

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(1)

「応用地質学」連載講座小委員会

連載をはじめに際して

本誌連載講座は昭和45年の創刊以降、山岳・都市トンネル分野各1テーマを原則に継続掲載してきた。この間、地質分野については、第5巻(昭和49年)に「地質学入門」¹⁾が連載された(文献2)は、それをもとに数次にわたり改訂出版された単行本である。第6巻(昭和50年)には「アーストンネルの地質調査」²⁾が4回にわたって連載されている。その後、「トンネル工事の計測入門」³⁾(第7巻)、「水平長尺ボーリング入門」⁴⁾(第9巻)、「山岳トンネル工事の事前調査」⁵⁾(第10巻)、「岩盤力学入門」⁶⁾(第16巻)、「山岳トンネルの新技术」⁷⁾(第18巻)などで、地質調査に関して触れてきているが、「地質学」を正面から取り上げた連載はここしばらくなかった。

本連載はトンネル技術者に役立つ「応用地質学入門」として前述の文献2)を新たに書き起こすものであり、企画・執筆は編集委員会の中に設けられた小委員会で行うこととした。小委員会のメンバーは、平成8年度に改訂された土木学会のトンネル工事標準示方書山岳工法編⁸⁾の計画部会(主査;大島)の地質分科会委員を中心に、若干名を追加したメンバーで構成した。

本講座は以下のような内容とし、10数回程度の連載で完結させることを考えている。

序編 トンネルと地質との関り

トンネルと地質とは切っても切れない関係にあることを具体的事例を混じえつつ紹介する。その中で、トンネル技術者たるもの、地質とまじめに取り組むべきことを強調する。

第I編 トンネル工事に必要となる基礎的地質学

トンネル工事に関りが深いと思われる地質学の基礎について紹介する。

岩石の性質、地質構造、地殻へ作用する各種の地質作用(営力)、日本の山地や平地の地質的特長、地形と地質との関係、地下水などで数章を構成させる。

「応用地質学」連載講座小委員会

委員長	大島 洋志	本誌編集委員会参与 国際航業(株)取締役技術センター長
委員	石橋 弘道	スイモンリサーチ(株)社長
〃	魚住 誠司	(株)ダイヤコンサルタント技術課長
〃	蝦名 克彦	日本鉄道建設公団設計技術室補佐
〃	神藤 健一	前田建設工業(株)技術研究所部長
〃	木谷日出男	(財)鉄道総合技術研究所主幹技師
〃	佐々木靖人	建設省土木研究所主任研究員
〃	萩原 博之	国際航業(株)地質課長
〃	長谷川昌弘	飛島建設(株)技術研究所長
〃	向山 栄	国際航業(株)技術センター主任技師
〃	水野 敏実	応用地質(株)斜面防災課長

(アイウエオ順)

第II編 トンネル工事と地質条件

トンネル工事を進めていくうえで、各作業に地質がどのように関るかについて詳述する。

例えば、爆破による在来工法のトンネル工事では、せん孔、爆破、換気、ずり出し、支保工建て込み、覆工といったサイクルをくり返しているが、それらの作業に地質がどのように関わっているかを中心に紹介する。

この他、①路線選定、②掘削方式、掘削工法、③切羽崩壊、④土圧・山はね現象、⑤地表沈下や陥没、⑥坑内湧水と漏水現象、⑦機械掘削(TBMを含む)、などと地質条件との関りについて紹介する。

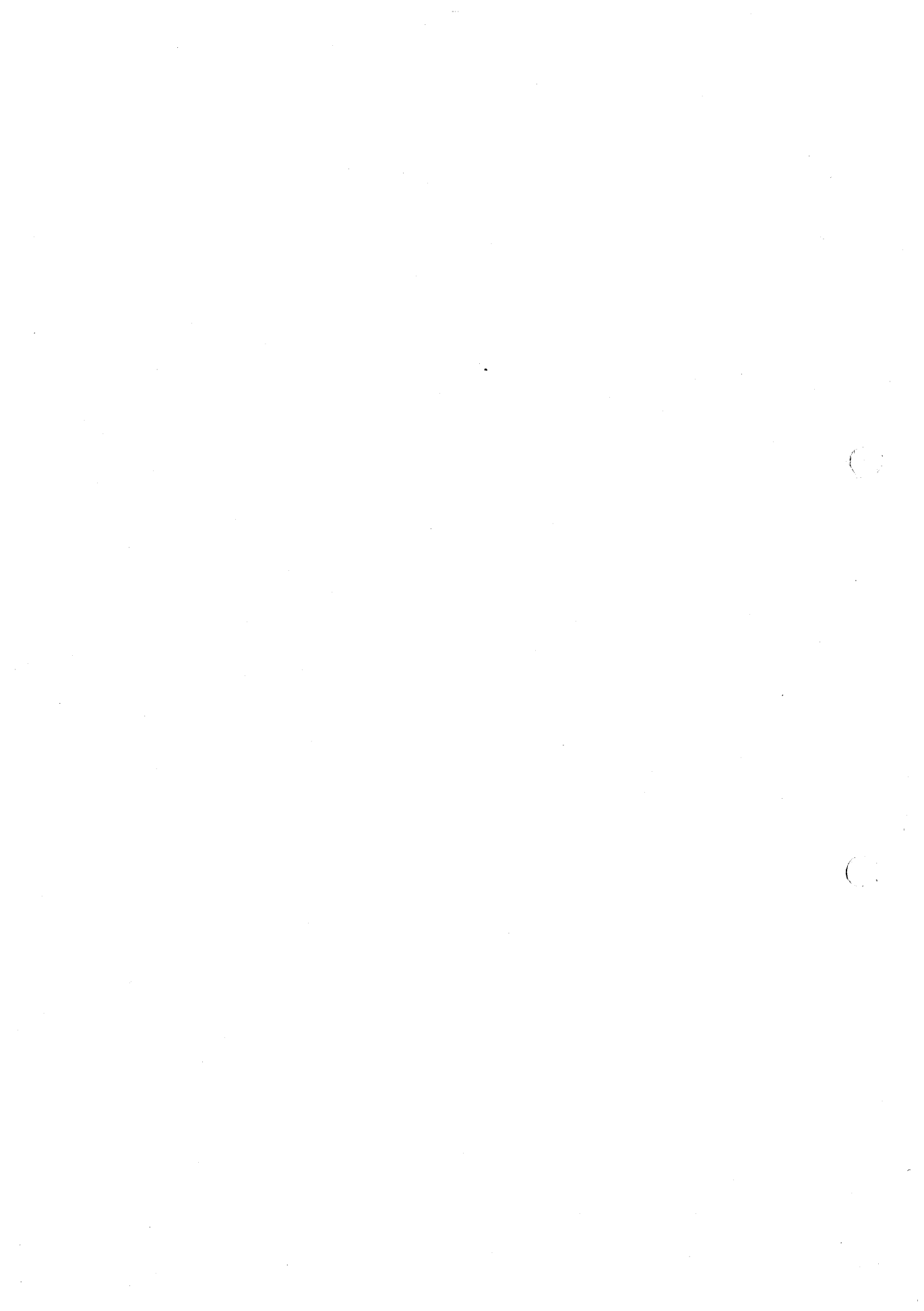
第III編 地質調査法

トンネル工事を進めていくうえで、必要となる地質情報を把握するための各種地質調査法について紹介する。

例えば、空中写真観察、地質踏査、ボーリング調査、物理探査、水文調査、坑内検層、岩石試験ならびに試験坑調査(施工中の坑内調査を含む)などについて、最新技術や事例などを意識しながら紹介する。

第IV編 工事を対象とした地質調査の進め方

トンネル工事は調査との関係で、①路線選定段階、②設計施工計画段階、③施工段階、④維持管理段階の4段階に区分できる。



ここでは、個々の調査段階でどのように調査を進めていったらよいかについて、工事の進捗状況との関係で紹介する。すなわち、個々の段階で調査をどのように計画し、実施し、その結果をどのように整理・判断し、その先へと進めて行ったらよいかについて、助言できることを考えた説明としたい。したがって、ここでは、それらの判断に必要な地山の評価法(岩盤区分法など)や、一般的に用いられている解析的手法などについても概説する。

序編 トンネルと地質との関り

1. 地質学とは、応用地質学とは

1-1 地質学とは

地質学とは、岩石などに記録されている長い地質記録(過去に地球に作用した営力や地球上に棲んでいた生物の痕跡、化石はその代表物)を探求することで、地球の起源、歴史、構造などを研究する地球科学である。

地質学とは地球の表層部とくに地殻を研究対象にする自然科学の一分野であり、地球の構成物質(岩石や鉱物)、地球の内部エネルギーにより生ずる内因的地質作用(地殻変動や火山活動など)、主として太陽エネルギーにより生ずる外因的地質作用(風化、浸食、運搬、堆積作用など)および生物の変遷と地球の歴史などを調べる学問、とも定義できる。

これらの定義に従えば、地球上の気圏、水圏、岩石圏(土、岩など地球を構成している物質)すべてが地質学研究の対象となりうる。したがって、他の多くの学問分野と深い関連をもっている。関連する分野ごとに、一般地質学、構造地質学、鉱物学、岩石学、古生物学、層序学、古地理学、地史学などに細分され、それぞれが天文学や物理学、化学、生物学などと深く関わっている。

しかしながら、地質学の根源にある主たる対象物は岩石と鉱物であり、それらに作用した力を含む生成過程を扱う学問であるとするのが常識的であろう。

1-2 応用地質学とは

地質学関連の学問の一つとして「応用地質学」がある。これは、地質学をベースにして資源の開発、自然保全・防災、表層地盤の利用などを多角的に扱おうとする地球科学の総称である。地質に関する理学と工学の境界領域をあずかる学問ということもできる。

わが国における応用地質学は、建設工事現場や鉱山資源調査現場などの実社会に従事した地質学専攻の技術者を中心に生まれ、発展してきたものである。その発展を支えたのは、主に各省庁や財閥系鉱山会社の大型工事や

開発業務であり、それらの業務に直轄的に従事した地質技術者たちの努力であった(今でこそ、地質コンサルタント業界の力に頼るところが大きいが、当時はそのような組織は成立し得なかった)。

このように、応用地質学とは、実社会に出た理学系の地質技術者が理学(この場合、地質学のほか地球物理学、地球化学、地理学などの地球科学)と工学(この場合、土木工学、資源工学、防災工学、農業土木学など)との橋渡しをすべく努力していくなかで、必然的に生まれた境界分野の実学であるといえる。したがって、応用地質学は、地質工学(Engineering Geology)と呼んだ方がよりなじみやすい学問と言えるかもしれない。ちなみに、この分野の発展に大きな貢献をされ、日本の地盤工学の祖ともいわれる渡邊貫(わたなべとほる)(1898~1974)は昭和10年に『地質工学』¹⁰⁾というタイトルの本を初版、同14年に増補版(約700ページの大作)にして出版している。また、日本応用地質学会はその英文名称を「Japan Society of Engineering Geology」と称している。

応用地質学の生い立ちは、鉱山資源の探査を主体とする資源地質学に端を発していると言っても過言ではない。昭和30年代半ばまでは、応用地質学=資源地質学であった。

一方、土质地質学、防災地質学、水理地質学という分野も個々に発展していた。わが国は「脆弱国土」と呼んでも決しておかしくないきわめて特殊な自然条件下にある。このような条件下で、道路や鉄道、ダムなどの建設工事とその維持管理、斜面災害などの防災、あるいは地下水開発などの社会資本整備を進めて行くと、地質の問題を避けては通れない。このような環境下で徐々に発展してきた分野である。

高度成長期に入った昭和40年代以降はどちらかといえばこれらの分野が応用地質学の柱となり、今日に至っている。さらに最近では地球規模の環境が問題にされるようになり、環境地質学も重要視されるようになってきた。

ちなみにトンネルに関してみれば、難工事となった丹那トンネル(1918~1934)で、地質の大切さを痛感した当時の鉄道省が前述した渡邊貫ら3名の地質専門家を採用した大正12(1923)年を、わが国トンネル地質技術の発足の年としてもよからう。その後、鉄道トンネル(例えば、清水、関門、北陸、青函、多くの新幹線トンネル、鍋立山、あるいは地下鉄を主とする都市トンネル)や道路トンネル(例えば、関門、恵那山、関越、安房、舞子、東京湾横断道路)などの工事を進めていく中でこの分野の学問も要請に応えつつ徐々に発展し、体系化されてきた。今後も同じような道を歩みつつ、発展させて行かねばならない応用地質学の一分野と考える。

なお、断るまでもないことであるが、本講座で扱おうとする応用地質学は、トンネルの計画・調査、建設などを介して積み上げてきた「トンネル地質工学」である。

2. トンネルと地質

2-1 トンネル一般

まず基本とすべき「トンネル」の定義や基礎的な用語の定義、ならびにトンネルの計画を行うに際しての基本的な事項について、以下に概説する。

2-1-1 トンネルの区分

土木学会のトンネル標準示方書⁹⁾(以下、本稿ではとくに断らない限りトンネル標準示方書と呼ぶ)ではトンネルを「内空断面に比べて延長の大きな地下構造物で、縦断勾配が15%以下のものをいう」とあっさり定義している。同じく土木学会のトンネル用語辞典¹¹⁾によれば「2点間の交通と物資輸送を目的に、その上部の地山を残して建設される地下の通路で、断面に比して軸方向に細長いもの」と定義している。しかし、同辞典ではさらにOECDトンネル会議(1970)の「トンネルとは計画された位置に所定の断面寸法をもって設けられた地下構造物で、その施工法は問わないが、仕上がり断面積が2m²以上のものとする」という定義も紹介している。ここではトンネルを次のように分類している。

(1) 使用目的による分類

- ①交通運輸用(鉄道、道路、地下鉄、地下駐車場、運河等)、②用水路用(上水道、水力発電用、灌漑用等)、③公益事業用(下水道、ガス、電力線、通信線、共同溝等)、④その他(地下貯蔵施設、地下工場、地域冷暖房用、地下街、地下発電所等)。

(2) 工事箇所による分類

- ①山岳トンネル、②都市トンネル、③水底トンネル。

(3) 掘削対象地山による分類

- ①岩石トンネル、②土砂トンネル。

(4) 施工法による分類

- ①山岳トンネル、②シールドトンネル、③開削トンネル、④沈埋トンネル、⑤その他。

(5) 仕上がり断面の大きさによる分類

- ①小断面2~10m²、②中断面10~30m²、③大断面30~100m²、④超大断面100m²以上。

2-1-2 トンネルに関する基礎的用語⁹⁾

トンネルでは、「地山」という用語をよく用いる。これはトンネル周辺の土砂ないし岩盤の総称である。したがって、地山条件といえ、トンネル周辺地山の地形・地質・水文条件を指し、地山分類といえ、掘削の難易や土圧などの地山挙動を評価できるように、地山を種々の物性により類型化して工学的に区分すること、あるいは

はしたものをいう。

トンネルの天端より上方の地山を土かぶりと呼ぶ。その地表部までの厚さを土かぶり厚と呼ぶ。

掘削工法とは、掘削断面の分割法によって決まる施工法をいい、全断面・上半工法などがある。分割掘削の場合の断面分割法を加背割と称す。また、トンネルは発破や機械、人力で掘削するがこのような掘削手段による分類を掘削方式と呼ぶ。

切羽とは、英語ではfaceというように、厳密にはトンネル掘削最先端の掘削面を指す。しかし、一般にはトンネル掘削作業を行っている最前線の20m程度の区域を指す用語として用いられている。

支保工とは、トンネル周辺地山の安定を確保して、変形を抑制するための手段であり構造物をいう。標準的な支保部材には吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工がある。

覆工とは、トンネルとして必要な形状または機能を与え、支保工を補完する手段・処置をいい、コンクリートが主たる部材となる。これらの支保工や覆工などを設計する際に考慮すべき土圧や水圧などの荷重を設計荷重と呼ぶ。

切羽の安定性や周辺環境の保全のため、主に地山条件の改善を図る目的で用いられる補助的または特殊な工法を補助工法と呼ぶ。

2-1-3 トンネルの計画に際しての基本

ごく常識的なことであるが、トンネル標準示方書では、以下のようなことをトンネル計画に際しての基本事項として掲げている。

- ① トンネルの機能、地山条件、立地条件、工事の安全、周辺環境に与える影響、経済性を考慮する。
- ② 線形はできるだけ直線または大きな半径の曲線を用い、地山条件が良好で、維持管理が容易で、周辺環境への影響が少ない位置にトンネルを設定する。
- ③ トンネルの坑口は安定した地山で、地形条件にも恵まれた位置に選定する。
- ④ 2本以上のトンネルを隣接させるとか、他の構造物に近接させる場合は相互の影響を検討のうえ位置を選定する。
- ⑤ 交通を目的としたトンネルでは極力緩勾配で、かつ自然流下による排水が可能な勾配を設定する。
- ⑥ 内空断面はその用途に応じた必要断面を包含し、トンネルの安全性や施工性も考慮し、合理的な形状寸法を決定する。

2-2 トンネル工事と地質との関り

土木工事と地質との関係は密接なものがある。なかでもトンネル工事の対象とするものは、地盤以外のなにも

のでもない。それほど、地盤とトンネル工事との関係は深い。本講座執筆者の多くが関係したトンネル標準方書が多数のページを地質調査に割いているが、このことは、「地質」がトンネル工事において無視できない大事なものであることの傍証でもある。

トンネル工事の流れは、①路線の選定(計画)、②設計・施工計画、③施工、④竣功後の維持管理の4段階に区分できる。以下に、地質との関りを各段階ごとにもう少し踏み込んで考えてみる。

2-2-1 路線の選定(計画)段階

この段階では、路線の平面・縦断形と同時に坑口位置を決める。トンネル路線の選定基準は、路線の目的、環境条件などで異なるが、一般的には、前後の取り付けの路線勾配がゆるく、できるだけ延長が短く、直線に近いことが理想とされている。しかし、その理想を追求するあまりに、トンネルを短くしようとして峠の下にトンネルを設け、断層破砕帯などの地質不良部に遭遇し難工事となったり、坑口部を余りに奥に追い込んだがために、偏圧を受けたり土砂崩壊や雪崩災害を被るなど維持管理の段階まで苦労を引きずっている例は枚挙にいとまがないほどである。

トンネルは一度つくったら簡単には改造できない構造物の一つであり、路線の決定には細心の注意を払うべきである。「急がば回れ」のことわざのごとく、真っ直ぐな路線よりも少し曲線を採用するだけで、諸問題を避けることができた例は多い。同時に縦断勾配をちょっと細工しただけで問題が解決できた例も多い。

したがって、条件が許す限り地質条件の最良のところを通せるように全般的な地質条件の把握が必要となる。他の理由で、別の路線にせざるを得なくなったときでも、選んだ路線が施工上、維持管理上、どのような地質条件にあるかがわかっておれば、覚悟を決めて工事に臨むことができる。それらの地質情報がない場合は、羅針盤もなく荒海に船出するのと同じであり、どのような苦難が待ちうけているかは全く予想できない。賢明な技術者なら採ってはならない選択である。

2-2-2 設計段階

この段階では、トンネルの内空断面、巻き厚、排水路などの形状・寸法を決めると同時に、これらに使用する材料(鋼材、セメント、骨材など)や発生土量などの数量を求め、工事費を推定する。これらの決定は地質条件の把握がなければ行えない。形状・寸法の決定には地圧や湧水量の推定が必要であるし、これ次第で材料および発生土量も変化する。同じ掘削断面であっても、地質により体積変化率や余掘り率が異なるので、発生土量も違ってくるのである。

2-2-3 施工計画段階

この段階では、掘削方式、掘削工法、削孔計画、ずり搬出計画、換気・配水計画、覆工方式などを決める。これらの決定には、どれ一つをとっても地質を無視して行えるものはない。

2-2-4 施工段階

この段階では、地質条件の当初予想が大幅に異なったため、設計・施工計画の変更を余儀なくされることがある。労務・資材・気象・地元事情などが、当初条件と異なっていたため、当初計画を変更せざるを得ないこともある。坑内湧水が予想以上に多いとか、予想もしなかった盤膨れ現象が発生したといった具合に、地質条件の予想が大幅に悪い方に異なっていたことによる設計変更の例は非常に多い。もちろん、予想が良い方に異なっていたということもあるはずだが、この場合は、発注者が発動しない限り、設計変更に連動する例は少ないようである。したがって、施工段階でも常に切羽前方の地質を事前調査資料と対比しつつ修正しながら作業を進める態度が要求される。

2-2-5 維持管理段階

この段階では、トンネル変状の有無を見守っていき、必要に応じ補修・改築・新築を行う作業となる。変状は、環境の変化、施工不良、材質劣化によることも多いが、設計・施工段階における地質条件の判断が結果論として甘かったことに起因するものもある。例えば、泥質岩のトンネルでは、施工中はほとんど問題なく掘削できたためインバート構造としなかったことに起因した変状が意外に多い^{12), 13)}ことは注目に値する。

以上の記述のように、計画、設計、施工、維持の各段階において、トンネルは地盤の性質、すなわち地盤の性状、地質構造、地下水の状況などに大きく左右される構造物であることが理解できたと思う。

したがって、トンネル技術者は、①地盤の性質について十分な知識を持つこと、②それを知るための地質調査がトンネル工事に必要不可欠のものであること、の2点を十分に理解しなければならない。

本連載講座では、この2点への理解を前提とし、トンネル技術者が知っていたら有利と思われる地質学の基礎およびトンネル工事における地質的諸問題ならびにそれを明らかにするための地質調査法などについて紹介する。さらに、トンネルを対象とした地質調査に従事する地質技術者にとっても大いに参考となることを意識しながらの執筆を心掛ける。

2-3 トンネル工事を困難にさせる不良地盤^{2), 14)~18)}

トンネルの施工を困難にする地質条件としては、①湧

水、②土圧、が両巨頭であろう。湧水が著しいと、切羽の自立を妨げたり、土砂を大量に流出して坑内を埋めたりするので、進行を著しく遅らせることになる。土圧が大きければ、支保工や覆工コンクリートが変状し、破壊するので、施工中はもとより、維持管理段階までも問題が残る。このほか、③地耐力不足、④坑口付近および偏地形・小さい土かぶり、⑤山はね、⑥高熱、⑦超硬岩、⑧酸欠などがトンネル工事を困難にさせる不良地盤といえることができる。

2-3-1 湧水

トンネルに湧水があると、坑内は実に様々な悪環境となる。トンネル工事を困難にする地質条件として『湧水』が『地圧』とともにあげられるのはそれだけの理由がある。難工した著名な山岳トンネルの多くは突発的な湧水に起因するものである。あまりに多すぎるので具体名は一つ挙げることは止める。

大量で高圧の湧水は切羽の崩壊を引き起こす。切羽付近の作業能率が著しく低下し、汚濁水処理施設の増設や排水溝設計の見直しも必要となる。減・湧水問題を引き起こす元凶ともなり、工期や工費に及ぼす影響は非常に大きい。トンネルにおける湧水はこれがない場合と比較すると進行への影響は無視できない。切羽に毎分 1m^3 以上の湧水があると、進行は確実に低下する。立坑では、数百 ℓ /分程度の水でも大きな支障となる。

少量の水でも、地質が軟弱であったり、均等粒の細砂であれば、路盤付近の泥濘化による脚部沈下や流砂が問題となり、開業後もトンネルの維持管理に苦労が伴う。高温水、冷水、酸性水などの湧水は、作業環境への影響はもちろん、将来の覆工材料の劣化などが問題となり、その面の検討も必要となる。

水の存在は竣工後も無視できない問題となる。とくに、都市部における地盤沈下対策の一貫としての揚水規制により、近年地下水位はかなり復元してきているが、地下水位が低い頃に作られた構造物を中心に思わぬ影響が出始めている。耐震性の面と併せれば、適正な地下水利用による適正な地下水位があってもいいのではと考えさせられる問題である。JRの新小平駅で発生した隆起災害¹⁷⁾や新幹線上野地下駅における隆起対策としての鉄インゴットの敷設¹⁸⁾や、地下鉄各線における坑内湧水の増加に伴う細砂の流入に伴う問題発生がその例としてあげられる。

トンネルは排水を前提とした設計・施工を通常としている。そのため、建設に伴う水利用への影響や地盤沈下などの環境問題が必然的に生じる。

地下水は水循環系を構成する一要素である。トンネル掘削による影響はまず地下水に現れ、次いで湧水や表流

水へと現れ、水利用などへの影響となって社会問題化することになる。東海道本線の丹那トンネル直上には湧水補償を勝ち取るのにいかに苦労したかをこまごまと記した地元建立の石碑がある¹⁹⁾。丹那隧道工事誌¹⁹⁾には別冊として『湧水編』がまとめられている。丹那トンネルが日本のトンネル技術発展への大貢献だけでなく、建設に伴う環境問題のルーツともいわれるゆえんはここにある。

トンネル掘削に伴う減・湧水問題は多数生じているが、補償問題であるだけにその記録を公の刊行物でみられるものは非常に少ない。それだけにその実態を文献から理解することは困難といえるが、筆者(大島)が体験した福岡・塩嶺両トンネル^{20)~22)}の例のように、工事工程そのものへ直接影響することが多く、決しておろそかに扱えない問題と認識しておくべきである。

2-3-2 土圧

トンネルを施工することで支保工や覆工に作用する荷重あるいは、トンネル掘削周辺地山の応力状態を総じて土圧と呼ぶ。地圧、盤圧と呼ぶこともある。

地山中に空間を開けると、地山の応力状態は崩れ、時間とともに新たな応力状態へと変化していく。再安定に要する時間は、硬質で小さな土かぶりの地山ほど短く、軟質で大きな土かぶりの地山ほど長くなる傾向にある。

トンネル掘削時には空間上部を支えないと、地山が崩落することがあるが、崩落は一般にある高さで落ち着く。これは地山のアーチ作用によるものである。したがって、掘削後支保工や覆工を施すと、上記の崩落高さを限度とする緩み土圧が作用すると考えてよい²³⁾。その大きさはスパン長と地質条件に応じて変わる。

トンネルの周辺地山の応力度が地山強度より大きい場合、塑性領域が形成され、塑性土圧が発生する。岩石の物理的あるいは化学的变化による膨張では膨張性土圧が発生する。このほか、縦断・横断的に不均等な土圧が生じることがあるが、これは偏土圧と呼ばれる。

これらの土圧現象のなかで、トンネル施工上もっとも嫌われるのは膨張性土圧である。戦前は東海道本線の丹那、羽越本線の折渡、戦後になって函館本線の神居²⁴⁾、北陸本線の頸城²⁵⁾、上越新幹線の中山²⁶⁾、大沢²⁷⁾、東北新幹線の岩手²⁸⁾などの鉄道トンネル、また道路トンネルでは東北自動車道の折爪²⁹⁾、上信越自動車道の日暮山³⁰⁾、長崎自動車道のうれしの³¹⁾、俵坂³²⁾などのトンネル名がこの種の難工トンネルとしてあげられよう。なかでも新潟県の北越北線(六日町〜犀潟間)にある鍋立山トンネル³³⁾では、土かぶりが100~200m程度の泥岩地山の背斜軸部分で異常な膨張性土圧現象が発生し、そのため、20年近い工期を要する難工事となったことは余りにも

有名な話である。このような異常な土圧現象を示す地質としては、第Ⅰ編や第Ⅱ編で紹介する予定であるが、グリーンタフ地域の泥岩や凝灰岩あるいは蛇紋岩あるいは著しく熱水変質作用で粘土化が進んだ地山などがあげられる。なお、熱水変質作用とはマグマの熱水液が周辺の母岩に与える変質作用のことをいい、生成する鉱物により、緑泥石化、プロピライト化、絹雲母化、珪化、炭酸塩化、明礬石化、カオリン化、沸石化などの作用に分類される³⁴⁾。

これらの土圧現象に対して、支保工や覆工が適合していれば問題はないが、不適当な場合は、落盤が起きたり(この点、白井らの記述³⁵⁾は参考となる)、内空断面の縮小、覆工の変形・剝離などの変状が発生し、供用段階になってその点検と維持のために多大な時間と経費を必要とすることとなる。

上述の膨張現象が、施工時に顕著に現れる場合はまだよいが、それほどの兆候もないのに、じわじわといつまでも安定しない膨張現象のために、供用段階で手当てを必要としているトンネル事例(文献12,13)などが少なからずあるのは注目に値する。

したがって、地形・地質調査などから竣功後も含めた土圧現象の姿を予想しておくことは非常に重要なことである。

2-3-3 地耐力不足

トンネルでは支保工や覆工コンクリートが足元にめり込む(脚部沈下)ことがある。これは支保工や覆工が背負った緩み土圧と自分自身の自重を支える脚部の地盤反力(地耐力)が不足する場合には見られる塑性変形現象である。

地耐力不足の地盤とは、本質的に強度の小さな粘土質地盤は当然として、本来十分な強度があっても、施工段階で応力解放やくり返し荷重あるいは水と触れることで脚部の地耐力が低下する地山もあるので注意を要する。例えば、風化花崗岩(マサ)とか泥岩、頁岩、凝灰岩などがこの性質を有している。

2-3-4 坑口付近および偏地地形・小さな土かぶり

北海道積丹半島の豊浜トンネル(1996年)や第2白糸トンネル(1997年)の坑口部岩盤崩壊事故の記憶は未だに鮮烈である。この例に待つまでもなく、坑口付近は縦断方向だけでなく横断的にも偏地地形となっていることが多く、土圧の不連続面であり、力学的な弱所といえる。加えて坑口付近は一般に風化が進み、ときには崖錐や地すべり地になっているなど地形・地質的に条件が悪い場所であることが多い。直接の坑口事故ではないが、1970年に発生した飯山線の高場山トンネル³⁶⁾の崩壊事故は信濃川に向かう偏地地形下にあるトンネルがトンネルを巻き込む地すべりによって引き起こされたものである。

したがって、坑口は、極力良好な条件のところを選定すべきである。そのうえで、偏圧や緩み土圧への配慮が必要となるし、大雨時や地震時の斜面の崩壊や落石、土石流、あるいは雪崩などにも考慮しなければならない。許せる範囲で坑口を極力前に出すのがよいとされるのは、ひとえにこの理由による(一昔前のトンネル設計では、工事費の縮減を図ってトンネル延長を極力短くすべく、坑口をできるだけ追い込むのがよいとされていたようである。なお、当時は多数の保守要員がいて、坑口部の崩壊があっても、直ぐに復旧できる体制にあった)。地質やトンネルのことをほとんど知らない計画屋が地形・地質や施工条件などを無視し、単に工事費を安くしようと、結果として工事費が少なくなること努力したばかりに、結果として工事費が高くなってしまったという結果に遭遇することがある。この種のことは技術者として恥ずべきことであり、あってはならないことである。

とはいえ諸般の事情で、地すべり地の石籠トンネル³⁷⁾や急崖地の坑口内に橋台を設けた深戸トンネル³⁸⁾の例などのように、最初から悪い場所と知りつつ、施工法で対処しなければならないケースが増えてきていることも事実である。

また、坑口付近も含めて土かぶりが小さい場合、掘削に伴う地盤変位が問題となる。極端な場合は地表面まで達する落盤事故となることもある(山陽新幹線稲光トンネル³⁹⁾の例など)。以前はこのような条件の場合、トンネルではなく切取斜面とする例が大半だったと考えられる。しかし、上部に建物や諸施設あるいは文化財などがあり、そこ以外に路線を選べないというケースが急増している。トンネル技術の向上という裏付けもあって、挑んでいるわけであるが、工事費もそれだけ高いわけで、難工事であることには違いない。

山岳トンネルでは通常の施工であれば、地質・地下水条件、施工条件などに左右されるが、20~30m程度以下の小土かぶりでは地盤沈下などの何らかの変位が地表に現れる。したがって、建造物や埋設管などがある場合、変位を抑制するための補助工法の採用が必須となる。

2-3-5 山はね

土かぶりが1,000m以上と非常に大きく、堅硬な岩盤の場合、切羽付近の主として側壁部の岩盤が振動と激しい音を伴った風とともに爆発的に粉碎し、岩片(ときには畳1枚ほどの大きさのもの)が飛散する現象を山はねと呼んでいる。一般に天端付近への応力集中が岩盤強度を超えたときに生ずるもので、日本では関東山地を貫く上越線の清水・新清水トンネル⁴⁰⁾、上越新幹線の大清水トンネル²⁷⁾や関越自動車道の関越トンネルなどで経験している。しかし、地山応力の方向次第では数百m規模

の通常の土かぶり部分でも発生することがある。甲府と秩父とを結ぶ雁坂トンネル⁴¹⁾では、土かぶり 200m 級の花崗岩部分で微弱ではあるが山はね現象が発生している。

この対策としては、掘削面を吹付けコンクリートで平滑にして応力を分散させる、冷水を散布して応力を熱エネルギーとして減少させる、または H 型鋼を建て込み、飛散する岩片を矢板で受ける、などが採られている。また、最近では、切羽前方で発生する微小な破砕音(AE)を捉えて山はね対策の事前資料とする試みが採用されている。

今後、脊梁山脈を貫通するトンネルが多くなることが予想されるが、これに伴い山はね現象を多くの現場で経験することになる可能性がある。

2-3-6 高熱

岩盤が高熱のために難工事となる例もある。有名なものは関西電力黒部川水力開発の黒部第三ダム建設に伴う「高熱トンネル」であろう。古くは伊東線の宇佐美トンネルの例(文献 10)の 235p にその記述あり)、最近では安房トンネル⁴²⁾中ノ湯方の施工が有名である。なお、同トンネルの坑口近くのみ明かり工事中に 1995 年に発生した水蒸気爆発で作業員数名が亡くなられた痛ましい災害も高熱であるがゆえに起きたものといえる。

地温は、地表面下約 25m で季節、時間による温度変化の影響を受けずに一定となる。この一定温度となるゾーンは常温帯と呼ばれる。これより深くなると、地温は増温率(1°C増加するに要する深さで、一般に 30~40m)に従って上昇する。ことにわが国は世界に冠たる火山国で温泉も随所に分布していることから、地温の上昇勾配が大きい(増温率が小さな値となる)ことが多い。

岩盤が高熱であるとか、高温の湧水があれば、発破工法(耐高熱火薬などの使用)、覆工の方法(セメントの選定、養生のあり方など)、作業の安全性や有毒ガスに対する検討などが必要となるので、火山地帯、温泉地帯のトンネルでは地温がどの程度になるかを把握しておく必要がある。

2-3-7 超硬岩

山岳トンネルでは、地山があまりに硬すぎると削孔速度が遅くなり、薬量が増え、大塊のずりとなりやすく、余掘りが多くなるといったマイナス面がある。それでも地質不良の苦労と硬質地山での苦労、どちらを選ぶかといえば、硬質地山の方を選ぶ技術者が多いと考える。

ところが、この種の岩盤が人家に近接した坑口付近にあると、発破による振動や騒音が苦情の元となり、発破工法が使えず、TBM 工法⁴³⁾や割岩工法⁴⁴⁾など非常に工事費がかさむ工法を選択せざるを得なくなることがあり、好ましくない地質条件となってしまう。背後に花崗岩か

らなる六甲山地を抱える阪神地区の諸都市では、この種の問題で苦労している事例が少なからずある。

2-3-8 酸素欠乏地山など⁴⁵⁾

酸素欠乏いわゆる酸欠は、一般に圧気をかけて行うニューマティックケーソンや圧気シールドを使用する工事の問題となることが多い。切羽付近に高圧の空気を送り込むと、空気の圧力差によって地山中に空気の流れが生じる。その際に空気中の酸素が地山中で消費され、酸素濃度の薄い空気になってしまったものが、近傍の古井戸や地表に漏れだし、その空気を吸うことで事故につながる可能性がある。地山中を空気が流れる機構は、上記のほか、大気圧の変動や地下水位の上昇などで説明できる。

地盤中で酸素が消費される機構には、①水位の下がった地層中の鉄塩類が空気に触れることで酸化鉄を生ずる際に酸素が欠乏、②同様な地層は還元状態になっており、真空状態か極度に酸素が少ない地層となる、③この種の地層に圧気の空気が入り、酸化により酸素を取られ酸欠空気となる、④バクテリア等分解作用で空気中の酸素を消費するか、地層中にメタンや炭酸ガスが発生することで酸素を稀釈する、といったものが考えられる。

2-4 山岳トンネルにおける地質調査の特殊性²⁾

山岳トンネルと地質調査との関りを考えた場合、①地質構造が複雑で、土かぶりが厚く、延長が線状に長く、特殊地山が存在するため、②事前の調査には経費や時間や技術面における事前調査面の限界があり、③そのため得られる情報は不足気味で、かつ情報の信頼度にも限界がある、ということ認識しておく必要がある。

したがって地質調査の実施に際しては、この限界を念頭におきつつ、人為的な要素にもとづく調査の欠点をなるべく少なくするように、以下の点に注意する必要がある。

- ・事前の地質調査が不十分のままトンネル工事に着手していないか?
- ・調査の目的と調査手法が有効に適合しているか?
- ・技術的配慮の不足、事業への理解の欠如といった人為的要素にもとづく漏れはないか?

また、地質調査の信頼度に関しては、調査の予測と実際とがあまりにも違うという不満の声を聞くことがある。これは、次の 2 点に起因するものであり、トンネル技術者と地質技術者相互の理解を深めることしか、解決の道はない。

- ① 地質調査技術の限界に対する不認識にもとづくもの
 - ・設計・施工担当者と地質調査担当者の相互理解が大切である。そのためには両者とも地質工学およびトンネル工学の素養を少しでも身につけお互い

を理解しようとする気持ちを持つことが大切。

② 不十分な調査のまま着工というような人為的な要素にもとづくもの

・調査を発注する側の地質調査の必要性や効果的な実施要領に対する理解が必要となる。

ともすれば、施工技術を過信して、トンネルの計画段階で綿密な路線選定を行わず、がむしゃらに直線的な路線を採用しているきらいがないだろうか。しかも、決定した路線の地質情報が少ないため、オーバーな表現であるが一寸先もわからないまま、施工業者に一任されるといった事例も未だなくなるとはいえない。順調なときは問題ないが、当初準備した設備の大幅な変更を余儀なくされるような事態になると、その被害は大きく、大幅な建設費の増額を必要とするようになる。

難工事であったトンネル工事が竣功した際に工事関係者から一様に聞かされる反省の弁として下記の①、②のようなものがある。「小を惜しんで大を失う」ことがないように、必要な調査は重点的・効果的に行うといった姿勢が地質調査には望まれる。

① 地質条件の良否によって、建設工事費がいかにかに左右されるか、さらに、計画段階の地質調査に全力を投入することが経済的效果にいかにつながるかを、お金を預かる事務方にかに説得できるかが重要である。

② 地質調査の費用をほんの少し増額しただけで、その増額よりも大きい建設費の削減につながる。

今でも、地質調査自身の精度が悪くて、やっても大差ないから調査はやらないという考えの人にまれに出くわすことがある。しかし、トンネル技術者を志す人は、トンネルの相手は地山であり、地山の性質を知ることがトンネルを上手に施工するすべての基本であると信じて欲しい。そのうえで、十分な地質調査を行い、これから挑もうとする地山を十分に把握したうえで、その情報を設計や施工に適切に反映させて欲しい。すなわち、自らが地質に興味を示し、身近なものとする努力をして欲しい。そのことが、トンネル技術者となる近道と考える。

2-5 標語にみるトンネルと地質との関り

トンネル工学は現場における実績の積み上げをベースに経験則を打ち立て、後追的に理論付けをするという形で体系化してきた学問であるといっても決して過言とはなるまい。先人は自分が教わり、経験してきた大切な事項をいろいろな形で後輩達に引き継いできた。筆者(大島)が若いころ聞かされた「トンネル十訓」もその一つといえる。

以下は足立貞嘉による十訓である⁴⁹⁾。そのうち、地質に関りの深いものについて解説を加える。

1. 地相は人相、山の性状

人間に人相や表情があり、それによってある程度人間の性格や体質がわかるように、山にも山の相があって、これをよく観察すれば山の性質がわかる。掘ってみなければわからぬという前にまず地相より山の性質を慎重に診断する必要性を説いたものである。現在のように地質調査技術が発達していなかった当時としては非常に大切なことであった。

2. 山のゆるみは気のゆるみ

トンネルを掘削すれば、山は必ず緩んでくるものであるが、その緩みを最小限にとどめるのがトンネル掘削の重大なポイントである。トンネル掘削中は事故の要素が常に隠されており、張り詰めた神経で、わずかな変化も見逃さぬよう頻繁な巡回と点検が必要である。山の緩みは最初は小石程度のものから加速度的に大きな緩みに発展することを考えなければならない。

3. 石硬くとも山堅いとは限らない。

例え岩石そのものが硬くとも、山全体が堅硬であるとは必ずしもいえないもので、常に成層状態、割れ目の頻度、湧水、風化の状態など、全般にわたって調査したうえで判断する必要性を説いたもの。ボーリングコアそのものの状態や、付近の露頭から見て山全体が硬いと考え、掘削中思わぬ苦勞をすることがあることを教えたものである。

4. 流汗りんりん崩壊の兆し

トンネル掘削でもっとも注意しなければならないのは湧水で、水がなければ多少の破碎はそれほど苦にならない。地質が一度水を含むと始末に終えなくなるものである。掘削した当時水気がなかったのに時間の経過とともに水が廻ってきて、炎天下で作業をする人が汗みどろになるように岩肌がテラテラになってくることもある。そういう場合割れ目が多かったり風化の度合いが進んでいると急激にバランスを失って崩壊する危険があると教えたものである。

5. 埃立たぬに水ないものか

これも湧水に対する注意である。目立った水がないからといって山に水がないものと即断してはならない。切羽に埃が立たないということはすなわち水があると考えるべきで、細心の注意を払うべきことを教えている。例えば、ウォーターポケットからの湧水は、たいてい予告なしに大量の水が土砂とともに噴出してきて人命を失う事故となりやすい。山はどこに水を抱いているかわからないものと考え、謙虚に対処すべきである。

6. 肩のしまりは身のしまり

7. 天道掘らずに中割するな

8. 鼻バリは腰紐キチンとしめたらシャンとする

9. 遣らずは両方

10. 荷を担ったら足元に気をつけよ

次は、斎藤徹による十訓である⁴⁹⁾。鋼製支保工時代に合うように、足立の十訓を改めたものである(○付き数字のものが新)。同様に、地質に関りの深いものについて解説を加える。

1. 地相は人相、山の性状
- ②. 中心狂えば屋台は揺らく
3. 山のゆるみは気のゆるみ
- ④. 余掘りはぜい肉、国の損

地山に密着してコンクリートを打設すれば応力的に覆工厚はかなり薄くできるはずである。しかし矢板の裏、クラウン付近など完全にコンクリートを充填できない箇所があるので、施工上の必要性から設計巻き厚として30, 45, 60cmなどの値が用いられている。

一方、現場の状態は平均しても20~30cm厚ぐらい余分のコンクリートを打設している。これは設計上全く不必要なコンクリートであり、金額にすればmあたり数万円に相当するもったいないものである。掘削中の測量、穿孔、爆薬量などにより余掘りを減らす努力の必要性を説いたもの。

5. 石硬くとも山堅いとは限らない
- ⑥. おさえなき支保工、葦のごとし

鋼製支保工を1基入れればそれなりの費用がかかる。人命尊重の見地から、これを惜しんではならないが、このような高価なものを入れるからには、支保工をくさびで十分に締め上げることによって、十分にその効果をあげさせねばならない。例えば、単線トンネルで125Hの支保工を1.2m間隔で建て込んだときに、支えうる地山の高さは5m程度とされる。それはアーチ部を完全にブロッキングした場合であって、締め上げの箇所が少ないと、2~3m程度の地山の荷重で支保工は変形・破壊してしまう。

7. 埃立たぬに水ないものか
- ⑧. わが家大切天井なおせ
- ⑨. 機械の故障で百人遊ぶ
- ⑩. 坑内軌道は鉄道と思え

脱線転覆などによるロスを考えると坑内軌道といえども一般営業線の鉄道と同様な厳格な基準で保守することが、作業能率の向上と経済性に直結する。泥質地山あるいは大量の湧水がある場合、路盤が泥濘化したり、冠水することで、坑内軌道が悪化しやすくなる。この面への配慮の大切さを説いたものである。

これらの外にも、標語とまではいかないまでも、経験

則的な教えはいろいろある。筆者(大島)自身の経験も踏まえつつ思いつくままに並べてみる。

トンネルセンターを歩こう⁴⁷⁾; トンネルの計画や施工に際し、路線周辺の状況を把握しておくことは大切である。工事の責任者たるもの、全域把握はともかくとして、せめてセンター位は歩いてその性質を知っておくべきである。高橋彦治氏の言葉。

ボーリング調査はトンネル計画断面外に; 切羽付近に既往のボーリング孔がでてくると、それが水ミチになったりして、施工に悪影響を与えることが多い。したがって、調査位置は断面の外側にせめて5m程度は外しておきたいものである。また、水位観測孔として残す場合はともかくとして、調査後は後々悪影響を与えないようにしっかりと跡埋めしておく必要がある。

クレストは極力行政界に; 坑内に拌み勾配の変更点を設ける場合は、水利権問題を意識し、極力行政界に設けるのがよい。

2本目は既設トンネルにつかず離れず、できれば下流側・上位に; 既設トンネルに接近して新設のトンネルを計画する場合は、標記のようにすれば、既設トンネルの存在の恩恵に浴することができる。

膨れる山に水は少ない; 異常な膨張性のある地山では湧水の心配は少ない傾向にある。逆に、湧水の多い山では膨張性地圧で苦勞することは少ない。

地山速度が試料速度より早ければ膨張の可能性; 膨張性の地質の場合、調査ボーリングで得られたコアそのものが、応力解放により緩んでしまい、標記のような現象となることが多い。標記の現象は、コアにディスクングやリラクゼーションなどがみられる場合にも要注意のシグナルと考えた方が安全である。

C地山はインバート構造に; 2-2の維持管理段階の項で説明済みであるが、C地山(土質における、粘着力Cと内部摩擦角 ϕ の記号からきた略称で、粘着力項が顕著な粘土質地山をC地山、砂質地山を ϕ 地山と呼ぶことがある)は掘削段階では目立たなくとも、緩やかな膨張現象を示すことがある^{12), 13)}。したがって、第三紀以新のC地山部分では、施工段階の膨張性の有無に関らずインバート構造としておくのが無難である。

坑内排水に土砂が混じれば要注意; 標記の現象がみられる場合、地下水浸食や走行車両による異常間隙水圧の上昇などに起因して覆工背面や路盤下部に空洞が発生している可能性があり、トンネル変状の発展に注意する必要がある。

まだまだ、いろいろな経験則を並べ立てることができると、それらは各編、各章で個々に紹介することとし、

序編を結ぶ。

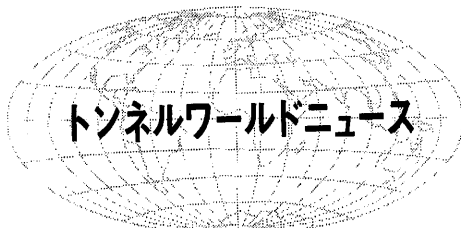
(文責：大島洋志・国際航業(株)取締役技術センター長)

参 考 文 献

- 1) 池田和彦・大島洋志：地質学入門，トンネルと地下，Vol.5, No.7~12, 1974.7~12.
- 2) 池田和彦・大島洋志：わかりやすい土木地質学入門(改訂8版)，土木工学社，1997.3。(文献1)をベースに単行本化したもの。
- 3) 斎藤迪孝：アーストンネルの地質調査，トンネルと地下，Vol.6, No.6~9, 1975.6~9.
- 4) 中根博・ほか：トンネル工事の計測入門，トンネルと地下，Vol.7, No.8~12, 1976.8~12
- 5) 前田憲一・蝦名克彦：水平長尺ボーリング入門，トンネルと地下，Vol.9, No.8~12, 1978.8~12
- 6) 石崎昭義・ほか：山岳トンネルの事前調査，トンネルと地下，Vol.10, No.1~7, 1979.1~10.
- 7) 今田徹：岩盤力学入門，トンネルと地下，Vol.16, No.2~Vol.17, No.1, 1985.2~1986.1
- 8) 長友成樹監修：山岳トンネルの新技術，トンネルと地下，Vol.18, No.3~Vol.21, No.5, 1987.3~1990.5.
- 9) 土木学会トンネル工学委員会：トンネル標準示方書「山岳工法編」・同解説，土木学会，1996.5.
- 10) 渡邊 貫：地質工学(増補版)，古今書院，1936.
- 11) 土木学会トンネル工学委員会：トンネル用語辞典，土木学会トンネル・ライブラリー第3号，1987.3
- 12) 片寄紀雄・興石逸樹・松本武海：緩やかな膨圧現象と付き合って30年，JR信越本線塚山トンネル，トンネルと地下，Vol.28, No. 3, 1997.3.
- 13) 平井公康・鈴木照行・秋月亨・八重樫栄：供用中のNATMトンネルの盤ぶくれ，一般県道宮古港線小山田トンネル，トンネルと地下，Vol.26, No.12, 1995.12.
- 14) 宮崎政三・高橋彦治：湧水と地圧・山海堂，1963.
- 15) 大島洋志：地盤工学者のための地形・地質情報の活用入門12. 地形地質情報の活用例(その6)地下掘削工事と地下水環境問題，土と基礎，Vol.44, No.7, 1996.7.
- 16) 大島洋志：トンネル掘削に伴う地下水問題，応用地質，Vol.38, No.5, 1997.12.
- 17) 金子静夫・井上寿男・新堀敏彦：武蔵野線小平災害復旧工事，トンネルと地下，Vol.23, No.8, 1992.8.
- 18) 片寄紀雄：復元する被圧地下水から地下駅を守る，東北新幹線上野地下駅，トンネルと地下，Vol.27, No.10, 1996.10.
- 19) 鉄道省熱海建設事務所：丹那隧道工事誌，1936.
- 20) 大島洋志：毎分23tの異常湧水に挑む，山陽新幹線福岡トンネル東工区，トンネルと地下，Vol.4, No.8, 1973.8.
- 21) 黒木正典：トンネル施工と湧水問題，土木学会誌，Vol. 60, No.2, 1975.2.
- 22) 早川敏彦・原繁之・西川直輝：地下水盆下のトンネル施工と水文調査，中央本線塩嶺トンネル，トンネルと地下，Vol. 11, No.2, 1980.2.
- 23) 坂本貞雄：トンネル鋼アーチ支保工，山海堂，1964.1.
- 24) 小竹豊・ほか：蛇紋岩トンネルの特性とその設計施工，国鉄神居トンネル例，土木学会誌，1936.
- 25) 国鉄岐阜工務局：北陸本線糸魚川・直江津間線路増設工事誌，1969.10.
- 26) 東京新幹線工務局：上越新幹線工事誌(大宮・水上間)，日本鉄道建設公団，1983.10.
- 27) 新潟新幹線工務局：上越新幹線工事誌(水上・新潟間)，日本鉄道建設公団，1983.3.
- 28) 奥村皓一・和地強・怡土一美：SFRC覆工で収束しない変位に対抗，東北新幹線岩手トンネル女鹿工区，トンネルと地下，Vol.29, No.5, 1995.5.
- 29) 北林哲・井出節雄：脆弱な凝灰岩地山におけるNATM，東北自動車道八戸線折爪トンネル，トンネルと地下，Vol.13, No.8, 1982.8.
- 30) 中村良明・羽田勝・木曾伸一：超膨張性泥岩を克服，上信越自動車道日暮山トンネル，トンネルと地下，Vol.24, No.1, 1993.1.
- 31) 佐藤憲司・江崎頌三郎・小田部淳：温泉近傍にトンネルを掘る，九州縦貫自動車道うれしのトンネル，トンネルと地下，Vol.20, No.7, 1989.7.
- 32) 佐藤憲司・坂元信幸：自立性の悪い地山に挑む，九州縦貫自動車道俵坂トンネル，トンネルと地下，Vol.19, No.10, 1988.10.
- 33) 柴田剛志・大沢光男：19年ぶりに導坑貫通の鉄道トンネル，北越北線鍋立山トンネル，トンネルと地下，Vol.24, No.1, 1993.1.
- 34) 龍本清：鉱床学，白亜書房，1964.1.
- 35) 白井慶治・那須誠：二次覆工の先端部付近は崩壊の要注意箇所，トンネルと地下，Vol.28, No.12, 1997.12.
- 36) 久保村圭助・山田剛二：飯山線高場山トンネルの地すべりによる崩壊，土木学会誌，Vol.55, No.7, 1970.7.
- 37) 井上勝人・香月廣志・田中康弘：地すべり地形の坑口を垂直縫地工法で施工，松山自動車道石鎚トンネル，トンネルと地下，Vol.24, No.9, 1993.9.
- 38) 真柄鎮・大木俊之・西尾進・吉永幸生：急斜面の坑口内に橋台を造る，東北自動車道深戸トンネル，トンネルと地下，Vol.26, No.6, 1995.6.
- 39) 大島洋志：建設工事における風化・変質作用の取扱い方 9. 風化・変質作用とトンネル工事の問題点，土と基礎，Vol.41, No.2, 1993.2.
- 40) 国鉄信濃川工務局：新清水ずい道工事誌，日本国有鉄道，1968.10.
- 41) 望月常好・穂刈利夫・斎藤義信・桑田俊男：土かぶり200mで山はね現象に遭遇，国道140号線雁坂トンネル，トンネルと地下，Vol.21, No.9, 1990.9.
- 42) 松下敏郎：高熱帯と高水圧低速度帯を克服して調査坑が貫通，一般国道158号線安房トンネル，トンネルと地下，Vol.23, No.3, 1992.3.
- 43) 蟹沢康人・河野英雄・鳥居聡：市街地硬岩部をTBMで掘削，本四連絡道舞子トンネル，トンネルと地下，Vol.23, No.7, 1992.7.
- 44) 中川浩二・庄野豊・石井吉宏・仙石博嗣：割岩工法で環境問題を克服，山陽自動車道増位山トンネル，トンネルと地下，Vol.22, No.9, 1991.9.
- 45) トンネル技術協会安全環境委員会：トンネル工事と環境保全対策，トンネル技術協会，1985.7.
- 46) 堀内義朗：トンネル十訓，鉄道土木，1968, 10, 11.
- 47) 高橋彦治：センターを歩こう(随想)，トンネルと地下，Vol.5, No.4.

※執筆に際しては，上記以外に下記の本なども参考とした。

- 48) 宮崎政三・高橋彦治：土木地質学，共立出版株式会社，1970.4.
- 49) K.チェッキー原著 島田隆夫訳：トンネル工学，理論・設計・施工，鹿島出版会，1971.11.
- 50) H.カスナー原著 金原弘訳：トンネルの力学，森北出版(株)，1974.4.



(社) 日本トンネル技術協会
国際委員会国内広報ワーキング

トロント空港アクセス

トロントの Lester B Pearson 国際空港で、大規模アクセス改良プロジェクトの建設工事が1998年11月に開始される予定であった。工事には、使用中の滑走路と3本の誘導路直下の延長約550mの二径間ボックストンネル工事が含まれている。トンネルは、サービス用の車両や貨物トラック、バスなどのための4車線道路となる。トンネルの開削工事は1999年の夏に3か月間の滑走路閉鎖を必要とするため、ビジネスや観光などの利用客に支障が生じるであろう。

掘削は、幅26m、深さ8mとなり、完成後は滑走路の直下わずか1.5mの土かぶりとなる。採用された設計および工事方法は、一度に一つの運行エリアを閉鎖し、次のエリアを開削する前に復旧させる方法となっている。

設計エンジニアリングのJVは、オタワの Morrison Hershfield 社が指揮をとり、ボストンの Sverdrup Civil 社とトロントにある同社の関連会社で構成されている。約1.5億円(130万US\$, 1US\$=115円)の空港プロジェクト設計業務が1997年から始まり、2000年の完成予定である。トンネル工事費は、45.54億円(3,960万US\$)である。トンネルの換気はジェットファンで行う。(T & T'98.12. 担当: 大津敏郎)

観光客を増加させるためにアラスカでトンネル改良

南アラスカで北アメリカ最長の道路トンネルが鉄道トンネルの改築によって完成する予定である。Whittier 村とアンカレッジを結ぶ75kmのルートのうちMaynard山の下をアラスカ鉄道運営の4kmのトンネルが通過する。

トンネル改築の設計では、道路交通と鉄道で一つのトンネルを共有する構造で鉄道線路を敷設した1車線の道路がつくられ、また、貨車による「ピギーバック」システムも取り入れることとしている。

D. B. O.(design-build-operate contract)契約では、Hatch Mott MacDonald(アメリカのHatch Associate社とイギリスのMott MacDonald社による北アメリカにおける永続的なJV)・Kiewit Construction 社JVが様々な地下「空間」を施工する予定である。これらの空間は、トンネル火災時に55人を収容できる耐火性の部屋と8か所の待避所を含み、換気装置と凍結防止システ

ムを取り付ける。換気は両坑口に取り付けられるジェットファンによる。Kiewit社は、輸送量の少ない冬期に予定されている鉄道営業休止時に線路を敷設する。

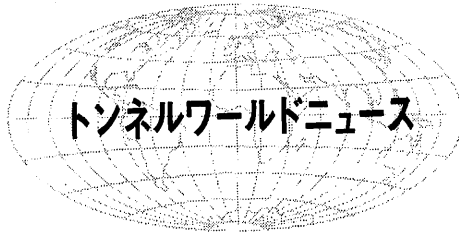
このトンネルの改良によってWhittierの港からの貨物輸送と同時に観光客を増加させることを見込んでいる。夏期の重要性を考えて、もしトンネルが2000年5月1日までに完成しなければ、JVは延滞金を支払わなければならない。(T & T'98.12. 担当: 事務局)

Øresund 横断プロジェクトの工期は変更せず

No.13の沈埋函の沈没事故(トンネルと地下、トンネルワールドニュース、1999年1月、p.71参照)が発生したが、共同企業体Øresund Tunnel Constructors(ØTC)と発注者Øresundskonsortietの両者は、今回の事故によりØresund Fixed Linkプロジェクトの全体工期が影響を受けることはないと言っている。沈没事故によりDrogden海峡トンネルの工事は中止したが、スウェーデンのMalmöへの連絡道の開通日については、まだ公表していないが、その予定日は変更しないようだ。

Øresundskonsortietは、目にみえるようなきめの細かい詳細な報告を公表している。それによると、鋭い亀裂音が発生し、それにつづき低くもった音が1分間続いた後、函体に海水が流入し、これが約2時間続いた。函体に海水が流入したときに、函体は深さ20mの浚渫した溝に沈没作業中であった。そのときに函体は、溝の底から1.5mの上であり、No.12の函体から3m離れた位置にあった。主な損傷は電気系統やパラスト(重量制御)システムで、本体は、損傷が軽微なため、トンネルの本設構造物として使用可能であった。事故の3時間後、ダイバーが調査を行いビデオを撮影している。1週間たわずに復旧計画を策定し、オランダとデンマークの24人のダイバーにより6週間に及ぶバルクヘッドその他の修復作業を行い、OTCは、重量57,000t、全長176mの函体を浮上させることに成功した。トンネルを据え付ける砂利の基盤を補修するために、函体を約200m離れた仮設の基盤まで移動させた。そうすることで、ダイバーが基盤を修復できるようになった。No.13、14の函体は10月9日に据え付けられた。復旧作業に要した費用は保険によって賄われた。Drogden海峡トンネルは、コペンハーゲン近くの海岸から全長3.5kmのうち2.1kmができた。

事故調査によると、仮設のコンクリートの支えが水圧により破損し、3つあるバルクヘッドの1つが浸水したことで損傷が広がり、ついには、大量の海水が函体の4つの室内すべてに流入することとなった。函体を製作する際の人為的なミスである。この状況のなかで、トンネル坑口はすでに完成している。坑口部に接続するNo.15以降の函体の据え付け作業は、10月中旬に始まる予定であった。デンマーク陸上部の工事もすでに完成している。(T & T'98.12. 担当: 長谷川雅彦)



(社) 日本トンネル技術協会
国際委員会国内広報ワーキング

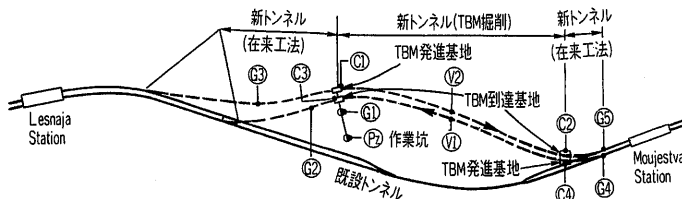
サンクトペテルブルグの水没区間迂回トンネル

Impregilo 社 (75%) と NCC 社 (25%) の IGL-NCC Contractors JV は、Metrostroy 社の下請として地下鉄迂回トンネルプロジェクトに来年着手する。

Metrostroy 社はロシアのサンクトペテルブルグ市公社の工事を施工する総合請負者である。工事は市営地下鉄 1 号線の水没区間に代替えすべく、新たな単線並列トンネルを建設することが主なものである(図-1)。プロジェクトは契約額 \$ 112.5 万(約 1.47 億円, 1 \$ = 120 円)で、工期 2 年を要するだろう。

1 号線は北東市街地および南西市街地を市中心と結ぶ、Kirovsko と Viborgskaja 間を運行する。Lesnaja 駅と Ploshad Moujestva 駅の区間では、路線は緩い、帯水性のいろいろな堆積物で埋っている Neva River という埋積谷を通過する。

トンネルの建設中(1973 年に着手し、1975 年に完成した)に、水と泥の流入が重大な地表面沈下を引き起こした。問題はそのときは解決されたが、1995 年に同様な



1 号線新トンネル詳細図

流入がトンネル構造の変形という結果を引き起こした。

危険な状況を勘案して、地下鉄交通は 2 駅間でストップした。さらなる地表面沈下や流入の危険を最小限にし、トンネル崩壊を避けるためにトンネルを水没させた。

1 号線の崩壊は毎日そのルートを利用する 5 万人の通勤客に深刻な不便をもたらしている。2 駅間を往復するバスは、市へのかかりな負担とともに交通混雑をもたらしている。自治体と St Petersburg Metro は、今やできるだけ早く地下鉄路線を再開せざるを得ないという問題に直面しており、そのプロジェクトは連邦政府から高い優先順位を受けている。

Neva 谷を横断する中央区間においては、単線並列トンネルを TBM により掘削することが決定された。この区間と既設トンネルとを結び、そこから使用中のトンネルに接続する区間については在来工法が選択された。建設工事用立坑が「谷」の西側に位置することになる。

新トンネルはそれぞれ、延長 1 km、径が 6 m で、1 台のシールド機で 2 本のトンネルを掘削する。1 本目を掘削した後、2 本目のトンネルのために分解され、再び組み立てられる。1 次覆工はコンクリートセグメントである。

イタリアの Geodata Consultants 社が新区間の設計を行っており、一方、IGL-NCC Contractors JV が地質調査を別契約で実施している。NCC International の筆頭副社長 Nils-Erik Blomström 氏は「私どもはこの契約を獲得できて大変うれしい。決定的な要因は明らかに NCC 社と Impregilo 社の持っている技術的ノウハウだった。」と言っている。

このプロジェクトはイタリアの最大の請負業者 Impregilo 社とスウェーデンで 2 番目に大きい請負業者でスカンジナビアでもっとも高額の完成工事高を自認している NCC 社 2 社の合意による初めての大きな成果である。

(T&T'99.1. 担当: 菊池一成)

シールドトンネルの新技術

シールドトンネルの新技術研究会

B 5 判・285 頁 本体価格 4,660 円 (〒 380 円)

株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16 メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(2)

第I編 トンネル工事に必要となる基礎的地質学(1)

「応用地質学」連載講座小委員会

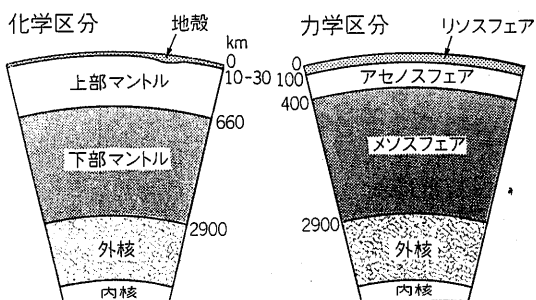
3. 地球の構造

地球は南北方向に軸を有する半径 6,400km の回転だ円状の剛体である。その内部における物質の分布状態は直接確かめられたものとしては、ロシア共和国のコラ半島における約 12km のボーリングによる掘削があり、現在も掘削中という¹⁾。

しかし、地球の大きさに比べると微々たるものでしかない。それより以深については、直接確かめたものはないが、地震波の観測などにより、地球の層構造がいろいろと推定されている。例えば、図-1 は現在有力とされている地球の化学区分と力学区分である²⁾。両区分の境界は必ずしも一致せず、とくに浅部はかなり異なる。深部も、外殻と内殻は同じ鉄でできているが液体と固体というように相が異なるという。

地球の平均密度は 5.52 であるが、地殻上面部の岩石の平均密度は 2.7 であるから地球内部のマントルや核の密度はかなり大きなものになる。また、リソスフェアとアセノスフェアの違いは、軟らかさ(粘性率)で区分されていて、地震波速度(S 波)もそこで小さいことがわかっている。また、4 章で述べるプレート運動も、このリソスフェアの移動によって発生するものである。

なお、トンネル工事で対象となるのは、モホロビッチ面(モホ面)で区分される地球表面側の地殻で、地球半径の 0.5~0.6% にしか過ぎないのである。

図-1 地球の化学区分と力学区分²⁾(瀬野, 1995)

4. 地層や岩石の分類

4-1 地層や岩石の分類方法

日本は地殻変動の著しい地域に位置するため、地下深部では様々な地質現象が生じ、地質も複雑化している。そのうえ、地表付近でも風化・浸食・堆積作用などで様々な地層が形成され、この結果、様々な土や岩石、地層が形成されている。トンネル工事においてこのような複雑な地質を取り扱うには、まずこれらの地層や岩石の分類の方法を理解しておく必要がある。

表-1 は岩石や地層の分類法とその代表的な例である。

岩石の基本的な分類法は、成因をもとに分類する地質学的方法である。この分類方法は、成因のほか産出状態、造岩鉱物の種類や割合、構成粒子の大きさや固結の程度、変質の程度などによって細分類される。

成因による分類法のほか、その岩石や地層が生成された地質年代によるもの、地理的分布にもとづいた地層名によるもの、あるいは地域的俗称や慣用名によるものなどがある。

一方、これらの分類とは異なったものとして、土木工学的な分類がある。土木工事の設計や施工には、岩石や岩盤の地質学的な細かい分類よりもむしろ、その硬軟、亀裂の状態、固結度、変形特性などがより必要である。したがってこれらをパラメータとして岩石や岩盤を分類することが必要である。

以下、表-1 の分類について各論に入るが、工学的な分類に関しては、第IV編29章で主に紹介する。

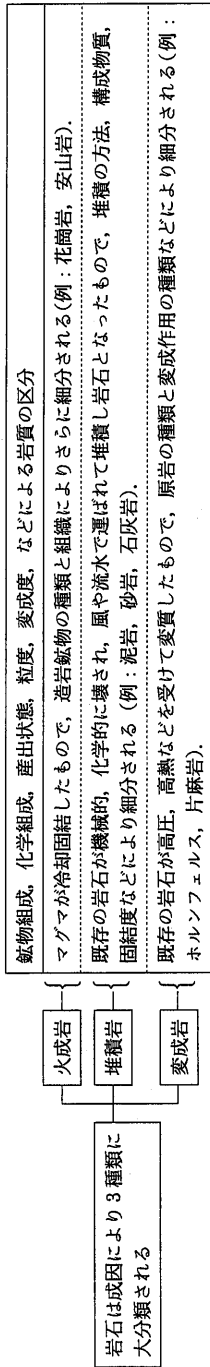
4-2 土や岩石を構成する物質

土や岩石は、無機質と有機質からなっている。有機質は土壌中以外にも堆積岩などに含まれることがある。しかし大半は無機質である。

岩石や土を構成する無機質は、鉱物と非晶質からなる。非晶質にはガラスや一部の粘土質物質があるが、一部を除き一般の岩石は鉱物を主体とする。

鉱物(造岩鉱物)には様々なものがあるが、一般の岩石

表-1 岩石の分類



地質年代表(表-14)を参照のこと (例: 第三紀層, 古生層).
 地理的な分布場所と関連した分類名で, その場所の代表的な地名をもって地層名とするもの(例: 秩父古生層, 和泉砂岩層)(表-16 参照).
 ある地域に発達している岩石や地層を特有な名称(俗称または慣用名)で呼んでいるもの(例: 真砂, シラス)(表-17 参照).
 第四紀に属する新しい堆積物は成因や性状が地形に現れており, 地形名がその地質状態を表すもの (例: 崖錐, 扇状地).
 岩盤の硬軟 (例: 軟岩, 硬岩)

表-2 主要造岩鉱物

名称	化学組成	形状	面の形状	色	光沢	モース硬度	比重	その他
石英	SiO ₂	粒状	貝がら状破面	無色	ガラス様脂肪	7	2.7	ナイフで傷がつかない
カリ長石	K ₂ O・Al ₂ O ₃ ・6SiO ₂	柱状	へき開完全	乳白~肉紅	はり光沢	6	2.6	ガラスと同じぐらいの硬度
針長石	m(Na ₂ O・Al ₂ O ₃ ・6SiO ₂ + n(CaO・Al ₂ O ₃ ・2SiO ₂))	細長い	へき開完全	白	はり光沢強い	6	2.6	
白雲母	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	六角板状	へき開完全	白	はり光沢 真珠光沢	2.5	2.76~3.0	薄く剥れる, きらきら輝く
黒雲母	K(Mg・Fe) ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	扁平な板状	へき開完全	褐~黒	真珠光沢	2.5	3.0	風化して緑泥石になりやすい 断面の挟主角124°
角閃石	(Ca, Fe, Na, K) ₂ (Mg, Fe, Al) ₂ [(OH, F) ₂ (Si, Al) ₆ O ₂₀]の固溶体	細長い六角柱状	へき開顕著	帯緑黒	はり光沢	5.5	2.9~3.5	
輝石	CaSiO ₃ -MgSiO ₃ -FeSiO ₃ の固溶体	太短い八角柱状	へき開完全	帯緑黒	はり光沢	5~6	3.2~3.6	断面の挟主角87° オリーブ色, 粒状に近い.
かんらん石	2(Mg・Fe)OSiO ₂	円味ある太短い 扁平柱状	へき開不明瞭	帯緑(透明)	はり光沢	6.5~7	3.2~4.35	

* F. Mohs(1638~1687): 1.滑石, 2.石膏, 3.方解石, 4.螢石, 5.りん灰石, 6.正長石, 7.石英, 8.黄玉, 9.銅玉, 10.ダイヤモンド, 爪(2~3), ナイフ5, ガラス5~6

表-3 代表的粘土鉱物とその特徴

	代表鉱物, その他	特 徴
3 層 構 造	モンモリロナイト・パ イロフィライト・滑石・ イライト	層結合が弱く水を含 みやすい(膨潤性)
2 層 構 造	カオリナイト・デイッ カイト・アンチゴライ ト	3層のものより結合が 強いので著しい膨張 を示すことは少ない
複鎖状構造	蛇紋石・クリンタイト	
2~3 層構造	緑泥石類	

を構成する主要な鉱物は数10種程度で、これを主要造岩鉱物という。例えば、主成分となるものは、石英、長石族(これらは通常無色または白色なので無色鉱物という)、かんらん石族、輝石族、角せん石族、雲母族(これらは通常色があるので有色鉱物という)の6つで、その特徴は表-2のとおりである。

このほかに、工学的に注意が必要なものとして、粘土鉱物がある。粘土鉱物は地すべりや膨張性土圧という現象で土木工事には縁の深いものである。

主な粘土鉱物には表-3のようなものがある。粘土鉱物はSiO₂の4面体をユニットとする層格子を中心にAl, Mg, Feなどの原子を抱いたOHの8面体をユニットとする層格子が上下方向に平行に連結する方式(層格子の重なる順序と間隔など)によって主として3層構造と2層構造に分類される(図-2)。

3層構造は、図-2(a)に示したようにSiO₂層格子が互

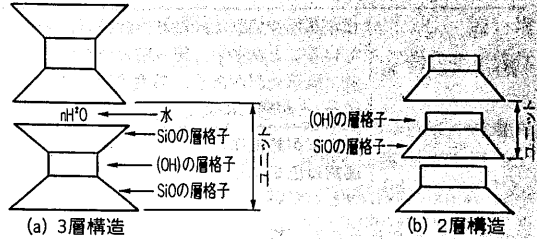


図-2 粘土鉱物の結晶構造の概念(層格子は水平にはいくらでも続く)

いに向きあい、その頂点(間)にOHの層格子を持ったものをユニットとするものである。各ユニットの間は、nH₂Oの層をもって接することになり、層結合が弱く水を含みやすいため、著しい吸水膨張性を示す。モンモリロナイトなどが代表的なものである。

一方、2層構造は、図-2(b)に示すようにSiO₂層格子の頂点に1層のOH層格子を持ったものをユニットとするものである。3層構造に対し層構造が強いので、吸水膨張の度合は少ない。

4-3 成因による岩石の分類

地質学では岩石を成因により火成岩、堆積岩、変成岩の3つに大別している。土木工事に必要な分類は、岩石の物性であることが多いが、それは岩石の成因に依存することが多いので、この分類を理解しておくのがよい。

4-3-1 火成岩

(1) 火成岩の分類

地下で溶融した高温、高圧のマグマが地殻中に貫入したり、地表に流出したりして冷却固結化した岩石を火成岩と呼ぶ。造岩鉱物の組成および冷却した深さによって、鉱物の配列、結晶粒の大きさ、割れ目(節理)、色などに差異を生じる。

表-4は主な火成岩を分類したものである。火成岩の化学組成はマグマの分化段階に応じて変化し、これらの岩石の中間的な組成を持った岩石(例えば、花崗閃緑岩など)も生成される。分化とは、マグマの冷却過程で、結晶として晶出しやすいものから順にマグマの中から失われていくことによって、残されたマグマの組成が変化していくことである。分化が進むと比率的にSiO₂, Na₂O, K₂Oなどは多く、FeO, Fe₂O₃, MgO, CaOは少なくなっていく。そのため

表-4 代表的火成岩の分類

産 状	SiO ₂ 含有率			
	95%	66%	52%	45%
鉱 物	酸性 石英+長石 +雲母	中 性 長石+(角閃石 雲母+輝石)	塩 基 性 長石+輝石	超塩基性 長石+ かんらん石
深 成 岩 (地下深所で ゆっくり冷却)	花 崗 岩	閃 緑 岩	はんれい岩	かんらん岩
半 深 成 岩 (やや深所で 冷却)	石 英 斑 岩	ひ ん 岩	輝 緑 岩	
火山(噴出)岩 (地表で冷却)	石英粗面岩 流 紋 岩	安 山 岩	玄 武 岩	
	小 ← 単位体積重量 → 大			
	優白 ← 色 → 優黒			
	低温 ← 晶 出 温 度 → 高温			
	高 ← 化学的安定度 → 低			
含有造岩鉱物	石英 カリ長石 雲母	斜長石 角閃石	輝石	かんらん石
	← 副成分鉱物			

表-5 工事でよく使われる火成岩起源のその他の岩石

蛇紋岩	超塩基性深成岩で、塩基性深成岩に随伴していることが多い。緑～暗緑色を呈し、ち密で脂肪光沢がある。緑色部と白色部(方解石)とが網状に交錯していることがある。
変朽安山岩 (プロピライト)	安山岩が熱水作用を受けて変質した岩石で、通常緑色を呈し、黄鉄鉱の結晶が散在することが多い。
温泉余土	火山岩が亀裂や破碎帯に沿って上昇してきた熱水溶液の作用を受けて、全く変質腐朽して軟弱な粘土となったものである。
ペグマタイト	花崗岩類中に岩脈をなして産す。白～淡色を呈し、完晶質で、巨大な結晶の集合からなることが多い。
自破碎溶岩	溶岩の堆積時に、溶岩の一部が固結した後も他の部分が流動するために固結部が破碎された溶岩。

最終的に残されたマグマは、花崗岩質のものとなっていく。

(2) 火成岩の命名法

火成岩を細分類する際、主成分となる有色鉱物の名称を頭につけて、「含黒雲母 角閃石輝石安山岩」などのように呼ぶのを基本としている。含有量が多い有色鉱物ほど後の方につける。なお、有色鉱物の含有量は岩石試料から作成した薄片の偏光顕微鏡観察などで調べる。

また、鉱物の含有量については、含有量が5%以下のものは「含」(英語で bearing)を頭につける。この例では、「含」が付いている黒雲母の含有量は5%以下で、角閃石や輝石は5%以上含まれていること、角閃石よりも輝石の方が含有量が多いことを示している。なお、このような岩石名を略称したい場合は、含有量の少ないものから順に省略して、「角閃石輝石安山岩」、「輝石安山岩」などと呼ぶこととしている。

表-4 以外にも、鉱物組成や鉱物の分布状態により、例えば、黒曜岩(流紋岩の一種)、ドレライト(粗粒玄武岩)、トータル岩(花崗岩の一種)など、様々な名前が用いられている。

上記以外の火成岩には、二次的な変質作用、変成作用、破碎作用などの様々な作用を受けた結果として特別な名前と呼ばれるものがある。例えば、トンネル工事で時々遭遇する火成岩または火成岩起源の岩石には表-5 に示すようなものがある。これらの岩は、変成や変質により粘土鉱物が多くなっていたり、空隙や潜在亀裂が多く、脆くなっているので、土木工事においてはしばしば問題となる岩質として取り扱われる。

(3) 火成岩の産状

火成岩に限らず、岩石が産出する状態を「産状」とい

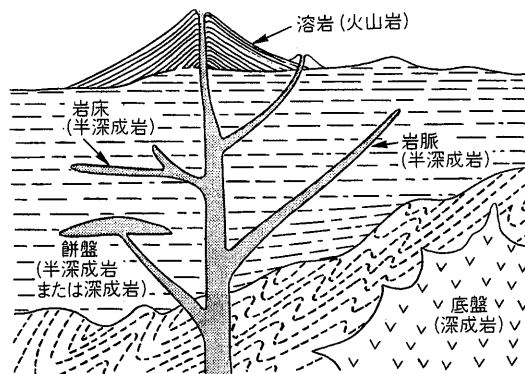


図-3 火成岩の産状

う。同じ化学組成の岩石でも、その産状によって地質学的特性だけでなく工学的特性も大きく異なるので、産状を把握することは重要である。

表-4 で示したような火成岩の基本的な産状は図-3 で説明される。火山岩はマグマが地表(海底を含む)上ないし近くに噴出し、急に冷却してできた岩石で、ち密な基底(石基)だけの岩石のほか0.5~2mmほどの大きさの鉱物結晶が混じっていて、それが斑点状にみえるものがある。深成岩はマグマが地下深部の高温、高圧のもとでゆっくりと冷却してできた岩石で鉱物は結晶体となり、その粒は大きく(一般に2~5mm)、しかも等粒である。半深成岩は両者の中間的なものである。

産状は同じ火山岩でも様々である。例えば、玄武岩では、パホイホイ、アア、塊状、自破碎状、枕状などがある(図-4)⁴⁾。深成岩では一般に大きな塊状で、半深成岩では脈状、板状などである。

(4) 火成岩の色や重さ

火成岩の色や重さは主要な鉱物の組成によって違いがある。表-4 によれば、表の左側のものほど Si, Al の含有量が相対的に多いので岩石の単位体積重量は小さく、色は白っぽい。逆に右側のものほど Fe, Mg の含有量が多いので重く、黒っぽい。また、表の上のものほど地下深部でゆっくり冷却してできたものであるため、鉱物の結晶が大きく、また重い。逆に下のものほど地表で急冷してできたものであるため、結晶が小さく、また、マグマの発泡によって生じた空隙のため軽いという傾向がある。

また逆に、鉱物組成に大きな違いがなくても、極端に色や重さが異なる場合もある。例えば、風化によって、岩石中にわずかに含まれる鉄分が酸化することで、黒色や青灰色の岩が赤褐色に変化することがよくある。また、重さについても、塊状の溶岩の部分と自破碎部で重さが数10%も異なることもある。

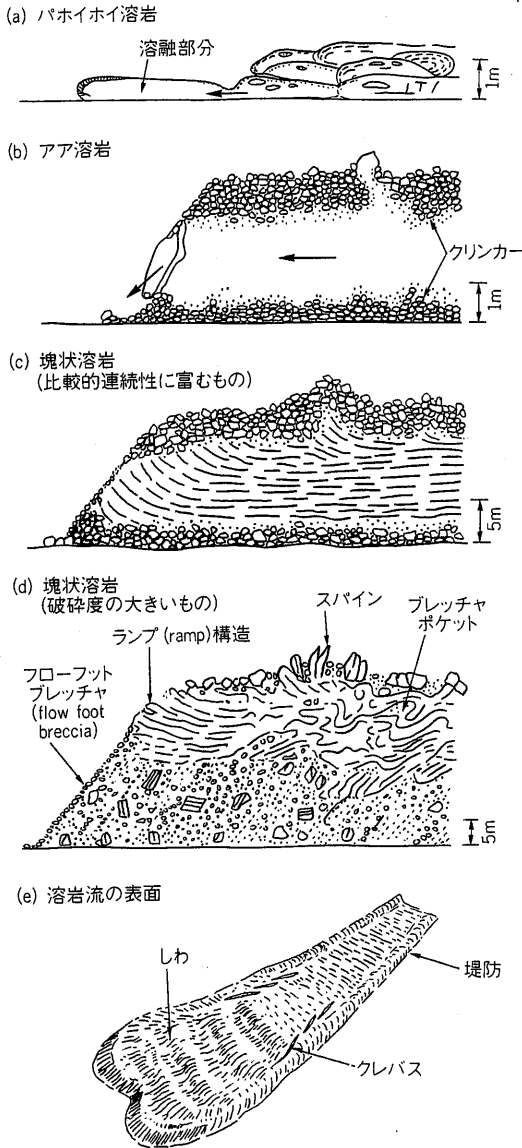


図-4 溶岩流の内部構造を示す模式断面図
(b, cは Macdonald, 1972)⁹⁾、(久城国ほか, 1989)

4-3-2 堆積岩

(1) 堆積岩の分類

既存の岩石が風雨や流水などにより機械的に破碎されたり化学的に分解されてできた残存破片や分解生成物、火山活動に伴って放出された火山噴出物、生物の遺がい・遺体などは、その生成場所に堆積したり、風や流水によって遠方に運ばれて、堆積して堆積物をつくり、次々にほぼ水平・層状に重なった地層をつくる。

当初軟弱な堆積物も、順次上に載ってくる堆積物の荷重によって脱水、圧縮され、また熱や化学的作用(主に

石灰質や珪酸質分の作用)によって粒子間が充填(セメント)されていっそう固結(これを膠結という)し、固い堆積物(堆積岩)に変化していく。このような働きを続成作用と呼んでいる。

以上のように堆積岩は、元々の堆積物の種類や粒度によって千差万別であり、また、続成作用の程度によって硬さもまちまちである。したがって堆積岩の分類は、元々の堆積物の種類、粒度、続成作用の程度などを指標になされる。表-6, 7は、堆積岩の分類の例ならびに粒径による堆積岩の分類の例である⁹⁾。例えば、同じ泥でできた堆積物では、続成作用による圧密が進行するに従って泥岩、頁岩、粘板岩などと名称が変化する*(さらに変成作用が進むと千枚岩、黒色片岩となる)。

(2) 堆積構造と岩相

堆積岩は、いろいろな堆積構造と様々な岩相を持つ。もっとも一般的な構造は層理(面)である。層理は、異なる粒度または異なる性質の堆積物が層状に重なりあったときの境界面であり、一つの堆積面である。層理は一般に平坦であるが、ときには、水の流れの痕跡を示す様々な凹凸(流痕)がみられることがある。また、層理よりも細かく連続性の小さい面が頻繁に薄くくり返す、葉理またはラミナと呼ばれる面構造がみられることがある。主な葉理としては、面がほぼ平行な平行葉理とやや斜めに発達する斜交葉理がある。

岩相とは堆積物(岩)の色、粒度、組成、組織、厚さ、成層様式その他の諸特徴を総合的に把握した表現をいう(例えば、塊状大礫々岩、厚成層粗粒砂岩、薄成層泥岩)。複数の岩相がくり返して重なる場合を互層と呼ぶ(例えば、砂岩頁岩互層)。また、土石流状の混濁流に起因してできた海底堆積物は、図-5に示すような独特の層序・岩相を示し、タービダイトと呼ばれている。

(3) 堆積岩の特異な地質構造

ある特定の成因によって独特な地質構造を持つに至った堆積岩については、特別な名称で区分しているものがある。近年、四万十帯などの乱堆積状の海底堆積物(オリストストロームやメランジュ)の研究が発達し、また、プレートテクトニクスとの関係が判明してきたことによって、土木工事においてもこれら特殊堆積物の名前を頻繁に使用するようになってきている。

以下に示す堆積岩は、砂や泥がいったん堆積し、地層を形成した後に、海底地すべり、プレートの沈み込みな

*頁岩は構成粒子が層理面に平行に定向再配列し、薄く剥げやすい性質を帯びた泥質岩であり、さらに圧密が進んで剥離面に沿って低温度変成鉱物の白雲母や緑泥石の針状の微結晶が生成し、薄板状に剥離性がさらに顕著になったものが粘板岩(スレート)である。なお、粘板岩は通例変成岩に含まれる。

表-6 主な堆積岩⁹⁾

主要構成物質	岩石名	細分	
碎屑粒子 石英 長石 岩片 粘土鉱物など	碎屑岩 (Clastic rocks)	粒度による分類 礫岩(Conglomerate) 砂岩(Sandstone) 泥岩(Mudstone)または頁岩(Shale)	砂岩の構成粒子の相対比による分類 石英砂岩(Quartz Sandstone) アルコース砂岩(Arkose) 石質砂岩(Lithic Sandstone)
生物源粒子 石灰質化石 サンゴ, 貝 有孔虫など 珪質化石 ケイソウ, 放散虫 海綿など 炭化植物片	生物岩(Biogenic rocks) 石灰岩(Limestone) 珪質岩(Siliceous rocks) 石炭(Coal)	礁性石灰岩(Reef limestone) 石灰質碎屑岩(Calcareous clastic rocks) ドロマイト(Dolomite):石灰岩の交代, 化学的沈殿など成因は多様 珪質軟泥 → ポーセラナイト → チャート(続成変化) (siliceous ooze) (Porcellanite) (Chert) 泥炭 → 亜炭 → 瀝青炭 → 無煙炭(続成変化) (Peat) (Brown coal) (Bituminous coal) (Anthracite)	
化学的沈殿物 炭酸塩, ケイ酸 その他の塩類 鉄マンガン酸化物	化学的沈殿岩 (Chemical-sedimentary rocks) 蒸発岩(Evaporite) リン酸塩岩(Phosphate rocks) 鉄マンガン鉱石 (Iron-manganese ore)	岩塩(Halide), セッコウなど(Sulfate) $P_2O_5 > 20\%$ (初期続成作用) 縞状鉄鉱(Banded iron ore):先カンブリアに限る 魚卵状鉄鉱(Oolitic hematite):顕生代 マンガン団塊(Manganese nodule)	
火山碎屑物	火山碎屑岩 (Volcaniclastic Rocks)	粒度による分類 火山角礫岩(Volcanic breccia) 凝灰角礫岩(Tuff breccia) 火山礫凝灰岩(Lapilli tuff) 凝灰岩(Tuff)	

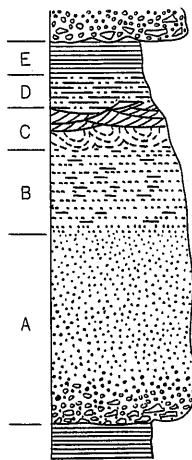


図-5 タービダイトにみられる砂岩と頁岩の典型的な層序(ブーマ・サイクル)⁹⁾
(水谷・ほか, 1987)

地層であることを認識しておくことが重要である。

① メランジュ(メランジ, メランジュともいう)

主に砂岩, 粘板岩, 緑色岩(低変成玄武岩溶岩, 火砕岩), チャート, 石灰岩などの大小(主に数 10m ~ 数 cm)の

どのような作用によって, それらの地層が攪乱されたり変形して特有の構造や岩相を持つに至ったものである。とくにメランジュやオリストストロームなどの地層は, 予期せぬ地質の変化があったり, 破碎帯を伴ったりすることが多い。トンネル工事などでは, このような

岩塊, 角礫が強いせん断作用により鱗片状の片理が普遍的に発達したペラペラな粘板岩状泥質基質と複雑に混じり合った地質体。海洋プレートが島弧下に沈み込む際に付加された海溝充填堆積物(主にタービダイト), 海洋地殻の表層部(チャート, 珪質粘土岩, 玄武岩溶岩(緑色岩)), および海山構成物(玄武岩溶岩, 火砕岩, 石灰岩)の覆互構造体が付加体底部で高い封圧下での強いせん断作用により再断裂・再配列して混在を強めたものと考えられている(テクトニックメランジュ)。その他, 砂質岩, 泥質岩の角礫を主とする泥ダイアビルメランジュや下記のオリストストロームが強いせん断を受け岩塊・基質の再配列を受けた堆積性メランジュも含まれる。

② オリストストローム

大規模な海底地すべりによって異なる岩塊や角礫が複雑に含まれる堆積物。オリストストロームの中に含まれる異地性岩塊はオリストリスといい, 地質図に描けるような大規模な異地性岩塊を含むこともある。岩塊の集積様式は様々で, 岩塊が相互支持し, 基質部は小角礫からなるものから, 岩塊, 角礫が広い泥質基質中に散在するものまでである。異地性岩塊には浅海成碎屑岩の他, 外来のチャート, 緑色岩, オフィオライト, 深海相石灰岩な

表-7 砕屑粒子の粒径区分⁹⁾(水谷・ほか, 1987)

φ	粒径 (mm)	円磨した粒子		角ばった粒子
		砕屑物	集合体	
-8	256	巨礫 (boulder)	巨礫岩 (boulder conglomerate)	角礫岩 (breccia)
		大礫 (cobble)	大礫岩 (cobble conglomerate)	
-6	64	中礫 (pebble)	中礫岩 (pebble conglomerate)	
-2	4	細礫 (granule)	細礫岩 (granule conglomerate)	
-1	2	極粗粒砂 (very coarse sand)	砂岩 (sandstone)	
0	1	粗粒砂 (coarse sand)		
1	1/2	中粒砂 (medium sand)		
2	1/4	細粒砂 (fine sand)		
3	1/8	極細粒砂 (very fine sand)		
4	1/16	シルト (silt)		シルト岩 (siltstone)
8	1/256	粘土 (clay)	粘土岩 (claystone)	頁岩 (shale)

4-3-3 変成岩

(1) 変成岩の分類

岩石はいったん形成された後でも、熱や圧力などの環境変化があると、新しい環境に適応するよう岩石本来の性状を変える。このような作用のうち、とくに比較的高い圧力や高い熱の状態での作用を変成作用という。

変成作用には、非常に大きなエネルギーと長い時間が必要であり、熱的なもの(熱変成作用)と、圧力・ひずみ的なもの(広域変成作用)に分けられる。主な変成岩を表-8に示す。

熱変成作用は、熱量の大きな火成岩が貫入して周囲の岩石に熱的な変成を与えるものであり、ホルンフェルスや結晶質石灰岩(大理石)が代表的である。

一方、広域変成作用は、地殻の運動によって構成物質が再配列し、比重の大きい容積の小さい鉱物に変化する作用であり、岩石は結晶片岩や片麻岩などが代表的である。このような変成作用を受けると鉱物が一定方向に並びやすくなり、面

状の構造(これを片理という)を持つようになる。

変成岩は、基本的には硬岩に属し、粘土鉱物なども膨潤性のあまりみられないタイプが多いので、工事においては比較的問題の少ない岩盤といえる。ただし、変成岩の中には風化を受けて溶食空洞などが生じたり(結晶質石灰岩など)、片理面に沿って風化して弱面となつてすべりや分離、あるいは座屈変形を生じやすくなるもの(片岩など)があるので注意が必要である。

(2) 変質岩の分類

変成作用が比較的高い圧力や高い熱の状態での作用をいうのに対し、比較的低い圧力下で行われる作用を変質作用という。しかし、変成作用と変質作用の境界は明確ではない。例えば、グリーンタフ地域の広域変質岩の多くは、続成作用の一過程と考えられ、低度変成岩として研究されている⁹⁾。

変質作用は、広い範囲に及ぶ場合と、火成岩、鉱床、破碎帯などの近くに局所的に及ぶ場合がある。変質作用としては熱水変質が有名である。温泉の周辺では岩石が白濁化・褐色化・粘土化しているのをよく見かけるが、これも熱水変質の一つの温泉変質であり、変質は比較的低温でも起こり得ることがよくわかる。

変質岩としては、いわゆるグリーンタフが有名である。グリーンタフとは、東北日本や日本海側に産出する新第

表-8 変成岩の分類

接触変成岩	マグマの熱とその溶液の影響を受けてきた岩石で、マグマからの影響範囲は狭い。	ホルンフェルス(原岩は泥質岩)、珪岩(原岩は砂質岩)、大理石(原岩は石灰岩)	
動力変成岩(断層岩)	断層によるせん断応力の作用によってできた岩石で、その範囲は狭い。	ミロナイト、カタクラサイト、シュードタキライトなど	
広域変成岩	地殻の構造運動に伴う圧力と温度の上昇によって、既存の岩石が広範囲に変成されてきた岩石。	片麻岩(原岩は花崗岩、もしくは堆積岩)	結晶片岩(剝離性大きい) 泥質片岩、砂質片岩、石墨片岩、雲母片岩、石英片岩、緑色片岩、角閃岩、紅れん片岩
		千枚岩(原岩は泥質岩)	

ども含まれることがある。オリストストロームの形成は、①陸棚前縁、大陸斜面、海溝斜面部の崩壊、②前進する衝上体縁の崩壊、③海溝での海山体の衝突・崩壊などが考えられている。

表-9 熱水変質帯の分類⁹⁾(水谷・ほか, 1987)

酸性帯		中性帯		アルカリ性帯	
硫酸塩系	珪酸塩系	K系	Ca-Mg系	Ca系	Na系
明バン石 オパール帯	ハロイサイト帯	モンモリロナイト帯	モンモリロナイト帯	束沸石帯	モルデン 沸石帯
明バン石-石英帯	カオリナイト帯	混合層粘土鉱物帯	混合層粘土鉱物帯	輝沸石-菱沸石帯	方沸石帯
	パイロフィライト帯	絹雲母帯	プロピライト帯	濁沸石帯	曹長石帯
	ダイアスポア帯	カリ長石帯		ワイラケ沸石→湯河原沸石帯	

↓ 温度

→ アルカリ・アルカリ土類イオン活動度
水素イオン活動度

三紀中新世ごろの、主として緑色に変質した酸性凝灰岩の総称である。石材として有名な大谷石などもこれに含まれる。また、主として輝石、角閃石などが緑泥石を生ずる変質作用を受けた安山岩はプロピライト(変朽安山岩)といい、グリーンタフの産出する時代やそれよりもやや古い時代の地層によく産出する。プロピライトそのものはトンネル工事の対象岩盤としてそれほど悪いものではないが、粘土化したものは膨張性を示すことがあり、問題の地質となる。

このような変質作用を受けると、元々の岩石中の火山ガラスや長石、有色鉱物などを交代したり空隙を充填したりして、粘土鉱物や沸石、方解石などの二次鉱物(変質鉱物)ができる。変質鉱物にも様々な種類があり、どのような鉱物ができているかによって、変質の度合いや変質条件が細かく分類されている。表-9に熱水変質の分類例を示す⁹⁾。

変質作用によって岩石の工学的な特性も変化する。例えば、長石や火山ガラスが粘土鉱物になると、それだけ強度が低下する。しかし、母岩の鉱物組成や熱水の物理化学的性質によっては、変質によって強度がむしろ増加する場合もある。例えば、グリーンタフ地域の砂岩や泥岩、凝灰岩などの互層では、酸性凝灰岩の火山ガラスが変質してべとべとのモンモリロナイト質になっているのに対し、それと互層している泥岩は珪化作用などを被って逆に硬質化していることがある。熱水変質を受けた亀裂や破砕帯状の部分でも、軟質化している部分と硬質化している部分が複雑に混在することがよくみられる。

4-3-4 岩石の見分け方

トンネル工事で接する岩石も、2-3-1~3に示した岩石のいずれかに属するものであることが多い。

そこでトンネル技術者でもそれなりに行える岩石の簡単な判別法を以下に紹介する。ただし、この判別法はごくおおまかなものであることを承知して用いて欲しい。このほか、いくつかの岩石図鑑が出版されているので、それらを参考にするとよい。

なお、正規な判別など、地質的な判断は地質専門家と

表-10 火成岩、堆積岩、変成岩の判別

判別要素	岩石の種類		
	火成岩	堆積岩	変成岩
大局的組織構造	1. 層理の存在		○
	2. 互層		○
	3. 化石の存在		○
	4. 多孔質流状構造	○	
組織・構造	5. 形のよい鉱物結晶がある	○	○
	6. 斑点状の鉱物結晶がある	○	1)
	7. 長柱状の鉱物結晶がある	○	○
	8. 鉱物結晶が一定方向に配列		○
	9. 有色鉱物と無色鉱物とが交互に配列		○
	10. 鉱物結晶がわん曲している		○
	11. 円い粒子を多量に含む		○
	12. 粒子が見えずち密で一様	2)	○
	13. 剥離性が著しい		4)
色彩	14. きれいな色(黄緑青紅紫など)	○	5)
光沢	脂肪光沢	6)	○

- (注) 1) 火山砕屑岩にはある場合がある
 2) 火山岩にはある場合がある
 3) ホルンフェルス、千枚岩などは可能性がある
 4) 頁岩、粘板岩にはある場合がある
 5) 火山砕屑岩・チャートは色彩がある
 6) 黒曜岩、蛇紋岩、かんらん岩にはある

相談しながら行うのが妥当である。

(1) 火成岩、堆積岩、変成岩の判別

火成岩、堆積岩、変成岩のいずれに属するかについては表-10を参考にすると比較的よく判別できる。

(2) 火成岩の判別

表-10により火成岩と判定されたら、表-11により火成岩の中の分類を行う。まず、岩石の組織が等粒状であるか、斑状であるかを観察する。等粒状ならば深成岩、斑状ならば火成岩、その中間ならば半深成岩である。次に色彩をもとに酸性岩、中性岩、塩基性岩の区分をする。

(3) 堆積岩の判別

表-10で堆積岩と判定したものは、表-12により、以下のように岩石名を推定できる。

- ① ち密で一様な灰色~褐色。ハンマでなかなか割れず、小刀で傷がつかない→チャートであることが多

- い。
- ② ち密で様な灰白色。ハンマで割れ、小刀で傷がつく→頁岩か石灰岩であることが多い。
希塩酸で泡立つ→石灰岩、泡立たない→頁岩

表-11 火成岩の判別

組織	色	白、灰	淡紅、淡 緑、淡青、 淡黄	緑、紅、 褐、青、 紫	濃緑、濃 青、灰黒	緑黒、青 黒、黒
	組織	酸性岩 ~ 中性岩 ~ 塩基性岩				
斑状、中間、等粒状	火山岩	← 流紋岩 (黒曜岩) →		↑ 安山岩 (変朽安山岩) →	玄武岩 →	
	半深成岩	← 石英斑岩 →	↑ 斑岩 →	↓ 輝緑岩	↓ 輝緑岩	
	深成岩	← 花崗岩 →	↑ 閃緑岩 →	↓ はんれい岩	↓ 蛇紋岩	

- ③ ち密で様な緑色。ハンマで割れ、小刀で容易に傷がつく→凝灰岩であることが多い。
ち密で様な緑色。ハンマで容易に割れない→緑色岩(低変成玄武岩・火砕岩)であることが多い。
- ④ 様な細粒子の集合体の淡褐色。ハンマで容易に割れない→砂岩か硬砂岩かであることが多い。
小刀で傷がつかない→硬砂岩

(4) 変成岩の判別

表-10 で変成岩と判定したものは、表-13 により、例えば、以下のように行う。

- ① 剝離性の著しい黒色の片岩でハンマで容易に壊れる→黒雲母片岩であることが多い。
- ② 白色で剝離性がほとんどなく、非常に硬く直射日光にあてて白く光って見える→珪岩であることが多い。
- ③ 外観が花崗岩に似て、鉱物結晶が一定方向に並列し、白黒の稿状模様が明瞭→片麻岩であることが多い

表-12 堆積岩の判別

岩石名	判定法	肉眼から見た粒子構造		固結程度		硬 度		組 織 構 造		色		その他の特徴				
		粒子が見えず均質	粒子および礫よりなる	ハンマで容易に壊れる	ハンマで割れる	ハンマでなかなか割れない	軟 質	中 硬	極硬(ナイフで傷がつかない)	ち 密	礫や鉱物が斑点状にある		大きな礫岩塊が入っている	白、灰、淡黄、淡褐	緑、褐、青、紅・紫	灰黒、黒褐、黒
水成 碎屑 岩	粘土層	○					○									固結していない
	砂層		○				○									"
	砂礫層		○				○				○	○				"
	泥岩	○			○		○			○						圧縮強度400kgf/cm ²
	頁岩	○				○	○			○						片状に剥げることがある
	粘板岩	○				○	○			○						薄く剥げることがある
	砂岩		○		○		○			○						
	アルコース砂岩		○		○		○			○						外観が花崗岩に似ている 礫が角礫の場合は角礫岩
火山 碎屑 岩	硬砂岩	○				○			○							
	礫岩		○		○		○									
	火山灰	○			○		○		○		○	○				
	火山礫・軽石		○	○	○		○			○						
	火山岩屑			○	○		○				○					
	凝灰岩	○				○	○		○							一般に色は淡緑～緑
	輝緑凝灰岩	○				○	○		○							一般に色は淡緑～緑
火山礫凝灰岩				○		○			○						"	
角礫凝灰岩				○		○			○						"	
火山角礫岩				○		○			○						"	
有化 機学 的 堆積 岩	石灰岩	○			○		○		○							希塩酸で泡立つ。ナイフで傷がつく
	チャート	○				○			○	○						ナイフで傷がつかない
	泥炭	○		○	○		○			○						
	石炭	○				○				○						
	岩塩		○		○		○						○			
珪藻土	○			○		○			○			○	○			

表-13 変成岩の判別

判別法 岩石名		片理 (剥離性)			主成分の鉱物色			鉱物の配列状態			硬 度			そ の 他		
		ほとんどのなし	あり	著しい	白、灰、淡黄褐	緑、褐、紅	灰黒、黒	ほとんどのなし	あり	著しい	ち密で一様	規則性あり	一定方向に配列		軟く中硬	非常に硬い
接触変成岩	ホルンフェルス	○					○	○						○	直射日光で暗紫色に見える	
	珪 岩	○			○				○					○	直射日光で白く美しく光る	
	大 理 石	○			○				○					○	完晶質で、希塩酸で泡立つ	
動力変成岩	ミロナイト		○		○	○			○	○			○	細粒の集合体、残結晶が点在する		
広域変成岩	片 麻 岩		○	○	○	○			○	○				○	結晶発達、外観が花崗岩に似ている場合が多い	
	千 枚 岩		○	○				○	○					○	片岩より片理性劣る	
	結 晶 片 岩	泥質片岩		○	○				○	○					○	手でこすると指先が黒くなる
		石墨片岩			○			○		○	○				○	一般に鉱物結晶見えない
		砂質片岩		○	○	○			○		○				○	片麻岩に似ている
		石英片岩		○	○	○				○					○	
		雲母片岩		○	○	○			○		○				○	
		緑色片岩		○	○	○				○	○				○	
		紅れん片岩		○				○			○	○			○	
角 閃 岩		○	○			○			○	○			○			

い。

- ④ 緑色(紅色)で剥離性がある→緑色(紅れん)片岩であることが多い。

4-4 地質時代による分類

4-4-1 地質時代

地質時代区分は、生物の進化とその変遷によって区分する相対年代と、それぞれの相対年代の長さを放射性元素の崩壊のスピードが一定であることを利用して求める絶対年代とがある。相対年代は各時代の地層を特徴づける示準化石によって決められる。絶対年代は主として、ウラン:²³⁸U, トリウム:²³²Th, カリウム:⁴⁰K, ルビジウム:⁸⁷Rb, 放射性炭素:¹⁴Cなどを用いる。

地質時代は表-14のように分けられる⁹⁾。それぞれの代はさらに紀→世→期→時に細分される。これらの地質時代に形成された地層に対しては、界→系→統→階と細分名が用いられる。

4-4-2 各地質時代の地層

(1) 沖積層

沖積世という用語は、第四紀という地質時代を二分するとき、前期を表す洪積世と併せ、従来からよく用いられてきた。しかし、ヨーロッパ大陸の水河堆積物の研究

成果などから完新世(現在から約1万年前までの間の地質時代)と更新世(1万~165万年前までの間の地質時代)とに二分するのが国際標準であり、表-14もそれによっている。しかしながら、明瞭な水河堆積物を有していない東アジア地域の地質表現には、従来の沖積・洪積層という区分には捨てがたい利点がある。したがって、ここでは従来の区分に中心をおいた記述とする。

沖積層は、最終氷期(ビュルム)から現在に連なる約1.8万年間に存在した水系に沿って堆積した泥や砂、粘土などの堆積物の総称である。約1.8万年前に海水準が-80~-140m程度に低下したときに谷が形成され、その後、海水準の上昇に伴って谷が埋積されて現在の平野になった。この谷を埋めた堆積物が沖積層である(くどい話となるが、沖積層は完新世の地層だけでなく、更新世の末頃の地層も含むことになる)。

沖積層を構成する主な地質は、粘土、砂、礫、これらの混合物、火山噴出物などである。また、沖積層はもっとも新しい時代の堆積物で、現在もお進中のものである。平野部の堆積物、現河川のはんらん原、おぼれ谷堆積物、三角州、扇状地堆積物、崖錐などの大部分は沖積層に属する。一般に固結しておらず、凝集力が乏しく

表-14 地質年代表⁹⁾(国立天文台, 1998)
(単位: 百万年)

代	紀	世	年
新生代	第四紀	完新世	0
		更新世	0.01
		鮮新世	1.65
	第三紀	中新世	5.3
		古新世	23.5
		始新世	34
	古第三紀	始新世	53
		暁新世	65
		後期	96
		前期	135
中生代	白亜紀	後期	154
		中期	180
		前期	205
	ジュラ紀	後期	230
		中期	240
		前期	245
三疊紀	後期	295	
	前期	295	
古生代	二疊紀	295	

代	紀	年
石炭紀	後期	295
	前期	325
	前期	360
古生代	デボン紀	410
	シルル紀	435
中生代	オルドビス紀	500
	カンブリア紀	540
古生代	先カンブリア時代	295

日本地質アトラス(地質調査所, 1982)およびOdin(1994)による。Steiger and Jäger(1977)壊変定数を使用。

軟質であり、いわゆる軟弱地盤もある。弾性波速度は一般に1.5km/sec以下である。

(2) 洪積層

洪積層は、洪積世(氷河で代表される地質時代)で、約165万年～1.8万年前までの間を指す。正規の地質年代というならば、1万～1.8万年前の間を除く更新世)の堆積物の総称である。

洪積層を構成する主な地質は、粘土、砂、礫、これらの混合物、ローム、火山噴出堆積物(未固結)、火山岩など多様である。段丘堆積層の多くは洪積層に属する。弾性波速度は一般に2.5km/sec以下(火山岩を除く)で固

表-15 地質時代の区分およびそれらの期間の形成された地層群に対する名称⁹⁾(水谷・ほか, 1987)

	万国地質学会 (1881)	万国地質学会 (1990)	国際層序区分委員会 (1976)	日本 (1952)
岩相層序区分単位 Lithostratigraphic units (Rock units)			Group Formation Member Bed(s)	層群 累層(屑) 部層
年代層序区分単位 Chronostratigraphic units(Time-stratigraphic units)	Group System Series Stage Assise	System Series Stage Zone	Eonothem Erathem System Series Stage Chronozone	界 系統 階
地史年代区分単位 Geochronologic units(Corresponding Geologic time units)	Era Period Epoch Age Phase	Era Period Epoch Age Phase	Eon Era Period Epoch Chron	(累代) 代 紀 世 期

注) この名称は必ずしも厳密に使用されていない。地域や時代によって地層の広がりや厚さは著しく変化し、研究の目的やその記述の仕方によって、地層群をどのようにまとめるかは、研究者の考えにまかされているためである。

結度は弱い、洪積層の中でもやや古いもの(数10万年～165万年程度の地層)は固結していることも多い。沖積層と比較した場合、地耐力は大きく、砂礫層のN値は一般に50以上である。また、砂礫層は帯水していることが多い。日本では更新世に火山活動が盛んで、今日みられる多くの火山は、この時代に噴出したものである。

(3) 第三紀層

第三紀層を構成する主な岩石は、泥岩、頁岩、砂岩、礫岩、凝灰岩、角礫凝灰岩、および火山岩である。第三紀層は、さらに新第三紀層と古第三紀層に分けられる。石炭の大部分は、古第三紀層に属する。新第三紀は北陸・奥羽地方、北海道に広く分布するグリーンタフの火山活動にみられるように火山活動が盛んで、日本の火山岩の多くはこの時代に生成された。一般に第三紀層(火山岩を除く)は、固結度が低く、圧縮強度400kgf/cm²前後、弾性波速度は3.6km/sec以下で軟岩に属するものが多い。なお、新しい花崗岩の中には第三紀に形成されたものがある。

(4) 中生層

中生層を構成する主な岩石は、頁岩、粘板岩、砂岩、チャート、珪質粘土岩、石灰岩、緑色岩(低温度変成玄武岩溶岩・火砕岩。海洋底地殻表層部および海山構成物の付加体。古くは輝緑凝灰岩と呼ばれていた)などであ

表-16 地理的分布にもとづいた代表的地層名の例

地理的地層名	説 明
① 明石層群	明石地方に分布する鮮新世末～更新世の淡水性の地層で、泥岩、砂岩、凝灰岩よりなる。
② 和泉層群	紀伊半島から四国西部まで、中央構造線の北側に分布する上部白亜系の地層で、頁岩、砂岩、礫岩よりなる。
③ 魚沼層群	新潟地方に分布する最上部第三紀層で、砂礫層、粘土層を主体とし、火山砕屑岩を挟む。
④ 大阪層群	大阪、播磨、京都、奈良盆地に分布する鮮新世末～更新世の地層で、粘土、砂礫層よりなり、凝灰岩を伴う。
⑤ 関東ローム	関東地方の更新世火山活動に由来する火山灰を主体とする火山砕屑物層をいう。南関東の関東ロームは上から立川ローム、武蔵野ローム、下末吉ローム、多摩ロームの4層に分けられている。
⑥ 関門層群	九州北部・中国西部の白亜系で、脇野、下関の2重層群に区分される。頁岩、砂岩、礫岩、石灰岩、凝灰岩、火山岩類よりなる。
⑦ 訓縫層群	北海道西南地域に分布する中新世の海成層で、火山岩、凝灰岩を主とし、泥岩、砂岩を挟む。
⑧ 四万十層群	関東山地、赤石山地、紀伊半島、四国南部、九州南部に分布する中生代～古第三紀にかけての堆積物で、頁岩、砂岩を主とし、礫岩、石灰岩、千枚岩などを挟む。
⑨ 秩父古生層	北上山地、関東山地、飛騨山地、紀州・丹波地方、岡山・広島県境付近、四国の山地、九州の中南部などに分布し、粘板岩、硬砂岩、チャート、石灰岩、輝緑凝灰岩よりなり、地向斜生の堆積物である。
⑩ 東京層	東京都内に発達する海成更新統、貝化石に富む砂泥層で、成田層に相当する。
⑪ 成田層群	房総半島北部を中心に発達する上部更新統。砂層を主とし、泥層、火砕質層を挟む。
⑫ 飛騨変成岩	飛騨山地から隠岐にかけて点々と分布し、片麻岩、片岩よりなり、花崗岩が随伴する。古生代～前カンブリア代とされている。
⑬ 御坂層群	山梨県、神奈川県、静岡県の県境付近山地を構成する新第三紀の地層で、火山砕屑岩、砂岩、頁岩よりなる。

る。弾性波速度は4.5～5.0km/sec程度である。なお、この時代の末期には花崗岩が広く貫入していることも特徴である。西南日本内帯では、花崗岩活動に先立つ白亜紀前期の酸性火山岩が広く分布する。

(5) 古生層

従来、古生層または中古生層とされてきた地層の多くは、微化石の研究などによって、その多くが中生層であることが明らかになってきた。そのため、純粋に古生層と考えられる地層は以前よりも少ないと考えられる。古生層を構成する主な岩石は、粘板岩、硬砂岩、チャート、石灰岩、緑色岩、ホルンフェルス、片麻岩、千枚岩、結晶片岩などである。古生層の岩石は一般的に硬く固結さ

表-17 地域的俗称で呼ばれる代表的岩石名

岩 石 名	説 明
① 赤間ケ石 Akamagaseki	中生代の輝緑凝灰岩、すずり石に用いる。
② 埋 木 Umoregi	炭化度の低い褐炭
③ 黄 土 Loess	第四紀の細粒粒風成堆積物を中国では黄土という。
④ 大谷石 Ohyaiishi	宇都宮付近に分布する新第三紀の軽石凝灰岩、石材。
⑤ 鹿沼土 Kanumatsuchi	赤城山火山噴出による黄色軽石層。
⑥ 菊面石 Kikumenseki	球状せん緑岩で、放射同心円状に配列した構成鉱物が、菊の紋状にみえる。宮城県産。
⑦ 黒ぼく Kuroboku	腐植に富む黒色の粗しような土。
⑧ 讃岐岩 Sanukigan	別名かんかん石。讃岐地方に産する黒色ち密の輝石安山岩で、同種のものは瀬戸内火山岩区の他の地域に産する。
⑨ しらす Shirasu	南九州に広く分布する火山噴出物(軽石流堆積物の非溶岩部や降下軽石など)およびそれに由来する2次堆積物。
⑩ 鉄平石 Tetsupeiseki	板状節理の発達した安山岩で、石材に使用。
⑪ 陶 土 Porcelain clay	陶磁器の原料となる土で、カオリンであることが多い。
⑫ 十勝石 Tokachiishi	黒曜岩、主に十勝川の河床礫から産する。
⑬ 土 丹 Dotan	新第三紀の泥岩、シルト岩、砂質岩をいい、ときには更新世の未固結シルト、粘土をいう。
⑭ 那知黒 Nachiguro	南紀伊に産する黒色頁岩の一種で、大部分が潜晶質鉱物の集合体よりなり、黒の基石として用いられている。
⑮ 灰 石 Haiishi	溶結した火砕堆積物、九州に産する。
⑯ 表 土 Surface soil	広義には岩盤の上の風化残留物や沖積世堆積物。
⑰ ぼ た Bota	炭層を挟み上下盤に存在し、採炭に際して石灰とともに掘りだされるが、実用にならない粗悪な石灰、頁岩砂岩などの俗称。
⑱ 真 砂 Masa	花崗岩が風化分解してできた白色～淡褐色の砂を主成分とする土。
⑲ 松 岩 Matsuiwa	岩層中に存在する石化木。
⑳ 御影石 Mikageishi	花崗岩の石材名。
㉑ よ な Yona	北、中部九州で阿蘇起源の細粒質新期火山灰。

れているが、地殻変動を受けて破碎されていることが多い。古生層の弾性波速度は4.5～5.0km/sec程度である。

4-5 地理的分布や地形、地域的俗称その他による分類

4-5-1 地理的分布にもとづいた地層名

地質学では、同一種類の岩石がある程度広く分布する場合や、類似の地史や地質特性を持ったひとまとまりの地層がある場合に、そのひとまとまりの地層に名前を付けることになっている。これを「地層名」という。

地層名の付け方にはいくつかのルールがあるが、基本的には、岩相層序区分(表-15)に沿って行う⁹⁾。岩相層序区分とは、岩相とその層序に着目して地層を区分する方法である。地層の命名にあたっては、各地層がもっとも典型的に露出する箇所やルートを「模式地」として模式層序を明らかにするとともに、模式地の地名などを用いて「〇〇層(累層)」と命名する。この地層の中に、さらに特徴的な地層が含まれる場合、「△△部層」などと命名されることもある。また、一連で産出する「〇〇層」や「××層」などをまとめて「□□層群」などと命名するときもある。この場合、いずれもその地層群、地層、部層などが典型的に産出する地域の名称を用いる。表-16はその例である。

4-5-2 地域的俗称で呼ばれる岩石名

地方によっては、地質学的な地層名とは別に、その地域によく発達する岩石、地層を特有な名前と呼んでいる。この例を表-17に示す。

4-5-3 地形にもとづいた名で呼ばれる岩石名

第四紀におけるいろいろな地形形成作用によって形成された岩片や土砂の堆積物は、未固結で、いわゆる岩石とはいえない。しかし、各々が成因の推定につながる独特な形成をなし、その地形から地盤の性状が推定できる場合が多い。これらには崖錐、地すべり、段丘、扇状地、後背湿地、おぼれ谷などがある。このような地形作用で形成された堆積物を地形や成因を関して呼ぶことがある。地形に関しては本編7章で後述する予定である。

4-6 土木工学的な分類

土木分野でも、地質学的な分類とは別に、岩石を工学

的に分類することがよく行われる。これについては第IV編で詳述するが、基本的には、軟岩や硬岩といった硬さの観点で区分している。ただし、トンネル工事などで取り扱う岩盤は、岩石それ自体は硬くても、亀裂などが存在して脆くなっていることが多いので、岩盤としての良否を区分する方法として「岩盤分類」という方法が考え出された。これには多くの方法があるが、基本的には、岩石自体の硬さ、亀裂の量、亀裂の性状などに着目したものが多い。(文責：佐々木靖人・建設省土木研究所地質研究室主任研究員/大島洋志・国際航業(株)取締役技術センター長/指導：勅米良亀齢・九州大学名誉教授)

参 考 文 献

- 1) 藤田至則・小室裕明・角田史雄・加藤碩一・西村敬一：新しい地球観を探る，愛知出版，314p，1993。
- 2) 瀬野徹三：プレートテクトニクスの基礎，190p，1995。
- 3) 池田和彦・大島洋志：わかりやすい土木地質学入門(改訂8版)，土木工学社，224p，1997。
- 4) 久城育夫・荒牧重雄・青木謙一郎：日本の火成岩，岩波書店，206p，1989。
- 5) 水谷伸治郎・齊藤靖二・勅米良亀齢：日本の堆積岩，岩波書店，226p，1987。
- 6) 島津光夫：グリーンタフの岩石学，共立出版(株)，172p，1991。
- 7) 池田俊雄：地盤と構造物，自然条件に適応した設計へのアプローチ，鹿島出版会，1975，7。
- 8) 国立天文台：理科年表，丸善，1054p，1998。
- 9) 巽好幸：タヒチを造った超巨大プリューム，朝日ワンテママガジン11最新・地球学，朝日新聞社，254p，1993。
- 10) James Gilluly, A. C. Waters, A. O Woodford: Principles of Geology.

好評発売中

岩盤分類とその適用

吉中龍之進・桜井 春輔・菊地 宏吉/編著

B 5 判上製本 本体価格 4,656 円 (送料 380 円)

本書は、わが国における岩盤工学の権威者が、各種土木構造物・岩盤構造物別に基礎岩盤に関する「岩盤」を取り扱う土木・地質技術者、ならびに研究者のために、岩盤分類の現状、適用方法、問題点、最近の動向などを現実に即して平易に解説したものです。

最近の土木工事はルート選定に制約を受けるため、わが国特有の複雑多様な地盤を掘削することから、以前にも増して岩盤分類は重要視されております。本書は、このような社会的な背景を踏まえた数少ない待望の著書であり、岩盤工学にたずさわる関係者に広くご一読をおすすめいたします。

 株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

現場だより



平成11(1999)年

「世界最長のトンネルと鳥越伝説」一戸町より

小松正三

一戸町は岩手県北部に位置し、東は北上山地、西は奥羽山脈に囲まれた雄大な自然に恵まれ、「白と緑のエッセイ」を町のテーマとしている。現在の一戸町は、昭和32年に旧一戸町、鳥海村、浪打村、小鳥谷村、姉帯村の1町4村が合併して誕生し、町の面積は、300.26km²を有する。また、文化財も豊富で、国指定文化財7、県指定11、町指定は41件にものぼり、自然・文化と人の融和のとれた町を築いている。

中でも当作業所から数100mのところにある「鳥越観音堂」には、有名な伝説が残っている。その昔(807年)慈覚大師が奥州を巡礼している際、聖観音が現れ「あの山を清めよ」といって姿を消す夢をみた。不思議な夢と思ひながら歩いていると、目の前に夢の岩山と同じような鳥越山があり、そこには大蛇が住んでいた。慈覚大師が観音経を唱えるとその大蛇は姿を消し、代わって観音菩薩が現れ「この地は苦しみが多い。人々を救え」と教えられ、大師はこの地にとどまり、観音像を刻んで本尊とし、観音堂を開いたと伝えられている。観音堂は、ほぼ垂直にそそり立つ岩肌の中腹をくり抜いたところにあり、お堂への階段も傾斜角45度と急で、代々天台宗の修験道場となっている。春先には地元だけでなく、県外からも大勢の参拝客が訪れ、



鳥越観音

参拝する人たちの列や奉納された札、供物などで観音堂はいっぱいになる。

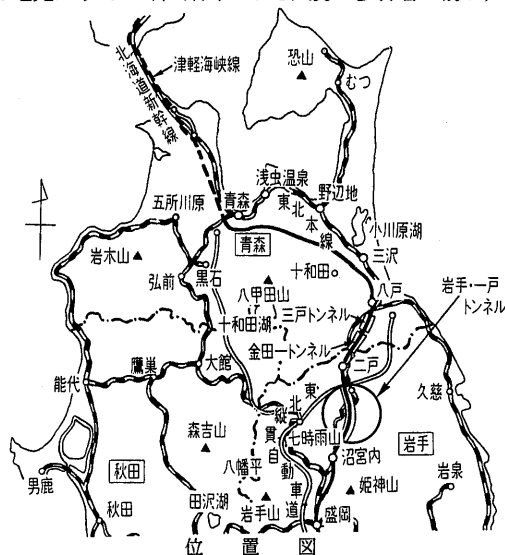
また、昔から一戸町(鳥越集落)は、水田が少なく畑作中心で「ひつつみ」、「くし餅」、「せんべい汁」などの雑穀を使った郷土料理が多数見られる。中でも「ひつつみ」は小麦粉を練ったものを手で鍋の中にひつつむ(ちぎって)入れることが名前の由来となっている。

さらに竹細工の里としても全国的に有名で、冬の生活が長く厳しい集落の人々に慈覚大師が作り方を指導すると同時に動物の命を奪う肉食を禁じたという伝説も残っている。現場近くの実相寺の境内には珍しいイチョウの木があり、実をつけるのは雌の木だが、このイチョウは雄の木でありながら秋には実をつけ、昭和31年には天然記念物に指定されている。しかも、葡萄の房状に実をつけるという珍しい習性を持っている。

現在、盛岡～八戸間の東北新幹線工事が平成14年の開業を目指し急ピッチで進行しており、当企業体はこの一戸町で、完成すれば陸上トンネルでは世界最長となる延長25.81kmの岩手・一戸トンネル青森方出口の鳥越工区(延長3,000m)を施工している。

岩質は、坑口付近が安山岩の崖堆積層で坑奥に向かいシルト岩、粘板岩、凝灰岩となっており、坑口部崖錐対策工として長尺先受け工(AGF工法)を採用し、発破にはアンホ爆薬とノネル雷管を使用している。平成10年2月に掘削を開始し、11年3月末現在で1,400mまで進捗しており、来年7月の無事故・無災害での貫通を目指し、よりよいものを、より早く、より安全にをモットーに作業所一丸となって努力している。

(佐藤・鴻池・東鉄共同企業体岩手トンネル鳥越作業所長)



連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(3)

第1編 トンネル工事に必要となる基礎的地質学(2)

「応用地質学」連載講座小委員会

5. 地質作用

5-1 地殻へ作用する営力

地殻は、地球の生成以来種々の地質作用を受け続けている。この作用は外因的地質作用と内因的地質作用に大別される。外因的な作用には、空気、水、生物、気温変化など太陽の放射エネルギーによる風化、浸食、運搬、堆積などがある。内因的な作用には、プレート運動に伴う地殻変動およびこれと密接に関係する火山作用や地震現象などの地球内部のエネルギーによるものがある。

5-2 外因的地質作用

外因的地質作用には、風化、浸食、運搬、堆積の4つの作用がある。陸地のうち山地などの傾斜地には主として風化・浸食作用が働き、平地には主として運搬・堆積作用が働く。湖沼や海域でも浸食・運搬・堆積などの作用が働いている。

5-2-1 風化作用

風化とは、地下深部にあった岩石が地表付近の物理的、化学的、あるいは生物的な作用によって変化し、地表付近でより安定な状態になる過程の総称である。

物理的な作用には、①温度変化の周期的なくり返しにより熱膨張係数の異なる鉱物間で剥離するもの、②岩石中にある水分が凍結氷となり、くさびの作用で岩石の割れ目を拡大していくもの、③流水や波浪により水底や岸部を浸食するもの、④地下水の地中内部の浸食力(内部浸食)で岩石が塊状化、粒状化、あるいは空洞化するもの、などがある。

化学的作用とは、酸素、炭酸ガス、水などによって岩石が化学的に変質(酸化、炭酸化など)、溶解することによって分解する作用で、①酸化作用(水中の酸素が鉄、硫黄、有機物などを酸化するもの)、②水和作用(有色鉱物を緑泥石、蛇紋石などに変化させるもの)、③脱水作用(褐鉄鉱が赤鉄鉱に、あるいは石膏が硬石膏に変化するような作用)、④炭酸化作用(水に含まれている炭酸ガスのために炭酸塩が生成し、これが水に溶ける作用で、

長石がカオリン化するもの、輝石やかんらん石が蛇紋石に変化するなどの作用)、⑤溶解作用(石灰岩地帯にみられる鍾乳洞、カルスト地形などはこの作用に起因している)、などがある。

かんらん石、輝石、角閃石、黒雲母、斜長石などの鉱物は化学的風化作用を受けやすく粘土化しやすい造岩鉱物である。逆に白雲母や石英は化学的風化作用に対しては安定した鉱物である。これによって、輝石や角閃石、斜長石などを多く含む岩石類(例えば、玄武岩、はんれい岩)は、風化・変質しやすく、石英分に富む花崗岩や砂岩などは化学的作用には抵抗することが説明できる。ただし、花崗岩や閃緑岩などの鉱物の結晶粒の大きいものは、造岩鉱物各々の熱膨張係数が異なるため、温度変化により各鉱物間の結合性が弱められやすい。花崗岩が深層まで風化したまゝに変化しやすいのはこの理由による。

一方、生物的作用はこれまで比較的軽く考えられてきた。しかし、化学的風化としての酸化作用にも、鉄酸化細菌などの微生物が深く関与しているらしいことがわかるなど、無視できない存在になってきている。

5-2-2 浸食・運搬作用

日本のような高温、多湿な地域の浸食作用は、雨・雪などの水によるものが大半である。水の浸食力は、勾配が急で、流速が速く、流量が多いほど、また、水中に混濁あるいは浮遊している土粒子分が多いほど、さらに軟弱な地盤であるほど大きく作用する。この原理は河水に限らず海岸での波浪による場合にも同様である。このほかに浸食作用としては、風食作用などがある。

運搬作用には、①海などの水によるもの、②風によるもの、③地震や火山活動に起因する重力性の変動によるもの、などがあり、主体は水によっている。

水による運搬の形態には、①水に溶かして運ぶもの(溶食)、②水に浮かして運ぶもの(浮遊)、③流れの強さで押し流して行くもの(掃流)、④水と土砂が混在して泥流・土石流・地すべりなどとして移動するもの(これは

運搬作用であると同時に浸食作用でもある), の4つがある。

風による運搬作用は、わが国では目立たないが、平野や台地の表面に堆積している火山灰やローム層などの細粒堆積物のかなりの割合が風によって運搬されたものであることがわかっており(ローム層の細粒石英などが遠く中国から運ばれて来ている), 決して無視はできない。

5-2-3 堆積作用

運搬作用が衰えると堆積が始まる。水による運搬の場合、運搬される粒径と体積は流速と比例関係にある。詳細には、粒径は流速の2乗に比例し、体積は流速の6乗に比例するので、流速が衰えると、運びきれない大きさや分量のものは沈殿し、堆積することになる。したがって流速が速くなる洪水時には、平時には考えられないような巨礫を運搬し、その運搬量も平時とは比較にならないほど大きなものになる。河川の upstream は流速が速くて浸食作用の著しい区間であるが、ここで生じた運搬物質のうち、巨礫類はいち早く上流部に安定してしまう。河川勾配がだいに緩くなるにつれ、流速も遅くなっていくので、粗粒分から順々に沈殿していき、流速がほとんどなくなる河口付近で細粒分が沈殿する(図-6⁷⁾参照)。海岸でも同様なかんらん石により、汀線から沖に向かって、礫→砂→シルト→粘土というように粗いものから細かいものへと堆積物に変化している。

ただし、運搬が地すべりや崩壊、土石流などのマスムーブメントによって生じている場合には上記の限りではなく、思わぬ遠方まで巨礫が運ばれることがある。この場合には、堆積物に元の地質の構造が残っていたり、堆積物の粒度組成が淘汰を受けていない(様々な粒度のものが混在する)状態であることなどから、通常の堆積物と区別がつく。

なお、中国大陸内陸部の黄土(loess)は風成堆積物として、ヨーロッパ大陸のチル、チライト(till, tilite)は水成堆積物として知られる特異な堆積物である。

5-2-4 浸食輪廻と岩石の循環

このような作用により、河川の最上流部は掘れ溝が形

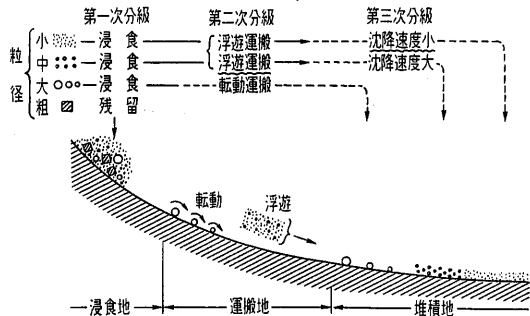
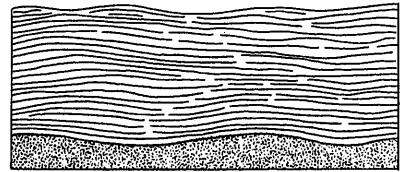


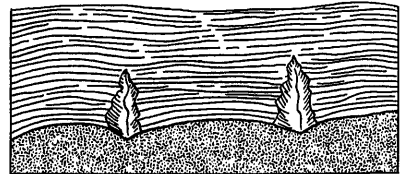
図-6 分級作用による土粒子の選別堆積⁷⁾(池田俊雄)

成され、流域の争奪が著しい地域、上~中流部は下刻、側刻作用が著しく、V字谷などの幼~壮年期地形となる地域、下流部は河川堆積物からなる沖積氾濫原の老年期地形を呈する地域というように分類される。老年期地形は上流へと進行していき、準平原化が行われるようになる。このような地形が風化・浸食により新しい土地ができてから起伏の多い時期を経て平坦地になりサイクルを浸食輪廻(または地形輪廻)と呼んでいる(図-7)。

ただし、浸食輪廻という概念は、外国の大陸性の地域で研究されたものであり、日本のような地殻変動の著しい地域では、このような輪廻が必ずしもきちんと行われているとはいえない。日本のような地域では、浸食と堆積だけでなく、地殻変動あるいは火山活動などの相互作用によって、比較的長い間幼~壮年期の地形を保ったり、あるいは幼~壮年期の地形を経ることなく陸化した



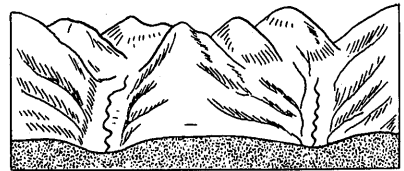
1. 原地形



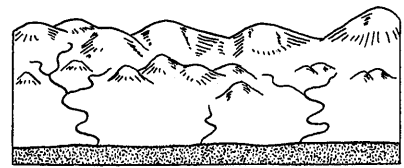
2. 幼年期



3. 幼年期



4. 壮年期



5. 老年期

図-7 地形の浸食輪廻

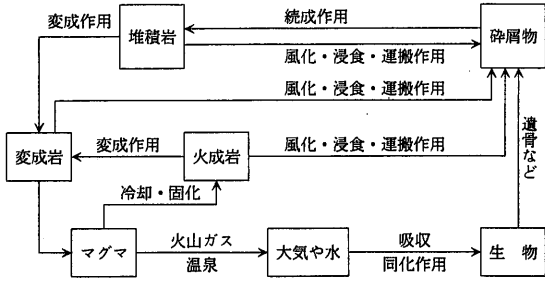


図-8 岩石の循環

り浅海・湖沼化したりをくり返している箇所もある。

しかし、いずれにしても地殻を構成している岩石には上述した種々の作用、すなわち太陽放射エネルギーによる外因的営力と、後述する地球内部のエネルギーによる内因的営力により長い時間の間に姿を変え循環している。

以上を模式図に示すと図-8 のようになる。

5-3 内因的地質作用

地殻に働く内因的地質作用は、プレート運動、およびそれに伴って起こる付加体の形成、火成活動、地震活動などの地殻変動がある。

5-3-1 プレート運動

地球表層の地殻が10数枚の硬い板(プレート)に分かれていて、そのプレートが相互にゆっくりと水平運動をしているという仮説がプレートテクトニクス(プレート理論)である。海洋プレートは大洋中央海嶺で生産され、海嶺を軸として両側に広がっていき(海底拡大説)、島弧または大陸縁弧外縁の海溝(プレート収束境界)で地球内部へ沈み込む。この海底拡大説は深海掘削により海底岩石の年代分布がわかり、その正当性が確認された。この説によると、従来地向斜理論などで説明されていた造山運動や様々な地殻変動現象は、主としてプレート収束境界における様々な現象として説明される。プレートの相対運動はVLBI(Very Long Baseline Interferometry: 超長距離基線干渉計)などの宇宙測地技術によって直接にcmオーダーで測定できるようになったため、プレート運動自体はほぼ実証された感がある。また現在では、プレートの発生や運動を規制するポストプレートテクトニクス理論として、マントル内の円筒状の対流運動説(プレームテクトニクス)が提唱されており(図-9)⑨、プレート理論だけでは説明できない部分についても、今後統一的な解釈がなされるようになると思われる。

プレート運動は、リソスフェアがアセノスフェアの上を移動する現象である。プレート境界では、異なるプレートが発生(形成)したり、横ずれ移動したり、衝突したり、潜り込んだりしている。このような現象は地質調査や地震の分布などによって推定されている。また、近年は医

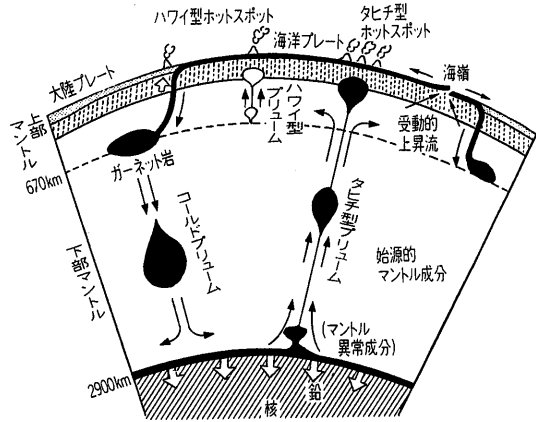
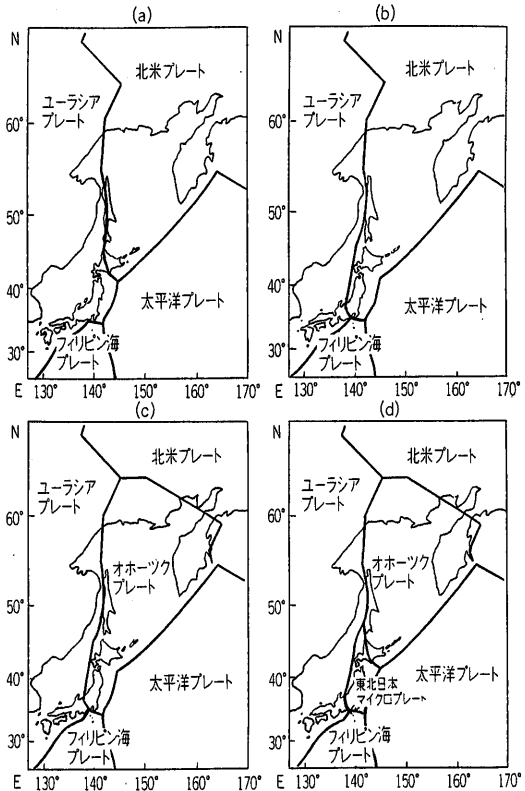


図-9 プレームテクトニクスの概念図⑨(巽, 1993)



(a)北海道中軸部を通る(Chapman & Solomon, 1976)
 (b)日本海東縁を通る(中村, 1983; 小林, 1983)
 (c)オホーツク海・東北日本を通る(Seno et al., 1996; など)
 (d)東北日本はマイクロプレートをなす(瀬野, 1995)

図-10 日本列島周辺のプレートの考え方⑨

療用CTスキャンと同じように地震波トモグラフィによって、プレートそのものの分布や、プレートがマントル中に落下している様子、プレームがマントル中を下降したり上昇したりしている様子を画像で「見る」ことができるようになった。

このようにして明らかになってきた日本の基盤の主要構造は、大まかには、西側のユーラシアプレートや北側の北米プレート(またはオホーツクプレート)に、東側の太平洋プレートや南側のフィリピン海プレートが沈み込む構造である(図-10)。このように多数のプレートがひしめき合うことによって、房総半島や南部フォッサマグナ付近には、世界的にも珍しいプレートの三重会合点が形成されている。

このようなプレート運動に伴って地殻やリソスフェアの内部に応力が蓄えられ、変成岩を生じたり、褶曲や地震・断層活動などを生じる原因となっている。また、火山活動もこのようなプレート運動と密接な関連を持っていると考えられる。

また、地質時代には、今あるプレートとは別のプレートが潜り込んでいて、現在はすべて潜り込んでしまったことなども推定されている。現在のプレートだけでなく、このような過去のプレート運動も、日本列島の形成に大きく関係している。

5-3-2 付加体の形成

プレートの沈み込みによって、海洋プレート上の深海

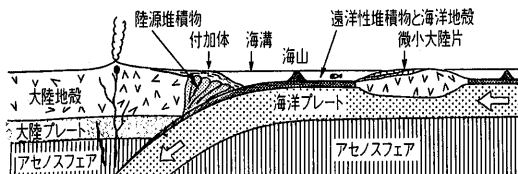


図-11 日本付近の沈み込み帯のモデル²⁾(瀬野, 1995)

底堆積物や、島弧または大陸縁弧から浸食されて海溝に堆積した堆積物などが削り取られ、陸側のプレートにくっついていく(付加する)ことがある。これを付加体という(図-11, 12)²⁾。日本列島、とくに西南日本では、このような現象のくり返しでいくつもの延長の大きい、そして幅広い帯状の付加体ができ、また、現在も付加し続けている。秋吉帯、美濃帯、秩父帯や四万十帯などは典型的な付加体である。

付加体は後の時代の変動によりいろいろの構造を受けているが、海溝堆積物の付加体は本来特有の地層配列、変形や断層を示す。すなわち、海側に向かって順次若い時代の地層が配列し、海側へ倒れた非対称褶曲、海側へ押し上げる衝上断層およびデュプレックス構造ならびに覆瓦構造で特徴づけられる。さらに4章で述べたような特異な地質体(メランジュ、オリストストロームなど)が形成される。

日本の堆積岩からなる基盤とその構造の大半は、このような付加体であることがわかってきた(図-13)²⁾。三郡、三波川帯などの高圧型変成帯もそうで、それらは、15~20kmほど地下深く潜り込んだ付加体である。なお、飛騨帯は中朝大陸塊の一部で、南部北上、阿武隈の一部は、海洋プレートに乗った小さなブロックが衝突して付加されたものであることもわかってきた。

5-3-3 火成活動、火山活動、温泉作用

上述したように、日本の基盤は一部の大陸地殻と多量の付加体によって構成されるが、基盤の中で、もう一つ

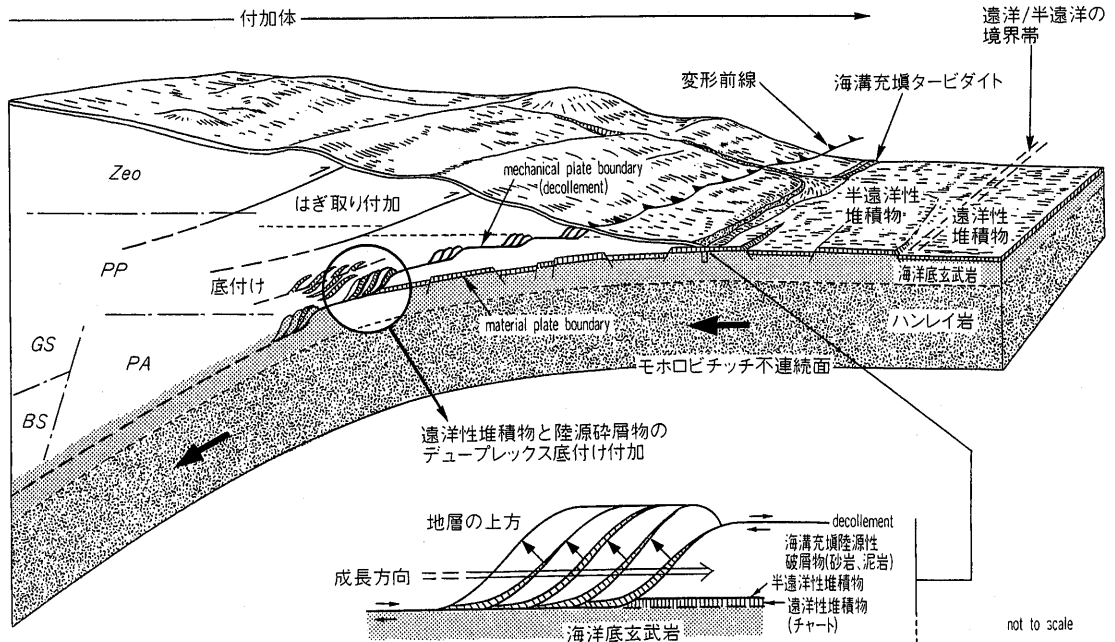


図-12 付加体の模式的断面図(狩野・村田(1988)¹⁾。英文原図は Matsuda & Isozaki, 1991 による)

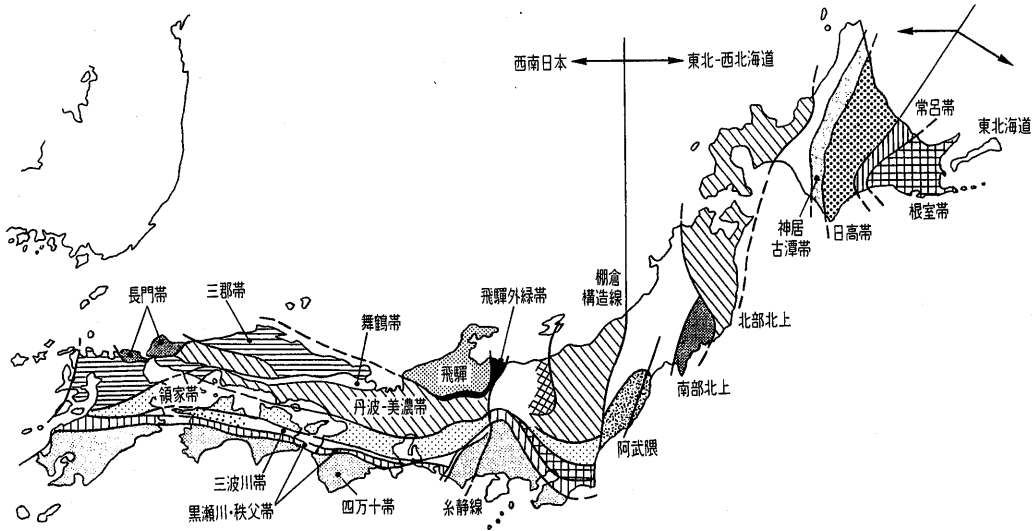


図-13 付加体を基本とする日本列島の基盤の区分(齊藤靖二原図, 瀬野, 1995)²⁾

大きな面積を占めるのは火成岩である。日本では、プレート運動などに伴って発生したマグマが上昇して基盤を大小様々な規模で貫いている。

火成活動は、火山活動と深成活動に分けられる。われわれに身近なのが火山活動である。深成活動で形成された深成岩は日本全土の11.6%、火山岩を加えると日本全土の面積の37.6%程度を占めており、日本における火成活動がいかに重要かがわかる。

地殻中を上昇してきたマグマや気体が直接地表に噴出したり、あるいは、いったん地殻中でマグマだまりをつくり、そこから次々に気体やマグマを地表に放出する活動を火山活動という。火山は、このようにして噴火口から吹き出した溶岩、火山弾、火山灰などが積もった山である。

日本は火山が多く、活火山はおおよそ50程度あり、東日本火山帯と西日本火山帯に大きく区分される。前者は太平洋プレートの、後者はフィリピンプレートの沈み込みに関係している。火山帯は基本的には日本列島の島弧に並走している。

また、火山活動に関連する作用として地熱や温泉がある。地熱は、文字どおりの地下の熱である。地球の内部は岩石中に含まれている放射性元素の崩壊による熱エネルギーにより5,000~6,000℃の高熱になっているとされている。これらの熱は地表へ向かって熱流として放散されているため、地表から地下へ向かって温度が上昇していく。この温度上昇の割合を地温勾配(地下増温率)といい、一般的に比較的浅い部分において2~3℃/100mである。とくに火山の周辺や断層破碎帯などがある場合には、地熱が上昇しやすく、地温勾配が高いことがある。

温泉は、主として火山活動に伴って上昇したマグマが冷却して、結晶鉱物が結晶固化した後に残った残液(熱水溶液)が水蒸気の圧力によって地盤の弱所に沿って上昇し、これが地表近くの地下水と混じって湧出してくるものである。この際に周辺の岩石が変質する作用を温泉変質作用という。

5-3-4 地震活動などの地殻変動

プレート運動や火山活動に伴って、地殻は応力とひずみを受ける。その応力やひずみによって、地殻は変形して褶曲したり、破壊されて断層を生じたりする。断層が生じるときには地震が発生する。このような地殻の変形現象を総称して地殻変動という(地殻変動によって形成される地質構造については本編第6章で詳述する)。

(1) 地震

地球内部応力に起因する破壊によって地殻やリソスフェアに生ずる震動を地震という。これは地殻やリソスフェアを構成する岩石が脆性破壊を生じ得る弾性体であるために起こるもので、岩石中に貯えられた弾性エネルギーが岩石の破損または降伏とともに急激に放出されて起こる。地殻やリソスフェアを伝わる地震波は2種類ある。一つは疎密波で、容積の変化が波として伝わり、媒質の粒子が波の進む方向に振動する。これをP波(縦波)といい、6~8km/secの伝播速度である。他の一つはねじれ状態の変化が波として伝わり、媒質の粒子は波の進む方向に垂直な面で振動する。これをS波(横波)といい、3~4km/secの伝播速度である。波動にはこのほか、地殻表面を伝わる表面波(ラブ波、レーリー波)がある。

地震波を最初に生じた源を震源という。震源は常に地中のある深さにあり、その地表への投影点を震央という。

表-18 気象庁震度階級関連解説表(1996)(国立天文台, 1998)

計測震度	震度階級	人	屋内の状況	屋外の状況	木造建物	鉄筋コンクリート造建物	ライフライン	地盤・斜面
—0.5	0	人は揺れを感じない。						
—1.5	1	屋内にいる人の一部が、わずかな揺れを感じる。						
—2.5	2	屋内にいる人の多くが、揺れを感じる。眠っている人の一部が目覚めます。	電灯などのつり下げ物が、わずかに揺れる。					
—3.5	3	屋内にいる人のほとんどが、揺れを感じる。恐怖感を覚える人もいる。	棚にある食器類が、音を立てることがある。	電線が少し揺れる。				
—4.5	4	かなりの恐怖感があり、一部の人は、身の安全を思うように行動し、一部の人は、行動に支障を感じる。	つり下げ物は大きく揺れ、棚にある食器類は音を立てる。盛りの悪い置物が、倒れることがある。	電線が大きく揺れる。歩いている人も揺れを感じる。自動車を運転していて、揺れに気づく人がいる。	耐震性の低い住宅では、壁や柱が破損するものがある。	耐震性の低い建物では、壁などに亀裂が生じるものがある。	安全装置が作動し、ガスが遮断される家庭がある。まれに水道管の被害が発生し、断水することがある。(停電する家庭もある。)	軟弱な地盤で、亀裂が生じることがある。山地で落石、小さな崩壊が生じることがある。
—5.0	5弱	非常に恐怖を感じる。多くの人が、行動に支障を感じる。	つり下げ物は激しく揺れ、棚にある食器類、書棚の本が落ちることがある。盛りの悪い置物の多くが倒れ、家具が移動することがある。	窓ガラスが割れて落ちることがある。電柱が揺れるのかわかる。補強されていないブロック塀が崩れることがある。道路に被害が生じることがある。	耐震性の低い住宅では、壁や柱がかなり破損したり、傾くものがある。	耐震性の低い建物では、壁、梁(はり)、柱などに大きな亀裂が生じるものがある。耐震性の高い建物でも、壁などに亀裂が生じるものがある。	家庭などにガスを供給するための導管、主要な水道管に被害が発生することがある。 (一部の地域でガス、水道の供給が停止することがある。)	
—5.5	5強	立っていることが困難になる。	固定していない重い家具の多くが移動、転倒する。間もなく多くのドアが多い。	かなりの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。多くの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。補強されていないブロック塀のほとんどが崩れる。	耐震性の低い住宅では、倒壊するものが多い。耐震性の高い住宅でも、壁や柱が破損するものがある。	耐震性の低い建物では、壁や柱が破損するものがある。耐震性の高い建物でも、壁、梁(はり)、柱などに大きな亀裂が生じるものがある。	家庭などにガスを供給するための導管、主要な水道管に被害が発生することがある。 (一部の地域でガス、水道の供給が停止し、停電することもある。)	地割れや山崩れなどが発生することがある。
—6.0	6弱	立っていることができず、走れないと動くことができない。	固定していない重い家具のほとんどが移動、転倒する。戸が外れて飛ぶことがある。	多くの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。補強されていないブロック塀のほとんどが崩れる。	耐震性の低い住宅では、倒壊するものが多い。耐震性の高い住宅でも、壁や柱がかなり破損するものがある。	耐震性の低い建物では、倒壊するものがある。耐震性の高い建物でも、壁や柱が破損するものがある。	ガスを地域に送るための導管、水道の配水施設に被害が発生することがある。 (一部の地域で停電する。広い地域でガス、水道の供給が停止することがある。)	
—6.5	6強	揺れに翻弄され、自分の意志で行動できない。	ほとんどの家具が大きく移動し、飛ぶものもある。	ほとんどの建物で、壁のタイルや窓ガラスが破損、落下する。補強されているブロック塀も破損するものがある。	耐震性の高い住宅でも、傾いたり、大きく破損するものがある。	耐震性の高い建物でも、傾いたり、大きく破損するものがある。	広い地域で電気、ガス、水道の供給が停止する。 (一部の地域でガス、水道の供給が停止することがある。)	大きな地割れ、地すべりや山崩れが発生し、地形が変わることもある。

* ライフラインの () 内の事項は、電気、ガス、水道の供給状況を参考として記載したものである。

震源から観測地までの距離(L)は次式で求められる。

$$L = v_p \cdot v_s \cdot t / (v_p - v_s)$$

ここに、 v_p : P波伝播速度、 v_s : S波伝播速度、 t : 観測点における初期微動継続時間である。

地震の強さを表す指標には次のものがある。

① マグニチュード

地震そのものの大きさを表す指標で、マグニチュードが1だけ大きくなるとエネルギーは30倍大きくなる。最初の定義であるリヒターの定義は、震央距離100kmの地点におかれたウッド・アンダーソン地震計による最大振幅(μ 単位)の常用対数で表したものであるが、これをベースに種々微修正して用いられている。

② 震度

地震の加速度(α)と重力の加速度(g)との比 α/g で表したものの。

③ 震度階

地震の強さを測る尺度。気象庁の震度階(最新)は表-18のとおりである⁹⁾。

(2) 断層

地震は地下における断層の発生によって生じる。この断層は、地震の規模が比較的大きく、かつ、地下数km程度の浅い部分で発生した場合、地表にも現れることがある。このように地震によって地表に現れた断層を地表地震断層という。また、過去に断層活動を生じたことがあり、将来にも活動が予想される断層を活断層と呼んでいる。

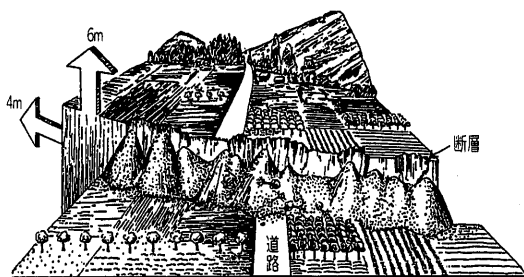


図-14 濃尾地震(1891, M=8.4)によって形成された根尾谷断層。地震により水平4m、垂直6mの変位(左横ずれ)を生じた。当該地は現在国指定の特別記念物となっており、地震断層観察館が建設されている

阪神大震災で生じた淡路島の野島断層はその典型的な例である。もっとも新しい例では、1998年9月に岩手山南西部で発生した地震により、雫石盆地に小規模な活断層と思われる地変が生じた。北伊豆地震(1930年)においては丹那断層を境に東側のブロックが北側へ、西側のブロックは南側に移動し、当時建設中の丹那トンネルの導坑が数mずれた(丹那隧道工事誌によれば、西側のブロックが水平に南へ約2.4m、鉛直に約0.6mほど沈下したとされている)。図-14は1891年の濃尾地震の際に形成された根尾谷断層の変位を示したスケッチである¹⁰⁾。この変位は、樽見鉄道の水鳥^{みどり}駅近くに造られた地震断層観察館で見学できるようになっている。

(3) その他の地殻変動

断層以外にも、地殻変動の結果は様々な形で現れる。関東地震における房総・三浦・伊豆半島地区の海岸の隆起などの地殻変動は有名な地変である。また、精密な測量や、段丘面の調査などの地形学的な方法によって判明する地殻変動もある。例えば、山形県や新潟県などで見られる活褶曲などがそれにあたり、現在でも褶曲変形が累積していることがわかっている。

(文責: 佐々木靖人・建設省土木研究所地質研究室主任研究員/大島洋志・国際航業(株)取締役技術センター長/指導: 勸米良亀齢・九州大学名誉教授)

参考文献

- 1) 藤田至則・小室裕明・角田史雄・加藤碩一・西村敬一: 新しい地球観を探る, 愛智出版, 314p, 1993.
- 2) 瀬野徹三: プレートテクトニクスの基礎, 190p, 1995.
- 3) 池田和彦・大島洋志: わかりやすい土木地質入門(改訂8版), 土木工学社, 224p, 1997.
- 4) 久城育夫・荒牧重雄・青木謙一郎: 日本の火成岩, 岩波書店, 206p, 1989.
- 5) 水谷伸治郎・斉藤靖二・勸米良亀齢: 日本の堆積岩, 岩波書店, 226p, 1987.
- 6) 島津光夫: グリーンタフの岩石学, 共立出版, 172p, 1991.
- 7) 池田俊雄: 地盤と構造物 自然条件に適応した設計へのアプローチ, 鹿島出版会, 7, 1975.
- 8) 国立天文台: 理科年表, 丸善, 1054p, 1998.
- 9) 巽好幸: タヒチを造った超巨大ブリューム, 朝日ワンテーママガジン 11 最新・地球学, 朝日新聞社, 254p, 1993.
- 10) 小藤文次郎原図, James Gilluly, A. C. Waters, A. O. Woodford: Principles of Geology.
- 11) 狩野謙一・村田明広: 構造地質学, 朝倉書店, p42, 1998.

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(4)

第I編 トンネル工事に必要となる基礎的地質学(3)

「応用地質学」連載講座小委員会

6. 地質構造

6-1 地質情報の特徴

序編第1章で述べたように、地質学は宇宙の始まり以来の時間の流れの中で、地球上のあらゆる物質が(生物も含めて)どのような変遷を経て現在のような空間分布に至っているかを解明することを根本的な目的としている。そのため地質学はその体系の中に物理学、化学、生物学、天文学など他の学問分野の知識も動員するような総合的な学問となっている。このような地質学と土木工学との接点は、土木構造物が建設される場が大地であり、また建設材料にも大地から得られるものがあるということにあるのはいうまでもない。しかし、そのことだけであれば土質工学や岩盤力学のような工学的な分野が既にある。それでは地質学の理学的要素が土木工学においてなぜ重要な役割を演じることになるのだろうか。

それは、地質学が他の科学分野と異なるもっとも大きな特徴ともいえる「物質の空間的連続性を扱う」体系を持つということにあると思われる。土木においてはどのような物性を持った物質がどこにあるかを知ることが設計・施工にあたっての重要な情報である。施工時において異なる物性を持つ岩盤が出現する場所、タイミング、順番、延長などは、計画・施工に直接影響を与える。一方、地質学においては、ある物質がなぜそこにあるのか、なぜそのような姿・構造をしているのかという因果関係を明らかにし、その過程を復元することが重要な作業となっている。したがって、物質がどこにあるかということはもっとも基礎的な情報である。それでいながら、実はそれを知ることが大変に難しいために、地質学は野外の事実とさまざまな論理を武器にして物質の空間的連続性の把握に務めているのである。

地質現象はそもそも非常に複雑なものであるが、日本はとくに地質条件が複雑な状況にある。これに対して人間が地質の空間的連続性を把握するために手にできる情報は相対的にきわめて限られている。人間が他の天体を

訪れることが可能な時代に、ある地域の足下1kmの岩盤状況を完全に知りつくすための現実的手段はないといってもよいくらいである。通常的手段で知り得るのは基本的に点の情報であり、それのみではある地点の地盤条件がどのように空間的に連続しているかは無限の可能性があるとも言える。また、地下探査をかなりの密度で実施しても未解明な部分が残ることが多いのは、得られた情報の精度や確かさが不均質だからでもある。これらの違いを客観的に評価することも簡単ではない。さらに地質学が目標とするところの、物質の「空間配置の歴史的過程」については、隅々まで詳細に復元されているわけではなく、未解明の部分が多い。

しかし、このような情報の不連続性については、地質分布の幾何学的特性を表している地質構造を把握することによって情報を補い、分布のパターンの可能性を限定することができる。また、未解明で不確実な要素に対しては、多くの地質学的法則や経験的な事実が実用的な解決手段として有効になる。わずらわしく思える地質時代の用語などにしても、経験的に知られるさまざまな地質学的事実の指標という意味を持っており、現場で直接データを得ることが困難な状況においても有益な工学的情報をあたえるための論理的根拠となっている。こうした手段を組み合わせることにより、未知の要素が多い地質に対しても必要以上の調査をせずにすむのである。

また、地質学の体系の大きな特徴として、定性的なデータ・表現が多いということがある。これは地質情報の複雑さを物語っているものだが、定性的であることが必ずしも不確実であるというわけではない。多くの場合は多次元的情報を簡便に表すために用いられているのである。これらの多次元的情報は現象の複雑さに対して情報量が限られており不確実な情報も多いということを補うために役立っている。

上述したような地質学のいくつかの特徴を考慮すると、地質調査の調査精度の善し悪しは単なる調査数量の多寡や手法の新奇性、調査項目の多様さで決まるものではない

い、重要なポイントは地質学的考察の論理を展開するのに十分な内容を持つデータが得られているかどうかということである(2-4参照)。そして、もちろん調査目的を達成するために取得すべきデータをいかに少なくすませるかについて地質学的に考察することも、工事の経済的効率性をよくするためには重要な課題である。

6-2 地質図の特性

地質学におけるもっとも基礎的な情報である物質の3次元的空間情報は、地質分布として地質図に表される。地質図は通常は1枚の平面図として手に取って見ることができる。しかし地質図は本質的には地下における物質の3次元的分布を観察(観測)事実と地質学的法則・経験則、そして幾何学的論理を武器にして把握した結果であり、基本的には3次元図として情報を読みとるように描かれている。また地質図には物質分布の歴史的経緯、例えば、断層で切った切られたの関係など、時間的前後関係や地層形成の年代などの情報も含まれている。したがって地質図は時間次元をも含んだ多次元図であるといえる。地質図に表現されている地質境界などの境界線は、物質分布の平面パターンを表すというよりも、立体的な面構造と地表面との交線が平面に投影されたものとしてみるとよい。また地質図は本質的には3次元立体情報を理解するためのものであるから、本来の目的で使用する場合には地形図(標高の情報が示されている)上に投影されたものであるべきである。

今日では、地質図の3次元化もできるようになりつつあり、技術者が地質構造を直感的に理解しやすいような表現法が試みられている(図-15)。

地質図を作成するにあたっては幾何学的論理はかなり重要な役割を演じているので、大学の地質学の講座においては「地質図学実習」などは測量学の単位になるほどである。しかし、地質図学はもともと地層が整然と積み重なり変形の少ない北アメリカやヨーロッパの平坦地地質を対象として確立されたものである。すなわち基本的

に連続する「板」と考えられる地層が傾いたり曲がったりしたときの空間分布を把握するための手段であった。しかし、日本においては地層はむしろ整然としていないことが多く、「板」ではなく「塊」あるいはモザイクとして捉えねばならないこともある。このような場合は地質図学で用いる通常の幾何学だけでは対処できず、「塊」を他と区分している物質境界を丹念にたどり、全体の構造を把握しなければならない。

本稿では、地質の空間分布を理解するための手段として重要な地質構造について解説することが目的である。以下では、地質構造の概念、および地質構造を認識するための基本となる地層区分の概念について述べ、次に比較的簡単な地質構造、さらにやや複雑な地質構造について述べる。

6-3 地質構造の概念

地質構造とは、ある領域を占める岩石の構造的な特徴を表すものであるが、この概念が実用的に重要であるのは、まず地質構造が物質分布の概要を規定し、他と区別ができる部分を空間的に決めることができるものだからである。このような「部分」は地質学の用語では構造单元という。構造单元にもさまざまなスケールのものがあるが、この内部では、

- ① 岩質や岩相が連続している
- ② 変形機構が共通である
- ③ 形成時期が共通である

のような特性がある。

構造单元ごとの境界ではこれらの特性の著しい不連続が面として認識される。また、構造单元の内部においても、薄く平面的な広がりを持つ地層の1枚1枚などは面構造を形成している。このような面の構造と並んで地質構造で重要なもう一つの要素は線の構造である。これは破碎された岩片や鉱物が並ぶ向きや、地層が曲がっている軸などがつくる地質の内部構造である。地質調査ではこのような不連続面の面構造や地層内部の線構造を見出すことが重要な作業であり、その情報にもとづいて物質の立体的な空間分布を復元する。

なお、地質構造の大きさの尺度は大・中・小という3区分程度に分けられるのが一般的であり、例えば、次のような区分法が知られている(Turner and Weiss, 1963による)。

- ① 大構造：目視程度では全体を把握できないスケールの地質構造
- ② 中構造：目視(肉眼視)で観察、記

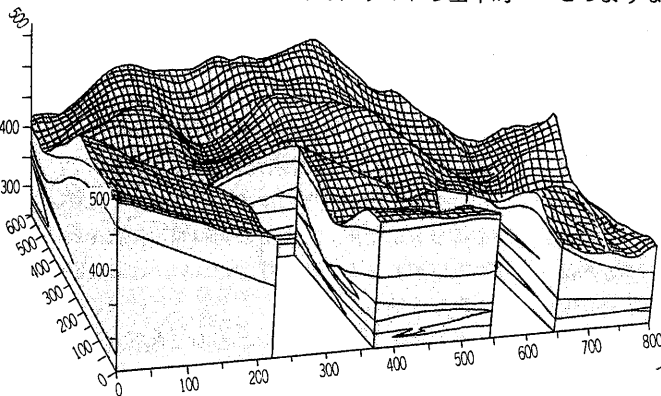


図-15 3次元情報として視覚化した地質図

載できるような地質構造

③ 微構造：顕微鏡などの高倍率の機械で観察ができる地質構造

また、地質構造には地層が形成される過程で獲得した構造—初生構造とその後の変形作用によって獲得した後生構造とがある。

地質構造の大きさの概念は、地質調査で得られたデータがどのスケールの現象を検討するに足るものなのか、また目的に応じてどのような調査をどこで実施すればよいかを判断するのに不可欠である。また、地質構造形成の前後関係の認識は地層変形の機構・過程の概要を理解するために重要である。

地質構造を知ることが、土木工学のうえで重要であるもうひとつの理由は、岩盤にかかる応力の状態が地質構造によって規制されることがある点である。後述するようにトンネルは地層の傾斜や曲がりかたとの位置関係によっては大きな偏圧を受け地下水の挙動も異なってくる。

ところで地質調査報告書の中では、ある地域の地質を記述する際に基盤という用語がよく用いられる。基盤に対立する概念は被覆岩(層)である。基盤の概念は地質学の発祥の地であるヨーロッパで確立されたものであるが、日本においては一般に「著しい不整合を境界とする下位の岩盤で、上位の地層が形成される以前に地質構造が形成されているもの」として用いられている¹⁾。基盤と被覆岩(層)との関係は相対的のといつてよい。地震防災の分野などではモデル地震動を用いて地表での地震動予測を行う際に、表層部の地層と区別して工学的基盤という概念を用いる。いずれにしても基盤は被覆層との間に著しい物性の不連続があることを示している。

6-4 地層の区分と時間

地質名の区分についてはすでに第4章で解説したが、ここでは地質構造を認識するためのもっとも基本となる地層の区分の概念について簡単に述べる。地層区分の最小の単位は地層面で上下を区分することのできる単層である。地層の広がりには有限であり、その立体的な姿は形成の場に依じた不定型な輪郭を持つ薄いレンズが重なり合っている様子を想像するとわかりやすい。地層の広がりの規模は岩相によって異なるが、単層が数10km程度の広がりを持つ例も知られている。地表地質調査において地質の分布を把握するためのデータは、まず単層を認識しその空間情報を取得することに始まる。しかし、地質図上に「○○層」として命名表記され、地質境界線を持って色分けで示されるのは一般には複数の単層の集まりである。この単層の群は基本的には岩相の違いでひとまとまりに区分されるが、空間的な広がりや時間的間隙の程度にもとづく総合的な判定により統合され

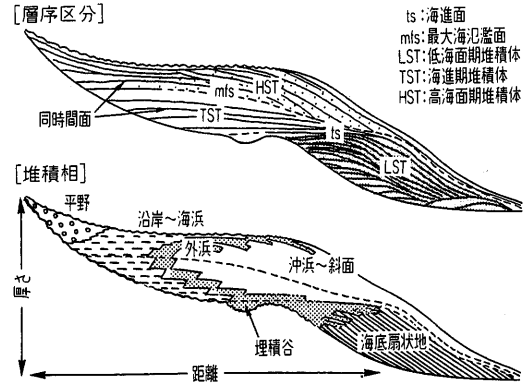


図-16 1回の海進・海退で形成された地層の累重構造のモデル²⁾(Haq et al. 1998 による)

たものであるから、内部の岩相は全く均質ではないし、縁辺部では漸移的な性質を示す場合もある。

岩相の境界としての地層面が認識できるということは単層が形成された期間中の環境がほぼ同じであったことを示す。しかし、単層の上下を限る地層面は全く同一の時期に形成されるのではない。例えば、海岸に近い場所では海面の相対的上昇(海進)、下降(海退)によってできる地層の内部は図-16のようになり、ある時点に形成されている地層の表面の広がりである同時面は、岩相にもとづく地層境界とは斜交している。

6-5 傾斜層

地質調査の基本は、地質の境界面の面構造を追跡しその立体的な形状を正確に把握することである。地質の面構造は「走向」と「傾斜」の二つの要素で確定できる。

走向とは地層面と水平面とが交わる交線の方向をいい、傾斜とは走向に直行する断面上で地層面と水平面のなす最大傾斜角をいう。地層が自然に堆積した場合、1地点で見ればほぼ水平なので、これがそのまま岩石化したものは水平な地層になる。しかし、現在みられる日本の地層は新しい時代の洪積層、沖積層を除いて傾斜していることが多い。これは地殻変動に起因したもので、一般に古い時代の地層ほど数多くの変動を経験しているため、傾斜がきつくなったり、一様な傾斜ではなくなったりしたものが多い。

地質調査において地層面が良好に認識できる場合はクリノメーターによる直接計測が行われる(図-17)。クリノメーターは測量機器の中でもきわめて単純なメカニズムを持つものだが、1地点の傾斜層の情報を得るものとして不足があるというわけではない。むしろ計測する条件の最適な地点、すなわち、できるだけ求めたい構造がよく把握できる地点を選ぶことのできる人間の目視と判断という高精度な機能が付加されているというべきであろう。

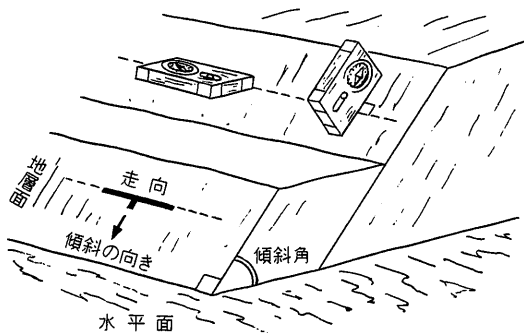


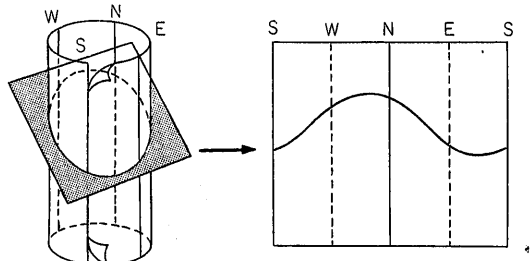
図-17 地層の走向傾斜とクリノメーターによる計測⁹⁾

地層面での走向傾斜の直接計測ができない場合でも、同一の地層の出現地点を確認できれば、3点による1平面の決定という手法で地層の走向・傾斜を定めることもできる。また、地表部で露頭が直接観察できない場合にはボーリングによる調査からも地層の傾きを求めることができる。ボーリングコアは一般に回収するときには回転しているので、1本のボーリングから傾斜の向きを求めることはできない。しかし、同一の地層がはっきりと確認できるのであれば3本のボーリングで地層の走向傾斜を決定することができる。また、2本のボーリングで同一の地層とその傾斜が確認された場合でも、地層の走向と傾斜の可能性を限定することができる。なお、今日ではボーリング孔内を映像によって直接観察することもできるようになってきた。コアを採取した残りの孔壁部分の画像から方位を定めることもできるし、層理や節理、断層面といった面構造の立体的構造をも容易に把握することができるわけである(図-18)。

いずれにしても計測されるのは局所的なデータであるから傾斜層の情報扱う際には次のような注意が必要である。地層面は局所的には平滑に見えても巨視的には曲面であったり起伏があったりするのが普通である。きわめて限られた計測点でのみ得られたデータは大まかな傾

・ボーリング孔と不連続面との切り合い

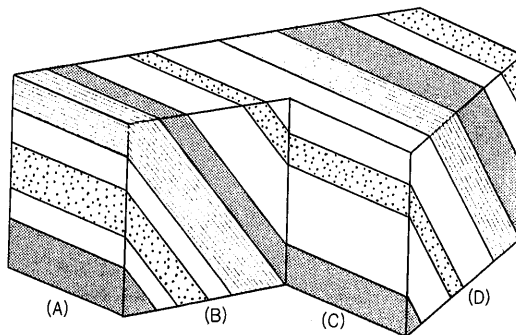
・展開図



節理・亀裂面等の不連続面

ボーリング孔壁展開画像から不連続面の位置、走向傾斜、開口幅などが把握できる。コアの採取が困難な箇所も把握できる可能性が高い。

図-18 ボーリング孔内の映像による面構造の計測



(B)は真の傾斜が見られる。(A),(C)は走向に平行に切った面であり、見掛けは水平層に見える。(D)は両者の中間で真の傾斜よりややゆるく見える。

図-19 切り取り面による地層の傾斜の見え方の違い⁹⁾

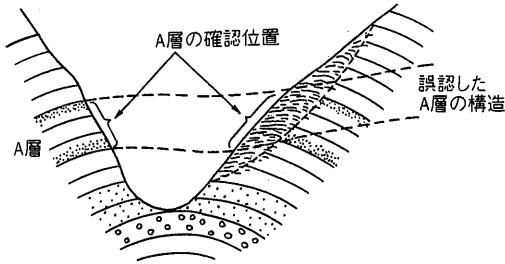
向しか表していない場合もあるし、逆に局所的な傾向を反映しているだけの可能性があることに注意する必要がある。このような場合、地層面の構造を詳細に把握するには多数の計測点が欲しくなる。しかし多数の計測点を一様に分布させる必要があるかどうかは、全体の構造やその中の局所的な構造を把握しつつ決めることである。したがって、調査を能率よく進めるためにも地質調査は概査から精査へと段階的に進めることが望ましい。

なお、傾斜層はこれを切る面の角度によって真の傾斜を表さないことがある。走向に直角でない角度で切った場合の傾斜角は真の角度より緩く、走向に平行に切った場合には見かけ上は水平層に見える。したがって、切り取り面や地質図を見るときにも注意が必要である(図-19)。同様な意味で、地表近くで地層が重力の影響により変形を起こしていることがある。地層のクリープと呼ばれる非構造的な地層変形の一つであるが、これを真の地質構造として誤認することのないように注意する必要がある(図-20)。

地層の走向と傾斜を知ることは、地層分布の空間的連続性を把握し、トンネルなどの掘削延長に対する岩盤区分の比率を予測したり、斜面における岩盤の安定性や地層中の流体の挙動を予測するのに重要である。傾斜した地層の走向方向に対してトンネルが斜交する場合には覆工は偏った地圧を受けやすい。また、いわゆるすべり目(流れ目)の場合は切羽の自立性が問題となることが多く、刺し目の場合は天端からの突発湧水となることもある。

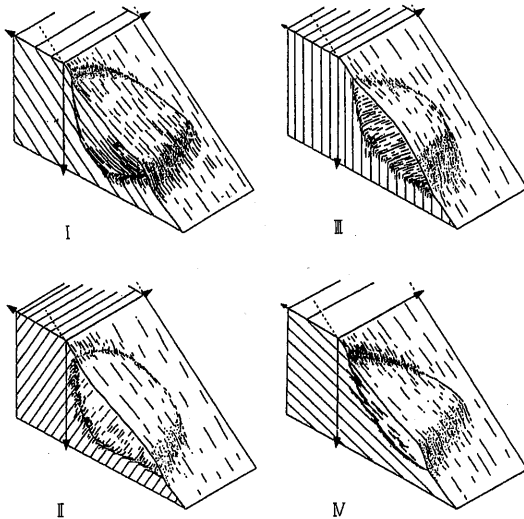
6-6 整合・不整合

地層には特別の場合を除いて下位の地層ほど古く、上位の地層ほど新しいという「地層重畳の法則」がある。地層は砂や泥の粒子が堆積してできるが、この堆積作用が連続して行われる限り、地層には古いものからより新



表層クリープの存在により褶曲構造は見落とされ、
 一樣な傾斜層と誤認する。そのためトンネル掘削中に
 遭遇する実際地質は予測と大きく異なってしまう。

(1) 岩盤表層部の変形と地質分布の推定の誤り



面構造の傾斜と斜面の関係に応じて岩盤
 クリープの性状のちがいがみられる。

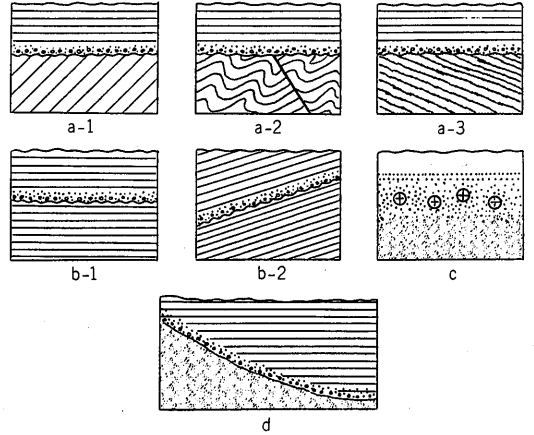
(2) 岩盤クリープ性褶曲の模式図

図-20 岩盤クリープによる岩盤表層部の変形⁹⁾

しいものへと時間的な連続性が刻まれている。堆積作用
 は全く均一に無限に行われるわけではない。地層面がで
 けることは地層の形成の環境の変化や堆積の小休止があ
 ることを表している。しかし、このような変化が小規模
 で大きな時間の間隙を示さない場合、上下の地層の関係
 は「整合」であると呼んでいる。

このようにしてできた地層が地殻変動で隆起したりし
 て堆積作用が一時中断され、この間に風化侵食作用を受
 けた後、再び地盤が沈降し、堆積作用が始まった場合に
 は、隆起前の地層と沈降後に形成された地層との間には
 時間的な間隙があることになる。このような地層の関係を
 「不整合」といつている(図-21)。

地層形成に時間間隙があれば、地殻変動によって古い
 地層が大きく傾斜するのに対して新しい地層の傾斜の程
 度が小さいことも起こる。不整合面は侵食作用による凹
 凸や、風化作用による下位地層の赤褐色化などが見られ



- a : 傾斜不整合(1 : 傾斜層を水平層が覆っているもの。2 : 断層・褶曲作用を受けた地層を水平層が覆っているもの。3 : 変成岩を水平層が覆っているもの—無整合とも呼ぶ)。
- b : 平行不整合(1 : 上下とも水平層。2 : 上下とも傾斜層。つまり、不整合形成後、傾動が起こったもの)。
- c : 無整合の一種(火成岩と被覆層の間に火成岩の風化残留堆積物が介在するもの)。
- d : アバット(不整合面に沿って基盤の斜面崩壊による粗粒碎屑物が卓越していることが多い)。

図-21 整合、不整合⁹⁾

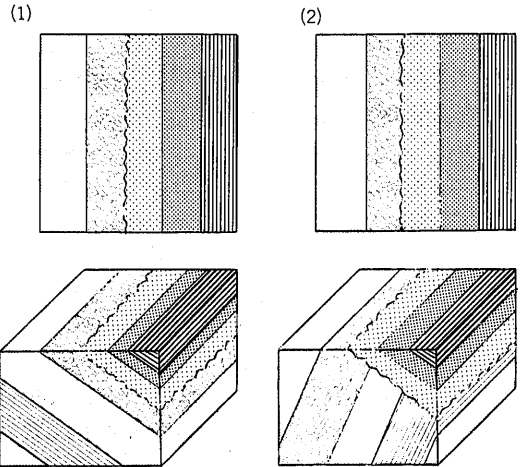


図-22 不整合関係の立体的構造と平面における見え方

ることもある。また不整合面のすぐ上位の地層はしばしば礫岩からなっていることが多く、これは基底礫岩と呼ばれている。

不整合面もまた3次元的な立体構造を持っているので、地表面あるいは一つの露頭面レベルでは同じように見える不整合関係も、立体的にみると異なっている場合がある(図-22)。また不整合面が巨視的にみた場合にどのような形状であるか、あるいは不整合がどのような成因で生じたかについて目に見える直接的な証拠で確認することができず、地質層序を考察することによって推定しな

ければならない場合もある。不整合面の全体の構造は1地点の露頭での計測だけでは把握できないことが多く、広域的な地質構造を考慮しつつ複数の地点で確認しながら追跡するという作業が必要である。

土木的観点からみて不整合が重要な意味を持つのは、不整合面を境にして地質の物性が急変することがあることと、その境界面が地層境界面に比べ不規則で起伏を持ち複雑な形状をしていることである。沖積平野の軟弱層とその下位の支持層や基盤との境界をなす不整合面が起伏に富む場合は、構造物の基礎となる杭の長さもそれに応じたものでなければならない。また不整合面の直上には礫層や崖錐など透水性の高い地質が分布することも少なくない。したがって、地下水の集中や強度の異なる地質の出現に対して予測しなかった対応が必要になることがある。

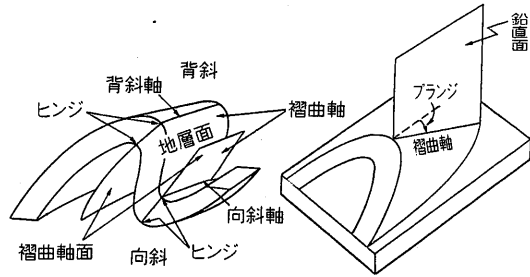
6-7 褶曲

日本のような地殻変動の著しい地域では、地層が著しく変形して単に傾斜するだけでなく波状にうねることがある。これは褶曲と呼ばれる地質構造である。国内外を問わず山岳地帯にはさまざまな規模の褶曲を見ることが多いが、圧縮応力場で著しく隆起したいわゆる山脈には著しい褶曲構造が認められる。国内でも山脈を横断する長大トンネルが建設されるようになった今日においては、飛驒山脈や赤石山脈などの典型的な山脈をはじめとして、褶曲構造に伴う土木工学的問題に遭遇する機会も少なくない。

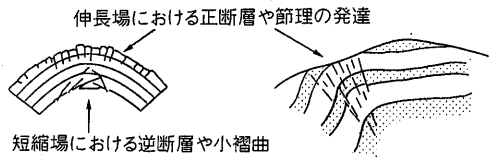
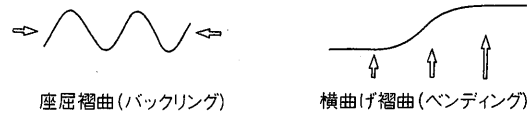
褶曲は面構造が曲がった形状についていうが、その成因で区分すれば、広域的な地質構造を形成するような力(造構力)によるものと局所的に主に重力によって形成されたものがある。後者には固結度の低い状態の堆積物が海底で地すべりなどを起こしたときに生じるスランプ褶曲と、固結した岩盤が斜面をゆっくりと移動(岩盤クリープ)するときに生じる褶曲がある。

褶曲のうねりが層位的な上位に向かって山状になった部分を「背斜」といい、谷状になった部分を「向斜」という。これらの山や谷の曲率が最大になる部分を連ねたものを褶曲軸(背斜軸、向斜軸)と呼ぶ。褶曲軸は鉛直方向に傾いていることもある(図-23)。褶曲は一般に複数の褶曲軸を持つが、褶曲の波長が大きい場合や褶曲構造の端部では波状の変形というよりは一つの軸を持った緩やかな撓みしか認識できないこともある。このような構造は撓曲と呼ばれている。

褶曲構造にもうねりの波長が数 km から数 10km、数 100 m から数 km、数 cm から数 10m およびそれ以下の顕微鏡で認識できる規模などのさまざまなスケールがある。また、褶曲は階層的な構造を持ったり、大きな構造

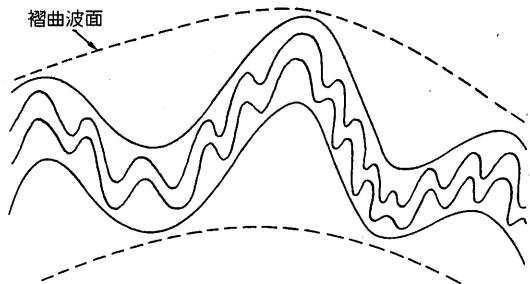


(1) 基本的な構造



(2) 褶曲を形成する外力と岩盤のひずみ
図-23 褶曲の構造

(A) 複褶曲



(B) 階層的な構造を持つ褶曲

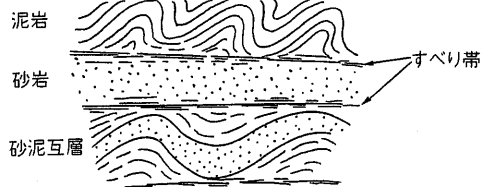


図-24 階層的な構造を持つ褶曲構造

の中に小さな構造を持つことがある(図-24)。このような場合には露頭観察のレベルで観察できる地層の傾斜などは全体の褶曲構造を表していないことがあるので地層の厚さや出現位置の把握を誤ることがある。

土木的観点からみた場合、褶曲構造があると物質分布が複雑だということがまず問題となる。地層が単純に傾斜した構造である場合には地質分布の立体的構造を復元することは困難ではない。しかし褶曲構造のあるところ

では、褶曲の規模や形態を3次的に理解しないと物質の分布位置を把握することが困難になる。著しく褶曲した地層は上下(地層の新旧)が逆転していることも少なくなく、先述したような地質学的論理で空間位置情報を補う際に判断が困難なこともある。

また褶曲に伴って岩盤が脆弱化していることも問題となる。褶曲は基本的には地層の構成物がさまざまな規模の破断面によって系統的にずれているものである。地層の岩質は均一ではないため、岩石の延性度(破断せずに流動する程度)と、圧縮強度の違いにより褶曲の様式にはさまざまなものがある(図-25)。

変形の際には小断層や層面間のすべり、層の内部の割れ目などが発達し、褶曲の程度が著しいほど破断面は多くなる。褶曲が限界に達すると圧縮応力場における地層の短縮はせん断面を使ったすべりによって担われるようになり、褶曲の構造を切るような断層も発達する。例えば、赤石山脈においては西側ほど褶曲が著しく、東側の比較的ゆるく褶曲した地域と比べて岩盤の破碎の程度が大きい。

また工事が難航した新潟県の鍋立山トンネルも第三紀層の背斜構造にかかわって存在した膨張性地山が原因とされている。褶曲したときの変形に伴って岩石の物性が異なることもあり、同じ地質でも褶曲の軸部と翼部では強度が異なるために地すべりの発生が集中すると考えられる例もある。

なお、岩盤クリープに伴う褶曲は層状になった地質や面構造の発達した地層で起こりやすく、表層部での地すべりや岩盤崩壊などの斜面災害と深い関係があるので注意を要する。

6-8 断層

断層は、ある面を境として両側の地層が相対的に変位したその面のことをいう。地質学的には変位の量の大小は問わず肉眼視できる程度のものであれば断層というのが普通である。また、その成因について明確な定義はないが、一般的には地殻内部にはたらくせん断力によって生じたものをいうことが多い。しかし、小規模な断層は表層部の現象である地すべりや山崩れによって形成されることもある。

概念としては断層は面であるから、時々誤解されるような「〇〇断層という層」はない。しかし、断層は破断面のみであることは少なく、小さな規模の破断面の集合体からなる破碎帯を形成していることが多く(図-26)、断層破碎帯と呼ばれるのはそのためである。破碎帯は破断面が集中するだけでなく、断層角礫岩や細かく砕かれた断層粘土などの特有の「岩」を伴う。これらは断層岩と呼ばれ、堅く固結したものもあるが固結度を失ったも

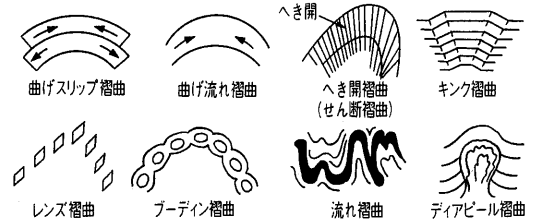


図-25 機構の違いによる褶曲のタイプ⁷⁾

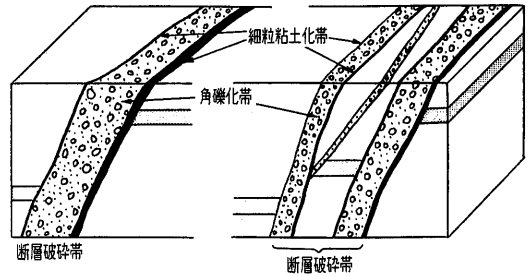
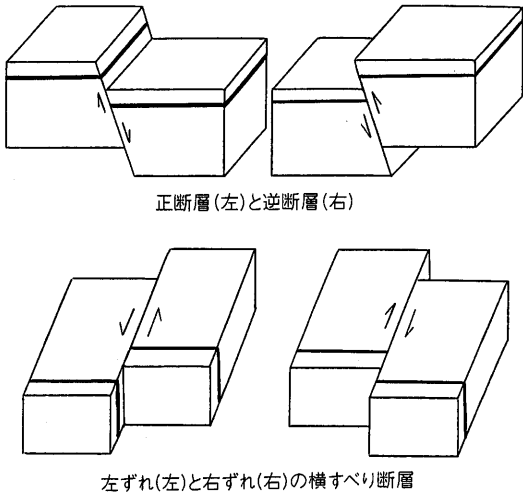


図-26 断層に見られる断層破碎帯⁸⁾

のもある。大きな断層では断層面に沿って砕かれた岩石が再結晶し圧砕岩と呼ばれるち密な岩石を形成していることがある。

土木的観点からみると断層は不整合面と同様に物質の不連続境界であり、地質の分布位置を規定している点が重要である。断層は地層形成の初生的な構造とは無関係に生じるので物質の変位に関する幾何学的な検討により空間的な構造が把握できる。断層の露頭が発見できず、移動の方向が直接確認できない場合には断層を挟んで分離している地層面の相対的な位置関係から断層の構造を推定することも行われる。断層面が傾斜している場合、断層面に沿って上盤(断層面上側にある岩盤)がずり落ちたような形になっているものを「正断層」といい、逆に下盤(断層面の下側にある岩盤)が潜り込んだような形になっているものを「逆断層」という。上下の変位よりも水平方向の変位が卓越する場合は横ずれ断層といい、ずれの方向によって右ずれと左ずれに区別される(図-27)。実際には断層のずれは多少とも上下および水平方向の双方の成分を同時に持つ。

さらに、断層が問題とされるのは、断層破碎帯自体の強度が低いことと断層破碎帯によって地下水の挙動が規制されている点である。断層の形態からして正断層は引張り破壊によるもの、逆断層は圧縮破壊による変位といえる。したがって、正断層の場合は開口亀裂の多い破碎帯が、逆断層の場合はぐしゃぐしゃに圧縮された断層粘土を伴う破碎帯となっていることが多く、土木工事において岩盤の挙動も異なってくることが多い。地表付近においては風化によって断層破碎帯の周囲の地山のゆるみがさらに強調され、亀裂が開口して透水性が高くなる場



正断層(左)と逆断層(右)

左ずれ(左)と右ずれ(右)の横すべり断層

図-27 断層の種類

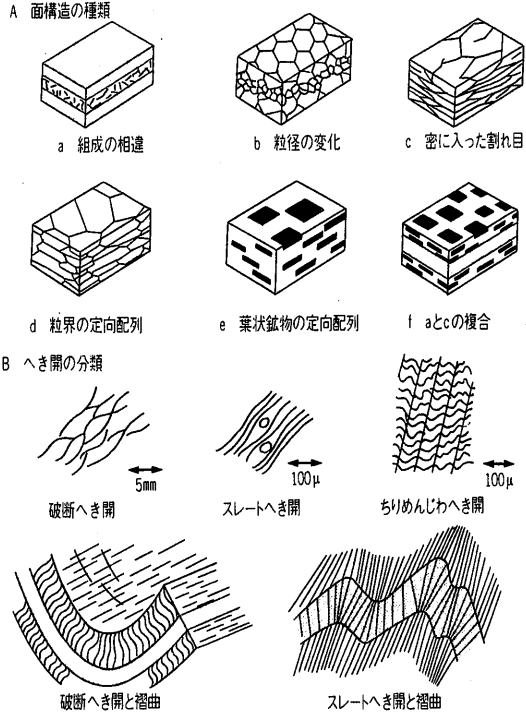


図-28 岩石に見られる面構造とへき開の種類⁹⁾

合がある。

一方、断層破砕帯に伴う断層ガウジ(断層粘土)は一般に不透水性であり、断層を挟んで顕著な帯水層を形成する。これらの特性が断層においては2次元的に広く分布するので、アクシデントの規模が大きく突発的であることが特徴である。トンネル掘削の場合に断層破砕帯が突発湧水の原因となることはよく知られている。

6-9 岩盤中の割れ目

岩盤には層理面や断層面以外にもさまざまな面構造がある。岩盤中の面構造を知ることは、物質分布の状況だけでなく岩盤の力学特性や透水性の異方性を知るためにも重要である。とくに面構造に沿って岩盤がせん断破壊しやすいことは、面構造と斜面や切り取り面との関係によって岩盤がどのようにふるまうかに強い影響を及ぼすものである。

岩盤や地盤がある面を境に相対的に変位したものは断層であるが、ほとんど変位を起こしていない断裂や割れ目もよく見られる。規則性を持たない割れ目は「亀裂」ともいうが、形態的特徴からある程度規則性を持つものは片理面、へき開面、節理面などに分類される(図-28)。

片理の発達したスレートや層状のチャートなどは面に沿って薄く剝割れやすく、斜面においては重力の影響により変形や転倒(トッピング)を起こしやすい。岩盤の表層部で生じたこのような変形は斜面のクリープとなり、大規模な崩壊に発展することも少なくない⁹⁾(図-29)。注意したいのは、地層面と斜面の関係がいわゆる流れ盤でなく受け盤であってもこのような現象は起こることである。

片理やへき開は岩塊レベルあるいは露頭オーダー以下の岩盤性状であるから、工事においては切羽などでの

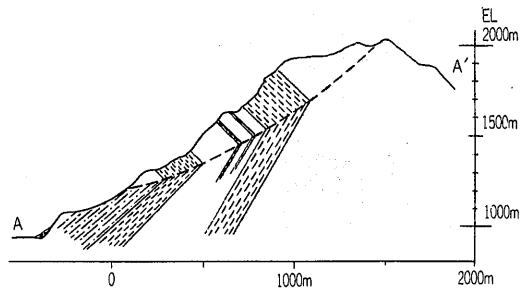


図-29 クリープ域で発生した大規模な崩壊⁹⁾

観察の対象である。これに対し節理は露頭オーダーからさらに広域的な岩盤性状を支配していることがある。節理は広範囲に規則的に発達しているものを系統的節理、局部的で不規則なものを非系統的節理という(図-30)。また、成因から見て造構節理と非造構節理にも分けられる。前者は地殻の応力配置と調和的で最近の地質時代の広域的な応力状態を反映して形成されたものである。後者は溶岩や高温の火砕流堆積物などが冷却し収縮する際に発生する引張り応力によって生じる冷却節理が代表的である。これらは形態により板状節理、柱状節理などと呼ばれることはよく知られている。

その他、岩石の風化によって生ずる風化節理もあるが、土木工事において注目しておきたいのは、掘削などによって加重が除去されると残留ひずみエネルギーが解放されて

図-30 節理系の分類¹⁰⁾

分類名称	形状	特徴	主に出現する岩石	成因
系 板状節理 platy joint		岩体表面に平行に発達、薄板状の岩片を生じる	安山岩質熔岩 (例: 鉄平石)	冷却・固化時の収縮による引張り
統 柱状節理 columnar joint		冷却面に垂直で、六角柱状、板状節理を伴うこともある	玄武岩質熔岩 (例: 玄武洞), 熔結凝灰岩 (例: 層雲峡)	冷却時の収縮による引張り
節 方状節理 cubic joint		岩石を直方体状に分離する3系統の節理系	花崗岩(例: 寝覚床), 砂岩	深部での緩慢な冷却収縮による引張り
理 斜交節理 diagonal joint		顕著な構造方向に菱形状に斜交する2系統の節理系	各種岩石	変動変形で生じる剪断
非 地形性節理 topographic joint, sheeting		岩体の主要な構造と無関係に、地表面にほぼ平行な割れ目で、地表付近ほど密	U字谷や急な谷壁に露出する花崗岩、砂岩などの均質な硬岩で顕著	水河融解や侵蝕に伴う応力解放による引張り
系 玉ネギ状節理 onion structure		玉ネギのように同心球状の薄殻として剥がれる割れ目	泥岩、細粒砂岩、花崗岩、安山岩、玄武岩	乾湿風化による引張りなど
統 放射状節理 radial joint		中心から放射状に伸びる車輪のハブ状の割れ目	枕状熔岩の内部に発達し、玉ネギ状節理を随伴	冷却・固化時の引張り
節 風化節理 weathering joint		形態は不規則で不連続的、地表や系統節理に近いほど密	各種岩石の風化帯	各種の物理的風化過程(とくに乾湿風化)
理 乾痕 mud crack, sun crack		多角~亀甲形で、地面に平行な剥離面を伴うこともある	湖沼底や潮間帯の泥質堆積物	泥質堆積物の乾燥収縮による引張り

火山地域では、火山体のどの部分を見ているかということが重要である。火山体の中心部では火道形成に伴う岩脈や変質帯などが複雑に分布している可能性がある。しかし新しい火山地域の場合は、溶岩流や火砕流、火山灰層などによってつくられた地層の初生的な構造は、山体中心部やカルデラ形成などによる山体の破壊が生じた部分を除けばそれほど乱されているわけではない。やっかいなのは溶岩などが起伏のある陸上の斜面を流下するために、下位の地層とは著しい不整合となり、しかも低所を求めて谷地形を流動するために局所的に複雑な分布形状となる(図-31)。すなわち地層の板状の連続性を頼りにして分布高度や分布範囲から地層を対比するということがひとつの谷の対岸の斜面ですら成り立たない。しかもこのような地層が幾重にも埋没しており、その分布が外観からはほとんどわからないことが多い(図-32)。すなわち火山地域においては堆積岩などは力学的にも水理的にも特性の異なる火山岩が予想外の位置に出現することが問題となる。

これは地表にある火山岩だけでなく地下深所で固結した深成

掘削面に平行な地形性節理が生じることである。これはシーティングと呼ばれる。除荷による節理の発達、地下深部にある岩体が急速に隆起し、侵食により地表に現れた場合にも生じると考えられる。このような節理はある程度広域に発達する系統的節理となる。

6-10 火山地域の地質構造

幾何学的に整然とした地質構造を示さない代表的な例としてはオリストストロームがあるが、その概要は第2章ですでに述べた。ここでは、オリストストロームの内部構造を目にする際には初生的な構造が保存されていることもあり、整然とした地質構造であると誤認することもあることを付け加えておく。

もう一つの代表例としては火山地域の地質構造がある。

岩、貫入岩の場合でも同様である。岩体の外郭は複雑な形状であり、他の岩石との境界付近は不規則な岩脈がいくつも形成されていることも多い。また、深成岩の岩体自体が2次的に取り込まれた形になっていることもある。このような場合は地表付近に認められる岩体も根なしになっていて、トンネルの施工深度には存在しないかもしれない。したがって深成岩体の貫入の順序関係についてもあらかじめよく把握しておくことが必要である。

また火山地域のトンネル工事ではしばしば地熱地帯の存在が問題となる。地下深部に広域的な地熱源があるような地域ではいわゆる火山の姿をした新しい火山から離れた場所にも地熱地帯があることがある¹⁹⁾。これらは地下の高温の貫入岩体に熱源を依存するもので、熱を運搬する

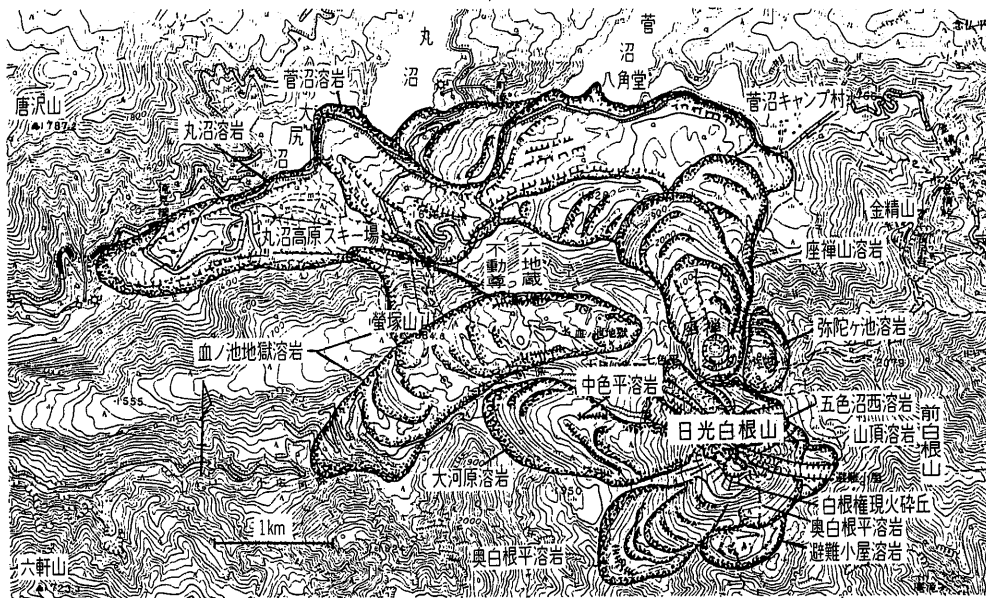
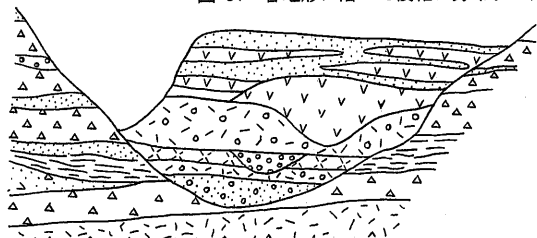


図-31 谷地形に沿って複雑に分布する日光白根山の溶岩(溶岩の分布は文献¹⁾による)



火山地域では火山噴出物が局所的に著しく不連続に分布していることが多い。

図-32 谷を埋めた火山噴出物の複雑な構造

高温の流体は岩盤中の深部亀裂に支配された挙動を示す。
(文責：向山 栄・国際航空(株)技術センター向山研究室長/大島洋志・同 取締役技術センター長)

参 考 文 献

1) 垣見俊弘・加藤碩一：地質構造の解析-理論と実際，愛智出版，pp.1~20, 1994.

2) 増田富士雄：シークエンス層序学入門，Fukadaken Library 2, 1997.
 3) 高安克己・大西郁夫：地学ハンドブックシリーズ・1，地質図学，地学団体研究会，pp.30, pp.98~99, 1985.
 4) 池田和彦・大島洋志：わかりやすい土木地質学入門(改訂8版)，土木工学社，pp.39, 1997.
 5) 千木良雅弘：風化と崩壊，近未来社，pp.78, pp.99, 1995.
 6) 坂幸恭：地質調査と地質図，朝倉書店，pp.51, 1993.
 7) 大久保雅弘・藤田至則：新版地学ハンドブック，築地書館，pp.76~89, 1984.
 8) 木村敏雄編：地質構造の科学，朝倉書店，pp.124~125, 1984.
 9) 金折裕司：甦る断層，近未来社，1993.
 10) 鈴木隆介：建設技術者のための地形読図入門，第1巻，読図の基礎，古今書院，pp.73, 1997.
 11) 高橋正樹・小林哲夫編フィールドガイド日本の火山①関東・甲信越の火山，築地書館，pp.42, 1998.
 12) 須藤茂・向山栄：仙岩地熱地域北部の火山岩の古地磁気と火山活動の推移，地質調査所報告第266号，pp.143~158, 1987.

シールドトンネルの新技術

シールドトンネルの新技術研究会

B5判・285頁 本体価格4,660円(〒380円)

株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16 メイジャー神楽坂
 電話 (03) 3267-2888(代) 振替 00110-8-190072

トンネル ジャーナル

TUNNEL JOURNAL · TUNNEL JOURNAL · TUNNEL JOURNAL · TUNNEL JOURNAL · TUNNEL

油坂峠道路6.3kmが開通

近畿地方建設局と日本道路公団名古屋建設局で事業を進めてきた中部縦貫自動車道油坂峠道路のうち、白鳥西ICから油坂峠料金所までの6.3kmが4月26日開通した。

同道路は、標高差が特徴の道路で、とくに油坂峠から白鳥西ICまでの直線距離約1.7kmに対し、標高差が約290mもあるため、自動車の走行が可能ないように何倍もの距離をとり、ループ状の長大トンネルなどで縦勾配を確保していることになる。

トンネルが約6割、橋梁が約3割と構造物主体の道路で、建設にあたっては、工事用道路の確保や橋脚の基礎杭施工、そして悪い地山でのトンネル掘削など、各種様々な技術を駆使して建設が進められてきた。

今回の開通により、冬季積雪や異常気象時の通行が確保され、走行性、安全性が向上するとともに、油坂峠区間の通過時間が約20分から約7分に短縮される。

寒風山道路開通

四国地方建設局が整備を進めていた国道194号寒風山道路が完成、4月17日開通した。

国道194号は、太平洋側の高知市と瀬戸内側の愛媛県西条市を最短距離で結ぶ幹線道路。しかし、道路線形が悪いうえ未整備区間が多く、とくに寒風山付近では大型車の通行が困難で、冬季は積雪や路面凍結により通行が不可能になるなど、早期の改良が望まれていた。

寒風山道路は、このうちの高知県本川村桑瀬～西条市藤之石間6.4km。四国地方建設局が86年度に権限代行事業として改良工事に着手。

事業の中心となる寒風山トンネルは延長5,432mの四国一の長大トン

ネル。88年度に着手し、94年9月に作業坑が貫通、96年11月に本坑が貫通した。

今回の開通で、現道を利用するのに比べ、所要時間が50分から10分に短縮される。

炭焼田トンネル開通

愛知県土木部が愛知・静岡県境で96年度から建設を進めていた国道257号の炭焼田トンネルが4月30日に開通した。

国道257号は、静岡県浜松市を起点に岐阜県荘川村に至る延長約214kmの主要幹線。古くは「遠州街道」と呼ばれ、地域の発展に貢献してきたが、増加する交通需要に対応して、3県で部分的に改良工事を進めている。

今回開通する区間は、鳳来町下吉田から静岡県引佐町田沢までの延長1.2km。炭焼田トンネルは長さ257m、幅員10.5m。NATMで掘削した。

美馬～井川池田が開通

日本道路公団四国支社が94年10月から建設を進めていた徳島自動車道美馬～井川池田間が開通した。

同区間は、既設の美馬ICから吉野川沿いに西進し、井川池田ICで一般国道32号と連絡する延長21.1km。徳島県中西部と香川県・高知県を結ぶ道路網が強化され、利便性が向上するものと期待される。

今回の開通で徳島道は、供用中の徳島ICで美馬IC間(52.7km)を合わせ73.8kmとなる。さらに残る井川池田～川之江間21.5kmの工事進捗率は64%で、99年度中に同道は全線開通の見通し。

八風山トンネル貫通

日本道路公団が96年から建設を進めていた上信越自動車道の八風山ト

ンネルが5月10日に貫通した。延長4,468mに及ぶ長大トンネルを東・西2工区から掘り進み、予定工期より早く貫通にこぎつけた。

2001年秋には八風山トンネル～碓氷軽井沢IC間で全線が4車線となり、上信越地方の経済・文化交流の促進に大きく寄与するものと期待されている。

双海トンネル貫通

日本道路公団四国支社が建設を進めている松山自動車道の双海トンネルが5月14日貫通した。同トンネルは、松山自動車道の伊予IC～大洲IC間に建設が進められているもので、延長2,566m。

工事は96年6月3日に掘削を開始。爆破掘削方式による補助ベンチ付き全断面掘削工法および機械掘削方式による上部半断面先進ベンチカット工法で工事が進められた。

同区間の8本のトンネル中で最長となるもので、今回の貫通で同区間すべてのトンネルが貫通、開通に向けて弾みがつくことになる。

鉄道公団136億円縮減

日本鉄道建設公団の98年度のコスト縮減率は、直接的施策分で4.51%となった。トンネル掘削への偏心多軸シールド機の採用や、セグメントへの高流動コンクリートの使用などの施策により、136億4,200万円を縮減した。発注工事費は2,888億8,400万円だった。

同公団が昨年取り組んだコスト縮減施策は、①車両基地排水除外設備方式の変更、②駅の対向壁の一体化、③トンネルに偏心多軸シールド機の採用、④鉄道高架橋に新形式のアーチスラブ式を採用、⑤セグメントに高流動コンクリートを使用、などである。

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(5)

第I編 トンネル工事に必要となる基礎的地質学(4)

「応用地質学」連載講座小委員会

7. 地形と地質の関わり

7-1 地質調査と地形解析

土木を対象とした地質調査の報告においては、地形についての記述の割合はきわめて少なく、地質に関する記載の前書きのように扱われていることが多い。地形調査は主に調査の予備段階で行われ、空中写真による判読や地形図から読みとった情報が記載される。しかし調査が進むにしたがって地形に関する記述は少なくなり、詳細調査にいたって土木構造物の設計値に議論が集中する段階ではほとんど扱われることがない。これは従来の地形調査が主に表層物質の概略の分布を把握するか、またはリニアメントを抽出することによって、断層や断層破砕帯の有無を検討することに主眼がおかれてきたためであると考えられる。しかし、地形からはもう少し重要な情報を読みとることができる可能性がある(2-5節の第1項参照)。

地形は地下の地質分布や地質構造を反映していることから、物質分布や水理地質的条件の概要が把握できる。また、地形は岩盤の物理的性質や力学的特性を知るための情報源でもある。これらの静的な情報に加えて、地形から侵食・運搬・堆積過程などの動的な情報を知ることや、変動地形から過去の状況を推定することは、斜面の安定性や地盤の変位や変形について将来予測を行うことの手がかりにもなる。たいがいの地質調査は点の情報や2次元的な断面を示すにとどまり、しかも物性値の読み替えを行った結果が呈示される。これに対して地形は面的な情報であり、局所的なノイズとも言える現象に支配されない地盤状況の全体の傾向を示しているという特徴は他に代え難いものである。

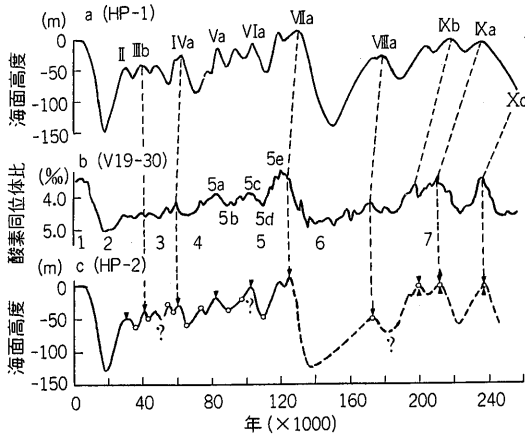
今後は応用地質の分野においても地形から地盤情報を読みとるための解析が充分に行われ、地質調査の重要な1項目として取り扱われるようになることが強く望まれる。今回はトンネル施工上問題となるとと思われる地形と地質との関わりについて、代表的な例をいくつか述べる。

7-2 低地の地形

日本列島が多くのプレートの境界近傍にあり、世界的に見ても活発な地殻変動を続けている地域であることは前に述べた。このことと日本付近が温暖で湿潤な気候であることが相まって作りだした特殊な地形条件は、特に土木建設工事の機会の多い低地・平野の地形・地質の特徴にも顕著に現れている。

低地が形成されるためにはものをためる場所とたまるものがなければならぬ。平野ができるには多量の土砂が河川によって運ばれてくる必要がある。この点で日本においては、隆起の著しい山岳地が海岸から近い距離にあり、多雨によって河川が発達するということが、海岸に広い平野が形成される要因となっている。このような場所は世界的に見ても限られている。地殻変動の緩慢な大陸およびその周辺では、大量の礫や砂などは山地近隣にとどまり、海岸までは急速に運ばれて堆積することはない。乾燥地域では大きな河川が発達しないので土砂の移動が少ない。ヨーロッパや北米大陸東部の平原などでは平地に堆積したいわゆる沖積層は岩盤を薄く被覆しているにすぎない。

また日本では海水面変動の影響の現れ方にも特徴がある。大陸地域を中心に氷河が広く発達した地球上の水が陸地に固定されるために海水準が低下することを氷河性海水面変動という(図-33)。このような海水面変動は汎世界的な現象であり、日本においては海水面が約6,000年前(縄文時代中期)には現在よりも数m高く、約2万年前の最終氷期には現在よりも100~120m程度低下していたといわれている。河川の侵食による谷地形は海水面を侵食基準面として形成される。河川の地形は陸地の地形全体よりも相対的に変化が早く、海水面の変化は河川の侵食、堆積に伴う地形変化の中によく保存されることが多い。日本においては、海水面が低下した場合でも海と山岳との距離が近く河川は急勾配であるために、深く掘り込んだ谷が形成される。すると再び海水面が上昇したときには厚い堆積物が深い谷を埋める(図-34)。海



(a)HP-1: ウラン系列年代値をもとにしたニューギニア・ヒュオン半島における海面変化曲線
 (b)V19-30: 太平洋東赤道海域の深海底コアに含まれる底生有孔虫の示す酸素同位体比の変化(1~5e, 6, 7: アイトープ・ステージ区分を加筆)。酸素同位体比は、 ^{18}O と ^{16}O との比の標準物質からのずれを千分比(‰)で示し、 $\delta^{18}\text{O}$ と表わす。
 (c)HP-2: (b)の変化曲線を参考にして年代補正をほどこした海面変化曲線

(原図は Chappell J. & Shackleton N. J., Oxygen isotopes and sea level, Nature Vol. 324. 1986)

図-33 過去24万年間の氷河性海面変化曲線¹⁾

岸部においてはこのようなことがくり返し行われるので、現在は平坦な海岸平野の地下にも深い谷地形とそれを埋めた厚い未固結の地層が埋没している。

関東平野を例にとると、約12万年前以降の地形変化は図-35のようになる。

7-2-1 おぼれ谷とリアス式海岸

海水面の上昇に伴い形成される海岸地形として、おぼれ谷とリアス式海岸がある。

おぼれ谷とは図-36に示すように、海水面の上昇によって海底に残された旧河谷をいう。この谷は河川や沿岸流による堆積物によって埋め立てられ次第に陸化していく。図-37に示したように、土砂供給の多い主流河川や海岸地帯の沿岸流などにより形成された堆積物が枝谷や小河川の出口をせき止めて湖沼地となったところは軟弱地盤を形成するので、問題とされる地形である。

リアス式海岸は起伏の多い丘陵や山地が沈降してきた地形で、陸側に大量の土砂を供給する大河川がないため、埋め立てられずに海岸線の出入りが残ったものである。長崎県九十九島、先志摩、若

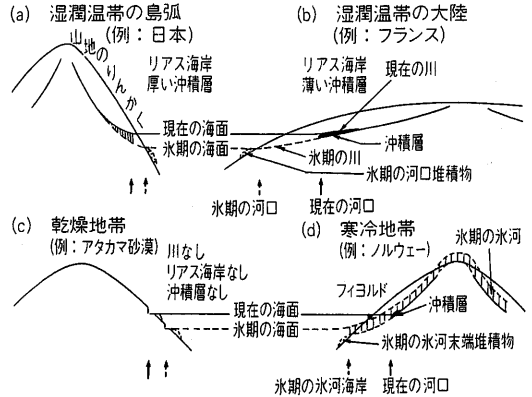


図-34 日本の沖積層と他の地域の沖積層との比較²⁾

狭湾、三陸海岸などはその代表例である。

7-2-2 海岸の堆積地形

海岸では海水のさまざまな流れと波浪によって、固結していない堆積物が移動する。

泥は海流とともに沖へ運び去られ、砂や礫は沿岸流などに沿って移動し、浜堤や沿岸州、海上に長く突き出た砂嘴、尖角州、島が砂嘴や尖角州によって他の陸地と一続きになったトンボロといった堆積地形をつくる(図-38)。これらの名称は地形の種類に与えられたものであり、「砂州」のイメージから構成物質が砂であるように受け取られがちであるが、実際には砂礫や巨礫でできた沿岸

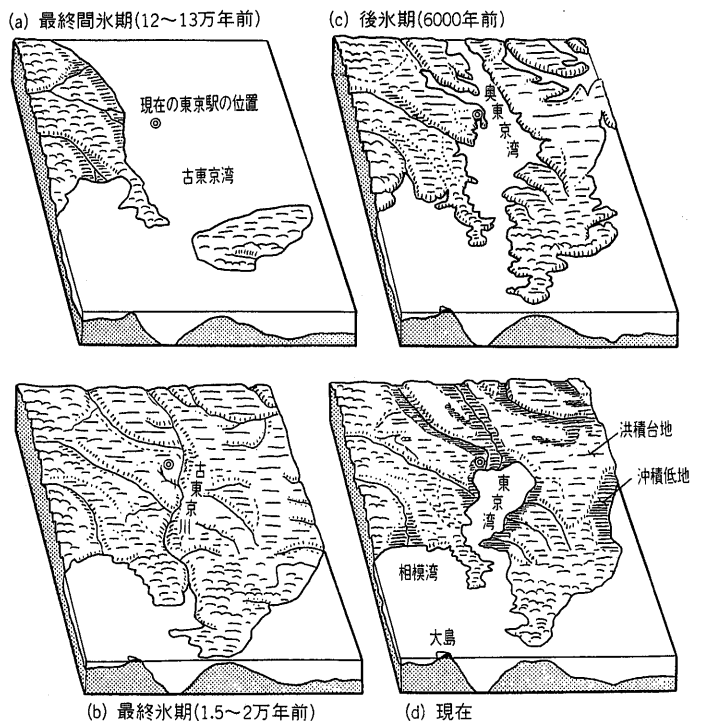
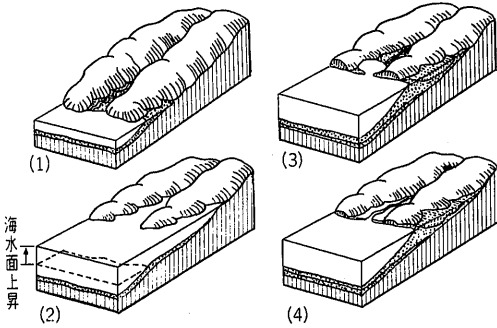


図-35 関東平野南部の過去13万年間の地形の変遷²⁾



- (1) 洪積世水期—低下した海水面と浸食谷の生成
- (2) 洪積世初期—海面上昇によるおぼれ谷の生成
- (3) 沖積世中期—沿岸砂州の発達と入海の湖沼化
- (4) 現在—湖沼より沖積平野へ

図-36 おぼれ谷の地形³⁾(水期からおぼれ谷を経て沖積低地に至る過程)

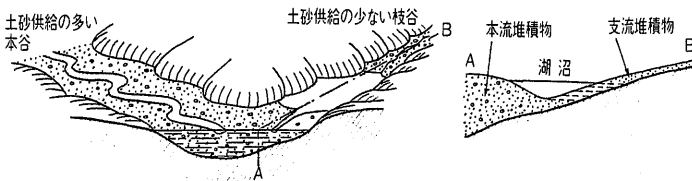
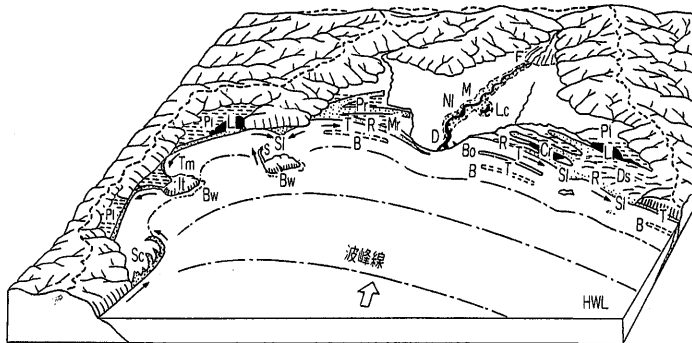


図-37 本流の堆積物によって閉塞された支谷の軟弱な地層³⁾



F: 扇状地, M: 蛇行原, D: 三角州, Pr: 堤列低地, Ds: 砂丘帯, Pl: 潟湖跡地, L: 潟湖, R: 浜堤, Mr: 堤間湿地, Cr: 堤間水路, B: 沿岸底州, T: 沿岸溝, Bo: 沿岸州, S: 砂嘴, Sc: 複合砂嘴, Sl: 尖角州, Tm: トンボロ, It: 陸繋島, Bw: 波蝕棚, NI: 自然堤防, Lc: 三日月湖, →: 漂砂の卓越方向。

図-38 海成低地の地形³⁾

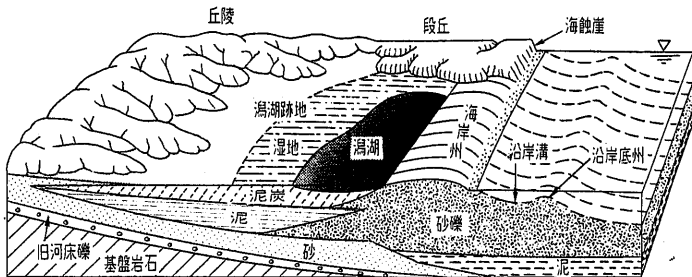


図-39 潟湖と潟湖の陸化⁴⁾

州や砂嘴も少なくない。これらの地盤は一般的には透水性がよいが、浜堤の間の低地の表層には軟弱な泥が分布していることが多い。

砂嘴の例としては三保の松原、北海道根室の野付崎、鳥取県中ノ海の夜見ヶ浜、天の橋立、北海道サロマ湖、尖角州の例としては東京湾の富津崎、海岸トンボロの例としては博多湾の海の中道、八郎潟、函館山などがあげられる。

海岸堆積地形が発達すると外海から切り離された入江や湖が生じる。このような水域を潟湖(ラグーン)という。潟湖は陸側からの土砂の供給によって次第に埋め立てられ陸化する(図-39)。こうしてできた低地は泥炭などを含む軟弱な地盤が厚く堆積する地下水位の高い排水不良地で、土木工事の条件としても非常に不良であり、従来は湿田などに利用されるのみであった。この種の地形の

例としては千葉県九十九里浜、静岡県沼津～富士間の田子の浦とその背後の低湿地、石川県金沢市北方の河北潟周辺などがある。

7-2-3 自然堤防・後背湿地・旧河道

海岸に三角州が形成されるような大きな沖積平野においては、扇状地と三角州との間で河川は蛇行する。河道は通常は安定しているが、洪水時には河道の岸を越えて泥水の氾濫が行われる。洪水をくり返すと河道の両側に比較的粗い粒子からなる堆積物の高まりが連続的に形成される。これが自然堤防である(図-40)。自然堤防の堆積物は洪水氾濫の場によって、砂礫、砂などのほかシルトなどの細粒物からなる場合もあり得る。自然堤防の背後に広がる河道から離れた低平な地帯は、洪水氾濫時に浮遊していたような粘土、シルト、細砂、ときには有機質土や泥炭層などを挟む軟弱地盤からなる排水不良地で、後背湿地と呼ばれる。また、大河川の本自然堤防や扇状地などによって小河川の出口がせき止められ、同様な低湿地が形成されることがある(図-37参照)。蛇行する河道が本川から切り離されて閉じた湖沼となり、さらに土砂によって埋め立てられたものを旧河道という。旧河道の表層は静穏な湖沼に堆積した軟弱な細砂や粘土などからなるが、基底部はやや粗い砂礫などからなる。自然堤防、後背湿地や旧河道の地形は小縮尺の地形図

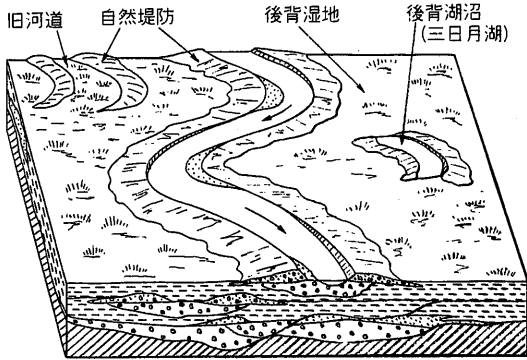


図-40 自然堤防、後背湿地、旧河道の地形と堆積物

ではわかりにくいですが空中写真の判読によって識別できることが多い。

自然堤防が見られる地域では、洪水を考慮した土地利用が進んだ結果、自然堤防の上には古くから交通路や集落が開けたが、後背湿地は排水施設が整うまでは湿地や未利用の湿地であり現在でも水田として利用されていることが多い。しかし現代においては宅地化などの土地改変が進み、土地利用からの微地形の判定も困難になってきた地域が多い。調査にあたっては旧版地形図や土地改変以前の空中写真などによりできるだけ自然の微地形を把握することが望ましい。なお、長い目で見ると自然堤防の位置は移動することもあり、自然堤防の地層と後背湿地の地層、旧河道を埋めた地層とが交差したり重なり合うこともある。

土木工学的には後背湿地の地盤は軟弱地盤であることが多いため、不同沈下の原因となるばかりでなく地下水位が高いことと相まって地震時には液状化しやすいことに注意する必要がある。また、旧河道や埋没した自然堤防の砂礫に富む部分は漏水の原因ともなる。

7-2-4 段丘

河川や湖沼、海による堆積作用と浸食作用がそれまでよりも低い位置で働くような急激な変化があると、それまでに形成された河床面、三角州や海底面などは水面から隔たり、急な斜面によって新しい流路と境界された平坦面を形成する。このような地形を段丘と呼ぶ。段丘の上の面は通常的环境下では冠水しない。浸食作用が卓越した場でつくられた段丘面は浸食段丘と呼ばれ、堆積作用が卓越した場で形成された段丘面は堆積段丘と呼ばれる。段丘面は海岸や河岸に棚状の平坦な地形をなしているのので、地形図あるいは航空写真の判読によって比較的判別しやすい。

段丘の地層は未固結の砂礫層からなる段丘堆積物が基盤岩を不整合の形で被覆した形態となっている。浸食段丘の場合でも堆積物を全く欠くことはまれである。また

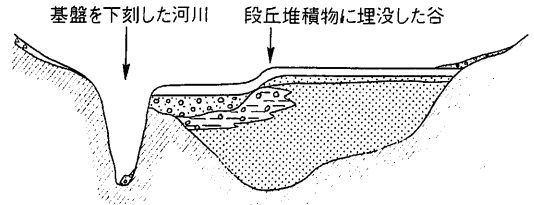


図-41 段丘堆積物に埋没した谷地形と基盤の側壁を下刻する流路(硬く透水性の小さい基盤を下刻した流路は峡谷となる)

段丘堆積物は固結性の低さのために、トンネル掘削に伴い緩み土圧を生じやすい。さらに、湧水があると砂分が流出しやすく、覆工裏に空洞をつくる。とくに基盤岩との境界付近は基盤岩自体も帯水のため軟弱化しており、トンネル施工上問題が多い地質といえる。段丘面は平坦であっても段丘堆積物の下の基盤は起伏があって不整合面となっていることもある(図-41)ので、基盤中に予定されたトンネルが掘削中に段丘礫層に遭遇することのないよう充分に調査を行う必要がある。また、埋没した谷地形に規制された地下水の挙動にも注意が必要である。

7-2-5 扇状地

扇状地は山中を流れる急勾配の河川が急に平地に至り自由通路がとれるようになった場所にてできる。扇状地が発達する条件としては上流からの土砂供給に加えて土砂を堆積させるのに十分な平地があること、さらに堆積したものが運び去られないことが必要である。日本における著名な扇状地のほとんどは、隆起の著しい山地(飛騨山脈や赤石山地、奥羽山脈など)や上流に噴出物を多量に供給する火山(手取川扇状地上流の白山など)がある地域にある。急速に成長する山地や火山では崩壊の発生も多く、急勾配の河川では土石流や泥流が頻発する。扇状地は土石流や泥流、洪水によって移動した土砂が堆積するような条件にある場所で、自然の状態では流路は固定しておらず、くり返し発生する土石流や泥流の土砂は谷の出口から放射状に拡がって堆積する。そのため扇状地は同心円状の等高線で特徴づけられる独特の地形を示す(図-42)。

甲府盆地は秩父山地や赤石山地から流れでる笛吹川、荒川、釜無川などの河川がつくる複合扇状地として有名である(図-43)。また、武蔵野台地は、青梅を扇頂とする旧多摩川が形成した洪積世の扇状地とされている(第8章参照)。また、富士山型の成層火山の山裾には、溶岩流や火砕流の堆積物だけでなく、それらから2次的にもたらされた崩壊堆積物や土石流、泥流の堆積物によって扇状地が形成されることが多い⁴⁾。

扇状地の中には現在の河川が扇状地を浸食して発達し、扇状地面への土砂の供給はすでに停止しているものもあ

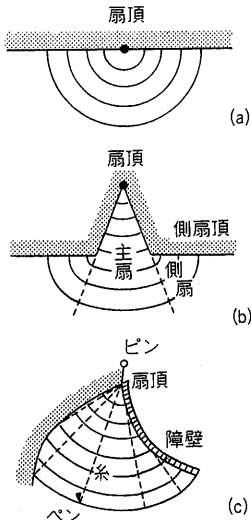


図-42 扇状地の特徴を示す模式的等高線⁹⁾

る。このような扇状地は古期扇状地などと呼ばれ、氷河期に植生の乏しくなった山地で形成された多量の岩屑がその後の温暖期に下流に多量に供給されて形成されたものである(図-44)。また火山山麓の扇状地においても、噴出物の供給が終了し河川による浸食が進んだため扇状地面が取り残された地形が見られることもある。

扇状地を構成する地質は粒径の大きな礫を多く含む砂礫～礫層からなっているので、透水性がよく水流は伏流となっていることが多い。伏流水は扇状地の末端部で湧水となって地表に湧出し、生活用水や農業用水として利用される。扇状地におけるトンネル工事ではこうした地下水の存在に注意する必要がある。トンネル工事において扇状地の礫層を長く掘削する例は多くない。しかし扇状地地下の基盤中を掘削したところ埋没した旧流路の扇状地礫層に遭遇し地表の陥没や出水が見られた例や、台地化した扇状地にトンネルおよび開削工事を施した路線において帯水層と交差する箇所で豪雨時に異常出水が見られた例もある。とくに火山山麓扇状地においては、不透水性の火山噴出物中の埋没谷に規制された地下水の流れがあることがあるので入念に調査を行うべきである。

扇状地、自然堤防、後背湿地などを含めた沖積平野地形の立地的条件を図-45に模式的に示した。

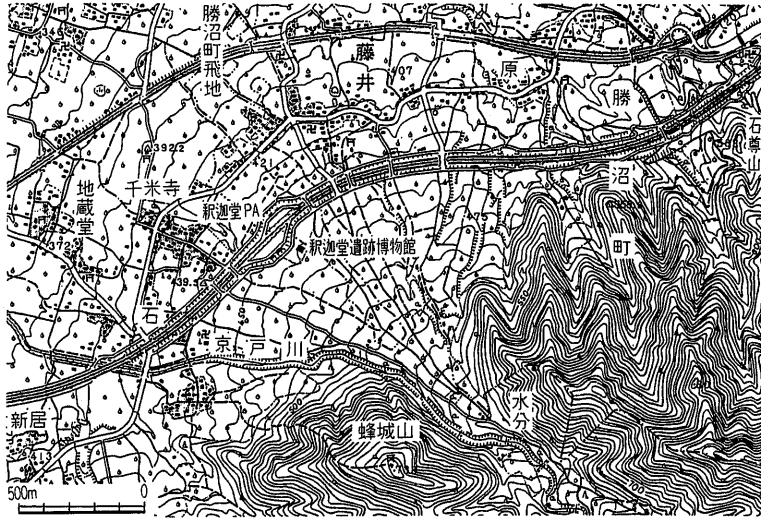


図-43 甲府盆地に発達する扇状地の地形(1/25,000地形図「石和」を使用)

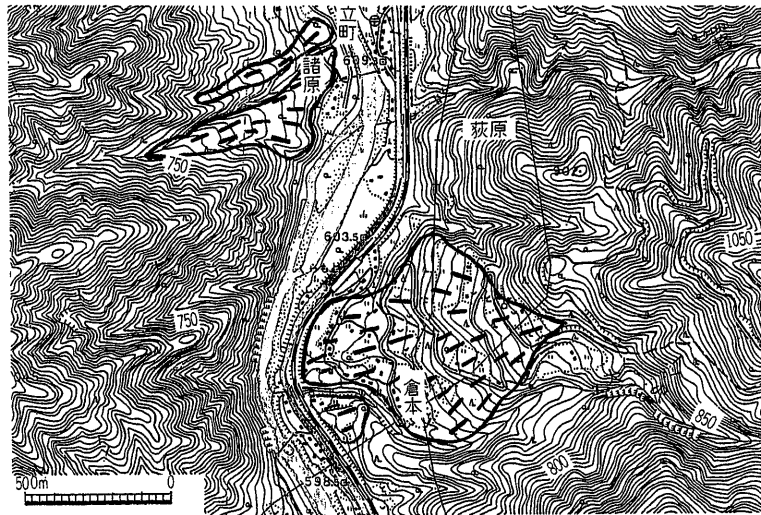
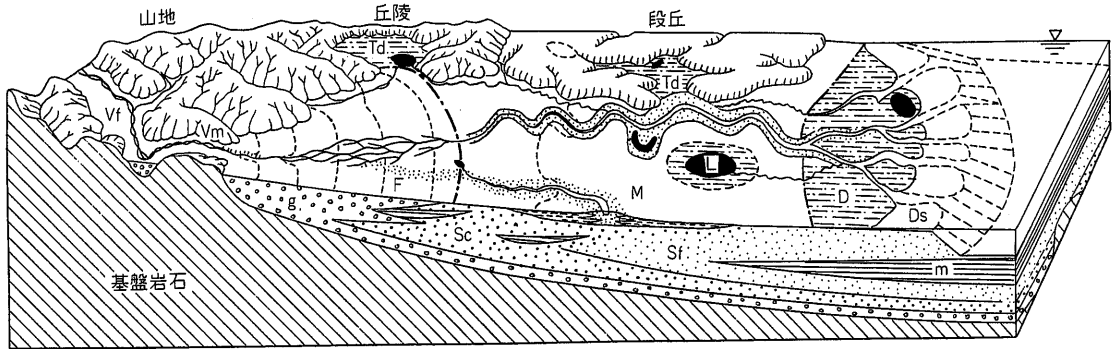


図-44 現在の河川から土砂の供給を受けない古期扇状地の地形(1/25,000地形図「木曾須原」を使用)

7-3 山地の地形・マスマーブメントの地形

7-3-1 崖すい

山地や丘陵地の斜面の表層は地山の風化物質および上部から供給された土砂、岩屑において覆われていることが多い。これらは急斜面においては重力の作用により徐々にあるいは崩壊に伴って急速に移動し、平地との境界で停止する。また、岩石の露出した急崖面においても物理的風化作用が激しく働きかける結果、崖面から岩石が剥脱し崖の基部に落下する。このような土砂や岩屑は、波浪や河川の流水などによる著しい浸食によって運び去れることがなければ斜面の基部に定着する。この結果、形成された堆積物を崖すいという(図-46)。崖すいは地形的には次のような特徴がある。まず斜面の上方は急傾



Vf: 谷底堆積低地, Vm: 谷口, F: 扇状地, M: 蛇行原, D: 三角州 (Ds: 水底三角州), L: 湖沼, Td: 支谷閉塞低地, g: 礫層, Sc: 粗粒・中粒砂層, Sf: 細粒砂層, m: 泥層(シルト・粘土層)。一点太破線は、扇状地、蛇行原および三角州の境界線である。

図-45 扇状地から平野にかけての地形の模式図¹⁾

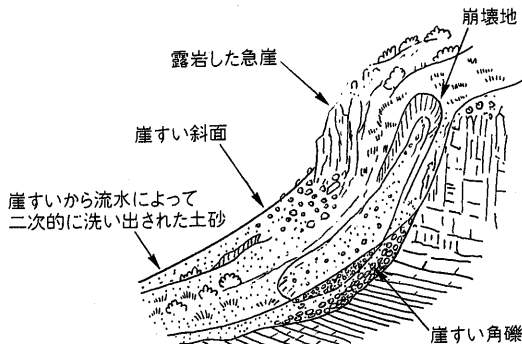


図-46 崖すい地形の模式図²⁾を改修

斜で露岩帯などが見られ、斜面基部には傾斜角 30~40 度のやや緩傾斜な部分がある。この部分の表面は比較的平滑であることが多い。さらにはその裾部には流水などによって 2 次的に移動した土砂がつくる緩い傾きの斜面が見られる。

崖すいは日本の山地斜面のいたるところで見られ、その地形は 1/50,000 程度の縮尺の地形図では見分けることができないものも多い。しかし、1/10,000 以上の大縮尺の地形図や写真判読などでは、供給源としての崩壊跡の地形などを読みとることにより崖すいを判別することができる。なお、斜面基部にある緩斜面の中には小規模な谷地形の出口にあって主として流水の働きによって土砂が堆積したものもある。それらのうち扇状地より急傾斜で降雨時の土砂流出によって形成された小規模なものを沖積すいと呼んで区別している。沖積すいの構成物は流路の短い水流による堆積物であるから崖すいと大きな違いはなく、円磨度の低い角礫を主体とした固結度の低い粗粒な堆積物である。しかし流水の働きを受けたことでより間隙が少なく、礫の間は基質で充填されている。

崖すいは土砂の安息角に近い状態でようやく平衡を保っている。このため河川による側方浸食、トンネル掘削、切り取り、盛土などによってなんらかの力学的変化を与

えると安定をくずして滑動する危険を常に持っている。また、崖すいは通常透水性が高く地下水に乏しいが、不透水性の地山との境界部には湧水が見られることがある。建造物は通常できるだけ崖すいを避けて建設されているが、やむを得ず崖すい中につくられたものも多い。崖すい中のトンネルは、施工段階においても崩壊しやすく、偏圧を受けるなど難工事になりやすい。また、不安定な状態で静止しているので、竣工後もなお変形が生じるなど問題が多い。峡谷を縫うように走っている路線にはいたるところに崖すいが発達しており、トンネルに限らず切り取り、土留め壁、橋梁などにも崖すいに起因した変状がよく見られる。

7-3-2 地すべり・崩壊

(1) 地すべり

高所にある物質が低所に移動して地表を平坦化する現象を総じてマスマーブメント(あるいは、マスマーブメントと呼んでいる。マスマーブメントは規模や運動様式の違いで地すべり、崩壊などと分類がなされている。地すべりは地質の不連続面や弱層を地中のすべり面として滑動する地盤のせん断変形であり、滑落崖と旧地形から分離して移動する地すべり土塊からなる特徴的な地形を持つ(図-47)。地すべり土塊は周囲の地形と比較して等高線のパターンが著しく異なっていたり、土塊が移動していることを示す起伏や亀裂などが見られることで判別できる。

通常、教科書的な明瞭な地すべり地形として判読されるものには活動的地すべりである場合と既に活動の終わった古期地すべりである場合とがある。しかし、実際に建設工事の際に人為的な影響により地すべりとして活動し大きな問題となることの多い初生的地すべりは判読が困難な場合が少なくない。このような地すべりの発生場所を予測するには、対象地点だけの調査では不十分であり、周辺の地形・地質と地すべりの発生状況との関係を包括

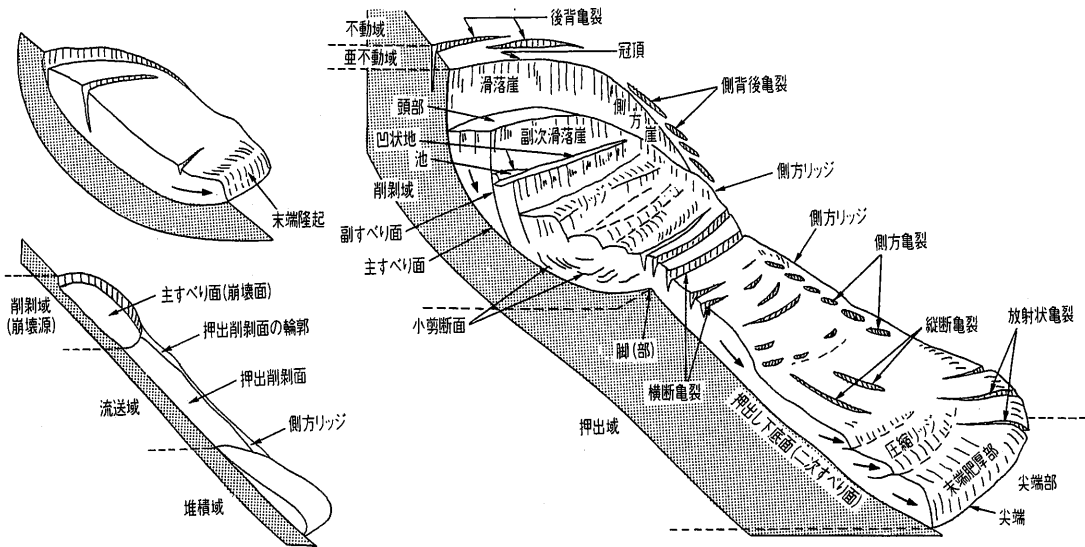


図-47 地すべり地形の模式図^{*)}(大八木原図)

的に理解できるような、広域的な地形・地質調査が不可欠である。また、大規模な岩盤の層すべりの場合は、通常の地表地質調査やボーリング調査だけで存在を把握するのは困難である。岩盤の破碎や風化は地下深部に及んでおり、すべり面も単純な形状ではない。このような地すべり土塊は土砂状というよりもゆるんだ岩塊であり、ひとつの岩塊の大きさは数10m大のこともあるから地表では地すべりの存在を認識できないことも多い。大規模な岩盤の層すべりに対しては空中写真判読による地形調査を綿密に行うことと合わせて、地質構造の解明と岩盤中の節理系などに注目した調査が必要である。

トンネル工事で問題となるのは、坑口付近において地すべりが発生し、すべり面より上の移動土塊が坑口を埋めてしまう場合と、トンネルと地すべり面が交差してトンネル断面や線形に異常を来す場合である(2-3-6参照)。大規模な地すべりの場合はすべり面の深度は数10mに達することもあり、地すべり土塊自体の性状も施工上の問題となる。すなわち、地質の構造は乱れており、岩盤でも亀裂が多く崩積土状を呈することがあるほか、透水性が大であることにも注意すべきである。地すべりは崖すいと同様、現時点で安定していても安全率はほとんど1であるから、わずかな外力の変化で安定が崩れる危険性を持ったものである。地すべりはルート選定の段階で極力排除するよう努めるべきである。

(2) 岩盤崩壊

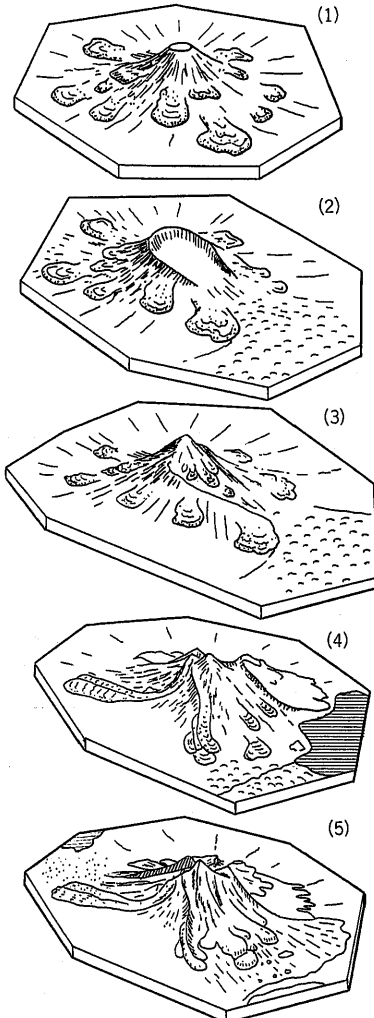
平成元年7月の福井県越前市の崩壊による落石^{おおいこう}覆工の破壊、平成8年2月の北海道古平村豊浜トンネル坑口付近の崩壊、平成9年8月の北海道島牧村第2白糸トンネル坑口付近の崩壊は、いずれも海食崖で発生した岩盤崩



写真-1 海食崖での岩盤崩壊(平成9年8月第2白糸トンネル) 壊であった。急峻な岩盤の露出した海岸線に並行なトンネルは土かぶり厚さの偏りによる偏圧が発生することがある。

上記の事例はいずれも最終的な破壊の過程は高速であったと考えられるが、自重の影響などによって岩盤内部の壁面に平行な引張亀裂が発生し徐々に岩塊の分離が進行していたものと考えられる。

海食崖で発生する大きな崩壊のような現象は人間社会の時間スケールではまれであるといえる。しかし海食崖、とくに浸食速度の比較的速い軟岩の岩盤では、地形の発達史的に見ると特別なものではなく普通の浸食過程である。それは崖下に巨大な岩塊がいくつも横たわっていることや崩壊跡に残る岩塔状の部分が見られることも少なくないことが雄弁に物語っている(写真-1)。地表踏査や写真計測、およびボーリングなどによって地質構造と岩盤の亀裂の方向、および連続性を把握し、岩盤内の応力状態を推定してどのような崩壊が起こりうるのかを検討することが必要である。



1. 主成層火山体の形成
2. 主成層火山体の大崩壊。翁島岩屑流堆積。
3. 大磐梯火山体形成
4. 小磐梯火山体形成。沼ノ平火口形成。
5. 1888年小磐梯大崩壊。

図-48 大規模崩壊の例¹⁾(磐梯火山の形成史における山体崩壊の発生)

(3) 大規模崩壊

崩壊規模が $10^6 \sim 10^7 m^3$ 以上の崩壊を大規模崩壊(あるいは巨大崩壊)という。大規模崩壊には1984年の長野県西部地震で発生した御岳崩れのように大地震に伴って発生するものや、1888年の磐梯山の山体崩壊などのように火山の噴火に伴って発生するものがある(図-48)。崩壊物質は岩屑流となって長距離を流下する。流下距離は比高差の10倍以上に達することも少なくない(図-49)。堆積物は低地を広く埋

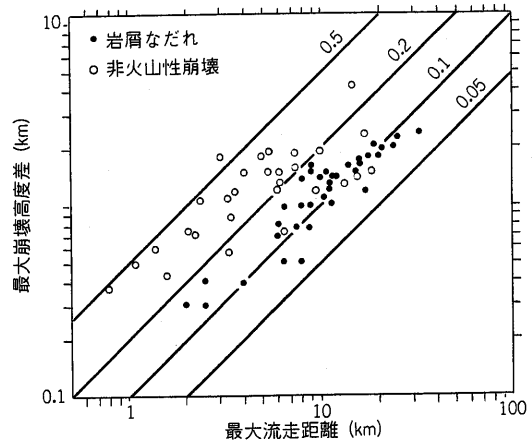
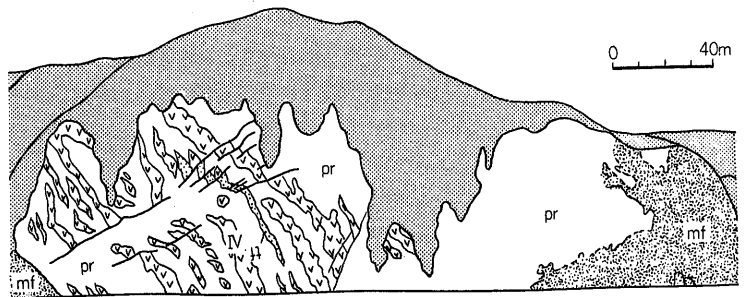


図-49 大規模崩壊の堆積物の流下距離¹⁾(最大崩壊高度差と最大流下距離の関係)



流れ山断面のスケッチ(下図のA地点 三村, 1985による)

V: 溶岩, pr: 粗粒の火砕岩, ti: 火山灰, mf: マトリックス部分

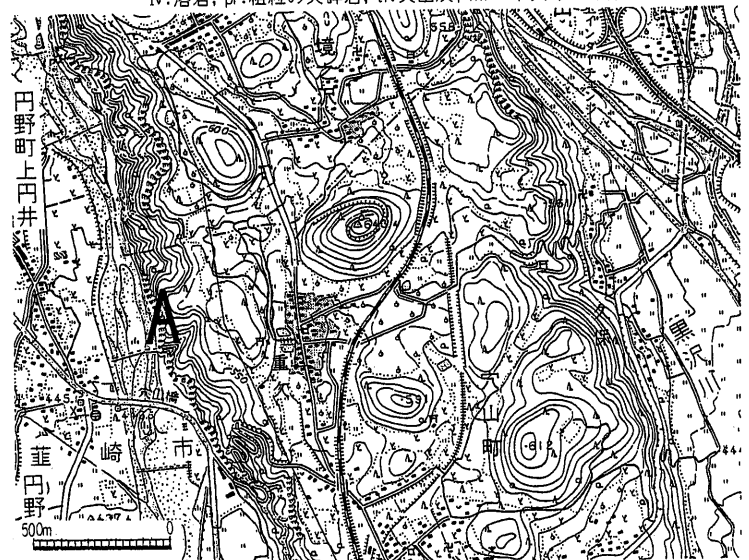


図-50 流山の内部構造(1/25,000地形図「若神子」を使用)

め尽くし、その内部はきわめて不均質でしばしば小山のように巨大な岩塊をブロックとして含んでいる。このような巨大なブロックは「流れ山」と呼ばれ、基本的には「根無し」の岩体で崩落源にあった地質構造が粉碎され

ずに残っていることが多い(図-50)。このような大規模崩壊の堆積物の古期のものはさらに浸食を受けて一見すると成因がわからない地形を示すものがある。このような場合も周辺の広域的な地形・地質調査により堆積物の分布を追跡して発生源の斜面を特定し、さらに堆積物の分布形状を復元することで不安定な地質の分布を知ることができる。

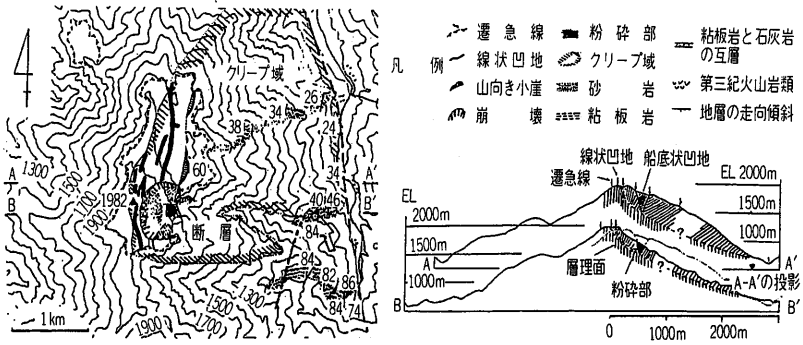


図-51 尾根状の線状凹地と大規模な岩盤クリープ¹⁾

(4) 岩盤クリープ

山地の岩盤斜面が重力によって変形し、急激で大規模なせん断が起こらずに変位が累積した構造を岩盤クリープと呼ぶ(第6章参照)。変形している岩盤と変形していない岩盤との境界は漸移的であることが地すべりと異なる。変形してゆるんだ岩盤の厚さは大きな斜面では数10m以上になることがある。地形としては斜面がやや凸に膨らんだ形状で地すべりのような明瞭な滑落崖は持たない。また、このような斜面の頂部にあたる稜線には線状凹地(二重山稜)が見られることがある。一般的には線状凹地の成因は十分に解明されておらず、雪食などが要因であるものもあると考えられるが、岩盤の表層に生じた重力性の断層により斜面全体がクリープ性的変形をしているものもある(図-51)。

7-4 断層地形

断層地形は断層変位地形と断層線谷地形に分類される。断層は異なる物質の境界であったり、断層破砕帯などの風化浸食に弱い物質が存在することも多い。そのため、それらの差別的浸食によって形成された断層地形は地質的弱線を示すと考えられてきた。一般に断層の存在を示唆する地形としては図-52に示すようなものがある。しかし、山地と低地との地形境界を示す直線的な傾斜変換線や直線的に連続する谷などは、浸食が進んで斜面が後退した形態であることが多く、断層自体が必ずしもその位置にあるわけではない。また、谷の成長は断層破砕帯に沿う浸食だけが

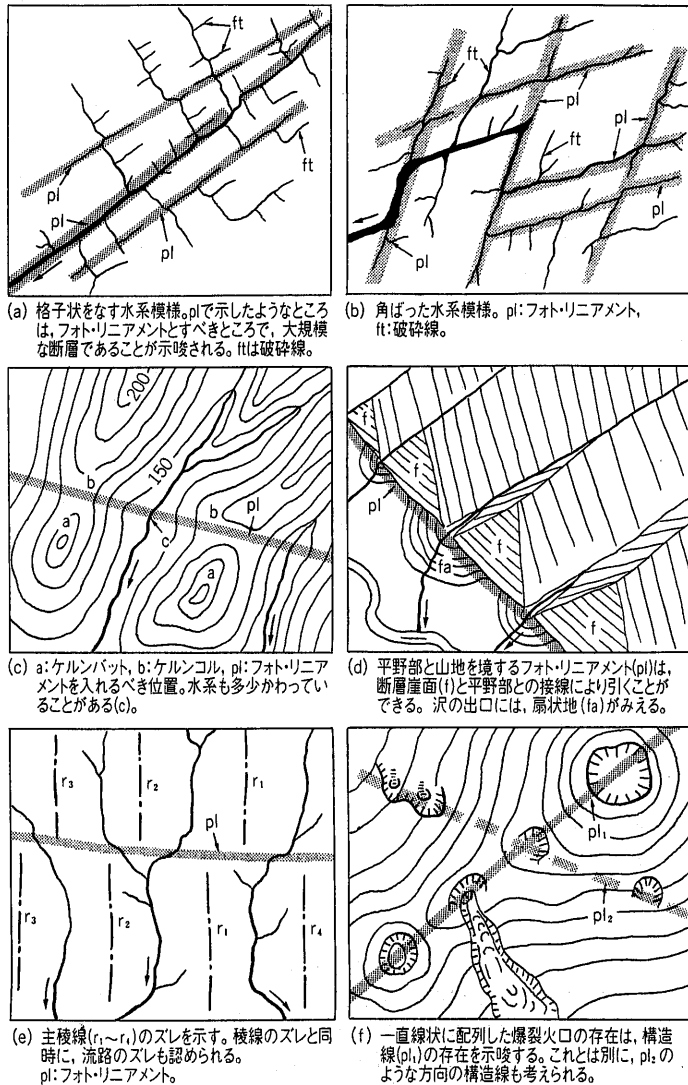
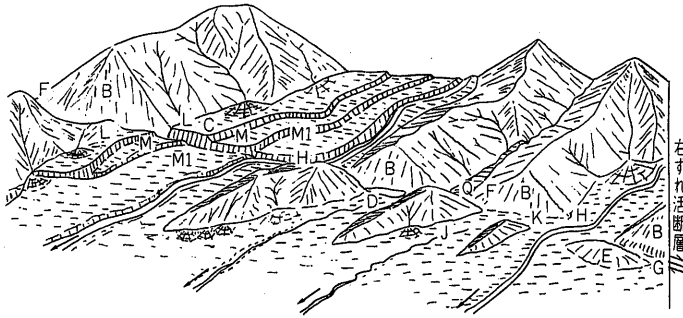


図-52 断層の地形への現れ方¹⁾

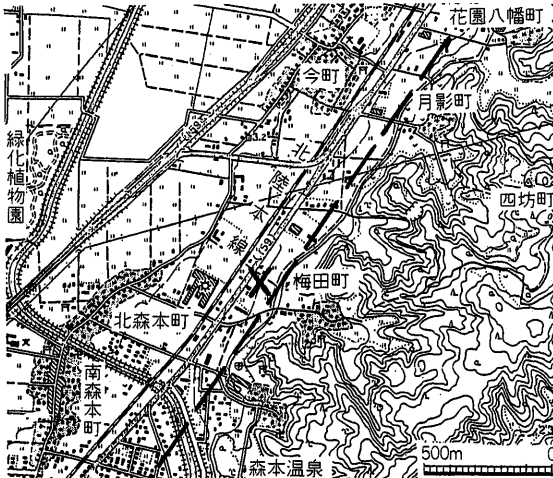
関与するのではないので、破砕帯は必ずしも断層線谷の

谷底全体に発達しているわけではないし、谷底をはずれたり谷底に複数の断層が存在することもある。ダムサイ



B: 三角末端面, C: 低断層崖, D: 断層池, E: ふくらみ, F: 断層鞍部, G: 地溝, H: 横ずれ谷, I: 閉塞丘, J: 截頭谷, K: 風隙, L-L': 山麓線のくいちがい, M-M': 段丘崖(M, M')のくいちがい, Q: 堰止め性の池。

図-53 断層変位地形の現れ方(右ずれ断層によるもの)¹³⁾



---: 地形境界に推定されていた断層の位置
X: トレンチ調査で確認された断層の位置。
(複数の断層群の一部と考えられる)

図-54 地形的な境界と離れた場所に見出された断層の例¹³⁾

トなどにおいて詳細な地質調査が行われた例を見ても、確認された断層は地形に現れていないことも多く、注意すべきである。また、断層線谷地形のいくつかは、次に述べる活断層調査が進むにつれて断層変位地形であったことが明らかにされている。

活断層については5-3-4でも少し触れた。阪神・淡路大震災以来、衆目を集めるようになった活断層は日本に約2,000あるといわれている。活断層のカタログともいえるべき「新編 日本の活断層」(東京大学出版会, 1991)には、主に空中写真を用いて断層変位地形(図-53 参照)を判読した結果による活断層の分布が示されている。平成7年度よりこれらの活断層のうち主要なもの約100を対象に、地方自治体による断層の活動性の調査が行われている。これらの調査結果によれば、断層の位置が必ずしも従来知られていた場所と一致しなかったり、最近の時代における活動の根拠が認められなかったりする事例も

ある(図-54)。

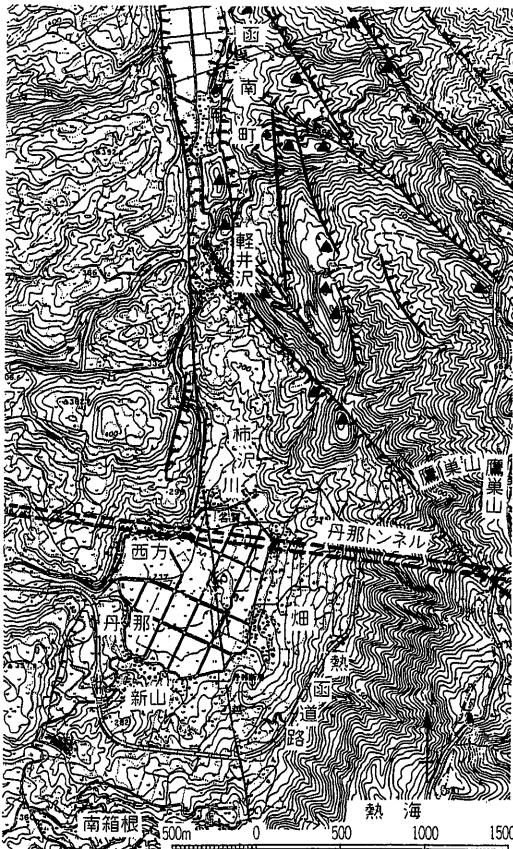
最近では1/25,000の縮尺で大都市周辺を手始めに都市圏活断層図が刊行されるようになった。これらの図面には従来よりも詳細に活断層の位置が記載されている。しかし、これらに描かれた断層の「線」は、具体的調査により断層の位置が確認されているもの以外は、「活断層の存在を示唆する地形的特徴を連ねた線」であって必ずしも実際の断層の位置を正確に示しているものではない。したがって、土木工事にあたっては活断層の影響を考慮したい場合は断層の位置を発掘な

どで正しく捉えておく必要がある。

活断層の定義は「最近の地質時代にくり返し活動し、将来も動くことが予想される断層」(新編 日本の活断層, 1991)ということである。将来も動く判断するための根拠は、「現在と同じような地殻変動の場であった近い過去に何回もくり返して動いたという事実を確認する」ことにある。この「近い過去」のとり方は研究者によりさまざまであり、「新編 日本の活断層」では第四紀という地質時代をとって約200万年間とし、国土院から刊行されている1/25,000都市圏活断層図では第四紀後半の約数10万年間をとっている。また、通産省地質調査所では第四紀後期の約10数万年間としている。

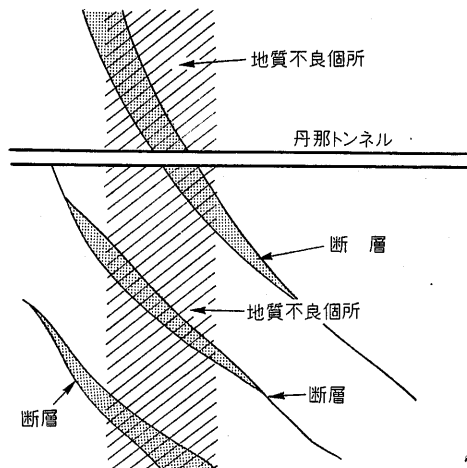
なお、活断層は内陸の大地震(マグニチュード6.5以上)の発生と深い関係があるので、地震発生の長期的予測を行うための調査が進められているわけであるが、ここでいわれる活動間隔、例えば、活動間隔3000年程度というのは、3000年ごとに規則正しく地震が発生するという意味ではない。内陸の大地震の発生間隔は通常かなり大きなばらつきがあり、日常感覚的な意味では周期性を持っているとはいえない(そのために活動間隔という言葉が活動周期と区別して使われていることに注意したい)。しかし、内陸の大地震は全く無秩序に起こるわけでもない。松田¹⁴⁾は統計分析から、次の地震の大部分は平均的な活動間隔の前後のある一定の期間の幅の中で発生するとしている。この「平均的活動間隔」がいわゆる「活動間隔」である。活断層の活動間隔は一般に1000年単位と長い、約3万年程度よりも長いものは現在のところ知られていないようである。

トンネルにおいて断層の変位が問題となるのはまず断層が再び動いて岩盤が変位することである。施工中に北伊豆地震が発生し、坑内で約2mの岩盤のずれが生じた丹那トンネルの例はよく知られている(図-55, 5-3-4(2)参照)。また、山陽新幹線の新神戸駅は六甲山地山麓の



断層を示唆するリニアメント(ケバは落ちの向き)
▲ ケルンバット

(1) 1930年北伊豆地震によって動いた丹那断層を横切る丹那トンネル



(2) トンネル工事の過程で判明した断層破砕帯の形状の模式図¹⁶⁾。(巨視的な断層の方向に斜交し地表に現われた地割れの方と一致する。左横ずれ断層運動に伴うリーデル・シアと考えられる。)

図-55 丹那断層を横切る丹那トンネルと断層破砕帯の形状

諏訪山断層の直上に位置しているが、活断層の変位による不同沈下を避けるために基礎をおく岩盤の違いによってブロック化した高架橋の構造がとられている。

一般的な活断層の活動間隔を考えるとこのような原因による岩盤のずれはきわめてまれなことと言えるが、全く無視してよいというわけでもない。日本では従来から主要な交通路が発達してきた山地と平野との境界や主要な谷の縁辺部などには活断層が存在していることが多く、こうした交通路が活断層に沿うかまたは横切るのを避けることはほとんどできない。活断層が動くことにより被害が生じることは多少とも避けられないと思われるが、地震動による施設の被害と異なって地盤の変位が起こる場所がある程度特定できる点は対策上考慮する必要がある。対処法の選択は発生の頻度と影響の大きさ、復旧の難易などを比較し、適正なコストについて社会的合意が形成されたうえで行うことになると思われる。しかし低頻度で起こる発生不可避な災害のリスクについての議論はまだ十分に成熟していない。

7-5 組織地形

地表に水や風などの流体や温度・乾湿の変化、凍結融解、化学的な作用、生物の増殖に伴う作用などの外的営力が加わるとき、地質構造や岩石などの地表構成物の組織を反映した地形が現れる。これを組織地形という。一般に岩石の物性は試供体で測定されるが、構造物への影響はある程度の広がりを持った岩盤の物性が現実的な意味を持つことが多く、岩盤の亀裂や空隙、異方性などが重要である。このような岩盤の物性は組織地形に反映される。

7-5-1 メサ・ビュート・ケスタ・モナドック

侵食に対して抵抗力の異なる地層が重なる場合には図-56に示したような地形が現れる。抵抗力の大小は岩石の硬さと透水性の大小に大きく依存していると考えられている。

メサとは、水平な硬岩層が軟岩層の上を覆う場合に行える平らな頂面で、周囲が急崖の地形をいう。溶岩が下部層を覆った屋島、博多湾に浮かぶ能古島などはその例である。メサとは、スペイン語でテーブルの意味である。ビュートとは、頂面より崖面の大きいものを呼んでいるが、日本には典型的なものは少ない。

ケスタとは、頂面が緩やかに傾斜したものをいい、平野において、一方が急な崖で低地に落ち込み、他方が緩やかな斜面で傾いた非対称な横断面を持つ丘陵をいう。ケスタとは、スペイン語で坂とか斜地の意味である。日本においては傾斜の急な第三紀の堆積岩などの層状岩盤からなる山地では Hogback 地形がよく見られる。傾斜した平滑な地層面がそのまま斜面を形成しているこのよ

うな地形は、岩盤が層すべりを起こすことによって強調されていることが多い(図-57)。

モナドック(侵食残丘)は、花崗岩などの深成岩分布地域でよく見られる。節理の発達程度や風化に対する抵抗力の差から侵食に対して強い部分が島のように残った地形であり、塩嶺トンネル入口付近の高尾山もこの類である。また、茨城県の筑波山は花崗岩中に取り込まれた斑れい岩の岩体が侵食に残り独立した山頂部を形成したものである。

7-5-2 キャップロック構造

キャップロックは、メサやケスタなどの台地の上部に位置する硬岩が下位の軟岩を侵食から保護している構造をいう(図-58)。第三紀層の軟岩の上に重い溶岩や厚い段丘礫層などが重なる場合には、亀裂に富む溶岩や砂礫層の地下水涵養効果と相まって第三紀層の層面などをすべり面とする大規模な地すべりが発生することがある。

7-5-3 水系模様

水系は基盤を構成する岩石の岩質と地質構造を敏感に反映するものであり、水系模様から大ざっぱな岩質と地質構造の推定が可能である。水系模様は武田・今村によると図-59に示すようなものがある。

樹枝状：各水系の各支流が、不規則ないくつもの角度で枝分かれしている。側方浸食に対して岩石の抵抗が一様なことと条件づけられる。塊状均質な岩石、あるいは水平な地層中に発達する。

平行：各水系が互に平行に分布する。隆起傾動した海岸平野、段丘面、火山噴出物の堆積面、あるいは平行な波状の褶曲構造、断層、節理に支配されて形成される。

格子状：長大な水系が互に平行し、これに対して二次的な支流がほぼ直角に連絡しているもの。急傾斜した互層中に発達するほか、断層や大規模な節理系の影響も強く受ける。

放射状：各水系が、中心から放射状に射出しているもの。錐状の成層火山に発達する。

年輪状：輪状に発達した支流をもつ放射状水系。開折されたドーム構造、あるいは盆状構造に支配される。

長方形：直角に近い角度で各水系が折れ曲がっているもの。互に直交する2系統の断層、あるいは節理に

トンネルと地下

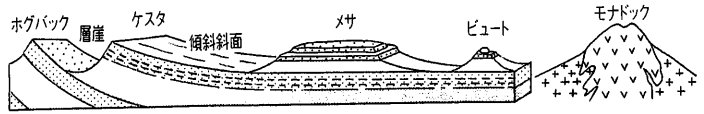


図-56 地質構造や地層の傾斜と侵食地形の模式図¹⁾

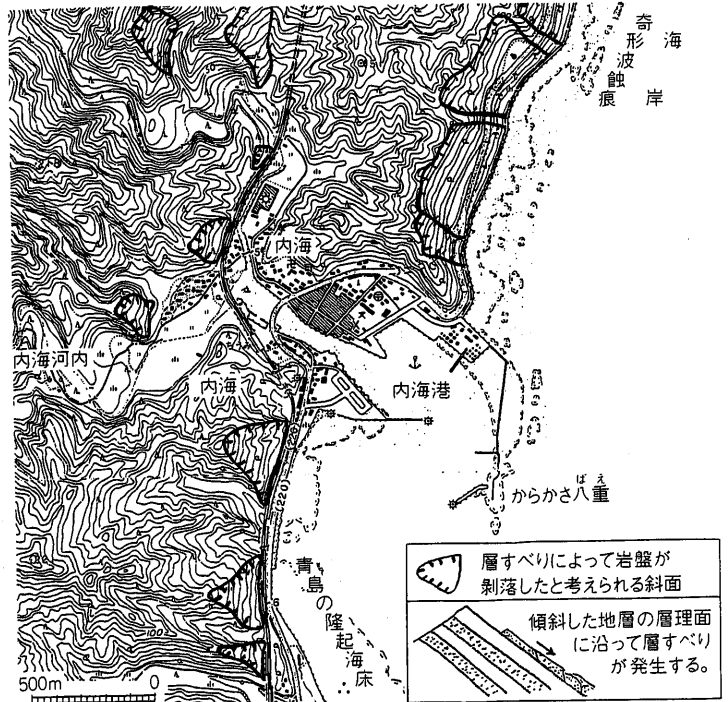


図-57 宮崎県日南海岸の流れ盤斜面の地形(1/25,000地形図「日向青島」, 「郷之原」を使用)

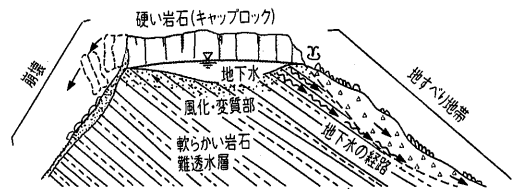


図-58 キャップロック構造の模式図¹⁾

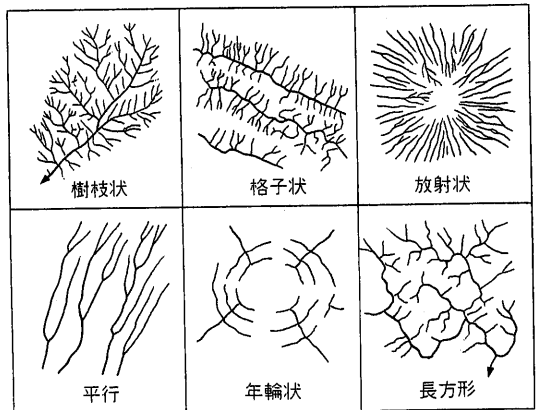


図-59 さまざまな水系模様の例¹⁾

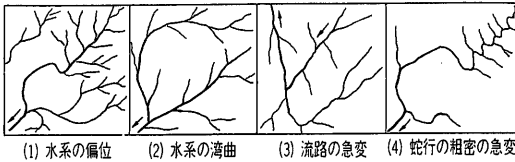
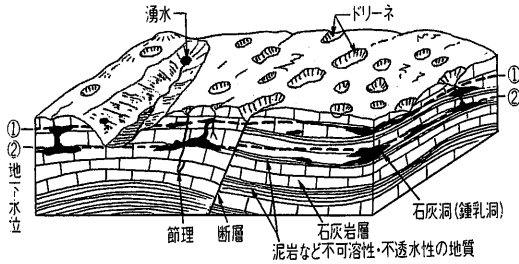


図-60 水系異常のパターンの例⁽¹²⁾



凹地形を主に示す。地下水位はかつて①の位置に停滞したことがあり、現在は②の位置にある。

図-61 カルスト地形の模式図⁽¹³⁾

支配されて発達する。

比較的広い範囲で水系様子を観察すると、図-60のような局所的な水系異常が見られることがある。このような変化は、局所的な地質構造の急変、あるいは地すべりや大規模な崩壊による谷の閉塞などが原因である可能性がある。また、河道の幅は岩盤の堅さ(浸食に対する抵抗力)を表していると考えられるので、その急変部は物性の違う岩盤の境界である可能性が高い。

7-5-4 カルスト地形

石灰岩のような炭酸カルシウム(CaCO₃)を含む岩石は地表水・地下水によって溶ける。そのためこれらの岩石の分布域では溶食による独特の地形ができるが、これらを総称してカルスト地形と呼んでいる(図-61)。代表的なものにドリーネやウパーレ(複数のドリーネが拡大し連結したもの)という凹地形がある。これらの凹地には地下に鍾乳洞などの空洞があることも多いが、凹地を埋めた物質が地下で何らかの原因により除去されると地表

が陥没することがある。また地下水は洞穴網を使った複雑な流路で流れており、トンネル工事などでは思わぬ場所で湧水を見ることもあるので、ボーリングの際には空洞の有無や地下水の挙動に充分注意する必要がある。(文責：向山 栄・国際航業(株)技術センター向山研究室長/大島洋志・同 取締役技術センター長)

参考文献

- 1) 小池一之・坂上寛一・佐瀬隆・高野武男・細野衛：地環境の地学—地形と土壌，新版地学教育講座⑨，東海大学出版会，p103, 1994.
- 2) 貝塚爽平：平野と海岸を読む，岩波書店，p54, p102, 1992.
- 3) 池田和彦・大島洋志：わかりやすい土壌地質学入門(改訂8版)，土木工学社，p59, 1997.
- 4) 鈴木隆介：建設技術者のための地形読図入門，第2巻，低地，古今書院，1998.
- 5) 村田貞蔵：断層扇状地の純地形学的研究，矢沢大二・戸谷洋・貝塚爽平：扇状地，古今書院，pp.1-54, 1971.
- 6) 斎藤享治：日本の扇状地，古今書院，1988.
- 7) 池田俊雄：わかりやすい地盤地質学，鹿島出版会，p137, 1986.
- 8) (財)日本測量調査技術協会編：空中写真による地すべり調査の実際，鹿島出版会，p27, 1984.
- 9) 守屋以智雄：日本の火山地形，東京大学出版会，1983.
- 10) UI, T. Yamamoto, H. Suzuki, T and Kamata, K: Characterization of debris avalanche deposits in Japan, 1986, Jour. Volcano. Geotherm. Res., 29.
- 11) 千木良雅弘：風化と崩壊，近未来社，1995.
- 12) 武田裕幸・今村達平：建設技術者のための空中写真判読，共立出版，p.60, 73, 1976.
- 13) 活断層研究会編：新編日本の活断層，東京大学出版会，1991.
- 14) Matsuda, T.: Earthquake Prediction: An International Review(Simpson, D.W. & Richards, P.G., eds.), AGU.
- 15) 科学技術庁：平成7年度・平成8年度地震調査研究交付金成果報告会予稿集，科学技術庁，1997.
- 16) 櫻井孝：北伊豆地震(1930年)による丹那トンネル内地震断層出現状況記録，応用地質，第39巻，第6号，pp540-544, 1999.
- 17) 今村達平・岩田健治・足立勝治・塚本哲：画で見る地形・地質の基礎知識，鹿島出版会，1983.
- 18) 貝塚爽平：発達史地形学，東京大学出版会，P121, 1998.

E. フック・E. T. ブラウン共著

岩盤地下空洞の設計と施工

理学博士小野寺透・工学博士吉中龍之進・斉藤正忠・北川隆 共訳

B5判・442頁・上製本 本体価格9,800円(〒450円)

株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072



「世界文化遺産・合掌造り集落」白川村より

小林 伸次

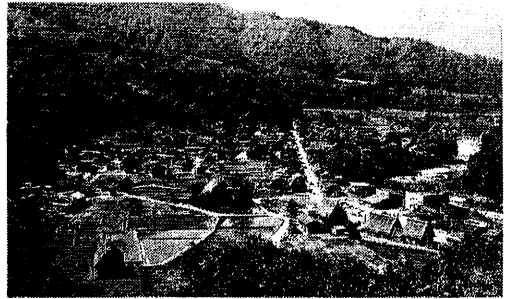
白川村は、岐阜県、富山県の北部県境に位置し、平成7年12月に合掌作り集落が世界遺産として登録されている。

国内では、姫路城、白神山地などに次いで6件目の世界遺産であり、保存に取り組んできた長年の村人の努力が世界的にも認められたもので、人類共有の遺産として保護、保存されていくことになった。

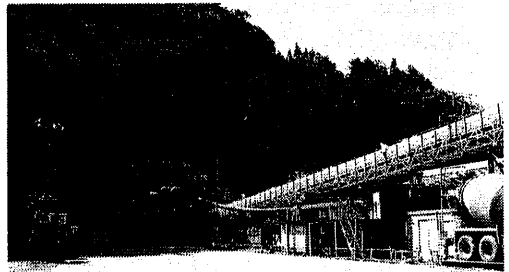
「合掌造り」とは、木材を梁の上に手の平を合わせたように山形に組み合わせて建築された勾配の急な茅葺きの屋根を特徴とする住居である。こうした建物はほかの地方にも見られるが、白川では「切妻合掌造り」といわれ、屋根の両端が本を開いて立てたように三角形になっているのが特徴で積雪が多く雪質が重いという白川の自然条件に適合した構造に造られている。また、建物は南北に面して建てられており、これは白川の風向きを考慮し、風の抵抗を最小限にするとともに、屋根にあたる日照量を調節して夏涼しく、冬は保温されるようになっている。

飛驒トンネルは、東海北陸自動車道の清見ジャンクションと白川インターチェンジ間に位置する全長約10.7kmの国内では2番目に長い長大道路トンネルで、この白川村を坑口に河合村側に片押しにより施工するものである。

工事は、本坑と緊急用に使用する避難坑とからなり、避難坑については、本坑工事に先立ち掘削径4.5mのTBMにより避難坑JVが施工中である。坑口付近は、この地域の景観を考え仮設ヤードが合掌集落からひとつ尾根を隔てた位置に本坑、避難坑共用の作業坑を設



白川村荻町合掌集落



本坑、避難坑共用坑口

け、施工中の景観も配慮している。

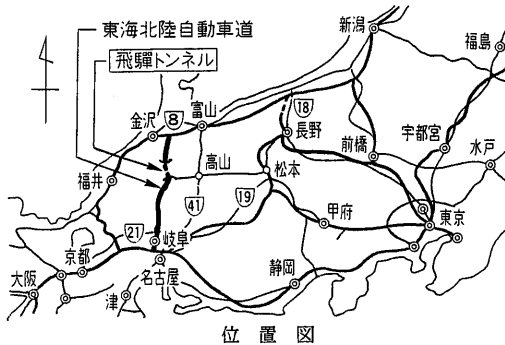
さて、当工事は飛驒トンネルの本坑を掘削径12.84mの世界最大級のTBMにより掘削するもので、その円形に掘削された本坑断面を活用した換気立坑の不要な換気システムを採用しているところに特徴がある。

地質は、白川花崗岩、濃飛流紋岩類、飛驒変成岩類が分布し、その他第三紀の貫入岩類が存在するものと予想されている。地質状況としては、中硬岩が大半を占めると予想されているが、一部不良地山の出現も予想される。

現在、TBMの坑内組み立て基地をNATMで掘削中であり、また、TBM本体の主要部材の工場製作および、細部詳細設計を行っている。

来春のTBM発進を目標に、『住民とのふれあいある現場づくり!』をスローガンに全工期無事故・無災害で完工するよう努力する次第である。

(大成・西松・佐藤共同企業体飛驒トンネル工事所長代理)



位置図

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(6)

第I編 トンネル工事に必要となる基礎的地質学(5)

8. 日本の地質

8-1 日本の地形・地質の特徴

ユーラシア大陸の東縁に位置する日本は、北海道、本州、四国、九州および沖縄と、これに付属する多数の島々からなる全体に弧状の列島である。また、周辺の高地地形は、西側は大陸との間にオホーツク海、日本海、東シナ海の比較的浅い海盆が発達し、東側は太平洋で、日本海溝、琉球海溝などの10kmクラスの深い海溝により特徴づけられる。海底から日本列島を見上げれば、比高差10kmを優に超える南北に2,000km余りの長さを持った一大山脈にうつることになる。

日本列島を構成する島弧群は世界的にみれば、ロッキー、アンデス両山脈などととも、太平洋をとりまく環太平洋造山帯の西縁域に属している。この造山帯は、ユーラシア造山帯とともに火山活動や地震活動および地殻変動の激しい地域である。したがって、わが国土の地質構造の複雑さ、火山およびこれに関係した温泉の多さ、さらに、どこかで有感地震が1日数回発生している事実などはこのことを裏付けるものである。これらの日本列島周辺の大地形や変動帯としての特徴は、大陸側のプレートの下に海洋性プレートが沈み込むことによる典型的な大陸-島弧-海溝系の特徴と考えられる(5-3-2~5-3-3参照)。

これを山地、盆地、平野などのもう少し小さな地形単位で見たとき、日本の特徴としていずれもが小規模であることが挙げられる。“日本の風景は箱庭的”と言われるゆえんであろう。後述するが、日本の地体構造は非常に小規模に区分され、しかも各構造単位が形成された地質年代はまちまちであり、相互に様々な地質学的な関係をもって接している。例えば、アメリカのグランドキャニオンの壁面に見られるような長い地質時代を連続的に観察できるような場所は、日本にはきわめて少ない。

このように、地形や地体構造が小規模な単位で区分せざるを得ない状況こそが、日本全体の地形や地質の把握

「応用地質学」連載講座小委員会

をより困難で複雑なものにしている最大の理由である。また、日本列島の大構造や地質形成史を考えると、第三紀以来の活発な火山活動により中生代以前の日本列島の骨格にあたる地質体が広く覆われていることも一層複雑さを増幅する条件となっている。

日本には、3,000m内外の高山が北海道・東北の脊梁山脈、関東山地、飛騨・赤石・木曾山脈のいわゆる日本アルプス、紀伊・中国・四国・九州山地などにひしめき、山地の割合は総面積の8割近くを占めている。これに伴って、日本には平地が少なく、〇〇平野とよばれるものでも、世界的にみれば、非常にスケールが小さく、山地の付随物的な感じが強い、この山地と平地の割合は、まさに日本列島が海中にそびえる大山脈的な存在であることに由来した日本の地形の特徴である。

山地は河川水による浸食で地表には大小の深い谷が網状に細かく発達し、独特の渓谷美を作っている。さらに、運搬された土砂は山麓や浅海部に堆積し、河川に沿った狭い平坦面や平野を形成している。大陸諸国の平野が、長い地質時代間に風化・侵食を受けて形成されてきた準平原的なものであるのと対比的である。

このような、大きな地形から微地形と呼ばれるような小さな凹凸まで、地形を形成する侵食と堆積は日本の気候によるところが大きい。前述のように、日本列島は南北に非常に長い列島であることに加えて、四方を海で囲まれているため海洋性気候下にあり、季節風帯にあることなどが原因して、日本の気候や生物相は実に多様性に富んでいる。例えば気候上の特色として、世界有数の多雨地帯であり、多雪地帯であり、さらに、気温の較差や地域較差が大きいことなどをあげることができる。

雨は梅雨や台風などに由来するものが多いが、これらは山地の崩壊など防災上の問題を引き起こす。また、雪は日本海側に面した山地部に多いが、これらは雪崩などの災害および交通支障の原因ともなる。これらが引き起こす災害から身を守るため、トンネルのウェイトが高くなっているのも事実である。

さらに、島国である日本では海水面の変動も地形に強く影響を与える要因となる。大氷河時代とも言われる第四紀は、気候の寒暖による水河の消長により、海水面が周期的に変動してきた。海水面は、最新の氷河期であるウルム氷期(最寒期は2万年前)には現在より100+ α mほど低く、6,000万年前は10mほど高かったといわれている。このように、海水面変動は汀線を大きく海側や内陸側に変えることにより、とくに海岸平野などの平坦面の分布やその地質を大きく変える要素となった。

8-2 地質構造区分と地域の特徴

日本の地体構造は、いくつかの地質構造線により地質構成などの特徴を持った地質区に細分できる。また、その形成時代から新第三紀以前とそれ以降の間には重要な違いがあることが知られている(図-62(A), (B)¹⁾参照)。

日本列島の代表的な地質構造線としてはフォッサマグナ(この西縁を糸魚川-静岡線と呼ぶ)と中央構造線とがある。この他にも数多くの構造線や断層が発達し、断層谷、断層盆地、地塁山脈などの断層地形と呼ばれる特徴的な地形が各所で観察される。断層はトンネル地質的には、岩盤の破碎化、粘土化による脆弱部としての問題、破碎帯からの突発的大量湧水の問題、内陸型地震に関連して注目されている活断層としての問題などをもっており、重要な地質条件になっている。

また、上記の2大構造線により区分される地質区は、フォッサマグナにより西側の西南日本地区と東側の東北日本地区に、さらに西南日本地区は中央構造線により外帯と内帯に大区分される。

これらの区分は、地質構造発達や構成地質種などの観点から重要な区分となる。一方、日本の地勢的な区分である北海道、東北、関東、中部、近畿、中国、四国、さらには九州・沖縄地方を考えると、それぞれの地質条件上の地域特性との関連が深い。

以下では、大局的な地質区分と、この地勢区分の対比をすることにより、日本の地質的な地域特性の多様性に触れることとする。なお、ここでは各地方の地形・地質上の主な特徴を整理することとし^{2), 3)}、詳細は各種専門書を参照されたい。また、応用地質上の特徴についても概括的な記述に留める。

8-2-1 東北日本地質区

フォッサマグナより東側の東北日本地質区は、地勢的には北海道、東北、関東および中部地方という広い範囲を指す。この地質区には中央構造線に相当するような、さらに細分する明瞭な地質構造線はない。中央脊梁山脈より西側(日本海側)には第三紀中新世以降の主に火山性の地層(泥岩、シルト岩、凝灰岩、砂岩)からなる地質が卓越している。この地質区分はグリーンタフ地域と呼ば

れ、これをもって東北日本地質区は代表される。なお、その分布は東北日本の日本海側だけでなく、フォッサマグナの東縁、脊梁山脈の東側内陸部、西南日本内帯の日本海側にも散在する。この地層は鉱産資源に富んでいるが、土木地質的には問題の多い地質である。

山脈の東側は、関東、八溝、筑波、阿武隈、北上といった安定した山地よりなり、花崗岩および中・古生層(砂岩、粘板岩など)が主体の地質である。

各地勢区分ごとの応用地質的な特徴を以下に概説する。

(1) 北海道地方

北海道は、地形・地質の特徴から石狩低地帯、中央脊梁(夕張山地、日高山脈、天塩山地など)により西部、中央部、東部の3つに区分される。西部は那須火山帯に属する火山岩類で特徴づけられる。積丹半島から支笏、洞爺にかけては第三紀の火山岩類と第四紀の火砕流堆積物が広く分布し、とくに積丹半島は景勝地としての一面とともに、1996年の豊浜トンネル坑口斜面など、大規模な岩盤崩壊の発生がその特徴となっている。

中央部は、北海道の中軸をなす山地が連なり、片麻岩などの変成岩類、白亜紀堆積岩類およびこれに貫入する花崗岩類を基盤とし、さらに新生代の火山岩類が分布する複雑な地質帯を形成する。また、日高山脈の西側には神居古潭帯と呼ばれる蛇紋岩地帯があり、土木工事的には問題の地質となる。

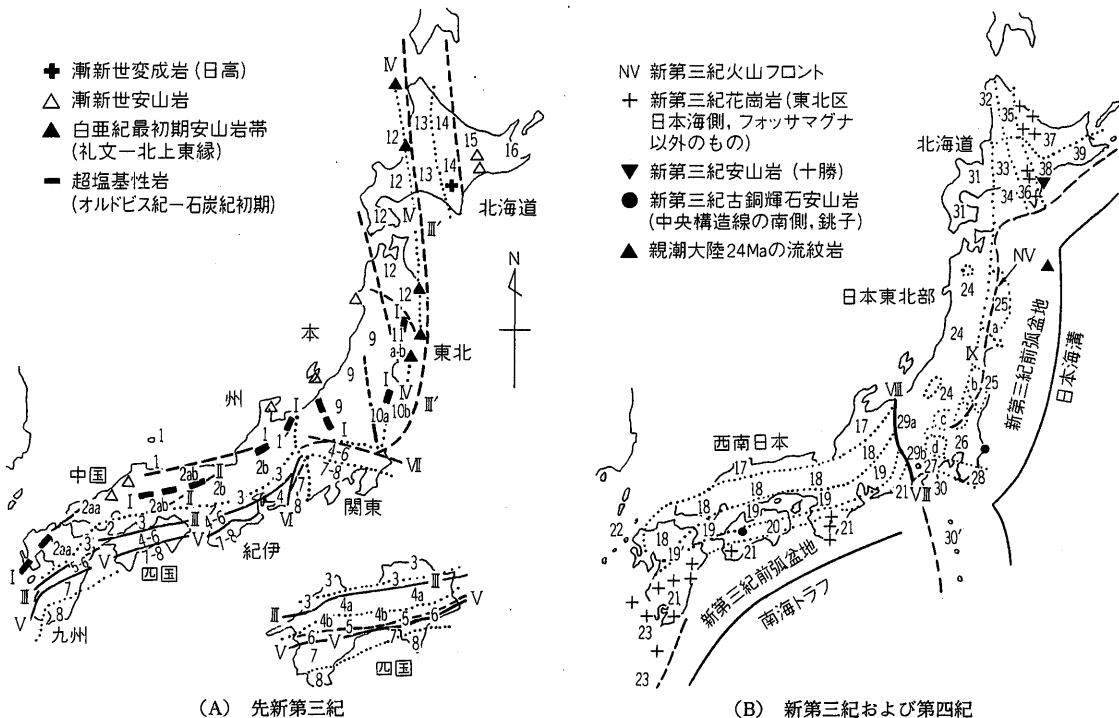
東部は平野や大地が広がる地帯であり、知床半島から阿寒にかけて千島火山帯に属する火山が分布する。

(2) 東北地方

東北地方の地形は、東側から北上山地-阿武隈山地、奥羽山脈(脊梁山脈)および出羽丘陵の3列の山地と、その間に挟まれるように分布する盆地や海岸平野からなる南北方向の配列により特徴づけられる。地質帯は大きく2つに区分され、その境界は伏在する盛岡白河構造線であると考えられる。

構造線の東側は北上山地や阿武隈山地に見られる中・古生代の堆積岩類、変成岩類および花崗岩類からなる。この地域での応用地質上の問題としては、主に変成岩類の異方性があげられ、斜面防災上の問題やトンネル工事での問題地質条件となっている。なお、阿武隈山地では棚倉構造線が北北西-南南東方向の特徴的な方向をもって見られるとともに、その東側に特徴的な片麻岩や結晶片岩が分布する。

構造線の西側は広いグリーンタフの分布で特徴づけられる地帯である。グリーンタフは新第三紀の海底火山活動に由来する火山砕屑岩や堆積岩の総称であり、安山岩の熱水変質(プロピライト化)や鉱床の形成などを特徴とする。とくに泥岩、シルト岩、凝灰岩の一部はトンネル



(A) 先新第三紀

(B) 新第三紀および第四紀

凡 例

赤石裂線	(VI)	小仏帯	(8)	十勝地区	(38)
足尾マッシーフ(新第三紀)	(c)	山陰-北陸区	(17)	南部北上(西部)	(11a)
阿武隈(西部・中部)	(10a)	三波川帯	(4a)	南部北上(東部)	(11b)
阿武隈(東部)(東部阿武隈)	(10b)	三宝山帯	(6)	仁頃帯	(15)
阿武隈マッシーフ(新第三紀)	(b)	七島	(30')	日高山脈(北海道南部中軸山地)	(36)
石狩地区	(33)	四万十帯	(7)	飛騨外縁地区	(1')
伊豆	(30)	初原の中央構造線(東北日本)	(III')	飛騨帯	(1)
和泉層群堆積盆地	(3')	西南北海道	(12,31)	フォッサマグナ(南部)	(29b)
糸魚川-静岡線	(VIII)	瀬戸内区	(19)	フォッサマグナ(北部)	(29a)
浦河地区	(34)	瀬戸川-中村帯(前弧盆地)	(8)	仏像構造線	(V)
神居古潭-空知区	(13)	空知-日高区	(14)	別府-雲仙陥没帯	(19')
関東構造線	(VII)	丹沢	(27)	北西部九州	(22)
関東山地(マッシーフ)	(d)	丹波-美濃	(2b)	北部北上	(12)
関東盆地	(26)	千島(西端部)	(16,39)	房総半島	(28)
外帯(南部)(新第三紀)	(21)	秩父帯	(4b)	舞鶴帯	(II)
外帯(北部)(新第三紀)	(20)	中央構造線	(III)	御荷鈴帯	(4a)
北上山地	(11,12)	中国-中部山地(新第三紀)	(18)	美濃-丹波	(2b)
北上東縁-礼文安山岩帯	(IV)	天塩山地(北海道北部中軸山地)	(35)	母体-長崎半島帯	(I)
北上マッシーフ(新第三紀)	(a)	天北地区	(32)	琉球弧	(23)
北九州-中国区	(2a)	東北区太平洋側(新第三紀)	(25)	領家帯	(3)
三郡-山口帯	(2aa-2ab)	東北区日本海側(新第三紀)	(24)	礼文-北上東縁安山岩帯	(IV)
北見地区	(37)	東北日本日本海側区	(9)	盛岡-白河構造線	(IX)
黒瀬川帯	(5)				

図-62 日本の地質構造区分⁰

建設においては軟弱で、著しい膨張性を示し、未固結砂岩などは帯水しているため切羽崩壊、土砂流出を引き起こすなど非常に問題の多い地質である。また、地表においては地すべりの原因ともなる。

さらに、東北地方には第四紀火山が奥羽山脈および出羽丘陵に沿って南北に配列し、とくに第四紀初頭の酸性火山活動に由来する石英安山岩質の火砕流堆積物は、十和田湖付近から白河付近まで断続的に分布し、一部は溶結するが、いわゆるシラスに類似する性状の非溶結部はトンネルをはじめとする土木工事のうえで問題となることがある。

(3) 関東地方

関東地方は地形的には西部の関東山地や北部の足尾一八溝山地およびこれらに取り巻かれる南東部の広大な関東平野で特徴づけられる。地質はこれらの地形に対応し、中・古生代の堆積岩類、変成岩類および火成岩類が山地部に分布し、平野部は厚い第四紀層と周辺火山からもたらされた厚い火山灰層(関東ローム層)で覆われる。

関東地方の地質体の大きな特徴として、出現する地質が古第三紀までは西南日本の特徴に類似する帯状配列を残すことがあげられ、この東側の境界が前述の棚倉構造線にあたる。一方、東北地方から連なる新第三紀のグリーンタフは、丹沢山地まで関東平野を取り巻くように分布することが知られており、この時代以降は東北日本の活動と共通する性状を呈する。また、箱根火山をはじめとする火山の存在や、海洋型地震の震源分布など、島弧会合部の複雑な大構造を反映した活動性の高い地域であることも重要な特徴の一つである。

首都圏である地勢的な特徴から土木工事のうえでもこれらの地形・地質を対象とした問題は多く知られるが、山地部では主に断層破砕帯での湧水や斜面災害、丘陵や平野部では人工改変に伴う問題などがあげられる。なお、平野部の問題については後述する。

(4) 中部地方東部地域

本稿では、中部地方を東北日本区に属するフォッサマグナ以東(新潟、長野、山梨および静岡県)と以西に区分して記述する。本地域は東北日本弧と西南日本弧の接合部でフォッサマグナ地域とも呼ばれている。越後、三国あるいは関東山地などの標高1,000~2,000m程度の山地からなり、これを源とする長大河川で特徴づけられ、下流域では海岸平野を形成する。また、富士山や浅間山などの大規模な火山が分布する。

地質体としては、関東地方と同様の岩種および帯状配列があり、古第三紀までは西南日本弧の特徴を有し、新第三紀以降は地域全体にグリーンタフが分布することなどで特徴づけられる。

応用地質上の問題として、豪雪、豪雨などの気象条件に伴う災害の発生と、各地質体ごとに特徴的な地すべりの多発地帯であることがあげられる。地質的には三波川帯や四万十帯などの異方性を持つもの、あるいはスレーキングしやすい新第三紀層の分布と関連することが多い。また、新第三紀層では石油や天然ガスを胚胎するほか、トンネル工事において著しい膨張圧の発生する場合があることが知られている。

8-2-2 西南日本地質区

フォッサマグナより西側の西南日本地質区は、中央構造線によりさらに西南日本外帯と内帯に分けられる。これに伴い、西南日本を構成する中部、近畿、中国・四国および九州地方も地質的な特徴を持って、南側の外帯(紀伊・四国・九州南部地域)と北側の内帯(北陸、中国、九州北部地域)に分断される。

西南日本外帯は北側から、三波川変成帯(黒色・緑色片岩、斑れい岩、蛇紋岩など)、いわゆる秩父古生層(堆積物の時代は中・古生代で、粘板岩、砂岩、チャート、石灰岩、緑色岩など)、四万十帯(砂岩、頁岩、緑色岩など)と地質年代の古いものから新しいものへと、中央構造線に沿って平行、かつ帯状に地層が分布することを特徴とする。その地質境界は、これもまた平行にみかぶ線(特徴的な緑色岩の挟在する地質帯)、仏像線と呼ばれる構造帯や構造線をもって境される。

一方、西南日本内帯は、北側から中央構造線に向かって飛騨変成岩(片麻岩)、三郡変成岩(緑色・黒色片岩が主体)、中・古生層(粘板岩、砂岩、チャート、石灰岩、緑色岩など)、広島花崗岩、領家変成帯(片麻岩、花崗岩)および泉層群(主に砂岩)などに分帯されるが、外帯ほど明瞭な配列は見られない。とくに内帯では白亜紀の花崗岩類や濃飛流紋岩で代表される酸性火山岩類が、飛騨帯から中国地方に広範に分布することを特徴とする。

(1) 中部地方西部

フォッサマグナより西側の中部地方は、中央部に標高3,000m級の飛騨・木曾山脈をはじめとする急峻な山地および高原部と、日本海、太平洋側の平野部に分けられる。地質的には上述した西南日本の特徴的な帯状配列および中央構造線により内帯、外帯に区分される。

本地域はこのうち内帯側の地質区が広く分布し、西南日本のもっとも内側(日本海側)の飛騨片麻岩を主体とする地質区は本地域を中心に分布し、その延長は隠岐島後に見られるのみである。また、飛騨外縁帯と呼ばれる日本最古の化石を産出するオルドビス紀の堆積岩類や古い結晶片岩類などを特徴とする地質区を伴う。南側の外帯に区分される本地域の三波川帯、秩父帯、四万十帯は帯状配列を示すが分布は狭い。なお、これらの古第三紀ま

での地質区分は、関東地方や中部地方東部と同様に新第三紀以降は異なり、日本海側には東北日本を中心とするグリーンタフと同様の地質区が分布する。

急峻な山地部であることやフォッサマグナ、中央構造線の会合部であるなど、断層系の発達する特徴から、本地域はトンネルやダム建設時に断層破砕帯に伴う湧水や変形が大きな問題となった事例が多い。また、斜面の崩壊も大規模な山地崩壊や北陸側での新第三紀層の地すべりまで規模や形態も様々である。

(2) 近畿地方

近畿地方は、南側から紀伊山地、近畿三角地帯および丹波山地から中国山地に連なる地域に地形的に区分される。紀伊山地は中・古生層や古第三紀の東西方向の帯状配列を呈する主に中央構造線以南の外帯を構成する地質で特徴づけられる。

また、近畿三角地帯は近畿地方の中部から北東部に至る地形・地質の特徴により、若狭湾、播磨灘および伊勢湾で囲まれた地域に命名され、その成因を第四紀の地殻変動である六甲変動とされている。

この三角地帯は南限を中央構造線、東側に柳ヶ瀬断層、琵琶湖北西の花折断層などに代表される活断層群に囲まれる活動性の高い地域である。この地域は内帯に共通する構成地質のほか、六甲変動に伴い大阪平野に厚く形成された洪積世の大阪層群が特徴となる。

次に、丹波山地から西側の山地部は、地形的には特徴的な隆起準平原を形成し、主に丹波帯と呼ばれる中・古生層や花崗岩類で構成される。また、北西(山陰)側の丹後、但馬山地には丹後・但馬帯と呼ばれる白亜紀から古第三紀の花崗岩類が広く分布する。両帯の境界には若狭湾から岡山県にかけて、舞鶴帯と夜久野岩類と呼ばれる特異な堆積岩、変成岩および火成岩からなる地質帯が、帯状に分布する。

以上のように、活動性の高い地方であるため、この地方では断層の存在が最大の応用地質的問題といえる。とくに、破砕帯に伴う湧水や地圧の発生は過去のトンネル施工事例でも重大な問題となっている。また、斜面災害は地すべりや斜面崩壊が基盤をなす岩種により様々な特徴を持つことが知られている。さらに大阪を中心とした大都市圏であることから平野部での問題も重要となる。

(3) 中国・四国地方

中国地方は、瀬戸内海側や日本海側に狭く平野を伴うが、全体としては標高1,000~1,300m程度の脊梁部が東西方向に伸び、さらにその南北方向に広く高原状の山地が連なる隆起準平野で特徴づけられる。中国地方は西南日本内帯に属し、北から飛騨変成岩帯、もっとも広く分布する中国帯、舞鶴帯、領家変成岩帯に区分される。中

国帯は結晶片岩からなる三郡変成岩類と、その中央部や南側に非変成の中・古生層が分布する。中央部の非変成中・古生層は秋吉石灰岩などを伴う特徴を持ち、南部では近畿地方の丹波帯に類似した地質となっている。

これらの地質群は脊梁部に沿って分布する白亜紀から古第三紀の花崗岩類の貫入や火山岩類により分断、熱変成を受けている。さらに、新第三紀には山陰地方にグリーンタフに対比される火山岩類および火砕岩類が堆積している。

一方、四国地方は徳島県鳴門市から愛媛県砥部町に東西方向に伸びる中央構造線を境界として、地形・地質の特徴が大きく異なる。瀬戸内海に面する内帯側は地形的に、南から讃岐山脈、丘陵部および讃岐平野で特徴づけられる東部地域と、山地からなる高縄半島と周辺の扇状地性平野を特徴とする西部とに2分できる。地質は主に領家帯の花崗岩、変成岩類からなり、讃岐山脈には白亜紀の和泉砂岩層が分布する。また、外帯側は全体に中央構造線側で高く、南側で低くなる傾向をもつ中央脊梁(四国山脈)からなる山岳地帯で、平野部は高知平野などに限定される。外帯の一般的な特徴である東西に伸びる地質帯が存在すること、その境界となる構造線の帯状配列が典型的に発達する地域といえる。

応用地質の問題としては、中国地方では山陰地方を中心としたグリーンタフ、三郡変成岩類の分布域での地すべりと、全域の花崗岩の風化物であるまさ土がとくに重大な問題としてあげられる。まさ土は斜面災害ばかりでなくトンネル工事でも問題となり、例えば、山陽新幹線のトンネルの大半は花崗岩中に構築されており、花崗岩自体は非常に堅硬な岩石であるが、これが風化して形成されたまさ土や花崗岩中の節理や破砕帯中の水はトンネル工事を困難にしている。四国地方では主に中央構造線から仏像構造線までの三波川帯や中・古生層が地すべり、大規模崩壊の多発地帯として知られる。トンネルにおいても異方性ならびに付加地質につきものの破砕質岩盤での崩壊などに苦労させられている。

(4) 九州・沖縄地方

九州地方は地質区分では西南日本に属し、構成する地質体は同様であるが、中央部や南部の火山体により前述の西南日本に共通する帯状配列は不明瞭、あるいは大きく乱れた分布をしている。内帯と外帯を区分する中央構造線の九州における延長は臼杵一八代構造線とされるが、ここでは三波川変成岩類は見られず、内帯の領家帯と外帯の中・古生層が接する。内帯側の地質は三郡変成岩類と構造的に斜交する長崎変成岩、中・古生層および花崗岩類からなり、外帯側は中・古生層と四万十累層群が基盤をなす。また、新生代の火山岩およびその噴出物は中

部九州や南九州に広く分布し、とくに外帯側ではシラスと呼ばれる火砕流堆積物として、独特の台地地形を形成することが大きな特徴となっている。

沖縄地方は西南日本とは異なる琉球列島として琉球弧と呼ばれる地質区分を形成している。その地質構成は四万十累層群に対比され、琉球石灰岩と呼ばれる新第三紀以降の石灰岩が分布する。

九州地方の災害は梅雨や台風期の豪雨による斜面災害の多発のほか、地質条件としては長崎や佐賀での第三紀層の地すべり、南部九州のシラスの斜面災害が特徴的である。また、火山災害も雲仙、桜島に見られるように過去から現在に至るまで大きな災害を起こしている。トンネル工事で問題となる地質条件としては地下水を伴う溶結凝灰岩やシラスがとくに重要である。

8-3 平野部の地質(東京の地質を例として)

8-2で概説した地域特性は、地形的な分類で考えると、その主体は山地部の特徴と考えることができる。これに対し、応用地質的に問題となるもう一つの地形条件として平野部の地質条件がある。

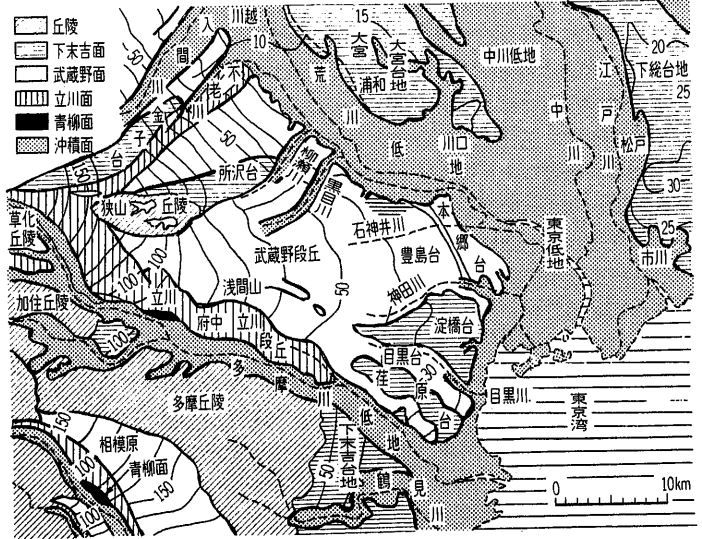
前述のように日本の平坦地は、海岸平野や山間の狭い範囲に限られ、しかも散在する。この自然条件に対し、大都市は沿岸の洪積台地や沖積平野に集中する。このため、日本における土木工事で山岳地帯に対峙する存在として、都市土木という技術分野が重要な技術要素と位置づけられる。

ここでは、その対象となる平野部の地質条件として、首都圏という地勢的な重要性も含め、東京の地形・地質を以下に整理する。なお、記述は誌面の都合もあり、概説に留める。詳しくは高橋彦治氏の近刊「川と平野の地学・第四紀層」(1999.5, 山海堂), などの専門書をご覧頂きたい。

8-3-1 東京の地形・地質

東京周辺の地形は図-63⁰に示すように、武蔵野台地などの扇状地性の洪積台地が数段の段丘面を形成した状態で見られ、それらの台地間を流れる河川沿いの三角州、砂堆、自然堤防、砂丘および一部に人工的な埋立て地を伴う沖積低地(沖積平野)が発達する。この特徴的な段丘地形は、前述の海面変動や地殻変動によるもので、その形成は第四紀洪積世以降である。

その地質の構成は最下部より新第三紀鮮新世ないし第四紀洪積世の上総層群、洪積世の江戸川層、東京層、本



太い実線は地形界(段丘崖線), 細い実線の等高線(10m 間隔)は段丘面が谷にきざまれる前の形を復元して描いてある

図-63 東京付近の地形区分⁰

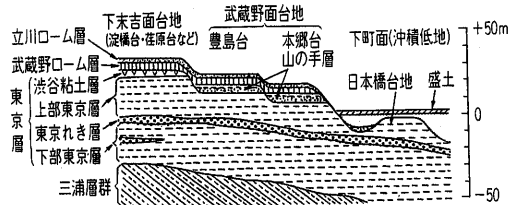


図-64 山の手模式的な断面⁰

郷層、武蔵野層など、また、その上位に七号地層や有楽町層と呼ばれる沖積層やローム層が分布する(図-64)⁰。このうち、洪積層は主に締まった砂や砂礫あるいは固結した粘性土から構成され、さらに、沖積層は全体に軟弱な地盤である。

各地質の特徴を以下に述べる。

(1) 上総層群(三浦層群)

房総半島、多摩川以南の丘陵や三浦半島では広く地表に露出しているが、東京では地表では見られず地下で基盤として分布する。これは第三紀の末(鮮新世)から洪積世の初期に堆積した砂岩、泥岩、凝灰岩からなり、厚さは1,000mを越える。東京の地下での分布深度の詳細はわかっていないが、目黒川沿岸で-10~20m、中央区付近で-100m、荒川放水路付近-200~250m、江戸川下流部で-500m前後である。本層のN値は30~50以上でもっとも信頼される支持地盤である。

(2) 東京層

上総層群の上位に重なる洪積世の海成層で、やや固結した砂層を主体とし、礫層、粘土層、火山灰質粘土層を伴う。東京層は中間にかなりよく連続する厚さ5~10m

の東京礫層が分布している。この上下位で地層の締り程度が異なることから、上部東京層と下部東京層に区分される。この礫層は渋谷、新宿付近で-10m、赤羽、上野、東京付近で-20m程度の深度に分布する。

(3) 渋谷粘土層

武蔵野台地東部の淀橋台、荏原台などのロームの下位、東京層の上位にある火山灰質粘土層で4~5mの厚さを有する。本層は軟弱で水を通しにくい。

(4) 山の手層

武蔵野台地の下に分布する河成砂礫層で、その上部は粘土、砂よりなる氾らん原の堆積物である。同層は西側では武蔵野礫層と呼ばれている。このうち下位の礫層は、面的に広く連続することが知られる反面、層厚2~15m程度の幅で、一般には5~10mと大きく変化しないことを特徴とする。また、粘土層は東部ほど厚く、粘土質で2~5mであるのに対し、西部ほど薄くかつ砂質となり、荻窪以西ではレンズ状の不連続な分布形態に変化することが知られている。武蔵野台地の縁辺部には地形上特徴的な湧水地が存在することが知られている。例えば、井頭池、善福寺池、石神井池などがそれであり、それぞれ標高50m付近に分布する。これは台地の上面を構成する透水性の高い関東ロームや段丘礫層により、地表に降った降水が涵養源となってこれらの地層を浸透し、下位の東京層や上総層群からなる不透水層に沿って流動し、その縁辺部で湧出することによる現象と考えられる。このような都市の地下水の流動系は土木工事における重要な情報となる。

(5) 関東ローム

関東ローム層は、「関東地方の洪積世の火山灰層」と定義されるもので、南関東ではその新旧によって、立川、武蔵野、下末吉、多摩の各ロームに分類される。通常露出した状況で観察されるのは、主に立川、武蔵野ロームである。前者は厚さ3mで色が明るい特徴を持ち、後者は4mで最上部には割れ目を伴うことが多い特徴を有するが、工学的にはとくに区分する必要はないと考えられる。

(6) 沖積層

東京低地の地質構造は図-65⁹⁾に示すように、隅田川~江戸川の沖積層では最大で40mを越える層厚を有する。沖積層の層序は、上部層(細砂ないし泥質細砂5~10m)、

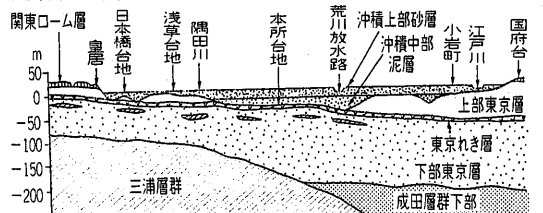


図-65 東京低地の地質断面⁹⁾

中部層(軟質シルト層, N 値1~5, 20m±)および下部層(砂礫, 立川礫層に対比される可能性がある)の3つに区分される。

8-3-2 平野部の応用地質上の問題

上述の東京周辺に見られる地形・地質の特徴は、例えば大阪府周辺でも見られ、同様な堆積物の構成からなる厚い洪積層(大阪層群)と、東京に比べやや厚層の薄い沖積層によって大阪平野は形成されている。これらの日本の沖積平野や丘陵部に共通する条件として、ある程度の強度を持つ基盤をなす岩盤が深く沈み込んでおり、洪積層や沖積層からなる新期の堆積物がある上に厚く堆積した盆状の構造をなしていることがあげられる。さらに、これらの堆積物の分布と地形条件は、自然状態で地表標高に対して高い地下水分布を形成する点でも共通している。なお、東京や大阪では昭和30年代に地下水の過剰揚水による著しい地盤沈下が発生し、その後の揚水規制により地盤沈下の抑制が図られると同時に、地下水位がほぼ静水位まで回復した状態となっている^{6),7)}。

この高い地下水条件は今後の都市での土木工事において重要な問題点と考えられている。

トンネル工事に関わる問題として、これらの共通する条件は切羽の自立性の確保がもっとも重要となる。この点については、従来より都市トンネルの中心的な工法であるシールド工法、開削工法で対応することが基本となるが、施工延長や掘削深度などの条件によって山岳工法の適用も検討される可能性がある。その前提条件は、まさに上記の共通する都市の地盤条件の問題となろう。

さらに、ここに挙げた比較的規模の大きい沖積平野は活動性の高い地質区にあって、沈降により形成されている。1923年の関東大震災や1995年1月に発生した阪神大震災の甚大な被害はこのような地質条件と、人工密集地である地勢的条件のもとで起きている。このうち、阪神大震災では、洪積台地や沖積平野で、とくに人工的な地形改変を行った地域での地盤災害の発生が報告されており、このような観点からもあらためて都市の地盤条件を検討する必要がある。

9. 地下水

9-1 地下水とは

(1) 地下水の基本概念

地下水は水循環系の中に存在する一要素であり、降水や地表水(海水、湖沼水、河川水など)などとの間で供給・流動・流出をしているものである。したがって、地下水は水循環系の中で考える必要がある。大島ら⁹⁾がトンネルの湧水を水収支的に考える必要を強調しているのはこの理由による。

地下水(groundwater)は地層中の間隙や岩石の割れ目の中にあり、それらの間隙や割れ目を通して移動する。井戸とか湧泉といった特別のものを除けば、一般にその状態を直接目で見ることはできない。水循環系内における地下水移動の特徴は、水の粘性が大きく作用し地表水に比べて数倍ないし数百倍も遅い循環速度にあることである。

地下水(subsurface water)には循環系のもの以外に地球の深部よりマグマに沿って生じた初生水、堆積岩に閉じこめられた化石水があるが、量的には少なく、取り扱い上は循環系のみで評価してよいと思われる。

(2) 地下水(subsurface water)の垂直分布

循環系の地下水(subsurface water)は、地下の垂直分布から、地下水面の上の通気帯と地下水面下の飽和帯の水(groundwater)に分けられる。通気帯の水はさらに土壤水と飽和帯直下の毛管水、両者の間の沈降水に区分される(図-66)。

土壤水は、地表直下の土壤帯水に含まれる水全般を指すが土粒子との結合状態に応じて吸着水、毛管水および重力水と表-19のように細分類される。表に用いられている pF 値とは、土壤水分状態を表わす方法であり、土粒子を結合している水を除去するのに必要なエネルギーを単位水中高さ(cm)の対数で表わしたものである。

降水後の土壤は飽和状態で重力水から吸着水にいたる

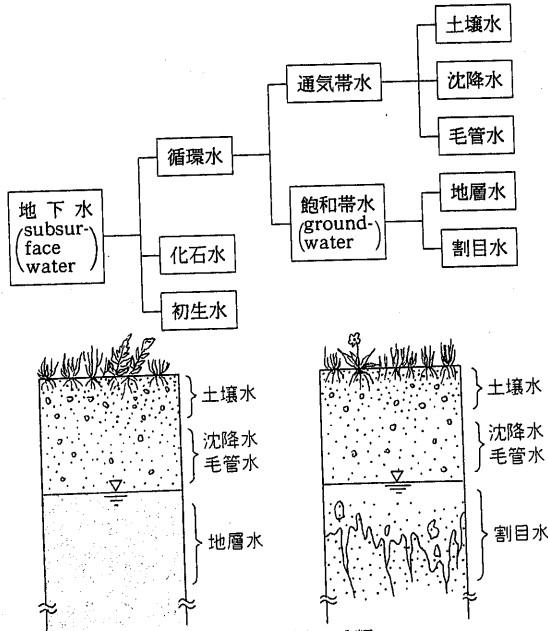


図-66 地下水の分類

表-19 土壤水分の区分と pF ⁹⁾

土壤水の種類	吸引圧(負の圧力水頭)			pF	土壤水分恒数等
	水柱(cm)	エルグ/gr	気圧		
吸着水	10^7	$98,000 \times 10^5$	10,000	7	乾燥炉 $110^\circ C$ 最大吸湿度(風乾)
	10^6	$9,800 \times 10^5$	1,000	6	
	10^5	980×10^5	100	5	
毛管水	10^4	98×10^5	10	4.2	永久しおれ点 初期しおれ点 生長阻害水分点 水分当量
				4	
				3.8	
重力水	10^3	9.8×10^5	1	3	圃場含水量 最大毛管水量
				2	
				1.8	
重力水	10^2	0.98×10^5	0.1	1.8	圃場含水量 最大毛管水量
				1.5	
				1	
重力水	10^1	0.098×10^5	0.01	1	圃場含水量 最大毛管水量
				0	
				0	

(安芸 一・多田文男, 1966をもとに作成)

あらゆる種類の水で満たされているが、晴天が続くと、通常の大気圧($pF \approx 3$, 水柱 $10^3 \text{cm} = 10\text{m}$)のもとで重力水の排除がなされ土壤水分は低下するが、水分当量($pF 3$)以上の土壤水分は晴天が続いても通常は排除されない。植物が利用しうる pF 値は1.8~3.8の範囲であり、3.6以上になると植物が枯れないように灌漑する必要がある。

飽和帯水(地下水)は、地表面からの重力水が下層へ沈降して地下水を形成されたものをいう。地下水は、それを入れている容器(地下水包蔵体)の状態によって、地層水と割れ目水に大別できる。また、水の流動しやすい層(透水層)と、しにくい層(不透水層)とに区分され、流動しやすい透水層に水を持っていれば帯水層と呼ぶ。

9-2 地下水の容器としての地質の基本的見方

(1) 地下水の容器とは

地山には一般に空隙があり、降水や地表水がその空隙に浸透・貯留して地下水が形成される。地中に貯留される状態は地山の空隙の割合や空隙の大きさに支配される。有効空隙が大きな地山(大きな容器)ほど地下貯留能力が大きいことになる。もちろん容器が大きくても容器への水の浸透・涵養がなければ地下水はないし、多くの浸透・涵養があっても容器の遮水性が小さければ(ザルのような地山であれば)地下水は貯まらないこととなる。

したがって、地下水の容器としての地質は、貯留可能で流動可能な有効空隙率を持った地層あるいは地質の分布によって分類される。

(2) 地下水の容器の種類

地下水の容器は地下水の貯留状態または透水間隙の状態をもとに、①地層、②裂隙・空洞、③破碎帯などの3

つに分類できる¹⁰⁾。これらの区分は地形・地質の状況によってなされるものであるが、地下水を貯留する間隙(開口)がその地質本来の初生(一次)的であるか、二次的に形成されたものであるかも併せて考える必要がある。

① 地層の容器¹¹⁾

沖積層、洪積層、新第三紀層に属する砂層・砂礫層・礫層・火山砂礫層・砂岩・礫岩など主として未固結あるいは固結度の弱い堆積層に見られる粒子間の空隙(図-67)がなす容器である。一般に新しい地層のものほど空隙が大きい傾向にある。なぜなら新しい地層ほど上位に堆積するので下位の地層は上位の地層の荷重を受けて空隙は押しつぶされて小さくなるからである。また、古い地層ほど空隙中の水などにより空隙に沈殿物が形成され空隙が少なくなったり連続性がなくなる膠結化作用(cementation)が進みやすく、地層は固結度が増して初期の空隙より小さな器になってしまうからである。

しかし、日本では一般に新第三紀層より古い地層になると固結度がさらに大きくなるが地殻変動に対しては脆弱になり割れ目や亀裂が発達するようになる。その傾向は古い地質ほど変動の累積を受けており、水の容器としての空隙すなわち二次的開口が発達する。その場合、水の容器にとっては堆積初期の粒子による空隙の大きさより二次的開口による割れ目や亀裂・断層・断層・断層帯などの空隙が重要になる。したがって、堆積層の容器にとって固結度と二次的開口という関係は重要である。砂岩や礫岩は新しい地層においては大きな空隙を持っているが、古い地層では粒子間の空隙は押しつぶされたり充填物で埋め尽くされたりしてほとんど初期の空隙を有していない。そのような地層での地下水の入り込める空隙は変動による割れ目しかない。しかしこの割れ目も

進化して閉塞傾向に進む。

② 裂罅・空洞の容器

溶岩や石灰岩などの地質に見られる容器である。溶岩は火山の噴出や溶岩流動後の冷却などにより、また、石灰岩は溶蝕などにより大きな空隙や洞くつを形成する。しばしば空洞が大きすぎるため、地下水としての性格よりも地表水と同じような性格を持つ。この種の容器はしばしば地表の流域分布とは異なる場合が多い。

③ 破碎帯の容器

地殻変動などで地山が変形・破壊する際に二次的開口としてできる割れ目を地下水の容器とするものである。新第三紀以前の古い地層の空隙はこの種のものが多い。したがって、古第三紀層<中生層<古生層というように古い地層ほど変動の累積を受けて破碎されている。このような地層では砂岩・泥岩・頁岩・粘板岩などの母岩の性質ではなく破碎の性質で空隙が規定される。容器の形状分布は地層の分布ではなく破碎構造の分布に支配される。

9-3 構造、地形から見た地下水の存在

(1) 構造¹²⁾

地下水の存在に影響を与える構造を整理してみると次のようになる。

① 岩石の走向傾斜によって判定される構造

単斜構造、盆地(向斜)構造は被圧水地下水を形成しやすい。この場合、基盤に関係なく帯水層をなす。透水層の性質とその厚さが問題となる。

② 断層、節理、割れ目系

これらの発達した部分は当然のこととして地下水を豊富に持つ。この場合、割れ目の多少とその大小が問題となる。

③ 不整合

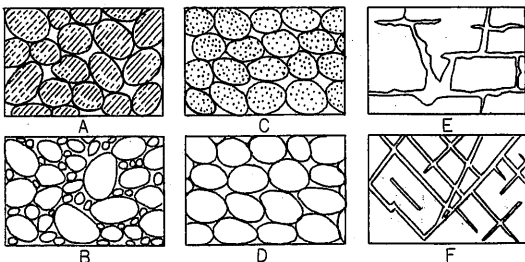
上位の地層が空隙質になりやすく、地下水脈を形成しやすい。このような場合、基盤の構造がわからない。

④ その他

風化の状況、河川網も地下水の存在に影響を与える。また地層の水平、垂直への連続状態も重要である。この点については、地層の堆積環境および地史に関する情報から判断すべきである。

(2) 地形¹³⁾

地形は、地下水の水文的環境としての涵養→流動→排出に大いに関係している。一般に起伏の少ない緩傾斜部は涵養地帯、起伏の大きい傾斜の変換部は排出地帯となりやすい。このような観点から地形を観察すると、地下水に関する情報が意外と多いことがわかる。



- A: 粒の揃った沖積層空隙率大
 B: 粒の不揃い沖積層空隙率小
 C: 粒の揃った砂利沖積層空隙率大
 D: 粒の揃った沖積層だが充填物があって空隙率小
 E: 溶けて隙間のできた岩石
 F: 破碎によって隙間のできた岩石

図-67 地下水の含まれる空隙のあり方(Meinzerによる)

以下に代表的地形と地下水との関係を述べる。

- ① 海岸平野、砂丘、三角州
良好な帯水層を形成する。
- ② 氾濫原
地下水の良好な流路である。火山灰あるいは新しい河川堆積物によって被覆された旧氾濫原(旧河道)は目に見えないが良好な地下河川を形成する。
- ③ 扇状地
良好な帯水層を形成する。しかし一般には扇状地の頂部は涵養帯、中央上部は自由水帯、中央下部は被圧水帯、末端部は湧水帯を形成していることから、水利用上は被圧水帯以下の地域がめぐるまれている。
- ④ 段丘、台地
上述の地形が海退による造陸運動の結果形成された地形であり、地下水を下部に持っている。樹枝状の開析された谷の谷頭は地下水の露頭とみなしてよい。
- ⑤ 盆地
地下水が豊富で、被圧地下水を形成することが多い。
- ⑥ 火山地帯
扇状地に類似した水循環機構を持っている。山体部は涵養帯をなしているため、地下水を得ることは困難であるが、山麓部は排水帯であるため大量の水が得られる。ただし、割れ目水的な性格とともに、溶岩流の方向に規制された地下水脈(溶岩流の上下のガスが抜けてできたクリンカー(第4章図-4参照)と呼ばれる多孔質安山岩や角礫岩や火山灰に形成される帯水層)をつくることが多いので、水は偏在するか、ある場所に集中することが多い。
- ⑦ カルスト地形
台地表面において地下水を得ることは困難。洞穴水を形成することが多い。火山地帯と同様に、水は偏在あるいは、ある場所に集中するが大量の水が得られる。
- ⑧ 一般山地
山崩れ、地すべり、崖すい、岩脈などに地下水を伴うものが多い。上述の①～⑦に比較して得られる地下水は一般に少ない。

(3) 割れ目の進化¹²⁾

岩盤内の空隙のうち、地下水の容器として大きな役割を果たす割れ目はいつまでも同じ空隙を維持しているとは限らない。割れ目が発達していく場合もあり、また割れ目が閉塞していく場合もある。割れ目の閉塞は沖積層や洪積層などの堆積した粒子の空隙と同じように荷重を受けたり流入物の沈殿・付着を受け、割れ目空隙にも老化現象が発生する。

一度形成された割れ目に地下水が流れ込むと、酸化鉄

やマンガン、他の種々の粘土鉱物も形成され、割れ目の空隙を埋めていく。老化の主役は地下水の流動である。このような老化の現象は井戸の老朽化でも類似のものがテレビモニターによって観察される。温泉作用や熱水作用によっても割れ目の空隙が充填される場合も多い。

9-4 地下水の水そのもの

(1) 地下水体の見方

地下水は、地質調査におけるボーリングコアのように地下に孔を掘って採水することはできても、地下にどのように存在し、どのように流れているかは直接確認することは難しい。地質や岩石コアのように実物を目で確かめることができないばかりでなく、地下水の流れをうまく表現することが困難である。地下水流動の基本とされるダルシーの法則にもとづく地盤の透水係数は、単位断面積内を流動する単位時間内の流量(ディメンションとして平均流速となる)を表わしている。

例えば、地下水は地山の空隙を流動してトンネル内に湧出するが、その湧出の仕方はタンクを逆にしたように一度に出てしまうわけではない。まるで水飴のビンのように穴を開けたようにゆっくり湧出してくる。さもないと山岳地帯の地下水は雨や雪によって涵養されるよりも速く地下水は流出してしまい山地の逕流は存在しえないことになる。このメカニズムは地下水の水の粘性によるものである。水は、流動する空隙と流動速度が小さいと粘性が支配的な流れになることが流体力学¹³⁾により知られている(レイノルズ数が1以下)。

このような直接目で見るできない地下水に対しての見方は、流動に関しては、①ポテンシャルによる方法、②トレーサによる方法がある。

(2) 地下水のポテンシャル

一般に地下水の表面を平面的に等高線で表わしたものが、よく知られている地下水面図である。最近までは、地下水体の内部の水面(水圧・水頭)を計って地下水の表面より高いと被圧水(面)と呼んでいた。最近では流動しない地下水以外はすべて地下水体の内部の水圧が異なり、あたかも地下水の表面を表わした地下水面図と同じものが地下水体内部においても規則的に分布することが明らかになった。これを地下水のポテンシャル分布という。地下水の涵養域では地下水体の深部ほど水圧(水頭)は低く、湧出域では深部ほど水圧が高い。この地下水体内部のポテンシャル分布図が得られるようになってようやく地下水流動の構造が明らかにされてきた。

トンネル工事では従来被圧水とは高水圧の湧水のことを指していたが、学問的な定義では上記のごとくであり、切羽周辺の水圧分布がポテンシャル分布である。これにダルシーの法則や透水係数の概念を適用し地下水の平均

的な流動を解析することが可能になった。

谷川の水が地下水の湧出によるというブシネスク¹⁰⁾の基底流量の概念をポテンシャル分布によって説明したヒュバート¹¹⁾の考えは画期的なものであった。この理論と概念から高橋¹²⁾は、沢水の基底流量(湧水流量)を測定することにより山岳トンネル掘削に伴う恒常湧水量の予測を北陸トンネルにおいて行った。さらに大島¹³⁾は水循環の概念をも取りこみトンネル工事工程に沿って掘削前・掘削中・掘削後の湧水量と地下水面の非定常的变化を予測する手法まで発展させた。

(3) トレーサ

トンネルの工事では湧水の規模が大きくなるほど、実用的に平均の地下水流動の考え方・解析結果では役に立たない場合が多い。そのため実際の地下水の動きに焦点をあてて調べてみようという手法がトレーサによる方法である。

トレーサ法は、自然のトレーサによる方法と人工トレーサ法による方法に分けられる。前者のトレーサとしては、水質・環境同位体・温度などが用いられ、それらの変化から地下水流動の解明が行われている。ポテンシャルによる流動と同様に、主にマクロ的な広域の地下水流動における水の循環(起源)を対象としている。トンネル掘削中に湧出する異常出水や温泉水などの起源の解明に用いられる場合が多い。

人工トレーサ法は、食塩や染料などを用いて、地下水・湧水の起源、流動経路、実際の速さ、透水性をあきらかにする目的で行われている。人工トレーサ法で得られる地下水の速さ(実流速)はダルシーの平均流速より数倍大きく局部的な指向性の強い流れなどが把握できる。トンネル直上の沢水などにトレーサを投入してもトンネル湧水中にはなかなか検出されにくい。地下水体の内部流動構造とあわせて用いることが必要である。

(4) 地下水の涵養・流動量・流出量

地下水そのものの存在を支配する重要なものは地下水の流動量である。流動量は降水による涵養量が測定できれば求められるが降水量は計測できても涵養量の計測は

非常に難しい。ヒュバート(1940)はブシネスク(1905)が述べている基底流量は地下水の流出量とみなされるとしている。したがって、基底流量を測定すれば、収入=支出(基底流量)の関係から涵養量と流動量を推定することが可能となる。無降雨が続いたときの沢水は、地下水の流動・流出量であり、トンネル湧水に対する涵養量でもあるといえる。

(文責：木谷日出男・(財)鉄道総合技術研究所主幹技師/石橋弘道・スイモンリサーチ(株)代表取締役社長/大島洋志・国際航業(株)取締役技術センター長)

参 考 文 献

- 1) 木村敏雄・速水格・吉田鎮男：日本の地質，東京大学出版会，1993。
- 2) 日本応用地質学会：平成10年度シンポジウム予稿集「地域特性に見る応用地質上の問題と展望」，日本応用地質学会，1998。
- 3) 「日本の地質」刊行委員会委員：日本の地質(全9巻)，共立出版，1986-1992。
- 4) 貝塚爽平：紀伊国屋新書C-8東京の自然史，紀伊国屋書店，1977。
- 5) 東京地盤調査研究会：東京地盤図，技報堂，1959。
- 6) 東京都土木研究所：昭和61年の地盤沈下，昭62，都土木技研年報，1987。
- 7) 土質工学会関西支部・ほか：新編大阪地盤図，コロナ社，1987。
- 8) 大島洋志・西森紳一：トンネル工事を対象とした水文調査法の研究，鉄道技術研究報告，No.1108.1979.3。
- 9) 安芸咬一・多田文：水資源ハンドブック，朝倉書店。
- 10) 高橋彦治：土木技術者のための地質学，鹿島出版会，1974。
- 11) 駒田広也・石橋弘道：風化・変質帯での地下水の挙動，土と基礎，40-11，1992。
- 12) 石橋弘道：水文地質調査の着眼点，地質と調査，3号，1989。
- 13) Todd, D.K.: Ground Water Hydrology, John Wiley & Sons, London, 1959.
- 14) Davis, S.N., R. De Wiest, Hydrogeology, John Wiley & Sons, 1966.
- 15) Hubbert, M.K.: The theory of groundwater motion, Jour. Geol. 1940.
- 16) 高橋彦治：トンネル湧水に関する応用地質学的考察，鉄建報告，No. 279, 1962。
- 17) 大島洋志：トンネル掘削に伴う湧水とそれに伴う水収支変化に関する水文地質学的研究，鉄建報告，No. 1228, 1983。

(土木工学社図書案内)

岩盤の計測と解析

工博 鈴木 光著

A5判 箱入 260ページ 本体価格4,326円(税込み) (¥380円)

最近では、有限要素法を利用し、地盤や構築物の変形や応力分布に関する予想解析が行われるようになりつつある。そのために入力などに信頼度の高い各種計測値が要求されるようになってきた。

このような理由から、建設工事では、従来にも増して計測や解析が重要となりつつある。

本書は、応用範囲も広く重要と思われる岩盤の計測と解析法の紹介と解説を試みた実務書である。

部空間が狭小なため、兼用型検知装置を分割して設置した(写真-2)。シールド機内前方隔壁のマンホールに抽出装置を設置し(写真-3)、メタン分析装置は中央部側壁に設置した。制御装置は防爆仕様(内圧式防爆)にすると装置自体が大きくなりかつ内圧制御盤も必要となるため、非防爆エリアの後方台車上に設置した。シールド機には大小様々な型式があり、そのいずれにも対応できるのが本装置の特徴である。

5. おわりに

冒頭に述べた平成5月2月の江東区において発生したトンネル掘進中のガス爆発災害を教訓として、当局ではシールド工法によるトンネル築造工事用の地層メタン検知方法ならびに装置の開発を、2年にわたる実証試験を含め民間会社((株)銭高組、(株)ティクス、(株)地下計測技術コンサルタント)の協力のもとに推進してきた。

本装置の今後の課題は、まず測定コストの削減を進めるとともに、数多くの現場で施工実績を積むことであり、それによる信頼性を向上させることである。

本装置開発の目的は既に述べたように、従来の各種安全対策をより補完しようとするものであって、本装置によりそれらの対策が決して不要になるものではない。幸い、その後同様の災害の発生は見えないものの、決してメタンの危険性が薄れたわけではない。

都市のインフラ整備事業については、東京低地に限らずメタン発生危険地帯においても地下空間の利用が不可欠である。このようなことから、今回開発した地層メタン検知装置はメタンによる爆発などの事故防止対策の有効な手段として開発を進めてきた。その結果、最終目標である泥水・泥土圧式兼用型検知装置の試作も完了し、本年5月から掘進を開始した亀戸工事において、本採用に向けての最終実証試験を行っているところである。

シールドトンネルの新技术

シールドトンネルの新技术研究会編 代表 鈴木 章

B5判 289頁 本体価格4,660円 円380円

本書は、最近のシールドトンネルの新技术を実務経験者を中心にまとめたものである。本書の特色は、シールド工法の変遷と将来の技術開発の方向性の現況をまとめたうえで、新技术について調査・計画編、設計・施工編とに分けて、その理論と実際についてソフト、ハードにわたり記載している。また、これらのことを実務にすぐさま活用できるように、付録としてセグメントの設計、地盤変位予測解析、施工計画についての計画・設計例も紹介し、実務者をはじめトンネル技術者のニーズに応えた内容となっている。

〔目次〕 第一章 概説 1. シールド工法の変遷と将来の技術開発の方向性 ○シールド工法の歴史 ○シールド工法誕生以前のトンネル工法 ○シールド工法の登場 2. わが国におけるシールド工法の歴史 ○シールド工法の導入と発展の経緯 ○シールド工法の現況 3. 今後の技術開発の方向性 第二章 調査・計画編 1. シールド工法の調査技術 2. 断面および線形計画 3. シールド機種の種類と選定 4. 新しいシールド工法 第三章 設計・施工編 1. 覆工 ○一次覆工の設計 ○二次覆工の設計と施工 ○シールドトンネルの防水技術 2. 立坑の設計と施工設備 ○立坑の設計と施工 ○シールド機の構造と装備 ○仮設備の計画 ○シールド工事による自動化 3. 掘進と施工管理 ○シールド掘進と施工管理 ○シールド発進と到達 ○裏込め注入工法と注入効果 ○曲線施工と地中接合 ○補助工法の種類と選定 4. 近接施工と環境対策 ○近接施工と対策 ○アンダーピニングおよび支障物対策 ○シールド工事と環境対策 ○新工法の現状と将来展望 ○ECL工法 5. 切羽の安定と地盤変状防止 ○切羽安定の理論と実際 ○泥水式シールド工法の切羽安定 ○土圧シールド工法の切羽安定 6. 地盤変位の理論と実際 付録 1. セグメントの設計例 2. 地盤変位予測解析手法の例 3. シールド工事の施工計画

 株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(7)

第Ⅱ編 トンネル工事と地質条件(1)

「応用地質学」連載講座小委員会

はじめに

トンネル工事と地質の係わりは、序文 2-2 で紹介したように密接なものがある。本編では第Ⅰ編の基礎的な地質学をベースとして、トンネル工事に対する地質の重要性をさらに踏み込んで紹介することを目的に、トンネル工事と地質条件の関係を事例も含めて概説する。トンネル工事には表-1 に示すように地質や地質構造のみならず、トンネル工事に関係する地下水などの水文条件、土かぶりや斜面形態などの地形条件などトンネルおよびその周辺の総合的な地山条件が関係しており、これを併せて紹介したい。

なお、具体的な地質調査の詳細や進め方などについては、第Ⅲ、第Ⅳ編で記述する。

1. 路線選定と地質条件

1-1 一般

トンネルの位置の選定は、全体のロケーションの中でまず考えなければならない。トンネルだけよいところへ選定しても、明り区間で苦勞するようであれば意味がない。したがって、地質条件の他に、①駅、インタチェンジなどの位置条件、②地形条件、③気象条件、④国立公園、砂防指定地域、文化財などの法的規制、⑤公害など環境条件、⑥開業後の保守条件と運転条件、⑦鉱業権、水利権などの権利、⑧用地、建物などの補修条件、⑨工費、工期などの施工条件、などを考慮して比較ルートを作成した後、個々のルートの総合的な優劣を比較し、その中でルートの大筋を決定する。決定ルートに対しては、さらにきめ細かい検討を上記の条件を念頭におきながら行うことになる。

全体のロケーションは路線の規模にもよるが、一般に1/20万~1/5万の地形図で行い、その後の局部的ロケーションは1/1万~1/2,500の地形図で検討している。この際に、トンネルの位置選定では、周辺環境の保全や対策などを考慮したうえで、問題となる地形・地質をでき

表-1 地山条件

項目	内容
地質	地質の種類と分布、硬岩・軟岩・土砂などの地山評価 トンネルの設計に必要な物理定数・力学定数 風化・変質の状態、割れ目頻度・割れ目の状態などの岩盤評価 膨張性地山や含水未固結地山などのとくに問題となる地山の有無
地質構造	断層破砕帯、褶曲じょう乱帯、不整合など 地熱、温泉、ガスなど
地形	トンネルルートの地形：土かぶり、リニアメントなど 坑口付近の地形：地すべり、崩壊地形、偏圧地形、土かぶりなど
地下水	地下水位、帯水層、透水係数、地表湧水、集水域
環境	濁水、騒音、振動、汚濁排水、大気汚染など 周辺構造物、交通阻害など

*環境問題は直接地山条件といい難いが、考慮すべき条例として含める。

るだけ避け、適切な土かぶりを確保し、できるだけ地下水頭の低い位置を選定する必要がある。また、トンネル坑口や換気坑・避難坑の付属施設、坑外設備や土捨て場などの立地条件や施工性についても十分に留意した線形とする必要がある。とくに、下記の特殊な地山条件や特殊な立地条件などは工事に多大な影響を及ぼすので、路線選定時からそれらの分布や性状などを十分把握し、その対策を検討する必要がある。

(1) 特殊な地山条件

- ① 地すべりなどの移動性地山および斜面災害が予想される地山
- ② 断層破砕帯、褶曲じょう乱帯
- ③ 含水未固結地山
- ④ 膨張性地山
- ⑤ 山はねが予想される地山
- ⑥ 高い地熱、温泉、有毒ガスなどがある地山
- ⑦ 高い水圧や大湧水の発生が予想される地山

(2) 特殊な立地条件

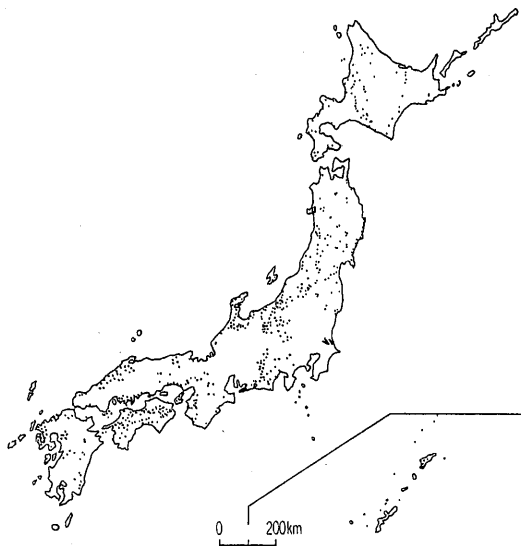
- ① 小さな土かぶりの場合
- ② 都市域を通過する場合
- ③ 水底を通過する場合
- ④ 斜坑や立坑部
- ⑤ 坑口部
- ⑥ 近接施工となる場合
- ⑦ 大断面となる場合

1-2 特殊な地山条件

1-2-1 地すべりなどの移動性地山および斜面災害が予想される地山

トンネル坑口や土かぶりの小さい谷部や斜面に近接したトンネルの場合、地すべりや斜面崩壊の可能性を調査・検討するとともに、トンネルの安定性を評価し、対策工の可能性を検討する必要がある。坑口は極力地すべり地を選定することのないようにすべきである。

地すべりは図-1に示すように全国的に分布しているが²⁾かなり偏りが認められ、とくに東北地方の日本海側、四国中央部に多い。また、地すべりの特徴としては、①特有な地すべり地形を呈している場合が多い、②地質的には風化しやすい第三紀層・第四紀層の泥岩・凝灰岩、断層・破碎帯を伴っている中・古生層および変成岩、火山作用(温泉・熱水変質作用)を受けた火山変質岩などが一般にすべりやすい地質である、③基岩の走向・傾斜や風化の程度や地下水状況などが大きく影響している、④地すべり地帯では、現状の地山のすべりに対する安全率は、1.0~1.10程度と想定されかなり不安定な状況にある、などである。このような地すべり地帯でトンネルを建設する場合には、トンネル施工に伴う地すべりの誘発

図-1 日本の地すべり²⁾

が懸念されるため、慎重な対策が必要である。

具体的には次のような事象が問題となる。

- ① トンネル掘削による地すべり、斜面崩壊の誘発
- ② 偏圧、地山の移動によるトンネルの変形・変状発生
- ③ 切羽・天盤の崩落
- ④ 地表沈下・陥没

とくにトンネル坑口部が地すべり地帯にあっている場合には、地すべり対策を実施した後にトンネル施工する必要がある。また、トンネル坑口部がこのような地帯にあっていない場合にも、トンネル掘削に伴うゆるみやすべり面の切除、坑口の切り盛りによって誘発される可能性を検討する必要がある。

地すべりとトンネルの位置関係では³⁾、大きくすべり運動方向と平行する場合と直交する場合に分けられる。地すべり運動方向と平行な場合は、すべり面を通過しなければすべり面への影響は大きくないが、すべり面土塊中を掘削する場合は著しく破碎されているので掘削が困難になるので、すべり面下に入れるべきである。また、地すべり運動方向と直交する場合には、地すべり末端部では地すべりが発生しやすく、地すべり頭部ではトンネル自体への偏土圧の影響が大きい場合がある。いずれにしても、トンネル掘削によるゆるみが地すべりに影響を及ぼす可能性が大きいので、ゆるみを極力防止するような対策が必要となる。

1-2-2 断層破碎帯・褶曲じょう乱帯

断層破碎帯には数mから100mを超えるものまで様々な規模のものがあるが、幅10m以上の広い断層などについては、事前の調査で想定することができるが、幅が数m~10mの破碎帯については、事前調査の経済的な制約などもあって把握されていないことも多々あり、施工中に対応するのが現状である。

断層破碎帯でトンネル施工上問題となる事象は次の3点である。

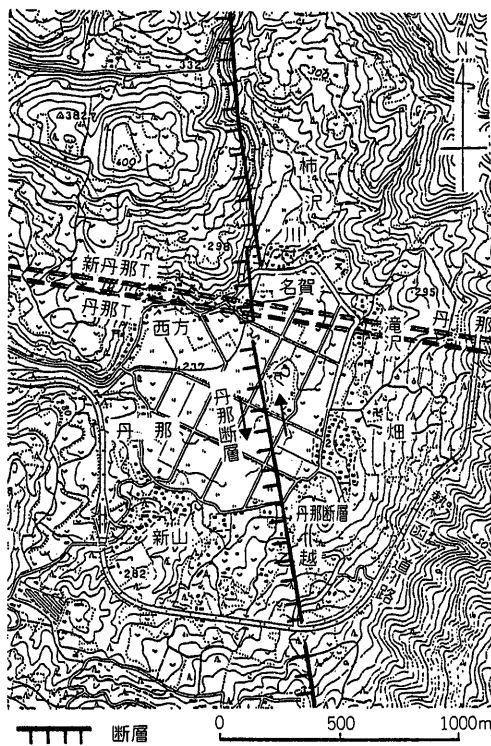
- ① 切羽・天盤の崩壊・流出
- ② 膨張性地圧の発生(土かぶり圧が大きい場合など)
- ③ 突発的大量湧水・高圧湧水

また、活断層は有史時代に動いた断層で、図-2に示すようにわが国に広く分布している⁴⁾。丹那トンネルでは、工事中の昭和5年の北伊豆地震で丹那断層が図-3に示すように大きく左にずれたことがある⁵⁾(第I編5-3-4(2)、7-4図-55参照)。ということで、活断層はできることなら避けるのが望ましい。

なお、活断層や規模の大きな断層破碎帯や褶曲構造では、事前調査である程度把握でき、土圧、地耐力不足、突発湧水などが原因で工費が増大、特殊工法を必要とするので、できればこれを選避すべきである。どうしても

破碎帯を横切らなければならないときは、できるだけ破碎帯に直交させるとともに、破碎帯の幅は場所によって異なることを認識して、その幅のもっとも狭い区間を選ぶとともにできるだけ浅い土かぶりで通過することを心がけるべきである。

褶曲については、とくに第三紀グリーンタフ地域の褶曲帯が問題となる。中・古生層の褶曲構造はすでに終息しており、地質構造的な応力が問題になることはないが、新第三紀層の褶曲帯は現在も進行中であり、褶曲軸付近では、土かぶり圧に加えて、かなり大きな地質構造的な応力が作用している場合があり、軟岩で岩石そのものの強度も小さいため、膨張性地圧が作用することがある。また、褶曲軸付近は断層を伴うことも多く地層が激しく破碎されていて大量の地下水を伴うことが多い。また、地質時代と地域によっては石油やガスの貯留層になっていることもあり、地すべりなどの自然災害の多発地点と



(a) (国土地理院 1/25000 地形図, <熱海>)
(山崎晴雄: 丹那断層と丹那盆地, 1983. 日本第四紀学会大会巡検案内書, 1983)

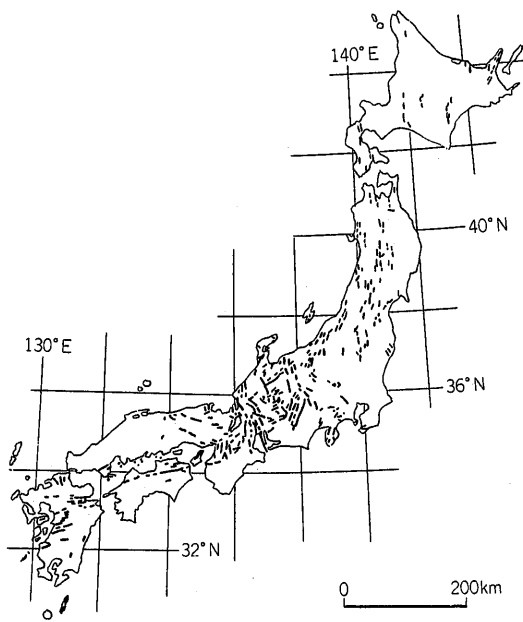
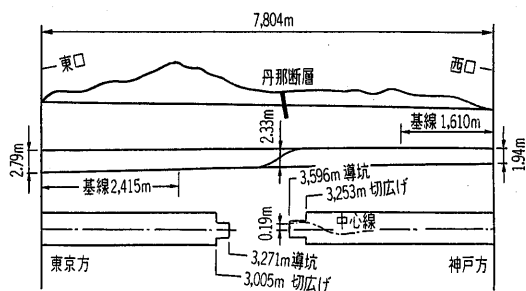


図-2 日本列島内陸の活断層分布¹⁾



(b) 地震断層による丹那トンネルの変位
図-3 活断層と交差するトンネル

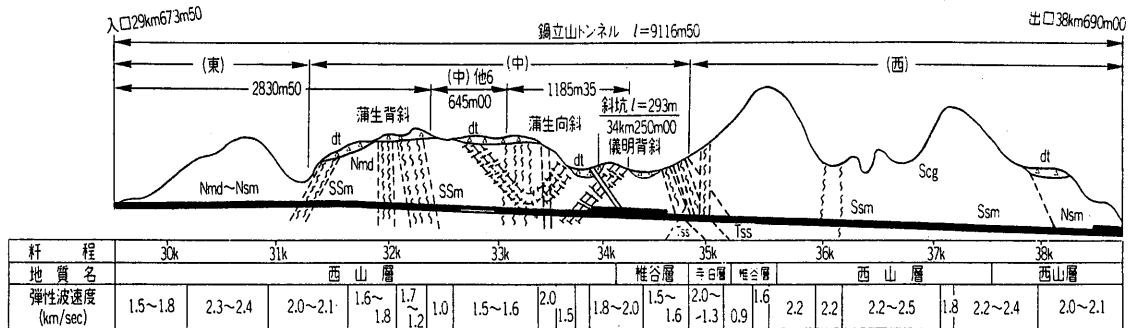


図-4 鍋立山トンネル地質縦断面図

杆程	30k	31k	32k	33k	34k	35k	36k	37k	38k										
地質名	西山層				椎谷層	幸白層	椎谷層	西山層	西山層										
弾性波速度 (km/sec)	1.5~1.8	2.3~2.4	2.0~2.1	1.6~1.8 1.7 1.2	1.0	1.5~1.6	2.0	1.5	1.8~2.0	1.5~1.6	2.0~2.0	0.9	1.6	2.2	2.2	2.2~2.5	1.8	2.2~2.4	2.0~2.1

一致する場合が多い。北越の地すべり地帯を20年近くかけてやっと貫通した鍋立山トンネル⁶⁾は背斜軸付近で、著しく劣化した粘性土地山に封入された最大17kg/cm²の高圧可燃性ガスのために難航したトンネルとして有名である(図-4)。

1-2-3 含水未固結地山

新第三紀以降に堆積した洪積層や一部沖積層を形成する砂質土や礫質土、火山灰、火山礫(軽石)などの未固結ないし固結度の低い堆積層は総称して未固結地山と呼ばれる⁷⁾。トンネルがこのような地山に遭遇すると、

- ① 地山の強度が小さく切羽の自立性が悪い
- ② 地山の強度・剛性が低く変形が大きくなる

といった問題が生じる。とくに、含水した状態になると、切羽の流出・崩壊、土かぶりの小さい場合の地表面沈下・陥没および大量湧水や地表漏水などの問題を生じやすい不良地山となる。未固結砂層・砂礫層の場合は地質構造が単純なことが多いので、踏査、ボーリング調査、孔内検層、地下水調査などにより、地質性状や流動化のかなりの推定が可能である。また、粘土などの不透水層と互層をなしている場合には、未固結砂層・砂礫層の地下水は被圧している場合が多く、切羽が近づいても被圧水圧が減少せずに残っているため、そのまま不透水層を掘削すると、地下水の噴出とともに大量の土砂が流出する事態となる。したがって、このような場合、事前に砂層の地下水を排除する対策を講じる必要がある。しかしながら、互層地山では単一砂層と比べると排水効果が悪く、不透水層上に地下水が残留し、層境からの湧水により砂層が流出することもあるので注意を要する。一方、火山地帯の場合は、旧地形に支配されるため、地質構造が複

雑で、さらに新期の堆積物が地表を被っている場合が多いので、事前調査による地質の予測は難しいのが現状である。とくに新期の火山噴出物からなる地帯は、一般に地表部では水を得にくいが地下水は豊富であり、丹那、榛名、中山、塩嶺トンネルなどにみられるように、大規模な湧水と濁水で難航することが多いので極力避けるべき地質の一つである。

例えば、上越新幹線中山トンネルは⁷⁾、図-5に示すように、高崎・上毛高原駅間をほぼ直線で短絡する路線中、その中間部の小野子・子持両山の鞍部および高山盆地地下を通過するものである。その中間部の四方木・中山両工区においては、2度にわたる未・半固結の火山噴出物層(八木沢群層)からの異常出水とそれによる立坑工区の水没事故などによって工期が大幅に遅れたためにルート変更が余儀なくされている。これは当初の計画路線が大量の高圧湧水のため切羽維持が困難となり、迂回坑により問題部分を仮突破しようとしている段階で、本線右側に良好な岩体が見つかり、いろいろな迂回曲折を経て最終的にルートを変更したものである。

1-2-4 膨張性地山

トンネル掘削により強大な土圧が作用し、内空断面が大幅に縮小するような地山で、新第三紀の泥岩・凝灰岩、断層部の粘土、破碎帯、温泉余土、蛇紋岩などにみられる。単に岩石の種類や性質のみでなく、土かぶり圧による応力や褶曲構造などによる地質構造的な応力との関連も大きく、同一基準によって膨張の大小を判定できないことが多い。膨張性地山のトンネルでは、ゆるみ土圧などよりはるかに大きい土圧が作用して、施工中はもとより、トンネル完成後も継続的な増加をきたす場合も多く、供用後のトンネル覆工に変形がおよび、後年改築を余儀なくされる事例も往々にしてある。こうしたトラブルを防ぐためには、トンネルの設計・施工の段階で、地形、地質、近隣の施工事例の調査などからこうした現象が発生する可能性を検討しておく必要がある。その結果、もし疑わしい場合には地質精査や施工上の対策について配慮しておかなければならないが、その際、適切な判断を

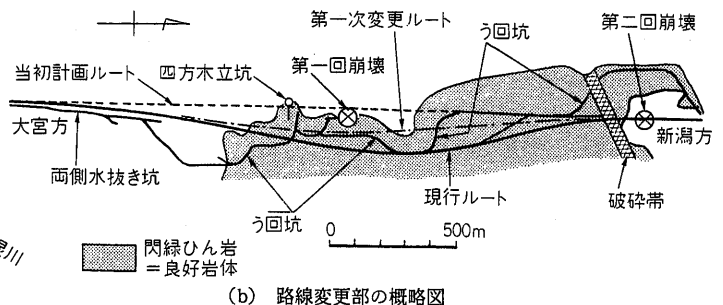
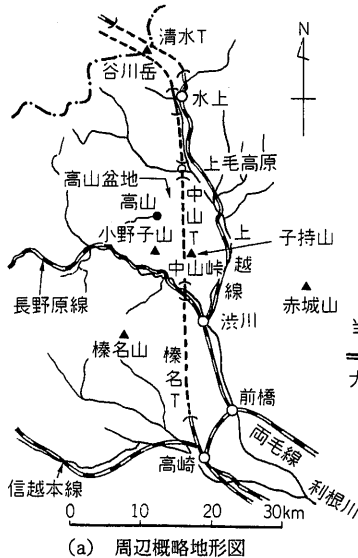


図-5 中山トンネルの地形と路線変更図⁷⁾

下すためには、膨張性地山の地質・分布・挙動・発生する現象などについての十分な知識が必要とされる。

膨張性現象を発生する原因としては次のようなものが起因するものと考えられている。

- 1) 岩石の風化や吸水などに伴う膨張、脆弱化。
- 2) 掘削に伴う応力の再配分による塑性変形と体積膨張。
- 3) 地質構造的運動などに起因する潜在応力の解放によって誘発される過大な塑性変形。

また、膨張性地山に遭遇する可能性のある地質、岩質としては次のようなものがある⁹⁾。

① 第三紀の泥岩・頁岩・凝灰岩

膨張性粘土鉱物としてスメクタイトを多量に含み、吸水による体積膨張を生じやすく、乾湿効果により、岩石が破碎するスレーキングを生じやすい。また、地山強度が小さいため、トンネル掘削に伴い周辺の岩石の破壊あるいはせん断面付近の吸水軟化による強度低下とそれに伴う塑性流動が主因として膨張性を生じやすい。

② 中・古生層の頁岩・粘板岩・結晶片岩類、千枚岩類

中・古生層の頁岩・粘板岩は、構造運動を受けており、また結晶片岩、千枚岩は、長期間にわたって激しい圧縮変形と高温・高圧の作用のもとで分解し再結晶した岩石で、圧縮変形によってできた剝離性の強い片理面をもっている。これらの岩石自体には膨張性はほとんどないが、断層破碎帯などでは地下水の影響や破碎作用を受けて粘土化しており、さらに、片理面における強度異方性によって起るすべり・せん断破壊が膨張の原因となる。

③ 蛇紋岩

蛇紋岩は熱水(200°以上)による加水変質により10%以上の岩石の体積増加のため、自破碎作用によってできた割れ目が多く、葉片状に剥がれやすい岩石または滑石質粘土状岩石が多い。また、変質の過程の中でスメクタイトが生成され、破碎風化作用によって粘土状となる。さらに、岩石の中での状態の変化がはなはだしいなどの特徴がある。蛇紋岩の分布は、主として岩床や断層破碎帯、堆積岩の層理面、片岩の片理面などの弱線に沿って進入し、脈状、レンズ状岩体をなしている。蛇紋岩の膨張現象は、応力解放による一種の塑性領域の発生によるものと考えられ、岩石の結合力の欠如によるせん断破壊による押し出しが主とみられる。

④ 温泉余土・変朽安山岩など熱変成作用を強く受けた岩類

原岩は主として火山岩や火山砕屑岩であるが、火

山作用の熱気・熱水のため著しく変質粘土化しスメクタイトを多く含有し、強度がきわめて小さいため、大きな土圧が作用する場合が多い。また、一連の化学反応の結果、硫酸が生成され湧水をかなり酸性にし、覆工コンクリートの強度を劣化させる作用を持つ。

1-2-5 山はねが予想される地山

山はねは、爆音とともに切羽近傍や岩盤が急激に破壊し、破壊された岩片が飛び跳ねることをいう。一般に地殻応力が卓越しているなどの理由で岩盤内に存在する破壊条件に近い応力状態にある場所が掘削によって破壊応力条件に達し、岩盤に貯えられていた弾性ひずみエネルギーが急激に解放される現象とされる。山はねは、ぜい性度(一軸圧縮強度と引張強度との比 σ_c/σ_t)が大きい岩石とか、ボーリングコアがボーリング軸の直角方向に薄く割れて円盤状になるディスクング現象がみられる場合に発生する傾向があるとされる。山はねのわが国の事例としては、図-6に示すように大清水トンネル、関越トンネルなど⁹⁾がある。上越新幹線の大清水トンネル⁹⁾では土かぶりが約500mで兆候が見られ、1,000mを超えると多発し、掘削後大きいものは量大から小さいものは数cm程度の岩片が異音とともに飛散し、危険で切羽に近づくことができず、このためロスタイムがでて作業能率が落ちると、本来ならば無普請ですむ岩盤を山はね防護のため支保工を要することになり進行にも影響がでている。また、関越自動車道関越トンネル¹⁰⁾においても土かぶり750~1,050mで多く発生し、このときの対策としては、H型鋼製支保工、切羽へのロックボルトの打設および切羽全面にナイロンネットをかけるなどを実施し、作業空間の安全を確保している。

最近の事例としては国道140号雁坂トンネル¹¹⁾の花崗岩の比較的薄い土かぶり(約200m)でも、山鳴り、山はね現象が発生しており、AEによる山はねの可能性について報告されている。

1-2-6 高い地熱、温泉、有毒ガスなどがある地山

高熱下のトンネルとしては、炭坑や鉱山のように、大深度であるため高熱となるトンネルと、火山地帯の影響

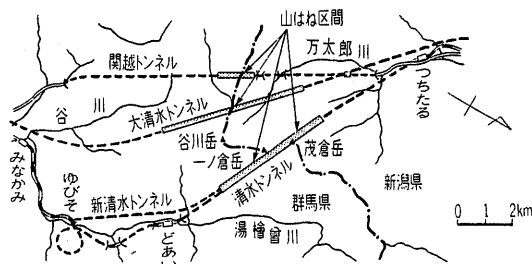


図-6 谷川連峰における山はね発生区間¹⁰⁾

表-2 安房トンネル施工上の課題¹²⁾

平湯側(岐阜県)	中ノ湯側(長野県)
<ul style="list-style-type: none"> ・「熱水帯」 ①作業環境の確保の可能性 ②薬液注入による止水の可能性 ③注入材料の耐久性 ・「平湯低速度帯」(火山噴出物層) ①地質状態の把握と評価 ②湧水対策と水文環境の影響 ③切羽の自立性と施工方法 	<ul style="list-style-type: none"> ・「高熱帯」 ①作業環境の確保の可能性 ②材料の温度応力と耐久性 ③熱水噴出の可能性と対策 ④火山性ガス突出の可能性 ⑤火薬類の耐熱対策 ⑥NATMの適応性 ⑦重機の窓ガラスの曇り ⑧開通後のガラスの曇り

によるものがある。

火山地帯のトンネルでは、高圧熱水の突出、火山性ガスの突出、岩盤の高熱化などの問題が懸念される。安房トンネル¹²⁾では表-2のような課題に対してその対策を検討している。

過去の高熱下のトンネル施工事例¹³⁾としては、新黒三導水路トンネル・岩盤温度 175℃(富山)、小和瀬発電所導水路トンネル・岩盤温度 132℃(秋田)、国道 158 号取入トンネル・岩盤温度 96℃(長野)、国道 158 号安房トンネル調査坑・岩盤温度 75℃、湧水温度 73℃(長野、岐阜)がある。

高熱下のトンネルと判断される場合にはルートを回避する方向で検討する必要がある。なお、温泉・鉱泉の場合は旅館の位置でなく、泉源の位置と構造を調べないと誤りを起こすことがあるので注意を要する。トンネルの掘削にとって有毒なガスは次の 3 種に大別される。

- ① 爆発の可能性を有する可燃性ガス

メタンを主とするエタンなどの炭化水素が一般的であり、石油や天然ガスの賦存する地帯や石炭や亜炭・褐炭の分布する第三紀地質に広く発生する。

沼沢地などにおいて、有機物の分解によって生成される水溶性のメタンガスもある。これらのわが国での分布は図-7 に示すとおりである。
- ② 人体に対して有害で危険を及ぼす有毒ガス

自然地山に賦存する有毒ガスには、火山性地質における硫化水素、亜硫酸ガスなど、少量で毒性の強いガスがある。硫化水素は嫌気性バクテリアによる有機物の分解過程でも発生するので、都市域でも長期間滞留した下水による事故例もある。
- ③ 酸素濃度の希薄ないわゆる酸欠空気

酸欠空気は、地下で発生量の大きなメタン、炭酸ガスなどの湧出によりガス濃度が上昇し、酸素が希薄になる場合と、砂礫層の空隙中で化学反応により酸素が消費された酸欠空気が湧出する場合がある。

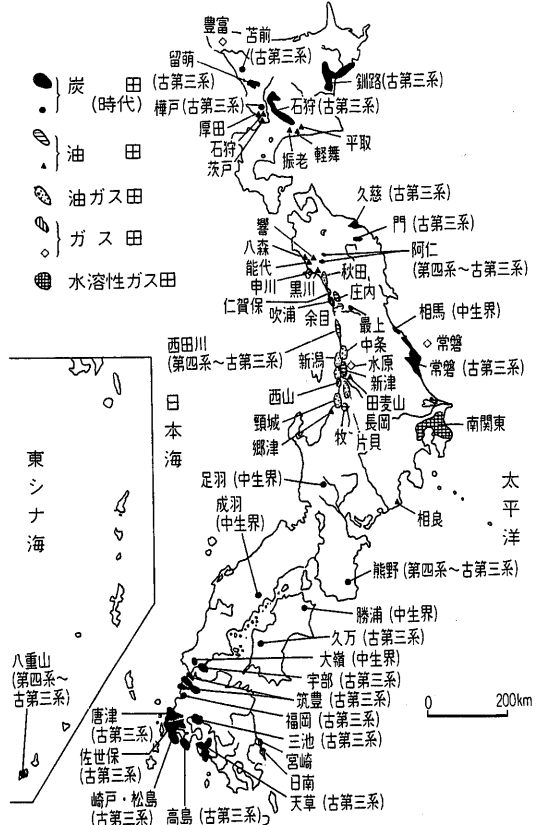


図-7 日本の炭田・油田・ガス田分布図

これら有毒ガスに対しては、各々のガスの特性(賦存状況、比重、発火温度、爆発限界濃度、危険濃度、水溶度など)についての十分な知識をもって、それぞれに適した対策を講ずる必要がある。自然状態で生じるガスは地質的成因によるものであり、地域的な広がりや有するものであるから、過去の事例、地質構造などにより発生の予測が立てられるので、計画・調査の段階から備えをもって対処することも必要である。

鉱山や各種鉱床の存在が知られている地域¹⁴⁾では、施工中に鉱毒水が湧出することがある。ここでの鉱毒水とは重金属を溶かし込んでいたり、あるいは強酸性を示したりして通常の濁水処理設備では放流基準に達しない湧水をいう。

鉱物の中には、掘削され空気にさらされることにより化学反応を引き起こすものがある。例えば、黄鉄鉱などの硫化鉱は、気中で発熱を伴う酸化作用を生じ、反応の結果硫酸が生成されて湧水をかなり強い酸性水に変えてしまうことがあるので注意を要する。

もっとも注意すべき重金属は、鉱床の種類によっても異なるが、とくに Cd(カドミウム)と As(砒素)である。毒性の強い物質を含有する地山では、発生するだけの処

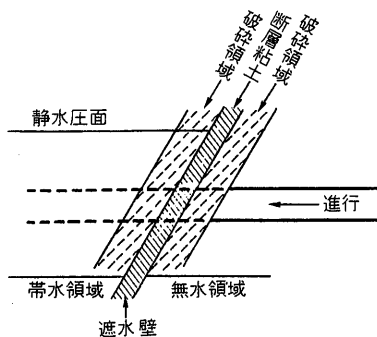


図-8 断層粘土と地下水の貯留状況

理についても問題がないように処置しなければならない。基準量以上の重金属を含むずりは、通常の捨て土、盛土材としての転用ができず、特定の指定土捨て場へ持ち込む必要があり、土捨て場に汚濁水処理設備が必要となる場合もある。

1-2-7 高い水圧や大湧水の発生が予想される地山

山岳トンネルの施工時あるいは供用後の維持に重大な支障を与える要素の一つにトンネルの湧水が挙げられる。

一般に地下水の分布は地形・地質に大きく依存し、湧水の状態や湧水の形態は地下水の賦存状況に深く関係することが知られている。

とくに地質的にみると図-8に示すような断層粘土で遮断された地下水、火山砕屑物などの未固結層に含まれる大量の地下水、節理・亀裂などに含まれた裂か水、石灰岩・溶岩などの空洞に含まれる洞窟水などでは高水圧の大量湧水が突然湧出し、場合によっては崩壊・流出事故を起こすことがある。

トンネルの施工に伴い発生する湧水⁹⁾は、作業環境を損なうばかりでなく切羽の自立を妨げ、吹付けコンクリートやロックボルトの施工不良の原因となる。さらに完成後のトンネルに対しても漏水やそれに伴う構造物の劣化など維持管理上の問題を残す恐れがある。とくに湧水が多量・高圧で流出した場合重大な事故の原因となるほか、工法変更、補助工法の追加などにより建設工程の遅延や工事費の増加など、計画の大幅な変更を余儀なくされた事例は多い。

補助工法によって湧水を処理した場合、水質汚濁や濁水問題など施工中の影響はもとより、完成後長期にわたって維持管理や水利環境への影響が考えられる。したがって、トンネルの施工計画を進めるにあたってはこれらを十分に理解のうえ策定する必要がある。

1-3 特殊条件のトンネル

1-3-1 小さな土かぶりの場合

土かぶりの小さい場合には、グランドアーチが形成されにくくこれに加えて、地表面の傾斜による偏圧、ある

いは表層の軟弱堆積物、風化部分がトンネル掘削に影響を及ぼすなど特殊な条件に遭遇することが多くなる。このため、地質条件によっては、沈下の急激な増大、地表面のクラックなどの変状、ときには切羽が不安定化することもある。とくに未固結地山中であるとか構造物下を通過するといった条件が加わると、切羽安定対策、地表面沈下対策、トンネル支保の沈下防止、支持力の増強などについてとくに慎重な検討が必要である。

鉄道トンネルや道路トンネルの設計に用いる地山分類の適用範囲は、 $500\text{m} > H > 2D$ (H : 土かぶり、 D : トンネル径)とされており、土かぶりがトンネル径の2倍以下の場合には、特殊なケースとして個々に検討することとされている。

1-3-2 都市域を通過する場合

都市域におけるトンネル工事は周辺の状況や地山条件などから通常山岳トンネルに比較して厳しい制約がある¹⁾。従来このようなトンネルは開削工法かシールド工法で施工されていたが、断面の拡大や縮小・急曲線(または直角)への施工、地質変化への柔軟な対応などの必要性から、近年山岳工法による施工実績も増えてきている。都市域を通過するトンネルでは、未固結地山の場合が多く、地表および地下構造物などの支障など、周辺状況への対応が必要であるので、山岳トンネル工法を採用する場合、次のような適用限界がある。

- ① 多量の湧水があり、吹付けコンクリートなどの支保部材が施工不能になる場合。
- ② 湧水による土砂流出を引き起こし、掘削・支保が困難になる場合。
- ③ 切羽が自立せず、掘削・支保が困難になる場合。

このような場合でも、適当な補助工法を採用することにより、トンネル構築を可能にしている。ただし、山岳工法の場合、大規模な補助工法の採用が前提となる場合が多いので、工事費も高くなり、工期も長くなる場合があるので、他の工法との比較を検討する必要がある(2-1参照)。

1-3-3 水底を通過する場合

海底など水底を通過するトンネルの場合¹⁰⁾、大量の湧水で水没する危険性があるので、湧水に対する十分な調査が必要である。水底トンネルの地質調査は、陸上トンネルと調査項目をとくに異にするものではないが、その水深と潮流のため、陸上部の調査のように直接観察したり手で触れるということが困難であるばかりでなく、水路交通や環境問題によって調査の方法や時期に制約を受ける場合がある。

施工に際しては、海水が起源である高圧大量の湧水を確実に止水し、さらに軟弱な地盤の改良を行うことが不

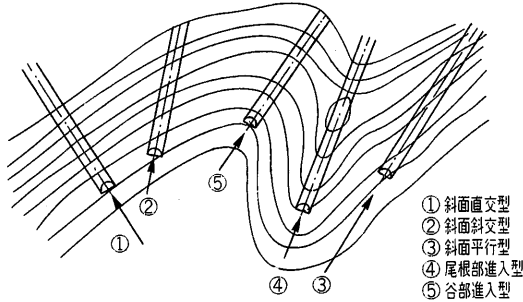


図-9 トンネル中心軸線と地形との関係

可欠である。また、海底トンネルでは海底区間が最深部に位置するため、流入する湧水を坑外に強制排出する必要がある、この永続的な揚水費を低減するためには湧水量を極力少なくしなければならない。このようなことからトンネル周辺に地盤注入を行い、透水性が小さくかつ十分な地山強度を有する止水ゾーンを形成したうえでトンネルをその中に構築する方針がとられる場合が多い。

1-3-4 斜坑や立坑部¹⁾

斜坑の調査は一般トンネル部と同様であるが、湧水の発生に対しては強制排水せざるを得ず、また水没の可能性もあるので、湧水量の予測に必要な事項などについては十分に調査する必要がある。また、立坑部については調査箇所が限定されるため、ボーリング調査を主に、その孔を利用した孔内検層、原位置試験、地下水調査などで立坑の安定や湧水を総合的に評価し、場合に応じて位置などの変更を考慮する必要がある。

1-3-5 トンネル坑口

坑口部分は、地すべり、斜面崩壊、偏土圧が生じやすい不安定な地山条件下にあり、また自然条件による災害も考慮する必要がある。トンネル坑口と地形との関係は図-9のような位置関係に区分され、それらの主な特徴は次のとおりである。

- ① 斜面直交型：もっとも理想的な位置関係にある。
- ② 斜面斜交型：斜面に対し斜めに進入しているため偏圧が作用する場合がある。
- ③ 斜面平行型：偏圧に特別な配慮が必要である。
- ④ 尾根部進入型：比較的安定した地山であるが十分な調査が必要である。
- ⑤ 谷部進入型：一般に崖錐などの未固結堆積層が厚く分布し地下水位が高い。また土石流、雪崩などの自然災害が発生しやすい。

また、地形地質的にみた場合、表-3のような地形区分の坑口が問題となる場合が多い。

なお、トンネル坑口部で予想される諸問題に対しては、適切な対策工(表-4)を選定し設計する必要がある。

表-3 地形区分からみた坑口の問題地形

地形区分	坑口としての問題点
地すべり地形 (クリープを含む)	<ul style="list-style-type: none"> ・土塊そのものがルーズであるうえ、すべり面付近は粘土化し、地下水も多いため偏圧・地耐力不足・地表沈下など各種の障害が発生する。また、いったんすべりだした場合には、その防止対策に膨大な費用を要する。
崖錐地形	<ul style="list-style-type: none"> ・現状(自然状態)では安定しているが、施工などによって、いったんバランスをくずした場合には、すべり・崩壊などが発生しやすい。 ・不均質な構成物(小〜巨礫、シルト、粘土など)からなるため地耐力不足をはじめ施工が困難である。
段丘地形	<ul style="list-style-type: none"> ・構成物がルーズで不均質(垂円礫、砂など)なうえに大量の湧水を伴う場合が多く、容易に崩壊が発生するほか地耐力不足などにも問題がある。
その他 火山山麓の地形 崩壊跡地形 土石流地形 など	<ul style="list-style-type: none"> ・火山麓には、未固結な火山碎屑物からなるルーズな地形があったり、溶岩端が大壁面を形成していたり、坑口として問題の多い地形がみられる。 ・その他土石流地形や崩壊跡地形などは、再びそれらの現象が再現される可能性が高い地形といえよう。

1-3-6 近接施工となる場合

既設構造物に近接してトンネルを施工する場合、既設構造物が施工された条件、立地・環境・地山・施工時期などを十分に把握したうえで、工事による影響を最小限に抑える必要がある。また、双設トンネルでは相互干渉によるトンネル地山挙動が問題となるので、近接施工と同様、①トンネル掘削による周辺地山の変位、②発破などに伴う振動、③地下水位の変化などの影響を検討する必要がある。これらの影響の現れ方は、トンネルと既設構造物の位置関係や離隔距離に大きく左右されるので、過去の施工事例を参考に事前に既設構造物への影響の程度を予測し、適切な基本工法の採用ならびに必要な補助工法による対策を講じ、施工中は計測による管理を行うことが必要となる。このように、近接工事においては一般工事とは異なり、既設構造物に対する配慮が調査・設計・施工の各段階において大きな割合を占めることになる。

施工に伴う近接構造物への影響は、なにも山岳トンネルにおいてのみ固有のものというわけではなく、開削トンネルやシールドトンネルなど地下工事において共通の問題である。しかしながら、開削工事、シールド工事においては、今日では地下連続壁工法や密閉型シールド工法といった基本工法により、地質条件が悪い場合でもかなりの部分まで対処が可能となっているのに対し、山岳

表-4 坑口部の設計において予想される問題点と対策工法¹⁾

問題点	地すべり	斜面崩壊	地表面沈下	切羽崩壊	偏圧	地耐力不足	記 事
主な対策							
のり面防護工	○	○					
擁 壁	○	○			○	○	抱き擁壁
保護切土・押え盛土	○	○			○		ソイルセメント, エアモルタルなど
垂直縫地ボルト	○	○	○	○	○		
アンカー工	○	○					
抑 止 杭	○	○					深礎, H鋼管杭
水抜き工事(地表・坑内)	○	○		○			ウェルポイント, 水抜きボーリング
地山注入(地表・坑内)	○	○	○	○		○	
切羽安定対策				○	○		鏡吹付けコンクリート, 鏡止めボルト, パイラフ, フォアボーリング, 長尺鋼管フォアパイリング, 水平ジェットグラウト, プレライニング
脚部の補強			○	○		○	ウイングリブ付き鋼製支保工, 脚部補強ボルト, 脚部補強注入, 仮インバート

注: ○は一般に用いられる工法

トンネル工事の場合は、地質条件にめぐまれた場合を除き、基本工法のみで対処することは現状では難しく、補助工法に多くを頼らなければならない状況にある。

近接施工においてどのような対策を講じるかは⁹⁾、地質条件、既設構造物と新設トンネルの位置関係、影響の程度、既設構造物の種類と重要度によって変わってくるので、調査・設計の段階で慎重な検討が必要である。

2. トンネル工法・掘削工法と地質条件

2-1 トンネル工法と地質条件

トンネル工法には、①山岳工法、②シールド工法、③開削工法、④沈埋工法の4工法がある。このうち一般的なものは①～③の3つである。表-5は、代表的3工法の概要や適用地質条件、地下水対策、適用深度などの特徴を示したものである^{13,14,15)}。なお、沈埋工法は、川底・海底トンネルに用いられる特殊な工法であり、トンネル構造物をドライドックなどの別の場所において、両端を仮隔壁により閉塞した函体を製作し、これを水面に浮かべて敷設箇所まで曳航し、予め川底面・海底面に掘削した溝(トレンチ)の所定の位置に沈設し、既設部分と水中で接合・連結した後、埋め戻しを行い、函体の中の水を

抜いてトンネルを構築する工法である。

トンネルの工法選定にあたっては、地質・地形などの地山条件、立地条件、工期、経済性、施工性などの検討を要する。

山岳工法における軟質地山での切羽安定対策などの補助工法が著しく進歩しており、従来はシールド工法や開削工法の適用が必要であった土かぶりの浅い未固結地山でも山岳工法が採用される事例が増加している。

図-10, 11には、それぞれ砂質地盤と粘土質地盤での山岳工法の施工実績をまとめた¹⁶⁾。また、図-12はシールド工法の適用地盤条件と補助工法を併用した山岳工法の適用地盤条件とを比較したものである¹⁷⁾。これらの施工実績から、補助工法の併用により山岳工法の適用地盤が、シールド工法と並んで都市部の土砂トンネルの領域まで拡大していることがわかる。しかしながら、沖積地盤での山岳工法の適用事例は未だ限られていることから、地盤調査時には洪積層と沖積層の境界を正確に把握することが重要となる。

表-6に山岳工法における切羽安定対策など各種補助工法の適用範囲を示す¹⁷⁾。

2-2 山岳工法の掘削工法と地質条件

山岳工法における掘削工法(掘削断面の分割法によって決まる施工法)は、切羽の自立性、地山の支持力、地表面沈下の許容値などを考慮して決められるが、施工性、経済性、工期にも大きく影響するため、事前の地質調査結果を十分に検討して選定する。

一般に、トンネルの全断面を一挙に掘削する工法が施工性の面でも経済性の点でも優れているが地山強度が低いと切羽の自立が確保できず崩壊を生じる。すなわち、切羽の自立性によって掘削できる断面の形状、大きさが制約されるため、トンネル断面を分割して掘削することになる。掘削工法の選定とは、「加背割り」ともいわれており、トンネル断面をどのように分割して掘削するかを決定することである。

山岳工法における代表的な掘削工法を下に示す。

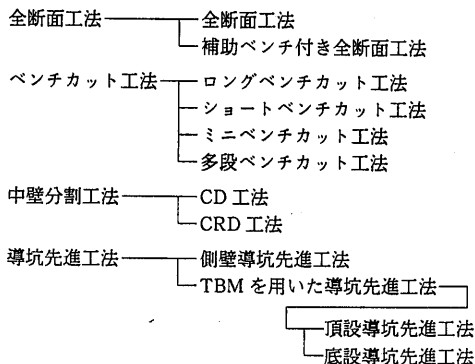


表-5 主なトンネル工法の比較^{1), 10), 15)}

項目	山岳工法	シールド工法	開削工法
工法概要	トンネル周辺地山の支保機能を有効に活用し掘削後吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼製支保工などにより地山の安定を確保して掘進する工法である。 周辺地山のグラウンドアーチが形成されることおよび掘削時の切羽の自立が前提となり、それらが確保されない場合には補助工法が必要となる。	シールドを地中に推進させ、坑壁をシールド外殻およびセグメントにより保持し土砂の崩壊を防ぎ、トンネルを構築する工法である。 密閉型シールドは泥土あるいは泥水で切羽の土圧と水圧に対抗して切羽の安定を図る。 開放型シールドでは、切羽の自立が前提となり、自立しない場合は補助工法が必要である。	地表面から掘り下がり、所定の位置にトンネルを築造して、その上部を埋戻し地表面を復旧する工法である。わが国では、全断面を掘削する方式が一般的に行われている。
適用地質 (標準的な過去の実績、変化への対応性)	一般的には、硬岩から新第三紀の軟岩までの地盤に適用される。条件によっては、洪積層にも適用されることもある(未固結地山では、一軸圧縮強度 $qu=100\text{kN/m}^2$ 、変形係数 $Es=10,000\text{kN/m}^2$ 程度以上までであるが、これより軟弱な場合にも適用された例もある)。 地質の変化には、支保剛性、掘削工法、補助工法の変更により対応可能である。	一般的には、沖積層、洪積層、新第三紀層の極軟弱から一軸圧縮強さ $qu=$ 数千 kN/m^2 程度までの地盤に適用されるが、未固結地盤を対象とすることが多い。地質の変化への対応は容易である。また、最近では、数万 kN/m^2 の岩盤に対する事例も増加している。	基本的に地質による制限はない。各種地質に適応した土留め、補助工法などを選定して、これに対応する。
地下水対策 (切羽の自立性、掘削面の安定)	掘削時の切羽の自立性、地山の安定性に影響するような湧水がある場合には、地盤注入などによる止水、ディープウェル・ウェルポイント・水抜きトンネルなどによる地下水位低下などの補助工法が必要となる。	密閉型シールドでは、とくに補助工法を必要としないが、開放型では必要となる。	ボーリングや盤膨れの対策として、土留め壁の根入れを深くしたり、地下水位低下工法や地盤改良などの補助工法が必要となる場合が多い。
トンネル深度 (最小土かぶり、最大深度)	未固結地山では、土かぶり高さ/トンネル直径比(H/D)が小さい場合(2未満程度)には天端沈下量を抑制する有効な補助工法が必要となる。	最小土かぶりには、一般的にはシールド径程度であり、圧気工法を併用する場合や泥水式シールドでは、噴発に注意が必要である。 最大深度は地下水圧で決まる場合が多い。	最小土かぶりは、施工上からの制限はとくにない。 最大掘削深度は、40m程度の実績がある。
断面形状	掘削断面天端部にアーチ形状を有することを原則とし、その限りでは、かなりの程度まで自由な断面で施工可能であり、施工途中での断面形状変更も可能である。	円形が標準であるが、特殊シールドを用いて半円形、複円形、楕円形なども可能である。 形状の施工途中での変更は、一般的に困難である。	矩形断面が一般的であるが、複雑な形状にも対応できる。
断面の大きさ (最大断面積、変化への対応)	一般的には 150m^2 程度まで可能で、 200m^2 以上の実績もある。支保工や掘削工法の変更により、施工途中での断面積変更が可能である。	実績では、トンネルの外径は最大で14mである。 外径の施工途中での変更は一般には困難である。	断面の大きさおよびその変化に対しては、施工上からの制限はとくにない。ただし、断面が変化する隅角部は、十分な補強を行う必要がある。
線形 (急曲線への対応)	施工上の制約はほとんどない。	曲線半径/シールド外径=3程度までの急曲線の実績がある。	施工上の制約はほとんどない。
周辺環境への影響 (近接、路上交通、騒音・振動)	近接施工の場合は、補助工法が必要である。ただし、都市部においては地下水位低下工法により問題が生じる場合が多く、施工上必要な地下水対策が困難となる場合がある。 路上交通への影響は、立坑部を除き、きわめて少ない。 騒音・振動は、坑口付近に限定され、一般に防音壁、防音ハウスなどで対応できる。	近接施工の場合は、補助工法を必要とすることもある。 路上交通への影響は、立坑部を除き、きわめて少ない。 騒音・振動は、坑口付近に限定され、一般的に防音壁、防音ハウスなどで対応できる。	近接施工の場合は、土留めの剛性の増大を図るとともに、近接度合いにより補助工法を必要とすることもある。 施工区間に作業帯を常時設置するため、路上交通への影響は大きい。 各施工段階において、騒音・振動対策が必要である。

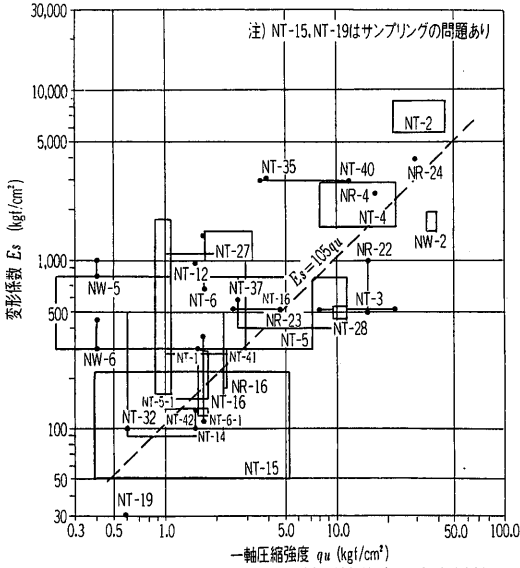


図-10 NATM実績における一軸圧縮強度と変形係数 (砂質地盤)

各掘削工法の適用条件と特徴は、表-7, 8 に示すとおりである^{18), 19)}。

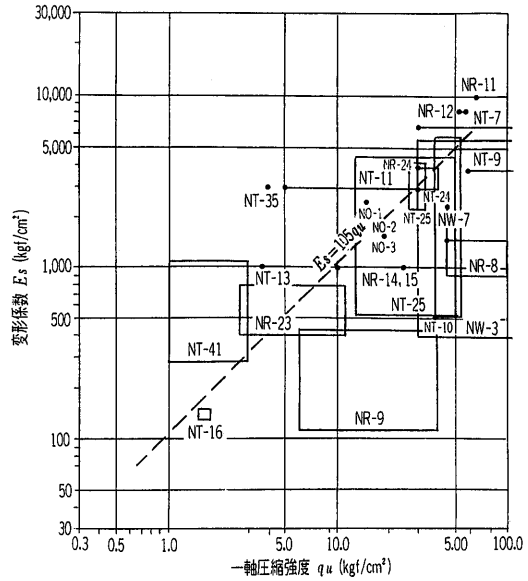
掘削工法の検討にあたっては、切羽の自立性を確保するために地質条件に適合した先受け工法、地下水低下工法、地盤改良工法などの補助工法の併用を検討し、できる限り加背を分割せず、作業空間を広くとり、大型の施工機械を導入できる工法にすることが施工性・経済性・安全性を向上させるポイントである。

大断面のトンネルで、地山の支持力が不足する場合や地表面沈下が制限される場合には、側壁導坑先進工法(サイロット工法)を採用する事例が増加している。
2-2-1 全断面工法

設計断面を一度に掘削する工法であり、地質が安定した地山や小断面のトンネルで採用される。大型施工機械を使用でき切羽が1か所になるため作業管理が容易であるが、地質条件の変化への順応性が低い。

2-2-2 補助ベンチ付き全断面工法

全断面工法を採用し難い地山において、ベンチを付けることで切羽の安定を図るとともに、上・下半を同時施工することで掘削効率を上げようとする工法である。ベンチ長は2~5m程度で、下半盤に全断面を掘削できる大型施工機械を配置し、分割した上部および下半断面を同時に掘削する工法である。全断面工法の効率性とベンチ工法の安定性・順応性を具備したものであり、発破



注) 砂質地盤: 砂, 砂礫, 火山灰, マサ土, 古生層の風化岩などの卓越したもの
粘土質地盤: 粘土, 固結粘土, 泥岩およびシルト岩, 膨張性のある凝灰角礫岩, 蛇紋岩を含む変成岩などの卓越したもの

図-11 NATM実績における一軸圧縮強度と変形係数 (粘土質地盤)

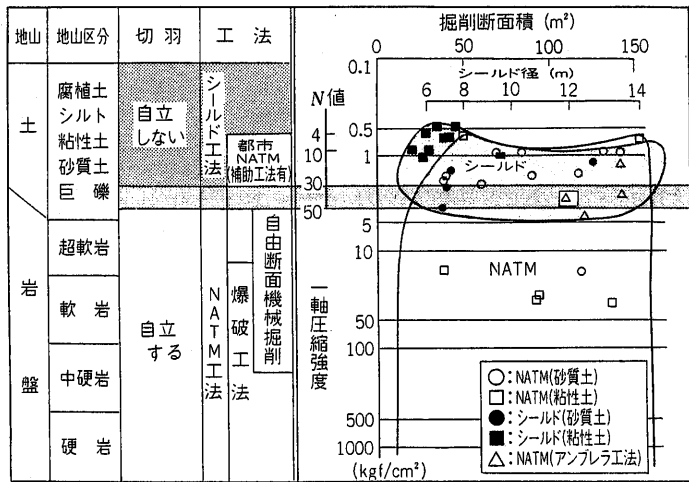


図-12 都市部でのトンネル工法の適用事例¹⁷⁾

掘削方式では、一般的な工法となりつつある。

比較的安定した地質から早期のインバート施工が必要となる比較的悪い地質までの広範囲の適用例を有する。

2-2-3 ベンチカット工法

一般には上半断面と下半断面に2分割して掘削する工法であるが、特異なものとして3段以上に分割する多段ベンチカット工法がある。ベンチの長さによりロングベンチ、ショートベンチ、ミニベンチの3種類に区分

表-6 補助工法の分類表

工 法	目 的							対 象 地 山			摘要
	施 工 の 安 全 性 確 保				周 辺 環 境 の 保 全			硬岩	軟岩	土砂	
	切 羽 安 定 対 策			湧水 対策	地表面 沈下 対策	近 接 構造物 対策					
	天端の安定	鏡面の安定	脚部の安定								
先 受 け 工	・フォアボーリング (非充填・充填式, 注入式)	◎	○				○	○	◎	◎	
	・バイブーフ	○	○			◎	○		○	○	*
	・水平ジェットグラウト (攪拌噴射)	○	○				○	○		○	*
	・長尺鋼管フォアパイ リング(充填式, 注入式)	○	○				○	○		○	*
	・プレライニング	○	○				○	○		○	*
鏡 面 脚 部 の 補 強	・鏡吹付けコンクリート		◎					○	◎	◎	
	・鏡止めボルト		◎					○	○	○	
	・仮インバート			○		○			○	○	
	・脚部補強ボルト〔パイル〕			○		○			○	○	[*]
湧 水 対 策 ・ 地 山 補 強	・水抜き坑	○	○		◎			○	○	○	*
	・水抜きボーリング	○	○		◎			◎	◎	◎	*
	・ディープウェル	○	○		○					○	*
	・ウェルポイント	○	○		○					○	*
	・注 入	○	○	○	◎	○	◎	○	○	○	*
	・垂直縫地	○	○			○		○	○	○	*
	・遮断壁				○	○	◎			○	*

注) ◎: 比較的良好に用いられる工法, ○: 場合によって用いられる工法,

*: 通常のトンネル施工機械整備・材料で対処が困難な対策または施工サイクルの影響の大きい対策

される。ベンチの長さは、1次覆工の閉合時期から決まる場合と、上半掘削の作業性(掘削、支保、ずり出しなどの機械・設備類の配置)から決まる場合とがある。良好な地質では、後者に重点をおき選択されるが、断面閉合で地表沈下、内空変位を抑制する必要がある軟弱地質では両者を総合的に判断してベンチ長さが決められる。

(1) ロングベンチカット工法

全断面では切羽が自立しないが地山は比較的安定していてインバートによる断面閉合が不要もしくは断面閉合の時間的制約のない地質条件に適用される。ベンチの長さは、おおむね50m以上で上半と下半とを同時並進掘削する場合と上半、下半を100~150mずつ交互に掘削する場合がある。

(2) ショートベンチカット工法

比較的広範囲の地質条件の地山に適用可能で、ベンチ長さはおおむね20~30mで、とくに地質条件が変化し、全断面では切羽が安定しない場合に有効な工法である。膨張性地山で早期に断面閉合が必要な場合や土砂地山で、天端沈下を抑制する必要がある場合には、施工機械・設

備の配置を考慮して、さらにベンチ長を短くすることが望ましい。

(3) ミニベンチカット工法

ベンチ長さを3~5mとして、膨張性地山や土砂地山で早期に断面閉合が必要な場合に適用される。

(4) 多段ベンチカット工法

比較的大断面のトンネルで通常の断面分割によるベンチカットでは切羽が自立しない地質条件の場合に採用されるが、低強度地山ではベンチの数を増やすと断面閉合までの時間が長くなるため変形が大きくなることや作業が競合することが課題である。

2-2-4 中壁分割工法

トンネルの断面を中壁により左右に2分割し、各分割断面をさらに2~3段ベンチで掘削する工法である。左右いずれかの片側半断面を先行掘削し、もう一方の半断面をその後掘削するので、先進トンネルと後進トンネルとの間に中壁ができることから、中壁分割工法と呼ばれる。

この工法にはCD(Center Diaphragm)工法、CRD

表-7 掘削工法の適要条件と得失

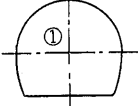
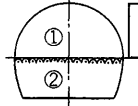
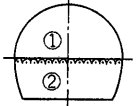
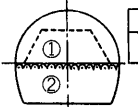
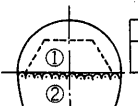
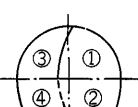

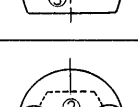
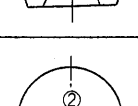
開削工法	加背割り	主として地山条件からみた適用条件	長 所	短 所
全断面工法		<ul style="list-style-type: none"> 小断面トンネルにおける一般的施工法。 大断面(60m²以上)ではきわめて安定した地山。 中断面(30m²程度)では比較的安定した地山。 	<ul style="list-style-type: none"> 機械化による省力化急速施工に有利。 切羽が単独であるので作業の錯綜がなく安全面などの施工管理に有利。 	<ul style="list-style-type: none"> トンネル全長が単一工法で施工可能とは限らないので、補助ベンチなどの施工法の変更体制が必要。
補助ベンチ付き全断面工法	 ベンチ長≒2~4m	<ul style="list-style-type: none"> 全断面では施工が困難であるが、比較的安定した地山。 全断面施工中に施工が困難になった場合。 良好な地山が多いが部分的に不良地山が挟在する場合。 	<ul style="list-style-type: none"> 機械化による省力化急速施工に有利。 切羽が単独であるので作業の錯綜がなく安全面などの施工管理に有利。 	<ul style="list-style-type: none"> 補助ベンチでも切羽が自立しなくなった場合の段取替えが困難。
ベ ン チ カ ッ ト 工 法	 ベンチ長>5D	<ul style="list-style-type: none"> 全断面では施工が困難であるが、比較的安定した地山。 	<ul style="list-style-type: none"> 上・下半を交互に掘削する交互掘進方式の場合機械設備や作業員が少なくすむ。 	<ul style="list-style-type: none"> 交互掘進方式の場合、工期がかかる。
ショ ー ト ベ ン チ カ ッ ト 工 法	 D<ベンチ長≤5D	<ul style="list-style-type: none"> 土砂地山、膨張性地山から中硬岩地山まで適用できる工法でもっとも基本的かつ一般的な施工法。 	<ul style="list-style-type: none"> 地山の変化に対応しやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> 同時併進の場合には上・下半の作業時間サイクルのバランスがとりにくい。
ミ ニ ベ ン チ カ ッ ト 工 法	 ベンチ長<D	<ul style="list-style-type: none"> ショートベンチカット工法の場合よりもさらに中空変位を抑制する必要がある場合。 膨張性地山などで早期の閉合を必要とする場合。 	<ul style="list-style-type: none"> インバートの早期閉合がしやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> 上半施工用の架台が必要となる。 上半部の掘削に用いる施工機械が限定されやすい。
中 壁 分 割 工 法	 上半のみ中壁分割する方法と上下半ともに分割する方法がある	<ul style="list-style-type: none"> 地表面沈下を最小限に防止する必要のある土かぶりの小さい土砂地山。 大断面トンネルで比較的不良な地山。 	<ul style="list-style-type: none"> 断面を分割することによって切羽の安定が確保しやすい。 側壁導坑先進工法より加背が大きく、施工機械をやや大きくすることが可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 中壁撤去時の変形などに留意が必要である。 中壁の撤去工程が加わる。 坑内からの特殊な補助工法の併用が困難である。
多 段 ベ ン チ カ ッ ト 工 法		<ul style="list-style-type: none"> 縦長の断面トンネルで比較的良好的な地山に適用されることが多い。 	<ul style="list-style-type: none"> 切羽の安定が確保しやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> 閉合時期が遅れると不良地山では変形が大きくなる。 各ベンチの長さが限定され作業スペースが狭くなる。 各段のずり処理に工夫を要する。
側 壁 導 坑 先 進 工 法		<ul style="list-style-type: none"> ベンチカット工法では地盤支持力が不足する場合。 地表面沈下を抑制する必要がある土かぶりの小さい土砂地山。 	<ul style="list-style-type: none"> 中壁分割工法の中壁撤去と比較して、側壁部の仮壁撤去が容易。 	<ul style="list-style-type: none"> 導坑掘削に用いる施工機械が小さくなる。
T B M 先 進 工 法	 上半に導坑を設ける場合もある	<ul style="list-style-type: none"> 地質確認や水抜き効果などを期待してTBMによる導坑を先進する場合。 	<ul style="list-style-type: none"> 発破工法の場合心抜きがいらないため、振動・騒音対策にもなる。 導坑位置によってはあらかじめ地下水位低下を図ることが可能。 導坑を先行することにより地質の確認ができる。 	<ul style="list-style-type: none"> 地質が比較的安定していないと、TBM掘削に時間がかかる。

表-8 NATMによる掘削工法の種類と特徴

掘削工法 条件 特徴など	全断面掘削工法	補助ベンチ付き 全断面掘削工法	ベンチカッタ			工法			側壁専坑先進工法 (サイロット工法)
			ロングベンチ工法	ショートベンチ工法	ミニベンチ工法	多段ベンチ工法			
トンネル 断面	<ul style="list-style-type: none"> 小断面における一般的な工法 中断面以上では良好な岩質のみ 	<ul style="list-style-type: none"> 中断面以上での一般的な施工法となっておりつつある 比較的良質な比較的不良な地山まで 	<ul style="list-style-type: none"> 中断面以上の一般的な施工法で比較的良質な地山 	<ul style="list-style-type: none"> 中断面以上の一般パート早期閉合が必要な場合 	<ul style="list-style-type: none"> 中断面以上で切羽の自立性が悪い場合 大断面で機械の施工範囲の関係から 	<ul style="list-style-type: none"> 中断面以上で切羽の自立性が悪い場合 大断面で機械の施工範囲の関係から 	<ul style="list-style-type: none"> 中断面以上で切羽の自立性が悪い場合 大断面で機械の施工範囲の関係から 	<ul style="list-style-type: none"> 中断面以上で切羽の自立性が悪い場合 大断面で機械の施工範囲の関係から 	<ul style="list-style-type: none"> 中断面以上で坑口部などの不良地山で採用される
地質	<ul style="list-style-type: none"> 全断面の切羽が自立することが条件 	<ul style="list-style-type: none"> 切羽に2～5mの補助ベンチを設けることで切羽の安定性が図れ、地質に対する適応性が高い 	<ul style="list-style-type: none"> 比較的良質な地山でインバート早期閉合が望まれる場合 	<ul style="list-style-type: none"> 支持力の不足する地山や膨張性地山で早期の全周支保を必要とする場合 	<ul style="list-style-type: none"> 支持力の不足し難い不良地山 大断面で施工機械の関係で採用する場合 良質から不良地山まで 	<ul style="list-style-type: none"> 切羽の自立し難い不良地山 大断面で施工機械の関係で採用する場合 良質から不良地山まで 	<ul style="list-style-type: none"> 切羽の自立し難い不良地山 大断面で施工機械の関係で採用する場合 良質から不良地山まで 	<ul style="list-style-type: none"> 支持力の不足する地山の沈下防止に採用される 	
長所	<ul style="list-style-type: none"> 機械の大型化により省力化が図れ、急速施工にも有利 切羽が一箇所のため作業の錯綜がな く安全性が高い 効率的な換気が可能で坑内環境の改善が図れる 	<ul style="list-style-type: none"> 同 左 	<ul style="list-style-type: none"> 一般的な工法であり施工機械の汎用性も高く工法の熟練度も高い 地山の変化に対応しやすい 	<ul style="list-style-type: none"> インバート早期閉合ができ変位や沈下を最小限に抑えることができる 	<ul style="list-style-type: none"> 切羽を小さくすることで安定を確保しやすい、ミニベンチとの組み合わせで不良地山の施工も可能 	<ul style="list-style-type: none"> 切羽を小さくすることで安定を確保しやすい、ミニベンチとの組み合わせで不良地山の施工も可能 	<ul style="list-style-type: none"> 切羽を小さくすることで安定を確保しやすい、ミニベンチとの組み合わせで不良地山の施工も可能 	<ul style="list-style-type: none"> 沈下抑制に効果があり、大断面トンネルでも適要可能 導坑による水抜きや地質確認が期待できる 	
短所	<ul style="list-style-type: none"> 施工法の変更が困難 中断面以上では肌落ちなどに充分な注意が必要 施工機械が大型になり初期投資額が多くなる 	<ul style="list-style-type: none"> 中断面以上ではは落ち等に十分な注意が必要 施工機械が大型になり初期投資額が多くなる 	<ul style="list-style-type: none"> 上・下半同時施工の場合は下半部の作業が錯綜する。また斜路の確保が必要で手戻りが生じる 上半部の作業スペースが限定される 	<ul style="list-style-type: none"> 上半作業用の架台などを要し施工機械も限定されることが多い 	<ul style="list-style-type: none"> 作業の輻輳が多いので安全や坑内環境に注意を要する 各ベンチの長さが短くなることが多 く作業スペースが狭くなる、機械も限定されることが多い 	<ul style="list-style-type: none"> 作業の輻輳が多いので安全や坑内環境に注意を要する 各ベンチの長さが短くなることが多 く作業スペースが狭くなる、機械も限定されることが多い 	<ul style="list-style-type: none"> 作業の輻輳が多いので安全や坑内環境に注意を要する 各ベンチの長さが短くなることが多 く作業スペースが狭くなる、機械も限定されることが多い 	<ul style="list-style-type: none"> 導坑は小断面のため機械の投入が困難 延長が長い場合側壁の施工などに時間を要するため工夫を要す 	

(Cross Diaphragm)工法があり、前者は各ベンチを閉合せず、後者は閉合することで区別される。土かぶりの浅い土砂地山の断面トンネルに適用例が多い。

2-2-5 導坑先進工法

(1) 側壁導坑先進工法

サイロット工法と呼ばれており、地質が軟弱でベンチカット工法では地盤支持力が不足する場合や土かぶりが小さく土砂地山で都市内で地表沈下の抑止が必要な場合に適用される。吹付けコンクリートで閉合された2本の導坑が管体(チューブ)構造物として地山周辺荷重を支持するため抵抗が大きく軟弱地質でも沈下などの変形を小さくできる。大断面トンネル以外は、導坑断面が狭くなるため施工性が低下する。

(2) TBMを用いた導坑先進工法

TBM(トンネルボーリングマシン)により先進導坑を掘削する工法であり、導坑の位置により頂設導坑先進工法と底設導坑先進工法とがある。導坑を先進させることにより、前方地山の地質確認、水抜き効果、坑内換気効果の向上、切羽の先行補強などの効果が期待できる。導坑の位置は、導坑の目的や切り上げ方法などによって決まる。

地質が比較的安定していない場合は、TBMの掘進・施工が困難となることがあるため、とくに破碎帯や軟質地山ならびに大湧水の有無・程度など地質条件の十分な検討が必要である。

(文責：神藤健一・前田建設工業(株)技術本部技術研究所部長/長谷川昌弘・大阪工業大学教授(元飛鳥建設(株)技術研究所長))

参 考 文 献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解析, 1996.
- 2) The Japan Landslide Society and National Conference of Landslide Control, 1996, Landslides in Japan(The fifth revision), 57.
- 3) 日本道路公団：設計要領第一集, pp265-267.
- 4) 地質調査所編：200万分の1日本活断層図, 1982.
- 5) 土質工学会：建設計画と地形・地質, 土質基礎工学ライブラリー 26, pp144~145, 1984.
- 6) 小暮誠・木村裕俊：超膨圧トンネル掘削完了, 北越北線鍋立山トンネル, トンネルと地下, 1995, 7.
- 7) 大島洋志：減濁水問題を中心としたトンネルの路線選定と環境地盤, 応用地質, 第27巻, 第4号, 昭和61年12月.
- 8) 土木学会トンネル工学委員会：山岳トンネルの補助工法, トンネル・ライブラリー, 第5号, 土木学会, 平成6年3月.
- 9) 中井善人：大清水トンネル工事の概要, 土木学会誌, Vol.64, No.4, 1979.4.
- 10) 猪間英俊：関越トンネル工事における山ハネ, 応用地質, Vol.23, No.5, 1982.4.
- 11) 望日常好・ほか：土かぶり200mで山はね現象に遭遇, トンネルと地下, 1990, 9.
- 12) 成瀬・ほか：安房トンネルの本坑が貫通, 高圧帯水火山噴出物層と高熱帯を克服, トンネルと地下, 1995, 11.
- 13) 地学団体研究会編：新版地学事典 付図付表・索引, 平凡社, 1996, 10.
- 14) 土木学会：トンネル標準示方書(開削工法編)・同解説, 1996.
- 15) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説, 1996.
- 16) 都市NATMワーキンググループ：都市トンネルにおけるNATMの適用に関する研究について.
- 17) ジェオフロンテ研究会：アンブレラ工法に関する技術資料, 1996.
- 18) 全国建設研修センター：土木施工管理技術研修テキスト(下巻), 1998.
- 19) トンネル施工積算研究会：トンネルの施工と積算, 1998.

投稿原稿応募のご案内

1. 原稿用紙は当社所定(25×12行=300字詰,ご請求があり次第お送りします)のもの,またはワープロでご提出の場合は横25字詰で打ち,現代用字・用語を用いて執筆してください。
2. 原稿は50枚(15,000字)以内(ただし,図・表・写真のスペースも含む)とし,仕上がりページにして8ページ以内とします。
3. 原稿掲載の採否は,本誌編集委員会で審査のうえ決定します。
4. 掲載論文については当社規定の原稿料をお送りします。
5. 原稿には,題名・勤務先・役職名・住所・電話番号を明記してください。
6. 原稿は,原則として返却いたしません。
(注:「現場だより」の投稿は受け付けておりません)

送付先 株式会社土木工学社 編集部 投稿係
〒162-0832東京都新宿区岩戸町16 メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888(代)

5. 国際トンネル会議

5-1 開会式

国際トンネル会議(World Tunnel Congress '99)は5月29日～6月3日まで、オスロのRadisson SAS Plaza Hotelで開催された。5月30日夕方、全員参加の非公式のレセプションがあり、お互いに久しぶりの再開を喜びあった。翌5月31日にはオスロコンサートホールでノルウェー国王御臨席のもと、開会式が挙行され、オスロ市長、ノルウェートンネル学会会長などが開会の挨拶をされた。

今回の会議には、世界46の国・地域から約630名が登録したが、そのうち日本からの登録者は約130名で、地元ノルウェーを上回り、世界最多であった。

5-2 全員セッション

5月31日の午後「世界のトンネル建設」をテーマに、全員参加のセッションが開催された。このセッションでは「ノルウェーにおけるトンネルと地下工事」(ノルウェー)、「ケルン～フランクフルト間高速鉄道での困難な岩盤条件下のトンネル工事」(ドイツ)など、提出論文の中から8編が選ばれ発表された。日本からは(株)熊谷組の梶山氏が「地下鉄12号線飯田橋駅での3面シールド工事」を発表され、高く評価された。

5-3 一般セッション

今回の国際トンネル会議を目指して、日本から44編の抽象トピック提出があり、そのうち42編が採択され、論文を提出した。その後論文審査委員会での検討の結果、36編について論文集掲載と発表の通知があり、全員セッ

ションでの発表を除く28編が一般セッションで発表された。これは一般セッションでの総発表数109編の約30%であり、日本勢の活躍が特筆される。

一般セッションは、6月1日午後から6月2日の夜まで、A～Fまでの6セッションに分けて行われた。「調査研究と計画設計」と題されたAセッションでは、22編の発表があった。日本からは、土門(都立大)、三谷(道路公団)、寺戸(建設技研)、安田(パシフィックコンサルタント)、および西(清水建設)の各氏が発表した。「地下空間の利用」と題されたBセッションでは12編の発表があった。日本からは、西(名古屋大)および清水(名古屋大)の各氏が発表した。「トンネルの支保と覆工」と題されたCセッションでは、20編の発表があった。日本からは橋本(RCセグメント工業会)、佐藤(クボタ)、福本(大林組)、太野垣(鉄道公団)、山根(鉄道公団)、および藤井(阪神高速道)の各氏が発表した。「連絡トンネル」と題されたDセッションでは、24編の発表があった。日本からは、梶山(熊谷組)、斎藤(首都高速道)、三浦(JR東日本)、鳥越(NTT)および芥川(神戸大)の各氏が発表した。「導水路を含む各編」と題されたEセッションでは、17編の発表があった。日本からは野池(中部電力)、佐合(先端建設技術センター)、今津(清水建設)、中川(山口大)、瀬丘(関西電力)および坂山(道路公団)の各氏が発表した。「機械化トンネル建設」と題されたFセッションでは、15編の発表があった。日本からは河谷(北海道電力)、塚田(JR東日本)、矢萩(営団)および安光(前田建設)の各氏が発表した。

(文責：宮口尹秀・下河内稔/応用地質(株))

研究論文募集のお知らせ

弊誌「トンネルと地下」では、研究論文(実験、技術開発など)を募集いたします。大学や技術研究所などからの貴重な研究成果を多数お待ちしておりますので奮ってご応募下さい。なお、本誌では、とくに若手トンネル技術者の技術向上を主眼としておりますので、平易・簡潔にまとめていただくようご配慮のほどお願い致します。なお、応募方法の詳細につきましては36頁に掲載の「投稿原稿応募のご案内」を参照のうえ、ご応募下さい。

問い合わせ先 株式会社 土木工学社 編集部

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂 電話 (03) 3267-2888 (代)

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(8)

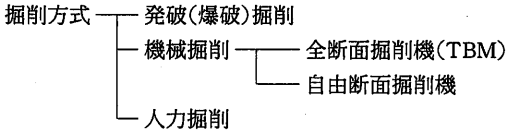
第II編 トンネル工事と地質条件(2)

「応用地質学」連載講座小委員会

3. 掘削方式と地質条件

3-1 掘削方式

掘削方式(掘削手段による分類)は、一般にトンネルの長さ、断面の大きさ、形状、地山条件、立地条件、掘削工法などに応じて次の3つに区分される。



発破掘削は、削岩機で穿孔し、火薬(爆薬)により掘削する方法で、山岳トンネルにおけるもっとも一般的な掘削方式であり未固結、低固結地山を除いた硬岩から中硬岩までのほとんどの地質条件に適用される。

機械掘削は、発破によらず機械的に地山を切削あるいは圧砕する掘削方式で、トンネルボーリングマシン(TBM)を用いた円形全断面掘削方式とアーム(ブーム)掘削機やブレーカなどを用いた自由断面掘削方式に分けられる。未固結、低固結地山から中硬岩、硬岩が適用される地質条件である。

人力掘削は、ピックハンマ、ショベルなどを用い主として人力で掘削する方式で、土砂地山などで地山が不安定であったり、加背が小さく機械の持ち込みが困難な場合や坑口部などの特殊な条件に限って適用される。

3-2 穿孔と地質条件

穿孔では、穿孔数、穿孔長、穿孔配置、のみ下がり、削岩機種などが問題となるが地質条件や湧水状況を十分考慮して計画することが必要である。

穿孔数は、岩石の硬さや岩目の状態、掘削断面積によって異なる。図-13は、池田による岩盤強度分類と穿孔数の標準的な例である¹⁾。

穿孔長は、地質条件によって区分された地山等級の発破進行長によって決定される。1発破進行長は、通常、1.0~2.0mが標準となっているが、地山等級Aクラスの地山では3m程度の例もある。発破によって切り崩され

る範囲は軟岩では孔尻^{あなじり}は残らず、硬岩では穿孔長の1割ぐらが残るため、これらを考慮して所定の1発破進行長が得られるように穿孔長を決める。また、心抜き孔は他の装薬孔よりも多少深くする。

トンネル切羽面における発破は心抜き発破によって切羽面のほぼ中央部に小断面の自由面を設け、順次払い発破をかけて自由面を拡げて行き、周辺孔を最後に爆破して所定の掘削断面にする。模式的な穿孔配置の関係をそれぞれの名称を図-14に示す²⁾。心抜き方法には、Vカットとピラミッドカットといったくさび型心抜き方法が多

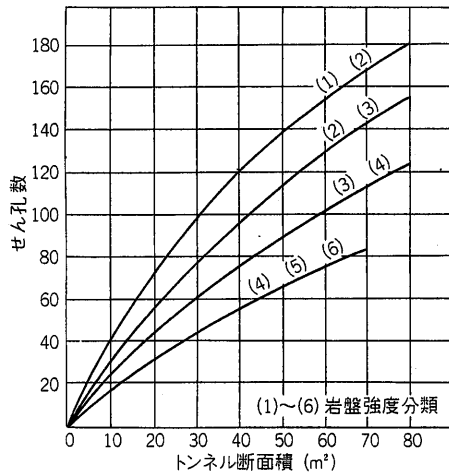


図-13 岩盤強度分類とせん孔数算定標準

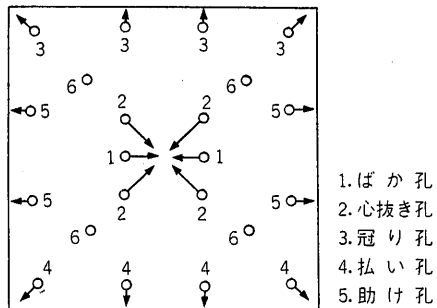


図-14 爆破孔の配置ならびに名称

く用いられているが、最近ではバーンカットなどの平行型心抜き方法も採用されている。Vカットは、1発破進行長に限度が生じることがあるが、岩質に左右されずもっとも一般的な心抜き方法である。

通常の発破工法では、爆破エネルギーの作用方向が十分に制御されないため、地山外周が大きな損傷を受けて緩み領域が大きくなったり掘削面の凹凸が激しくなりやすい。最近では、爆破エネルギーの作用方向を制御することができるスムーズブラस्टィング工法を採用する例が多くなっている。しかし、この方法でも岩質により効果が少ない場合があるため、試験発破を実施しその効果が発揮されるように工夫することが必要である。

削岩機は、動力源によって圧縮空気式削岩機と油圧式削岩機とに大別されるが、最近では小型で高出力で作動し、制御が容易であるうえ騒音が小さいなどから、湿式ヘビードリフタ(重量100kg以上、通常150kg級)によ

る油圧削岩機が主に用いられている。この場合、通常用いられる削岩機は、ホイール式の移動台車に油圧式ヘビードリフタを2~3台搭載したドリルジャンボである。

のみ下がり(穿孔速度)は、岩質、削岩機種、穿孔長、ビットの摩耗度などによって異なるが、岩石の圧縮強度とのみ下がりの一般的な関係をドリルジャンボ用150kg級ドリフタの例(図-15)で示す³⁾。

3-3 爆破と地質条件

産業用爆薬には、ニトロゲルを基剤とする膠質ダイナマイト(桜、桐、榎、杉)、ニトロゲルの含有率が低く可塑性のない粉状ダイナマイト(桂)、過塩素酸アンモニウムを基剤とするカーリット(あかつき)、硝酸アンモニウムを基剤とする硝安爆薬、粒状の硝酸アンモニウムと軽油を成分とする硝安油剤爆薬(AN-FO爆薬)、硝酸アンモニウムの飽和水溶液に火薬類でない鋭感剤を混ぜた含水爆薬(スラリー爆薬)などがある。

トンネル掘削には後ガスと耐久性が良好な膠質ダイナマイト(2号榎)と含水爆薬が多用されている。親ダイおよび心抜きには2号榎、増ダイには含水爆薬を使用する例が多い。

また、周辺孔用にはSB(スムーズブラस्टィング)含水爆薬が用いられている。含水爆薬は、後ガスと耐久性、安全性が膠質ダイナマイトよりも優れており、価格も同等であるため使用例が増加している。

トンネル用各種爆薬の主要特性をまとめると表-9のようになる⁴⁾。

爆薬量の多寡は、①掘削断面積、②地山の岩石強度、③使用爆薬の種類、④穿孔径および穿孔長、⑤掘削工法、⑥爆破方法などの影響因子に支配される。

単位体積あたりの爆薬量を地山の耐爆強度 H との関係で掘削断面積ごとにプロットすると図-16(a)のように

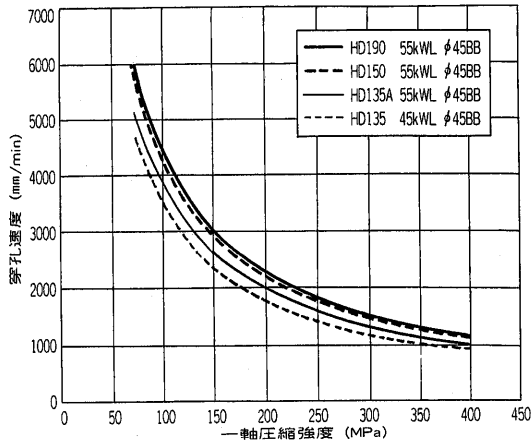
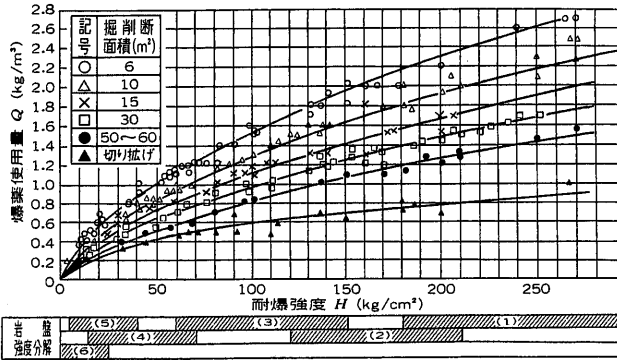


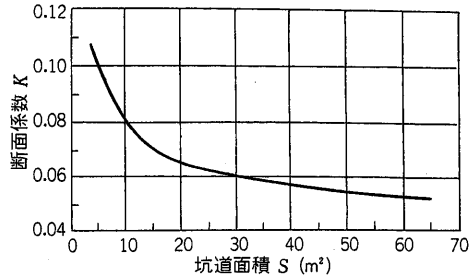
図-15 岩石の強度と穿孔速度

表-9 トンネル用爆薬の種類と主要特性

品名	性状			起爆性		爆力		後ガス試験 (Gallery Test)			安全度に関する試験		
	性状	仮比重 (g/cc)	耐水性	起爆性	限界薬径 (mm)	爆轟速度 (m/sec)	砂上殉爆度 (倍)	後ガス	CO (ℓ/kg)	NO _x (ℓ/kg)	落錐感度 (5kg 荷重)	摩擦感度	銃撃感度
2号榎ダイナマイト	膠質	1.42~1.50	良好	雷管1本	5~7	5,800~6,500	4~6	最優秀	5.0~8.0	1.0~1.9	20~25cm以下不爆	20kg以下不爆	10/10爆発
3号桐ダイナマイト	"	1.30~1.40	"	"	"	5,500~6,500	"	優秀	5.6~10.5	1.5~2.5	20~22cm以下不爆	"	"
AN-FO爆薬	粒状	0.85~1.00	吸湿	ブースター使用	-	約3,000	-	坑外用	2.7~9.1	2.6~17.3	不爆	-	-
含水爆薬 (スラリー爆薬)	ウォーターゲル	1.10~1.12	最優良	雷管1本	10~15	4,400~5,200	2~5	最優秀	2.5~3.5	1.0~3.0	120cmで不爆	41kgで不爆	0/10不爆
SB用スラリー (スムーズブラस्टィング用)	"	0.9	"	"	-	2,500~3,000	3~6	"	-	-	"	"	"



(a) 岩盤強度と爆薬使用量



(b) 坑道断面積に対する断面係数Kの値

図-16 岩盤強度と爆薬使用量など

表-10 火薬使用量 (kg/m³)

掘削区分 加背	火薬使用量 (kg/m³)		
	B	C	D
上半	1.0	0.8	0.6
下半			0.5

(注) 火薬使用量は、余掘りを含めない設計掘削量1に対するものとする。

なる。

ただし、

$$H = 1 + \left\{ \frac{1}{\exp(v_c/v - 1) - 1} \right\} \times \sigma \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

σ : 準岩盤せん断強度(kgf/cm²) $\sigma = \sigma_s(v/V)^2$

σ_s : 岩石試料のせん断強度(kgf/cm²)

v : 地山弾性波速度(km/sec)

V : 岩石試料の弾性波速度(km/sec)

$(v/V)^2$: 岩目係数

v_c : 地質によってきまる固有弾性波速度(km/sec)

火成岩, 古生層, 中生層, 変成岩 6.0

一部の古生層, 第三紀層, 火成岩 5.5

大部分の第三紀層 4.5

第三紀層への洪積層 3.5

Q : 使用爆薬量(kg/m³)

H : 耐爆強度

図より坑道掘削の場合の爆薬量 Q は、

$$Q = KH^{0.6} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

ここに、 K は図-16(b)から求められる断面係数である。

切り掘削の場合の爆薬量は、

$$Q = (0.06 \sim 0.7) H^{0.66} \text{ (kg/cm}^3\text{)}$$

道路トンネルの地山分類にもとづく地山等級ごとの単位体積あたりの爆薬量を示すと表-10のようになる。

3-4 余掘りと地質条件

発破工法では、爆破により周辺地山の掘削面に凹凸ができるため、覆工の設計巻き厚線より外側の余掘りが発

生することが避けられない。とくに、硬岩地山では余掘り量が大きくなる。余掘りが多いと、ずり出しと覆工に余分の費用が増大するだけでなく、大きく掘ったために地圧の点からも不利になる。したがって、余掘りの低減は、工費縮減での大きな課題である。余掘り率は、地質、断面形状、掘削方式、穿孔方法、穿孔数、穿孔長、穿孔配置、爆薬量などによって異なるが、余掘りと地質条件の一般的な関係は次のようになる。

- ① 硬岩ほど穿孔数、爆薬量などが多くなり、余掘りが増加する。
- ② 岩目が少なくマッシュ硬岩では余掘り率が高いが、岩目が20~40cm以下でも大きくなる。
- ③ 硬軟の入り混じった地山では、一般に余掘り率が高い。
- ④ 固結度の低い含水砂礫層、硬岩の破碎帯は余掘り率が高い。
- ⑤ 塑性地圧が作用せず、しかも岩目が適当に発達した地山は余掘り率が小さい。

余掘り率と道路トンネル地山分類との関係を過去の実績を参考にまとめると表-11のようになる²⁾。

余掘りを低減するための対策としては、以下の方法が有効である。

- ① 測量を正確に行う。
- ② 穿孔位置、穿孔方向を正確にする。
- ③ 過装薬、弱装薬をなくする。
- ④ 岩目を正確に把握する。
- ⑤ SB(スムーズプラスティング)工法を採用する。

①, ②については、最近では余掘り管理の手法として、レーザー光を用いた掘削断面マーキングシステムや穿孔パターンを自動的に選択できるコンピュータ搭載のジャンボの採用により省力化と合理化が図られている。

スムーズプラスティングの原理は、爆発力のクッション作用にもとづくもので、爆発の衝撃によるランダムな

周辺地山の破壊を防止し、静的なエネルギーを持つ爆発ガスの作用で周辺地山に滑らかな壁面を形成することである。周辺孔を平行かつ接近して配置し、穿孔径よりも

小さい径の爆薬を用い、最後に爆破させる方法であり、SBダイナマイトのような比較的爆力の弱い爆薬を分散して装填することが多い。通常の穿孔配置では、孔の間隔 D と最小抵抗線 W との比 $D/W=1.1\sim 1.2$ であるが、スムーズブラスティングの場合は、周辺孔の間隔を小さくして $D/W \leq 0.8$ 程度とするのが適当である。スムーズブラスティング工法については、岩質により効果が少ない場合があるため、試験発破を実施しその効果が発揮されるように工夫することが必要である。

なお、余掘り率の標準は設計断面積の 5~7% となっている。

3-5 換気と地質条件

トンネルの施工中には、穿孔・発破・ずり積み、吹付け作業に伴う粉塵、発破の後ガス、運搬機械からの排ガス・煤煙、地山から発生す可燃性ガス・有害ガス・酸欠空気などにより坑内の作業環境が低下するため、環境保全のために適切な換気が必要である。

粉塵は、3~0.1 ミクロン程度の微小な粒子である。粉塵の中でも遊離珪酸が人体に及ぼす影響が大きい。遊離珪酸が原因となって生じる症状は「珪肺」といわれる。

表-11 余掘り、余巻きおよび余吹き厚 (cm)

掘削方法	掘削区分	余掘り厚	余巻き厚	余吹き厚(N ₁)
発破工法	B	27	23	4
	C I	22	17	5
	C II	20	13	7
	D I	17	10	7
	D II	17	10	7
機械掘削	C I	13	8	5
	C II	13	8	5
	D I	13	8	5
	D II	13	8	5

- (注)1. 設計巻き厚、設計吹付けコンクリート厚および設計掘削断面に対する割増し厚さである。
 2. 非常駐車帯、避難連絡坑などについても上表を適用する。
 3. 変形余裕量を見込む場合は余掘り、余巻きは上表より 5cm 減じ、掘削断面に変形余裕量を加えるものとする。

表-12 粉塵の許容濃度

I. 遊離珪酸含有 10% 以上の粉塵(次式により計算)

$$\text{吸入性粉塵}^* M = \frac{2.9}{0.22Q+1} \text{ (mg/m}^3\text{)}, \quad \text{総粉塵}^{**} M = \frac{12}{0.22Q+1} \text{ (mg/m}^3\text{)}$$

M: 許容濃度, Q: 粉塵中遊離珪酸含有率(%)

II. 各種粉塵

	粉塵の種類	許容濃度(mg/m ³)	
		吸入性粉塵*	総粉塵**
第1種粉塵	滑石、ろう石、アルミニウム、アルミナ、珪藻土、硫化鉍、硫化焼鉍、ベントナイト、カオリナイト、活性炭、黒鉛	0.5	2
第2種粉塵	遊離珪酸 10% 未満の鉍物性粉塵、酸化鉄、カーボンブラック、石炭、酸化亜鉛、二酸化チタン、ポルトランドセメント、石灰岩、大理石、線香材料粉塵、穀粉、綿塵、木炭、革粉、コルク粉、ベークライト	1	4
第3種粉塵	その他の無機粉塵および有機粉塵	2	8
石綿粉塵	クリソタイル、アモサイト、トレモライト、アンソフィライト、アクチノライト クロジライト	時間荷重平均: 5 μm 以上の石綿繊維で 2 繊維/cm ³ (これに対応する石綿粉塵の重量濃度は 0.12mg/m ³) celing 値: 5 μm 以上の石綿繊維で 10 繊維/cm ³ (いかなるときも 15 分間の平均濃度がこの値を越えてはならない) 0.2 繊維/cm ³	

注)1. *吸入性粉塵: 次に示す分粒特性を有する分粒装置を通過した粒子を吸入性粉塵とする。

$$P = 1 - \frac{D^3}{D_0^3} (D \leq D_0), \quad P = 0 (D > D_0)$$

ここに、P: 透過率, D: 粉塵の相対沈降径(μm), D₀: 7.07 μm.

2. **総粉塵: 捕集器の入口における流速は 50~80cm/s として捕集した粉塵を総粉塵とする。
 3. 粉塵の濃度とは、遊離珪酸 10% 以上の粉塵および第 1 種、第 2 種、第 3 種粉塵測定法によって測定された濃度である。
 4. 石綿粉塵の測定法はメンブランフィルター法または X 線回折法によるか、あるいは、これらの方法で得られる値と比例の関係をもつ値の得られる他の方法によるものとする。

表-13 坑内の有毒ガス、可燃性ガスなどの一覧表

ガスの種類	ガスの特性 ¹⁾			予想される障害・危険	法令上の抑制値 ²⁾	ACGIH限界値 ³⁾
	比重 ²⁾	色, 臭気, など	爆発限界(容量%)			
一酸化炭素 (CO)	1.0	無色, 無臭	12.5~74	中毒, 爆発	100ppm	25ppm
二酸化窒素 (NO ₂)	1.5	赤褐色, 青黄色, 硝煙臭	—	中毒	—	3ppm
炭酸ガス (CO ₂)	1.5	無色, 無臭	—	酸素欠乏症	1.5%	5000ppm
硫化水素 (H ₂ S)	1.2	無色, 腐卵臭	4.3~45	中毒, 爆発	10ppm	10ppm
亜硫酸ガス (SO ₂)	2.3	無色, 硫黄臭	—	中毒	—	2ppm
メタン (CH ₄)	0.6	無色, 無臭	5~15	爆発	1.5% ³⁾	—

注1) 人体に対する症状は、濃度と経過時間により、それぞれ異なるので、文献を参考にするのがよい。

文献には、労働科学研究所：現代労働衛生ハンドブック(1988年)がある。

2) 気体の標準状態(0°C, 1気圧)における同じ状態の空気に対する比重。

3) 労働安全衛生規則、酸素欠乏症防止規則、労働省告示などに示された値で、就労禁止とすべき値である。

4) ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists(米国労働衛生専門会会議), 1992年による値で、a)健康管理の参考として用い、有害、無害の判定の基準に用いてはならない、b)ほとんど大部分の作業員は、この濃度下では連日作業をくり返しても影響を受けないとされている。

5) メタンの爆発限界は5~15%であり、安全衛生規制によれば、「可燃性ガスの濃度は爆発下限値の30%以下」と規定されているため、便宜的に1.5%とした。

表-14 容積変化率および単位重量の標準

分類	地 山		運 搬 中		落 着 いた とき	
	容積	単位重量(t/m ³)	容積	単位重量(t/m ³)	容積	単位重量(t/m ³)
硬岩	1	2.2~2.8	1.4~2.0	1.4~2.0	1.2~1.6	1.6~2.2
軟岩	1	2.0~2.5	1.3~1.7	1.3~1.9	1.1~1.4	1.5~2.2
土砂	1	1.5~2.2	1.2~1.5	1.2~1.8	1.0~1.2	1.4~2.2

は、体積増加によるもののほか余掘りによる増加もあるので、これらを考慮してずり量を見込むことが必要である。増え率は、運搬車に積み込まれたとき、土捨て場に落ち着いたとき、転圧されたときで

したがって、粉塵の中でも、とくに珪酸を多量に含有している酸性火成岩、石英質砂岩は注意を要する地質である。表-12に粉塵の許容濃度を示す²⁾。

太古、地中に埋もれた動植物が石灰・石油化するとき、動植物は分解してメタンガスなどが生じる。ガス田、油田、炭田地帯を通過するトンネルで、破碎帯や亀裂の多い岩質の箇所、砂岩・泥岩や炭層を挟む地層などでは、可燃性ガス・有害ガスなどが湧出する機会が多いので十分な注意が必要となる。また、ガスは上記地質の断層や背斜軸部の上部にち密層を持つポーラスな地層中に集まっていることが多い。

可燃性ガス・有害ガスなどの発生が予想される地山では、ガス検知器を用いてその濃度を測定し、状況に応じて換気、火気使用禁止、坑内使用機器の防爆、退避、入坑禁止などの措置を講じるなどが必要になる。坑内の可燃性ガス・有害ガスの特性などを示すと表-13のようになる³⁾。

切羽安定対策として圧気工法を併用する場合には、酸欠空気が、近隣の井戸や地下室に流出する危険性があるのでその採用にあたっては、十分な検討が必要である。

3-6 ずりと地質条件

掘削により発生したずりの体積は、もとの地山の体積に比べて1.2~2.0倍くらいに増加する。また、ずりの量

それぞれ異なる。

増え率は、地質によっても異なり運搬中、落ち着いたときに対応した容積変化率の標準が表-14のようにまとめられている²⁾。鉄道用バラストの実績でいけば、道床締め固め時の容積はダンプカー運搬時の容積の85%程度になるとされている。

トンネルずりは、通常は盛土材料として使用されるが、膨張性岩石、スレーキング(湿潤・乾燥のくり返しによる細粒化現象)、風化破碎などを生じる岩石は盛立て後の沈下やすべりを生じる危険性が大きいので極力使用を避けた方がよい。やむを得ず使用する場合には、乾湿のくり返しの影響をうけない部分のみにその使用を制限するなどゾーニング(使用する箇所)を十分検討することが必要である。また、礫岩、集塊岩、大きな目の発達した硬岩では、大塊が主体のずりになる場合が多いので、盛立て前に小割り発破やブレーカなどで粒度調整が必要となる。

3-7 機械掘削と地質条件

機械掘削は、発破掘削に比べて発生する地山の緩み範囲が約半分と少なく、平滑な掘削面が得られ、余掘りも少なく、振動・騒音も低減できるので、環境対策上、発破掘削の困難な都市部のトンネル工事に多用されている。

機械掘削は、TBMによる全断面掘削機とブーム(アー

ム)掘削機, バックホウ, 大型ブレーカ, 割岩機などによる自由断面掘削機とに大別される。

全断面掘削機は, 中硬岩・硬岩地山に適し, 自由断面掘削機は発破が適さない未固結地山から軟岩地山の掘削に適用されることが多い。

3-7-1 TBM

TBM は, 圧縮強度が 100~800kgf/cm² 程度の良好な地山において能率よく掘削が行われているが, 掘削効率は, 岩石の圧縮強度以外にも硬度, 研磨性鉱物粒子の含有量, 割れ目, 層理などにも影響をうける。TBM には, オープンタイプとシールドタイプがあり, 前者は中硬岩および・硬岩地山に適し, 後者は, 軟岩地山に適している。TBM は, 機械が高価で初期投資が大きいこと, 断面が円形ないし円形を組み合わせた形などに限定されること, 掘削径の変更が困難なこと, 発進基地の構築が必要であることなどが課題である。また, 地質確認, 湧水処理, 換気, 補助工法の施工などのために先進導坑として TBM を採用した例がある。

TBM では, 切羽面を直接観察できない。そのため軟弱な地山(断層, 破碎帯)に掘削機が突っ込んでノーズダウン状態となり動けなくなったり, 突然の湧水で掘削機が水没し, 掘削不能になるという致命的なトラブルが生じる可能性があるためトンネルの施工にあたっては, 断層や破碎帯の位置・規模, 地山の膨張性, 切羽の自立性, 大湧水の有無などに着目した十分な事前調査を実施するとともに, 施工中は切羽面および切羽前方の地質状態(とくに, 破碎帯, 帯水層や軟弱地質の出現状況)をリアルタイムまたは早期に把握できる探査システムの採用が不可欠である。

TBM 掘削機の仕様決定に際しては, 通常地質調査のほかに, 岩石の硬度, 鉱物組成, 地山の割れ目(節理・層理)の状態, 切削試験などの調査試験を実施することが必要である。トンネルの掘削延長, 断面の大きさや形状なども考慮し, カッタの種類・配置およびカッタヘッドの回転数・推力などの機械特性と地山との適合性を十分検討して機械の選定を行う。また, 破碎帯, 大湧水, 膨張性地山などの不良地山や掘削能力を超える堅硬な箇所遭遇したときの補助手段についても検討が必要である。

3-7-2 ブーム(アーム)掘削機

ブーム掘削機は, ブームの先端に回転ドラムを有し, ブームを切羽面に押しつけながら移動し, 部分掘削を行うので, 機動性があり, 任意断面を掘削できる。適用範囲は, 岩種や割れ目の状態にもよるが圧縮強度でおよそ 600~700kgf/m² までの地山であるが, 最近では, 1,000kgf/cm² 程度の実績もみられる。能率よく掘削で

きるのは 400kgf/cm² ぐらいまでとされ, この範囲では, 掘削速度が発破掘削を越える例もある。低振動・低騒音で効率的に掘削できるブーム掘削機が開発されてきており, 80~100m² 程度の断面積のトンネルに対し, 全断面, ミニベンチ, ショートベンチ工法に同一機械で対応できるようになってきた。しかしながら, 湧水のある地山では, 掘削盤が泥濘化し, トラフィカビリティが悪く, ずり積みも困難となるので排水をよくして切羽に水が滞留しないように配慮するとともに, 仮インバート, 底盤(路盤)の地盤改良, ロードマットや覆工板を使用するなどの対策が必要となる。また, 地山が乾燥している場合は, 切削による粉塵抑制のための散水や集塵機の設置が必要である。玉石や転石が分布する地山では, 掘削能力が大幅に低下するとともにカッタが損傷し, カッタコストが高価となる。

ブーム掘削機は TBM に比べて小型, 安価で, 地山の変化に応じて他の工法に変更が容易である。ブーム掘削機には, クローラ方式のロードヘッダのほかに, 低強度の地山を対象とするカッタローダ, フライスローダなど

表-15 土圧の分類

土圧の分類	原因	現象	地質状態
塑性土圧	残留応力, 活造山運動応力, 潜在応力の解放	山はね	堅岩(亀裂, 湧水少ない)
		トンネル周辺の押し出し, 崩壊	破碎帯, 軟岩, 造山帯の岩石, 先行荷重を受けている土
緩み圧	掘削, 爆破, 壁面の風化などによる地山の緩み	天井圧, 側圧, 崩落	未固結堆積物 亀裂のほとんどない堅岩を除く岩石
膨張圧	岩石の物理的・化学的変化, 沈下, 先行荷重の解放	トンネル周辺の押し出し	粘土のような強度の弱い土, 膨潤性粘土鉱物を含む岩石(蛇紋岩, 泥岩, 凝灰岩, 温泉余土など)
偏圧	1) 偏圧地形	支保工, 覆工の変質, 崩壊, 押し出し	1) 地形が非対称で急斜面をなし, 土かぶりが小さい
	2) 地すべりなどによる地山の移動		2) 地すべり地, 崖すい, 表土層
	3) 傾斜破碎帯や傾斜層理面		3) 地質状態が非対称
	4) 地山の部分的膨張(流動性土圧)		4) 破碎帯, 膨潤性粘土鉱物を含む岩石
	5) 並設トンネル, 切り取り爆破, 地震などによる		

表-16 膨張性地山のトンネル施工例

トンネル名 (線名)	トンネル 延長 (m)	膨張性 区間の延長 (最大土 かぶり) (m)	断面形状 (内空幅) (m)	膨張性 を示す 岩種	膨張性 区間の 掘削工法	支保工			覆工 巻き厚 (cm)	記 事
						吹付けコ ンクリー ト(cm)	ロック ボルト (長さ× 本数)	鋼製支保工 (呼称・間隔)		
新登川 (紅葉山線)	5,825	1,030 (420)	円形 (6.32)	蛇紋岩 頁岩	ベンチカッ ト工法	25	—	φ216.3× 0.5m ctc	40	鋼管支保工: モルタル中詰
青 函 (津軽海峡線)	53,850	446 (130)	円形 (9.80)	泥岩 凝灰岩	ベンチカッ ト工法(小 導坑先進 コンクリー ト中詰め)	35	(6~11m) ×17本	φ267.3~ 318.5×(0.7 ~0.9m ctc)	70~90	ロックボルト: 一部自穿孔 鋼管支保工: モルタル中詰 一部らせん鉄 筋入り
中 山 (上越新幹線)	14,830	800 (425)	馬てい形 (9.60)	凝灰岩 泥岩	ベンチカッ ト工法	15~20	(3~6m) ×(17~ 35本)	MU-29× (0.9~1.0m ctc)	50	
鍋立山 (北越北線)	9,117	2,296 (320)	円形 (7.20) 卵形 (4.92)	泥岩	ベンチカッ ト工法(一 部円形導 坑先進)	15~37.5	(3~5m) ×(6~ 40本)	H-150・175 MU-29× (0.5~1.0m ctc)	30~60	一部地山改良 注入
駒 止 (国道289号)	2,000	1,200 (300)	馬てい形 (8.50)	緑色 凝灰岩	ベンチカッ ト工法	15~20	(2~6m) ×(14~ 27本)	MU-29× (0.8~1.2m ctc)	50	
新 榎 (国道351号)	2,394	1,500 (200)	馬てい形 (9.00)	泥岩	ベンチカッ ト工法	10	(4~6m) ×(16~ 22本)	—	80	
塩 嶺 (中央東線)	5,994	5,994 (300)	馬てい形 (8.54)	泥岩	ベンチカッ ト工法	10~30	(2~8m) ×(22~ 44本)	H-150・200 MU-29× 1.0m ctc)	30	
新宇佐美 (伊東線)	2,985	2,985 (280)	円形 (6.00)	温泉 余土	ベンチカッ ト工法	10~20	(2.5~5m) ×(16~ 24本)	MU-29× (0.8~1.4m ctc)	30	
恵那山Ⅱ (中央自動車道)	8,635	350 (450)	馬てい形 (10.20)	熱水変 質作用 を受け た花崗岩	ベンチカッ ト工法	25	(6~9m) ×(22~ 61本)	MU-29× 1.0m ctc)	30~45	増しロックボ ルト13.5m 吹付け:一部 鋼繊維補強
折 爪 (東北自動車道)	上り2,321 下り2,272	上り950 下り1,033	馬てい形 (10.20)	泥質 凝灰岩	ベンチカッ ト工法(一 部円形導 坑先進)	20	(6~9m) ×(43~ 51本)	H-200× 1.0m ctc)	30~50	吹付け:一部 鋼繊維補強
中 屋 (国道249号)	1,260	210 (140)	馬てい形 (10.40)	凝灰岩	ベンチカッ ト工法	20~25	(4~9m) ×(18~ 58本)	H-150・200 ×(0.6~1.0 m ctc)	30~50	
舟 形 (国道13号)	1,368	270 (120)	馬てい形 (11.40)	泥岩	ベンチカッ ト工法	25	(4~6m) ×26本	H-200× 1.0m ctc)	30~50	
日暮山 (上信越自動車道)	2,223	380 (100)	馬てい形 (10.20)	泥岩	ベンチカッ ト工法 (一部円形 導坑先進)	15~35	(4~6m) ×(16~ 32本)	H-125・150・ 200・250× 1.0m ctc)	30~80	吹付け:一部 鋼繊維補強 覆工:鋼繊維 補強 一部地 山改良注入

がある⁹⁾。

バックホウは、主に土砂地山の掘削に用いられ、玉石を含む地山や中硬岩で、騒音・振動などの問題がある場合には、大型ブレーカや割岩機が用いられる。

また、圧縮強度が800~1,000kgf/cm²以上の硬岩地山で都市部や坑口付近などで発破工法やTBMなどのほかの機械工法が採用できない場合には、切羽面に油圧クロードリルなどで連続孔列(スロット)を穿孔し、自由面を形成したのち割岩孔を穿孔し、くさびまたは静的破碎剤などで割岩の後、油圧ブレーカやロードヘッダで圧碎する「割岩工法」が適用される例も増えている。

4. トンネル掘削に伴う地質的現象

4-1 概要

トンネル掘削に際しては、土圧、湧水、崩壊、地盤変位(沈下)などの地質的現象が発生する。

土圧には、地質条件や地形によって塑性土圧、緩み土圧、膨張性土圧、偏圧などがあるが、その大きさは掘削工法、支保工の規模・施工時期などによって影響をうける。湧水も地質や地下水頭の大きさによって出水状況や湧水量が異なる。崩壊現象は、切羽の天端や鏡面で生じ

るケースがほとんどで土砂地山、破碎帯、節理・層理の発達した地山、強風化地山、膨張性地山で発生しやすい。地盤変位(沈下)は、崩壊が原因となる場合や土砂地山などの土かぶりの小さい軟弱地山で大きくなる。

4-2 土圧と地質条件

地質条件からみた土圧の分類を表-15に示す。主要な土圧について以下にのべる¹⁾。

4-2-1 緩み土圧

未固結地山、節理・層理を有する地山、軟岩では、トンネル掘削によって地山に生じる応力増加に対して地山強度が不足するため、周辺地山が崩壊し、これが緩み土圧となって支保工に作用する。通常は緩み土圧により支保工が大きく変形することはない。

4-2-2 偏 圧

土かぶりの小さい山腹で、崖錐、表層堆積物、傾斜層(成層面、亀裂などの地質的分離面)がトンネル掘削によって緩んだり、滑動することによって生じる土圧である。地すべり地を通過するトンネルや双設トンネルや並設(メガネ)トンネルにおいても偏圧が問題となる。

4-2-3 膨張性土圧

軟岩(泥岩、頁岩など)、破碎岩、膨張性粘土鉱物を含

表-17 地山の膨張性を示す指標の例⁹⁾

	仲野(1975)	日本鉄道建設公団(1977)	大塚ほか(1980)	佐藤ほか(1980)	吉川ほか(1988)
膨張性を示す指標	地山強度比(G_n) $= \sigma_c / \gamma H$ σ_c : 一軸圧縮強度 γ : 単位体積重量 H : 土かぶり厚 ① $G_n \leq 2$ 押し出し性~膨張性 ② $2 < G_n \leq 4$ 強度の押し出し性~地圧が大きいと推定される ③ $4 < G_n \leq 6$ 地圧が大きいと推定可 ④ $6 < G_n \leq 10$ 地圧があると推定可 ⑤ $10 < G_n$ 地圧がほとんどないと推定可	地圧発生の可能性が非常に大きいもの ① 岩石中の主要粘土鉱物がモンモリロナイト ② $2\mu m$ 以下粒子含有率が30%以上 ③ 塑性指数 $\geq 70\%$ ④ 陽イオン交換容量 $\geq 35 meq/100g$ ⑤ 浸水崩壊度D ⑥ ボーリングサンプル中破碎部多い 膨張発生の可能性あり ① 岩石中の主要粘土鉱物がモンモリロナイト ② $2\mu m$ 以下粒子含有率が20%以上 ③ 塑性指数 $\geq 25\%$ ④ 陽イオン交換容量 $\geq 20 meq/100g$	① 変形係数 $\leq 8000 kgf/cm^2$ ② 一軸圧縮強度 $\leq 40 kgf/cm^2$ ③ 単位体積重量 $\leq 2.05 kgf/cm^3$ ④ 自然含水比 $\geq 20\%$ ⑤ 液性限界 $\geq 100\%$ ⑥ 塑性指数 $\geq 70\%$ ⑦ 液性指数 $\geq 20\%$ ⑧ $2\mu m$ 以下粒子含有率 $\geq 30\%$ ⑨ 陽イオン交換容量 $\geq 35 meq/100g$ ⑩ 膨張率 $\geq 20\%$	① 自然含水比 $\geq 20\%$ ② 単位体積重量(乾燥) $\leq 1.8 kgf/cm^3$ ③ (第1回吸水量/自然含水比) ≤ 2.0 ④ 浸水崩壊度C~D ⑤ モンモリロナイト含有率 $\geq 30\%$ ⑥ RQD $\leq 30\%$	著しい膨張性を呈する地山 ① ボーリング時 ・無水掘りが必要 ・コア膨張が顕著 ② $G_n \leq 1.5 (< 0.5$ で顕著) ③ モンモリロナイト含有率 $\geq 20\%$ かつ自然含水比 $\geq 20\%$ ④ 浸水崩壊度D 膨張性を呈する地山 ① ボーリング時 ・コア採取率低い ・コアディスクが顕著(< 0.5 で顕著) ② $1.5 \leq G_n < 2.0$ ③ モンモリロナイト含有率 $\geq 20\%$ または自然含水比 $\geq 20\%$
備考	新第三紀泥岩	赤倉トンネル 新第三紀中新世 椎谷層 第四紀洪積世 灰爪層	鍋立山トンネル 新第三紀中新世 椎谷層定性的に上記②~⑤、⑩は膨張性との 相関あり ⑧、⑨などは相関性低い	青函トンネル算用 師工区 新第三紀中新世泥 岩	新第三紀泥岩

注) $1 kg/cm^2 = 0.1 MPa$

表-18 山はねの発生したトンネル施工例

トンネル名 (線名)	トンネル 延長 (m)	地質	掘削断面積 (m ²)	施工法	支保工	覆工コンクリート厚さ (cm)	山はねの発生 状況と位置	山はね対策工
清越線 (上越線)	9,702	花崗岩 石英閃緑岩 花崗閃緑岩 ホルンフェルス	在来線単線 30.0	底設導坑先進 上半逆巻工法 (矢板工法)	松丸木、松板	コンクリートブロック 練り積み 30	土かぶり 1,000m 程度以上 ・底設導坑側壁	・待機時間
大越線 (上越新幹線)	22,221	花崗岩 花崗閃緑岩	新幹線複線 85.4	全断面掘削工法 (矢板工法)	鋼製支保工 (H250) ・ロックボルト	50	土かぶり 500m 程 度以上 ・切羽天端～側壁 ・切羽後方 20m 程 度の天端～側壁	・ロックボルト ・落石防止圧密 ・鋼繊維補強吹付けコンクリート ・待機時間
上越線	11,020	石英閃緑岩 ホルンフェルス	85.0 (2車線)	全断面掘削工法	ロックボルト ($L=3m$) 吹付けコンクリート ($t=5cm$)	30	土かぶり 300m 程 度以上 ・鏡、天端～側壁	・1掘進長の短縮(2.5から 1.5) ・吹付けコンクリートを SFRC に変更 ・鏡吹付けコンクリート($t=5cm$) ・鏡打ちロックボルト($l=3m, 22本/断面$) ・待機時間の設定(AE計測) ・点数評価(AEと切羽観察)による対策工の採用

表-19 支保部材選定の目安(掘削断面20~100m²)

地山の種類	特徴	支保の対象	支保部材					補助工法	記事
			吹付け コンクリート	ロック ボルト	鋼製 支保工	覆工			
						二次 覆工	イン パート		
硬 岩	割れ目が少ない	・岩塊の肌落ち	△	△				二次覆工コンクリートに応力が作用しない	
	割れ目は多いが粘土を介在しない	・岩塊の肌落ち ・緩み土圧	△	○	△			鋼製支保工は上半部のみ建て込む場合もある	
	割れ目が多く破碎されている	・岩塊の肌落ち ・緩み土圧 ・真の土圧	○	○	○		△	切羽安定対策(鏡面, 天端安定) 供用時の路盤状態確保からインパートの設置が望ましい	
軟 岩	地山強度比が大きい	・岩塊の肌落ち	△	△			○	供用時の路盤状態確保から泥質岩などは原則的にインパートが必要	
	地山強度比が小さい	・緩み土圧 ・真の土圧	○	○	○		○	インパートの早期施工	
	地山強度比が著しく小さい	・緩み土圧 ・真の土圧	○	○	○	△	○	切羽安定対策(鏡面安定) 断面の早期閉合, 吹付けコンクリートの高性能化, 変位の収束状況の確認, 変形余裕量を考慮する	
膨張性地山	・緩み土圧 ・真の土圧 ・膨張圧	○	○	○	○	○	切羽安定対策(鏡面安定, 脚部補強) 断面の早期閉合, 吹付けコンクリートの高性能化, 二次覆工の力学性能, 変位収束状況の確認, 変形余裕量を考慮する		
土砂地山 (土かぶりが小さい場合)	・緩み土圧 ・沈下の抑制	○	△	○	○	○	○	切羽安定, 地表面沈下, 近接構造物対策 断面の早期閉合, 覆工は構造部材として設計する	

注) ○は一般に必要なもの, △は必要に応じ適用されるもの。

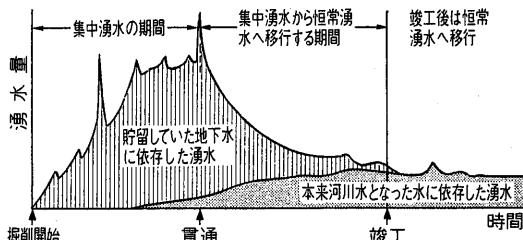


図-17 トンネル湧水量の変動(模式図)

区分	比湧水量 m ³ /min/km	%							
		20	20	20	20	20	20	20	20
10	5.0 ≤ q	σ=1.9	σ=1.9	σ=1.9	σ=2.2	σ=2.7	σ=2.5	σ=2.2	
9	2.0 ≤ q < 5.0								
8	1.0 ≤ q < 2.0								
7	0.5 ≤ q < 1.0								
6	0.2 ≤ q < 0.5					$\bar{x}=5.9$	$\bar{x}=6.0$	$\bar{x}=6.6$	
5	0.1 ≤ q < 0.2		$\bar{x}=4.8$	$\bar{x}=5.2$					$\bar{x}=5.4$
4	0.05 ≤ q < 0.1	$\bar{x}=4.7$							
3	0.02 ≤ q < 0.05								
2	0.01 ≤ q < 0.02								
1	q < 0.01								
比湧水量		地質							
		第三紀層	変成岩	中・古生層	深成岩	火山岩 火山砕積岩	洪積層	合計	
		103本 26.0%	92本 23.2%	80本 20.2%	89本 22.5%	9本 2.3%	23本 5.8%	396本	

図-18 地質とトンネル比湧水量

む軟岩(蛇紋岩, 温泉余土, 泥岩, 凝灰岩)では, トンネルが掘削されると周辺地山とともに坑壁が徐々に内空に押し出されてくる現象がみられ, その変位は天端・側壁ばかりでなく, 底盤や鏡面にも生じる。このような現象が発生する地山を膨張性地山と呼んでいる。この膨張性土圧の発生状況は, 掘削後長期間にわたって続く場合があり, 完成後, 著しい変位によって, トンネルの改築を

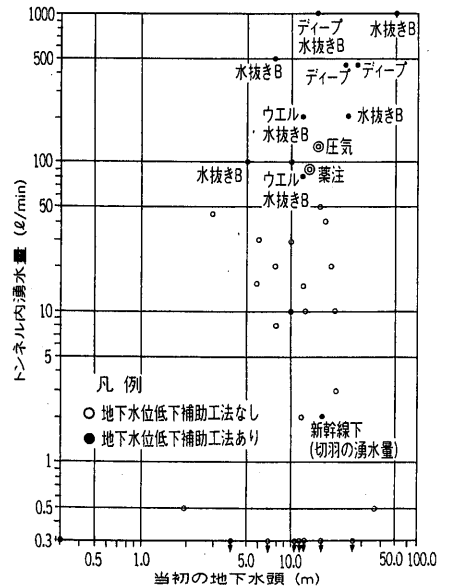
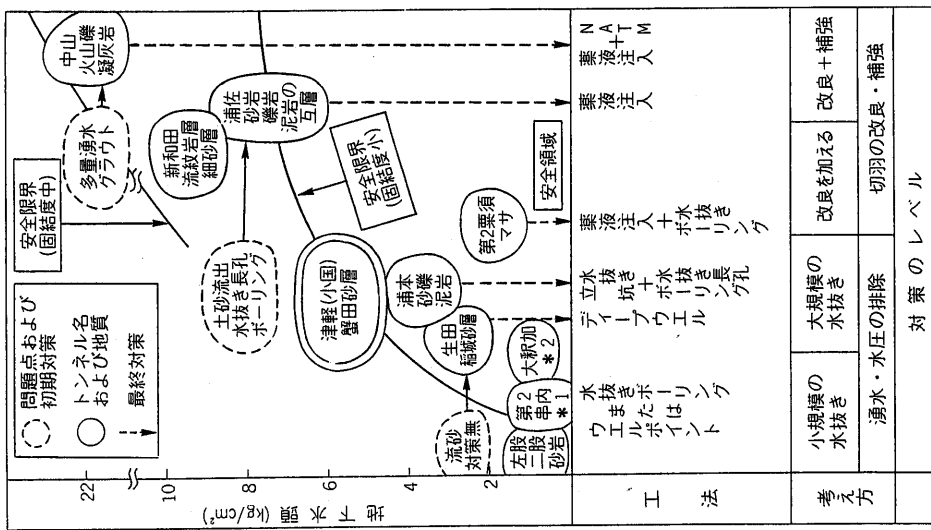


図-19 トンネル内湧水量と地下水頭の関係

表-20 切羽崩壊現象と切羽観察時の着眼点⁹⁾

地山状況	切羽崩壊の代表的現象	着眼点
① 均質 ほぼ均質な地山で、第三紀の泥岩などの膨張性地山がこれに相当する。		◎ 基岩の性質 △ 割れ目の程度や方向 △ 湧水
② 層理 異種物性の地層が互層をなす地山で、砂岩、泥岩などがこれに相当する。		◎ 基岩の性質 ◎ 割れ目の程度や方向 ◎ 湧水
③ 節理 硬岩に多く、組織が節理、割れ目により分断され不連続となっている地山。		△ 基岩の性質 ◎ 割れ目の程度や方向 ○ 湧水
④ 強風化・破砕帯 断層・破砕帯などのように局所的に劣化しており周辺と性質が異なるもの存在が認められる地山で、風化花崗岩などがこれに相当する。		◎ 基岩の性質 △ 割れ目の程度や方向 ◎ 湧水

注) ◎…とくに重要, ○…やや重要, △…あまり重要でない



*1 砂質シルト層 *2 砂利、ロームの互層
図-20 最大水圧・固結度・対策の関係⁹⁾

余儀なくされることもある。膨張性地山のトンネルの施工例を表-16に示す⁹⁾。泥質地山での施工例から、表-17のような膨張性判定指標が求められている⁹⁾。

4-2-4 山はね

土かぶりが大きい地山にトンネルを掘削すると天端や側壁あるいは鏡面から大きな音響を伴って急激に岩石が

表-21 地山の流動化を示す指標の例⁹⁾

	矢田ほか (1969)	森藤(1973)	日本国有鉄道構造物 設計事務所(1977)	土木学会 (1977)	奥園ほか (1982)	木谷ほか(1993)
指標	単位体積重量 ≤2.65g/cm ³ 土粒子の比重 ≤1.70 均等係数≤4 50% 粒径 ≤1.50mm 10% 粒径 ≤0.15mm	細粒分含有率 ≤10%	①均等粒径の砂 ・細粒分含有率≤10% ・均等係数≤5 ・飽和砂 ②地下水位の高い砂および砂 礫層 ③不透水層中に介在する帯水 砂層	細粒分含有率 ≤10% 均等係数≤4	細粒分含有率 ≤8% 均等係数≤6 透水係数 ≤10 ⁻³ cm/s	①自立が困難 ・相対密度<80% ・切羽近傍の動水勾配が大 ②流出の可能性がある状態 細粒分含有率<10%
備考	加木トンネル	生田トンネル				信濃川水路トンネルほか 詳細検討には試料試験が必要

表-22 代表的な切羽の安定対策工法の概要および地山条件

目的	対策工法	概要	地山条件			
			硬岩	軟岩	土砂	
天端安定対策	①フォアボーリング(充填式) ($l \leq 5m$)	切羽面から上半トンネルアーチ外周に5m程度以下の長さのロックボルト、単管、鋼矢板などを打設するものであり、充填式と積極的に地山を改良する注入式とがある。	○	◎	○	
	〃 (注入式)		○	◎	◎	
	②フォアパイリング($l > 5m$)	切羽面から上半トンネルアーチ外周に10~15m程度の長さを二重管掘りで鋼管などを存置して圧力注入を行ったり、水平ジェットグラウトによりコラムを造成しシェルを構築するものである。従来からの、ボーリング機械によるパイプルーフなども含む。		○	○	
	③斜めボルト	リングカットなどでロックボルトを斜め上方に施工し、早期に支保効果を発揮させる。	○	○	○	
	④プレライニング	専用機でトンネルアーチに沿って溝を切削し、これに吹付けコンクリートないし急結性のコンクリートを打設し、支保工とするものである。現在のところシェルの長さは3m程度であり、試験実施されている。		○	○	
切羽面安定対策	①鏡吹付けコンクリート	切羽面に吹付けコンクリートを行い、鏡面の安定をはかる。		◎	◎	
	②鏡ボルト	切羽面のロックボルトを打設し、切羽前方地山の補強を行う。		○	○	
	③加背割り	掘削断面積を縮小することで切羽の自立性を高める。			◎	
	④垂直縫地工法	地表からボーリングを行い、孔内に鉄筋を挿入しモルタルなどで固化する工法である。	○	○	○	
上垂壁の支持力対策	①支保工脚部の支持面積拡大 (ウィングリブ)	鋼アーチ支保工の脚部や吹付けコンクリートの脚部を厚く施工し、地耐力対策とする。		○	◎	
	②脚部補強ボルト(パイル)	支保工脚部に下向きに、ロックボルトやパイルを打設し支持力を補強する。		○	○	
	③仮閉合	上半あるいはインバート部に吹付けコンクリートを施工し、変形防止を図る。		○	○	
湧水対策	①薬液注入工	薬液を地盤に注入し、湧水量を低減する工法である。	○	○	○	
	②水抜き工	(水抜きボーリング)	水抜き工には、水抜きボーリング、水抜き坑のような自然流下方式とディープウェル、ウェルポイントなどの強制排水方式がある。工法の選定は土かぶり、地質条件などにより行う。	◎	◎	◎
		(水抜き坑)		○	○	○
		(ディープウェル)				○
		(ウェルポイント)				○

飛び出してることがある。この現象は、山はねとよばれ、岩盤中に蓄えられた弾性ひずみエネルギーが掘削により解放されることによって生じると考えられており、比較的土かぶりが大きく、地山応力が高い場合でかつ岩盤が均質で節理などが少ない地山で起こりやすい。山はねが発生したトンネルの例を表-18に示す⁹⁾。山はねの発生機構は、詳細には解明されていないが、発生の予知にはAE(アコースティック・エミッション)の測定技術が用いられた例もある。

4-3 支保工と地質条件

トンネル支保工には、鋼製支保工、吹付けコンクリート、ロックボルトなどが用いられている。地山の種類と支保工の選定の目安を示すと表-19のようになる⁹⁾。なお、鉄道、道路、水路などのトンネルにおいては標準設計に対応させた地山分類を定めている⁹⁾ので、参考とされたい。

4-4 湧水・湧水と地質条件

トンネルの湧水は、一般に図-17に示すように掘削中の集中的(非定常)な湧水と、供用後の恒常的(定常)な湧水とに分けられる¹⁾。難工事で著名なトンネルの多くは大量の集中湧水によるもので、枚挙にいとまがないほどの事例がある(序編 2-3-1参照)。恒常的な湧水量の実績をまとめると図-18のようになる¹⁾。恒常的な湧水量は地質、土かぶり、地形に左右される傾向性がうかがえる。湧水は、掘削能率を低下させ、断層破砕帯や未固結地山では、切羽崩壊を生じる原因となるばかりでなく、湧水や工期遅延の大きな要因となる。

湧水対策には、水抜きボーリング、水抜き坑、ディープウェル、ウェルポイントなどの排水工法と薬液注入、遮断壁などの止水工法がある。

湧水量と地下水頭との関係を施工実績からまとめると図-19のようになる⁷⁾。湧水量 100 l/min 以上、地下水頭 5~10m 以上になると湧水対策が施工されている。また、水圧と地山の固結度と湧水対策の事例を示すと図-20のようになる⁹⁾。

4-5 崩壊と地質条件

トンネル掘削中の崩壊現象は、切羽の天端と鏡面で発生する例がほとんどであり、崩壊原因としては地質構造によるものと湧水によるものが80%近くを占めている。破砕帯、強風化地山、節理・層理の多い地山、膨張性地山、土砂地山、崖錐、軟岩地山などでの発生例が多い。地山状況と切羽崩壊の代表的な現象ならびに切羽観察の着眼点を示すと表-20のようになる⁹⁾。

地下水位以下にある土砂地山では、切羽の流動化現象が生じる。流動化を発生させる要因は、水圧であるが地

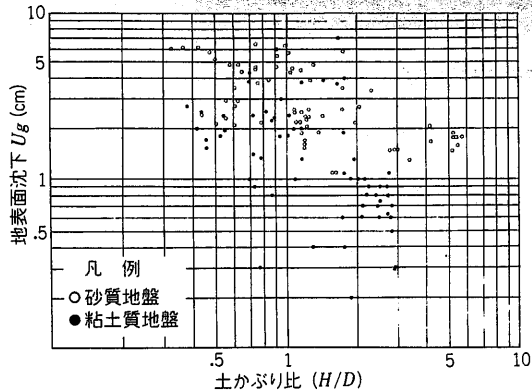


図-21 砂質および粘土質地盤における土かぶり比と地表面沈下との関係

山の粒度構成によって自立性が決まるようである。表-21に地山の流動化の判定指標を示す⁹⁾。

各種切羽安定化対策と適用地山条件の関係は表-22のようである⁹⁾。

4-6 地表沈下と地質

土かぶりが小さいトンネルでは、掘削による応力解放と緩み、地下水低下などにより地表沈下が生じる可能性が高い。図-21に、洪積層における土かぶり比と地表面沈下との関係を砂質地盤と粘土質地盤に分けて示した¹⁰⁾。バラツキがあるものの、両地盤とも土かぶりが浅くなるほど地表面沈下が大きくなる傾向にある。とくに、土かぶりがトンネル直径よりも小さい場合では、地表面沈下が大きい。

(文責：長谷川昌弘・大阪工業大学教授、(元)飛島建設(株)技術研究所長)

参 考 文 献

- 1) 池田和彦・大島洋志：わかりやすい土木地質学入門(改訂8版), 土木工学社, 1997.
- 2) トンネル施工積算研究会：トンネルの施工と積算, 1998.
- 3) ジェオフロンテ研究会：割岩工法に関する技術資料, 1998.
- 4) 全国建設研修センター：土木施工管理技術研修テキスト(下巻), 1998.
- 5) 土木学会：トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説, 1996.
- 6) ジェオフロンテ研究会：アンブレラ工法に関する技術資料, 1996.
- 7) 桜井春輔・足立紀尚：都市トンネルにおける NATM, 鹿島出版会, 1998.
- 8) 中山範一・成田一男・北村考海・向山拡美：未固結地山中のトンネル周辺における地下水の挙動, 応用地質, 1985, 26巻, 2号.
- 9) 日本国有鉄道：NATM設計施工指針, 1983.
- 10) 土木学会関西支部都市トンネルのNATMの適用に関する委員会：都市トンネルへの NATM の適用に関する研究, 土木学会関西支部, 1996.



図-4 ヨーロッパ新幹線の新フランクフルト駅

り、見たりすることが可能となるというものである(発表者はJ. R. Madinaveitia)。この感覚はヨーロッパ新幹線の新フランクフルト駅の空間設計(図-4: 出典, Tunnel, 3/99, 2p., Deutsche Bahn AG Wants to realise Frankfurt 21)とも近似している。

西(日本)からは「地下空間利用による外部景観向上の貨幣価値、地下空間内部の快適性向上のために利用者はいくらまで負担する気持ちがあるか」というテーマで名古屋、京都、函館などの計測事例(CVM, Contingent Valuation Method)とその結果から「地下による都市景観向上効果=地下の有利性の新しい一面ではないか」という論文を拙い誠にお恥かしい英語で発表させて頂いた。司会者のJ. P. Godard(フランス, ITA 理事)からは、彼は前年までWG#14 地下の有利性部会の部会長をされていたということもあるかもしれないが、「このようなテーマを提起した Mr. Nishi の発表は大変興味を引くもので、今後 ITA メンバーももっと考えていくべきものの一つである」云々というコメントがあった。そして、発表終了後 TUST の D. Ahrens 編集長がきて、「そのうちこの論文をもとに寄稿してもらうからよろしく」といったので、少しうれしくなったが、ほかの発表者(名古屋大学: 清木先生など)にも声をかけていたので、職務上皆に声をかけているのか、とわかった次第である。



写真-7 オスロの地下鉄へのスロープ



写真-8 オスロの地下鉄構内のスロープ

ともあれ、ノルウェーをはじめ欧州はトンネルに力を入れていて、とにかく超長大トンネルを掘ろうとしているという印象を持って ITA 会議基調講演の聴講、現場見学をさせて頂いた。また道路の利便性は確保しながらも、再度新しく鉄道も重視するという、周辺環境への大変な配慮を感じたし、TBM 工法選択と近接工事・地質との関連にもいろいろと配慮しつつ、そして何よりも一般市民への情報開示の姿勢にも大変感心した。

オスロの地下鉄では、交通弱者用のスロープ、ベビーカー・自転車の車内持ち込みが新鮮で、ついシャッターを押していた(写真-7, 8)。

今回は現場視察中心だったので、ルート選定や予算獲得のあたりはよくわからなかったが、別な機会があれば是非勉強させて頂きたいと思った。

ともあれ、日本の1988年ごろの地価高騰とは少し違った環境・エネルギー問題からの真摯な取り組みからのトンネル案採用という側面が、相当あるように思われる。

最後に、WG#14 への参加もふくめて名古屋大学の清木隆文先生には大変お世話になりました。この場を借りて深く感謝致します。

(文責: 西 淳二・名古屋大学)

(土木工学社図書案内)

岩盤の計測と解析

工博 鈴木 光著

A5判 箱入 260ページ 本体価格4,200円 (〒380円)

最近では、有限要素法を利用し、地盤や構築物の変形や応力分布に関する予想解析が行われるようになりつつある。そのために入力などに信頼度の高い各種計測値が要求されるようになってきた。

このような理由から、建設工事では、従来にも増して計測や解析が重要となりつつある。

本書は、応用範囲も広く重要と思われる岩盤の計測と解析法の紹介と解説を試みた実務書である。

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(9)

第Ⅲ編 地質調査法(1)

「応用地質学」連載講座小委員会

1. 地形・地質調査一般

1-1 調査対象項目

トンネル工事は、地形・地質条件により大きく左右されるため、事前の綿密な調査により地形・地質状況を正確に把握しておくことは、工事を迅速かつ安全に進めるための要となる。

地形・地質調査は、トンネル工事の進捗段階に応じて、調査の精度・内容が概略のものから詳細なものあるいは個別のものへと順次移行して行くが、いずれの段階でも基本的には下記に挙げる項目がその対象となる。

(1) 地形

- ① 不安定地形(落石、崩壊、地すべり、土石流などの発生する可能性のある地形)
- ② 偏圧が作用する地形
- ③ 小さい土かぶりとなる地形

(2) 地質構造

- ① 地質分布(構成地質の区分、地層の成層状態、走向傾斜)
- ② 褶曲・断層(褶曲軸、断層、破碎帯の位置、走向傾斜、規模、性状など)

(3) 土質・岩質

- ① 堆積物、岩石の種類および名称
- ② 生成年代
- ③ 土相・岩相(粒度、鉱物組成およびその配列、空隙状態など)
- ④ 割れ目などの分離面(節理、亀裂などの不連続面の走向傾斜、開口状況、充填物の状況)
- ⑤ 風化、変質
- ⑥ 固結度

(4) 地表水および地下水

- ① 地下水位など(地下水の有無と位置、種類、水圧、温度、水質など)
- ② 帯水層、遮水層の判別
- ③ 工事影響範囲内の水利用状況など

(5) 物理・力学特性

- ① 地山の弾性波速度、変形係数、透水係数など
- ② 土の粒度組成、含水状態、透水係数など
- ③ 岩石の弾性波速度、圧縮強度、引張強度など

(6) 鉱物化学的性質

- ① 粘土鉱物(スメクタイトなどの膨張性粘土)
- ② スレーキング特性
- ③ 吸水・膨張率

(7) 地熱、温泉、ガス、地下資源など

- ① 位置、分布、湧出量(賦存量)など

また、第Ⅱ編の「1. 路線選定と地質条件」に示された留意すべき特殊地山条件や特殊立地条件については、その存在がトンネル工事の施工性を大きく左右し、場合によっては、ルート変更を余儀なくされる場合もあるので、地形・地質調査にあたっては、早い段階からこうした特殊な地質・立地条件を把握するよう努める必要がある。

1-2 地形・地質調査の方法

上記の調査項目や特殊条件を明らかにするための地形・地質調査の方法としては、表-1, 2 に示すものがある。これらの調査方法は、それぞれ長所、短所があるため、調査計画をたてる際には、調査がどの段階にあるか、何を目的とした調査かを考慮して最適な方法を選定する必要がある。これについては、連載の最後、第Ⅳ編において記述することとし、本稿では個々の調査法についてその概要を紹介することとする。

表-3 に各種調査法の方法、原理、長所、短所、適用範囲を整理して示す。

2. 既存資料調査

既存資料調査は、一般に地形・地質調査の初期段階(例えばルート選定段階)で行われるものであり、刊行された文献や既存の調査報告書、周辺地域での工事記録などを収集して、トンネルを含む広範囲な地域の地形・地質・水文状況などの概要を把握するものである。

表-1 地山条件, 調査項目と調査法の関係¹⁾

地山条件	調査項目																								
	地形		地質構造		岩質・土質				地下水		物理的性質		力学的性質		鉱物化学的性質		その他								
	地すべり・崩壊地	偏圧が作用する地形	土かぶり	地質分布	断層・褶曲	岩質・土質名	岩相	割れ目等分離面	風化・変質	固結度	帯水層	地下水位	透水性係数	弾性波速度	物理特性	強度特性	変形特性	粘土鉱物	スレーキング特性	吸水・膨張率	地温	有毒ガス	地下資源		
一般地山	硬岩・中硬岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	軟岩	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	土砂	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
特殊地山等	坑口周辺や谷部で地すべりや崩壊の可能性のある地山	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	小さな土かぶりの地山			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	断層破碎帯, 褶曲じょう乱帯	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	未固結地山			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	膨張性地山	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	山はねが予想される地山						○	○	○					○	○	○									
	高い地熱・温度・有害ガス・地下資源などがある地山				△	○	○	○	○	△	○	○		△	○	△	△	△		△	○	○	○	△	
高い水圧や大湧水の発生が予想される地山				○	○	○	○	○	△	○	○	○	○												
調査法	概査	資料調査	○	△	○	△	△	△																	
		空中写真判読	○	△		△	○		△	△													△		
		地表地質調査	○	○	○	○	○	○	△	△	○	○									△	△			
		弾性波探査	△			△	○		○	○	△			○											
		電気探査	△			△			△	△	○	○			△										
		ボーリング調査	○			○	○	○	○	○	○	○													
	精査	孔内試験・検層	標準貫入試験									○						△	△						
			孔内水平載荷試験																○						
			透水試験											○	○									○	
			速度検層				△	△			○	○	△												
電気検層						△		△		△	△	○	△	△	○	△									
ポアホールテレビ							△		○																
	室内試験												○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		

表中の記号：(地山条件)

(調査法)

(注)室内試験の詳細は表-2に示す。

○ 把握すべき

○ 有効

△ 場合によって把握すべき

△ 場合によって有効

表-2 主な室内試験項目と試験法¹⁾

試験項目	試験によって得られる物性値	地 山 条 件				目 的
		硬岩	軟岩	土 砂		
				粘土質	砂質	
単位体積重量試験	単位体積重量	△	○	○	○	
自然含水比	含水比		○	○	○	砂質地山切羽安定の目安
粒度試験	粒土分布			○	○	流砂の指標
土粒子の比重試験	土粒子の真比重			○	○	
コンシステンシー試験	液性・塑性限界, 塑性指数			△		
一軸圧縮試験	一軸圧縮強度, 静弾性係数, 静ポアソン比	○	○	○	○	地山強度比, 数値解析の参考資料
三軸圧縮試験	粘着力, 内部摩擦角		△	△	△	数値解析の参考資料
圧裂試験	引張強度	△	△			
点 載 荷 試 験		△	△			強度の簡易指標
透 水 試 験	透水係数				△	含水未固結層の湧水量や切羽安定の検討
超音波伝播速度試験	P波・S波速度, 動弾性係数, 動剛性率, 動ポアソン比	○	△			亀裂係数などの分類指標
スレーキング試験 (浸水崩壊度試験)	浸水崩壊度		○			膨張性の判定指標
陽イオン交換容量試験 (CEC)	モンモリロナイトなどの含有量の推定		△			
X 線 分 析	粘土鉱物の種類		△	△		

○: よく実施されるもの △: 場合によって実施されるもの

表-4 地形図²⁾

発行機関	種 類	縮 尺
建設省国土地理院	地形図	1/200,000, 1/50,000
		1/25,000, 1/10,000
建設省国土地理院	国土基本図	1/5,000
建設省国土地理院	土地条件図	1/25,000
林 野 庁	森林基本図	1/5,000
地方公共団体	自治体区域地形図	1/10,000

2-1 既存資料の種類

対象となる資料としては次のようなものがある。

① 地形資料

- ・地形図(国土地理院, 表-4 参照)
- ・空中写真(日本地図センター他, 表-5 参照)
- ・土地分類基本調査(1/50,000, 各都道府県)
- ・土地分類図(1/200,000, 国土庁)
- ・土地保全図(1/200,000, 国土庁)

② 地質資料

- ・地質図幅(地質調査所他, 表-6 参照)
- ・学術論文(学会誌, 大学研究紀要他)

③ 気象・水文資料

- ・気象月報(各地方気象台)
- ・雨量年表(日本河川協会)
- ・流量年表(日本河川協会)
- ・その他自治体・事業所などの観測データ

表-5 空中写真の縮図²⁾

撮影機関	撮影区域	撮影年	縮 尺	申し込み先
米 軍	日本全域	1946~ 1957	約 1/40,000	日本地図 センター
米 軍	鉄道沿線 主要平野部	1946~ 1957	約 1/10,000	日本地図 センター
林野庁および 都道府県林野	山地部	1952~	約 1/20,000	日本林業技術 協会 都道府県庁
国土地理院 (国土基本図)	日本全域	1956~	1/33,000 または 1/40,000	日本地図 センター
国土地理院 (国土基本図)	平野部	1960~	1/10,000 または 1/20,000	日本地図 センター
国土庁 (カラー) (国土情報整備課)	日本全域	1974~ 1978	1/8,000 1/10,000 1/15,000	日本地図 センター
宇宙開発 事業団 (衛星写真)	日本全域	1979~	1/1,000,000 ~1/200,000	日本リモート センシング 技術センター

④ 災害資料

- ・災害復旧工事資料
- ・砂防指定地, 地すべり指定地など, 法令による指定地関係資料

表-3 主要な地質調査法

調査法	方法・原理	長所	短所	適用
既存資料調査	既存資料を収集・整理して地形・地質・水文などの状況を概略把握する。	現地へ行くことなく、地形・地質・水文などの状況を把握できる。	一般に図面類の精度が低く、地域により資料がない場合がある。	路線選定段階で回避すべき地形・地質・水文の概要、問題点を把握し、その後の調査計画立案のための資料とする。
空中写真判読	空中写真の実体観により、不安定地形、表層地質、地質構造の判読を行う。	広域に同一精度で調査が可能。写真は全国整備されており、立入りの困難な地域でも調査可能。	調査者の能力、経験が成果を左右する。誤った判読をする可能性があり、現地確認が必要。	既存資料調査と併用することで、より詳細な成果となる。とくに地すべりなどの不安定地形、断層破砕帯などの地質構造把握に有効。
リモートセンシング	地表面から放射・放射してくる電磁波を人工衛星など離れたところから間接的に測定し、地盤特性にもとづき選定される特定の波長による画像解析を行い、地形・地質・水文などの状況を把握する。	広域に同一精度で定量的な調査が可能。立入りの困難な地域でも調査可能。	特定の電磁波を選択しての解析があり、解析できる地形・地質・水文状況は限定される。	トンネルの地質調査での適用例は少ないが、赤外線センサーによる地熱調査が有効。その他、崩壊地などの災害調査によく用いられる。
地質踏査	地形図、クリノメーター、ハンマーなどを携行して現地へ行き、地形・露頭・転石を観察して、ルートマップを作成し、これをもとに地質図を作成する。	計測器を必要とせず、広範囲の地質の概要を把握できる。	調査者の能力・経験が大きき左右する。成果は解釈図であり、その後の調査で検証する必要あり。	地形・地質調査の基本。トンネル工事の各段階で実施し、目的に応じて調査精度・重点項目を設定することにより、よりよい成果が得られる。
重力探査	岩石によって密度が異なることを利用して地下の密度、すなわち重力を測定して地質構造を判定する。	地下深部の大構造を把握するのに有効。	細かな地質構造は把握できない。	主としてルート選定の段階の広域調査に適するが、実施例はあまりない。
磁気探査	岩石が持っている残留磁気を測定して、地質の分布、特に強磁性岩の存在を判定する。	同上	同上	同上
物理探査	屈折波法	地表または、地表付近で発生した弾性波が地層間で屈折して伝播する状況を、地表に設置した受振器で観測し、解析して地山の速度構造を把握する。	低速度挟在層の有無や断層などの傾斜は把握できない。また、市街地、集落では火薬が使用できない。	山岳トンネルでは必ず実施される。風化層、表土厚、断層破砕帯の位置・規模、岩盤の性状などが明らかにできる。速度値は地山評価の指標の一つで、重要な設計条件となる。
	平均速度法	2点間の伝播速度を平均速度とし、岩盤内に測線を扇状に配置して速度分布を求めめる。	屈折法では受振点設置のための調査坑が必要。2点間での地質の変化はわからない。	ダムサイトの岩盤内部の性状、地盤強度を求めためなどに有効。局所的な問題解決の方法として採用される。
	直接波法	ボーリング孔間で速度を測定し、解折を行って岩盤中の直接波の伝播速度を求めめる。	測定用ボーリング孔を設置する必要がある。解析は高度な技術を要する。調査費が高い。	平均速度法と同様であるが、二次元的な速度分布が把握できる点でより有効な手法。弾性波トモグラフィも同探査法の一つ。
波探査	反射法	地表で弾性波が発生させ、地下の地層の境界からの反射波を地表で受振して、地質構造を把握する。	堆積岩などの成層した地層の連続性を深部まで把握できる。	トンネルの地質調査での適用例は少ないが、都市トンネルなどの平地部の地質構造把握に適用される。
	VSP	地表で弾性波が発生させ、地下の地層境界からの反射波をボーリング孔内の複数深度に設置した受振器で振し、ボーリング孔沿いおよびその延長の地質構造を把握する。	地中に受振器があるためノイズや多重反射が少なく、放射法に比べて良質なデータが取得できる。	石油資源開発などの深部調査に適用される例が多く、トンネル調査への利用は少ない。

HSP	原理はVSPと同じだが、トンネルなどの水平坑に起振点・受振点を配置し、主に切羽前方の地質構造を把握する。	同上	受振点1点につき3成分以上の受振器が必要で、解析は高度な技術を必要とする。	トンネル切羽前方探査(とくに断層破砕帯や地層境界の位置把握)に利用される。		
			自然電位異常発生メカニズムが明らかでないため、異常のみから地質の状態の推定は困難である。	主として硫化金属鉱床、鉱化帯の探査に用い、土木の分野では、あまり実施の意義はない。		
電	大地を構成する岩石の比抵抗は、岩石の種類、間隙水などにより固有の値を示す。地面に電極を設け、電流を流して電位差を測定することにより、地盤の比抵抗値を測定し、構成地質・地下状況などを把握する。	操作が簡単。解析が容易であり、断層など高角度の地質構造の位置を把握するのに有効。	電位電極と電流電極の間隔を一定にして各測点で測定を行い、比抵抗値の水平分布を求め、1か所にて電極間隔を変えて一連の測定を行うことにより、垂直方向の比抵抗分布を求め、測線沿いに等間隔に電極を配置し、電位電極と電流電極を自動的に切替えて測定し、二次元断面上の比抵抗分布を求め、地盤の比抵抗値を測定し、構成地質・地下状況などを把握する。	断層の位置、幅、岩相の境界などの調査に用いるが、精度が低い。二次元探査法の発達により、最近ではあまり利用されない。		
			電磁探査	探査深度を深くするほど電極間隔が大きくなり、精度も低くなる。高角度の地質構造把握には不適。	水平構造をなす帯水層調査には利用されるが、最近では二次元探査法の発達により、トンネル調査での利用は少ない。	
			電磁探査	断面上での比抵抗分布が把握でき、電極間隔を密にするほど精度が高くなる。	水平探査・垂直探査に比べて、高精度な解析技術を要する。	解析技術の進展により、トンネル沿いの地質調査にも利用されるようになり、弾性波探査ではわからない深部の地質構造把握や、変質帯などの特殊地山の分布把握に適用される。
			電磁探査	複数の探査法があり、探査深度に応じて最適な方法を選定できる。画像により埋設物の特定も可能。	同じ比抵抗値を求めると電気探査に比べて精度が低い。高精度な解析技術が必要で、調査費が高い。	資源探査に使用されるが、浅部探査が可能となり土木地質へ適用されるようになった。空中電磁法により迅速な広域探査が可能。
地中レー	電磁探査の一つ。地下に電磁波(VHF)パルスを放射し、地層境界や埋設物などからの反射波を受信し、移動しながら連続的に測定することにより、地下の断面構造を把握する。	携帯用カウンタによる場合は操作が非常に簡単、航空機を使用すれば広域探査が短時間でできる。水底下の地質構造を連続的に把握できる。弾性波より分解能が高く精密な調査ができる。	探査深度が浅く(一般に3~4m程度まで)、地下水が塩水化している場合には探査できない。	表層部の探査であり、埋設物や地下空洞の探査に適用される。トンネル調査では覆工背面の空洞探査など維持管理調査に実績が多い。		
			表土による減衰が大きく、表面状態により値が変化する。成果は相対的な強弱で評価され、定性的。	資源探査が主体。操作が簡単なため、地質調査の補助手段として、断層や岩相境界の位置確認のために用いられる場合が多い。		
放	岩石や鉱物中の放射性同位元素から放射されるγ線をシンチレーションカウンタにより検出し、放射線強度などを測定して構成地質の分布や地質構造を把握する。	地質状況、湧水状況などを大断面で観察できる。	スパーカーなどによって水面下で音波を発生させ、水底や水底下の地層境界から反射してくる音波を受信して、地質構造を把握する。	海底トンネルの路線調査に有効。ドレッジや海上ボーリング、弾性波探査と併用して、水底下の地質を詳細に把握する。		
			現場で実際に調査トンネルや立坑などを施工し、地質の観察を行う。	主として設計、施工計画段階が必要により行う。施工中にも地質の状況が変化し、施工法に疑問が生じた際に実施することもある。		
音	音波探査	ボーリングマシンを用いてできるだけ破壊しないようにコアを採取し、そのコアの観察、物理試験より、層序、岩質(地質学的、力学的)を明らかにする。	トンネル工事が必要となり、調査費が非常に高い。	地質調査により把握した地質構造・地下水状態を確認するために用いられる。水平長尺ボーリングはとくに有効。		
			ボーリングマシンのコアとして実際の地中の岩石が確認できる。ボーリング孔を利用して各種試験・検層ができる。	地質調査により把握した地質構造・地下水状態を確認するために用いられる。水平長尺ボーリングはとくに有効。		

リング	岩盤ボーリングと同じだが、未固結層を対象とする。標準貫入試験を併用してN値を測定し、不規則試験での土質試験を行い、地盤の強度、支持力を調べる。	コアとして実際の地層が確認できる。N値や土質試験により力学的性質が明らかになる。	コアとして実際の地層が確認できる。N値や土質試験により力学的性質が明らかになる。	隣層の場合、コアの状態、各種試験の結果、地盤の状態が他の土質に比べて定量的につかめない。	隣層の場合、コアの状態、各種試験の結果、地盤の状態が他の土質に比べて定量的につかめない。
電気検層	検層とは、地層の性質を深度に関して記録する調査の総称であるが、主としてボーリング孔を用いてこれを行う。また、この成果から、ボーリング柱状図を対比して各層の物理的性質を明らかにする。	電位電極と電流電極を孔内に挿入し、自然電位と比抵抗を測定する。	測定が容易。連続的な測定ができる。帯水層の評価が可能。	ケーシング挿入区間では測定不能。ケーシング挿入区間では測定不能。	水平に成層した堆積物の地層対比、帯水層区分などに有効。
速度検層	地表(孔内)で起振した弾性波を孔内に設置した受振器で測定し、岩盤中の弾性波速度値を求める。	鉛直方向の速度変化が把握でき、低速狭帯層の抽出が可能。弾性波探査より解析が容易。	鉛直方向の速度変化が把握でき、低速狭帯層の抽出が可能。弾性波探査より解析が容易。	放射線物質の取り扱いが面倒。ボーリング孔の状況にあわせてキャリブレーションが必要。	速度による岩相の境界の区分、割れ目、固結度、風化、変質の程度の推定に利用される。
放射線検層	線源と検出器を孔内に降ろし、放射されたγ線などが地中で減衰する程度を測定する。	γ線では密度測定、中性子線では含水量が測定可能。ケーシングがあっても測定可能。	γ線では密度測定、中性子線では含水量が測定可能。ケーシングがあっても測定可能。	多孔質岩石の区分に有効だが、トンネル調査では、最近適用事例が少ない。	多孔質岩石の区分に有効だが、トンネル調査では、最近適用事例が少ない。
温度検層	熱電対を用いたサーミスタにより、孔内水温を測定する。	測定が容易。連続的な測定ができる。	測定が容易。連続的な測定ができる。	湧水地点、温泉湧出地点など、地下水流動の把握に適用。地熱分布の測定にも有効。	湧水地点、温泉湧出地点など、地下水流動の把握に適用。地熱分布の測定にも有効。
孔径検層	ゾンデに装着されたアームの開閉により、孔径を測定する。	測定が容易。連続的な測定ができる。	測定が容易。連続的な測定ができる。	ケーシング挿入区間、孔壁処理箇所については測定できない。	ケーシング挿入区間、孔壁処理箇所については測定できない。
ボアホールテレビ	孔内にテレビカメラを入れ、遠隔操作で孔壁の状態を観察する。	実際の割れ目の開口状況、走向傾斜を直接測定できる。	実際の割れ目の開口状況、走向傾斜を直接測定できる。	孔内水が濁っている場合は測定できない。	断層や割れ目などの性状や発達方向を確認するのに適用される。
孔内水平載荷試験	孔壁面を加圧し、そのときの孔壁面の変形量を測定して、地盤の変形特性を明らかにする。	測定は比較容易。地山のK値や変形係数、降伏強度などの変形特性が求められる。	測定は比較容易。地山のK値や変形係数、降伏強度などの変形特性が求められる。	値が孔壁状況に左右され、複数点での試験が必要。掘削後時間をおくと値が低下する可能性あり。	低圧用と高圧用がある。地盤状況に応じて機種を選定する。
現場透水試験	孔内への注水または地下水の揚水を一定時間行い、その後の水位変化を測定し、透水係数を求める。	測定が容易。地質・地下水状況に応じて測定方法が選定できる。地下水位のない区間でも測定可能。	測定が容易。地質・地下水状況に応じて測定方法が選定できる。地下水位のない区間でも測定可能。	泥水掘削ボーリングでは測定値の信頼性が落ちる。	主に土砂地盤に適用される(ピエゾメーター法、オーガー法など)。岩盤ではルジオンテスタが適用される。
J F T	試験区間を外部と遮断し、水圧測定器を設置して水位上昇速度を測定し、地盤の透水性を把握する。	測定が容易。測定日による湧水・透水係数所が特定できる。	測定が容易。	掘進中に並行して行わないと、1か所ごとの湧水量が測定できない。割れ目湧水の場合には不適。	トンネルの地質調査での透水性把握にもっともよく用いられるが、現場透水試験や揚水試験を併用することが望ましい。
孔内微流速測定	孔内に流速計を挿入し、孔内全長の地下水の流速変化を自然状態と、注水(揚水)状態で測定する。	測定が容易。割れ目による湧水・透水係数所が特定できる。	測定が容易。割れ目による湧水・透水係数所が特定できる。	泥水掘削ボーリングでは測定値の信頼性が落ちる。	トレーサなどを使用して、地下水の流向・流速を直接測定する方法もある。
揚水試験	揚水井と観測井を設置し、揚水井で長時間一定量の水を行って、そのときの周辺地盤の水位変化を測定することにより、地盤の水力特性を把握する。	透水係数だけでなく、貯留係数・透水量係数がわかり、湧水量の算定が可能となる。	透水係数だけでなく、貯留係数・透水量係数がわかり、湧水量の算定が可能となる。	大孔径の井戸掘削が必要となり、調査費が高い。	大量の湧水が予想される帯水層の水力特性把握に適する。
室内試験	ボーリングなどで採取した岩石または土質試験料を室内に持ち込み、物理・力学特性を把握するための各種試験を行う。	土や岩石の物理・力学定数を安価で測定できる。	土や岩石の物理・力学定数を安価で測定できる。	試験結果にバラツキができる場合が多く、複数試験料による試験が必要。	試験結果は、地山分類や地山の工学的評価指標として利用される。

表-6 各種の地質図²⁾

発行機関	名称	縮尺
工業技術院地質調査所	地質図幅	1/5万
工業技術院地質調査所	地質図幅	1/7.5万, 1/20万, 1/50万
工業技術院地質調査所	水理地質図	1/5万, 1/10万
工業技術院地質調査所	日本炭田図	1/1万, 1/2.5万, 1/5万
工業技術院地質調査所	日本油・ガス田図	1/2.5万, 1/5万
工業技術院地質調査所	構造図	1/5万, 1/10万, 1/20万, 1/50万
北海道地下資源調査所	地質図	1/5万, 1/20万, 1/50万, 1/200万
都道府県	地質図	1/20万など
国土地理院	土地利用図	1/2.5万
国土庁	土地分類図	1/50万
国土開発技術研究センター	土地地質図	1/20万 (近畿, 中国, 九州)

⑤ 工事資料

・対象路線付近の施工記録など

⑥ 土地利用資料

・天然記念物・国立公園・遺跡・文化財など

2-2 資料のとりまとめ

収集した資料は、各調査項目ごとに整理する必要がある。整理するうえでの着眼点としては、表-7に示すものがある。さらに、トンネル工事で問題となる特殊地山条件や特殊立地条件の有無、位置、性状などを把握し、トンネルの施工性を検討するための資料とする。また、今後の調査計画を立案するための資料として活用する。

表-7 既存資料による調査項目と着眼点²⁾

資料	調査事項	着眼点
地形	崖錐、地すべり、崩壊地などの分布、形状、規模および河川、溪谷の浸食形状など。	斜面形状、標高差、等高線の形状、谷密度、傾斜変換線など。
地質	地質・岩質の種類、地質系統、分布、地質構造など。	断層の位置、方向、規模、地層の走向、傾斜など。
気象	各観測事項別地域特性の有無。	路線凍結、霧の発生、吹きだまりやなだれの発生など。
災害	災害地分布、頻度、規模など。	斜面崩壊跡、湧水地点など地形図に示されたものとの対比。
環境	対象物件の路線に対する位置関係や環境条件、土地利用その他の制約条件。	貴重な自然、遺跡、文化財、付近の民家、既存構造物など。
工事	地山条件、工法選択の理由など。	施工方法、土圧、湧水、環境等類似条件。工事中の工法変更の有無、特殊な工法の採用など。

とくに地質踏査によって地質・地下水の概要を把握することが難しい市街地・平地・台地下に計画されるトンネルの場合には、ボーリングや井戸の掘削記録、周辺での工事記録などの既存資料の調査がとくに重要である。

3. 空中写真判読

3-1 空中写真判読の概要

空中写真判読は、位置を変えて撮影された2枚の空中写真(2/3程度は重なっている)を実体鏡(図-1)などを用いて、地形の起伏、植生の変化、土地利用状況などを観察し(図-2)、地形・地質状況を把握しようとするものである。第I編第7章でトンネル工事における地形との関わりの大切さを述べたが、空中写真判読はもっとも大局的に地形を観察できる手法ともいえる。

空中写真判読は、主に地形・地質調査の初期段階に、既存資料調査や地質踏査と併せて、必ずといってよいほど実施される。このことは、空中写真判読が既存資料調査や地質踏査にはない次のような利点を持っているからである。

- ① 使用する写真が、ほぼ同一時刻に同一縮尺で広範

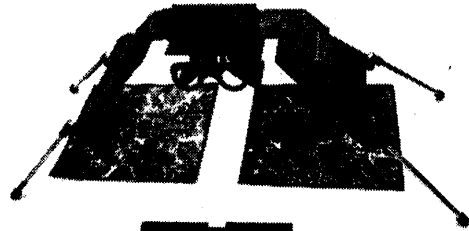


図-1 實體鏡

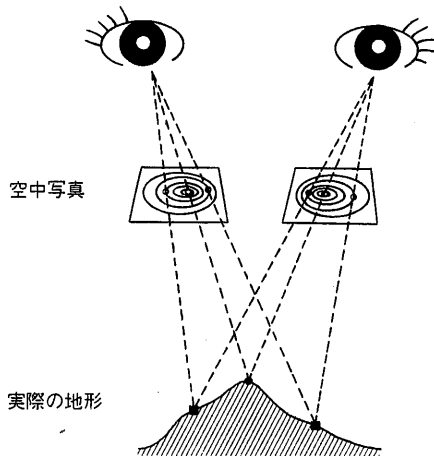


図-2 実体視の原理²⁾

囲に撮影されているために、判読はほぼ同一の精度で広範囲に行うことができる。

- ② 現地に入ることも難しいような急峻山地や災害現場でも、空中写真があれば判読できる。
- ③ 現地に入ることもなく、くり返し判読することができる。

3-2 主な判読項目

空中写真判読により抽出されるものには、次のようなものがある。

3-2-1 地形面区分

空中写真は撮影基線長(隣り合う写真の中心点間隔のこと。人間の左右の眼の間隔に相当)が長い為、それを実体視すると地形の起伏が実際より数倍に誇張されて見えるため、微妙な地形面の変化が明瞭に把握される。山地、丘陵地、扇状地、段丘面、沖積面などの地形区分はもちろんのこと、それぞれの地形面の微地形、例えば旧河道や自然堤防なども把握できる。地形面は、一般に河川や海水準変動による浸食や堆積作用の結果形成されたもので、地形面にはそれぞれ特有の堆積物が分布している場合が多い。したがって、判読によって地形面を区分することにより、その地点の地質や地下水などの分布状況が推定でき、とくに構造物基礎地盤としての適性や、小さな土かぶりトンネルでの施工性を評価するうえで有効な資料となる。図-3に判読の事例を示す。

3-2-2 不安定地形

崩壊や地すべりなどの斜面災害の発生する箇所あるいは

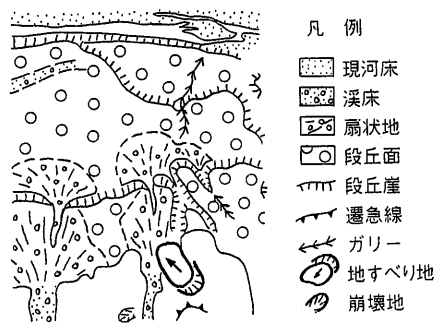


図-3 地形図の判読例

は可能性のある箇所を抽出するものである。斜面災害には一般に次のようなものがある。

(落石、崩壊、岩盤崩壊、地すべり、土石流)

これらは、いずれも斜面表層部の問題であり、トンネル工事では坑口や小さな土かぶりの斜面が主な対象となる。トンネルが不安定地形下にあると、施工段階だけでなく維持管理段階においても安全管理上問題が生じるため、路線選定段階などの早い段階で抽出し、極力避ける方向で検討することが望まれる。

具体的な判読項目としては下記の(1)~(8)などが挙げられるが、これらの分布状況から斜面災害の種類や発生形態を想定し、問題点を明らかにする必要がある。図-4に判読の事例を示す。

(1) 崩壊地

馬蹄形の急崖が発達し、下方斜面は裸地となって崩壊土砂が堆積しており、容易に判読できる。崩壊して間もない地形であり、豪雨などにより崩壊が周辺に拡大する可能性がある。

(2) 崩壊跡地

崩壊地と同様の形態を示すが、崩壊した後時間が経過しているために植生が復旧し、現状では一応安定しているもの。ただし、もともと不安定な斜面であったために崩壊したわけであり、今後周辺で新たな崩壊が発生する可能性がある。

(3) 地すべり地

馬蹄形の急崖(滑落崖)に囲まれた緩斜面で、斜面上部

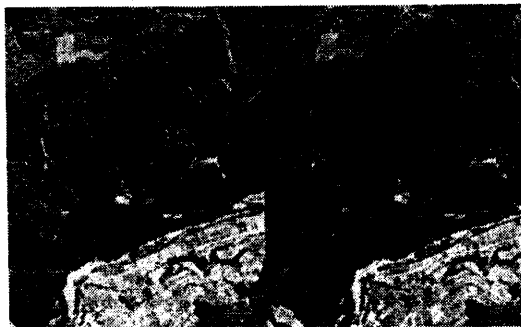


図-4 不安定地形の判読例

には溝状の陥没地や池が、下部には小丘や舌状の押し出しなど地すべり特有の微地形が発達する。また、地すべり地は土地が肥沃なため、水田などの耕作地に使用されていたり、竹林になっていたりする場合が多い、こうした土地利用状況も判読するうえで有力な手がかりとなる。

このように判読できる地すべり地は過去に活動して形成されたものであるが、一度活動した地すべりは再活動する可能性が高く、過去の地すべりとはいえ可能性のあるものは極力抽出しておく必要がある。なお、地すべりの中には、初生的な地すべりも存在するが、これについては地すべり地形として抽出することは難しい。地すべり発生の兆候となりうるクラック地形の存在や、地質踏査などによる流れ盤構造や断層破砕帯などの把握を行って、総合的に判断する必要がある。

(4) 崖 錐

斜面上部から供給された土砂や落石が堆積した斜面で、急斜面の山腹に広がる平滑な緩斜面を形成する。斜面勾配は一般に斜面下方ほど緩くなっている。厚い土砂がルーズな状態で堆積している場合が多く、崩壊や土石流の発生源となる可能性がある。また、こういった斜面には転石が多く、落石の発生する危険性もある。とくに厚い崖錐が坑口付近にある場合には、坑門工基礎地盤の支持力の問題や掘削に伴う初生地すべりの誘発などの問題もある。

(5) 遷急線

遷急線は、判読のうえでは斜面の上方から下方に向かって傾斜が不連続に急になる点を連ねた線として抽出される。成因からみると、河川・溪流の下刻作用により山腹斜面の浸食が進むが、時間の経過とともに浸食領域が徐々に斜面上部へ広がって行くときの最前線と言うことができ、別名「浸食前線」とも呼ばれる。したがって、山腹斜面の中では相対的に地盤の不安定なところであり、崩壊も発生しやすい。上述した崩壊地や崩壊跡地が遷急線沿いに集中する場合も多く、今後崩壊の発生する可能性の高い斜面とみなすことができる。ただし、遷急線すべてにそのような評価ができるわけではなく、遷急線の明瞭さや連続性、崩壊地など他の不安定地形の存在を考慮して評価する必要がある。

(6) クラック地形

斜面中上部に見られる馬蹄形の線状模様で、谷筋の湾曲、溝状凹地の連続、小規模な段差などが線状模様として認められる場合には、初生的な地すべりや崩壊の前兆現象の可能性があり要注意である。

(7) 露岩地・壁岩

露岩地や壁岩は当然植生がなく、あっても貧弱な植生であり、判読では比較的容易に抽出できる。ただし、壁岩については樹林に覆われてしまう場合もあり、その場

合には樹冠部の段差などから推定することもできる。

露岩地や壁岩は落石や岩盤崩壊の発生源であり、注意を要する。ただし落石や岩盤崩壊の規模の判断は難しく現地にて確認する必要がある。ただし1/1,000程度以上の大縮尺の空中写真を使用すれば把握できる場合もある。

(8) ガリー

一時的な表流水によって地表面が洗掘されたもので、直線的で小規模な溝状の地形を示す。豪雨時の表流水の流路であり、水だけでなく、土砂も併せて流出する可能性もある。また、植生がないことから落石の経路ともなりやすい。崖錐斜面や地すべり地内で認められる場合には、表層の脆弱さを示す指標ともなる。

3-2-3 基盤地質

現在の地形は、岩石や地層の堆積(生成)・風化・浸食の結果として表れたものであり、地形のパターンを詳細に判読することにより、基盤地質の分布を把握することが可能である。しかし、日本国内は湿潤温暖気候にあり、植生の発達著しいため、空中写真では地形面の細かいパターンを判読することが難しく、必ずしも十分な判読ができないのが実状である。なお、リモートセンシングの一つである合成開口レーダーを使用すれば、植生や表土の影響を受けにくい画像を得ることができるため、基盤地質の判読が通常空中写真より行いやすくなる。

一般に基盤地質の判読では、次のような項目に重点を置き、同一の地形パターンの分布状況からの基盤地質の分布を把握するのがよい。

- ① 水系および山稜の分布、形、方向性
- ② 起伏量と谷密度
- ③ 色調ときめ細かさ
- ④ 植生

ただし、異なる地形パターンとの境界は必ずしも明瞭なものではなく、既存資料調査などの成果も併せて分布範囲を明らかにしていくことが必要である。図-5に判読の事例を示す。

3-2-4 断層および活断層

空中写真判読では、断層はリニアメントとして判読される。リニアメントは、地形、土壌の色調、植生、水系模様の急変などから判読される線状模様を指しており、すべてが断層に対応しているわけではない。表-8および図-6に示すような断層特有の地形の有無により、断層かどうかの判断を行う必要がある。図-7に判読の事例を示す。

活断層は、通常の断層が持つ地質的問題点に加えて、今後変位する可能性があるという問題をかかえており、トンネルに限らず構造物建設にあたってはとくに注意を要する。活断層の判読では、表-8に示した特徴のうち、

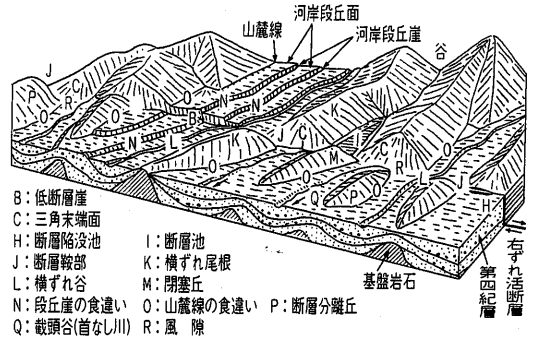
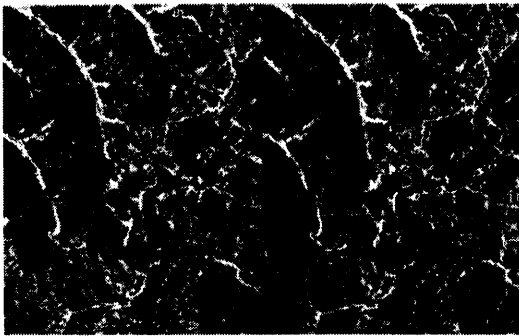


図-6 水平ずれ断層の活動がつくる地形³⁾

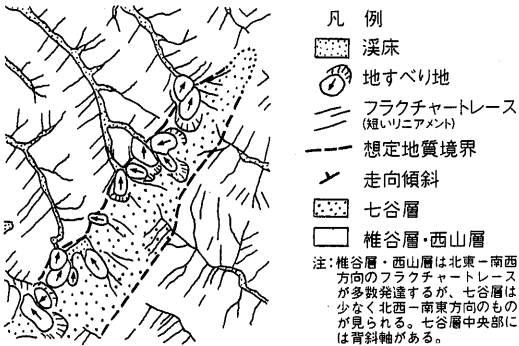


図-5 基盤地質の判読例

表-8 断層の存在を示す写真上の特徴例⁴⁾

空中写真上の特徴	
地形要素	①断層崖の存在/②直線的な谷(断層谷)の存在/③ケルンコル(断層鞍部)・ケルンバット(断層突起)の存在/④特定方向に平行する地形の存在/⑤稜線や川の流路にずれがある場合/⑥山腹斜面の傾斜変換点が直線的に連続する場合/⑦河川の流路がいちじろしく直線状を示す場合/⑧水系が格子状または直線状を示す場合/⑨地形的急変部/⑩水系異常/⑪湖沼・温泉・火口・湧水地点・崩壊・地すべりなどが一直線に配列している場合/⑫扇状地ずれ(断層扇状地)がある場合/⑬河成段丘面(一般には平坦面)が直線的境界をもって落差もしくは水平ずれを生じている場合
植生の特徴	①周囲に比べて植生に成長差が認められ、しかもそれが直線的な場合/②樹生種(樹種)・樹高が直線的に変化する場合/③樹生の分布そのものが直線的な場合
写真の階調	①土壌に覆われた部分で写真の階調・色調の変化が長く、線状に表れる場合/②ある直線境界をもって写真の階調・色調がかわっている場合

断層に沿った変位が認められる地形(断層変位地形)が連続的に分布するかどうか、それぞれの地形が同一方向の変位を示しているかどうかを注意深く判読する必要がある。断層変位地形としては、次のようなものがあげられる。

- ① 断層を横断する稜線や河川の流路が同一方向にずれている。
- ② 断層の両側で、同一時代に形成されたとみなされ

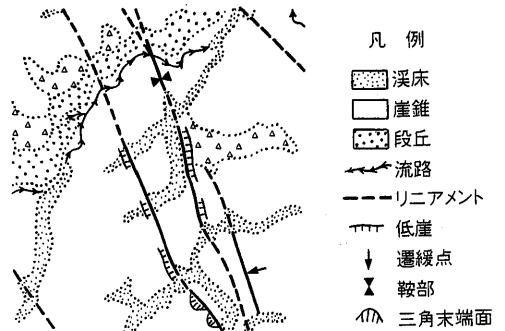
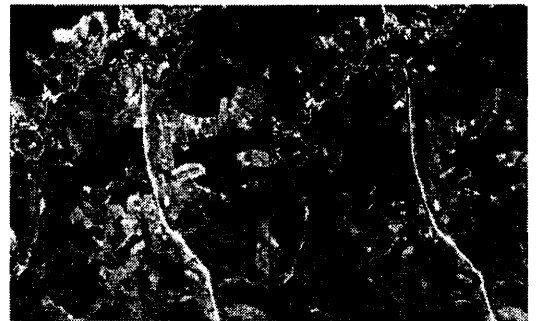


図-7 断層(リニアメント)の判読例

る地形面に高度差がある。

- ③ 断層沿いに截頭谷*(首無谷)や風隙**などの異常な河川形態がある。

3-3 判読結果の利用

空中写真判読では、上述のような地形・地質項目の把握が可能であるが、これ以外にも土地利用状況や植生分布など判読できる項目は数多くある。

* : 断層運動によって谷の下流側地盤が横ずれによって移動するか、相対的に隆起すると、その谷は断層線のところで切断され、かつての上流部から分離されることがある。このように上流部を失った谷の全体を截頭谷(beheaded valley)という³⁾。

** : 截頭谷のうち下流側の隆起により谷地形を残したまま分水界を形成するものを風隙(wind gap)という。

成果は、それぞれの判読項目を記号化して地形図に表記して、「空中写真判読結果図」としてとりまとめる。また、既存資料調査や地質踏査の結果と併せて「地質平面図」としてとりまとめられることもある。なお、空中写真判読によって得られる情報は膨大な種類があり、それらをすべて図面に表記することは難しい。調査の目的に応じて判読項目を選定することによって利用しやすい成果図とする必要がある。

空中写真判読は主に概査段階で採用されるが、資料調査や地質踏査結果と併せて実施し、調査の進捗に合わせてくり返し判読を行うことによって、誤った判読をなくすとともに、より精度の高い成果とするように努める必要がある。

概査段階では、主に小縮尺の空中写真を利用して地域全体の概要を把握するが、坑口斜面の調査などでは、大縮尺の写真を用いて判読することにより、表層地質や不安定地形の分布を正確に把握することができる。とくに地すべり調査においては、地すべりブロックの範囲やブロック内の微地形を正確に把握することが可能であり、精査段階でも活用することが必要である。

3-4 リモートセンシング

空中写真判読に関連して近年、地形・地質調査にリモートセンシング技術が活用されるようになってきている。リモートセンシングは、ある対象物に関する情報を遠隔から探査する方法である。空中写真判読や物理探査もこれに含まれるが、一般には地表面から反射・放射してくる電磁波を離れたところから間接的に測定し、地盤特性にもとづき選定される特定の波長による画像解析を行い、

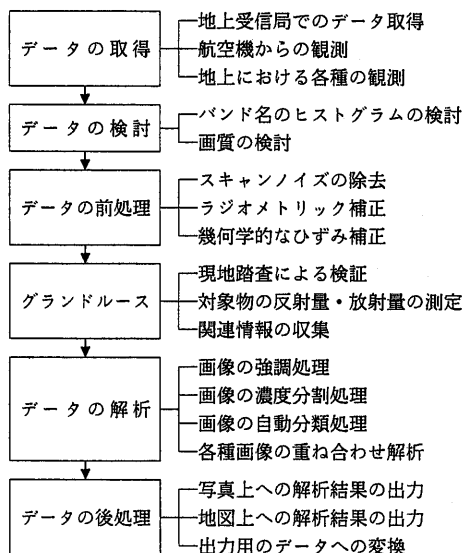


図-8 反射・放射特性によるスペクトル解析にもとづく方法の流れ⁹⁾

表-9 代表的な計測項目とセンサー⁹⁾

計測項目	センサー	計測手法あるいは原理
水 温 地 熱 地表面温度	熱赤外線映像装置 ・遠赤外線ビデオカメラ ・航空機マルチスキャナ ・LANDSAT/TMバンド6	・絶対温度以上のすべての物体はその温度に対応する赤外線を放射している。 ・火山活動のモニター、湧水箇所の把握、地熱分布の把握
	近赤外線センサー ・分光反射計 ・フィルム、ビデオ	・近赤外線が水分により吸収される特性 ・地表面が無植生であることが必要
土壌含水量	合成開口レーダ(SAR)	・物体ごとの誘導率の差異にもとづくCバンド(4~8GHz)のマイクロ波が有効
	γ線計測計 空中電磁探査	・地中の放射性元素の分布にもとづく ・地下の煤質の比抵抗値の差異を抽出
地下水脈・ 温泉の検知	写真、ビデオカメラ	亀裂間隔、密度、長さ、節理の走向傾斜
	写真、ビデオカメラ	岩盤の亀裂や色調の計測値を画像処理により抽出し、岩盤等級と対応づける
岩 相	イメージング・スペクトロメータ	可視~短波長赤外線までの波長を多段階(64~256階調)に細分して計測し、反射・吸収特性を比較、地表面に植生がある場合は不適
断層・破砕 帯の検知	空中電磁探査 γ線	・地下水脈、温泉の場合と同様
	合成開口レーダ 空中写真 マルチスキャナ	・リニアメントの地質的解釈にもとづく、資源探査、防災調査などへの利用
地盤の変位	G P S	定点観測の実施
	写真計測	空中写真計測(地すべりのブロックの変位など)
堆積の変位	合成開口レーダ	レーダ・ホログラフィ(インターフェロメトリ)を利用した三次元座標の計測と時系列比較(溶岩ドームの成長監視)
	写真計測	地盤の変位と同様
植物活力の 変 位	マルチスキャナ	可視光領域と近赤外領域とのデータの比により、植物活力の差異を把握 ・活火山による降下火山灰の分布 ・地すべり、崩壊の挙動のモニタリング

地形・地質・水文などの状況を把握するものとされる。調査・解析の手順はおおむね図-8に示すとおりである。測定は通常航空機や人工衛星を使って行われるが、地上での測定も行われる。使用されるセンサーとしては、表-9に示すようなものがあり、調査項目に合わせてセンサーを選定する必要がある。

トンネルの地質調査では、一般に数km程度の範囲が対象となるため、人工衛星による測定は対象範囲が広くしかも精度が粗いため、あまり適用された事例はない。これに対し、航空機や地上での測定は近年活用されるようになってきている。とくに熱赤外線映像による解析技術はトンネル調査に有効な手法で、航空機による広域測定では、地熱地帯での高熱隧道の予測に利用されている。また、地上測定では、トンネル覆工の老朽度の把握や、トンネル切羽面の温度測定により前方の地下水分布状況を把握する手法も開発されている。

4. 地質踏査

4-1 地質踏査の概要

地質踏査は、地質調査の基本をなすものである。踏査に際しては、既存資料調査や空中写真判読などの結果を併用して、できるだけ正確な成果を得なければならない。地質踏査は主として露頭の観察によって地質資料を得る方法であるが、連続する露頭が分布することはあまりなく、調査地に点在する露頭のデータから全体を予測することになり、露頭の少ない地域ほど調査の精度が落ちることになる。そのため、地質構造を明らかにするうえでとくに重要な地層境界や断層破碎帯などが想定される地点では、必要に応じて剝土、つば掘りなどの人工露頭を造り、直接確認することが望まれる。また、斜面に点在する転石の岩質を確認することも重要である。転石は斜面上から移動してきたものであり、少なくともその地点より上に分布する地質の露頭と同じである。とくに稜線部にある転石は現位置の露頭に近いものと考えてよい。

地質踏査にあたっては、地質露頭のほかに地形、湧水、表流水についても併せて確認する必要がある。地形の調査は坑口付近の斜面の調査ではとくに重要であり、前述した空中写真判読結果を参考にして、崖錐などの表層堆積物の分布状況、地すべり地や崩壊地などの不安定地形の分布や安定性を把握する必要がある。また、湧水や表流水の状況も重要な調査項目である。湧水地点、河川・溪流の表流水の増減状況などから、帯水層となる地層の評価や裂か水を伴う断層破碎帯の位置を把握するなど、水理地質構造を検討することができる。

4-2 地質図の作成

踏査のまとめは、図-9に示すルートマップを作成し

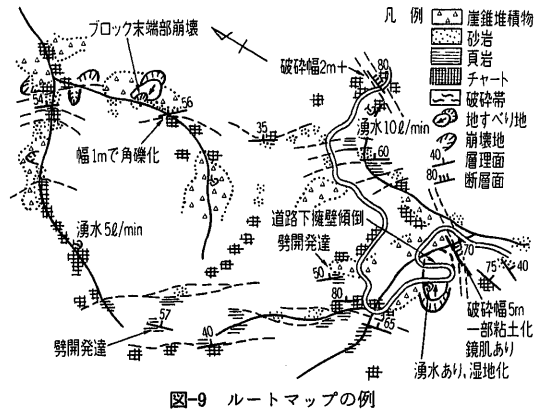


図-9 ルートマップの例

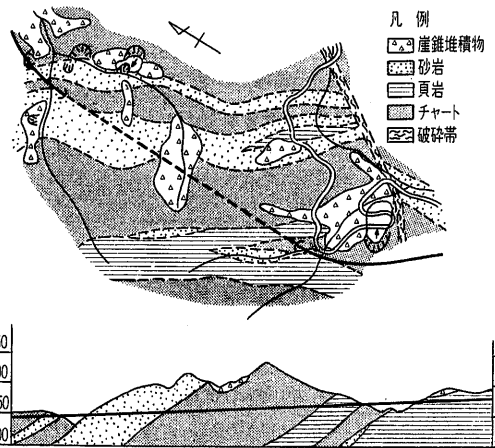


図-10 地質断面図、平面図の例

たうえて、地質学的な考察を加えて、図-10に示したような地質平面図、地質断面図に要約する。不安定地形(地すべり地、崩壊地など)、地質(土質・岩石名、硬軟、変質度、割れ目、風化、破碎、膨張性など)や地質構造、水文(地下水、表流水)、土木地質的な所見については調査報告書の中に記述する。

地質図は地形図の上に地殻の表層部を構成する土層・岩層の分布、相互関係、構造などを記載したものである。地質踏査の結果は、まず地形図に描かれ(地質平面図)、さらに地質断面図と柱状図の形で別の角度から表現して各岩層の関係をはっきりさせる。この記載法および作成法について以下に概説する。

4-2-1 地質図に用いる着色、記号、文字

地質図に用いる色彩や地質記号は必ずしも統一されていないが、その中でも伝統的・習慣的に用いられているものもあり、これを無視することは利用する側の混乱を招きやすく、地質図全体の調和を破ることもなる。以下に伝統的・習慣的な記載方法について述べる。

色彩区分については、古い時代のものは濃く、順次新

しい時代の地層は淡くする。また、前者は混合色、後者は光のスペクトル原色を用いる(表-10参照)。

地質記号、地質略号、模様については各々図-11、表-11、図-12を標準としている。なお、この種の標準に関してはISOの方で制定作業を進めていると聞く。

4-2-2 地質平面図の作り方、読み方

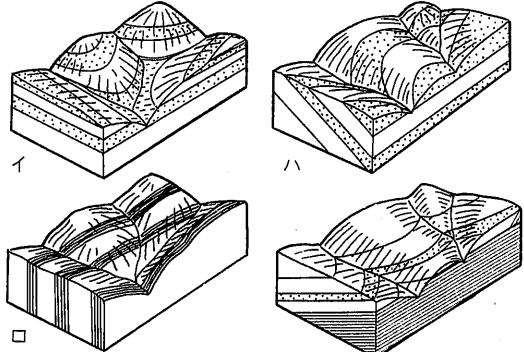
地質平面図では地質分布の境界線を正確に記入することが重要である。崖錐や段丘堆積物などの地層地質については地形状況を考慮して正確に記入することが可能で

表-10 彩色区分

地質時代別	新生代	橙～黄～黄緑系統
	中生代	緑～青～紫系統
	古生代	灰～茶～暗褐色系統
成分別	酸性岩	紅～桃色系統
	塩基性岩	濃緑～濃青～濃紫系統
その他	小地域に分布する単元には目立つ色あるいは濃色を、広域に分布するものには薄い色彩を用いる。隣接する単元にはコントラストの強い色彩を用いるとよい。	

火成岩	+++	+++	+++	+++	深成岩
	///	///	///	///	半深成岩・脈岩
	vvv	vvv	vvv	vvv	火山岩
堆積岩	■	■	■	■	表土
	▲	▲	▲	▲	崖錐
	▲	▲	▲	▲	火山砕屑物(火山灰,火山岩屑)
	▲	▲	▲	▲	凝灰岩
	▲	▲	▲	▲	凝灰角礫岩(集塊岩)
	▲	▲	▲	▲	輝緑凝灰岩
	▲	▲	▲	▲	砂岩・シルト岩
変成岩	▲	▲	▲	▲	片麻岩
	▲	▲	▲	▲	ホルンフェルス
	▲	▲	▲	▲	珪岩
	▲	▲	▲	▲	片岩類
	▲	▲	▲	▲	千枚岩
	▲	▲	▲	▲	蛇紋岩

図-12 地質模様



イ. 地層が水平な場合、地層境界線は等高線と平行する。
 □. 地層が垂直な場合、層境界線は等高線とは無関係に走向方向に直線状に延びる。
 ハ. 地層が傾斜している場合、地層境界線が低位の等高線と交わる方向へ傾斜している。

図-13 地層境界線と地形との関係

傾斜角 30°	傾斜方向	地層面	背斜軸	休鉱・廃鉱
傾斜角 30°	走向方向	垂直層	向斜軸	石切場・採石場
傾斜角 30°	傾斜方向	水平層	岩層(地層)境界(推定)	ボーリング
傾斜角 30°	走向方向	節理面	湧泉	トレンチ
傾斜角 30°	走向方向	垂直節理面	井戸	弾性波測線
傾斜角 30°	走向方向	水平節理面	化石産地	崩壊地
傾斜角 30°	走向方向	断層	動物化石	
傾斜角 30°	走向方向	推定断層	植物化石	
傾斜角 30°	走向方向	破砕帯	鉱山	

図-11 地質記号

表-11 地質略号(岩石名)

火成岩	深成岩	花崗岩	Gr	砂岩	Ss	片麻岩	Gn
		花崗せん緑岩	Gd	硬砂岩	Gw	ホルンフェルス	Hf
		石英	Qd	泥岩	Ms	片岩	Sct
		せん緑岩	Di	シルト岩	Sit	石英片岩	QSct
		はんれい岩	Gb	頁岩	Sh	緑泥片岩	CSct
	かんらん岩	Pe	粘板岩	Sl	墨片岩	GSct	
	半深成岩	花崗はん岩	Gp	チャート	Ch	石千枚岩	Ph
		石英	Qp	石灰岩	Ls	蛇紋岩	Sp
		ひん岩	Po	礫岩	Cg		
		輝緑岩	Db	輝緑凝灰岩	Sch		
輝緑岩		Db	凝灰岩	Tf			
火山岩	石英粗面岩	Lp	凝灰角礫岩	Tb			
	石英安山岩	Da	珪岩	Qt			
	安山岩	An					
		玄武岩	Ba				

あるが、基盤地質については、以下に示す作業を行って境界線を記入していく必要がある。

地層同士の境界面が地表と交わってできる線(地層境界線)は、地層の走向傾斜と地形の関係によって決まる。この関係は図-13で知ることができるように、境界線と等高線の間に規則性があるので、作図によって境界線を求めることができる。図-14において地層を傾斜方向に切った面を考え、その面に地層を投影させると実傾斜角αが得られる。地層の傾斜と水平距離、および高さとの間には $x = h \cot \alpha$ という関係がある。P点に走向NS、傾斜27°Eの地層があるとすれ

(粒 度) f: 細粒, m: 中粒, c: 粗粒
 (地質時代) P: 古生代, M: 中生代, C: 新生代 (T: 第三紀, Q: 第四紀)
 (使用例) Ssf: 細粒砂岩, Grm: 中粒花崗岩, PSI: 古生代粘板岩

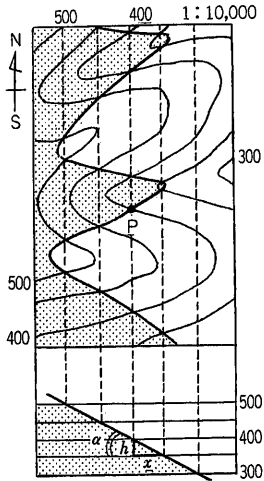


図-14 地層境界線の描き方

ば、50m おきの隣接する等高線に表れる地層の水平距離 x は、 $x=50 \times 1.96=98\text{m}$ となり、98m 間隔で走向に平行に描いた平行線と、50m おきの隣接する等高線との交点に P 点と同じ地層が分布する。これらをつなぐと、地層境界線が得られることになる。図-15 は作図の例題とその回答である。なお、これは地層境界面が平面であることを前提としている。実際の境界面は曲面を形成しているため、上述した作業を境界の確定できる地点ごとに、測定した走向傾斜にしたがって行い、地点間の食い違いを補正しながら全体が連続するようにしなければならない。

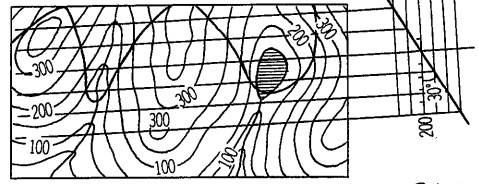
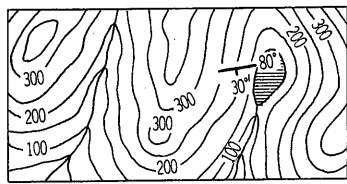
4-2-3 地質断面図

断面図は地域内の地質系統をなるべく多く含み、それらの相互関係がわかる位置で断面図を作成する。トンネルの地質調査では、トンネル縦断方向と複数の横断方向の断面図が作成される。この場合、距離と高さの縮尺比が同一の自然縮尺で作成されるが、路線計画段階や洪積層や沖積層などの水平層を対象とする場合には、高さを誇張した断面図を作成する場合もある。この場合、地層の傾きが誇張されたものになるので注意を要する。

4-3 地質踏査結果の利用

地質踏査の結果は、作成された地質図とともに設計施工の資料に活用される。ただし、地質踏査により作成された地質図は、点に在る地質露頭から地質分布・地質構造を推定した解釈図といえる。そのため地質踏査だけでは不明な点が少なからずあり、その後の地質調査で不明点を明らかにしていく必要がある。また、地質踏査では

① 下図200mの等高線点で、N80°E 30°Sの露頭があった。露頭線をかいてみよう。



② 下図0点において同一の地層がみられた。この地層の露頭線をかいてみよう。また、同地層の走向と傾斜を求めよう。

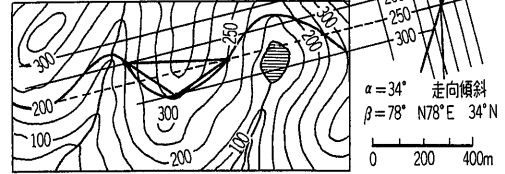
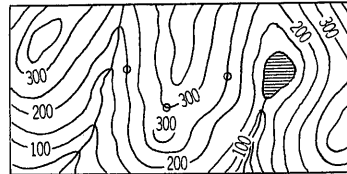


図-15 地質図作成例題

地山の物性値などのトンネル設計に必要なデータをも得ることができないため、その後の地質調査で物性値なども収集する必要がある。したがって、地質踏査結果をもとに、今後解明すべき地質的問題点を整理するとともに、設計に必要な物性値を求めるための調査方法を選定し、その後の詳細調査計画を立案することも地質踏査の主たる目的の一つとなる。

(文責：萩原博之・国際航業(株)東日本事業本部地質課長/大島洋志・同 取締役技術センター長)

参考文献

- 1) 土木学会トンネル工学委員会：トンネル標準示方書「山岳工法編」・同解説，土木学会，pp.19,20, 1996.
- 2) 日本道路協会：道路トンネル技術基準(構造編)・同解説，pp.24-27, 1989.
- 3) 熊木洋太・鈴木美和子・小原昇編著：技術者のための地形学入門，山海堂，pp.20,21, 115p, 1995.
- 4) 今村遼平・岩田健治・足立勝治・塚本哲：画で見る地形・地質の基礎知識，鹿島出版会，1983.
- 5) 活断層研究会編：新編日本の活断層，東京大学出版会，1991.
- 6) 応用地質計測特別委員会：応用地質計測，手法と解釈・評価，応用地質学会，22p, 25p, 1998.

訂正のお知らせ

本連載講座の先月(10月)号において、文章に誤りがありましたので、訂正のうえお詫び申し上げます。

訂正箇所 67頁 左側 下より13行目

〔誤〕 第三紀層への洪積層 3.5

〔正〕 第三紀層～洪積層 3.5

連載講座

都市部でのシールド立坑に係わる新技術(4)

立坑の構築技術(2) 地下連続壁工法の設計と施工例

「都市部でのシールド立坑に係わる新技術」
連載講座小委員会

1. はじめに

本連載講座の主旨は、シールド立坑工事での新技術の動向紹介にあるが、これを評価・比較するためには基礎的な情報として、現状の立坑構築技術についての情報も必要となる。

本稿では、従来から採用されてきた各種の地下連続壁工法について一般的な構築技術の紹介を行い、現状技術の留意点、課題などを明らかにする。

2. ソイルセメント地下連続壁工法

2-1 工法の概要

ソイルセメント地下連続壁は柱列地下連続壁の一種で、多軸オーガー機先端からセメント系懸濁液を注入しつつ、地盤を削孔・混練することにより造成し、1エレメントの壁体を順次完全ラップさせながら施工する壁である。通常は、応力負担材である芯材(通常H形鋼)を設置して発生断面力を受け持たせる。

ソイルセメント地下連続壁の中では、SMW(Soil Mixing Wall)が現在わが国において一般的であり、広く普及している。

図-1に削孔混練機を、図-2に標準施工方式を示す。

この工法の特徴は、

- ・各エレメント間の連続性がよい
- ・地山の土が様ではないので、セメント系懸濁液の配合を変化させて均一に混合攪拌された壁体を造成する
- ・施工対象地盤の不均一性や傾斜により削孔精度が影響を受ける

などである。

この工法の開発経緯は、単軸オーガー機の施工からスタートしたソイルセメント柱列式地下連続壁工法の混合性・施工性・精度の課題を解消するため、初期の時代(1976年頃)に多軸オーガー機によるソイルセメント地下連続壁工法の開発へと進み、現在に至っている。

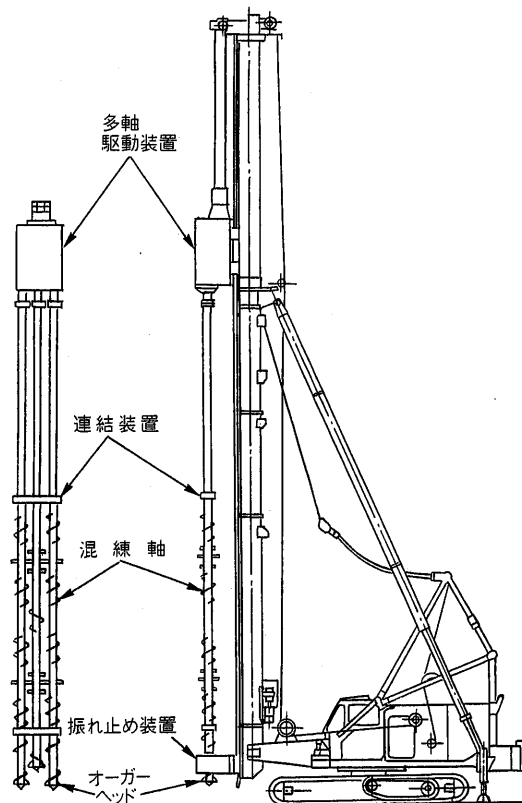
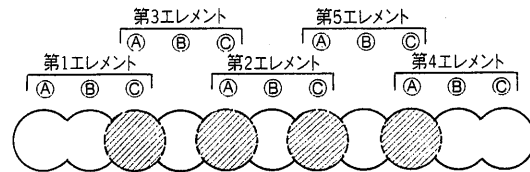


図-1 削孔混練機



※斜線部分は完全ラップ部分を示す。

図-2 標準施工方式

2-2 施工手順

壁体の施工は、地盤条件・施工条件に適応した機械および装置を選定し、図-3に示す施工手順で行う。

施工機械は、標準壁厚550mmと850mmの2種類があり、

土木情報 No.318

今月の主な入札結果

(9月29日～10月25日)

事業主体	工事名	請負会社	請負額 単位 百万円
室蘭開建	国道336号えりも町咲梅T	岩田・菱中JV	1,610
東北地建	岩手県山田町山田T	戸田建設	1,470
関東地建	浦和市芝川T	東亜建設工業	2,100
中部地建	1号七ツ新屋東地区共同溝	徳倉建設	615
"	1号静清半左右衛門新田地区共同溝	村本建設	550
"	中部縦貫小島T牧ヶ洞工区	西松・飛島JV	7,700
"	260号錦第1T紀勢地区	鴻池組	1,030
"	302号富田I共同溝蟹田	淺沼組	580
近畿地建	1号東野地下道南部	青木建設	780
中国地建	青谷羽合道泊T	熊谷組	1,820
"	三原バイパス第10T	日本国土開発	1,230
"	作木大和道第2号T	不動建設	840
九州地建	福岡202号外環状共同溝片江第2工区	白石	397
"	" "第4工区	丸紅建設	555
"	" 梅林第7工区	錢高組	572
"	" "第8工区	松尾建設	580
"	" [IV]-20工区	本間組	290
"	" " -23工区	森組	311
"	宮崎10号屋敷内第1,2T	西松建設	945
"	鹿兒島3号大里T1工区	奥村組	1,380
"	" 2工区	佐藤工業	1,370
水公・関西	丹生ダム県道改良管並1号T	松村組	349
鉄公・東京	臨海天王洲St本屋他	大成・五洋・三菱JV	895
鉄公・大阪	阿佐(西)新城T(西)他2	大日本・新井JV	207
鉄公・九州	九幹鹿新水俣St他1	奥村・白石・角田JV	1,015
道公・東北	東北縦貫道稲山T	東急・加賀田JV	1,550
道公・東京	関越道嵐山地区函渠	錢高組	1,850
道公・関西	近畿道敦賀線石山T	白石・岐建JV	3,010
都基公・千葉	新鎌ヶ谷地区西部7号幹線3工区	淺沼組	250
阪神公	新湊川第2工区その1開削T	大日本・大本JV	1,580
秋田県	国道石沢T(HA17-20)	長田・山科JV	422
埼玉県	国道16号下ボックス工	錢高・初雁・関東JV	897
千葉県	印旛沼流下9901工区	若築・三井不・松村JV	2,138
"	手賀沼流下放流渠904工区	奥村・博正JV	1,038
"	江戸川左岸流下107工区	福田・永井JV	1,150
都・財務局	汐留地区区街3号線地下構造物その1	大成建設	310
都・水道局	大田区中馬込1～上池台5丁目地先間配水管敷設替	泰成・木村JV	500
"	大田区北馬込2～品川区西大井6丁目地先間配水管敷設替	白石・松本JV	600
"	葛飾区高砂3～柴又1丁目地先間配水管敷設替	大盛・竹内JV	708
都・下水道局	足立区千住2,4丁目付近再構築	クボタ・堀真・新井JV	580
"	墨田区横網1,両国1丁目付近再構築	鉄建・富士JV	705
"	中央区新川1,2丁目付近再構築その3	大豊・美加土JV	798
"	港南幹線	大成・飛島・鉄建JV	840
"	中央区日本橋浜町3丁目付近再構築	森組	598
岐阜県	宮川4号T	佐藤・市川JV	1,620
"	緊急地方道山之江T	アイサワ・土屋JV	850
愛知県	日光川上流流下大和第3工区	竹中土・イチテック・吉田JV	1,850
"	五条川右岸流下布袋工区	五洋・大興・松本JV	1,310
"	第2尾西幹線第3工区その3送水管	鉄建建設	370

(72頁へつづく)

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(10)

第Ⅲ編 地質調査法(2)

「応用地質学」連載講座小委員会

5. 弾性波探査

5-1 弾性波探査屈折法

弾性波にはP波(縦波), S波(横波), 表面波などがあるが, これらの波を観測することで地下性状を探ろうとするのが弾性波探査である。地震探査ともいわれ, 大別して屈折法と反射法とに分けられる。土木地質調査では屈折法を利用する場合が多い⁽⁴⁾。

5-1-1 屈折法の概要

屈折法は, 発破などによって人工的に発生させた弾性波が地層中を伝わる状況を地表に設置した受振器で観測し, 増幅した後サイスマグラフに記録する(図-16)。屈折法では, もっとも速度が速いP波に着目する場合が多い。

観測記録の読み取りによって, 弾性波が起振点から受振点まで伝播する時間(走時)が求められるので, 起振点と受振点の位置をいろいろ組み合わせて観測した結果(弾性波伝播時間)をまとめて走時曲線を作成する(図-17(a))。さらに走時曲線を解析して速度層構造を得, これに地表踏査結果, ボーリング結果をも参考にして解析断面図を作成する(図-17(b))。

5-1-2 屈折法の解析方法

解析方法を理解するために, 解析の基本となる水平2層構造の解析法および実際の解析に用いられるはざとり

法について述べる。

(1) 水平2層構造の解析

図-18に示すように, 第1層の速度を V_1 , 第2層の速度を V_2 , 第1層の層厚を Z とする。 $V_1 < V_2$ の場合に層境界面からの屈折波が地表で観測されることから, 屈折法が有効なのは $V_1 < V_2$ の場合に限られる(つまり屈折法では, 地山の速度が深部に向かうほど大きくなるという前提条件で解析される)。起振点Aに近い測点Bでは第1層内を直接伝わる直接波が, 起振点Aから遠い測点Dでは下位層上面からの屈折波がそれぞれ初動として観測される。走時曲線の傾きは伝播速度の逆数 $1/V$ になっている。直接波と屈折波の伝播時間が同じになる点Cの起振点からの距離 X_0 は次式で表せる。

$$X_0 = 2Z\sqrt{(V_2+V_1)/(V_2-V_1)} \quad (1)$$

ここで仮に V_1, V_2 をそれぞれ1,000, 2,000m/sとすると $X_0=3.5Z$ の関係が得られる。つまり, 第1層と第2層の速度比が1:2である場合に, 層境界面からの屈折波は第1層の厚さのおよそ3.5倍離れた地点で初動として観測される。後述するはざとり法による解析では最下層上面からの屈折波が測線の相当部分で観測されている必要がある。そのため測線長は予想探査深度の5~7倍程度以上必要となる⁽⁵⁾。

(2) はざとり法

地層の境界面は地表面に平行とは限らず, 起伏してい

る。そのため, 実際の調査では調査区間の両側に起振点を設け往復走時を観測することによるはざとり法(表層除去法)を用いるのが一般的である。

図-17(a)に示す走時曲線図には, 速度走時曲線^{(2), (3)}(はざとり線^{(3), (4)}, T'曲線⁽³⁾ともいう)が示されている。この速度走時曲線は不均一な速度分布を有する表層を除去し, 最下層上面に沿って伝播する波動の走時を示す仮想の走時曲線である。その傾きは最下層の弾性波伝播速度を示

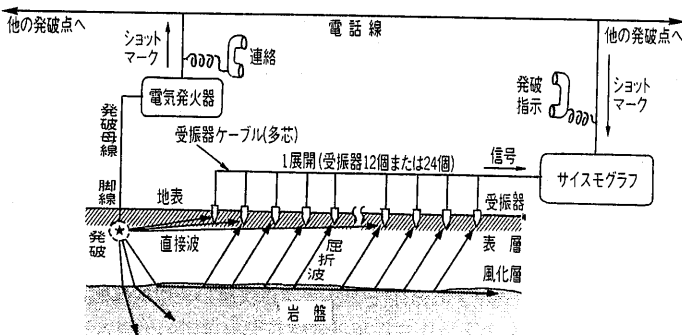


図-16 弾性波探査屈折法の概念図

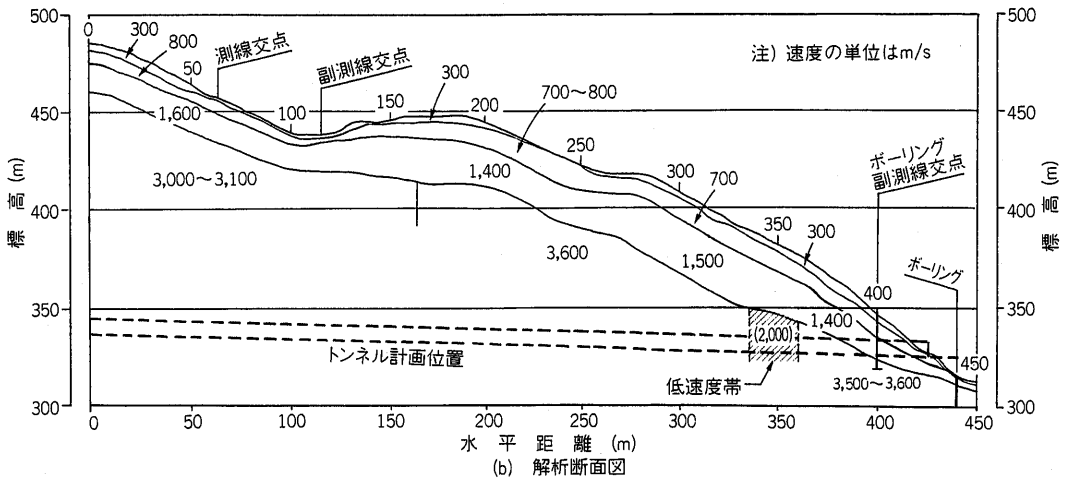
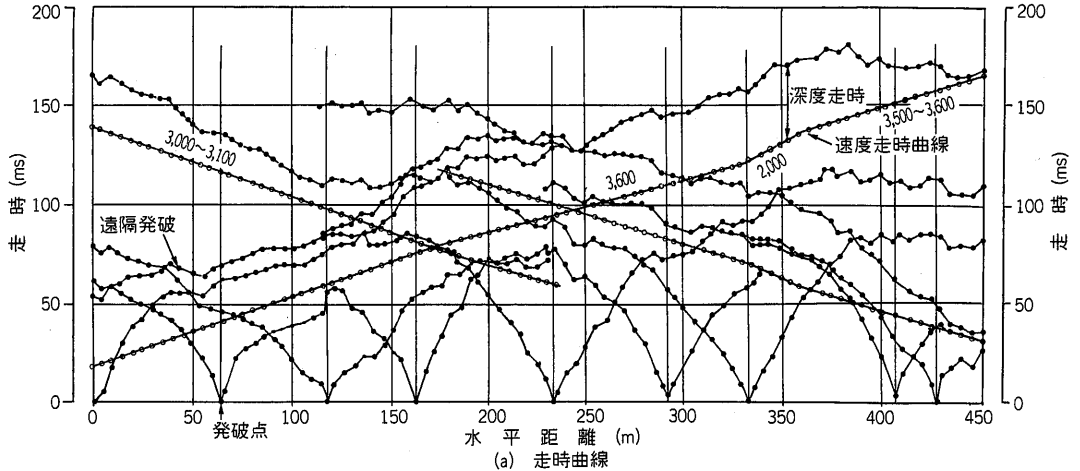
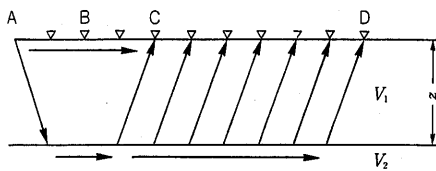


図-17 弾性波探査の解析例



(a) 速度構造モデル

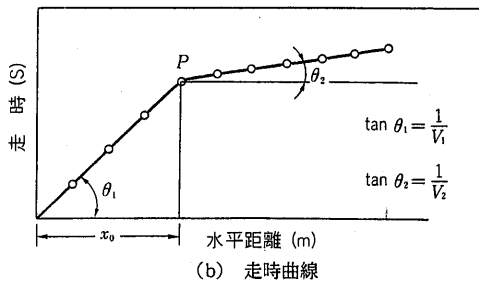


図-18 水平2層構造モデル

し、原走時曲線との走時の差は、表層内を弾性波が伝播する時間(深度走時³⁾、零走時²⁾ともいう)に相当し、表

層の厚さに対応している。速度走時曲線の傾きの水平方向変化を調べて、最下層の水平方向の速度変化を求め、深度走時を各速度層に分割・解析して、表層の速度構造を求めることができる。

5-1-3 弾性波速度と土質地質との関係

弾性波速度は次式に示すように、密度 ρ と弾性定数 E 、ポアソン比 σ の関数で表され、①土砂や岩石の固結度・硬さ(図-19)、②岩盤中の亀裂とその状態、③地盤中の間隙の量と飽和度などにより決まり、地山の力学特性を反映している。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\sigma)}} \quad (3)$$

表-12に弾性波速度と地質状態の一般的な関係を示す(同表には比抵抗値と地質状態も併記している)。弾性波速度は各機関で定めているトンネル地山分類の重要な指

P波速度(km/s)

		0	1	2	3	4	5	6	7
沖積層	表土	—							
	崖錐	—							
	乾砂礫	—							
洪積層	含水砂礫	—							
	ロームおよび粘土	—							
第三紀層	砂礫		—						
	火山砕屑岩		—						
	頁岩			—					
第三紀層	珪質頁岩			—					
	砂岩および礫岩			—					
	凝灰岩			—					
	凝灰角礫岩			—					
中生層	集塊岩			—					
	粘板岩				—				
	砂岩および礫岩				—				
中生層	硬砂岩				—				
	石灰岩				—				
	珪岩				—				
	輝緑凝灰岩				—				
火成岩	花崗岩					—			
	閃緑岩					—			
	斑れい岩					—			
	かんらん岩					—			
	斑岩					—			
	ひん岩					—			
	輝緑岩					—			
火成岩	浮石質溶岩		—						
	石英粗面岩			—					
	安山岩			—					
	玄武岩			—					
	千枚岩			—					
変成岩	石墨片岩				—				
	石英片岩				—				
	緑色片岩				—				
	片麻岩				—				
変成岩	蛇紋岩			—					
	ホルンフェルス				—				

図-19 主要地層・岩石の原位置弾性波伝播速度⁹⁾

表-12 弾性波速度、比抵抗と地質状況を表す要因との関係¹⁾

物性値	小 ← → 大	要因	
弾性波速度	軟らかい	硬い	岩質
	多い	少ない	
	飽和度低い	飽和度高い	地下水
	低い	高い	
小さい	大きい	粒径	
比抵抗	軟らかい	硬い	岩質
	多い	少ない	
	多い	少ない	導電性
	飽和度高い	飽和度低い	
	低い	高い	地下水
	小さい	大きい	
		粒径	

注) * 亀裂が地下水で飽和している場合：亀裂中の地下水の比抵抗値の大きさによって逆の傾向を示すこともある。
 * * 砂やシルトなどの粒状構造が孔隙水によって飽和している場合：孔隙水の含有状態によっては逆の傾向を示すこともある。

(1) 屈折法の適用が困難な地山条件

地山の速度層が層状に分布し、深部に向うほど速度が大きくなるという屈折法的前提と大幅に異なる下記①～④に示すような地質構造の場合は、正確な速度分布を把握するのは困難である。このような場合は、調査ボーリングと速度検層、比抵抗二次元探査などとの併用を検討する必要がある。

① 不規則な互層あるいは硬軟互層(図-20①)

火山礫凝灰岩と溶岩とが不規則な互層をなす場合、新第三紀層の砂岩泥岩互層などでは、弾性波は選択的に速い速度層を伝播するので、遅い速度の地層を検出できない。

② 中間に高速度層がある場合(図-20②)

新第三紀層中に溶岩のような高速度層を挟在している場合は、屈折波が高速度層上面境界に沿って進み、高速度層よりも下位にある地層の真の速度を検出できない。

③ 不規則な速度分布(図-20③)

粘土化帯、珪化帯などが不規則に混入している熱水変質帯および蛇紋岩地帯などでは、速度層分布が不規則となり、正確な地山性状の把握は困難である。

④ 飽和含水している場合の地層の判別(図-20④)

弾性波速度は含水の影響を受け、土砂地山で含水している場合は、比較的大きな速度(水のP波速度約1,500m/s)を示し、地層の判定は困難である。

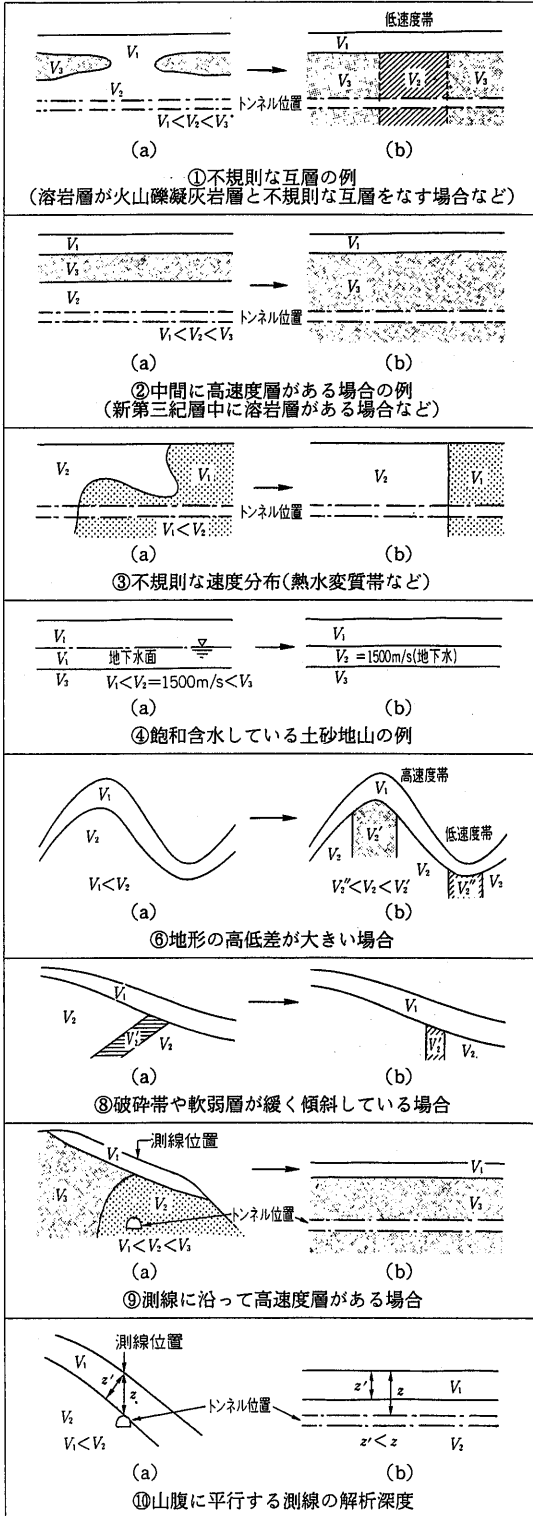
(2) 解析上留意すべき地形・地質構造

下記⑤～⑩のような地形・地質構造では、求められた速度構造が解析方法に起因する見かけ上のものか、実際

標として利用されている⁹⁾が、それは上述のように弾性波速度が地山の力学的特性を反映しているためといえる。
 5-1-4 屈折法調査の実施上・解析上の留意点

弾性波探査はトンネル全体の地山状況を比較的容易に把握できる有効な調査手法である。しかし、弾性波速度から推定した地山状況が掘削結果と合っていないとの報告が多く聞かれる。

この中には、弾性波探査に対する十分な理解がないままに実施されたり、解析(解釈)されていることが原因であることも多い。以下に適用が困難な地山条件、解析上留意すべき地形・地質構造ならびに実施上の留意点を示す^{1)~3)}。



(a)実際の構造, (b)解析結果に表示される可能性の高い構造
 図-20 屈折法解析上の留意すべき地形・地質構造

の地山状況を表しているのかを判断する必要がある。なお、⑨、⑩の場合にはトンネルと直交あるいは斜交する副測線を設けることにより解決できる。

⑤ 速度差があまりない下記のような地層境界の判別は困難である。

- ・古生層, 中生層中の岩脈
- ・古生層, 中生層, 変成岩, 火成岩の境界面
- ・第三紀と第四紀の含水砂礫層
- ・土砂化の進んだ強風化岩と表層堆積物
- ・第三紀泥質岩の風化部と未風化部

⑥ 地形の高低差が大きい場合(図-20⑥)

谷部を低速度帯, 尾根部を高速度帯と評価しやすい。谷部は地質の弱線である場合が多いので, 地表踏査などの結果と合わせて評価する必要がある。

⑦ 異方性の著しい地層

亀裂などの不連続面や片理が一方に発達した速度異方性の著しい岩石では, 測線の方向によって地山速度が大きく異なる。

また, チャートなどの硬質岩は, 岩片はきわめて硬質で速度も大きい。潜在性の亀裂を多く含むことが特徴である。地山中では亀裂も密着しているため比較的大きな地山速度を示すが, トンネル掘削時には緩むことによってかなり悪い地質条件となることがある。

⑧ 破碎帯などが緩く傾斜している場合(図-20⑧)

傾斜構造に関する事前の情報がないと誤った解析になりやすい。

⑨ 測線に沿って高速度層がある場合(図-20⑨)

高速度層を伝播する弾性波を観測するため実際よりも良い地山と間違えて評価する可能性がある。

⑩ 山腹に平行する測線の解析深度(図-20⑩)

斜面に垂直方向の解析断面を測線直下のデータとしてそのまま示していることが多い。

(3) 低速度帯の評価

周囲に比べて相対的に小さい速度値を示す部分を低速度帯と呼ぶ。低速度帯は断層破碎帯や変質帯などの地質的弱線部に相当する可能性が高いが, 地形条件などによって見かけ上生じることがあるので, 地表踏査や調査ボーリングを含めた総合的な検討が必要である。

1) 見かけ上の低速度帯が生じやすい地形・地質条件

- ① 測線が谷部を横切の場合
- ② 最下層(基盤)上面が深い谷をなす場合
- ③ 基盤上面に浸食作用などによる段差がある場合

2) 低速度帯の表現上・解釈上の留意

- ① トンネル調査では一般に受振点間隔は5~10mであるため, それ以下の低速度帯の正確な幅と速度は

決定できない。解析上の最小幅は測点間隔である。

- ② 低速度帯の傾斜角が他の地質情報などにより予想できる場合には、傾斜角を考慮のうえ解析断面図上に表示することが望ましい。しかし、多くの場合は低速度帯の傾斜を想定できないため、低速度帯が認められた測点から鉛直線をおろした位置の最下層内に表示することが多い。
- ③ 幅の狭い低速度帯がある場合に見かけ上2か所に低速度帯を解析することがある。
- ④ 高角度の高速度層がある場合に、その両側に実際には存在しない低速度帯を解析する可能性がある。
- ⑤ 測線が断層破碎帯などの低速度帯と鋭角に交わる場合には、走時曲線は複雑な形状を示し、一般に低速度帯の速度は実際より大きめに解析される。

(4) 探査可能深度

測線長は探査深度の少なくとも5倍以上とすべきであるとされている⁵⁾。実際の探査例では深査深度は数10~100m程度であることが多い。土かぶりが数100mを越えるようなトンネルでは屈折法の適用は大がかりとなるため、最近では探査深度の大きい電磁探査(7-1参照)などの調査法が利用される場合もある。

(5) 測線の設定など調査計画を立てるうえでの留意点
屈折法調査を効果的なものとするために(1)~(4)で既述したもののほか、次の点にも留意することが望ましい。

- ① 測線の両端は、大きな起振力が得やすい沢などの水辺に設けること。片側が山の高い所で終わるような測線は、良い記録を得ることは難しい。
- ② 路線に沿った主測線だけでなく、地層の走向や構造の方向に直交する副測線を設けることで、真の速度や構造の幅などを把握するよう配慮する。
- ③ 曲率を有する路線では測線を複数に分割することがある。この場合に分割測線をそれぞれ延長し、調査欠損部が生じないように十分に重ね合わせる必要がある。
- ④ 坑口付近の地質情報を得るためには、測線両端部の解析精度が劣る結果とならないように測線端から適当な距離の延長上に遠隔起振点を設ける必要がある。
- ⑤ 地表では大きな起振力が得られない場合には、ボーリング孔を利用した発破を検討する必要がある。

5-2 弾性波探査反射法

弾性波探査反射法(図-21)は、反射波を利用した探査法で、石油探査分野(探査深度数

km)で発展し、10数年前から土木分野でも活断層の調査などでよく利用されるようになってきている。土木分野での探査深度が数10~数100mであるため、浅層反射法と呼ばれている。反射法ではP波に加えて、分離能が高く、地下水によって速度が変化しないS波測定も実施されている。

測定作業は基本的に屈折法と大きく変わるところはないが、解析作業は電算機を利用して観測記録から微弱な反射波を抽出・表示するための情報処理が中心であり、初動走時だけを考慮する屈折法とは内容が全く異なる。直接的な調査結果は深度軸を反射波の伝播時間で表示した時間断面図で表されるので、時間軸を深度軸に変換するために、ボーリング孔内で実施するPS検層またはVSP探査などの速度分布情報を得る調査を併用する必要がある。

反射法は中間に高速度層がある場合でもそれ以深の探

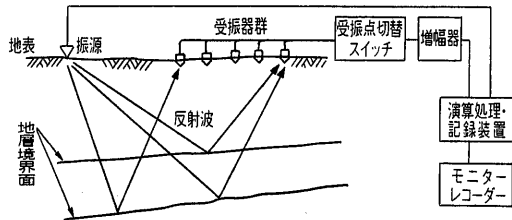


図-21 反射法の探査概念図

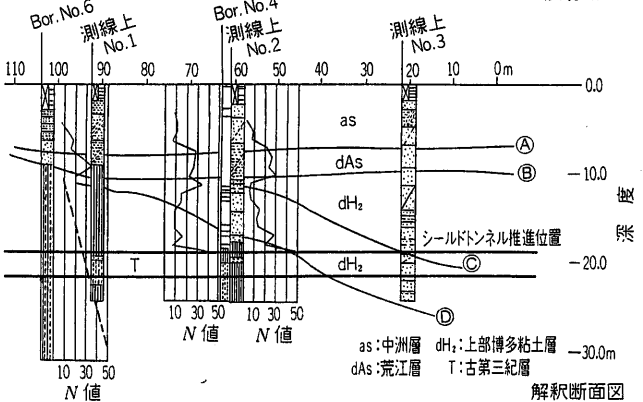
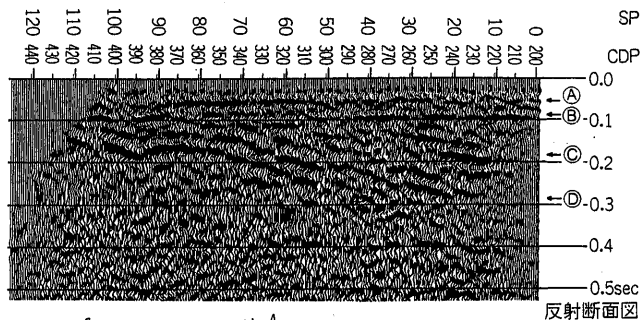


図-22 都市部での反射法探査実施例⁹⁾

査が可能であること、測線長は短くても探査深度を深くできることなど屈折法には無い長所を有している。

このような特徴から、反射法は山岳トンネルで中間に高速度層が分布する場合(P波)や、都市部での含水未固結層の調査(S波)に利用されている。

適用にあたっては次のような条件が必要である。

- ① 地形および地質構造が比較的単純であること。
- ② 探査対象地層が周囲と有意な速度差を有すること。
- ③ 探査対象地層の層厚が数 m 以上であること。

図-22 に都市内の通信ケーブル敷設用

シールドトンネル予定路線上で実施した例を示す。古第三紀層とその上を不整合に覆う洪積層の境界が認められる。

5-3 弾性波を用いたその他の調査法

5-3-1 弾性波トモグラフィ

弾性波トモグラフィは、複数のボーリング孔(調査坑やトンネルであってもよい)を用いてクロスホルのデータを測定し、これを解析することで二次元的あるいは三次元的に速度分布を画像化する方法である。測定法は、従来から用いられてきた孔(坑)間弾性波速度測定や扇斜法と基本的には変わらないが、多数の波線についてのデータを必要とすること、速度分布を計算機を用いた逆解析法を用いて解するところが異なる。

振源などの問題から、一般には数 10~100m 程度の規模の対象範囲について実施される。トンネル調査では断層破砕帯や坑口周辺の詳細構造の把握、あるいは地表からの調査が困難な場合に適用が考えられる。また、施工段階では緩み領域の調査や薬液注入の効果判定にも利用されている。

図-23に弾性波トモグラフィの実施例¹⁰⁾を示す。この調査地点では浅部は割れ目の少ない堅硬な安山岩、深部は自破砕状のやや軟質な安山岩が分布しており、地表からの屈折法では速度構造が正確に把握できないので弾性波トモグラフィを行ったものである。

5-3-2 高精度屈折法地震探査

従来の屈折法にトモグラフィ的手法を組み合わせ、より高精度に地山の速度構造を求めようとする方法(ただし、ボーリング孔を起振点として利用する)で以下のような場合に有効である。

- ① 変質帯など複雑な地山構造の場合。

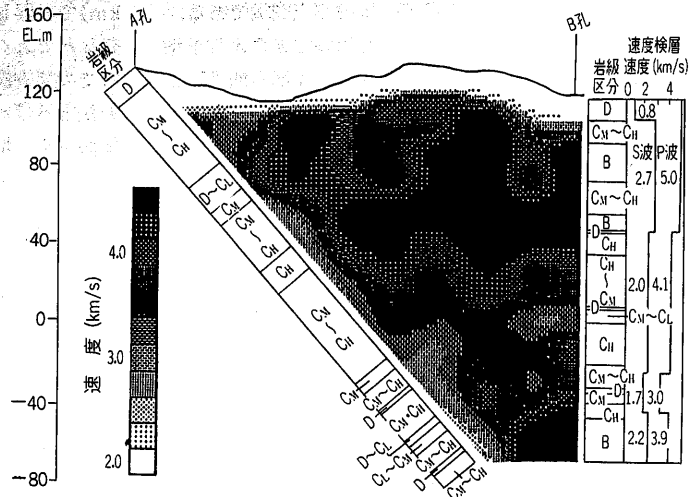


図-23 弾性波トモグラフィの実施例¹⁰⁾

- ② 土かぶりの大きなトンネルなど。
- ③ 明瞭な速度層境界がない地山など。

5-3-3 VSP(vertical seismic profiling)探査

地表に振源を置き、孔内で反射波を受振する反射法の一つ(図-24)で、ボーリング調査結果と対比することで、ボーリング地点における反射波と地層境界面を対応づける。さらに、この結果から得られる速度情報を用いて反射法探査の時間断面図を深度断面図に変換する。

5-3-4 トンネル切羽前方探査

切羽において前方予知を目的として行われる反射法探査技術として、TSP(tunnel seismic profiling)、HSP(horizontal seismic profiling(図-25))などがある。これらの解析原理は、基本的にはVSPと同じで、両者の違いはVSPが鉛直ボーリング孔内で実施されるのに対して、前方探査は水平のトンネル坑内で実施される点である。前方の予測可能深度は100~200m程度である。

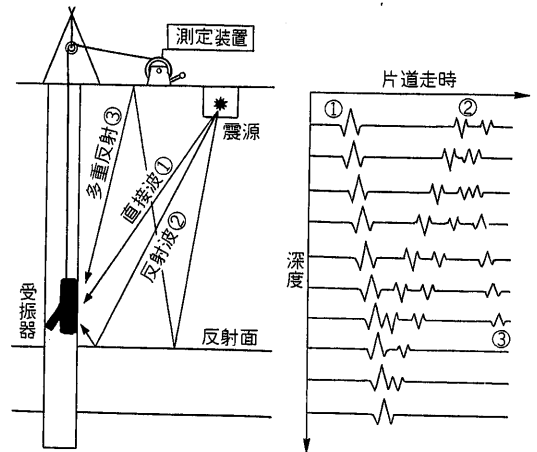


図-24 VSP 測定 の概念図

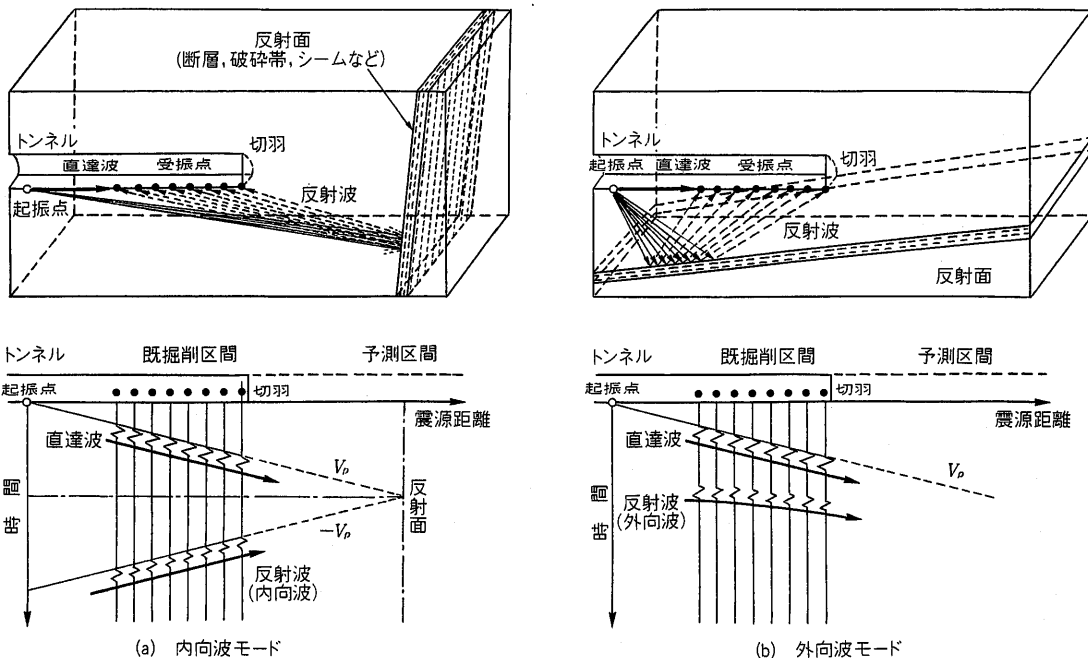


図-25 HSP測定概念図¹⁾

6. 電気探査

トンネルの調査に利用される電気探査法は比抵抗法がほとんどであるので、比抵抗法を中心に説明する。

電気探査は、10年ほど前までは平野部や扇状地あるいは丘陵地などの山麓地域において帯水層あるいは地下水の分布状況を把握するために、垂直探査や水平探査が行われてきた。しかし、近年になって比抵抗二次元探査法(比抵抗映像法, 比抵抗高密度探査とも呼ばれる)が実用化されたことにより、トンネルの調査においても、地質および地下水の分布状況、変質帯や断層破碎帯の把握を目的として実施される事例が増えている。

6-1 比抵抗法の原理

電気探査では図-26に示すように、1対の電流電極(C₁, C₂)から電流を地山中に流し、それによって生じた電位を1対の電位電極(P₁, P₂)を用いて計測する。よく利用される電極配置を表-13に示す。

地表面のある点Cから電流Iを流したとき、点Pに発生する電位V_pは次式で与えられる。

$$V_p = \rho I / (2\pi CP) \quad (4)$$

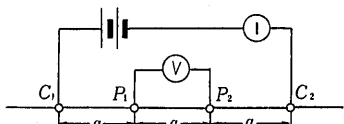


図-26 電極配置の一例

表-13 よく利用される電極配置

電極配置法	電極配置係数 G	電極配置図 C ₁ , C ₂ : 電流電極 P ₁ , P ₂ : 電位電極
2極法	a	
ウェンナー法 (等間隔CPPC法)	a	
エルトラン法 (等間隔CCPP法)	3a	
シュランベルジャー法	$\frac{n+1}{2n}a$	
ダイポール・ダイポール法	$\frac{n(n+1)(n+2)}{2}a$ n: 電極隔離係数	

見かけ比抵抗 $\rho_a = 2\pi C \frac{V}{I}$

電極配置係数 $\frac{1}{G} = \frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_2 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} + \frac{1}{C_2 P_2}$

ここで、 ρ は地山の比抵抗(単位立方体あたりの電気抵抗で単位は $\Omega \cdot m$)である。

測定された比抵抗は、各電極配置における平均的な比抵抗を表しており、見かけ比抵抗(ρ_a)と呼ばれる。見かけ比抵抗 ρ_a は測定電流 I と測定電位 V から式(4)を組み合わせて次のように求めることができる。

2 極法

$$\rho_a = 2\pi aV/I$$

ダイポール・ダイポール法

$$\rho_a = n(n+1)(n+2) \cdot \pi aV/I$$

ウェンナー法

$$\rho_a = 2\pi aV/I$$

シュランベルジャー法

$$\rho_a = (n+1)/n \cdot \pi aV/I$$

ここで、 a は電極間隔、 n は電極隔離係数と呼ばれるパラメータである。

6-2 探査方法

6-2-1 垂直探査法

垂直探査では、測点を中心に電極間隔 a を順次拡大して測点の深度方向の見かけ比抵抗 ρ_a を測定する。測定結果は、両対数方眼紙の横軸に a を、縦軸に ρ_a をプロットして、 ρ_a - a 曲線を作成する。これをもとに、標準曲線法あるいはリニアフィルター法などによって解析する。標準曲線法は、実測結果と2層標準曲線(水平2層構造に対する見かけ比抵抗の理論曲線)と補助曲線(3層構造の上部2層を等価な1層に置き換えるもの)を比較し、成層構造の第1層から順に比抵抗と層厚を決定していく方法である。リニアフィルター法は、最初に比抵抗構造のモデルを仮定し、次にモデルに対する電位の理論値を計算し、測定値と理論値との残差が小さくなるようにモデルをくり返し修正する方法であり、パソコンを

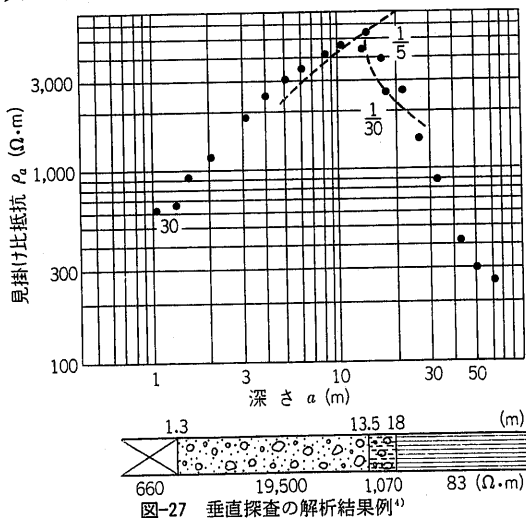


図-27 垂直探査の解析結果例¹⁾

用いた解析法である。図-27に標準曲線を用いた解析の例¹⁾を示す。図中の数字は標準曲線から読みとったパラメータ ρ_2/ρ_1 の値を示している。

トンネル調査のように、ある断面方向の比抵抗分布を得たい場合には、測線上に複数の測点を設け、各測点ごとに、垂直探査を実施し、各測点での解析結果をもとにして比抵抗分布断面図を作成する。

6-2-2 水平探査法

電極間隔 a を一定に保って、電極配置全体を面的に展開しながら見かけ比抵抗 ρ_a を計測し、 ρ_a の面的な分布を調べる方法が水平探査法である。水みちの面的な広がりなどを調べたい場合などに利用され、電極配置としては一般的にはウェンナー法がよく用いられる。

6-2-3 比抵抗二次元探査法

(1) 探査概要

比抵抗二次元探査の測定法は、垂直探査と水平探査を組み合わせたと考えられることができる。測線上に等間隔に測点を設定し、各測点に電極を設置する。これらの各電極は多芯ケーブルを介して測定器に接続する。測定器側の電極切替えスイッチを用いて、電流電極、電位電極を選択しながら、適切な電極の組み合わせのもとづいて測定を行う(図-28²⁾)。

解析は電子計算機を用いた逆解析法によって行い、測線下の断面内の比抵抗分布をカラー画像化した比抵抗断面図などで表示する。

複雑な地形においても十分実用的な解析が行えるようになったことから、近年、山岳トンネルの調査でもよく利用されるようになってきている。

(2) 計画・解析上の留意点

① 地形などの影響

比抵抗二次元探査は、地形・地下構造が二次元的である(測線の側方には変化しない)ことを前提としている。そのため測線の側方で地形・地下構造が著しく変化する場合は、副測線を設け、両者の結果を比較して評価する必要がある。

② 人工構造物の影響

近くに送電線、鉄道、鋼製構造物などがあるとノ

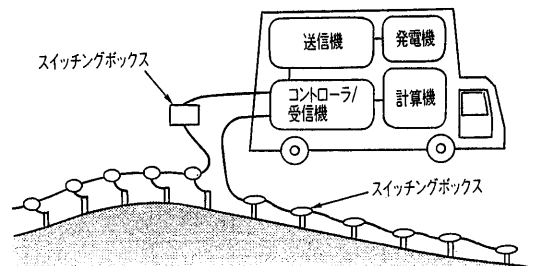


図-28 比抵抗映像法の測定概念図²⁾

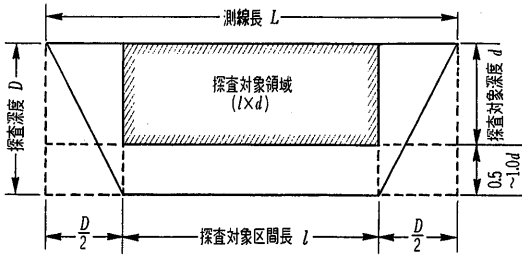


図-29 探査対象領域と解析領域⁽¹⁾

イズの原因となり、また電流の流れに影響を与えるので、測線はこれらに近接しないように計画する。しかし、避けられない場合には、測線を直交させることが影響範囲を最小限に止めるうえで望ましい。

③ 探査範囲

比抵抗二次元探査では、解析断面の底部、測線の両端部では解析精度が低下するため、図-29に示すような探査範囲を設定する必要がある。

④ 遠電極

2極法あるいは3極法による計測の場合に必要な遠電極は、探査深度の10倍以上離すことが望ましく、それ以下の場合には測定電位の補正が必要である。

⑤ 測線の曲がり

比抵抗値を評価するうえで、測線が多少(15°程度)曲がっていても、解析上大きな問題は生じない。

6-3 地層の比抵抗と土木地質との関係

6-3-1 地山比抵抗を決定する要因

地山比抵抗は地山の電気的性質に関連する物理量であり、①地山の岩質(鉱物)、②風化・変質、③亀裂、破砕帯(間隙率、粘土鉱物、地下水)、④地下水(水質、含有量)、⑤地温、など多くの要因によって影響を受ける(表-12、図-30)。

実際の地山では、これら要因が複合して比抵抗分布に影響を与えることが多い。例えば、風化部では亀裂が多く間隙率も大きいため、地下水で満たされると、比抵抗値は小さくなる。また、断層破砕帯、変質帯では、きわめて小さい比抵抗を示す粘土鉱物を含むため、低比抵抗部として検出される。

6-3-2 複雑な地質構造の解釈(弾性波探査との比較)

代表的な例をもって説明する。

① 断層破砕帯・変質帯の分布・傾斜の把握

断層破砕帯や熱水変質帯などは粘土鉱物の含有や岩石の碎片化による間隙の増加と地下水による飽和などにより低比抵抗帯を形成していることが多い。地山の比抵抗が一般に大きい花崗岩や中・古生層では低比抵抗帯はとくに明瞭に検出される。弾性波探査で得られた低速度帯と低比抵抗帯が一致していれば、断層破砕帯や熱水変質帯などの可能性が高いと判断できる。また、弾性波探査では低速度帯の傾斜は不明なことが多いが、比抵抗二次元探査では低比抵抗帯の傾斜方向から断層破砕帯の傾斜方向を推定できる場合がある。

② 中間高速度層をもった地質構造などの把握

弾性波探査では解析が困難である図-20④、⑤のような地質構造であっても比抵抗二次元探査では解析が可能といえる。

図-31は、新第三紀の凝灰岩類を石英安山岩が貫

地質	比抵抗 (Ω·m)									
	0.1	0.5	1	5	10	50	10 ²	5×10 ²	10 ³	5×10 ³
河川										
地下水										
ボーリング泥水										
粘土・シルト										
砂混じり粘土										
砂・砂礫(乾)										
砂・砂礫(帯水)										
一般表土										
火山灰砂										
泥岩・粘板岩(乾)										
泥岩・粘板岩(湿)										
砂岩										
硬砂岩										
凝灰岩										
凝灰角礫岩										
安山岩										
花崗岩										
石灰岩										
変成岩										

図-30 地質別比抵抗値⁽¹⁾

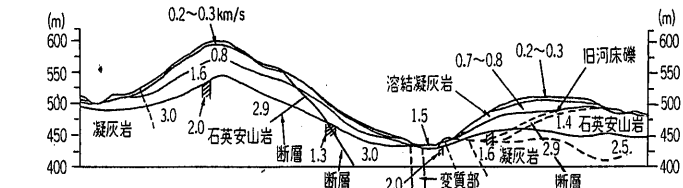
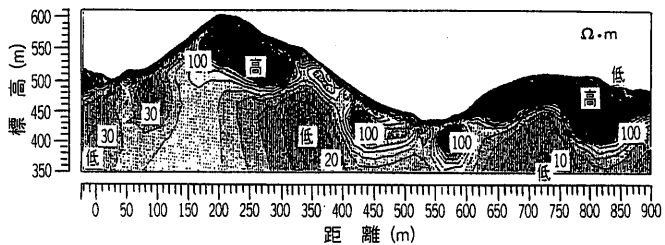


図-31 火山岩地帯での比抵抗二次元探査解析例

き、その上位に第四紀の旧河床礫や旧表土の薄層が介在して、さらにこれらを硬質岩である溶結凝灰岩類が不整合に覆っている地域で実施した例である。

弾性波探査ではこれら地山状況の把握が困難であったが、比抵抗二次元探査の結果からは、石英安山岩帯の岩体構造と溶結凝灰岩類の分布状況および断層、変質帯の分布がボーリング調査の結果ともよく一致して、精度よく確認された。

6-3-3 弾性波探査(屈折法)との比較

屈折法は、最短時間で伝播する初動をもとに解析するため、地山状況を実際の地山よりも良好なものとして評価する傾向がある。

一方、比抵抗法では電流が低比抵抗部分を流れやすいために、地山をより悪いものとして評価する傾向にある。

そのため、破碎帯、変質帯、帯水層など問題となる地山においては、比抵抗二次元探査と弾性波探査を併用することで、より正確な地山状態の評価が可能となる。

6-4 比抵抗トモグラフィ

比抵抗トモグラフィは、複数のボーリング孔(調査坑やトンネルであってもよい)を用いてクロスホールのデータを測定し、これを解析することで二次元的あるいは三次元的に比抵抗分布を画像化する調査法である。測定法および解析法は基本的に比抵抗二次元探査と同じである。

トンネル調査では弾性波トモグラフィと同様、断層破碎帯や坑口周辺の詳細構造の把握、あるいは地表からの調査が困難な場合などに適用される。また、施工段階では薬液注入の効果判定にも利用されている。

6-5 その他の電気探査法

トンネル調査に適用されているその他の電気探査法として、流電電位法と強制分極法(IP法)について簡単に触れる。詳細については他書を参照されたい。

6-5-1 流電電位法

流電電位法は湧水や井戸につながる水みちの連続性などを把握するために利用される。湧水箇所から電流を流し、周辺部で電位の異常分布の有無を測定して、水みちの連続性を把握する。

6-5-2 強制分極法

強制分極法はもともとは金属鉱床探査に利用された調査法であり、トンネル調査においても鉱化変質帯の分布状況の把握などの目的で実施されることがある。金属鉱物表面に蓄積された電荷の放電現象として電流遮断後の過渡的な電位の変化を計測する方法である。

7. その他の物理探査法

7-1 電磁探査法

電磁探査法は、自然電流や人工的に電流を流すことに

より形成される電磁応答を地表面で測定し、地下の比抵抗構造を推定する方法である。

電磁探査には水平探査と垂直探査とがある。

7-1-1 水平探査

水平探査にはループ・ループ法とVLF-MT法などがある。探査深度はいずれも数10m程度であり、地下水調査や断層破碎帯の検出に利用される。

(1) ループ・ループ法

ループ・ループ法は地面に電極を設置する必要がなく、送受信ループをそれぞれ一定距離(10~40m程度)離して地表面におき、送信ループに電流を流した状態で受信ループで二次磁場を測定することによって、地山中の平均比抵抗値を計測する。

(2) VLF-MT法

VLF-MT(Very Low Frequency)法は、送信信号として、潜水艦などの通信用に設けられた大電力の送信局から放射されるVLF電波(3~30kHz)を利用する受動方式の電磁法。国内では宮崎県えびの(22.2kHz)、ハワイ(23.4kHz)、オーストラリア(22.3kHz)などのVLF局が利用できる。

7-1-2 垂直探査

垂直探査にはMT法(地磁気地電流法・Magnetotelluric Method)、CSAMT法(人工信号源を用いたMT法・Controlled Source Audio Frequency Magnetotelluric)、TDEM法(時間領域電磁法・Time Domain Electromagnetic Method)などがある。垂直探査の探査深度は数100m~数kmと深く、従来は地熱、金属資源、温泉開発などの探査法として広く利用されてきた。

最近では、弾性波探査や電気探査では調査が困難な大深度のトンネルや地下発電所などにおいて、有効な調査方法として注目されている。トンネル調査では人工信号を用いて安定したデータの取得ができるCSAMT法、TDEM法が利用されている。

(1) CSAMT法

CSAMT法は測線から数km~10km程度遠方に人工信号源を設置して、周波数を変化させながら電流(数アンペア~数10アンペア)を流し、それによって発生した電磁場による地中応答を地表面において電場および磁場について測定し、地山内の比抵抗構造モデルを求める周波数領域の探査法である。深度1km程度までの探査に適用する。

図-32にCSAMT法の実施例を示す¹⁴⁾。図によれば、 $300\Omega\cdot\text{m}$ 以下の低比抵抗部が破碎帯確認地点から斜坑中間部さらには深部まで連続していることから帯水した破碎帯と推定された。トンネル掘削の結果、同区間で破碎帯に遭遇し、約500ℓ/minの湧水を記録している。

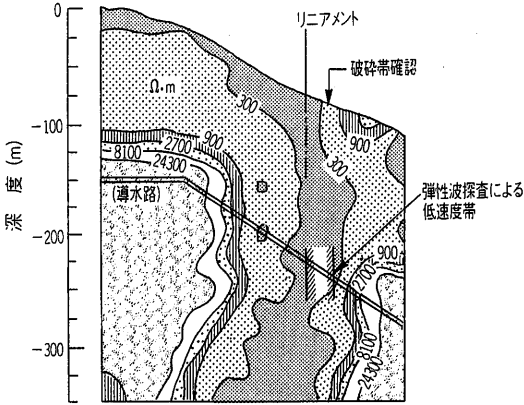


図-32 CSAMT法二次元解析結果¹⁴⁾

(2) TDEM法

TDEM法はCSAMT法と同じようにして人工信号を発生させるが、電流を遮断した後の時間領域での応答の減衰を測定し、地山内の比抵抗構造モデルを求める時間領域の探査法である。

7-1-3 空中電磁探査

空中電磁探査は、小型機やヘリコプターを利用して、空中から行う電磁探査法である(図-33参照)。基本的な原理はループ・ループ法と同じであり、1対の送受信コイルをバードと呼ばれる架台の中に収納し、このバードを対地高度およそ30m程度に保ち、測線沿いに地形をなぞるように曳航し測定する。求める物性値は地山内の比抵抗の水平変化であるが、5周波数程度について同時に測定することにより深度方向の変化も同時に測定する

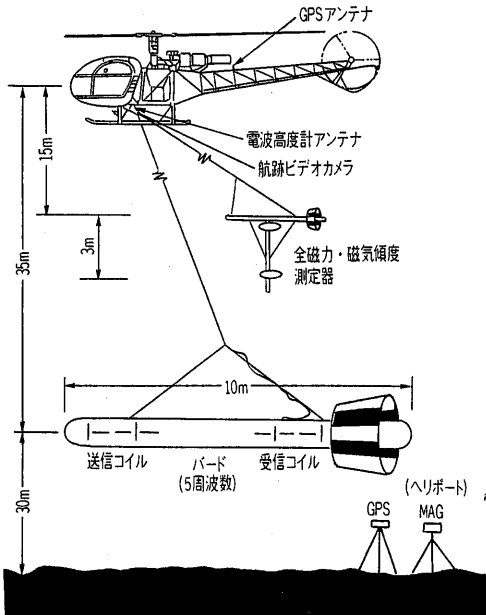


図-33 空中電磁法(HEM)の測定概念図¹⁵⁾

ことができる。多数の測線について測定することにより、比抵抗の面的分布を求めることが効果的である。測線間隔は通常50~200m程度に選ぶことが多い。

比抵抗分布図から、地質分布に関する情報が得られるほか、変質帯、断層破碎帯の検出に有効である。GPSアンテナを搭載して、位置測量を行うほか、同時に磁気探査を実施することが多い。

7-2 地中レーダ

地中レーダ(地下レーダともいう)は地中における電磁波の反射現象を利用して、地下構造を調べる調査法である。反射法地震探査と同様な原理であるが、VHF~UHF帯域(30MHz~1GHz)の電磁波放射を利用している点が異なる。

送信アンテナから放射された電磁波パルスは地山中の境界面で反射して再び地表の受信アンテナで受信される。通常は反射信号を時間軸(縦軸)に、水平位置を横軸にとって並べて表示する。

地中レーダは分解能に優れているので路面下の空洞・埋設管、埋蔵文化財の調査に利用されることが多いが、トンネルの覆工背面の空洞調査や、覆工中の鉄筋の位置検出、覆工厚の調査、シールドトンネルの切羽前方探査などにも利用されている。電磁波は地下水で急激に減衰するほか、金属板は全反射するので、地下水面以下は探査不能になるし、構造の場合は、アンテナに近い鉄筋は検出されるが、それより奥は探査不能となる。透過深度を大きくするために、送信信号の工夫などが研究されているが、通常的地盤中では探査深度は2~3m程度、岩盤中では岩石にもよるが、花崗岩や石灰岩などの比抵抗の大きな岩石中では数10m程度である。

(文責：魚住誠司・(株)ダイヤコンサルタント大阪支店技術課長/西田薫・同 技術研究所研究開発部長/大島洋志・国際航業(株)取締役技術センター長)

参考文献

- 1) 池田和彦：トンネルの物理探査，物理探鉱，Vol.25, No.6, 1972.12.
- 2) 物理探査学会：土木地質調査における屈折法弾性波探査の調査計画に関する要綱，物理探鉱，Vol.32, No.6, pp.26~43, 1979.12.
- 3) 物理探査技術協会(現物理探査学会)：土木弾性波探査法，p.446, 1977.3.
- 4) 地盤工学会：地盤調査法，pp.71~106, 1995.9.
- 5) 日本道路協会：道路トンネル技術基準(構造編)・同解説，p. 273, 1989. 6.
- 6) 服部保正：地質工学，日本物理探鉱(株)社報，1964.
- 7) 西田薫・杉本芳博：土木地質におけるジオトモグラフィ，(株)ダイヤコンサルタント資料，ダイヤノート，pp.59~70, 1993.
- 8) 土木学会：トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，1997.6.

- 9) 近藤章司・黒岩正信・平野浩治・西田薫・岡田信・名越澄生：福岡市内における浅層反射法地震探査，物理探査学会第80回学術講演会論文集，1989.5.
- 10) 西田薫・杉本芳博：弾性波トモグラフィ，地質と調査，No.2，pp.13~18，1991.6.
- 11) 稲崎富士・倉橋稔幸・中村康夫・竹林征三：トンネルHSP法の予測精度向上と施工反映課程の検討，第27回岩盤力学シンポジウム講演論文集，pp.401~405，1996.
- 12) 島裕雅・梶間和彦・神谷英樹：建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法，p.206，古今書院，1995.3.
- 13) 池田和彦・大島洋志：わかりやすい土壌地質学入門(第4版)，p.224，土木工学社，1979.5.
- 14) 打田靖夫・原田俊之・岡崎徹・川原恵・小里隆孝：トンネル地質調査におけるCSA・MT探査法の適用性，第27回土質工学研究発表会C-2 102，1992.6.
- 15) 小西尚俊・佐々木靖人：空中電磁法，地質と調査，No.2，1998.6.

(60頁からのつづき)

事業主体	工 事 名	請 負 会 社	請負額 単 位 百万円
"	五条川右岸流下木賀工区	三井・株木・永井JV	1,100
"	知多常滑線第3工区その2送水管	株木建設	162
岡山県	一般県道穴粟真備線泰T	元川建設	428
愛媛県	(主)新居浜別子山線風花T	白石建設工業	467
福岡県	ふるさと林道岩石線岩石T	松尾・谷口JV	1,050
長崎県	国道389号道路災害防除吹越T	三青・宅島JV	1,040
"	(主)勝本石田線道改山形T	中原・宮坂JV	860
"	一級町道曾吉田線道改双六坂T	西海・東川JV	713
大分県	広域大野川中流諸方大石T	友岡・ナトムJV	546.48
"	広域耶馬湊東部駄馬奥T	菅・笠原JV	834
宮崎県	県単1時間構想道12-2号北方北郷線黒木T	一心工業	760
千葉市	大蔵寺污水1号幹線8工区	三井建設	238
"	本郷地区管路17工区	太平工業	119.3
"	貝塚污水2号幹線2工区	西松建設	122
"	磯部茂呂町線(赤井地区)雨水排水施設	矢作建設工業	162
京都市	桃山雨水幹線その1	鹿島・鴻池JV	2,650
"	高速鉄道東西線六地藏駅工区	大林・竹中土・大鉄・金下・仁木JV	2,918
"	" 六地藏北工区	鹿島・奥村・大豊・吉村・岡野JV	7,350
"	" 石田駅工区	大成・佐藤・淺沼・古瀬・長村JV	3,590
"	" 石田北工区	飛島・西松・森本・公成・ケイコンJV	6,202
"	伏見西部第2地区油小路通共同溝	株木建設	587
堺市	深井沢町下水管布設及び配水管仮移設	国誉・志真JV	740
松原市	西除川右岸9号幹線管渠	大日本土木	410
神戸市	神戸複合産業団地1号ダム放水路T	西松建設	730
広島市	川内地区下水道11-1号	日特・錦JV	540
中町(兵庫)	公下11-4工区污水管	松村組	364
君津富津下水組合	君津污水4号幹線	東急建設	122
福岡地下街開発	天神地下街延伸	大林・鹿島・ハザマ・大成・清水・西松・淺沼・鏡高JV	24,000
九廣鐵路公司	KCRC 西線第1期チェンワン駅	五洋建設	26,000

連載講座

都市部でのシールド立坑に係わる新技術(5)

立坑の構築技術(3) ケーソン工法の設計と施工例(その1)

「都市部でのシールド立坑に係わる新技術」 連載講座小委員会

1. はじめに

最近の都市部におけるシールド立坑築造の施工条件は、経済発展による都市機能の拡大、都市部への人口集中などに伴い、以下に示す課題への対応および技術開発が要求され、ますます厳しくなっている。

- ① 騒音・振動、地盤沈下、水質汚濁などの建設環境保全や近接施工への対策・技術が求められる。
- ② シールドトンネルの大深度化に伴い、立坑の大深度施工技術が求められる。
- ③ 施工用地の確保が大変困難となっており、その用地の面積も狭隘化している。

これらの条件の中で、これまでケーソン工法は、立坑築造において多くの施工実績を有してきた。近年では、大深度立坑施工に対する新技術開発、周辺環境保全に対する取り組み、さらに省面積化への新たな提案などもなされてきている。

本稿では、ニューマチックケーソン工法およびオープンケーソン工法について、これらの対応技術と施工事例を紹介するとともに、ケーソンの立坑設計について、その概要を述べる。

2. ケーソン工法の種類と特徴

ケーソン工法は、地上で良好な品質の躯体を構築し、その躯体を土留め兼用として地中に沈設し、所定の深さに構築物を築造する工法である。その掘削方法、沈設方法の違いにより、ニューマチックケーソン工法とオープンケーソン工法に大別される。

2-1 ニューマチックケーソン工法

2-1-1 工法の概要

ニューマチックケーソン工法は、躯体下部に気密な作業室を設け、そこに地盤の間隙水圧に見合った圧縮空気を送り込むことにより、地下水の浸入を防ぎ、ドライな状態で、人力または機械(ケーソンショベルなど)による掘削沈下と躯体構築をくり返ししながら、所定の深度に構

造物を築造する工法である。

ニューマチックケーソン工法のための主要な施工設備には、機械(掘削)設備、排土設備、艀装設備、送気設備、予備設備、救急設備、安全・連絡設備などがある。図-1に工法の全体概要と主要設備図を示す。

また、立坑構築にニューマチックケーソン工法を採用する主なメリットとして以下の点が挙げられる。

- ・躯体構築を地上で行うため良好な品質が確保できる。
- ・構築した躯体を本体利用できる。
- ・仮土留めを必要とせず、土質に関係なく必要な深度で躯体を留めることができ、土砂崩壊の心配もない。
- ・地下水位の低下がなく、周辺地盤への影響が少ない。
- ・掘削地盤を直接確認でき、正確な掘削管理ができるため施工精度も高い。
- ・あらゆる土質に対し、補助工法なしで掘削できる。
- ・地中の障害物も容易に処理、撤去できる。
- ・施工プロセス(構築→掘削沈下)が一定しており、全体工程を確実に把握でき、一般的に工程が速い。

2-1-2 無人ケーソン工法

掘削作業の能率向上、コスト削減と高気圧下の労働環境の改善を目的として、「無人ケーソン工法」が開発され、これまでに多くの施工実績がある。この工法は、地上の遠隔操作室(写真-1)から、作業室内の掘削設備をテレビモニタと計測管理情報を確認しながら、遠隔操作する。掘削機械は、天井走行式のケーソンショベル(写真-2)を使用するため、掘削土砂の状態に関係なく、自由に移動・掘削・排土作業を行うことができる。この工法の開発により、掘削作業時は、作業室内に潜函工を配置する必要がなくなった。

また、無人化システムのさらなる省力化、高効率化、および安全性の向上を図るため、コンピュータ制御により、掘削から土砂積み込みまでの一連の作業を、自動運転化するのが「自動化ケーソン工法」である。

2-1-3 大深度ニューマチックケーソン工法

「無人ケーソン工法」の開発により、掘削は圧気下作

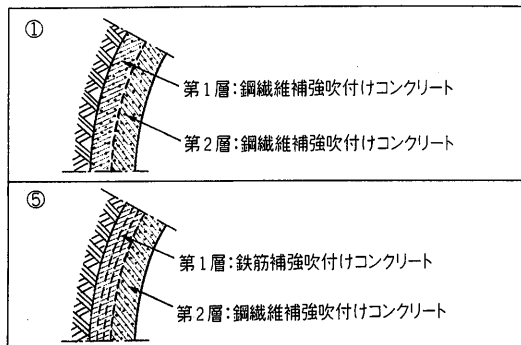


図-13 第2層に鋼繊維補強吹付けコンクリートを用いた構造形式

間での建設工事で得られた経験から、鋼繊維補強吹付けコンクリートを用いてシングルシェル構造の第2層を施工する場合には、配慮しなければならない要因がいくつかあることがわかった。

図-13には、第2層に鋼繊維補強吹付けコンクリートを用いた場合の構造形式を示す。構造形式は、耐水性の確保という点で次のように異なっている。

構造形式①：第1層と第2層の両層とも耐荷・耐水機能を有する。

構造形式⑤：第1層と第2層の両層とも耐荷機能を有するが、耐水機能は第2層のみ。

シングルシェル構造の第2層に鋼繊維補強吹付けコンクリートを用いる技術上の目的は、①十分な耐荷能力を得るため第1層を強化すること、②供用性に関して耐水性を保証すること、であり、第1層に支保工として用いられる鋼繊維補強吹付けコンクリートの目的とは異なっている。

これらの目的を達成するため、鋼繊維補強吹付けコンクリートの品質保証には特別な注意を払わなければならない。計画段階において考慮すべき事項は、以下のとおりである。

- ・付着している継ぎ目を横切る要素はいかなるものであっても避けること：コンクリート層間のコンタクトインターロッキングによってせん断力が伝達されることを保証すること。

- ・第1層の内空側に設置したラチスガーダーなどのすべての補強材に対して充分なかぶりを確保すること。
 - ・連続した膨張目地をなくし、施工継ぎ目を極力減らすこと。
 - ・耐水コンクリートに要求される事項に応じて、鋼繊維補強吹付けコンクリートの練り混ぜ方法と配合の検討を行うこと。
- また、施工段階において考慮すべき事項は、以下のとおりである。

- ・第2層を施工する前に第1層の表面処理を行う。
- ・第2層は一度に連続的に施工するべきであり、均一性を確保するために、施工継ぎ目をつくることは避けるべきである。
- ・コンクリートの品質を向上させるため、第2層の鋼繊維補強吹付けコンクリートは、湿式方式を用いて施工するべきである。
- ・湧水の浸透を防止するため、鋼繊維補強吹付けコンクリートの厚さは、施工期間中に適切な器具を用いて測定・管理すべきである。
- ・吹付け表面の均一性を改善するため、第2層の鋼繊維補強吹付けコンクリートは、コンピュータ制御された、もしくは、リモートコントロールされた施工機械(例えば、吹付けロボット)を用いて施工する。

5. おわりに

本文献は、今後の合理的なトンネル施工におけるキーワードと位置づけられるシングルシェル構造および鋼繊維補強吹付けコンクリートを理解するうえで貴重な情報になるものと思われる。そこで、当支保幹事会は、一部異議のあることはお許しを頂く前提で、情報提供の一環として投稿することにした。読者の皆さんの参考になれば幸いである。

(文責：岡井崇彦・西松建設(株)/熊谷幸樹・飛島建設(株))

参考文献

- 1) Bernhard R.Maidl : Steel Fiber Reinforced Concrete, Ernst & Sohn, pp. 189-203, 1995.

(土木工学社図書案内)

岩盤の計測と解析

工博 鈴木 光著

A5判 箱入 260ページ 本体価格4,200円 (〒380円)

最近では、有限要素法を利用し、地盤や構築物の変形や応力分布に関する予想解析が行われるようになりつつある。そのために入力などに信頼度の高い各種計測値が要求されるようになってきた。

このような理由から、建設工事では、従来にも増して計測や解析が重要となりつつある。

本書は、応用範囲も広く重要と思われる岩盤の計測と解析法の紹介と解説を試みた実務書である。

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(11)

第三編 地質調査法(3)

8. ボーリング調査

地下に人為的に孔をあけるボーリングは、地盤の性状把握に利用されるほか、石油や地下水(温泉を含む)のくみ上げや地盤改良用の材料の注入に利用されるなど様々な目的で用いられている。

ボーリングの削孔長は、トンネルなどの調査ボーリングでは鉛直・水平を含めて数十mからせいぜい数百m程度で、例外的には青函トンネルの水平先進ボーリングの2,150mがある。世界最長のものは地殻構造調査を目的としたロシアの12,261m(kola SG-3)がある。

トンネル工事におけるボーリングは、地質調査に限らず、水抜き、注入、ロックボルト打設など多くの目的に利用されている。ボーリング調査は多くの調査法の中でもトンネル施工位置の地質試料を採取し、直接目視できるため、もっとも有効なそして信頼されている方法である。

ボーリング調査は有効な調査法である反面、短所としては、土かぶりの大きなトンネルでの調査では余分な部分をせん孔せざるを得なかったり、また、平面的には点での情報にすぎないため効率がよくないこと、そして硬岩地山や不良地山では掘進速度が落ちるなど調査能率がよくないこと、さらに、得られる情報量に比して調査費用が高価であることなどが挙げられる。

8-1 ボーリングの分類

8-1-1 ボーリング機械による分類

現在実用に供されているボーリング機は、ロータリー(回転)式、パーカッション(打撃)式および回転・打撃組み合わせ式があるが、地質調査を対象としたものは回転式スピンドル型機がほとんどである。

(1) 回転式スピンドル型のせん孔法

ボーリングの掘進は、原動機の動力をロッドを介して受けたビットが回転力と推力でその刃先を地盤に食い込ませ、削り取りながら進むことでなされる。同時にロッド内を通して孔内に送り込んだ泥水などで、せん孔によって生じた岩くず(スライム)を孔外へ排出する。せん孔に

「応用地質学」連載講座小委員会

よってコアチューブの中に納められたコアは、コアチューブが一杯になると掘進作業を止めロッドとコアチューブを引き上げコアを取り出す。この作業をくり返してせん孔を進めて行く(図-34)。ボーリング機の主な装置または部品について以下に述べる。

- ① 原動機と内燃機関：表-14 参照。
- ② ビット：ビットは材質によって金属ビットとダイヤモンドビットに分類される。一般に金属ビットは軟岩用、ダイヤモンドビットは硬岩用に用いられている。ビットの適合性を表-15 に示す。
- ③ コアチューブ(コアバレル)：ビットで切ったコアを納めるために用いるパイプ状のもので(図-35)、用途に応じて表-16 のようなものがある⁹⁾。

8-1-2 工法別による分類

回転式ボーリングと衝撃式ボーリングおよび最近では

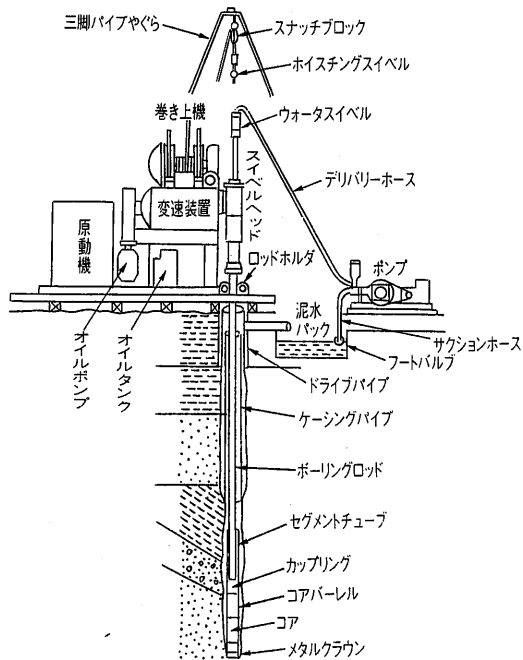


図-34 ボーリング装置の全体図

表-14 ボーリング深度と原動機の必要出力の関係*

深度 (m)	100以下	100~200	200~300	300~500	500~800	800~1,200	1,200以上	
原動機								
モーター	[kW]	3.7~5	7.5	10	15	20	25~30	30以上
	[rpm]	1,500~1,800(50~60Hz-4P)					1,000~1,200(50~60Hz-4p)	
エンジン	[PS]	5~6	8~9	10~20	15~25	25~30	30~40	43以上
	[rpm]	1,200~2,000					1,400~2,000	

表-15 ビット適合表*

分類	第四紀層 新第三紀層 古第三紀層 中生層 火成岩 変成岩	コアビット(クラウン)				ノンコアビット				
		メタルクラウン	小荷重 大刃の出	80m 10 2 1	40m 10 5 2	平ビット	大孔径 小荷重 大	小孔径 大荷重 大	粗刃形 小荷重 大	ロックビット コブラビット
土質										
軟岩										
中硬岩	礫									
硬岩					ボルツクラウン (サーフェース)					
極硬岩	玉石				硬↑ マクトリ↓ 大↑ 粒子↓ 小	荷重↑ マクトリ↓ 軟	15m 3			

- (注) 1) 礫、玉石層は、礫質、礫密度により硬さが変化する。
 2) 堆積岩は、一般に粒子径が大きくなるほど硬く、珪質、石英質になるほどビットの摩耗は大きい。
 3) 火成岩は、一般に粒子径が大きくなるほどビットの摩耗が大きい。
 4) 数字は、1丁あたりビット寿命の概略を掘進m数にて示す。
 5) ノンコアビットは、比較的大口径(100~200mm)のものを標準とする。

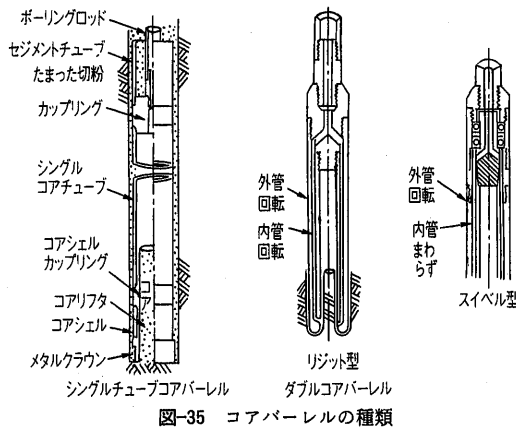


図-35 コアバレルの種類

回転式と衝撃式を組み合わせたロータリーパーカッションドリル式がある。

また、工法により、普通工法、ワイヤーライン工法、リバース工法、二重管式工法、エレクトロドリルやダイナドリルによる先端駆動方式がある。ここでは誌面の都合上工法名のみを紹介にとどめる。

表-16 コアチューブの分類

コアチューブ	適用地質	形状
シングルチューブ	地質で亀裂が少なくコアが取りやすい地層	図-35
ダブルチューブ	亀裂の多い不均質な地層石灰のように脆い地層	外管と内管がともに回転するリジッド型と、内管は回転しないスイベル型。 図-35
ワイヤーラインチューブ	ワイヤーライン工法専用	図-36

(1) 普通工法

8-1-1(1)で述べた回転式スピンドル型のせん孔法に同じ。

(2) ワイヤーライン工法

普通工法のロッドの昇降による時間ロスを極力少なくするために考えられた工法である。本工法は、図-36のようにコアチューブが二重になっており、コアの入る内

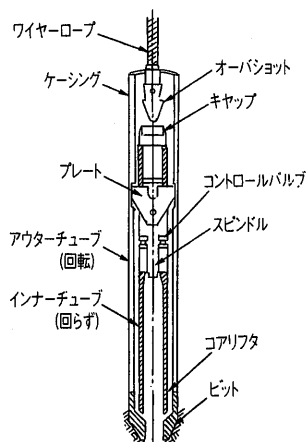


図-36 ワイヤライン工法

管だけをワイヤロープを利用して地上に取り出す方法で、コアを取り出す際ロッドを昇降する必要がない。ロッドの昇降回数が極端に少なくなるため孔壁を傷めることがなく、孔内作業におけるトラブルの発生率も低い。よって深度 100~200m 以上のボーリングで効率がよく、深度 500m で普通工法の 2 倍程度の効率向上が見込まれる³⁾。

(3) シングルリバース工法

普通工法やワイヤライン工法は、ロッド内に循環流体を送り込みロッドと孔壁の間から循環流体とスライムを排出するのに対し、ロッドと孔壁の間の循環流体を送り、ロッド内から循環流体とコアとともにスライムを排出する工法である。したがって、ロッドは内側がストレートなワイヤライン用のロッドを使用しコアチューブは使用しない。ロッドの外側から循環流体を送るため口元にはプレッシャーなどの装置が必要となる。この方法は、主に水平ボーリングで採用されることが多い。本工法の最大の利点はビット交換作業以外はほとんどロッドの昇降の必要がなくロッド接続時を含めて送水ポンプを止めることなく、ほとんど連続的にせん孔でき非常に効率が良いことである。

また、ロッド内の断面積が大きいので、ロッド内を通過する程度の崩壊物やスライムは容易に排出でき、ワイヤラインなどで時々見られるようなスライムや崩壊物による孔壁の梗塞といったトラブルが生じにくい。ただし、逸水が著しい地盤ではスライムやコアを排出できないので適用できない³⁾。

(4) 二重管工法

この方法は径の異なるロッドを二重にして、あるいはケーシングとロッドを組み合わせると同時にせん孔する工法である。主に崩壊性の著しい地盤の水平ボーリングで利用される。2種類の掘管を同時に回転させるためボーリング機械も2つのチャックを有する大馬力のものが必

要となる³⁾。

(5) 二重管リバース工法

上記(3)と(4)を併用した工法で主に膨張性あるいは崩壊性の著しい地盤の長尺水平ボーリングで利用される³⁾。

8-1-3 せん孔対象地盤による分類

(1) 土質ボーリング

沖積層や洪積層の未固結~半固結層の地盤をせん孔対象とする。せん孔長はほとんどの場合せいぜい数十m程度で、使用する機械は一般にハンドフィード型が多い。大部分、地盤の構成や支持力を求めることを目的とする。トンネルの調査ではシールドトンネルを対象とし、一般的には標準貫入試験を実施することが多い。

(2) 岩盤ボーリング

軟岩から硬岩までをせん孔対象とする。せん孔長は目的や地形条件によって数十mから数百mあるいは1,000mを越えるものもある。岩盤ボーリングでは一般に油圧機を使用し、地盤条件によって8-1-2で述べたような工法が選択される。

8-1-4 コア採取の有無による分類

調査の目的によって、コアを採取したりノンコアボーリングを行ったりする。例えば、断層破砕帯や重要な地質構造の把握や未施工区間の地質の正確な判定が必要な場合にはコアボーリング、地下水やガスの状況を把握する場合にはノンコアボーリングを行うなどである。

(1) コアボーリング

一部の土質ボーリング調査を除いてボーリング調査はほとんどの場合コア採取を目的として行われる。コア採取はできるだけ確実に、早くそして良好な状態で行うことが理想であり、ワイヤライン工法の開発や二重管あるいはアクリル管を内管とした三重管サンプラーやエラストックチューブ(コアパッキングチューブ)、ポリエチレン製スリーブなどの機器改良など、様々な工夫がとられてきた。コア採取率の良否はこの機械機具の良否、地山状況のほかボーリング作業員の熟練度により大きく左右される。とくに破砕帯や含水砂礫層などの地質のコア採取は容易ではないが、トンネル工事ではもっとも知りたい情報の一つでもあるので、できるだけコア採取率の向上を図る必要がある。

(2) ノンコアボーリング

土質ボーリングの場合には、標準貫入試験のときにレイモンドサンプラーで採取する以外はコアを採取しないノンコアボーリングが一般的である。岩盤ボーリングの場合でもスライムだけで地質が判断できる場合や地下水調査のみや計測器の設置のみを目的とするような場合などでは、鉛直、水平ボーリングを問わずコアを必要とし

ない場合にはせん孔速度が速くそして経費が安価なノンコアボーリングとして行うことがある。

使用するビットは粘性土層では平ビット、砂礫層ではトリコンビットとすれば能率的にせん孔できる。

岩盤ボーリングの場合には、通常トリコンビットを使用することが多いが、著しく硬い岩盤の場合にはノンコアダイヤモンドビットがある。しかしながら、場合によってはせん孔するビットの断面積の関係からノンコアでなくコアボーリングとした方が速い場合がある。

8-1-5 ボーリングのせん孔方向

せん孔方向による分類では、①鉛直ボーリング、②水平ボーリング、③斜めボーリングがある。

(1) 鉛直ボーリング

一般にボーリング調査といえば鉛直ボーリングを意味する。とくに土質ボーリングでは鉛直方向以外のものは例外的である。

(2) 水平ボーリング・斜めボーリング

トンネルの長大化に伴い土かぶりも大きくなる傾向がある。数百m以上の土かぶりでは、その地形が急峻であれば、ボーリング機械の運搬をヘリコプターなどに頼らざるを得なくなり、経費と労力の割にはトンネル工事に必要な情報が少ししか得られないという事態に陥る。しかし、地表地質踏査や弾性波探査だけでは精度的に誤差も大きいといったことから、トンネルに沿った地質情報が得られる水平あるいは斜めボーリングを行う場合がある。理想的には、例えば長さ数kmのトンネルで片側から数kmのボーリングを実施できればこれにこしたことはないが、数百m程度が現実的な長さとなっている。

過去に長尺・高速化を目指して青函トンネルやまぼろしの中津川線神坂トンネルにおいて先端駆動方式の電動ドリルによる水平長尺ボーリングが行われた例がある。1,000mを越すとロッドに作用する摩擦抵抗を切ってロッドを押し込むのに大きな推力が必要であり、非回転時のロッドの押し込み力は回転時の約3倍必要であった。また、青函トンネルでは水平長尺ボーリングとして水圧による先端駆動式のダイナドリルを用いた例があるが、地質変化の激しいわが国ではコンスタントに2~3kmせん孔することができず破砕帯に遭遇するとストップするなどまだ実用の段階に至っていない。余談ながら神坂トンネルの調査ボーリングで掘りあてた温泉は昼神温泉の発端となっている。

斜めボーリングは土木工事やトンネルなどの調査では短いものはかなりあるが、数百mから1,000mを越すものは実施例が少なく、豊予海峡や紀淡海峡部の海底トンネル計画調査などにおいて700~1,000mの実施例があるだけである。

8-1-6 ボーリングの循環流体

ボーリングの推進は、ビットの回転、ビットへの荷重とスライムの排出から成り立っている。スライムの排出は一部の土質、軟質岩、破砕帯などの場合、無水掘りを行ってコアを採取するためスライム排除をやめて掘進する方法があるが、これは通常の掘進作業とはいえない。通常はビットの冷却とスライムの排除のためボーリング孔へ必要量の循環流体を送り込む。循環流体の種類として、①普通の水(海水を含む)、②泥水(ベントナイトなどの単体や数種類の添加物を含む)、③圧縮空気、④ミスト(エアに少量の界面活性剤などを添加したもの)、⑤特殊泥材(高分子系掘削流体剤など)、⑥オイル、⑦その他、などがある。

これらは、掘削対象とする地山条件や材料の入手の難易、経済性、環境条件などによって使い分けられるが、一般的には②が多用されている。

8-1-7 せん孔速度の向上

せん孔作業はビットの回転、ビットへの推力およびスライムの排出の3条件から成り立っており、一つでも欠ければ順調に作業を行うことはできない。この3条件(回転、荷重、送水)の関係は、送水を一定にして、回転数、荷重のいずれか一方を固定し、他方を2倍にすれば掘進速度はほぼ2倍になる。また、ビットの回転数を増したときよりも荷重を増したときの方がトルクの増加が大きい。掘進中は常にスライムが発生し、これをビットの刃先や孔内から排出しなければ順調な掘進が得られない。このため必要な送水量を確保しなければならないが、送水量を増加すればある程度の掘進速度は向上する。ボーリングの掘進能率は地山状況によって上記の3つの要素の適切な組み合わせによるのでフォアマンの経験的要素が大きく支配しているが、一般的には表-17のようになる⁹⁾。

実作業では、ロッド昇降、孔内洗浄などが含まれるので地質条件、深度、工法、孔径などによって能率が低下する。ロッド昇降条件を変えた場合の深度、工法による低下率を図-37に示す⁶⁾。また、ボーリング作業を準備から後片付けまで入れて1日実働8時間あたりの平均能率を表したのが表-18である⁹⁾。

8-2 ボーリング作業におけるトラブル

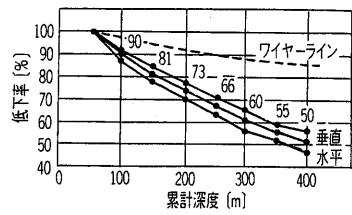
ボーリング作業中には、①孔壁の崩壊、②湧水・漏水、③ロッドの切断、④ロッドの抑留、⑤孔曲り、⑥コア脱落・コア詰まり、⑦掘削機器の故障などのトラブルが発生することがある。これらのトラブルの中には自然発生的な不可抗力のものもあるが、注意すれば避けられる人為的なものもある。例えば、①孔壁の崩壊では地山状況や孔内状況に応じた適切な泥水管理によってある程度回

表-17 掘進条件一覧

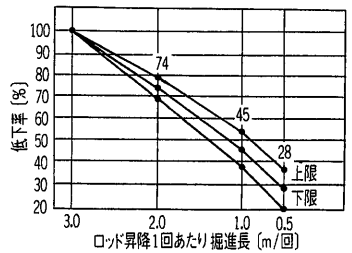
孔径 (mm)	土質				岩				盤					
	メタルクラウン		ボルツクラウン (サーフェイス)		浅		深		浅		深			
	回転数 (rpm)	使用ロッド (mm)	送水量 (ℓ/min)	上昇速度 (m/sec)	回転数 (rpm)	荷重 (kN)	回転数 (rpm)	荷重 (kN)	ダイヤ量 (ct)	使用ロッド (mm)	送水量 (ℓ/min)	上昇速度 (m/sec)	使用ロッド (mm)	送水量 (ℓ/min)
36	4	1~2	120~250	10	1.5	300~600	33.5	5~10	33.5	5~10	1.2~2.4	33.5	5~10	1.2~2.4
46	4	1~2	100~200	14	2	200~400	40.5	10~20	40.5	10~20	0.4~0.9	40.5	10~20	0.4~0.9
56	6	1.5~3	80~150	16	2.5	150~350	"	20~40	"	20~40	0.3~0.6	"	20~40	0.3~0.6
66	6	1.5~3	70~150	18	2.7	150~300	"	30~60	"	30~60	0.2~0.5	50	30~60	0.3~0.6
76	8	2~4	60~120	20	3	100~250	"	40~80	"	"	0.2~0.4	"	40~80	0.3~0.5
86	8	2~4	50~100	24	3.7	100~250	"	60~100	"	"	0.2~0.4	"	100~150	0.3~0.5
101	8	2.5~5	45~90	30	4.5	100~200	50	60~100	60	60~100	0.2~0.3	60	100~150	0.3~0.5
116	10	2.5~5	40~80	34	5	100~150	"	100~150	"	"	0.2~0.3	"	150~200	0.3~0.4
131	12	3~6	35~70	"	"	"	"	120~150	"	"	0.1~0.2	"	"	"
AQ				18	3	200~400	AQWL	5~10	AQWL	5~10	0.4~1.1	AQWL	5~10	0.4~1.1
BQ				20	3.5	150~350	BQWL	10~20	BQWL	10~20	0.3~0.7	BQWL	10~20	0.4~0.9
NQ				30	5	150~300	NQWL	20~40	NQWL	20~40	0.3~0.7	NQWL	20~40	0.5~1.1

(注) 1) 土質は深度50m程度までとする。 2) 荷重は平均荷重とし、岩質および掘進の初期と末期では前後30%程度増減する。 3) 回転は地質状況普通のととし、きわめてよい岩盤では50%増しとする。

4) 浅尺は50~100m、深尺は400~800m程度のものを資料をとった。 5) WLはワイヤーライン。



(1) 深さによる能率の低下率(0~50mを100%としたときの低下率、図中の数字は平均値)



(2) ロッド昇降当たりの掘進の変位による低下率(同一深さ3m/回を100%としたときの低下率)

図-37 ロッドの昇降による掘進能率の低下率

避することができるし、ドライブパイプやケーシングパイプの挿入、さらにはセメントミルク注入などで防ぐことができる。また、③のロッドの切断ではネジ部で切れることが多く、こういうトラブルは日常の点検・管理によってある程度は防ぐことができる⁹⁾。

ワイヤーライン工法に限って時々生じるトラブルとしてインナーチューブが何らかの原因でコアバレルにセットされない場合がある。そのまま掘進するとインナーチューブにコアが収納されないでオーバーショットを送り込んでもコアが回収されないでロッドを全部引き抜かなければならなくなる。この他、孔内水がなくなっていることに気がつかずロッド内に投入したインナーチューブが水による抵抗がないため空気中を自由落下してコアチューブ先端とビットを突き破り破壊してしまうという致命的なトラブルとなってしまうことがある。

水平ボーリングの場合のトラブルは、鉛直ボーリングと比較すると孔壁崩壊と孔曲がりそしてスライム排除が大きな問題となる。そのためそれらの対策がなかなか難しい技術となっており、長尺化が図られない最大の原因となっている。

8-2-1 孔曲がり

孔を曲げることなくせん孔することはほと

表-18 ボーリングの平均能率⁹⁾

(a) 土質ボーリング：深度0～50mのとき

孔径	平均能率 (m/日)					
	粘土, シルト	砂, 砂質土	礫混じり砂	砂混じり礫	玉石混じり礫	固結粘土, シルト
66	6.0	4.2	2.8	1.9	1.0	4.0
86	5.0	3.7	2.3	1.6	0.8	3.5
116	4.0	2.8	1.8	1.2	0.5	2.8

- (注) 1) 土質調査のボーリングで標準貫入試験を併用するものに適用する。
 2) 能率は相当に幅のあるもので、前後それぞれ2割程度の差がある。
 3) 礫質土は礫の岩質より差が多く、硬質の火成岩礫を主体としたときを示す。

(b) 岩盤ボーリング：浅尺調査 深度0～50m, 66mm孔径のとき

深尺ワイヤライン調査 深度0～500m, BQ孔径のとき

分類	ボーリング掘進状況	代表的な岩盤の性質			平均能率 (m/日)	
		種類	一軸圧縮強度 (MN/m ²)	地山弾性波速度 (km/sec)	浅尺調査	深尺ワイヤライン調査
軟岩	メタルクラウンで容易に掘進できる岩盤	新第三紀堆積岩	50	2.5以下	3.5～2.7 (3.1)	5～8 (7.0)
中硬岩	メタルクラウンでも掘進できるが、ボルツクラウンのほうがコア採取率のよい岩盤	古第三紀、中生代の堆積岩の軟質のもの	50～120	2.5～3.5	2.8～2.1 (2.5)	4～7 (5.5)
硬岩	ボルツクラウンを使用しないと、掘進困難な岩盤	火成岩類、変成岩類、古生代の岩盤	120～150	3.5～4.8	2.4～1.5 (2.1)	3～5 (4.0)
極硬岩 破砕帯	ボルツクラウンの摩耗のとくに多い岩盤および硬岩の破砕帯でコア詰まりの多い岩盤	珪質な岩およびチャート、中硬岩、硬岩の破砕帯	150～180	4.5以上 低速度帯	2.0～1.0 (1.8)	2～4 (3.0)

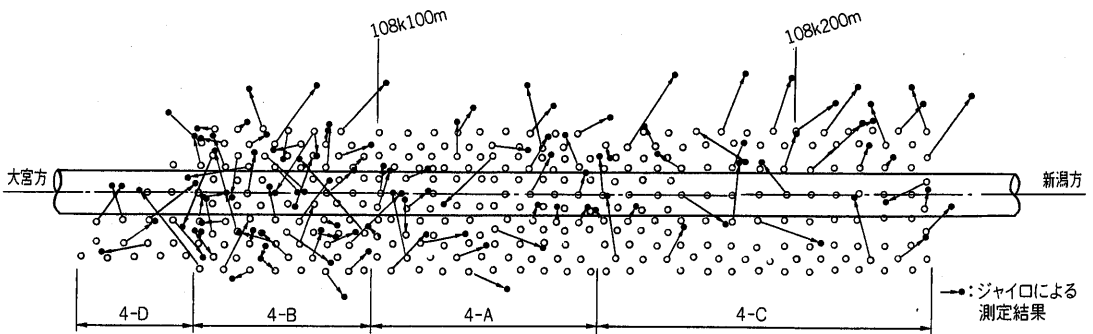


図-38 中山トンネルでの孔曲がり測定結果

んど不可能に近い。とくに、水平ボーリングの場合には重力方向すなわち下方に曲がる傾向が著しく、これも長尺化を難しくしている要因の一つとなっている。

ボーリングの孔曲がりの傾向と原因は、鉛直ボーリングの場合、一般にボーリングが右回転であることから、座標軸の第1象限方向にシフトしていく傾向がみられるようである(図-38)。しかしながら、硬い地層と軟らかい地層の互層で急傾斜を呈している場合は傾斜方向に曲げられる傾向がある。また、礫層の場合は硬質の礫によってビットが蹴られ不特定の方向に曲げられることが多いようである。

水平ボーリングの場合、傾斜層や礫層を掘進対象とし

た場合にも鉛直ボーリングと同様な傾向がみられる。これも一般的にはコアボーリングの場合には掘進長が長くなるにつれて重力方向に孔曲がりすることはよく知られていることであり、長尺ボーリングではこれを克服することに苦勞しているところである。一方、トリコンビットなどを用いたノンコアボーリングなどでは孔が上向く傾向が多く見られるが、これは切屑がビット直後のロッドの下に潜り込みそのためビットが上向きになりやすいことやロッドとビットの径の差が大きいものほど孔曲がりしやすいということが原因として考えられている。

8-2-2 孔曲がりの防止対策

一般に鉛直の調査ボーリングでは孔曲がりはそのほど

大きな問題にはならないことが多いが、深いボーリングで特定の狭い範囲を調査する場合や長尺水平ボーリングの場合には、孔曲がりや極力生じないようにしなければならない。孔曲がりの防止対策としては、①適正なビット回転数や給圧とし無理な掘進をしないこと、②消耗の少ないロッド、ビットなどを使用すること、③孔径に近いロッドを使用したりコアチューブをできるだけ長いものを使用する、④スライムの排出をよくする、⑤スタイビライザーなどの有効な利用を図る、などがある。

孔曲がりが大きくなった場合は、セメンテーションを行って埋め戻して掘り直すかあるいはクサビを用いて修正する。

青函トンネルの先進ボーリングではスタビライザーを利用してできるだけ孔曲がりしないような組み合わせを行って孔曲がりを制御して長尺化を図ることができた²⁾。

また、最近ではロッドを回転しながらコアを採取し、さらに任意の方向にせん孔方向をコントロールする方法が開発され実用化されている。この方法であれば孔曲がり修正だけでなく、上下、左右どの方向にも自由にボーリング孔をコントロールしながら掘り進めることが可能である。この方法の原理は、コアパーレルの相当する部分の外管はベアリングによって回転せず0.5~1.5°程度わずかに反っており、内管のインナーチューブに回転を与えてコアを採取し、ワイヤーライン方式と同様に地上に引き上げる方法である。実際この方式を採用して垂直から斜め、あるいは斜めから水平に曲げてせん孔するというボーリングが行われている。

8-2-3 孔曲がり測定器

光学式測定器には国産では村田式、外国製ではスペリー・サン、イーストマン、トロパリーなどの各メーカーがある。方位は地磁気を利用するので磁性を有する鉄管の中やそれに近接しては測定できないが、傾斜角はいずれも重力を利用して測定する構造なので問題ない。

測定器には垂直用と水平用がある。トロパリーは全方位・全傾斜の測定が可能であるがコンパスおよび振子がロックされた状態で方位角、傾斜角を読み取るもので記録は残らない。

光学式測定器による測定間隔は、これまでの経験から垂直、水平方向とも精度的、経済的にもだいたい25mごとにするのが合理的といえそうである¹⁾。

電気的測定器にはジャイロコンパスがあり、これはロッドとケーシングなど磁性のある鉄管の中でも測定できる。

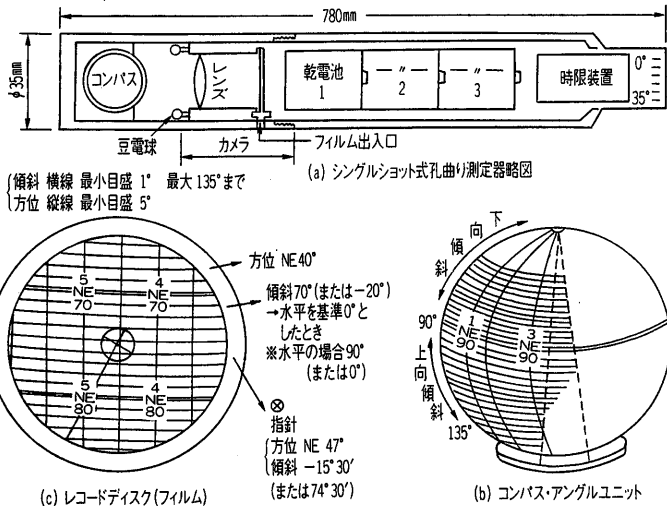


図-39 孔曲がり測定器

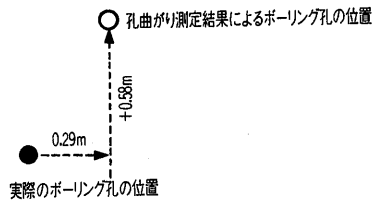


図-40 水平ボーリングの孔曲がり測定結果

国産では「TMG ジャイロ」、外国製ではハンフリー社製のものがある。

(1) スペリー・サン型磁気式方位測定器、村田式孔井記録傾斜儀

シングルショット式とマルチショット式がある。図-39にシングルショット式の例に示す。

スペリー・サン測定器の精度は垂直方向で1目盛1°になっているが、機械的誤差はないものとして拡大レンズを使用すれば10'程度まで読み取りは可能である。測定結果が信頼できることを具体的に例を挙げて示す。

青函トンネルの作業坑の側壁に横坑を掘削した際に以前に実施した水平先進ボーリング孔跡が出現し、孔曲がり測定結果から得られた軌跡と比較して大差ないことが2例認められている。その1例は掘進開始地点から358m離れた位置で、測定結果が実際の位置に対し垂直方向で+0.58m、水平方向で右0.29mの誤差であった(図-40)。2例目は、他のボーリング孔の348mの位置で、同様に垂直方向で+1.58m、水平方向で右1.8mの誤差であった¹⁾。

(2) 電気式・ジャイロコンパス、TV on-line システム

ジャイロコンパスによる孔曲がり測定器は、超高速に回転するコンパスが一定の方向を向き続けるという性質を利用したものである。このシステムの特徴は、①磁性

を有する鉄管の中でも方位、傾斜角が測定できる、②鉛直方向・水平方向 360°の全方位が測定できる、③測定器をボーリング孔内に停止させることなく移動しながら連続測定が可能で測定時間が短い、④測定精度がきわめて高精度である、という長所がある。ただし、数百mという長さの測定は今のところできないようである。TV on-line システムは最先端の超小型テレビカメラをボーリング孔内に挿入し、コンパスユニットから傾斜角度、方位角度をケーブルで地上に電送し、地上のモニター TV に画像として映し装置である。

8-3 トンネルの地質調査における適切なボーリング位置

トンネルの地質調査ではボーリング孔がトンネル断面内に入らないように計画することが肝要である(図-41)。なぜならばボーリング孔が貫通することでこれが新たな水みちとなることがあり、湧水のない乾燥したトンネルでもそのために路盤が泥濘化し作業環境を悪くしたり、水みちを形成することとなったボーリング孔に切羽が接近することで、切羽が崩壊したりすることがあるからである。一般に、ボーリング調査終了後はその孔はセメントなどで十分充填するようにしているが、十分でないのが現状である。とくに土かぶり大きい場合には、セメントミルクをロッドを通して押し込んでもブリージング現象もあり、効いていないことが多い。本当に孔埋めをするなら注入ポンプで高圧で地盤改良するつもりで注入しなければ効果がないといっても過言ではない。トンネルルートが決定していない場合にはやむを得ないが、ルートが決まり設計のための調査では、トンネル断面を避け

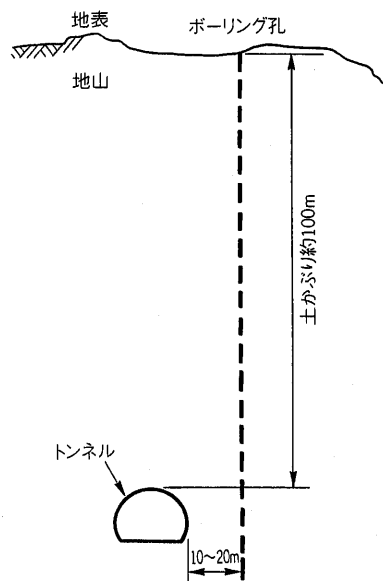


図-41 トンネルのボーリング調査位置

て行うのが望ましい。かといってトンネルから離れ過ぎると調査の目的を果たせないということになりかねないので、トンネル側面から大体 10~20m 程度を目安に入るようにすれば妥当であるといえる。その場合もしっかりと孔埋めを行わなければならないことはいうまでもない。

位置選定にあたって、現実的には地形が急峻であったり、道路がなかったりして機械運搬が困難な場合があり、必ずしも上記の条件どおりにいかないことがある。こういう場合には道路脇や道路から少し離れた比較的平坦地を選んで実施するのが実状であり、その地点がトンネルあるいは周辺の地質状況を反映すると考えられる場合はやむを得ないことであろう。

都市部での開削駅部のボーリング調査でも同様な注意が必要である。開削が計画された地盤の中に不透水層や難透水層が存在する場合、ボーリング調査で孔埋めをしたつもりでも本工事で開削していくと不透水層に近づくにつれ、不完全な孔埋めの状態になっている場合には、ボーリング孔から地下水が噴き上げ開削部が水没するという事故を生じる恐れがあり、現実にその疑いのあった現場もある。

このようなことから、とくに不透水層と被圧地下水を胚胎した地層が存在するような場合には、ボーリングの位置の選定に十分な注意が必要である。

8-4 ボーリング調査の整理

8-4-1 ボーリングコアの整理

採取されたコアは木箱あるいはプラスチック製のふた付きの箱に収納する。コア箱は長さ 1m で 4~5 列のコアが格納できるものが一般的である。コア箱には、調査件名、調査位置、ボーリング番号、深度、コア箱の通し番号(〇〇のうち〇〇)、会社名などを記載する。コアが採取されなかった部分や試験などで抜き取った部分には、そのあいた区間にその旨を書いたコマ(木片)を入れておく。

コアは、土質あるいは岩質、コア採取率、棒状・岩片状などのコアの採取状態、風化・変質の程度、亀裂の程度・方向、色調、硬軟、混入物、礫などの種類・大きさ、など地質状況を総合的に判断し評価するための貴重な情報を有しているものであるから注意深く観察し、整理・保存する必要がある^{3),6)}。

8-4-2 ボーリング柱状図

これらの観察結果、せん孔状況および孔内試験などは、岩盤ボーリングの場合、図-42のようなボーリング柱状図に明記しておくことよい。ボーリング柱状図の様式は、調査機関や目的によって多少異なる。以前は手書きのものが多かったが、最近ではパソコンによっていろいろな

工事件名										発注	
ボーリングNo.		線 k m付近						ボーリング柱状図			
着手年月	年月	使用機械	コア採取率 %		請負者		主任技術者		工法		特記事項
孔口標高	m		平均RQD %		専門技術者		試す技術者				
方位	N・	孔径	平均1掘進長 m		全掘進時間 h		コア鑑定者				
角度			平均掘進率 m		検査立合者						
掘進長	m										

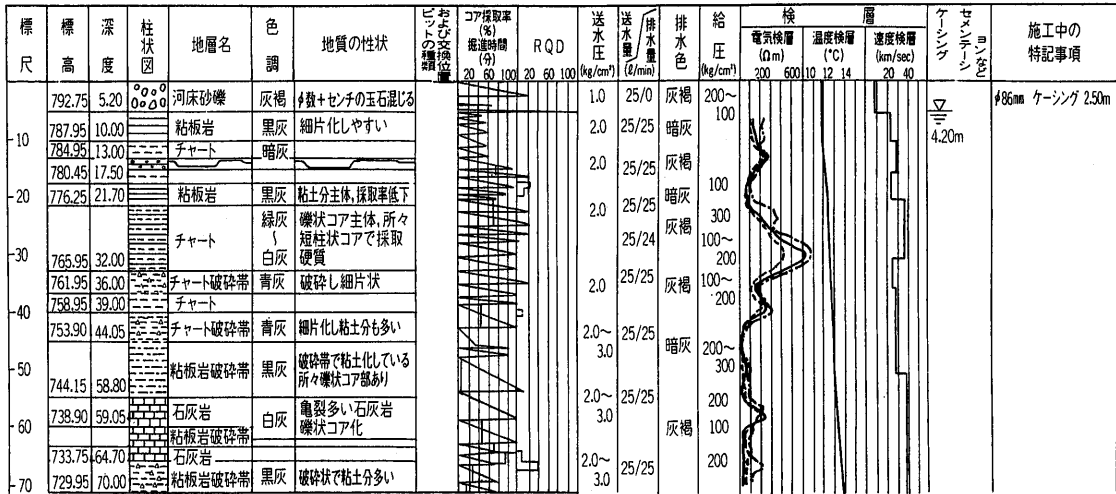


図-42 ボーリング柱状図

様式で容易に作成できるソフトが市販されている。土質ボーリングの柱状図の様式は、地盤工学会で定めたものを使用している場合が多い。土質柱状図には標準貫入試験によるN値を記入する欄があり、ボーリング柱状図の記事欄にはコアの観察結果だけではなく、せん孔中の状況も地質を総合的に判定する情報になるので、それも記述しておくのがよい。一般にコアの観察事項は柱状図に書き、せん孔中の手応えや作業中の変化などの状況は報告書の本文中に記述されていることが多いが、柱状図の記事欄中にもせん孔中の状況を記述することが望ましい。

記載項目の中でコア採取率には小片状のコア、粘土でもコアとして扱われる。ときにはスライムでも採取率の中に入れられることがあるので、採取率だけで地質の良否を判断することは適当ではない。したがって、棒状の良好なコアだけの採取率で岩盤の良否を判断するのが現実的である。その考えに沿ったものにR.Q.D(Rock Quality Designation)がある。これはある区間、例えば1m間に10cm以上のコアの長さの総和を%で表すもので、68cmあればR.Q.Dは68%ということになり、数字が大きければそれだけ良好な岩盤であるということである。

コアは持ち運びが不便でどこでも必要なときにいつで

も観察できるというものではないし、長い間保存しておく乾燥したりあるいは凍結・溶解したりして色調など見かけが変化してしまうし、保存場所や保存費用の制約などがあって放棄せざるを得ない場合もあるからコア写真として撮影しておくことが必須である。最近ではデジタルカメラによる撮影も行われ、電子的に保存するようになってきている。また、孔内にカメラを挿入し、壁面を画像として撮影したものを画像処理してコア状に表現したり、地層の走向・傾斜や亀裂などの統計処理など各種の検討ができるようなBIP(Borehole Image Processing)といった手法も実用に供されている。この方法を用いればコアが採取できなかった区間でもコアとして再現でき、またコア採取の必要がなければせん孔だけでコア採取したときと同様な効果を得ることができる。

8-4-3 ボーリングのデータベース化

最近ではパソコンなど電子機器が発達し、ボーリングデータを電子媒体を介して作成したり、保存したりあるいは検索することができるようになってきた。さらに近い将来、無線電話回線などを利用して現場から直接必要などころへ電送することができるようになるであろうし、現に一部実行しているところもあるようである。

ボーリングの調査報告書やボーリングデータは今までは紙で提出したり保存されてきたが、今後はフロッピー・

ディスクやMOあるいはCD-ROM,そしてコンパクト・フラッシュ・カードといった媒体に収録し,保存するようになるものと思われる。さらに簡単な報告などでは上記のような中間媒体を利用せず直接電子メールで報告することも考えられる。

このような電子機器を利用したデータの保存方法は場所をとらず,膨大なデータ検索も容易に即座に行うことができるという最大のメリットを有している。

近年,一部の官公庁や地方自治体などそして民間も含めて,上記のようにフロッピー・ディスクやMOあるいはCD-ROMによる提出を求めているところがある。こうしたことからできるだけ統一した保存様式などの整備が必要になるものと思われる。

(文責: 蝦名克彦・日本鉄道建設公団設計技術室補佐)

参 考 文 献

- 1) 前田憲一・蝦名克彦: 水平長尺ボーリング工入門(1)~(5), トンネルと地下 Vol.9, No.8~12, 土木工学社, 1978.8~12.
- 2) 北村章: 青函トンネルにおける最近の話題, '80トンネル技術講演会テキスト, 日本トンネル技術協会, 昭和55年2月21日
- 3) 持田豊・前田憲一・蝦名克彦: 青函トンネルにおける長孔ボーリングについて, 日本応用地質学会, 昭和56年度シンポジウムおよび研究発表会.
- 4) 蝦名克彦・矢部哲雄・服部修一: 青函海底トンネル建設工事における先進ボーリングによる地質の先方予知と実績, 応用地質, 第23巻, 第2号, 日本応用地質学会, pp.20~29, 1982.6.
- 5) 新編ボーリングポケットブック: 社団法人全国地質調査業協会連合会編, 1997. 2.
- 6) 池田和彦・大島洋志: わかりやすい土質地質学入門, 土木工学社, 1997. 5.

【新刊のご案内】



景気浮揚は温泉の有効利用で!! 続 きみの庭にも温泉が出る その後の温泉開発と建設の考え方

石井康夫・俣野恭寛 共著

新書判 219頁 本体価格1,200円 円210円

本書は『きみの庭にも温泉が出る』—温泉さがしと利用法の補充書として,バブル景気発生の原因と「ふるさと創生一億円」に関する温泉開発状況およびバブル崩壊後の温泉景気について解説しているほか,温泉の一般的知識として温泉の分布,温泉の成因と寿命,最近の温泉探査技術とその得失などについて紹介している。また,著者らが体験した外国の温泉にふれ,日本人と外国人の温泉感の違いについて考察し,将来の温泉開発の考え方を示している。

★ 主要目次 ★

- | | |
|----------------------|--------------------|
| 1. バブル景気と『ふるさと創生一億円』 | 6. 温泉の探査技術 |
| 2. バブル崩壊後の温泉景気 | 7. 温泉談義アラカルト |
| 3. 温泉とは | 8. 外国の温泉 |
| 4. 温泉の分布と特徴 | 9. 日本の地熱開発 |
| 5. 温泉の成因と寿命 | 10. 将来の温泉開発と建設の考え方 |

株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03)3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

連載講座

都市部でのシールド立坑に係わる新技術(6)

立坑の構築技術(3) ケーソン工法の設計と施工例(その2)

「都市部でのシールド立坑に係わる新技術」
連載講座小委員会

4. ケーソンの設計

4-1 設計の基本

立坑用ケーソンの設計方法について、明確に定めた基準などは少なく、一般的には「道路橋示方書・同解説IV 下部構造編」のケーソン基礎の設計に準じて設計を行っている。また、耐震設計については、上・下水道などの施設に対する「耐震工法指針・解説」などが示されている場合には、それらに準拠した設計を行っている。

以下に、上記基準などに準じた立坑用ケーソンの設計方法について概略を述べる。

4-1-1 設計手順

一般的な立坑用ケーソンの設計手順を図-17に示す。

ここで、開削工法による立坑の設計法と比較すると、ケーソンの沈設過程に応じて施工中に発生する応力の照査や、沈設するための必要重量が満たされているかの判断が必要となってくる。また、ケーソン工法にはニューマチックケーソン工法とオープンケーソン工法があり、部材によっては施工中の荷重状態が異なるので注意が必要となる。

4-1-2 荷重条件

立坑用ケーソンの設計における外力は、土水圧が支配的になる。水圧は、地下水位面から静水圧分布として考えるが、土圧の考え方は、施工時はクーロンの主動土圧とし、粘着力による土圧の低減は考慮しない。竣工時は静止土圧で砂質土と粘性土の区別をしないこととする。土圧については、各種の計測により、ある深さ以上になると増加しないことが知られている。そこで、設計では15m以深では一定の土圧が作用すると考える。また、安全側を考慮し、土圧係数は静止および主動とも下限値を0.5とする。

4-2 沈下関係の検討

(1) 沈下の判定

ケーソンは、作業室内または躯体内部の土砂を掘削しながら沈下させる工法であり、各リフトごとの状態で次

式を満足させなければならない。

$$W_c + W_w > U + F + R$$

W_c : 躯体重量 kN(tf)

W_w : ニューマチックケーソンの場合は水荷重,
オープンケーソンの場合は圧入アンカーなどの荷重(kN(tf))

U : ニューマチックケーソンの場合は揚圧力,

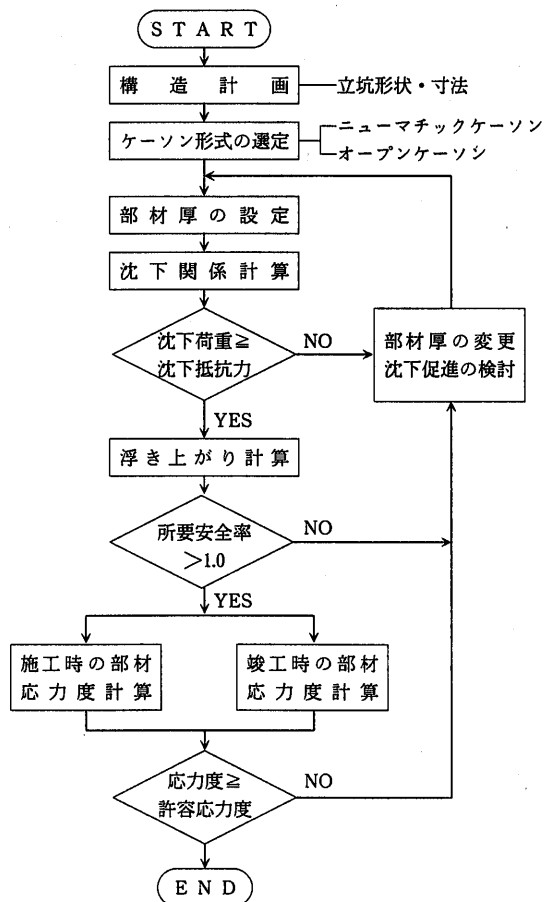


図-17 ケーソン設計手順

(2) 終局限界状態に対する検討

① 断面破壊

材料の終局のひずみ

鋼	材	引張ひずみ：0.1%
コンクリート		圧縮ひずみ：0.35%(通常), 0.45-0.0025 f_{cd} [%] (圧縮強度 $f_{cd} \geq 60$ MPa)

材料係数

	基本的な荷重組み合わせの場合	偶発的な荷重組み合わせの場合
鋼 材 γ_s	1.15	1.0
コンクリート γ_c	1.5(1.3*)	1.15

* ISO に準拠した品質管理が行われる場合

平均せん断応力 τ_u について、

$$\tau_u > 0.07f_{cd} / \gamma_c$$

となる場合には、せん断補強筋についての検討を行う。

② 形状安定性

地山の变形係数が小さく覆工が薄い場合に、座屈などに対する安定性検討を行う。

③ 静的つり合い

浮力に対して次式により照査する。

$$\text{鉛直荷重} \geq \text{浮力} \times 1.05$$

(3) 使用限界状態に対する検討

① ひび割れ限界

BEAL91 による規定として、有害ひび割れ発生に対する照査指標を鉄筋引張応力の上限值 σ_s で与えている。

$$\sigma_s = \max [240\text{MPa}, 110\sqrt{\eta f_{td}}], \\ \max [200\text{MPa}, 90\sqrt{\eta f_{td}}] (\text{腐食性環境の場合})$$

ここで、

$$\eta : \text{ひび割れ係数} = 1.6(\text{高強度異形棒鋼, 径} \geq 6 \text{ mm}) \\ 1.3(\text{高強度異形棒鋼, 径} \leq 6 \text{ mm}) \\ 1.0(\text{高強度丸鋼})$$

f_{td} : コンクリートの引張強度

上記に加え、BAEL91 により鉄筋の最大径と間隔が規定される。

圧は有利に作用する場合がある(不利に作用する場合は G_{max} に含まれる)。

Q_1 : 主たる変動荷重。道路、鉄道、水路等の活荷重や施工荷重。

γ_{Q1} : 主たる変動荷重に対する荷重係数。通常 1.5 とする(鉄道では 1.45)。

$\Sigma \gamma_{Qi} \Psi_{Qi} Q_i$: 従たる変動荷重(Ψ : 荷重組み合わせ係数)これより荷重組み合わせとして以下のように表現される。

$$1.35G_{max} + G_w + 1.5Q_1$$

(1979 Common Directives による基本的な荷重の組み合わせ式)

$$\gamma_{FS} S (\gamma_{F10max} G_{max} + \gamma_{F10min} G_{min} + \gamma_{F1Q1} Q_1 + \Sigma \gamma_{FiQi} \Psi_{Qi} Q_i)$$

ここで、

γ_{FS} : 応力算定の不確実性、モデル化の単純化等を考慮した係数で、いわゆる構造解析係数に相当。通常 1.125~1.15 とする。

γ_{F1} : 荷重係数。水圧に対しては 1.0 付近、土圧に対しては 1.2 付近の値とする。

S : 断面力を求めるための関数。

これより荷重組み合わせとして以下のように表現される。

$$1.35 * G_{max} + 1.15G_w + 1.5Q_1 (\text{荷重の算定が困難な場合はより大きな値とする})$$

(BAEL91, Eurocode2 による偶発的な荷重の組み合わせ)

$$G_{max} + G_{min} + FA + \Psi_{11} Q_{11} + \Sigma \Psi_{2i} Q_i$$

地震、爆発の場合の荷重組み合わせは以下のように表される。

$$G_{max} + G_w + \text{地震(または爆発)の影響} + 0.6Q_1$$

(2) 使用限界状態に対する検討

$$G_{max} + G_{min} + Q_1 + \Sigma \gamma_{Qi} \Psi_{Qi} Q_i$$

トンネル供用時の荷重組み合わせは以下のように表される。

$$G_{max} + G_w + Q_1 \text{ または } G_{max} + G_w$$

4. 組み立て機構の設計における荷重組み合わせ

(CM66(フランスの鋼構造規格)による基本的な組み合わせ)

$$4/3G_{max} + G_{min} + 3/2Q$$

(Eurocode3 による基本的な組み合わせ)

$$1.35G_{max} + G_{min} + 1.5Q$$

(CM66 規格及び Eurocode3 による偶発的な組み合わせ)

$$G_{max} + G_{min} + FA$$

参考文献

- 1) 小山・太田・竹内：シールドトンネル覆工に作用する土圧・水圧、山留とシールド工事における土圧・水圧と地盤の挙動に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、1992。
- 2) 入江・新治・大塚：シールドトンネルの覆工技術(7)、トンネルと地下、Vol.24, No.3, 1993。
- 3) M.Pascal GUEDON:AFTES RECOMMANDATIONS RELATIVES LA CONCEPTION, LE DIMENSIONNEMENT ET L'EXECUTION DES REVETEMENTS EN VOUSOIRS PREFABRIQUES EN BETON ARME INSTALLES A L'ARRIERE D'UN TUNNELIER, Tunnel et Ouvrages Souterrains, N° 147, 1998。
- 4) 土木学会：セグメントの設計、トンネル・ライブラリー第

- 6号、1994。
- 5) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド編)・同解説、1996。
- 6) Gesta, P.: RECOMMENDATIONS FOR USE OF CONVERGENCE - CONFINEMENT METHOD, Tunnel et Ouvrages Souterrains, N° 73, 1986。
- 7) 木村・渡邊・小泉：全周地盤ばねモデルを用いたセグメント設計の合理化に関する研究、トンネル工学研究論文・報告集、Vol.6, 1996。
- 8) 土木学会：都市 NATM とシールド工法との境界領域、トンネルライブラリー第8号、1996。
- 9) Duddeck H., Erdmann J.: Structural design models for tunnels, Tunnelling'82, Proc. 3rd Int. Symp. Institution of Mining and Metallurgy, 1983。

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(12)

第Ⅲ編 地質調査法(4)

「応用地質学」連載講座小委員会

9. ボーリング孔を利用して行う調査

9-1 物理検層

物理検層は、計測によって得られた物性値を採取したコアと対比するなどして、地山の硬軟、割れ目の状況、風化・破碎状況、変質程度などを把握するものである。また、地表から実施した物理探査結果と対比することにより地山全体の評価を行ううえでの貴重なデータとなる。

9-1-1 速度検層

(1) 検層の概要

速度検層は、ボーリング孔を利用して弾性波速度(P波、S波)を求めるものである。

図-43に山岳トンネルでよく用いられるダウンホール法を示す。これは、孔口近傍で発破などによって起振し、ボーリング孔に沿って深度方向に伝播する弾性波を孔内に予め挿入しておいた受振器で計測し、弾性波伝播速度を求める方法である。このとき、孔内固着方式の受振器ケーブルを用いる場合以外は、ボーリング孔内に水がないと測定は困難である。

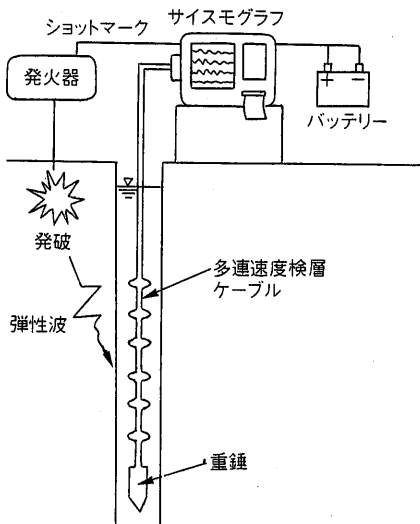


図-43 速度検層概要

このほかに、孔内起振受振(サスペンション)方式、孔内で発振し孔口近傍の地表で受振するアップホール方式、複数のボーリング孔間で孔間速度を計測するクロスホール方式などがある。

また、施工中の切羽から行う先進(水平)ボーリングを利用して、切羽前方地山の弾性波速度を計測する方法もある。

山岳トンネルではP波速度を計測する機会が多いが、土砂地山ではS波速度を計測することがある。また、地山の動的弾性定数を求める場合には、P波、S波の両方の計測が必要である。

受振点間隔は、土質地盤で1m、岩盤では2mを標準としている^{1),2)}。

(2) 結果の適用と留意点

速度検層は地表弾性波探査に比べて以下に示すような利点がある。

- ① 密な調査となるため、計測精度が高い。
- ② ボーリングコアと直接対比できるため、総合的に地山を評価できる。
- ③ 地表弾性波探査では解析困難な中間に高速度層が挟在している場合でも解析ができる。
- ④ P波、S波を計測することにより、地山の動的弾性定数を算出できる。

なお、速度検層で得られた速度値は、地表弾性波探査で得られたものよりも低い傾向がある。これは計測対象範囲の大きさによるものと考えられる。また、地表弾性波探査の測定方向がほぼ水平方向であるのに対し、速度検層では鉛直方向である。弾性波速度は割れ目の方向に依存するため、両者で異なる速度値を示すことがある。そのため、速度値の評価において割れ目の方向を考慮し総合的に検討する必要がある。

また、速度検層や地表弾性波探査で得られた地山の弾性波速度 V_p とコアの超音波速度 V_{pc} から岩盤良好度(亀裂係数) $D = (P_c/V_{pc})^2$ を求め、岩盤の緩み程度を評価することができる。

9-1-2 電気検層

(1) 検層の概要

電気検層は地山の電気的性質をもとに、地層の厚さや連続性、帯水層や変質部などを推定する目的で行う。また、電気検層の結果は、地表電気探査結果の評価・解釈を行ううえでも重要なデータとなる。

電気検層には測定原理や電極配置法などによって多くの種類があるが、トンネルの地質調査では、比抵抗法と自然電位法の2つがよく用いられている。

1) 比抵抗法

比抵抗法としては、下記の3つが一般的である。

① ノルマル検層

ノルマル検層(図-44)はボーリング孔内に電流電極A、電位電極Mを配置し、電流電極Bと電位電極Nを地表に配置する。孔内電極A、Mを孔内で移動しながら連続的に計測を行う。したがって、孔内水がないと測定は困難である。このとき、比抵抗 $\rho(\Omega \cdot m)$ は次式で求める。

$$\rho = 4\pi aV/I \quad (1)$$

ただし、 ρ : 比抵抗($\Omega \cdot m$)

a : AM間の電極間隔(m)

標準は0.25, 0.50, 1.0mの3種類^{1,2)}

V : M点の電位(V(ボルト))

I : A点の電流(A(アンペア))

② マイクロ検層

ノルマル検層の電極間隔を2.5~5.0cmと短くし、孔壁に圧着して孔壁面近傍の比抵抗を計測する方法。土木分野では主として薄層の検出を目的として実施する。

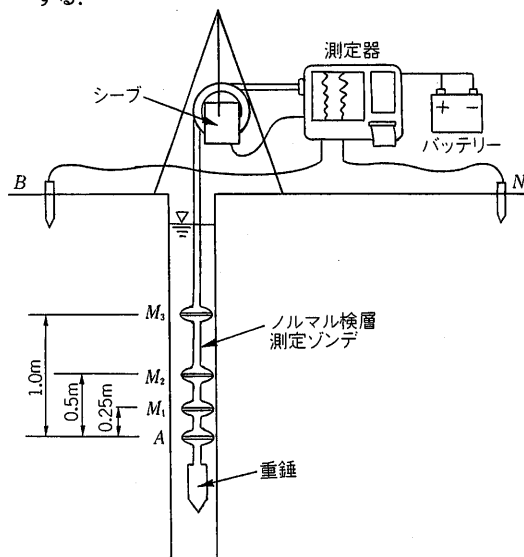


図-44 電気検層概要

③ 多連ノルマル電気検層³⁾

多連電極ケーブルを用いてノルマル配置の測定を行い、データ処理によって電流に指向性を持たせる検層。それによって孔内水、泥壁および泥水浸入領域の影響を受けない岩盤の比抵抗を求める。

2) 自然電位法

孔内に電極1極を挿入して連続移動させ、地表電極を基準にして孔内に生じている電気化学的電位を計測する方法。比抵抗法と同時に計測するのが一般的である。比抵抗曲線と自然電位曲線とを対比することで、湧水箇所や帯水層の位置が推定できる。

(2) 結果の適用と留意点

① 見掛け比抵抗と真の比抵抗

電気検層で求められる比抵抗は、孔内水、泥壁、泥水浸入領域および地山などの平均的な比抵抗を示すもので、見掛け比抵抗 ρ_a と呼ばれる。ただし、土木分野では電極間隔が1m程度あれば真の比抵抗 ρ_i とみなして評価することが多い。また、種々の仮定条件があるものの、泥水比抵抗 ρ_w と孔内温度がわかれば、見掛け比抵抗 ρ_a から真の比抵抗 ρ_i を算出することができる。

② 保護管を用いた測定

電気検層は普通裸孔で実施する。しかし、未固結層や著しい変質部などで孔壁崩壊が著しく、裸孔では試験ができないことがよくある。このような場合には、開口率(孔面積が全表面積に占める比率)3~5%程度の有孔塩化ビニル管であれば、実用上は有効な測定ができるとの報告がある⁴⁾。

9-1-3 その他の物理検層

(1) 孔径検層(キャリパー検層)

孔径検層は、孔壁に2点以上で接触させたアームの開き角度の変化からボーリング外径の連続的な変化を計測するものである。削孔後の孔壁の崩壊や押し出しなどによる変形を測定することで、地山の自立性の評価に用いるほか、他の検層結果と対比することで岩質の判定や密度検層の測定値の補正に用いる。

(2) 地下水検層

孔内をトレーサ液(食塩、ラジオアイソトープ、温水)に置換し、地下水が孔内に流入することによって生じるトレーサ濃度の変化を継続的に測定し、希釈する速さによって地下水の流動層を把握する。

食塩をトレーサとする場合、あらかじめボーリング孔内に重量濃度で1%程度のNaClを投入して十分攪拌し、孔内水の電気比抵抗をバックグランド値の1/5~1/10に低下させた後、多連の電極ケーブル(25cm間隔)を用いて孔内水の比抵抗変化を経時的に測定する。抵抗の経時

変化曲線から、地下水の流動状況を判断する。この方法は複数のボーリング孔間においても実施することができ、地下水の流動区間および概略の流動速度を把握するのに有効である。

(3) 温度検層

温度検層はボーリング孔内水の温度を連続的に計測し、孔内水温の変化から湧水・逸水・水の流動・透水層の状況あるいは高熱帯の存在などを推定するものである。

(4) ボアホールテレビ

ボアホールテレビは、地層の成層状況、亀裂・断層・断層帯の状況などを小型カメラ、テレビで直接観察するものである。ボーリングコアだけでは判断できない亀裂や断層の走向・傾斜、開口状況などを計測することができる(8-4-2参照)。また、孔内水に浮遊しているスライム

などの動きにより湧水・逸水など地下水の流動状況を観察できることもある。

9-2 ボーリング孔を利用した地下水調査法

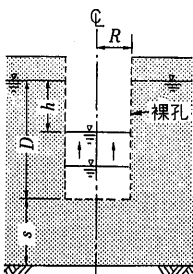
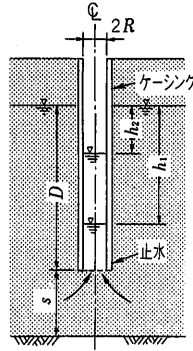
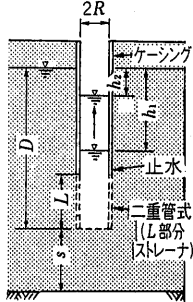
9-2-1 単孔式現場透水試験

(1) 試験の概要

土砂地山の透水係数を求めるために、単孔式現場透水試験がその簡便さから広く用いられている。ケーシングの有無などによりオーガー法、チューブ法、ピエゾメーター法などに区分される(表-19)。いずれも回復法、注水法による試験が可能である。

- ① オーガー法は試験深度、地下水位が浅く、ボーリング孔壁が自立する地盤に適用する。
- ② チューブ法は先端試験部分面積が小さいことから、透水性の比較的高い地盤に適用する。

表-19 単孔式現場透水試験の概要

試験方法	試験概要	透水係数算定式	特徴
オーガー法		$k = \frac{\pi^2 R}{16DCa} \times \frac{(h_2 - h_1)}{(t_2 - t_1)}$ <p>ただし、$\frac{D}{R} < 50$ Ca は一般に 1~3(1.5程度)</p>	裸孔で自立できる地盤 試験深度は10m程度まで
チューブ法 (孔底法)		$k = \frac{2\pi R}{11(t_2 - t_1)} \times 1n\left(\frac{h_1}{t_2}\right)$ <p>ただし、$15\text{cm} \leq D \leq 150\text{cm}$</p>	透水性の大きい場合に適用 試験深度は15m程度まで
ピエゾメーター法 (ケーシング法)		$k = \frac{R^2}{2L(t_2 - t_1)} 1n\left(\frac{L}{R}\right) 1n\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$ <p>ただし、$\frac{L}{R} > 8$</p>	標準的な試験方法 試験深度は10~50m程度

③ ピエゾメーター法(ケーシング法)は、先端試験区間の長さを調整できるためよく利用される。

(2) 結果の適用と留意点

単孔式透水試験は、Hvorslev らによって提案された方法であるが、元来 $10^{-6} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$ 程度の透水性の小さい地盤を対象としたものであり、 10^{-2}cm/sec 以上の高透水性地盤での試験には限界がある。また、一般に単孔式現場透水試験で求めた透水係数は、多孔式揚水試験で求めたものよりも1オーダー小さいと言われる。しかし、以下のような留意点を考慮し注意深く試験を実施すれば、ボーリング孔先端部周辺を局所的な地盤の透水性をより精度よく評価することができる^{5),6)}。

① 試験区間の孔内洗浄

孔壁保護のため泥水を用いたボーリング孔では、試験に先立ち孔内を十分に洗浄しないと、過小の透水係数となる場合がある。

② 試験区間崩壊の影響

砂・礫地盤では、回復試験中に孔径が変化するような孔壁の崩壊があれば、透水係数に影響を及ぼすので二重管による孔壁保護やストレーナ加工した測定管などの対策が必要である。

③ 自然水位の把握

自然水位は解析の基準となる水位であるが、潮位、降雨、周辺地下水利用などによって変動する。一般的には、試験孔を準備し、洗浄して1日放置した後の水位を自然水位とするのが望ましい。

④ 高透水性地盤への適用限界

高透水性地盤においては、ペーラのくみ上げでは十分に孔内水位が低下しなかったり、水位回復が早すぎたりする場合が多い。このような場合は、小型揚水ポンプによるくみ上げや間隙水圧計を用いた連続水位観測が必要である。

⑤ 透水係数の評価(精度)

単孔式現場透水試験を始め、各種透水試験で求められる透水係数の精度は、試験技術などから有効数字2桁程度であると考えられる。そのため、評価・解析時には必要以上に細かな数値の議論は避けるべきであろう。

9-2-2 多孔式揚水試験

(1) 試験の概要

多孔式揚水試験は、揚水井と複数の観測井を用いて、揚水時の観測井の水位低下量および揚水停止後の水位回復量を測定して、帯水層の平均的な透水量係数(透水係数)および貯留係数を求めるものである。本試験は透水係数が 10^{-4}cm/sec 程度以上の被圧地下水をもつ砂質～礫質地盤を対象にする。多孔式揚水試験で得られる透水

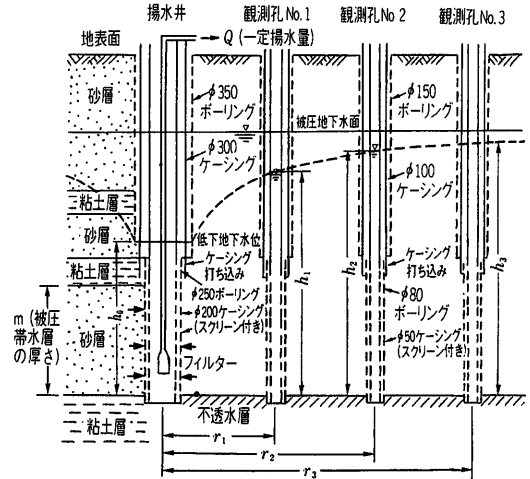


図-45 揚水試験概要(被圧地下水)⁷⁾

係数をもっとも精度が高いが、調査が大がかりであり調査費用も高価であるため、大きな水問題があると想定される場合に限り実施されている。

① 試験配置

揚水試験にあたっては、事前に地質構成を把握し対象とする帯水層を明確にしたうえで、試験井の配置、本数、掘削深度、孔径、スクリーン位置を決定する(図-45)。帯水層が均質な場合は1測線でもよいが、不均質な場合は十文字状や放射状に観測孔を配置する。観測孔の間隔は、解析時に揚水からの距離を対数グラフにプロットして整理するため、被圧地下水の場合は5, 10, 20, 40, 80m、不圧地下水の場合は、2, 5, 10, 20mのように倍数で決めていくとよい。

② 試験方法

揚水試験は、予備揚水試験1日、段階揚水試験1日(5段階)、連続揚水試験2～3日、回復試験1日を実施する。

予備揚水試験は揚水量に対する地下水位変動の概況、段階揚水試験の計画を行うために実施する。

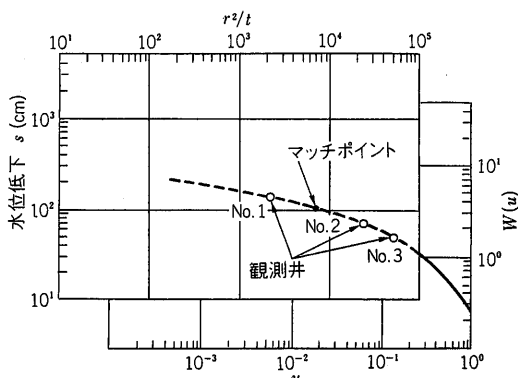
段階揚水試験は、揚水量を4～5段階に変化させ、そのときの揚水量と水位低下量の関係から限界揚水量・適正揚水量を決める。

連続揚水試験の揚水量は適正揚水量以下とし、試験は段階揚水試験後地下水位が元の自然水位に回復したことを確認したうえで実施する。

回復試験は、連続揚水試験終了と同時に試験を開始し、各井戸の水位が初期水位に回復した時点で終了する。

(2) 解析方法

非定常解析法(タイス、ヤコブ)、定常解析法(タイムム)および回復法などが知られている^{7),8)}。



マッチポイント

$r^2/t = 6.8 \times 10^3$ $t = 500 \text{ min}$
 $s = 105$ $Q = 400 \times 10^3 \text{ cm}^3/\text{min}$
 $u = 0.02$ $T = 1.0 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{min}$
 $W(u) = 3.355$ $S = 1.2 \times 10^{-2}$

図-46 タイスの標準曲線法による解析例⁹⁾

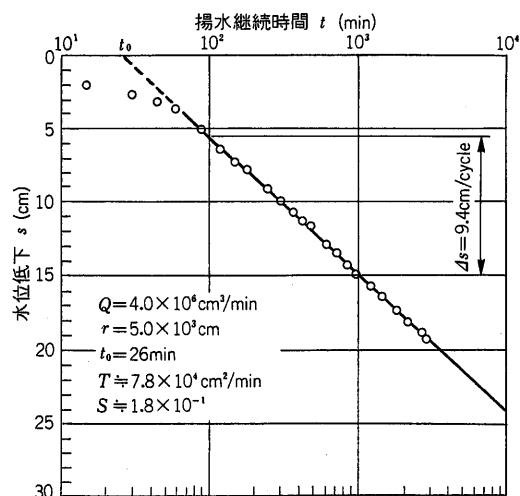


図-47 ヤコブの直線解析法の例⁹⁾

① 非定常解析法(タイスの標準曲線法)

初期の短時間の揚水と、揚水井から観測井までの距離が大きい場合に適合する。試験で得られた水位低下量 s と r^2/t の関係を両対数紙にプロットし、井戸関数 $u-W(u)$ 標準曲線と重ねて任意の合致点を定め、透水量係数 T 、貯留係数 S を求める(図-46)。

透水量係数 $T = K \cdot D = QW(u) / 4\pi s$ (2)

貯留係数 $S = 4uT(t/r^2)$ (3)

② 非定常解析法(ヤコブの直線法)

長時間の揚水と揚水井と観測井の距離が小さい(タイスの式の u が 0.02 以下)場合に適合する。試験結果から片対数紙上に s 、対数目盛に t/r^2 をとり透水量係数 T や貯留係数 S を求める(図-47)。

透水量係数 $T = K \cdot D = 2.3Q / 4\pi \Delta s$ (4)

貯留係数 $S = 2.25T(t_0/r^2)$ (5)

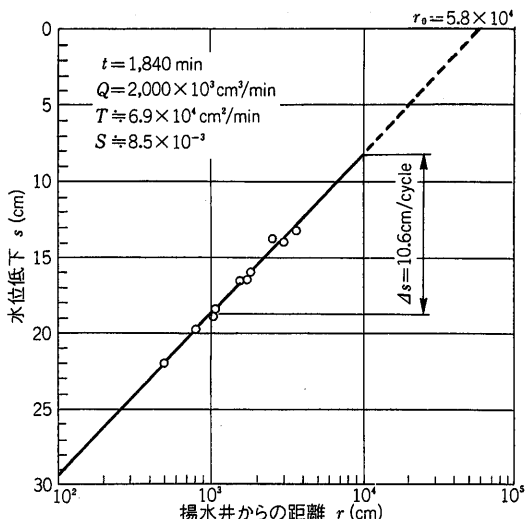


図-48 ティーム法による解析例⁹⁾

③ 定常解析法(ティームの式)

揚水井の中心から r の距離にある観測井の水位低下量 s を図-48 に示す $s-\log(r)$ にプロットし、透水量係数 T 、影響範囲 R (水位低下量の零軸の切片) を求める。ただし、貯留係数 S は求められない。

透水量係数

$T = 2.3Q \cdot \log(r_2/r_1) / 2\pi (s_1 - s_2)$ (6)

④ 回復法

長時間の揚水と、揚水井から観測井までの距離が小さいことが条件である。

透水量係数

$T = K \cdot D = 2.3Q / 4\pi \Delta s'$ (7)

上記それぞれの式において、

T : 透水量係数 (cm^2/sec)

K : 透水係数 (cm/sec)

D : 帯水層厚 (cm)

Q : 揚水量 (cm^3/sec)

$W(u)$: ウェンツェルの井戸関数

S : 貯留係数

s : 水位低下量 (cm)

r : 揚水井から観測井までの距離 (cm)

t : 揚水開始後の経過時間 (sec)

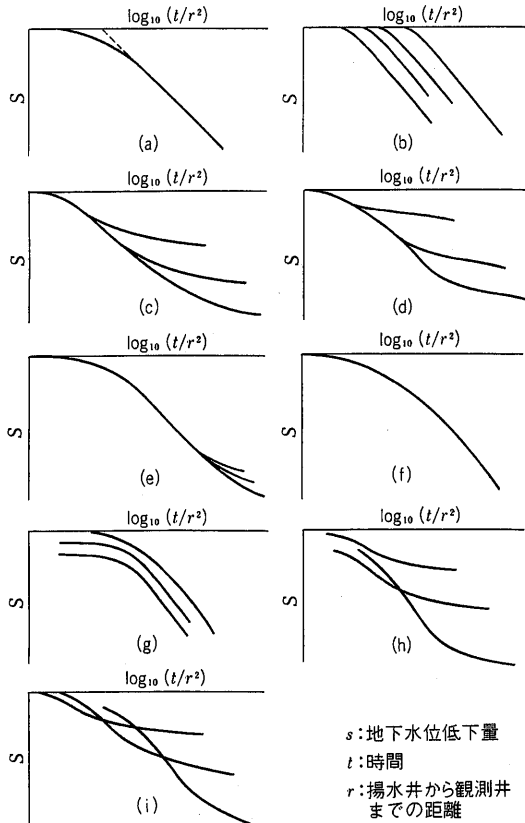
Δs : 対数1サイクル ($\log t$) の水位低下量 (cm)

t_0 : ヤコブの式で直線が $s=0$ と交差するときの t の値 (sec)

$\Delta s'$: 回復試験経過時間 t' としたときの ($\log t'/t'$) で求められる対数1サイクルの水位回復量 (cm)

(3) 解析上の留意点

解析は理想的な条件下でタイスが導いた方程式を基本としている。しかし、実際には近くの河川からの涵養がある場合、帯水層内に不透水層がある場合、難透水層を



- (a) 理想的な水位低下(Theis, Jacob).
- (b) 観測井ごとにずれが生じるが、ほぼ平行した直線関係で、試験地点近傍の帯水層内に不透水壁が存在する。
- (c) 被圧帯水層に補給水または漏水がある場合で、相当時間経過後の水位低下は止まって平衡する。
なお、自由水面をもつ不圧帯水層に地下水伏流が多量にあるときも類似した関係を示す。
- (d) (c)に類似しているが、平衡しかけた水位低下が再度進む形式のもので、重力井戸の長時間揚水にみられる。貯留係数が変化する場合である。
- (e) 水理干渉源(補給水源)が比較的遠方の場合。
- (f) 過剰揚水の場合で、上に凸な曲線になる場合。
- (g) 初期水位補正が必要な場合。
- (h), (i) 揚水井側壁の水頭損失がある場合、水理干渉を受けている場合、地層が複雑な場合などの複合条件下のもので、詳細な検討が必要である。

図-49 水位低下パターンと水理・地質条件⁹⁾

通して上下の帯水層から漏洩がある場合などさまざまな条件が想定される。

そのため、解析にあたっては図-49に示す水位低下曲線のパターンと水理・地盤条件の関係を参考にして、適切な解析方法を選択する必要がある⁹⁾。

9-2-3 湧水圧試験(JFT)

(1) 試験の概要

湧水圧試験(略称, JFT: 図-50 参照)は、軟岩～硬岩

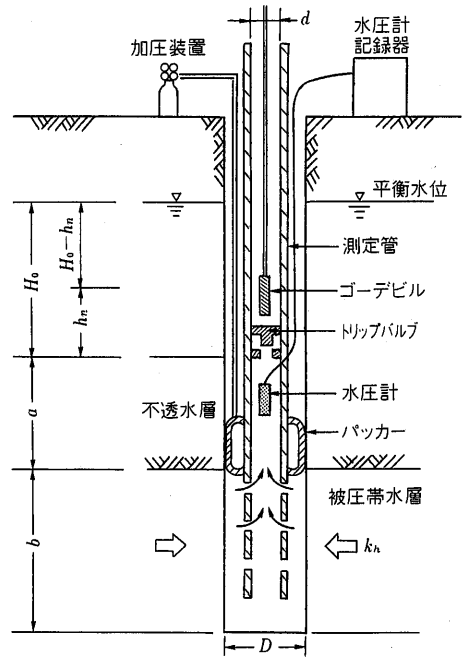


図-50 湧水圧試験装置

地山におけるトンネル地下水調査としてもっとも実績が多い。本試験は $10^{-2} \sim 10^{-4}$ cm/sec 程度の比較的透水性のよい岩盤を対象とする。孔内の任意の区間をパッカーで区切って掘削前の状況近くまで水圧を復元させた後、測定管内の水位を上昇させ、平衡水位と透水係数を求めるものである。

以下に試験実施上の留意点をまとめる¹⁰⁾。

① 試験区間の選定

トンネル調査の場合、当初設計において試験区間をトンネル天端～施工基面付近と指定されている場合が多い。しかし、良好な試験結果を得るには 10^{-4} cm/sec 程度以上の帯水層の分布とパッカーが設置できる不透水性地盤が必要である。そのため、試験区間は当初設計に縛られることなく、ボーリング掘削状況・水位変化状況をもとに決定する必要がある。また、状況によってはボーリング掘削終了後に試験区間を選定し、ダブルパッカーを用いて試験を行うことも検討する必要がある。

② パッカーの遮水性

試験区間を区切るパッカーの遮水性が、本試験結果の良否を決めると言っても過言ではない。そのため、パッカー効果が良好でないと想定される場合には、事前にパッカー位置をセメンテーションなどで補強することが望ましい。一般的にパッカーの内部圧力は、パッカー位置の水圧に $0.4 \sim 0.5$ MPa (40～50m) 程度を加えた圧力とする。

なお、パッカの遮水性のチェックのために、水位測定管と孔壁の隙間の水位を測定する必要がある。トリップバルブ開放後に隙間の水位が低下するようであればパッカの遮水が完全でない判断できる。また、測定管内の水位を水圧計で測定している場合には、試験開始前に隙間に水を補給し、測定管内の水位(平衡水位)が変化するかどうかでパッカの効果を判定できる。

③ トリップバルブの位置

トリップバルブは、パッカの直上に設置することが多い。しかし、本試験は乱流を生じさせない範囲で水位の回復を測定しなければならないため、透水性のよい岩盤ではトリップバルブをパッカから離して設置するなどの工夫が必要である。

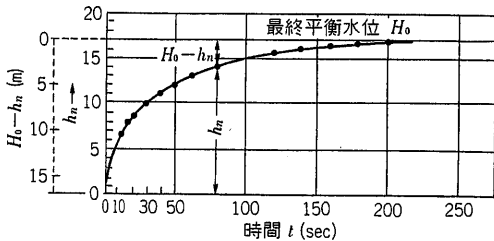
(2) 整理・解析方法

整理・解析は以下の手順で行う。

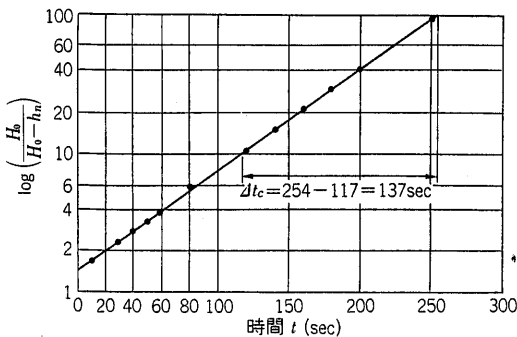
① JFT 解析図の作成

試験データをもとに水位上昇曲線(図-51(a))を作成する。試験は上昇水位が1時間あたり1cm未達となったときに終了し、その水位を平衡水位(JFT最高水位) H_0 とみなす。なお、トリップバルブよりも下に水圧計を設置した装置では、バルブ開放前の安定水圧を平衡水位として利用できる。

次に平衡水位 H_0 と任意の時間 t_n 秒後の水位上昇 h_n をもとに、 $\log\{H_0/(H_0-h_n)\}-t$ の関係図を作成する(図-51(b))。



(a) 水位上昇曲線



(b) $\log\left(\frac{H_0}{H_0-h_n}\right)-t$ 関係図

図-51 JFT 解析図¹⁰⁾

② 透水係数の算出

湧水圧試験はピエゾメータ法の一つと考えることができ、解析は Hvorslev の理論式を用いる。

a) 被圧地下水の場合

$$K_h = \frac{0.66 \cdot d^2}{b \cdot (t_{n+1} - t_n)} \cdot \log \frac{4mb}{D} \cdot \log \frac{H_0 - h_n}{H_0 - h_{n+1}} \quad (8)$$

b) 不圧地下水の場合

$$K_v = \frac{0.66 \cdot d^2}{b \cdot (t_{n+1} - t_n)} \cdot \log \frac{2mb}{D} \cdot \log \frac{H_0 - h_n}{H_0 - h_{n+1}} \quad (9)$$

ただし、

K_h : 水平方向の透水係数(cm/sec)

K_v : 鉛直方向の透水係数(cm/sec)

b : 測定区間長(cm(解析例 500cm))

d : 測定管内径(cm(解析例 3.7cm))

D : ボーリング孔径(cm(解析例 6.6cm))

m : 水平方向と鉛直方向の透水係数の比

$$m = (K_h/K_v)^{1/2}$$

とくに指定のない限りは $m=1$ とする

H_0 : 平衡水位(JFT 最高水位)(cm)

h_n, h_{n+1} : 測定開始後 t_n, t_{n+1} 後のトリップバルブからの水位(cm)

③ 解析例

図-51(b)における傾きは $\log(H_0-h_n/H_0-h_{n+1})/(t_{n+1}-t_n)$ であり、縦軸1サイクルの時間の読みを Δt_c とすれば、(8)式は次のようになる。

$$K_h = \frac{0.66 \cdot d^2}{b \cdot \Delta t_c} \cdot \log \frac{4mb}{D} \quad (10)$$

図-51(b)の $\Delta t_c = 137$ sec を(10)式に代入し、透水係数 $K_h \approx 3.3 \times 10^{-4}$ cm/sec となる。なお、測定区間長などは、上記ただし書きカッコ内の条件とする。

$$K_h = \frac{0.66 \cdot 3.7^2}{500 \cdot 137} \cdot \log \frac{4 \cdot 1 \cdot 500}{6.6} \approx 3.3 \times 10^{-4}$$

④ 解析上の留意点

パッカで完全に遮水することが困難な場合、水位上昇が遅くなり、求められる透水係数は小さめの値となる傾向がある。また、基準式は鉛直・水平方向の透水性が等しいという条件によっているが、実際の岩盤には異方性があり、亀裂の分布状況を考慮して透水性を評価する必要がある。

9-2-4 ルジオン試験(注水試験)

(1) 試験の概要

ルジオン試験は、孔内をパッカで区切った試験区間内

に一定圧力で注水し、圧力と注水量から透水性を求めるものである。注水試験とも言われ、主としてダム基礎岩盤の透水性把握に用いられる。

トンネルにおいては、岩盤注入の止水効果を評価するために利用する場合がある。

(2) 結果の適用と留意点

圧力 $P=10\text{kgf/cm}^2$ を標準として注水したときの定常注水量から次式でルジオン値 L_u を求める。

$$L_u = 10Q/PL \quad (11)$$

ただし、 L_u : ルジオン値

Q : 圧力 P のときの注水量(ℓ/min)

P : 注入時の圧力(kgf/cm^2)

L : 試験区間長(m)

ルジオン試験においてダルシーの法則が成立すると仮定すると、透水係数 K は次式で求められる¹⁷⁾。

$$K = Q/2\pi HL \cdot \log L/r \quad (12)$$

ただし、 K : 透水係数(cm/sec)

Q : 注 入 量(cm^3/sec)

H : 水 頭 差(cm)

L : 試験区間(cm)

r : 試験孔の半径(cm)

一般に $1L_u$ は透水係数 $1.3 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ に相当する。なお、ルジオン値が $10 \sim 20$ と大きくなった場合はダルシーの法則が適用できなくなる。ルジオン試験装置の機構は前述の湧水圧試験装置と同じであり、湧水圧試験に引き続きルジオン試験(注水試験)を実施するような場合があるが、各試験の適用限界を考慮のうえで各試験結果を評価する必要がある。

上記各種透水試験で求められる透水係数の精度は、試験技術などから有効数字2桁程度であると考えられる。そのため、評価・解析時には必要以上に細かな数値の議論は避けるべきであろう。

9-2-5 その他の地下水調査法

都市トンネルなどにおいて、周辺地下水環境への影響を考慮する場合には、地盤の透水性とともに帯水層の位置、地下水の流れの方向を把握することが重要である。

(1) 孔内微流速測定

孔内には各地層がもつ水頭の相違によって鉛直方向の流れが存在することがある。この流れを自然水位と人工水位(揚水あるいは注水)の状態測定し、地層の透水性や地下水の流動あるいは岩盤の割れ目の存在を推定しようとする手法である。透水係数が 10^{-3}cm/sec 以上の透水性が比較的高い地盤に適用する。

(2) 孔内流向・流速測定

最近、単一孔による流向・流速測定が開発されている。手法としては、トレーサの希釈濃度を計測する方法(中性子検出法、熱量法、電位差法)およびテレビカメラにより水流を直接観察する方法が提案されている。孔内の流れを周囲の地下水の流れと見なしてよいかという問題があるが、今後のデータの蓄積によりその適用性を明らかにしていく必要がある。

(3) 孔間透水試験

孔間透水試験は複数のボーリング孔を用いた透水試験であり、注水による岩盤内の圧力変化を複数の観測孔・観測区間で計測する。本試験では広範囲の透水性、透水係数の異方性(三次元分布)、高透水領域や低透水領域の連続性を把握することができる。

9-3 ボーリング孔を利用した力学試験

9-3-1 孔内水平載荷試験

(1) 試験の概要

孔内水平載荷試験は、ボーリング孔の孔壁に対して垂直方向に載荷し、そのときの圧力と孔壁の変形から、地盤の変形係数、弾性係数などを求めるものである。

孔内水平載荷試験の載荷パターンは、いまだ標準的なものが確立されておらず、試験目的や対象岩盤に応じて適宜決められているのが現状である¹⁸⁾。

図-52に単調載荷、階段載荷とくり返し載荷の荷重強度 P -変位 r 曲線を示す。一般に変形係数は D は、図-52における処女載荷部にあたる直線部分①-①の勾配を、弾性係数 E はくり返し載荷部の接線②-②の勾配から求める。

変形係数は、節理や亀裂による岩盤の緩みなどの影響を含んだ変形特性を、弾性係数は、岩盤の弾性的変形特性を表すと考えられる。

(2) 結果の適用と留意点

変形特性はトンネル支保パターンを決定するうえで重要な指標である。とくに軟岩地山や膨張性地山などで大きな変位が想定される場合、都市トンネルや近接施工に

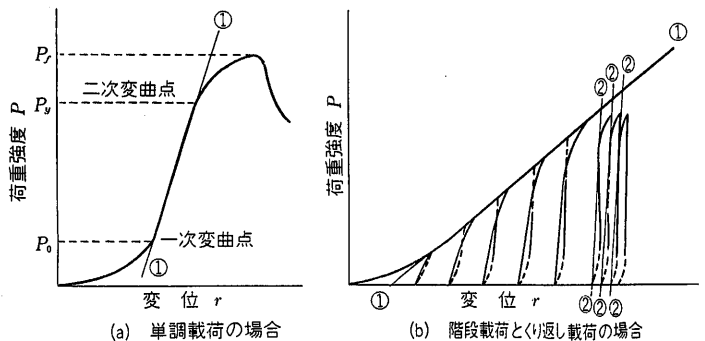


図-52 荷重-変位曲線

より変形を極力抑える必要がある場合は、解析により支保パターンを決定することがあり、変形(弾性)係数は入力値として必要である。

変形係数はひずみに依存しており、孔内水平載荷試験によって求められるひずみ領域 $\varepsilon > 10^{-2}$ ではひずみの増加に伴い変形係数が低下する傾向がある。それに対してトンネルのひずみレベルはおおむね 10^{-3} 程度であり、孔内水平載荷試験から推定した変形係数では過小評価となる場合が多い。また、変形係数は孔内水平載荷試験のほか、室内試験(一軸・三軸圧縮試験)、平板載荷試験、速度検層(PS 検層)などでも求められる。しかし、解析時の入力物性値としてどの値を採用するかについては、いまだコンセンサスが得られていないのが現状である。そのため、入力物性値は解析しようとしているトンネルの応力レベル、ひずみレベルを十分検討のうえで決定する必要がある。また施工段階において計測結果から逆解析を行い、変形係数の修正をしながら掘削を進めるとともに、入力物性値の適用性、評価法を確立する必要がある。

最近自己掘削型の孔内水平載荷試験機が開発され、ひずみレベルが 10^{-4} 程度の範囲での測定も可能となったと報告されている。また、従来型(プレボーリング型)の装置でも載荷時間を短くし、小さな圧力でのくり返し載荷法を採用することにより同様の結果が得られるとの研究報告もある¹³⁾。

9-3-2 初期地圧測定

(1) 測定の概要

初期応力の最大主応力方向が鉛直方向にあるのと水平方向にあるのとではトンネルに作用する地圧現象が全く異なってくる。また、最大主応力がトンネル方向にある場合には、切羽の押し出しにより自立性が悪くなるのが想定される。近年の初期応力の測定例によれば、水平方向に最大主応力がある場合がもっとも多い。この原因については構造応力、熱応力、過去の応力履歴による残留応力であるとする案が提案されているが、結論を得るには至っていない。原因はいずれにせよ、最大主応力の大きさおよび方向はトンネルの設計・施工に大きな影響

を与えるため、地圧測定の重要性が認識されつつある。

(2) 測定方法および今後の課題

初期地圧測定法として実用化されているものには、オーバークォーリング法、水圧破砕法、スリーブフラクチャリング法、AE法などがある¹⁴⁾。それぞれの手法は、技術的、精度的、経済的に一長一短があり、調査対象によって使い分けられている。また、各手法の測定値に対する評価も統一されていないのが現状である。今後はデータを蓄積させるとともに、施工現場でフィードバックさせることで、その適用性、評価法を検討する必要がある。(文責: 魚住誠司・(株)ダイヤコンサルタント大阪支店技術課長/西田薫・(株)ダイヤコンサルタント技術研究所研究開発部長/大島洋志・国際航業(株)取締役技術センター長)

参 考 文 献

- 1) 日本鉄道建設公団編: 地質調査標準示方書, 1991.
- 2) 地盤工学会編: 地盤調査法, p.648, 1995.
- 3) 今村杉夫: 多連ノルマル電気検層データを用いた電流集束型電気検層の合成法, 物理探査学会第87回学術講演会講演論文集, pp.211-216, 1992.
- 4) 東宏幸・樋渡純也・今村杉夫: 有効塩ビ管が電気検層に与える影響, 物理探査学会第85回学術講演会講演論文集, pp.388-391, 1991.
- 5) 西垣誠: 単孔式現場透水試験の整理(その1), 地下水と井戸とポンプ, Vol.28, No.2, pp.11-23, 1986.
- 6) 西垣誠: 単孔式現場透水試験の諸問題, 地下水と井戸とポンプ, Vol.28, No.5, pp.1-13, 1986.
- 7) 建設省河川局監修: 地下水調査および観測指針(案)pp.182-196, 山海堂, 1993.
- 8) 土木学会編: トンネルの地質調査と岩盤計測, p.231, 1983.
- 9) 宇野尚雄: 現場揚水試験における水位低下のパターン, 岐阜大学工学部研究報告, Vol.24, pp.2, 1974.
- 10) 大島洋志・木谷日出男: 小特集現場透水試験, JFT, 地質と調査, No.3, pp.33-38, 1990.
- 11) 建設省河川局開発課監修: ルジオンテスト技術指針・同解説, p.56, 1984.
- 12) 土木学会編: 孔内水平載荷試験の現状と課題—指針化の試み, p.126, 1988.
- 13) 関東地質調査業協会技術検討委員会: ボーリング孔を利用する原位置試験についての技術マニュアル, p.360, 1995.
- 14) 土木学会編: 初期地圧測定法の現状と課題, p.148, 1992.

シールドトンネルの新技術

シールドトンネルの新技術研究会

B5判・285頁 本体価格4,660円(〒380円)



株式
会社 **土木工学社**

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16 メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

第2英仏海峡トンネル構想

英仏海峡トンネルの運営会社であるユーロトンネルが、英仏両国政府に対し第2トンネルの構想を提出。同社が事業化調査を行ったうえでまとめたもので、2階建ての自動車専用道路と鉄道専用の2案を併記した。

建設期間は9年で、費用は自動車の場合が27億ポンド(約4,600億円)、鉄道用が30億ポンド(5,100億円)と見積もっている。ユーロトンネルは海峡トンネルを建設する際、英仏両国政府から第2トンネルの構想提示を義務づけられていた。

同社は「計画は長期的な構想であり、社の増益につながることはない限り着手しない」としている。

大深度地下利用法案

国土庁は、深さ40m以上の地下空間を利用する方法を定めた「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法案」(仮称)の概要をまとめた。鉄道や道路の整備など公共目的に限定し、対象地域を政令で定め、国や都道府県の認可を得て大深度地下を利用するとしている。他省庁との間で細部の詰めを行い、3月上旬に閣議決定したうえで、国会に提出する方針だ。

同法案は、1998年5月に政府の「臨時大深度地下利用調査会」がまとめた答申を踏まえ、鉄道、道路、河川、電気、ガスなど公共事業の利用を前提として事業者による大深度地下利用の手続を定めている。

大深度の定義については政令で、①地下室の建設が可能な地表から40m程度の深さ、②建築物の基礎杭を設置する地盤の上面から10m程度の深さ、と定めるとし、いずれかの深い方から下の空間とする。対象地域も政令で定めるが、実際の利用

を考えると、東京、名古屋、大阪の3大都市圏が中心となる見通し。

大江戸線全区間が連結

東京都地下鉄建設が進めている大江戸線(都営12号線)環状部の建設工事で1月18日、汐留シールドトンネル(汐留駅~大門駅間約770m)が貫通した。これにより都庁前駅~新宿駅(28.8km)の施工区間30か所で進められていた1次覆工工事が完了。大江戸線は、すでに開業している(新宿~光が丘)と合わせ、延長約41kmの路線区間が繋がった。

汐留シールドトンネルは、延長770m(単線並列式、直径5.3m)、掘進は、泥水式シールド工法により、東京・汐留の再開発区域内に設置する汐留駅を発進基地とし、JR浜松町駅の架道橋直下を半径100mの曲線を描きながら横断、大門駅に至るとくにJR線との交差部では、新たに設けた仮線に東海道新幹線と東海道路線に移設するなど、掘進工事の影響を極力縮小させる対策が取られた。

大江戸線は、今年12月の全線開業を目指し、工事は急ピッチに進められている。

大曽根~砂田橋間が開通

名古屋市地下鉄4号線の大曽根~砂田橋間(1.7km)が1月19日開通、営業を開始した。

同区間は、1994年に着工。開削工法で施工、ガイドウェイバス志段味線との並行区間のため、地下鉄構造物の上にガイドウェイバスの橋脚が載る構造となっているのが特徴。また、ナゴヤドームの西側には大幸車庫も設置した。

大曽根、砂田橋両駅の間には、ナゴヤドームまで約350mの「ナゴヤドーム前矢田」駅を開設。これまで大曽根駅から徒歩約20分だったドー

ムへのアクセスが格段に向上する。

地下鉄4号線は、残る砂田橋と新瑞橋を結び、名古屋市初の1周26.4kmの環状線となる。名古屋大学~新瑞橋(5.1km)は2002年度、砂田橋~名古屋大学(4.8km)は2003年度の開業を目標にしている。

梶賀トンネル貫通

三重県が建設を進めている尾鷲市曾根町と梶賀町を結ぶ梶賀トンネルが1月20日貫通した。

国道311号のうち、尾鷲市梶賀町と熊野市須野町が交通不能区間となっているため、トンネル2本を含む延長3.1kmを曾根梶賀バイパス道路改築事業として、85年度から着手していた。このうち、起点側の曾根トンネル(1,106m)は、すでに本体工事が完成している。

梶賀トンネルは、延長1,370m、全幅員9.25m、2車線。今後覆工、舗装工事を行い、11月末にはトンネル本体工事を完了させる予定。

岡部TのTBM発進

日本道路公団静岡建設局が建設中の第2東名高速道路で1月24日、岡部トンネルのTBMが発進した。

同トンネルは、上り線延長2,655m、下り線同2,419m、TBM導坑先進掘削工法を採用。TBMは直径5m、本体延長約16m、設備を含めた全長は約106m、先端のカッタは35個。自動掘削管理システム、導坑壁面画像撮影・キーブロック解析システム、掘削ずり搬出における連続ベルトコベヤシステムなど最新技術を結集している。

今回発進した下り線では、月進約280mを目標に掘り進み、今秋の貫通を目指す。このあと上り線にも転用し、2001年度中にも貫通させる予定。

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(13)

第三編 地質調査法(5)

「応用地質学」連載講座小委員会

10. 室内試験

室内試験の結果は、地山分類はもとより、補助工法・掘削工法の選定、数値解析や施工中の切羽の評価などに用いられ、トンネル調査の中心的な役割を果たす。

本章では、トンネルの本体工を計画するために必要な調査の一環として地山の物理特性や力学特性を把握するための試験について概説する。

10-1 室内試験項目

一般的な室内試験項目を表-1¹⁾に示す。

これらの室内試験は力学試験と物理試験などに分類さ

れる。力学試験は様々な状態における岩石などの強度の把握や地盤の変形特性を把握し、近接施工や双設トンネルなどの相互干渉による支保部材の応力解析といった複雑な応力変化の解析に用いる。物理試験などは岩石や土砂の特性を把握するための基礎的な情報を整備するほか、流砂現象や地山膨張性に対する指標を与える。

10-2 力学試験

10-2-1 圧縮強度試験

岩石や岩盤の圧縮応力下における特性は山岳トンネルの設計にもっとも基本的なデータとなる。圧縮試験には一軸圧縮試験と三軸圧縮試験があり、供試体の強度特性

表-1 地山材料試験

試験の種類	求める物性	岩種				備考	
		硬岩	軟岩	膨張性岩	未固結土		
力学試験	一軸圧縮試験 静弾性係数 静ポアソン比	○	◎	◎	◎	岩石の力学特性を判断する基本的な指標となる	
	三軸圧縮試験 岩石強度定数 C, ϕ 岩石変形特性		◎	◎	◎	岩石の力学特性を判断する基本的な指標となる	
	引張強度試験 引張強度		○	○		引張強度は、圧裂試験によって求める場合が多い	
	超音波伝播速度試験 動的弾性係数	◎	◎	◎		地山の弾性波速度との比較から岩盤の劣化度を推定することができる	
物理試験、 化学試験 など	比重試験 比重	◎	◎	◎	◎		
	含水量試験 自然含水比、飽和度		○	◎	◎		
	密度試験 湿潤密度、乾燥密度	◎	◎	◎	◎		
	粒度試験 粒度組成、均等係数			◎	◎	流砂現象の有無を推定する	
	液性限界・ 塑性限界試験	液性限界・塑性限界 塑性指数			◎	○	
	浸水崩壊度試験 スレーキング特性		○	◎		膨張性の目安を得る	
	X線分析 粘土鉱物の種類		○	○		膨張性粘土鉱物の有無とそれの膨潤性を推定する	
	陽イオン置 換容量試験(CEC)	モンモリロナイト 含有量の推定			○		
透水試験 透水係数				○			

注) ◎: 多くの場合実施する必要があるもの, ○: 場合による省略することができるもの

とともに、ひずみの測定を行うことによりそれぞれ弾性係数やポアソン比が求められる。三軸圧縮試験では圧力セルの中で拘束圧を変化させて試験を行い、粘着力 c 、せん断抵抗角 ϕ を求める。

岩石は完全な破壊に至るまでの間、いろいろな変位やひずみを示す。その状態を表現するため、圧縮強度はピーク強度、残留強度などを区別して求める必要がある。そのために、理想的には剛性の高い試験装置を用いて完全応力-ひずみ曲線を得る。図-1²⁾に示すように試験機の剛性が小さい場合、ピーク強度を超過して試験機が載荷時の伸びから解放されたとき、岩石の除荷に見合うだけの荷重を瞬時に減少できないため、試験機のバネにより上部載荷板が下方へ変位して供試体が荷重を受け、図中の(2)のようなぜい性岩の挙動を示す。こうした点を改良して手動やサーボ制御により圧縮試験を実施すれば、くり返し載荷などが可能であり、ひずみ軟化や硬化などの挙動も明瞭に把握できる。図-2に完全な荷重-変位曲線の事例³⁾を示す。

(1) 供試体の選定
力学試験の供試体は、試験の際に試験片の端面の0.02mm以内にするなど厳密に管理されて試験されるが、トンネル技術者は、どのような供試体がどのような試験状態で実施された結果かを十分に考慮して試験結果を判断する必要がある、供試体の選定には充分留意すべきである。

異方性のある試料では分離面の直角方向と水平方向で強度に影響すること、含水状態やサンプリングの方法によって強度が異なることなどの問題点があるため、下記のように

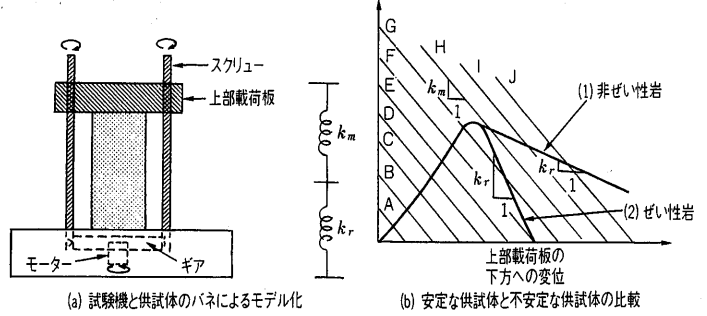
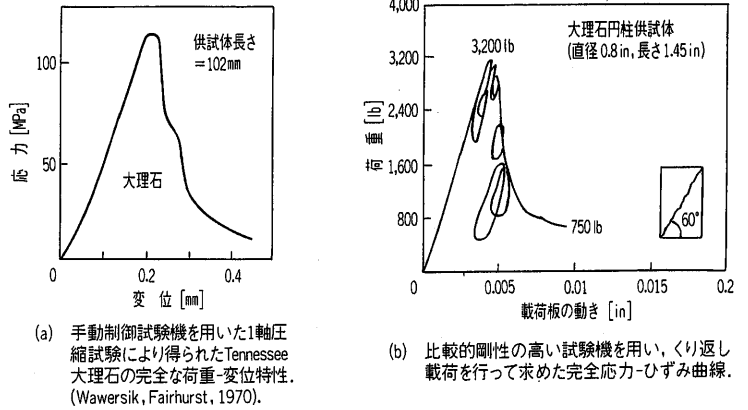
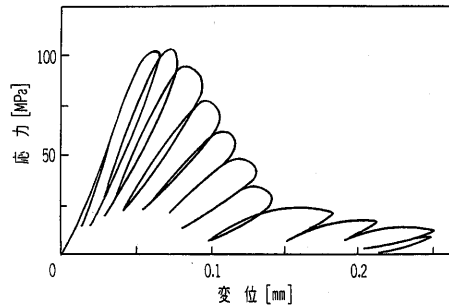


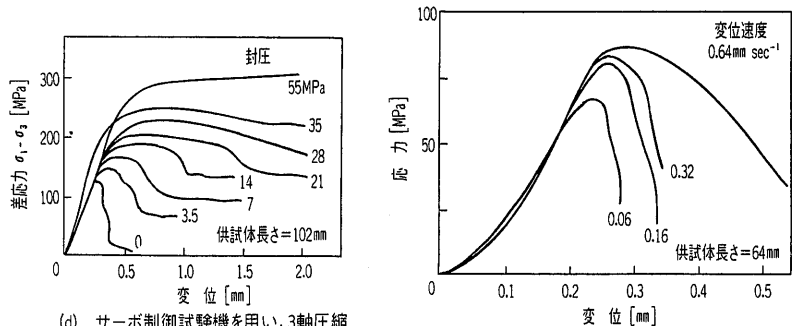
図-1 破壊に及ぼす試験機の剛性の影響



(a) 手動制御試験機を用いた1軸圧縮試験により得られたTennessee大理石の完全な荷重-変位特性。(Wawersik, Fairhurst, 1970).
(b) 比較的剛性の高い試験機を用い、くり返し載荷を行って求めた完全応力-ひずみ曲線。



(c) 破壊後の領域で供試体の剛性が低下することを示すくり返し1軸圧縮試験での細粒砂岩の変形挙動。(Bieniawski, 1971).



(d) サーボ制御試験機を用い、3軸圧縮試験で得られたTennessee大理石の完全な荷重-変位特性。変位速度は 10^{-2} mm/s (Rummel, Fairhurst, 1970).
(e) サーボ制御試験機を用いた1軸圧縮試験で得られた、硬砂岩の破壊後の挙動におよぼす変位速度の影響。(Peng, 1973).

図-2 剛性試験から得られた完全な荷重-変位曲線

な供試体の情報を的確に整理しておく必要がある。

供試体の情報としては、試料の岩質(土質)、試験片の異方性(層理・片理、葉片構造などの载荷軸に対する方向)、岩石中の最大粒径(試験片の直径は最大粒径の10倍を必要とする)、試料の採取状況(深度、採取日付とその方法、保管履歴)、試験時の含水比と飽和度、試験片の数(目的の試験に必要なコア長)などがある。また、試験をするコアは、NX コアサイズ(約54mm)以上であることが望ましい。

(2) 一軸圧縮試験

1) 試験方法

一軸圧縮強度 q_c は圧縮試験機で供試体を载荷したとき得られる最大荷重 P_p を供試体の断面積 A_c で割ったものとして定義される。

供試体の寸法は径50mm、高さ100mmのものが多く用いられ、径と高さの比は2となっている。供試体の端面は応力集中が生じないように十分に磨き、端面は供試体の軸に正確に直交するようにする。これを怠ると試験値が異常に小さなものとなり、試験そのものの意味が問われ兼ねないこととなる。その他、①供試体の形状および寸法、②加圧板と供試体端面との接触状態、③端面拘束、④含水状態、⑤载荷速度などに注意すべきである。

2) 適用性と留意点

トンネル工事において、地山の一軸圧縮強度は重要な地質指標である。例えば、地山強度比(一軸圧縮強度、密度および土かぶりから算出)をもとにした種々の設計・施工に関する判断基準(第IV編第4章 調査の成果)が示されている。しかし、試験は均質で割れ目の少ない材料に限られることから、すべての地山条件に適用できる指標とはなり得ない。また、近接施工や低振動・低騒音工法の必要性からブレイカによるトンネル掘削が増加しているが、ブレイカの採用の可否に関しては、一軸圧縮強度をもとに行われている⁴⁾のが実状である。

(3) 三軸圧縮試験

1) 試験方法⁹⁾

三軸圧縮試験は圧力セルを用いて供試体に軸直角方向の圧力(拘束力)を加え、三軸応力下における岩石の挙動を調べるための試験である。試験法には個別三軸圧縮試験(一般的)と連続降伏状態三軸圧縮試験(特殊)とがある。前者は、従来から行われてきた一般的方法で、所定の拘束圧まで軸方向応力とともに上げていき、その後は一軸圧縮試験と同様に軸方向応力のみを増加させて降伏応力(ピーク強度)および残留強度を求める。後者は、拘束圧を降伏状態を保つようにコントロールしながら行う試験である。

前者は粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ などの強度に関する値

を得るためには同一地点から数箇以上の供試体が必要となる。後者は1つの供試体だけで必要な情報を得ることができるが、特殊な装置が必要で、操作も複雑である。

試験の結果は、モールの応力円として降伏時の応力状態を表示して、その包括線の勾配と τ 軸との切片からそれぞれ内部摩擦角および粘着力を求める(図-3)。あるいは拘束圧と降伏圧力(ピーク強度)との関係でプロットし、直線をあてはめ、次式から内部摩擦角 ϕ および粘着力 c を求める(図-4)。

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \sin^{-1} \frac{m+1}{m-1} \\ c &= b \frac{1-\sin \phi}{2 \cos \phi} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

m : 直線の勾配, b : 直線の縦軸との切片

2) 適用性と留意点

地山の強度特性が粘着力か内部摩擦角いずれに支配的か(c 地山か ϕ 地山か)で地山の挙動は異なり⁸⁾、膨張性を呈する可能性がある c 地山の場合、三軸圧縮試験による強度特性の把握が重要となることがある。

未固結の土砂地山では、強度の把握に三軸圧縮試験が不可欠であり、近年の硬膜泡工法などのサンプリング技術の進展とあいまって、不飽和三軸圧縮試験¹⁾により未

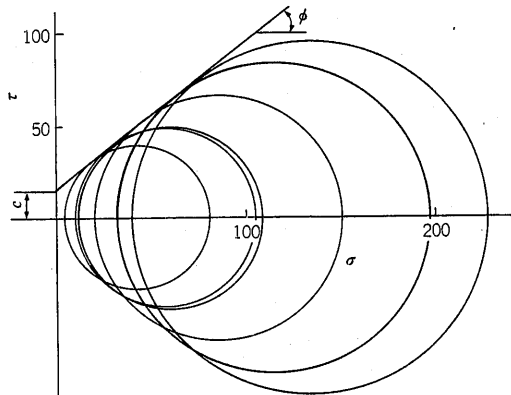


図-3 三軸圧縮結果のモール円表示

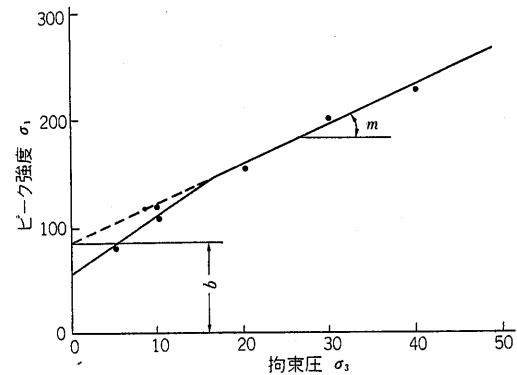


図-4 二軸圧縮結果の拘束圧とピーク強度との関係での表示

固結地山の強度試験が可能になってきている。最近の稲城砂層の試験事例では不飽和状態(飽和度 32.7~36.6%)の地山が、飽和状態に対して約3倍の粘着力をもつことが報告⁸⁾されている。大断面施工を前提とした将来の支保システム⁹⁾では、切羽の自立高さが重要であり、粘着力の適切な把握が工法選定を左右することになる。

10-2-2 引張強度試験

(1) 圧裂試験¹⁰⁾

引張強度を求める試験としてもっとも一般的な試験法は圧裂試験(図-5)である。これは円板状の供試体を直径方向に載荷することで一様な引張応力を発生させようとするものである。

所定の厚さの円板を図に示すように平板の載荷板の間に挟み上下2点で集中荷重 P を載荷すると、載荷点を結ぶ面上には、

$$\sigma_x = -\frac{P}{\pi R} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{P(3R^2 + y^2)}{\pi R(R^2 - y^2)} \quad (3)$$

の応力が生じる。 σ_x は載荷点を通る直径面に作用する載荷点を結ぶ線と直交する方向の応力で、位置に関係なく一様な応力分布となる。

この試験が成立するのは岩石の強度が圧縮強度に比べて非常に小さい(1/6 以下)という場合である。

(2) 点載荷試験

1). 試験方法¹⁰⁾

前述した諸試験は作製密度の高い供試体が必要で、その準備に手数がかかる。また、供試体の作製・加工には、加工に耐えるだけの強度が必要で、試験を行える岩片は強度の大きい部分であり、試験結果は強度の大きい方向に偏りがちという内部矛盾を抱えている。

特別に加工を要しない岩片あるいはボーリングコアを直接用いた試験から岩石の物性値が得られれば、簡易に試験ができ、上記の矛盾も解決が可能である。この課題を解決する試験法の1つとして点載荷試験(point load index test)がある。

これは先端を尖らせた載荷体を用いて、上下相対する

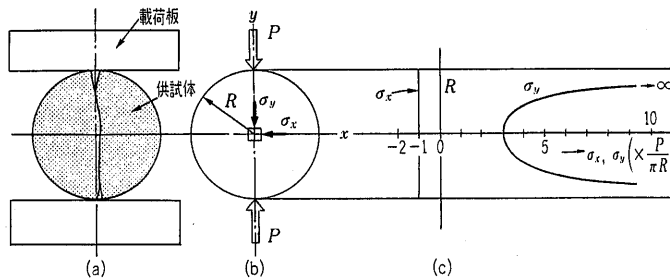


図-5 圧裂引張試験

点荷重として載荷し、破壊荷重 P を求めて、この値と岩石の圧縮強度などの特性と結び付けるものである(図-6)。このような点載荷を行うと、両載荷点を結ぶ面上で引張りにより破壊するのが普通である。破壊荷重 P は破壊が生じる断面積によって影響を受けることが考えられるので、 P を面積の持つ次元である L^2 で割れば応力の次元を持つ数値を得る。ボーリングコア片であるならば長さ L としてコアの直径 D を用いて、

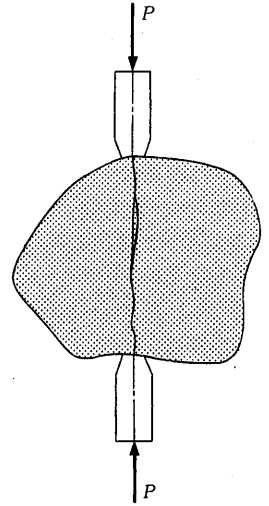


図-6 点載荷試験

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (4)$$

とおくと、 I_s は強度のディメンジョンを持つ指数となる。不定形の岩片の場合は岩片の体積 V の $2/3$ 乗を用いることもできる。今までの研究によれば、 I_s と一軸圧縮強度 σ_c との間には密接な関係があり、

$$\sigma_c = CI_s \quad (5)$$

で表すことができる。 C の値は供試体の形や大きさに関係するが、径 50mm のコア片の場合は $C=23$ が示されている。また、点荷重を与える載荷体の形状や試験片の大きさや形状と関係を持つ値であり、試験方法と一軸圧縮強度との相関について十分吟味する必要がある。

2) 適用性と留意点

Bieniawski が提案した RMR 法¹¹⁾ は、切羽の地山を客観的に評価しようとする手法である。RMR 法は支保荷重 P および原位置変形係数 E_M との関係をもつ(6)式によって求める。

$$P = \frac{100 - RMR}{100} \cdot \gamma \cdot B \quad (6)$$

ここで、 P : 支保荷重(KN)、 γ : 岩盤の単位体積重量(kg/cm³)、 B : トンネル幅(m)。

$$\left. \begin{aligned} E_M &= 2 \times RMR - 100 \quad (RMR > 50) \\ E_M &= 10^{(RMR - 10)/40} \quad (RMR < 50) \end{aligned} \right\} (7)$$

点載荷試験は RMR 値を決定するうえで、重要な圧縮強度を与えるものであり、コアの形状を問わない点で切羽評価の定量化に寄与するものである。

また、事前の詳細調査においても、RQD の小さい試料に対して、安価で迅速

に強度を把握するという点で、RMR 値による地山評価と併せて適用性が高いと考える。

10-2-3 その他の試験

供試体を用いて行うその他の試験として超音波伝播速度試験がある。

これは超音波パルスを岩石試料端で発振し、他端で透過したパルスを受振するもので、波の伝播時間(透過時間)から速度を算出する。

弾性波速度は発振子と受振子間の距離を超音波の透過時間で除して求められる。弾性体の理論では、速度と弾性定数(動弾性係数 E_d 、動せん断弾性係数 G_d 、動ポアソン比 ν_d)とは次の関係にある。

$$P \text{ 波の速度 } V_p^2 = \frac{E_d}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu_d)}{(1+\nu_d)(1-2\nu_d)} \quad (8)$$

$$S \text{ 波の速度 } V_s^2 = \frac{G_d}{\rho} \quad (9)$$

供試体の速度は、「序章 5.石硬くとも山堅いとは限らない」に「地山速度が試料速度より速ければ膨張性の可能性」とあるように、地山の膨張性の指標となるほか、硬岩地山の良否を示す龜裂係数の算出に必要な値を得るための重要な値である。

10-3 物理試験など

物理試験は岩盤や土砂の基本的な特性を把握するための試験であるとともに、流動化指標、膨張性指標などの地山の挙動を直接推定するための重要な試験である。ここでは、主な試験方法について整理する。

(1) 比重試験

岩石の比重は試料の質量と同体積の純粋な質量との比で表される。

$$\text{比重} = \frac{\text{ある温度において岩石試料が空気中で示す質量}}{\text{同一温度において岩石試料と同体積の蒸留水が空気中で示す質量}} \quad (10)$$

一般的には質量は重量を測定することによって求まるが、体積の算定は試料の状態により工夫を必要とすることがある。用いる体積の算出方法によって、得られる比重の値に違いが生じてくる。

岩石の体積はその空中重量と水中重量から見かけの体積を求める方法が一般的である。この方法は、水中においても体積が変わらないと見なせるときにのみ有効で岩石の吸水特性をよく考慮して適用すべきである。

岩石試料では、対象とする岩盤の含水状態が変化しやすいことから、物性に関する検討目的に応じて含水状態を変えて試験することが多い。旧国鉄¹²⁾や建設省¹³⁾の基準では、次の3状態での値を求めることになっている。

- ① 自然含水状態：試料採取時の含水状態で、湿潤状態ともいう。

- ② 強制乾燥状態：供試体を 80~110℃で 24 時間以上乾燥させた状態。

- ③ 強制湿潤状態：供試体を 72 時間以上水中につけ、十分に吸水させた飽和含水状態。

(2) 含水量試験

含水量は、(1)で述べた見かけ比重試験の過程で求められる。含水比は、(10)式に示したように、自然状態および強制乾燥状態での測定重量をおのおの W_1 、 W_2 とすると、

$$W_n = \frac{(W_1 - W_2)}{W_2} \times 100(\%) \quad (11)$$

として求められる。

岩片を用いて含水比を求める場合は、JIS A 1203(1978)「土の含水量試験法」が準用される。この方法では、湿潤試料を重量 W_c の容器にいれ試料と容器の合計で重量(W_s)を測定し、次に 110℃で一定質量になるまで炉乾燥し、デシケータ内で室温まで冷ました後、再び重量(W_n)を計る。含水比 ω_n は、

$$\begin{aligned} \omega_n &= \frac{\text{湿潤試料中の水の重量}}{\text{強制乾燥試料の重量}} (\%) \\ &= \frac{W_s - W_c}{W_n - W_c} \times 100(\%) \end{aligned} \quad (16)$$

から求められる。

(3) 密度試験

岩石の密度はその質量を体積で除することにより得られる。比重は試料の質量と同体積の水の質量との比(岩石の密度と水の密度との比)で表される。水の密度を 1 と見なすならば、その数値は(1)で述べた比重と同じになる。岩石の密度を直接計ることは稀で、乾燥、湿潤のいずれの過程でもその体積が変化しない岩石においては、質量の計測にもとづく見かけ比重の測定そのものが密度試験に相当する。

(4) 粒度試験

粒度試験は、軟岩の場合十分に乾燥させた試料を手や乳鉢でときほぐし、土砂の場合はふるいや沈降速度によって JIS A 1204(1990)にもとづいて行う¹⁴⁾。

粒度試験によって得られる細粒分含有率は、トンネル地山の透水性や切羽の自立性の判断の一要素となり、粒径加積曲線の形状が流砂現象の指標となる点で未固結土砂地山においては重要な試験である。

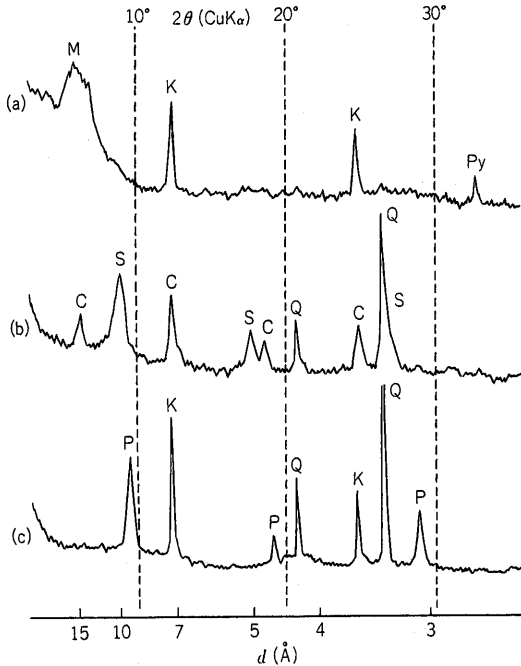
(5) 浸水崩壊度試験

浸水崩壊度試験は¹⁵⁾、乾燥供試体を大気圧下で水に浸し、その形態の変化を観察する試験である。通常、粘土分を多く含む軟岩を対象に実施することが多く、同一地点の 1 岩種に対し 3 個程度を用意する。各機関が同種の試験法を定めているが、乾燥方法(装置、温度、時間)と水浸方法(装置、時間)に若干の違いがある。

区分	0	1	2	3	4
A					
B					
形状	変化なし。	割れ目が少しできる。または、周辺が少し崩れる。変化なし。	全体に割れ目が多数でき、いくつかの岩片にわかれる。または、周辺がかなり崩れる。	全体が細片化する。または、周辺がかほとんど崩れる。全体が泥状化する。	全体が泥状化または、全体が砂状化。

A: 泥岩によくみられるタイプ。 B: シルト岩, 砂岩, 凝灰岩によくみられるタイプ。

図-7 スレーキング区分¹⁰⁾



(a), (b) 山形県吉野鉦山(黒鉦)の母岩の変質粘土。
 (c) 大分県鯛生鉦山(金鉦)の母岩の変質粘土。
 M: モンモリロナイト, C: Mg 緑泥岩, S: セリサイト,
 P: パイロフィライト, K: カオリン鉦物, Q: 石英,
 Py: 黄鉄鉦。

図-8 定方位試料のX線回折図

スレーキングの区分例は、図-7¹⁰⁾に示すように5段階に区分され、トンネルにおいてはスレーキング特性が膨張性指標の一助となっている。

(6) X線分析

粘土鉦物の同定にもっとも有効な手法で、トンネルの膨張性の判断材料として、後述する陽イオン交換容量ともによく用いられる。

一般に粉末法(不定方位法)と定方位法(層状珪酸塩の薄板状結晶粉末をスライドガラス上に沈着させて層面がほぼ平行に並んだ試料の回折を行う)が用いられる。

粘土鉦物の特徴は「第I編 4.2 土や岩石を構成する物質」に示したように、鉦物の結晶構造が層構造であることにある。層構造は SiO₂のつくる四面体層構造と Al³⁺(あるいは Mg²⁺, Fe³⁺ など)とこれを囲んだ(OH)⁻あるいは OB²⁻からなる八面体層構造である。

X線の底面反射にはこの層構造が明瞭に反映され、図-8¹⁰⁾のように定方位法による粘土鉦物の回折では底面間隔 d 値により各種粘土鉦物が識別される。

(7) 陽イオン置換容量試験(CEC)

粘土や土壌に含まれる粘土鉦物や腐植物はその粒子表面などに負の電荷を帯びているので、電気的な平衡を保とうとして、陽イオンと静電的に結合している。交換性陽イオンと呼ばれるこの陽イオンは、溶液中に異種の陽イオンがあると簡単に置換される。図-9¹⁰⁾は土粒子に吸着していたカルシウムイオンがアンモニウムイオンに置き換えられていく様子を模式的に示したものである。この交換現象が陽イオン交換と呼ばれる。

交換性陽イオンの総量を陽イオン交換容量(CEC: Cation Exchange Capacity)といい、単位重量(100g 乾燥重量)あたりの mg 当量数(meq/100g)で表す。表-2¹⁰⁾は主な粘土鉦物や土壌の CEC を示したものである。

CEC は膨張性を示す指標として利用されるが、モンモリロナイト以外にパーミキュライト、沸石およびその他あらゆる有機質土などは高い CEC 値を示すため、X線回折による鉦物の特定や塑性指数、浸水崩壊度などと合わせて総合的に判断する必要がある。

(8) 吸水膨張試験

小野寺²⁰⁾は岩石の吸水状態に関する図-10のモデルを用いて吸水膨張現象と膨潤現象について説明している。吸水膨張は、フレキシブルモデル(a)に示されるように、実質部分の変化はなく、有効間隙が水で満たされたことによる主として物理的な体積の増加をいう。したがって、岩石の組織や構造に支配され、また、不飽和で有効間隙

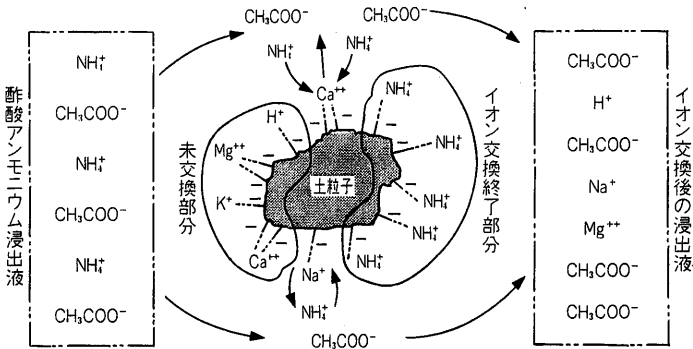


図-9 陽イオン交換の模式図(マイナスの手の数がCEO)

表-2 主要粘土鉱物の Atterberg 限界試験値(Scott, 1963*)

粘土鉱物	イオン	塩基交換容量 (me/100g)	Atterberg 限界			塑性指数 (%)
			液性限界 (%)	塑性限界 (%)	収縮限界 (%)	
カオリナイト	Na	7	53	32	27	21
	K		49	29		20
	Ca		38	27	25	11
	H		53	25		28
	Mg		54	31	29	23
	Fe		59	37	29	22
モンモリロナイト	Na	125	710	54	10	650
	K		660	98	9	560
	Ca		510	81	11	430
	H		440	55	9	380
	Mg		410	60	15	350
	Fe		290	75	10	220
イライト (<2μ)	Na	30	120	53	15	63
	K		120	60	18	60
	Ca		100	45	17	55
	H		100	51	17	50
	Mg		95	46	15	49
	Fe		110	49	15	60

*この実験は Lambe, T.らによるもの。

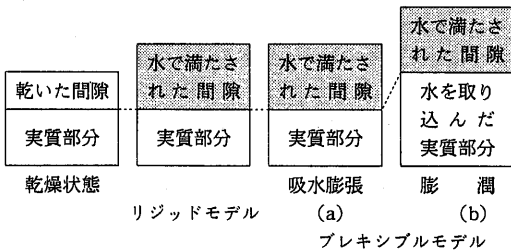


図-10 岩石の乾燥および吸水状態のモデル

を有する結合力の弱められた岩石にみられる現象である。とりわけ掘削による応力解放時に、この吸水膨張による問題が起こりやすい。

一方、膨潤現象はフレキシブルモデル(b)のように、有効間隙が水で満たされて膨張しても、なお実質部分自

身に水を取り込んで体積増加を続ける現象である。常温で水と共存して結晶学的性質が変化する鉱物からなる場合に起こり、元の体積の10~20倍にも増えることがある。粘土鉱物の多くは層状構造をなしており、スメクタイトでは粘土粒子の層間に水分子が吸着し著しく体積を増やそうとする。そのため、拘束圧下であってもかなりの膨潤圧を生じることになる。一般には吸水膨張試験の膨張量は20%以上で膨張性の可能性があるとされる。

11. 調査坑調査(施工・維持管理段階の調査含む)

11-1 概要

一般に調査坑調査とは、(1)で述べる狭義の意味で用いられるが、ここでは施工段階で「切羽掘削を行いながら坑内で行う地質調査」と位置付けることとする。

トンネルにおける地質調査は、「観測と修正」を行いながら、切羽前方の掘削作業に対するもっとも適切で最新の地質情報を提供することに心がけるべきと考える。その意味でこの調査の占める意味合いは大きなものがある。

トンネル供用後の維持管理段階でも、各種の地質調査が行われることがあるが、その調査項目も類似のものが多く、ここでは、施工・維持管理段階の調査も含めて述べる。

なお、余談であるが、NATMが山岳トンネルの標準工法となる以前は鋼製支

保工、矢板を用いた工法が標準で、そのころは小断面の底設導坑や側壁導坑を先進させ、上半断面を後から追いかけていた。導坑は、いわば地質調査坑としての役割をもっており、その情報をもとに本覆工の設計に関する判断をし、かつ先進水抜き坑としての大きな役割を發揮していた。

しかるに、最前線の切羽を大きな断面で進めるNATMが標準工法になって以降、付加体地質とか土砂地山で、土かぶりが厚いとか、湧水を伴う山岳トンネルではしばしば難航するケースが多くなっている。この種の地山でも、以前の導坑方式の場合、それほど苦勞することなく導坑の切羽を進めることができ、かつその導坑を介して時間をかけて水を抜くことができるため、上半断面が到達するころには乾いた状況に改善されており、

苦勞することが少なかったように感じる。少なくとも、かつての工法において導坑が果たしていた役割を再評価しこれを現工法にも生かしていかなければならない時期にきているのではと考える。

(1) 調査坑調査

特殊な地山条件や特殊な立地条件を対象としたトンネル²¹⁾計画に際しては、その地山状況をさらに詳細に調査する必要がある場合がある。このような場合、調査坑を掘削し、目的に応じた調査・計測、試験などを行う。かつて青函トンネルにおいては、調査坑を掘りつつ海底トンネルとしての難問題の程度を把握し、これなら可能という自信を得たうえで、本格施工に格上げしているが、調査坑調査の本来の目的はこの点にあるといえよう。

調査坑には、本坑から独立して専用掘削するもののほか、本坑工事あるいは本坑からの枝坑、サービストンネルとして利用されるもの、あるいは類似地点で掘削するものがある。また、最近では、大断面トンネルでの施工向上を目的としたTBM導坑が調査坑を兼ねるものも増えてきている。冒頭に述べたように、従来工法における底設導坑などの小断面先進坑は、まさに後進する上半などの本坑施工に対する調査坑と補助工法の二つの役割を果たしていたわけである。

(2) 施工中の調査^{22), 23)}

調査は、切羽の観察などの調査を行って、事前調査の評価と修正を行い、また、工学的かつ岩盤力学的視点でもとらえ、その結果を設計・施工へ反映させることを目的として実施する。具体的には、未掘削部分の地山分類に関する再評価ならびに施工の安全性と経済性の確保などに反映される。また、設計変更の要否を検討するための資料ともなる。施工中の調査は、通常、次のような項目が実施されている。

- ① 切羽観察
- ② 湧水量の測定
- ③ 水平ボーリング調査
- ④ 坑内弾性波探査
- ⑤ 地山試料による岩石試験、土質試験
- ⑥ 水文調査

これらの調査項目のうち、②と⑥については、第12章(次号)で述べる。なお、着工直前の施工計画立案にあたって、地表の状態を踏査し、施工上の視点から事前調査資料を再チェックし、地質情報に対する工学的判断を行うことも重要である。

(3) 維持管理段階の調査²³⁾

調査は、定期的な点検も含め、トンネルの変状や自然災害による被害に対し、その問題点の解明と対策を検討するために行う。とくに、坑口付近で、地すべり地形、

崩壊地形、土石流および偏土圧の発生が予測される地形で崩壊や自然災害を受けた履歴のある箇所、および土かぶりの小さいトンネルで、とくに周辺で開発など地形の変更があるトンネルでは、トンネルの変状が発生しやすいので、下記の点を重点として定期的な点検を行うことが望ましい。

- ① 湧水箇所の湧水量、降雨と湧水の関係、湧水温度など。
- ② 地質の変化箇所では、覆工の変状や湧水の変動。
- ③ クラック箇所では、覆工厚や背面空洞の有無。

以上のような、点検の結果から変状の発生や災害が及ぶことが予測された場合は、既存資料調査、踏査、観察調査、ひび割れ簡易調査、簡易覆工強度調査や必要に応じて、簡易ボーリング調査、覆工強度調査、簡易断面測定など実施し、その結果をもとに適切な対策を講じる必要がある。これらの維持管理段階での点検から調査・対策については各機関で示されているのでこれらを参照されたい^{24), 25)}。

11-2 各調査方法

調査坑調査、施工・維持管理段階の調査は11-1で述べたような調査項目があり、調査法としては、既に述べてきた方法を利用するものが多いので、これらについては省略し、とくにトンネル内で行われる主な調査として、①観察、②計測、③試験・坑内探査、④水平ボーリング、⑤切羽前方探査について述べる。

11-2-1 観察

(1) 地山は、一般的に不均一、不連続、異方性を有しているため、その性状は位置によって著しく異なることが多い。このため、トンネル施工中は、新しい切羽が現われるたびに、地質状況およびその変化状況を観察して設計・施工に問題がないか確認し、必要に応じて適切な処置を講じなければならない。また、トンネルの崩壊事故の多くは切羽で生じていることから突発的な崩壊や湧水の危険性については、地質状況の変化などから早めに読み取るよう努める必要がある。地山状況から予想される切羽崩壊現象と着眼点については第II編4-5崩壊と地質条件の表-20(第30巻10号)に示したとおりである。地山条件によって注意すべき観察ポイントを以下に示す。

① 硬岩地山

- ・不連続面、割れ目の多寡(平均間隔)、方向(流れ盤、受け盤、剥落しやすいか片断など)、性状(粘土を挟在しているか、開口しているか、密着しているかなど)
- ・断層・破砕帯・変質帯など(とくに湧水がある場合)
- ・山はねのあるときは十分注意

② 軟岩地山

- ・湧水・水による劣化
- ・支保工の足元の劣化, 泥濘化
- ・岩石の硬軟をハンマーで打診したり, 手で取って割ってみたりし, さらに, 針貫入試験などで試験する. 軟岩でも割れ目はあり, 割れ目によって岩塊が落下したりするので注意すること. とくに掘削当初は割れ目がなくても, ゆるみによって潜在的な割れ目で分離することがある

③ 土砂地山

- ・切羽の自立性, 天盤・側壁の安定性, 土砂の流出はないか
- ・湧水箇所, 湧水量, 土粒子の混入状況など
- ・支保工の脚部沈下(地耐力)
- ・地層の成層状況(とくに不透水層の挟み層)など
- ・土かぶり厚の変化や地下水位・地表沈下
- ・粒度・含水状態

以上のような観察を含め, 最近では各発注機関で基本となる切羽観察シートを定めている例が多い(図-11参照)²⁸⁾. さらに, 詳細は第IV編3章で述べるが, 最近では観察結果を点数化して集計し評点を与え, その大小で地山を評価する定量的評価法の採用が試みられている²⁷⁾. しかし, 現場状況によっては特殊な記事が必要となることがあるので, 事前に記載内容をよく検討することが大切である. また, 切羽情報のデジタル化も実行されつつあり, さらに踏み込んで, 切羽の観察結果をもとに地質を解析し, 切羽前方および周辺の地質想定図を作成するシステムなどを採用している例もある. とくに, 切羽の観察結果より地質図を作成し, その結果と事前調査結果を比較修正し, 切羽前方の地質を予知していくことは重要と考える.

(2) 既施工区間の観察

計測は点の情報であり, また, ある程度の期間までしか実施されないで, 既施工区間の観察も重要である. 既施工区間では, 主に, 以下の項目について点検し, 変状が認められた場合には, 変状の位置, 種類, 規模, 機構などを記録し, 必要に応じて位置図やスケッチ図などを作成する²¹⁾ほか, 状況によっては適切な対策を施す必要がある.

- ① 吹付けコンクリート: 地山との密着度・鋼製支保工と一体化, ひび割れの有無(発生位置, 種類, 幅, 長さおよび進行状況), 湧水の状況
- ② ロックボルト: ロックボルト・ベアリングプレートの変状の状況, ボルトからの湧水状況
- ③ 鋼製支保工: 変形・座屈の有無, 吹付けコンクリートとの一体化状況, 脚部沈下の有無

- ④ 覆工: ひび割れの状況, 湧水の状況, 巻き厚のチェック(NATMになってこの種の問題はないと過信することなく, 謙虚になって打音調査や電磁波探査などを行ってみるのがよい. 吹付けコンクリートと二次覆工の間に分厚い防水シートを挿入している場合はとくに注意が肝要.)

(3) 地表面の観察

トンネルの坑口付近や土かぶりの小さい区間での施工に際しては, トンネル掘削による影響が地表まで及び, 地表面沈下が生じたり, 地上構造物への悪影響が及ぶことが懸念されるので, 13項で述べるように, トンネル上部の地表面の状況を観察するとともに, 必要に応じて計測により, 管理していく必要がある.

11-2-2 計測

トンネルの計画段階で, トンネル周辺地山の挙動や支保の効果的・詳細に予測することは困難であるため, 実施工における計測結果にもとづき, 事前設計で評価できない部分について確認しつつ, 実施設計や施工方法の適正化を図っていく必要がある. すなわち計測の目的は, トンネルの掘削に伴う周辺地山の挙動と各支保部材の効果を把握し, 工事の安全性および経済性と構造物としてのトンネルの安全性を確保することにある^{21), 22), 28), 29)}.

トンネルならびに周辺地山を対象とした計測項目としては表-3に示すようなものがあるが, これらの計測項目の選定においては, 予測される地山挙動, 支保工の機能, 立地条件ならびに個々の計測の役割を十分考慮し, 地山条件により掘削時にどのような現象が想定されるか, あるいはどのような現象を防がねばならないか, さらに問題となる現象に対して計測結果を活用するには, どのような計測システムが必要かを検討する必要がある. なお, 計測項目は, 日常的に実施するもの(計測A)とこれを補足するために実施するもの(計測B)とがあり, その計測種別は表-3に示したとおりである.

なお, 計測に関する計器, 頻度, 間隔, 方法や管理基準などについては各機関で詳細に定めている.

11-2-3 試験・坑内探査

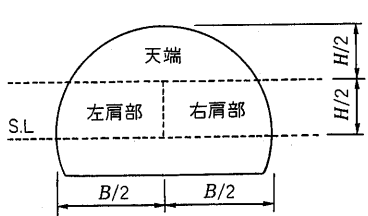
トンネル施工中, あるいは維持管理で地山性状を把握する目的で実施される試験・探査の代表的なものを以下に述べる.

(1) 簡易弾性波速度測定

弾性波速度測定を簡易の試験装置で行うもので, 試験装置に受振器とトリガー(起振信号を発生する装置)を接続し, ハンマーで壁面を打撃すると, 打撃箇所から受振器まで振動の伝わる時間がデジタル表示される. 打撃点と受振点の間の距離から, 切羽の地山の弾性波速度が計算できる. 一般の弾性波探査と直接対応付けることには

トンネル名:		観察年月日: 平成 年 月 日			
測点 Sta. +	坑口からの距離: m	断面番号:		支保パターン:	
土かぶり高さ: m	岩石名・地質時代:	岩石グループ(1~5):		岩石名コード:	

補助工法(鏡吹き, ボルトを含む)の諸元	増し支保工の諸元	A, B 計測 もっとも近い断面であれば A, B を記入
----------------------	----------	----------------------------------



特殊条件・状態など _____

崩壊の有無, 状況 _____

インバート早期閉合の有無 _____

観察項目		評価区分						評価区分記入		
		100以上	100~50	50~25	25~10	10~3	3以下	左肩	中央	右肩
A. 圧縮強度 (N/mm ²)	一軸圧縮強度	100以上	100~50	50~25	25~10	10~3	3以下			
	ポイントロード	4以上	4~2	2~1	1~0.4	0.4以下				
	ハンマーの打撃による強度の目安	岩片を地面に置きハンマーで強打しても割れにくい。	岩片を地面に置きハンマーで強打すれば割れる。	岩片を手を持ってハンマーでたたいて割ることができる。	岩片同士をたたき合わせて割ることができる。	両手で岩片を部分的にでも割ることができる。	力を込めれば, 小さな岩片を指先で潰すことができる。			
	評価区分	1	2	3	4	5	6			
B. 風化変質	風化の目安	おおむね新鮮		割れ目沿いの風化変質	岩芯まで風化変質	土砂状風化, 未固結土砂				
	熱水変質などの目安	実質は見られない		変質により割れ目に粘土を挟む。	変質により岩芯まで強度低下。	著しい変質により全体が土砂状, 粘土状				
	評価区分	1		2	3	4				
C. 割れ目間隔	割れ目の間隔	$d \geq 1m$	$1m > d \geq 50cm$	$50cm > d \geq 20cm$	$20cm > d \geq 5cm$	$5cm > d$				
	RQD	80以上	80~50	60~30	40~10	20以下				
	評価区分	1	2	3	4	5				
D. 割目状態	割れ目の開口度	割れ目は密着している	割れ目の一部が開いている (幅 < 1mm)	割れ目の多くが開いている (幅 < 1mm)	割れ目が開口している (幅 1~5mm)	割れ目が開口し 5mm 以上の幅がある				
	割れ目の狭在物	なし	なし	なし	薄い粘土を挟む (5mm 以下)	厚い粘土を挟む				
	割れ目の粗度鏡肌	粗い	割れ目が平滑	一部に鏡肌	よく磨かれた鏡肌	(5mm 以上)				
	評価区分	1	2	3	4	4				
E. 走向傾斜	走向がトンネル軸と直角	1. 差し目 傾斜 45~90°	2. 差し目 傾斜 20~45°	3. 差し目流れ目 傾斜 0~20°	4. 流れ目 傾斜 20~45°	5. 流れ目 傾斜 45~90°				
	トンネル軸と平行			1. 傾斜 0~20°	2. 傾斜 20~45°	3. 傾斜 45~90°				
	評価区分									

切羽 10m 区間での湧水量と水による劣化状態による評価(劣化は現在および将来における可能性について判定する)

F. 湧水量	状態	なし 滲水 1ℓ/分以下	滴水程度 1~20ℓ/分以下	集中湧水 20~100ℓ/分以下	全面湧水 100ℓ/分以上
	評価区分	1	2	3	4
G. 劣化	水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	流出
	評価区分	1	2	3	4

図-11 切羽観察データシート

表-3 トンネル本体と周辺地山を対象とした主な計測項目

分類	観察・計測項目	位置	対象となる事象	結果の活用	計測種別
地山とトンネルの挙動に関する計測	内空変位測定	坑内	・壁面間距離変化	・周辺地山の安定検討 ・支保部材の効果検討 ・二次覆工打設時期検討	A
	天端沈下測定	坑内	・天端・側壁の沈下	・天端周辺地山の安定検討 ・脚部支持検討	A
			・インパートの隆起	・インパート部地山の安定検討	A
	地中変位測定	坑内	・周辺地山の半径方向変位	・緩み領域の把握 ・ロックボルト長の妥当性検討	B
		坑外	・周辺地山の地中沈下 ・周辺地山の地中水平変位	・掘削以前からの地山挙動検討 ・地山の三次元挙動把握 ・切羽前方地山の安定検討	B
地表面変位測定	坑外	・沈下 ・地すべり	・掘削影響範囲検討 ・切羽前方地山の安定検討 ・地すべり挙動の監視	A・B	
支保機能に関する計測	ロックボルト軸力測定	坑内	・ロックボルト発生軸力	・ロックボルト長, 本数, 位置, 定着方法などの妥当性検討	B
	吹付けコンクリート応力測定	坑内	・吹付けコンクリート応力 ・作用荷重	・吹付けコンクリート厚, 強度の妥当性検討 ・鋼製支保工との荷重分担検討	B
	鋼製支保工応力測定	坑内	・鋼製支保工の応力, 断面力	・鋼製支保工の寸法, 建て込みピッチの妥当性検討 ・吹付けコンクリートとの荷重分担検討	B
	覆工応力測定	坑内	・覆工コンクリート応力 ・鉄筋応力	・覆工コンクリートの安全性検討 ・覆工打設時期, 設計の妥当性検討	B
その他	周辺部変状測定	坑内	・沈下 ・傾斜	・構造物への影響評価	A・B
	地下水水位測定	坑内	・地下水水位	・地下水対策工検討	B

問題があるが、各切羽ごとの相対比較や、地山状況が変化し際の指標としては有効である。

(2) 坑内(坑壁)弾性波探査

掘削の終了したトンネルの坑壁に一定間隔で受振器を設置し、ハンマー打撃で起振して、屈折法による弾性波探査を行うもので、トンネル延長方向の連続した弾性波速度の分布を知ることができる。ゆるみ域の判定に一般的に用いられる方法である。縦波(P波)、横波(S波)のいずれも試験可能であるが、ゆるみ域の識別にはS波の方が敏感である。

(3) シュミットロックハンマー

コンクリートの強度試験に使われているシュミットハンマーを、岩盤(岩石)の強度を測定するために改良したもので、バネにより重錘を一定の力で測定対象物にたたきつけ、その反発度から強度を推定する試験方法であり、硬岩～中硬岩に有効な試験である。多数のデータの蓄積をもとに、一軸圧縮強度とシュミットハンマー反発度との対応表が得られており、概略の一軸圧縮強度を知ることができる。測定箇所がゆるんでいたり、浮石になって

いると測定値は極端に低くなるので、測定前にハンマー打診で確かめてから試験するのがよい。

(4) 点載荷試験³⁰⁾

非整形の岩石片を上下の載荷ピストン間にセットして、点載荷(ポイントロード)することにより圧裂破壊させ、引張強度を求める試験で、切羽で採取した岩石片をそのまま供試体として試験を行うことができる(10-2-2(2)参照)。

(5) 針貫入試験

岩石に針を貫入させて、貫入深さと貫入力から強度を推定する試験で、一軸圧縮強度 100kgf/cm²以下の軟岩に対して有効である。針貫入試験結果から概略の一軸圧縮強度を知ることができる。

(6) 地山試料試験

設計に使用した定数の確認、設計変更使用する定数の確認、掘削工法変更(機械掘削から発破掘削への変更など)のためのバックデータの収集のために、切羽や水平ボーリングで採取したサンプルを使用して、10章で述べたような室内の地山試料試験を実施する。切羽では

実際に、地山を代表するような位置からサンプルを採取できるので、事前調査時の地山試料試験よりはトンネル周辺の地山状況をよく表していると考えられる。土砂地山の場合でも切羽では乱さない試料を手で採取することができる点も有利である。

11-2-4 ボーリング調査

(1) 先進ボーリング

先進ボーリングは、切羽または切羽付近に設けたボーリング基地からトンネル前方に向けて実施するボーリングで、通常は水平～若干上向き(3～5度)に掘進する。

先進ボーリングは、これから掘削しようとする地山の地質・地下水状況を把握したいとか、切羽を進める補助工法として水抜きやガス抜きをしたいという場合にまず最初に考えるべき信頼度の高い(効果と確実度においては小断面の先進坑に譲るが)調査方法である。とくに土かぶりの厚いトンネルで事前にトンネルレベルまでのボーリングが困難な場合や、大量の湧水が予測される地山の場合などには必要な調査方法となる。地質調査が主目的であればコアボーリングで行うが、水抜きやガス抜きが主目的の場合、ロータリーパーカッション方式などのノンコアボーリングで行うこともある。土砂地山で水抜きなどを兼用する場合には、孔崩れを防ぐ目的で塩ビの有孔管などを挿入しておくといよい。

(2) さぐり削孔データの利用

ノンコアボーリングやさぐり削孔は、水抜きの目的の他に、ノミ下りとくり粉の観察によって、岩の硬さ、断層の位置などを直接的に評価する簡易な調査として、従来から使用されてきている。最近では、そのさぐり削孔時に得られるノミ下がりの他に、ドリフターに与えられる打撃圧、フィード圧、回転圧の各種データを用いて、切羽前方の地山性状を予測し、様々な地質に適用できるように打撃エネルギーを求め、定量的に岩盤を評価する研究³¹⁾が行われており、現場管理に使用されつつある(図-12参照)。

(3) ボーリング孔を利用した検層・試験

トンネル周辺のゆるみ域の判定や、設計に使用した定数の確認などのため、坑内からトンネル横断方向に5m程度の短いボーリングを行い、ボーリング孔を利用した検層・試験(孔内載荷試験、速度検層(PS検層)、ルジオンテスト、ボアホールテレビなど)が行われる場合がある。

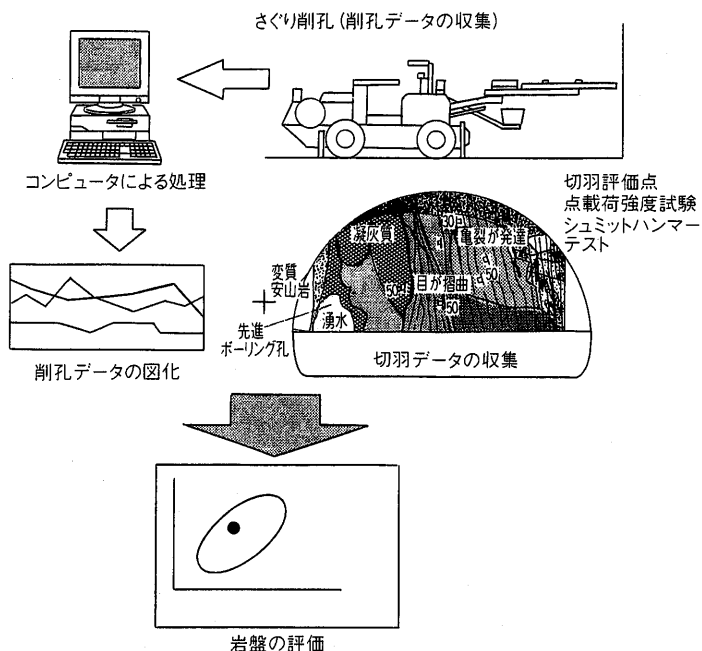


図-12 切羽画像データとさぐり削孔データの利用

11-2-5 切羽前方探査

トンネル工事における切羽前方探査は、探査距離の観点から次の3種類に大別できる。

- ① 広域の地山状況を地表から探査。
- ② 切羽前方数10～100mの地山状況を坑内から探査。
- ③ 切羽前方数mまでの地山状況を坑内から探査。

①の探査法は、従来から事前調査として行われてきた方法である。②の探査法は中・長距離探査であり、断層破碎帯や帯水層などの地質境界面の位置や規模の探査を主な目的とし、2週間～1か月後の切羽の地質状況を予測し、事前対策の検討と準備を行うためのものである。③の探査法は、切羽近傍の探査であり、1～2日後の切羽の地山状況や物性値を検知し、切羽の安定判断やその対策工の選定などの日常の施工管理に生かすことを目的とするものである。

現在、切羽前方探査手法としては表-4に示すように数多くあるが、大きく分類すると物理探査法(弾性波探査、電気探査、電磁探査)とボーリングを利用したものおよび切羽情報を利用するものである。これらは昔からある手法を前方探査にいかに応用しようかとその観点で技術開発や適用性が研究されているのが現状である。これらのうち、切羽観察の利用、ボーリング調査が前述したように利用されつつある。坑内から弾性波反射面を探査する坑内水平弾性波探査法³²⁾がTBMなどの急速施工時の前方探査法として適用されている。また、切羽の地温測定を前方地下水探査に適用する試みなども今後注目

表-4 前方探査技術の現状と評価(施工中の坑内から実施する調査技術)

概要	調査手法	ボーリング・調査坑の活用							物理探査								
		切羽観察・画像処理	ボーリング調査		調査坑の施工	孔内観察・画像処理	各種孔内試験・検層	各種試料試験	各種原位試験	穿孔検層法	地温測定	地山先行変位測定	坑内比抵抗探査	坑内簡易弾性波探査	坑内水平弾性波探査	表面波探査法	電磁波反射法
			ノンコア	コア													
基本事項	探査内容	切羽の地山状況	穿孔情報	コア採取	各種地山情報	孔内の地山状況	各種物理量他	破壊エネルギー	地山温度	地山先行変位	比抵抗分布	弾性波速度	弾性波反射面他	表面波伝播速度	電磁波反射面等		
	探査可能距離(m)*1	鏡	ボーリング・調査坑の深度					80	数m	20	数m	数m	100	30	10		
	準備・作業時間*2	◎	△	△	△	△	△	△	◎	◎	◎	◎	○	△	○	◎	
	解析時間*3	◎	◎	△	△	△	○	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	◎	◎	
調査項目	地層状況の変化	破碎帯などの位置	○	◎	◎				◎			○		○	○	○	
		同上, 走向・傾斜	◎			◎				△				○	○	○	
		同上, 規模(幅など)		○	◎	◎				◎		○		△			
		地下空洞の有無	○	◎	◎	◎				◎		△				○	
		ガスの賦存位置(岩質・地層対比)	◎	△	◎	◎	◎			○		△		○	○	△	
	地下水	帯水層の位置		○	○	◎				○	○		○		△	△	○
		帯水層の透水性	△			△	◎	◎	◎								
		同上, 水圧	△			△	◎	◎									
	地質の状態	不連続面の間隔	◎		◎	◎	◎										
		不連続面の状態	◎		◎	◎	◎										
風化・変質		◎	○	◎	◎	◎	◎	◎	○		○	△	△	△			
力学的性質	地山強度	△	△	△	○		◎	◎	◎	○			○	△	△		
	変形係数	△					◎	◎	◎		○		○	△			
	異方性	△					◎	◎	◎								
	緩み領域	△	△	△	△	○	◎	◎	◎	○	△		◎	○			
実用化のレベル*5	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	△	△	△	◎	○	○	△	

*1 探査可能距離 同一技術でも岩質等の地山条件によって差異が生じる。
 *2 準備・作業時間 ◎: 1, 2時間程度, ○: 半日程度, △: 1日以上掘削休止
 *3 解析時間 ◎: ほぼリアルタイム, ○: 数日以内, △: 1週間以上
 *4 調査項目に関する評価 ◎: 信頼性の高い情報となる, ○: 傾向をつかめる情報となる, △: 参考になる程度の情報となる
 *5 実用化のレベル ◎: 実用化技術・慣用技術, ○: 試行段階の技術, △: 実験段階の技術

される³⁹⁾。その他の前方探査は、現時点では費用、時間などを考えた場合、研究段階であり、今後の開発が待たれるものである。

(文責: 水野敏実・応用地質(株)技術本部道路部課長/中藤健一・前田建設工業(株)技術研究所部長/長谷川昌弘・大阪工業大学土木工学科教授/木谷日出男・(財)鉄道総合技術研究所主幹技師/大島洋志・国際航業(株)取締役技術センター長)

参考文献

- 1) 日本道路公団: 設計要領第三集トンネル, 1997.10.
- 2) 日本材料学会編: 岩の力学, 基礎から応用まで, 平成5年12月, p.67.
- 3) 日本材料学会編: 岩の力学—基礎から応用まで, 平成5年12月, p.68.
- 4) 猪俣正・滝沢一成・中村吉男・山下修司・今川正男: 低振動・低騒音掘削工法(8), トンネルと地下, Vol.24, No.11,

- 1993年11月。
- 5) 今田徹：岩盤力学入門(5)，トンネルと地下，Vol.16, No.6, 1985年6月。
 - 6) 今田徹：NATM20年我々は何を学んだか，ハイウェイ技術，No.9, 1997年12月。
 - 7) 地盤工学会基準部：新規規定の学会基準案「不飽和土の三軸圧縮試験方法」について，土と基礎，Vol.46, No.2, 1998。
 - 8) 東京都多摩都市整備本部：多摩・稲城トンネル(仮称)工法検討委員会報告書，1998年3月。
 - 9) 今田徹：トンネルの技術課題と動向，土と基礎，Vol.45, No.5, 1997。
 - 10) 今田徹：岩盤力学入門(6)，トンネルと地下，Vol.16, No.7, 1985年7月。
 - 11) (社)日本トンネル技術協会：山岳トンネルの施工法に関する調査研究(その3)報告書，平成2年2月。
 - 12) 日本国有鉄道(旧)：地質調査標準示方書(施管第652号)，日本鉄道施設協会，pp.80~81, 1983。
 - 13) 建設省：土木試験基準(案)，pp.98~100, 1968。
 - 14) 土質工学会：土質試験の方法と解説，第3章粒度試験，pp.25~67, 1990。
 - 15) 土木学会：軟岩の調査・試験指針1991版，pp.64~72, 1991。
 - 16) 市川慧・平野勇・神保悟：軟岩の簡易スレーキング試験方法の提案，土木研究所資料，第2455号，1986。
 - 17) 白水晴雄：粘土鉱物学，粘土科学の基礎，朝倉書店，pp.57~58。
 - 18) 土質工学会編：岩の調査と試験，p.516, 1989。
 - 19) 技報堂：土質力学，p.23, 1969年8月。
 - 20) 土質工学会編：岩の工学的性質と設計・施工への適用，pp.156~161, 1974。
 - 21) 土木学会：トンネル標準示方書(山岳工法編)・同解説，1996。
 - 22) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル，pp.39~44, 1997.10。
 - 23) 日本道路公団：土質地質調査要領，pp.191~192, 平成4年4月。
 - 24) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，1992.11。
 - 25) (社)鉄道総会技術研究所：トンネル補強・補修マニュアル，1990.10。
 - 26) 日本道路公団：施工管理要領基準集，トンネル施工管理要領(計測工編)，1997.12。
 - 27) 赤木・ほか：新しい切羽評価点法の適用に関する研究，第29回岩盤力学シンポジウム論文集，1999.1。
 - 28) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針・計測指針，1996.2。
 - 29) (社)日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，1993.11。
 - 30) 土質工学会編：岩の調査と試験，1989.9。
 - 31) 荒川宗久・伊藤毅浩：前方地山の事前評価用のさぐり削孔を併用しながらのトンネル掘削。(社)日本トンネル技術協会第44回施工体験発表会，pp.111~120, 1999.12。
 - 32) 山本松生・ほか：反射法地震探査結果と地質構造に関する一考察，トンネル工学研究論文・報告集，第7巻，1997.11。
 - 33) 赤松幸生・他：地温測定における切羽前方地下水状況の予測，トンネルと地下，Vol.30, No.10, 1999年10月。

R. E. グッドマン， G. H. シー著

ブロック理論と岩盤工学への応用

A5判 上製本 360頁 本体価格 4,855円 円 380円

吉中龍之進 大西有三訳

ブロック理論とは、岩盤内に分布する不連続面と自由面をなす岩盤表面、あるいは掘削面との間の三次元の幾何学的関係から岩盤の安定に影響を与える岩塊を見出す新しい手法である。

自由面と不連続面をなす不安定岩塊をキーブロックと呼び、そのブロックを安定させ岩盤全体の安定化をはかることがブロック理論の体系である。

したがって、トンネル・地下空洞・岩盤斜面などの築造に際しては、同理論の適切な活用によって安定した岩塊を確保し、支保や安全対策工の合理化・省力化をはかることができる。

〔目次〕 序説／ベクトル解析を用いたブロックの形状と安定性の記載／図解法(ステレオ投影法)／ブロックの移動可能性／ジョイント・ブロック／地表の岩盤掘削へのブロック理論の応用／地下空洞へのブロック理論の適用／トンネルと立坑についてのブロック理論／移動可能ブロックの力学安定解析

 株式会社 **土木工学社**

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

連載講座

都市部でのシールド立坑に係わる新技術(8)

立坑の構築技術(5) 特殊な立坑構築例(その1)

掘削機械に係わる新技術

「都市部でのシールド立坑に係わる新技術」
連載講座小委員会

1. はじめに

都市部でのシールド工事は過密化した地域での施工が多く、とくに深い立坑では大型機械を使用した土留め壁工事となり周辺住民に威圧感、恐怖心を与えたり、振動騒音の影響や施工が長期化して地元住民の理解を得られないことが多い。また、実際に大型クレーンの転倒事故などを引き起こして周辺に被害が及んだケースもある。

そこで、これらの立坑工事では小型化した安全で静かな機械装置や急速施工が可能となる技術がニーズとして強く求められている。このようなことから、ここでは特殊な立坑構築例のなかで、掘削機械に係わる新技術として、

- ① 大口径全旋回ボーリングマシンによる立坑構築 (Quic4000 工法)
- ② 分割リング圧入工法による立坑構築 (アーバンリング工法)
- ③ 大口径リバース掘削工法による立坑構築 (RESCO 工法)

の3工法を取り上げ、工法概要を紹介し計画・施工の技術上の留意点について、施工例を挙げながら解説する。

2. 大口径全旋回ボーリングマシンによる立坑の構築

2-1 工法の概要

大口径全旋回ボーリングマシンによる立坑構築工法(以下、Quic4000 工法と称す)は、全旋回ボーリングマシンによる基礎杭の技術に着目し、都市部の建設工事における振動、騒音、交通渋滞などの諸問題を解決すべく外径4,100mmの円形立坑の構築方法を開発したものである。

本工法は、図-1, 2 に示すように立坑構築位置にセットして、ケーシングチューブを回転圧入するための「①全旋回ボーリングマシン」と、ケーシング内を中掘りするための「②ハンマグラブ・③クローラクレーン」、および全油圧駆動方式となっているボーリングマシンの駆動源となる「④パワーユニット」の4つに大別した構成システムで順次ケーシングチューブを沈設する工法である。

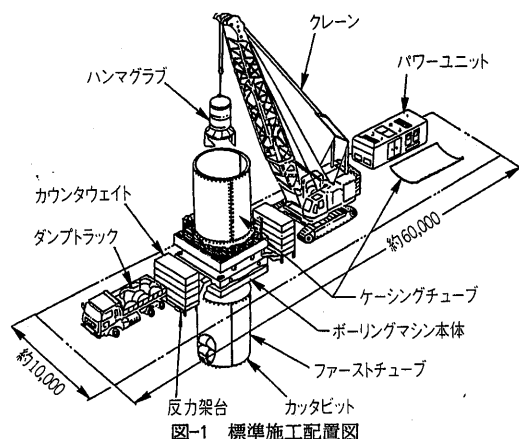


図-1 標準施工配置図

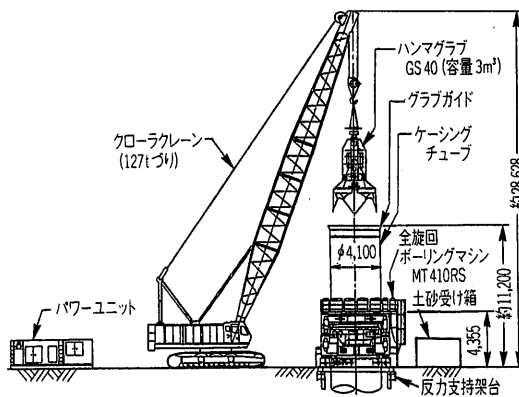
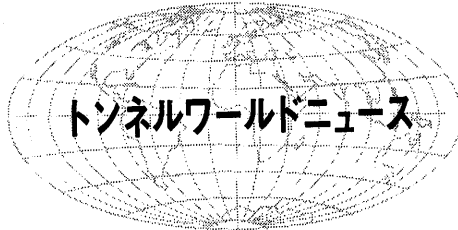


図-2 施工図

以下に、Quic4000 工法の特徴として、

- ① 回転圧入による高速施工が可能で大幅な工期短縮が図れる
- ② 大口径で大深度(φ4,100mm×40m以上)の施工が可能である
- ③ ファーストチューブの先端に装備するカッタビットを工夫することで、土質を選ばずに軟弱粘土から軟岩までの掘削が可能である
- ④ オールケーシング工法によるため、ヒービング、



(社) 日本トンネル技術協会
国際委員会国内広報ワーキング

ベルリンにおけるトンネル工事

ベルリンの中心部におけるトンネル工事は、地下鉄U5の地下路線延長部のトンネル掘削が完了するとともに、21億ドル(2,205億円, 1\$=105円)を費やして近距離および長距離鉄道をそれぞれ市内で南北に連結するトンネルの南側工区を掘削するシールド機の組み立てが開始されるなど最盛期にさしかかっている。

Reichstag-Pariser Plats間のU5の連結線は内径5.8m, 延長480mと450mの2本のトンネルからなり、Herrenknecht社の泥水式シールド機で掘進された。U5は連続した新しい官庁街へとつながる東西方向の幹線となる。

2本目の掘削は8月の初旬に完了したが、このトンネルはドイツにおける二次覆工を省略したセグメントタイプの覆工を採用した最初のトンネルであるといわれている。

工事を請負ったWalter Bau社による解体作業は1.2barの圧気下で行われている。シールド機の撤去は11月の最初の週に完了する予定である。

一方、主要幹線である南北線のReichstag-Potsdamer Plats間を結ぶ北側工区4本の内径7.8mのトンネルの最後の1本は10月の初めに完了する予定である。掘進は延長710m, 土かぶり18~25mであり、2.3barの水圧下において直径8.95mのHerrenknecht社の泥水シールド機を用いて掘削が行われた。

それと同時に、同一仕様のもう1台のシールド機は北側工区の掘削を終えて、南側工区のGleisdreieckのケーソン内で組み立てられている。このシールド機は南側工区の4本の580mの最初の1本の掘進を2000年早々に開始する。最初の1台のシールド機は北側工区の最後のトンネルの掘進を終えてから、南側工区最後の掘進に投入され、4月に2本目のトンネル掘進を開始する。そのときまで、1本目の掘進は完了している予定である。請負者はHochtief社, Philip Holzmann社, Bilfinger-Berger社, Dyckerhoff-Widmann社の共同企業体である。発注者はDeutsche Bahnの子会社であるDB Projekt

Knoten Berlinで、施工管理はLahmeyer International社が行う。

シールド機の掘進は2001年の末までに、またすべての建設作業は2002年の末までに完了する予定である。しかしながら、プロジェクト全体の完了は2002年から2005年に延期されている。

(T & TI '99.10 担当: 真下秀明)

泰嶺トンネル貫通

延長18.5kmの泰嶺(Qinling)鉄道トンネル(中国)のTBM掘削が8月に完了し、本誌(T & T International)の特別通信員Shani Wallisが8月22日の南側での貫通を目にすることができた。これは直径8.8mのWirth社製TBMの2台のうちの1台であり、その7日後に2台目のTBMが北側の掘削を完了し、本工事での最高記録である月進528mを樹立した。

本トンネルの貫通は、中国当局と機械製作メーカーの両者にとって大きな挑戦であったプロジェクトの終了を意味するものである。このTBMは中国で使用された最大径のものであるとともに、鉄道部の職員が扱った最初のものであるため、集中的な訓練と短期間での習熟を必要とするものであった。

機構面での問題としては、北側TBMでの一部ギアボックスユニットの補修とメインベアリングのシールド部の交換が挙げられる。また、予期された以上にディスクカッタの摩耗とカッタヘッドのひび割れ発生などの問題があったが、無事に克服することができた。

本プロジェクトの当初工程では、1998年1月と2月に掘削を開始し、27か月後の2000年春に貫通予定であった。しかしながら、発注者の要請により、中国建国50周年記念にあたる10月1日に間に合うよう、完成期限が前倒しされた。この期限を守るため、両坑口からのTBM掘削に加えて、本坑に並行した既設の導坑からアクセスし、中間部を発破工法で施工することになり、その掘削延長は6.4kmであった。

最終的に、南側TBMは、150~325MPaの硬岩・超硬岩に区分される花崗岩と片麻岩の区間5,621mの掘削を18か月で完了し、平均月進は338.7m, 最大月進518mを達成した。

北側TBMは5,255mを19か月で完了し、最大日進40.6mの記録を保持している。

現在は、坑内でのTBM解体が進められており、作業の完了まで2か月を要する見込みである。解体後、このTBMは他の現場に移送される予定であり、転用先は南京-西安線の延長19kmの単線トンネル工事とのことである。

(T & TI '99.10 担当: 小島健一)

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(14)

第三編 地質調査法(6)

12. 水文調査・地下水調査

12-1 トンネル地質と水

トンネルは地質に起因して、工期・工費の予測に不確定要素が多い構造物である。なかでも水は、トンネル工事の死命を制するような重要な課題であり、トンネル地質は水を離れては存在し得ないといっても過言ではない。「地質技術者がトンネル掘削に伴う湧水や漏水の規模さらに問題の性質をできるだけ事前に把握し、それにもとづき適切な諸対策をいかに配慮したらよいか」について、有益な助言を求められるゆえんである。

このような様々な水問題に対処するため、水文調査・地下水調査が行われる。これらの調査では、それぞれ別々に地表水・地下水に調査対象を分けて行うのではなく、降水や蒸発散をも含めて『水循環』という水文学の基本概念により、トンネル周辺流域の地表水・地下水などの水文状況を一体として把握すべきである(図-1)¹⁾。

水文調査は、トンネル周辺の流域を対象とし、水に関する自然環境の他に飲料水や農業用水、漁業・工業用水などの人的な利用水を含めて行う。また、トンネルの掘削に伴う湧水や漏水などの水利権・補償やトンネル湧水

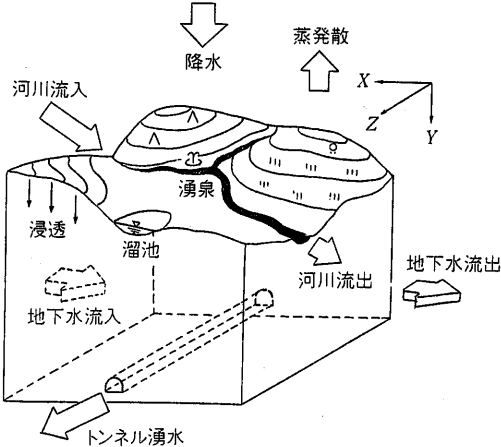


図-1 トンネル湧水に関する水の出入り¹⁾

「応用地質学」連載講座小委員会

の放流に伴う水質汚染なども対象とする。水質には濁水や一般的な公害汚染物質の他に冷水・高温水なども含む。

12-2 トンネル湧水の分類

トンネルの湧水といっても種々のものがある(図-2)²⁾。一般には、トンネル掘削中に切羽周辺に湧出する初期湧水と掘削後湧水量が安定した恒常湧水に分けられている。さらに、切羽に大量の湧水が発生する集中湧水(異常湧水)や突然、切羽崩壊を伴うような突発湧水などもよく見られる湧水である。このように湧水量の予測をする場合、どんな湧水を対象にするのかを明確にしておくことが大切である。

施工中における湧水は、湧水の発生場所によって、切羽湧水、坑口湧水などと呼ばれている。また、切羽湧水でも、最初は多量でもトンネル掘削後の時間経過とともに、通常は減少してくるので、初期湧水、恒常湧水、一時湧水などと呼ばれており、これらは、湧水の経時変化

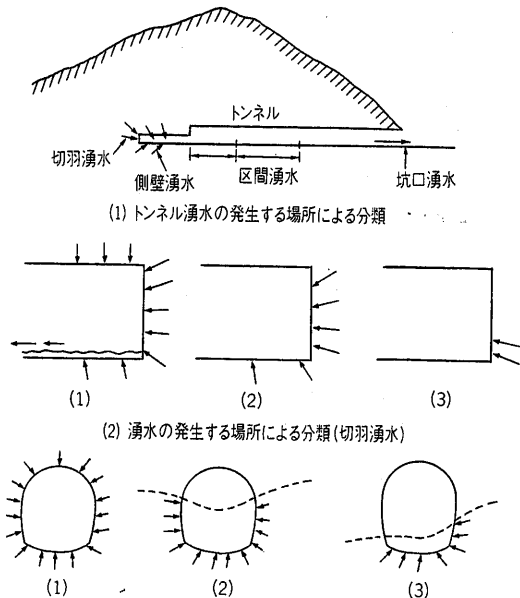


図-2 トンネル湧水の分類

による分類に属する。突発湧水、鉄砲湧水、被圧(高圧)湧水、漏水などは、湧水の形態による分類である。以上がトンネル湧水の基本的な分類によるもので、湧水の場所、時間、形態は予測計算を行う前に明確にしておかなければならない。また、湧水の起源も明らかにしておくことが大切である。

12-3 トンネルの水文調査・地下水調査の歴史

明治30(1897)年、日本で初めてトンネル掘削前に地質学者の踏査判定によって地質図が作成された中央本線笹子トンネル(4,658m)では、施工中も一々標本を採取したが、現在0.76m³/分という少ない恒常湧水量であることからわかるように、水に苦しむことはなかった。

しかし、大正7(1918)年に着工した東海道本線旧丹那トンネル(7,840m)は、大正14(1925)年の135m³/分という集中湧水により、工事は難航をきわめた。また、丹那盆地における湧泉源の減少、井戸水の枯渇が発生し、その影響が4km以上に及び、社会的に大きな影響を及ぼした。この湧水・渇水問題に対する水文学の調査は阿部謙夫(1933)⁹⁾により初めて行われ、地下水・地表水を一体とした水の循環の概念が適用され、トンネル湧水量と地表水の水収支から地下水貯留量渇水範囲を論じた研究が行われた最初のトンネルである。

日本で水文学を初めて提唱した阿部謙夫は、逋信省の発電水力調査に従事し、前後6年間九州地方における河川に関する調査を行い、河川の流水は雨水が地表を流れて入るものと、地下水の流出によるものことからなることを言及した(1926)。その後、鉄道省において、丹那隧道湧水による河川流量減少の原因を詳細調査し、千歳川と柿澤川の流出量と降水量、蒸発量を含めて行った調査結果を用いて水収支計算を行い、地下貯水量と流出係数(%)を求めた(表-1)。両河川はいずれも丹那隧道付近の河川で、千歳川は湯ヶ原付近を東流して海に入るもの、柿澤川は狩野川の支流で、丹那隧道の直上丹那盆地を西流するものである。この両流域において、降水量、蒸発量はほとんど差異がないにもかかわらず、流出量には著しい差異があり、千歳川では年の初めと終わりの地下水貯水量はほとんど同値となるのに対し、柿澤川では計算上貯水量が約900mm増加したことになる。この著しい差異は、主として丹那隧道湧水の影響によるもので、千歳川は隧道の影響がないのに対し、柿澤川では隧道からの湧水のた

め、地下水位が著しく低下し、地下水の河川に流出する量は減少し、流出量の減少を来たし、その結果、計算上地下の貯水量が増したことになる。しかし、この貯水量の増加よりも隧道への湧水が多いため、実際は地下水位がますます低下し、地表水の減少が著しくなっている。柿澤川で隧道の影響がないときに多少観測したものが、それによると流出関係は千歳川と全く同様で、前述したような変化は丹那隧道湧水の影響であることが結論づけられている。すなわち、水文調査・地下水調査は、それぞれ別個の独立した調査ではなく、地表水・地下水を一体として取り扱うものである。最近において積極的に水文循環の水収支シミュレーション手法を研究している大島の概念図の基本は、すでに阿部(1933)の時代にスタートしている。

阿部はさらに、地下水の河川への流出をポテンシャル分布と流線の概念から、地下水の河川へ流動する方程式を用いて説明している。アメリカの地質学者 Hubbert (1940)のポテンシャル概念に先立つ研究である。

Hubbert と阿部の概念図が異なるのは、地下水の河川への流出を河床面以下を不透水性基盤としていたことである。阿部の研究においてもっとも特筆すべき点は、水循環の過程において河川の基底流量が地下水の流出によるという点で、地表沢水と地下水は別々ではなく一体として見ている点である。

沢の直下にトンネルを掘ると沢水を引水するという概念があるが、これはトンネルに地下水が湧出し、地下水位を低下させたために渇水が発生したわけで、丹那トンネルの例と同様に、直接河の床から引水したのではない。

表-1 柿澤川の水収支計算表

月	1km ² あたり 平均流量 (ℓ/s)	流出量 (mm)	降水量 (mm)	蒸発量 (mm)	合計 (mm)	貯水量 (mm)	流出係数 (%)
1	12.0	-32.2	+142.3	-55.6	+54.5	1000.0	22.6
2	16.5	-41.4	+107.0	-71.3	-5.7	1054.5	38.7
3	17.1	-45.3	+174.8	-75.5	+53.5	1048.8	26.2
4	16.6	-40.4	+154.2	-96.3	+17.5	1119.8	26.2
5	16.4	-44.0	+187.2	-98.3	+44.9	1164.7	23.5
6	28.3	-73.3	+400.6	-65.1	+262.2	1426.9	18.3
7	19.3	-51.7	+209.1	-100.2	+57.2	1484.1	24.7
8	54.7	-146.6	+401.9	-82.0	+173.3	1484.1	36.5
9	10.1	-26.2	+97.3	-78.2	-7.1	1657.4	26.9
10	12.2	-32.7	+292.5	-59.6	+200.2	1650.3	11.2
11	10.9	-28.2	+115.3	-50.4	+36.7	1850.5	24.5
12	7.0	-18.8	+62.3	-52.8	-9.3	1337.2	30.2
年	18.4	-581.3	+2344.5	-885.3	+877.9	-	24.8

流出関係計算表(その4) 狩野川水系柿澤川丹那尻(静岡県)流域面積 11.897km² 昭和3年

河川の基底流量が地下水流出量であることを提唱したのは、20世紀初頭フランス人 J. Boussinesq(1905)や E. Maillet である。それから20年後に阿部謙夫(1926)⁴⁾は、日本で初めて Boussinesq の“基底流量=地下水流出量”という概念のもとづいて九州山地の地下水流出量を調べ、その研究成果をもとに丹那トンネル湧水と、周辺河川流量や湧水の濁水原因解明に適用したことになる。

このような考え方は、後に阿部の後輩にあたる高橋彦治(1962)⁵⁾の「トンネル恒常湧水量を把握するための水文学的方法」へと発展し、さらに大島洋志(1983)⁶⁾の地質と水循環とトンネル湧水を併せた時系列の水収支シミュレーション手法に統合体系化されて、多くの湧水トンネルで用いられるほどに進展した。

トンネル掘削中から掘削後までのシミュレーションの方法によるトンネル地下水を認識する方法は、大島の方法のほかに大東憲二(1995)⁷⁾など多くの手法が用いられている。それらの基本概念はトンネルを含めた流域全体における降水・蒸発散・地表水沢水と地下水の出入りする器、すなわち地質を含めて一体とした水循環・水収支をトンネル掘削工程を組み込んだ時系列の計算を行うというものである。

以下に、トンネル湧水の捉え方の基本ともいうべき高橋と大島の方法について概説する。

12-4 高橋の水文学的方法(恒常湧水量)

山岳トンネル周辺の地下水調査では、井戸がないので沢水や谷川溪流の流量を一定期間毎日測って基底流量を求め、これを山体からの地下水湧出量とみなす。基底流量が地下水流出量であることを提唱したのは20世紀初めごろのフランス人 J. Boussinesq(1905)や E. Mariotte である。それから20年経って、阿部謙夫(1926)が日本で初めてブシネスクの“基底流量=地下水流出量”という概念のもとづいて九州山地の地下水量を調べている。さらに30年後の1961年、高橋彦治は阿部謙夫の研究などをもとに地形・地質条件を考慮して、「トンネル掘削時の恒常湧水量は、周辺沢の基底流量に比例する」という、いわゆる「高橋の水文学的方法」を提案した。この理論は北陸トンネルをはじめ多くの湧水トンネルで用いられ、実用的で理解しやすい手法であることが認められている。

高橋の手法とは、トンネル周辺小流域の流量観測から基底流量を求め、流域面積で除した比流量(S_p 、通常 $l/sec/km^2$ の単位)と地形学的に求めた流出範囲(A)からのトンネル恒常湧水量(Q)を算出する。

$$Q = S_p \cdot A$$

この比流量(S_p)は、河川工学で用いる濁水量(1年を通じ365日間これより少なくってはならない流量)から求

めるのではなく、正しくはトンネル周辺の小流域ごとの流量観測値からハイドログラフを作成し、基底流量を分離して求めなければならない。トンネル周辺の流量観測がなされていない場合は、近くの河川の河川台帳から比流量を見て地下水量の目安として用いることもあるが、トンネルの標高が著しく異なったり、河川台帳の流域がトンネル周辺小流域より著しく大きい場合が多いので実用的ではない。ただし、火山地域や扇状地のような場合は大きな流域で見ること大切である(真鶴トンネル、榛名トンネル)。

比流量とトンネル湧水量は通常山岳トンネルでは、 $15 \sim 30 l/sec/km^2$ 程度の比流量が多く、その場合のトンネルの恒常湧水量は、おおむね $1 \sim 444 m^3/分/km$ 程度と考えればよい(旧丹那トンネル $47 l/sec/km^2$ 、恵那山トンネル $30 l/sec/km^2$ 、津軽トンネル首沢 $120 l/sec/km^2$ 、安房トンネル $35 \sim 45 l/sec/km^2$)。この比流量が求められていれば、シミュレーションによる予測をするうえで、答えの常識的な基準値として役に立つ。

12-5 大島の水収支的方法(愛称 Townby)

この方法(愛称 Townby)は、気象(降水量、融雪量、蒸発散量)、地表(流量、浸透)、地中(地質、水理定数)、地下水(水位、揚水量)および施工(トンネル断面、掘削速度など)などの各条件が水文学的に総合的な観点から体系化したものである。作業手順の概要は図-3のようになる。この適用には多くのデータの収集・作成が必要となり、主な手順と留意点を次に示す。

(1) 計算範囲とブロックの大きさの設定

(2) 気象データの作成

- ① 降水量は過去にさかのぼって5~10年分程度を収集する。
- ② 降雪量は菅原(1984)のタンクモデルと同様の方法で扱い、春先に融雪させる。

$$r_m = m \cdot t + \frac{P \cdot t}{80}$$

r_m : 日融雪量(mm/day)

m : 5~6

t : 日平均気温($^{\circ}C$)

P : 降水量(mm/day)

- ③ 蒸発散量は、ソーンスウェイトの方法で求めるが、山岳地帯の場合、流域の上・下流の標高差が大きいので、平均気温も一般には高めのデータで計算することになる。求めた値は割り引いて考える。

(3) 水文データの作成

- ① 地盤標高は各ブロックごとに地形図から読みとる。
- ② 他流域からの地表水の流入は、流域面積が大きい場合は、タンクモデルにより計算ブロック内に流入

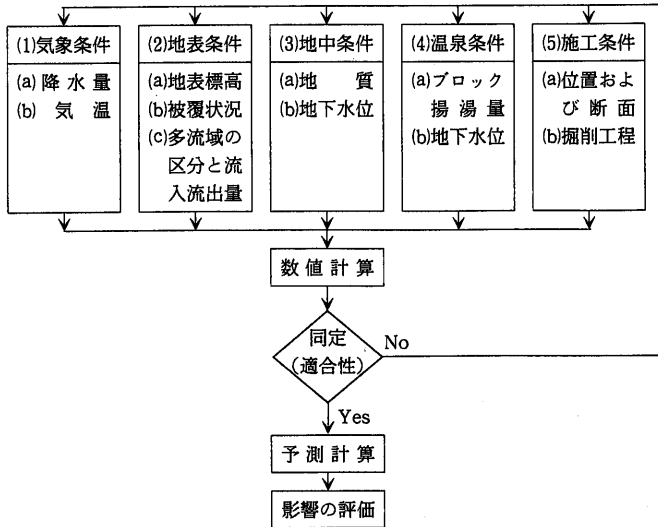


図-3 Townbyでの作業手順概要

させる。

- ③ 地下水面は、平地の場合と比較すると流域の勾配が大きいので、境界部は通常固定をしない方がよい。固定させると、冬期の渇水時に境界部の上流域には地下水位が保たれて、水収入量が大きくなる。また、トンネルの影響がない十分大きな計算範囲を設定することが必要である。
- ④ 各ブロックからの浸透は、被覆状況や傾斜を考慮した区分を行い、限界貯留高(大島の新しい定義による)によってブロックからの浸透と流出を調整する。
- (4) トンネルデータの作成
- ① トンネルの位置はトンネル路線が含まれる座標を作成。
- ② トンネル掘削速度は予想される工程を与える。例えば50m/月、120m/月など。
- ③ トンネル半径はトンネル掘削断面積を円形断面に換算したときの半径を与える。

(5) 水理地質データの作成

地表踏査やボーリングなどから地質図およびトンネル横断方向の水理地質断面図を作成し、水理定数コードを作成する。

(6) トンネル湧水量の算定

トンネル湧水量(Q)は、トンネルが掘進する地山の地下水位、地山の透水性、トンネルの径と延長により計算する。

$$Q = 2\pi \cdot K \cdot H / \ln(4H/d)$$

Q: 単位延長あたり湧水量

K: 地盤の透水係数

H: トンネル中心から地下水面までの水頭

d: トンネル直径

(7) 水収支予備検討の方法

水収支の方法を用いて詳細な計算を行う前に、あらかじめ「水収支予備検討」の作業を行い入力データの吟味と出力結果の大局的な判断を行う。これはトンネル周辺の山体に関して季節的な水収支計算を代表的な流域単位で行うもので水文気象、基底流量、表面流出量、地下水位変化などのデータなどを用いて総水収支量をマクロ的に求め、トンネル周辺山体内部の地下水流動や透水係数、有効空隙率を推定する方法である。この方法は山村和也(1960)⁹⁾が安房トンネルで用いたもので、とくに湧水トンネルの場合に有効である。

(8) 同定作業

数十万から数百万個のブロックに透水係数や有効空隙率などの水理定数を入力し、さらに浸透率、降水量、蒸発散量など膨大な数のデータが組み込まれる。それぞれの入力データは、それなりに精度を持っていても、計算誤差は計り知れない。そこで最初は単純なモデルについて計算を行い、常識的な答えが得られたら、順次トンネルの現場に合わせた計算を行っていく必要がある。

常識的な答えの基準は、第一に高橋の水文学的方法による湧水量や流域の比流量で、第二はボーリング孔などの水位変化である。メッシュの大きさにもよるが、基底流量もコントロールの基準として重要なものである。結局シミュレーションはマクロ的な水収支予備検討の域をでることはない。また、湧水量が何百 m^3/min もでたり、沢水が多いのに数 ℓ 程度以下であったら、予測は間違っている。

納得のいく結果を得るためには、数十回もの計算のくり返しは少なくとも必要になるが、1回で答えが得られることはまずない。常識的な答えに近づくために行う各々のK、Sの大きさや分布をケースごとに整理吟味して上手に進めなければならないが、これは練習や回数を重ねてコントロール技術を会得するしかない。

集中湧水や異常出水は、地質構造などから地質学的に判定するのがもっともよい。しかし、断層や割れ目系があるからと言っても、湧水量と地下水が集まる集水域の大きさは、バランスがとれていなくてはならないことを念頭に置くことが必要である。

予備検討結果と計算した出力結果が実測データに同定されるまで、各々のインプットデータの修正を試行錯誤的に行う。同じ地質でも風化や深さによっても水理定数が異なる場合もある。

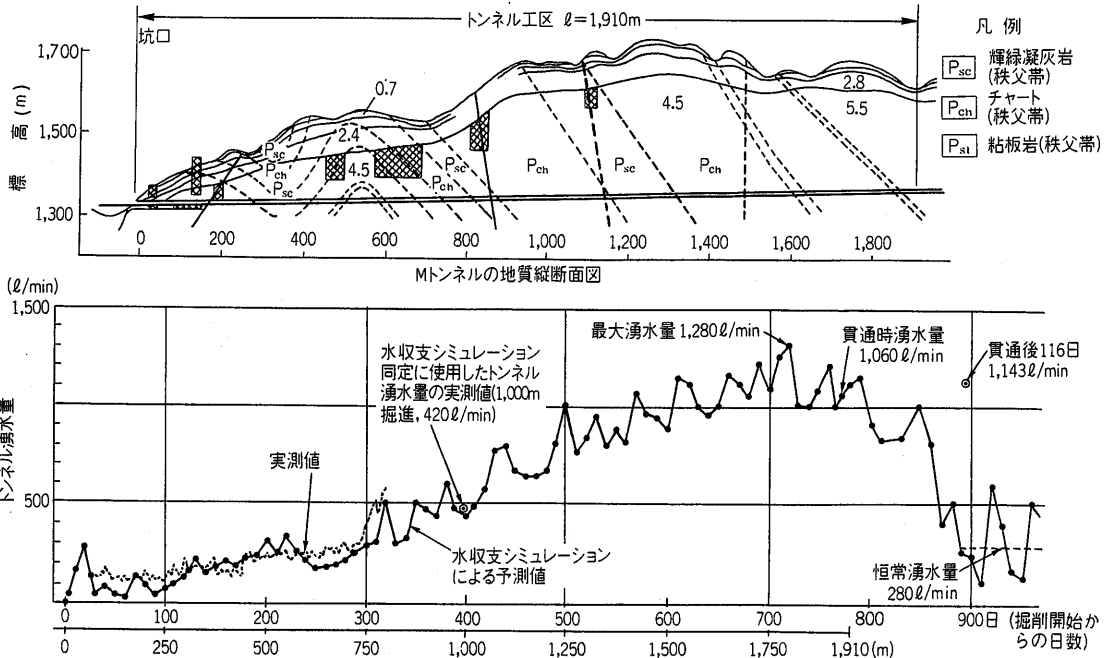


図-4 Mトンネル進捗に伴う坑口推定湧水量(Townbyによる)と実績湧水量

(9) 予測計算結果

予測結果の一例として、図-4にMトンネルの切羽進捗に伴う湧水量の予測と実績値を示す。

予測と実績はよく一致しており、高橋の水文学的方法と比べるとより現場的で実用的な情報を提供してくれる。この方法は塩塚トンネルの水問題の解決において初めて適用され、その後多くの湧水トンネルに適用され、大きな成果をあげている。この手法の適用では、多数の実測データが必要で、次に示す現地調査や資料による調査が実施される。

12-6 水文調査・地下水調査の方法

ここでは、トンネルの設計や施工計画のために行う調査について概説する。

12-6-1 調査項目概要と留意点⁹⁾

調査は、表-2に示した個々の調査からなり、その結果をもとにトンネルの湧水量や集水範囲、水収支への影響度、切羽の自立性などを総合的に評価することを目的に行う。

水文地質調査では地下水の容器としての地盤の構造(透水層・不透水層の形態)と性質(切羽の自立など)、ならびに帯水層に胚胎される地下水の量や動きに関する性質を調べる。水文環境調査では、上記調査から得られる集水範囲内に存在する各種水源の用途と水量、水質を調査し、別途実施の調査結果と対照することによって水利用への影響を判断する。事例調査では、対象トンネルに地形・地質条件などが類似したトンネルの実績や現状を

把握し設計・施工の参考にする。

調査は「期間」と「範囲・位置」に十分に注意を払う必要がある。河川流量や地下水位などは絶えず変動するので、その傾向を知るためには長期観測が必要となる。調査範囲は市町村界のような人為的な境界ではなく、地形・地質的単元をもとに決める。調査はボーリングのような点的なもの、弾性波探査のような線的なものもあるが、その情報は点・線に留めず、三次元的な広がりの中で評価・解釈することを心がけるべきである。

地下水調査は、地質調査の1項目と位置づけ、路線の計画段階から計画的に行うべきである。路線決定後に形式的に行うのみでは、この調査から得られる有効な水の情報を当初から無視して路線を決定したという批判を免れることはできない。

12-6-2 水文地質調査¹⁰⁾

(1) 帯水層の構造調査

1) 資料調査

該当地域の空中写真、地形図、地質図、地質調査報告書、学術論文、土地利用図、水理地質図、井戸台帳、工事記録、災害記録、気象観測資料、河川流量表などの既存資料からは多くの情報が得られるので、総合的な判断材料として大いに活用すべきである(第Ⅲ編2章参照)。

2) 地表踏査

地表踏査はすべての調査の基本に位置づけられるもので、なるべく多くの露頭から多くの地質情報を収集し、これらをもとに帯水層構造の概要を明らかにする(第Ⅲ

表-2 水文調査の方法とその重要性¹⁾(大島洋志による)

調査法		調査段階		路 線 選 定	設 計 ・ 施 工 計 画	施 工 中	竣 工 後
		調査	段階				
水文地質調査	帯水層の構造調査	資料調査	◎	◎	○	△	
		地表面踏査	◎	◎	○	△	
		弾性波探査	○	◎	○		
		電気探査	○	◎	○	△	
		ボーリング	○	◎	◎		
		検層	○	◎	◎		
	帯水層の能力調査	現地水質調査	◎	◎	○	△	
		工業用水試験法にもとづく水質分析	△	○	△	△	
		その他水質基準にもとづく水質分析	△	○	○	△	
		井戸水位変化	△	○	○	○	
		揚水試験法	○	◎	○	△	
		湧水圧試験法	△	○	△		
	水収支調査	微流速測定	△	○	△		
		注水試験	△	○	○		
		トレース法	△	△	△	△	
		室内試験法	△	△	△		
		土壌の浸透性		△	△	△	
		浸透度試験		△	△	△	
水文環境調査	減水深測定	△	○	○	○		
	pF値測定	△	○	○	○		
	降水量調査	◎	◎	◎	◎		
	水量調査	◎	◎	◎	◎		
	水位測定	○	◎	◎	◎		
	蒸発散量調査	○	○	○	○		
	水源調査	有効雨量調査	○	○	○	○	
		湧泉調査	◎	◎	○	○	
		河川流量調査	○	◎	○	○	
		湖沼・貯水池調査	◎	◎	○	○	
水利用調査	井戸調査	◎	◎	○	○		
	被覆形態調査	◎	○	△	△		
	上・下水道工業用水調査	○	◎	○	○		
	かんがい用水調査	○	◎	○	○		
事前調査	その他の水利用調査	○	◎	△	△		
	トンネル湧水量	◎	◎	○	○		
	湧泉湧水量	△	◎	◎	○		
	河川流量	△	◎	◎	○		
	利水への影響	◎	◎	○	○		
	その他の検討	○	◎	○	○		
予測	水収支シミュレーション	△	△	△			

◎:実施すべき調査 ○:実施した方がよい調査
△:必要により実施したらよい調査

編4章参照). しかしこの調査では、湧水、井戸などの位置、水量などの水文的情報収集に力点を置く。例えば、湧泉の分布に目を向けてみると、湧泉が線状に並んでいることから断層破砕帯の分布を推定できることもある。

調査の最終目的は対象地山の透水性の評価と考えればよく、地層水タイプの地質では土粒子の粒度分布、均等

係数、空隙率が、割れ目水タイプの場合は割れ目の多少とその大小を各々目安とするような調査を行う。

3) 物理探査

弾性波探査では、地山弾性波伝播速度と新鮮な岩石試料の速度の比較などから、地層の固結度、風化度、変質度、割れ目度などを推定する。例えば、山陽新幹線福岡トンネルでは同じ三郡変成岩でありながら、平均地山速度4.7km/sの西工事区の湧水量は0.35m³/min/kmであったのに対し、3.2km/sの東工事区の湧水量は11.5m³/min/kmと著しい差を示した。このように、弾性波探査は割れ目水の帯水層構造解析に有効な情報を与えてくれる。

電気探査では、軟岩より硬岩が、含水した岩より乾燥した岩が、粘土質地盤より砂質地盤の方が各々大きな比抵抗を示すという傾向を利用し、地山の含水傾向を知ろうとするものである。帯水層の構造把握は、定性的であるが比較的利用される手法と考える。

ボーリング調査では速度、電気、温度などの物理検層を併せて実施し、帯水層の位置および透水性の推定を行うのがよい。温度検層では増温率、温度勾配変異点に着目すれば、湧水点などを推定できる。

4) ボーリング調査

コアを観察して透水性とその厚さの区分を行う。土の場合は粒度分布、均等係数、空隙率などで評価し、岩の場合はR.Q.Dのような指標で割れ目の程度(多少、大小)を評価する。R.Q.Dが小さいほど割れ目が多く、含水質の地盤であるといえるが、透水性についてはそれだけでなく、検層や揚水試験などの結果と併せて評価する。また、削孔中の送水・漏水量や水位の変動は貴重な情報であり、柱状図などに併記するのがよい。ボーリング調査は後埋めを原則とするが、施行中の水位観測孔として利用するのがよいこともある(12-7参照)。しかし、この孔が切羽に対する水みちとなり、掘削作業に悪影響を与えることもあるので、トンネルとの位置関係は壁側から10mほどは離しておくのがよい(第Ⅲ編8-3節参照)。

5) 水質調査

地質条件と水の環境条件(沢水、湧水、浅井戸)の差違が水温、水比抵抗、pHといった現地で簡易に測定できる水質に現れることがよくある。数多くの地点で調査して得られる等比抵抗線図、等pH線図から帯水層の構造を明らかにできることがある。なお、pHや水比抵抗は豊水期と渇水期とでは傾向的に異なるので、河川水の中に占める地下水の依存度が高くなる基底流出時に測定するのが望ましい。

(2) 帯水層の能力調査

帯水層に胚胎される地下水の量や流動性の評価は一般

に透水量係数と貯留係数でなされる。降水の地下水への寄与度、水田などへの必要水量を判断する場合は、表層地盤の透水性が問題となることもある。透水性は垂直・水平方向に不均質であるので、多くの地点の試験をもとに広域的な評価を心がける。

以下に透水性を評価するいくつかの方法を概説する。

1) ボーリング孔を用いる試験法

第Ⅲ編 9-2 節(第 31 巻 2 号)を参照されたい。

2) トレーサ法

水と反応しにくく、希薄濃度でも追跡可能で、水質基準に抵触しない薬品を孔内などに投入して観測点までに薬品が到達するまでの時間と濃度変化を測定することで、地下水流を明らかにしようとする方法である。地下水に混入している放射性同位元素(トリチウム、炭素など)をトレーサとして用いる方法もある。

3) 室内試験法

サンプリング試料の土粒子の真の比重、単位容積重量、粒度分布などから有効空隙率と透水係数が推定できる。また、併せて切羽の安定性に関してシルト以下の細粒分の割合や均等係数について求めておくのがよい。

4) 表層地盤部の透水性を評価する方法

① 浸透度試験

降水や灌漑用水が土壌に浸透する速さを浸透度と呼ぶ。この値は当初大きく、時間の経過とともに次第に小さくなるが、その最大値を浸透能と呼ぶ。円筒浸透計による測定で求める。

② 減水深測定

減水深は水田における消費水量を1日あたりの水深で示す指標で、水田用水量の算定に重用されている。これは蒸発散量と浸透量との和であり、水田の土壌や地形、地下水位の状態、水稻の生育状態によって左右される。用水計画としての減水深は用水ブロックごとにしろかき期の水量(cm)と平常用水期の減水深(cm/day)がわかればよい。

③ pF 値測定

pF 値とは土壌水分状態を表す指標で、土粒子を結合している水を除去するのに必要なエネルギーを単位水柱高(cm)の対数で表したものである。降雨後の土壌は重力水から吸湿水に至るあらゆる種類の水で飽和しており、pF 値は低い。晴天が続くと重力水が排除され、pF 値はおおむね3まで上昇する。植物が給水できる土壌水の pF 値は1.8~3.8の範囲であり、3.6以上では灌漑する必要があるとされている。

これらのことから、降雨前後における pF 値の変動傾向で表層土の透水性の良し悪しがわかる。トン

ネル施工前後の変動傾向と比較すると、掘削工事が表層土の保水性に及ぼした影響を評価できる。

12-6-3 水収支調査

水収支という概念がある。地下水は水循環系の一構成要素であり、降水(R)は蒸発散(E)、地表水(D)、地下水(G)と地面貯留(SS)の総和として説明できるというものである。このような水循環をある範囲、ある期間に限定して数量的に取り扱うのが水収支調査である。

短期的に水収支を考える場合、対象期間は一雨一雨であり、一降雨ごとのハイドログラフから降雨量に占める河川流出の比率(流出率)や減衰の傾向を調べる。流出率が小さい場合、地下水浸透が多く、トンネル湧水が多いことを予想させる。また、減衰傾向が緩やかな場合、保水性がよく、恒常湧水量が多いことを予想させる。

長期的には、乾期を区切りとする1年がよく用いられる。補償問題がからむ場合の調査はできるだけ長期の観測を心がけ、その地域の特性を捉えておくべきである。

坑内湧水が始まると、水収支バランスに変化が生じる。トンネルの進捗につれ坑内湧水に占める地下水貯留の依存度は低下し、徐々に降水起源の地下水に依存するようになる。

したがって、トンネル湧水は地下水貯留量の減少と河川流量、地下水流出あるいは蒸発散量の減少という形で水収支に影響を与えることになる。

一方、トンネル湧水は新規に開発された水源と考えることができる。貯水池がない場合、水利用可能な河川水は基底流出と洪水流出のほんの一部に限定される。しかし、トンネル湧水の場合はトンネル上部付近の地山が流量を保留する機能を果たしてくれるため、地表流出のピークが均された平滑なものとなる。よって、河川流量が減少しても、トンネル湧水とを併せれば、利用できる水量は以前よりも増加したということも十分にありうる。

以下、各水文要素ごとに調査上の留意点を列記する。

① 降水量調査

対象地域に近い長期観測点のデータ収集を行うとともに、必要により観測点を新設する。これらのデータをもとに対象地域内の降水量を推定する。

② 河川流量調査

調査は条件のよい位置においてその場で可能な限り正確な方法で行う。長期観測の場合は、別の方法によりその妥当性を時々検定して正確を期した方がよい。流量測定は降水量との関係でハイドログラフが得られるようにするのがよく、従来の基底流出だけをねらった長期観測でなく、短期でもよいから連続的記録のある方が望ましい。調査の結果は流域図、流量変動図、湧水比流量図として整理するほか、降

水と流量の相関、流量減衰特性、流出率などについて分析する。

③ 地下水水位調査

地下水水位を井戸やボーリング孔などで目盛式、電気簡易法、日記水位計などを用いて測定する。できるだけ経時変動を降水量との関係で求め、地下水水位変動図、地下水水位等高線図のような形にまとめる。

④ 蒸発散量調査

蒸発散量は水収支法、ソーンスウェイト法、蒸発計などにより推定する。ほかの水文要素の残りを蒸発散量と考える水収支法によるのを第一義とするのがよい。簡単には水面蒸発量が気象台などで長期観測されているので、これに口径補正と水面に対する蒸発散比を考慮して求めることも考えられる。

12-6-4 水文環境調査

対象区域内の地表水や地下水と水利用との関係を水源と水利用の両面から明らかにするために行う調査である。地下水や地表水のうち直接利用されているものは全体のうちごくわずかであるが、小さな領域を考えると、利水量に対して供給能力がそれほど十分でない場合が多い。このような地域では貯水池などを設けたり、ほかの水系から引水するなどしている。水源と水利用は供給と需要の深い関係にあるので、両者の相互関係を捉えなければ水文環境は明らかにできない。

(1) 水源調査について

① 有効雨量

前述した植生にとって有効な pF 値 (3.8~1.8) の範囲内でこれを低下させるに寄与した降雨は有効雨量とみなせる。水田では、5~80mm 内の日雨量を半月(5日間)合計の80%を有効雨量とみなすという簡便な考え方がとられている。

② 湧泉

湧出構造を明らかにするとともに、分布と用途および湧出量、水温や水質の変動について調査する。

③ 河川

取水堰の位置やそこから分岐した用排水路の系統と取水目的、取水量、取水期間などを概略把握する。

④ 湖沼・貯水池；分布と用途、貯水能力と流入・流出量、使用期間および灌漑ブロックの範囲と面積について把握する。

⑤ 井戸

分布と用途、構造、水量、水位変動、水質などを調べる。

(2) 水利用調査について

① 被覆形態調査

地表の被覆形態からその区域の水文環境の一端を

知ることができる。水源的な面からは地山の保水性や降雨流出などの特質をつかむことができるし、利水的な面からは水田や畑地、林などの利水分布を知ることができる。調査結果は宅地、裸地、水田、果樹園、草地、森林などに区分して表示する。

② 上下水道・工業用水

上下水道については利用の人数、水量などを、工業用水については利用者、目的、水量などを調査する。

③ 灌漑用水

用排水路、水収支ブロック、水田面積、灌漑期、必要用水量、水利権などを調査する。もっとも水量を必要とするのは水田で、中でもしろかき期が用水のピークとなる。調査地の各ブロックが、何日間でもしろかきを終えているか、あるいは何日に短縮できる能力をもっているかを重点に調査すればよい。

④ その他

酒造用水のような水の特殊性を利用したものや観光資源としての滝や湧泉のような自然環境などの特性を利用した水利用があるので、これらの実態についても調査する。

12-6-5 事例調査

トンネル掘削に伴う湧水や渇水の問題を事前に量や規模として予測することはきわめて困難であるが、対象トンネルと地形、地質、土かぶり条件がよく似たトンネルの事例を調査することにより、トンネル湧水や渇水の規模をある程度予測することができる。

12-6-6 調査のまとめ

調査が終わったら、トンネル湧水と集水範囲、降水量と河川流量、湧水量との関係、トンネル掘削の利水への影響などについて検討したうえで各調査段階に応じたまとめをする。

(1) トンネル湧水量および集水範囲

トンネルの湧水は前述のように施工中の集中湧水と竣工後の恒常湧水に分類できる。

1) 施工中の集中湧水

施工中の突発的な集中湧水量を予測する算式がいくつも提案されている。しかし、量もさることながら、その位置を予測することはもっと大切なことといえる。

2) 竣工後の恒常湧水

恒常湧水を予測する方法は2大別できる。一つは渇水比流量や地表水の地下への浸透量から求めるもの、一つは地盤の透水係数、影響圏、初期水位などから求めるものである。

(2) 降水量と河川流量、湧泉量との関係

降水量と流出という結果にだけ着目し、途中の流出機

構をブラックボックスと考えれば、降水と流出の関係を入力と出力の応答関係として予測式をたてることができる。地下水位の実測値とタンクモデルによる予測値との関係のように、水文調査の結果はこのように両者を関係づけた形で整理しておくことが望まれる。

(3) 利水への影響

トンネル掘削に伴うトンネルの湧水が及ぼす地下水や地表水形態の変化が利水にどのような影響を与えるかを予測することは意義あることである。精度的にはまだ検討の余地があるが、今までに述べた調査の基礎データを処理していけば、各水収支ブロックにおけるトンネル施工前の用水の過不足量を求めることができる。トンネルの恒常湧水量が予測されれば、各河川の減水量を与えることができるので、同様な処理からトンネル竣工後の用水の過不足量を求めることができる。両者の差がトンネル施工によって生じる利水への影響となり、不足を補う手段としての揚水設備、貯水池などの能力のあるべき姿を見込んでおくことも可能である。

(4) 水収支シミュレーション

水収支シミュレーション手法は、前述した大島の方法に代表されるように、かなり常識化された手法となってきた。評価については実測データなどの問題から検討されねばならないこともある。この手法は最初、割れ目を対象とする山岳部分ではあまり適用例はなかったが、最近になって適用例もかなり増えてきている。このような現場への適用では、実際に今なお困難な問題を多く有しているが、有効な方法であることに変わりはない。

また、この手法を水問題の少ない路線の選定あるいは、候補路線における水問題の可能性の想定あるいは、問題が考えられる地域において、止水対策の種類や施工区間を変えてその効果を比較するのに用いたりできる。このような例から明らかなように、この手法は上手に使用すれば事前調査の一つの強力な手段として評価できると考える。

(5) 湧水圧の予測

トンネル掘削に伴う地下水の水圧は、トンネル内部においては、水平ボーリングによる測定や、トンネル路線上で実施した垂直ボーリングにおける水位や水圧の測定を行って求めたりして、それらの測定データから概略の予測を行ってきた。

また、山岳トンネルでは、経験的にトンネルの土かぶりとの関係で予測する場合もあった。

しかし、切羽を安全に確保するために水抜きボーリングなどで水圧をどの程度低下させたりすればよいかが必要な場合は、トンネル切羽周辺の水圧ポテンシャル分布を経験だけではなく、しばしば理論的に水平水抜ボーリングの数、切羽の数、水抜きに要する時間などを予測し

なければならないことがある。そのようなときの予測は、できるだけ現場の要求に対応して種々なケースを短時間に答えを出して対応する必要がある。

最近では、コンピュータが手軽に使用できるようになり、また、理論的にもしっかりした計算ソフトが作成されているのでそれらの利用技術を会得しておけばよい。ソフトの操作は簡単であるが、要は、どのように現場にあった答えを出せるかであり、それには水文地質的な知識と経験はもちろん、トンネル坑内の現場湧水・水抜き孔などの状況を熟知してモデル化を行い、正しい答えを出すことが必要である。

(6) 湧水の起源の予測

トレーサーによる地下水流動の予測は、地下水面や透水係数にもとづく地下水の流れの認識方法に対して、実際に水みちにおける地下水の流れそのものをモニターしようとする方法である。従来の地下水面や透水係数の認識方法よりも、より局所的な指向性の強い流れなどが把握できるが、両者の認識方法の違いによる地下水の流れのイメージに差が生じる可能性がある。

トンネル直上に池・ダムがあったり沢水が流れていた場合、掘削中のトンネル湧水の起源が、それらの地表水から浸透してきたものかどうかを判定する場合、トレーサー調査が行われることがある¹¹⁾。これらの調査と同時にトレーサーの動きは、地下水流動を追跡するシミュレーションを行うことによって予測できる。

この場合、地下水の流動途中にチェック孔の観測が行われれば、より近似したモデルの修正と予測が可能になると思われる。

(7) 超深部のトンネル地下水問題

水収支計算の予測と実績が一致していてもトンネル内に温泉がでて来たり、非常に流れの速い地下水もトンネル坑内やその周辺で確認される例もある。また、湧水トンネルの多くは、年々湧水量が減少傾向を示す。これらの湧水や地下水の起源やメカニズムは、必ずしも水収支だけでは説明できないという問題がある。

また、超深部の水の動きがほとんどないようなところのよい岩盤の地下水の賦存、流動を測定しようという研究もある。

これらの解決方法として、水質による方法(1962)¹²⁾や島田純(1986)¹³⁾らの環境同位体水文学的手法が試みられている。例えば、恵那山トンネルは8.5kmの延長で、貫通時の総湧水量は約40m³/分、湧水圧は最大50気圧を記録した一級の湧水トンネルである。ここでは、5,000年程度の古い地下水も湧出しているが、水文学的に水質や同位体(³H, ¹⁴C)、湧水圧などの面から地下水とトンネル湧水のメカニズムが総合的に研究されている。

12-7 施工中の調査¹⁴⁾

トンネル切羽の前進と併せて坑内湧水や地表水量ならびに地下水位の変動を調査し、それを事前調査の予測とを比較検証することで、切羽前方の一層の確度の高い予想が可能となる。すなわち、観測修正の考えはトンネル湧水にも適用すべきである。

通常の場合、施工中の調査は、施工前から継続実施している水収支調査の測定のほかに次の2項目の調査を追加し、それらのデータをもとに過去の調査を適宜見直しすることで、突発湧水などの特異現象を前兆の段階でキャッチし、早期対応への道を開くことを目的として行うものである。

① 坑内地質観察と湧水箇所、湧水量の調査

② 工事の進捗と湧水量や地下水位の時間的変化

最近では、切羽の掘進に先立って切羽付近から先進ボーリングを実施するのが定例的になりつつあるが、非常に望ましい傾向と考える。導坑を先進するのが一般的であった旧来のトンネル工法の時代は、導坑そのものが水の存在も含めた地質調査坑の役割を果たし、併せて水抜き効果も発揮していた。NATMが標準工法となった現在、先進ボーリングのもつ役割は非常に大きいと考える。また、切羽進行に併せて、その前方に設けられた地下水位観測井の水位低下の傾向も重要な情報を提供してくれる¹⁵⁾。坑内における調査に関しては第Ⅲ編 11章(第31巻3号)を参照されたい。

(文責：石橋弘道・スイモンリサーチ(株)代表取締役社長/大島洋志・国際航業(株)取締役技術センター長)

参 考 文 献

- 1) 大島洋志・辻 徹：山岳トンネル水収支シミュレーション処理要領，鉄研報告，No.A-83-124，1983.
- 2) 市川慧・石橋弘道：地下水の調査(ダム，トンネルなどに関係した最近の地下水調査手法とその留意点)，土木技術，vol.42-4，1987.
- 3) 阿部謙夫：水文学，岩波講座，70pp.，岩波書店，1933.
- 4) 阿部謙夫：九州における河川の流量について，土木学会誌，12，975-1095，1926.
- 5) 高橋彦治：トンネル湧水に関する応用地質学的考察，鉄研報告，No279，1962.
- 6) 大島洋志：トンネル掘削に伴う湧水とそれに伴う水収支変化に関する水文地質学的研究，鉄研報告，No.1228，1983.
- 7) 大東憲二：開発による地下水状態変化の予測評価に関する研究，名古屋大学工学部博士論文，1995.
- 8) 山村和也：トンネル水収支予備検討資料，国土開発技術研究センター，1985.
- 9) 大島洋志：トンネル掘削に伴う地下水問題，応用地質，vol.38-5，1997.
- 10) 大島洋志・西森紳一：トンネル工事を対象とした水文調査法の研究，鉄研報告，No.1108，1979.
- 11) 石橋弘道・猪間英俊：関越トンネル谷川立坑周辺の水理地質学的研究，昭和57年シンポジウム及研究発表会予稿集，pp.38-41，1982.
- 12) 石橋弘道・山田憲夫：トンネル湧水の湧出機構と水質一恵那山トンネルの場合，ハイドロロジー，vol.16-1，1986.
- 13) 嶋田純：水文学に望まれる諸問題(Ⅲ)，水文学研究会秋季大会予稿集，1986.
- 14) 日本トンネル技術協会：トンネル工事と環境保全対策 第5章 湧水，pp.161-163，1985.
- 15) 大島洋志：山岳トンネルの地質に関する講習会，地質調査を中心としたトンネルと地下水，日本トンネル技術協会，pp.62-65，1994.

好評発売中

岩盤分類とその適用

吉中龍之進・桜井 春輔・菊地 宏吉／編著

B 5 判上製本 本体価格 4,656 円 (送料 380 円)

本書は、わが国における岩盤工学の権威者が、各種土木構造物・岩盤構造物別に基礎岩盤に関する「岩盤」を取り扱う土木・地質技術者、ならびに研究者のために、岩盤分類の現状、適用方法、問題点、最近の動向などを現実に即して平易に解説したものです。

最近の土木工事はルート選定に制約を受けるため、わが国特有の複雑多様な地盤を掘削することから、以前にも増して岩盤分類は重要視されております。本書は、このような社会的な背景を踏まえた数少ない待望の著書であり、岩盤工学にたずさわる関係者に広くご一読をおすすめいたします。


株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

連載講座

都市部でのシールド立坑に係わる新技術(9)

立坑の構築技術(6) 特殊な立坑構築例(その2) 土留め壁に係わる新技術

「都市部でのシールド立坑に係わる新技術」
連載講座小委員会

S A T T 工 法

1. はじめに

都市インフラ整備の一環として、幹線道路の地下に各種トンネルの立坑、地下鉄の駅舎、地下駐車場、高速道路などの大きな地下構造物を構築することが多い。また、幹線道路の地下には電気、ガス、上・下水道、通信などのライフラインをはじめとした既存地下構造物が、さまざまな位置に存在している。

これらの地下構造物が存在している位置は、地上から山留め工事が行えないために、事前に地下構造物を移設して山留め工事を行うか、地下構造物の下から路下での連続柱列杭と薬液注入などの補助工法による山留め工事が必要となる。地下構造物の移設は、敷地の問題やコスト・工程が過大になり事実上困難であるケースが多い。

また、路下における連続柱列杭による山留め工事は、施工管理、安全管理が難しいだけでなく、地上からの山留め工事とは別工程の作業となり工期が長くなる。

そこで、ツインカット拡翼式掘削機を使用し、地上から既設構造物下部を掘削し、安全かつ効率よく鉄筋コンクリートの連続地中壁を構築する SATT 工法を採用することにより、上記の諸問題を解決することが可能となり、地中埋設物の多い都市部の工事に適用して、工事の効率化や工期の短縮などに寄与している。

2. 拡翼連壁(SATT)工法の特長

以下に、SATT 工法の特長を示す。また、同工法のイメージを図-1 に示す。

- ・地中埋設物下部に連続した壁を構築できる。
- ・すべての作業を地上から安全に行うことができる。
- ・あらゆる土質に適用できる。
- ・連続壁施工と同時期に施工ができるので工期全体の大幅な短縮が可能。

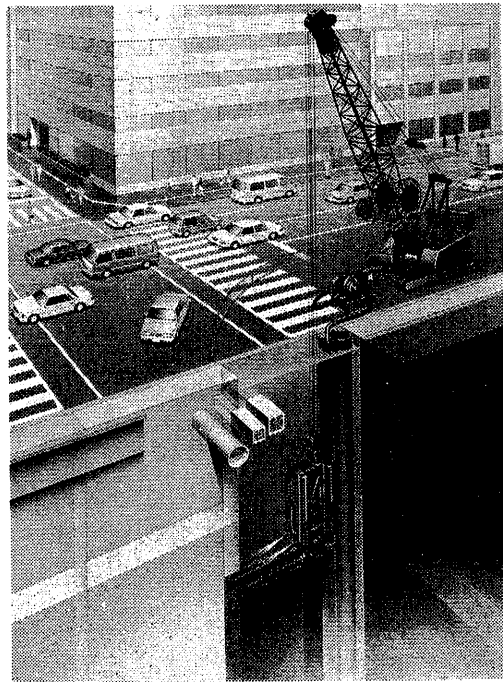


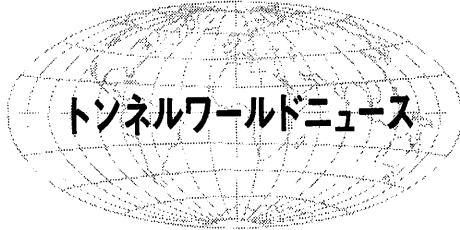
図-1 SATT工法施工イメージ

- ・内部掘削工の工程に支障なく、連続壁の施工が可能。
- ・一般部と同様の壁体を構築することができるので、他の補助工法が不要となり、工期の短縮やコストダウンが可能。

3. 掘削機械とシステム

SATT 工法は、以下に示す点を主な留意事項として掘削装置の仕様を決定している。

- ・本工法を適用する現場は、幹線道路を切り回して狭隘な作業帯で施工することが多いと考えられるので、掘削機械を軽量化し、機械設備を小型化する。
- ・都市部で想定される軟弱粘性土層から砂礫層や土丹層の硬質層まで掘削できる機械とする。



(社) 日本トンネル技術協会
国際委員会国内広報ワーキング

Jubilee Line の開業

London Jubilee Line は、現在営業しているロンドン東部の Stratford 駅からテムズ川の南に位置する Bermondsey 駅まで延伸される。すでに、途中の Canary Wharf 駅と Canada Water 駅を含め、新たに3駅が1999年9月17日に開業を迎えている。JLE は、2000年の秋には London Bridge 駅と Waterloo 駅の開業を含め、最終的に既設の Stanmore 駅に接続させる予定である。

Lord Foster が設計した Canary Wharf 駅は、エスカレーターが20か所、エレベーターが2か所、そして新しい Citibank ビルへの出入口など見るべきところの多い駅である。

駅は古い West India Quay という名のドックの中に、22mの深さまで掘削して構築されており、その中の水位低下を保つためには、55mの深さの白亜層まで揚水井戸を掘り下げることが必要であった。

駅の開業前に揚水ポンプを撤去すると、水位の上昇により22万tの浮力が生じることが予想された。この浮力に耐えるため、駅の底盤は163本のアンカー杭でおさえられている。

駅構築の下半分は、ドックの底盤から25mの深さまで届く148のエレメントのT字形の連続地中壁で建設されている。これらは、出改札階とコンコース階の間の永久壁を形成するものである。構築物は、長さ280m、幅32mである。

駅両端の出入口の屋根は、光を採り入れるため湾曲させたガラスの構造になっている。中二階のコンクリート床板は、コンクリート製の斜材で屋根から吊り下げる構造になっており、混み合う階下のコンコース階には構造物を置かない配慮がされている。

Canada Water 駅は Jubilee Line Extension Archi-

itects と Herron Associates によって設計された。この駅は1999年8月19日に East London Line に接続するために、一部が開業された。そして、St Pauls 大聖堂と同じ位の規模で建設されており、特徴は出入口の直径25mの円筒形のガラス構造にある。また、駅に面して、Eva Jiricna Architects 設計のバスの発着場が設けられている。

建築家の Ian Ritchie の設計による Bermondsey 駅は、心地よい環境を創り出すために自然光を利用し、土木技術がうまく活用されている。出入口とプラットホームの間の導線をはっきりとした通路には、半透明の屋根が取り付けられており、昼間は太陽光による自然光がプラットホームまで届くような構造になっている。

(WT. '99.11 担当: 森田健夫)

爆発による重大事故

オスロの西方約45kmに位置する Bragernes 道路トンネルにおいて1999年6月29日午後、大爆発が発生した。この事故で地元の消防士2人とトンネル施工会社に勤めているオペレータ1人が死亡した。

トンネルは長さ2,400m、断面積約70m²で、2車線の対向車線道路である。

このトンネルは、Drammen 市の郊外を北へ向かう道路交通のためのもので、2002年の夏に開通予定である。

爆発に至る一連の事実はきわめて明確である。

当時、換気ファンシステムを支えるための架台を補強するために、トンネル坑口で溶接作業を行っていた。溶接作業による火花がトンネル坑口でむきだしになっていた PE-foam (ポリエチレンの発泡材) に引火した。火はトンネル坑内に広がり、70kg のニトログリセリン系の爆薬と雷管が入っている鉄製の容器を熱した。約10~12分でコンテナは爆発し、爆破によって生じた衝撃波によって被害は甚大となった。初期の調査によると、溶接作業前に作業場所に散水が不十分であったことと、監視員が配置されていなかったことが事故の原因であったかもしれないとのことである。

さらに、爆薬と雷管を同じ容器と一緒に入れていたことと、1日の必要量を超えた量を保管していたといった安全規則の重大な違反であった。

この Bragernes トンネル事故が訴訟問題に発展することは間違いなさそうである。

(WT. '99.11 担当: 林 稔)

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(15)

第三編 地質調査法(7)

「応用地質学」連載講座小委員会

13. 立地条件調査

立地条件調査は、自然環境、社会環境および生活環境の保全目的や建設計画と工事設備に深く関係する事項について調査を行うものであり、地山条件調査(主に第三編第1～12章で触れた部分に相当)と同様に大切な調査である。1997年に環境影響評価法が成立し、近年、大気汚染・土壌汚染に関する関心が高まる中、トンネル技術者にとっては立地条件に係わる知識は必須ともなった。

ここでは、応用地質学の観点から、地質環境に係わる立地条件を中心にその調査についてまとめる。

13-1 環境調査

環境調査は、トンネル建設に起因して自然環境、社会環境および生活環境などの環境や財産権などへの影響を把握する調査である。したがって、トンネル周辺のトンネル建設に伴う環境の変化はもち論、路線計画の際のコントロールポイントやトンネル施工時に有毒な物質の発生の有無など、トンネル建設に先立って確認する必要がある事項は多岐に及び、トンネルの路線選定、施工方法や環境対策の検討では環境条件に十分配慮する必要がある。

13-1-1 広域の環境調査

この調査に関しては下記の8項目が主な対象となる。

- ① 気象(気温、水温、気圧、降雨、降雪、突風など)
- ② 既往災害(既往の自然災害発生地点と被害の程度)
- ③ 土地の用途区分、環境区分
- ④ 既存交通網
- ⑤ 神社・仏閣、学校・医療施設(施設の位置と規格)
- ⑥ 史跡、天然記念物、文化財(位置、規格、法指定)
- ⑦ 自然公園(範囲、法指定)
- ⑧ 地下資源、温泉等(権利設定の範囲、稼働状況など)

応用地質学的な観点からは第二編第1章(路線選定と地質条件)に記したように②、⑧が重要な調査項目となる。

②の既往災害は、地すべりや断層などトンネル計画に

係わる重要な事項であると同時に、建設時に問題となる地質条件や坑口の設計・施工法に影響する。

⑧の地下資源等はトンネルの補償対象調査(13-3 補償対象調査参照)に係わると同時に、重金属や有毒ガスの発生など、トンネル建設に大きな影響を与えるものである。例えば、国道113号新宇津トンネル¹⁾ではメタンガスのほか、硫化水素ガスやアンモニアガスの発生があり、坑内の電気設備を中心に防爆構造とし、坑内換気に配慮した。また、油田地帯を掘削した国道351号新榎トンネル²⁾では著しい膨張性と湧水に遭遇し、炭田や油田の分布する地域(第二編第1章の図-7 日本の炭田・油田・ガス田分布図を参照)では工事の困難さのほか、工事設備などにも留意が必要である。さらに、東京都で平成5年2月1日、江東区越中島三丁目においてシールドトンネルの工事中に爆発事故が発生した。関東地区の水溶性ガス田では地下水にメタンガスが溶け込んでおり、水から気化したガスが問題を起す場合があり、東京都ではその基本事項とメタンガス調査、防災対策についてまとめている³⁾。今後、大深度地下利用が推進される情勢下では、こうした点にも十分留意して、トンネル技術者は調査を進める必要がある。

13-1-2 トンネル周辺の環境調査

この調査は、生活環境の必要事項を事前に把握することで、トンネル建設による環境への影響を予測し、環境保全と公害防止策を図ろうとするものである。いわゆる環境アセスメントについては、本稿では言及しない。

(1) トンネル周辺の生活環境調査

トンネル周辺の生活環境調査項目を表-1⁴⁾に示す。

1) 地形・地質

工事の事前調査として地形・地質・地盤状況や地下水状況の把握を行う(第三編第1～12章に記述)。

2) 地盤沈下

地盤沈下にはトンネル掘削による弾性あるいは塑性変形によるものと地下水低下に伴って生じるものがある。地山の応力解放による地表面沈下量は簡便法として下

表-1 トンネル周辺の生活環境調査⁴⁾

対象	調査項目	調査事項	留意点
工事前	地形・地質・地盤状況	地形の現況と成因, 層序, 層相, 地質構造, 地層の時代区分, 層厚, 圧縮性, 透水性	連続性, 断続の有無
	地下水状況	帯水層の分布と透水性, 帯水層ごとの地下水圧と水質および経年変化, 地下水の流向と流速, 湧泉の分布と湧水量, 地下水の涵養状況	事前の調査を重要視して十分に行う 井戸調査など
	地盤沈下	事業対象地域の年間沈下量と累積沈下量, 沈下の範囲, 層別沈下量と沈下速度, 沈下による建物などへの影響	過去の工事事例の調査
工事 中	地盤および構造物の変状	建物, 建造物の状態(構造形式, 健全度, 用途, 位置など), 地形(地表面の状態, 不安定地形, 地山の物性など), 土地利用の状況(用途, 使用状況など), 地下水の状況(含水比, 地下水位など), 構造物の変状発生のある近接構造物	工事着工前の状態を調査 土かぶりの小さい区間, 地すべり断層の箇所に注意して調査
	汚濁水	排水の状態, 流量および水質, 排水経路, 水路の状態 流末河川の状態(流量, 水質, 利用状態など)	法令などによる規制の状況, 濁水の発生原因, 放流前の状態を十分把握し, 影響の程度を調査
	交通障害	輸送路の状況(構造, 交通量, 混雑状況, 道路管理者, 道路周辺の環境など)	交通のピーク時, すれ違い不能箇所や退避所など
	減・漏水	水利用の状況(用途, 使用量), 地下水位, 水質(水温, 濁度, 溶存成分, 臭気, 色など), 水源の状況(種類, 供給量, 供給経路, 変動など), 漏水発生のある近接工事	とくに帯水層, 不透水層に留意 地下水位の変動測定は着工前に調査
	騒音, 振動	暗騒音・暗振動 地形・地質(土かぶり, 地山の物性など) 土地利用の状況(用途, 騒音・振動の影響を受ける家屋や施設の分布)	とくに市街地近傍の硬岩山では留意 坑口および土かぶりの小さい区間に注意して調査
	竣工後	鉱染, 重金属	湧水の pH, 電気伝導度, 水質分析, 含有量試験, 溶出試験(H ₂ O, H ₂ O ₂)
大気汚染		大気汚染物質(濃度分布, とくに CO, NO _x) 気象状況	坑口, 換気塔周辺に注意

表-2 近接施工に関する指針類

企業体名	指針類の題名	備考
建設省	近接基礎設計施工要領(案)	昭和58年6月
日本国有鉄道	近接施工の設計施工指針	昭和62年2月
東京都交通局	地下鉄構造物に対する近接工事取扱い(暫定)指針	東京都交通局工務部49交工第362号
日本道路公団	設計要領第2集第5編4-2-7基礎の近接施工	
首都高速道路公団	首都高速道路に近接する構造物の施工要領(案)	昭和57年4月
東京電力(株)	地中送電線土木工事における構造物近接部設計・施工指針	日本トンネル技術協会 昭和60年11月
建設省土木研究所	トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル(案)	平成6年2月
(財)鉄道総合技術研究所	既設トンネル近接施工対策マニュアル	平成7年1月

式の Limanov の方法⁵⁾ほか, 種々の提案がある⁶⁾.

$$\delta_{\max} = (1-\nu) \frac{P}{E} \cdot \frac{D^2 Z}{Z^2 - (D/2)^2} \quad (1)$$

ここに, δ_{\max} : 最大地表面沈下量(m)

D : トンネル径(m)

E : 地山の变形係数(tf/m²)

ν : 地山のポアソン比

P : トンネル掘削による応力解放(tf/m²)

地下水低下による圧密沈下対策は遮断壁により地下水位低下範囲の拡大を抑えたり, くみ上げた水を再度地盤に戻す⁷⁾などの方策が採られる. このためには圧密沈下対象地盤の正確な分布状況の把握と物性の調査および地下水低下の正確な影響評価が必要となる.

3) 構造物の変状

地盤および構造物の変状に関しては, 各機関が定める指針類がある(表-2). 影響が懸念される対象物に対して

は設計施工法の妥当性を確認する目的で数値解析的手法による詳細検討を行うことが多い。その際には地盤の弾性係数をはじめとする解析に必要な力学特性の把握が必要である(第Ⅲ編第10章参照)。

4) 汚濁水

火山岩の変質帯や鉱床付近を掘削すると坑内に酸性水が湧出したり重金属を含む浮遊物質がでてくることもある。これらの汚濁水は、放流基準の遵守を基本として、pHや濁度の調整が必要となる。

酸性の湧水は、工事中の汚濁水処理のほか、供用後においても覆工に悪影響を及ぼすこと⁸⁾があり、調査・設計段階でトンネル周辺の地下水の低下や酸食に対する覆工の検討が必要であるため、鉱床の他、火山地帯の熱水変質作用による鉱化帯⁹⁾に留意を要する。

5) 減・濁水

この件に関しては、水源などの分布やその利用状況の事前把握が重要である。トンネル掘削による影響であると判断するには掘削前の井戸水位などの季節変動や降水量との関係を明確にしておく必要があり、補償などの対応が厳密には困難となる(詳細は第Ⅲ編第11章参照)。

また、湖沼などでは動植物の棲息や繁殖が行われ、場合によっては貴重種が存在し、水面の確保が自然環境保全上の重要な問題になるため、減・濁水問題を自然環境保全の点からも検討することが重要となる。

6) 振動・騒音

振動は地盤の状況により伝播特性が異なり、単純な距離減衰では影響を把握できないことがある。したがってこの種の問題が懸念される工事域周辺では地質分布や地下水位などを概略把握しておく必要がある。

爆破による掘削方式の場合は、騒音・振動が構造物や斜面(落石など)への影響以外に人体や家畜(乳牛、豚、鶏)などの生物に影響を与える¹⁰⁾ため、工事箇所周辺の騒音・振動の対象抽出と影響評価が重要である。

7) 鉱染、重金属

鉱染、重金属は立地条件調査の中でも地質学的観点からのアプローチが重要であり、重金属の種類や含有量の特定などの調査が必要である(第Ⅱ編1-2-6参照)。

日本における主な毒水の分布は、図-1¹¹⁾および表-3に示すとおりであるが、こうした場所の近傍でトンネル工事を計画、施工するには注意を要する。

鉱床付近の開発行為などに関連する重金属にはカドミウム(Cd)、鉛(Pb)、六価クロム(Cr⁶⁺)、ヒ素(As)、総水銀(THg)、セレン(Se)などがある。これらに対して環境庁では、表-4に示す対策範囲設定基準¹²⁾を規定しており、過酸化水素(H₂O₂)を用いた溶出試験の結果に応じて、溶出量Ⅱではコンクリートなどによる汚染物質の遮断、溶出量Ⅰでは汚染物質への遮水の処理を要としている。

こうした事例として北海道のオロフレトンネル¹³⁾では、鉱化変質帯で重金属のうちヒ素の含有が著しく、ずりの密封処理、酸性湧水の中和および凝集沈殿方式による汚泥処理を実施している。オロフレトンネルの地質断面図

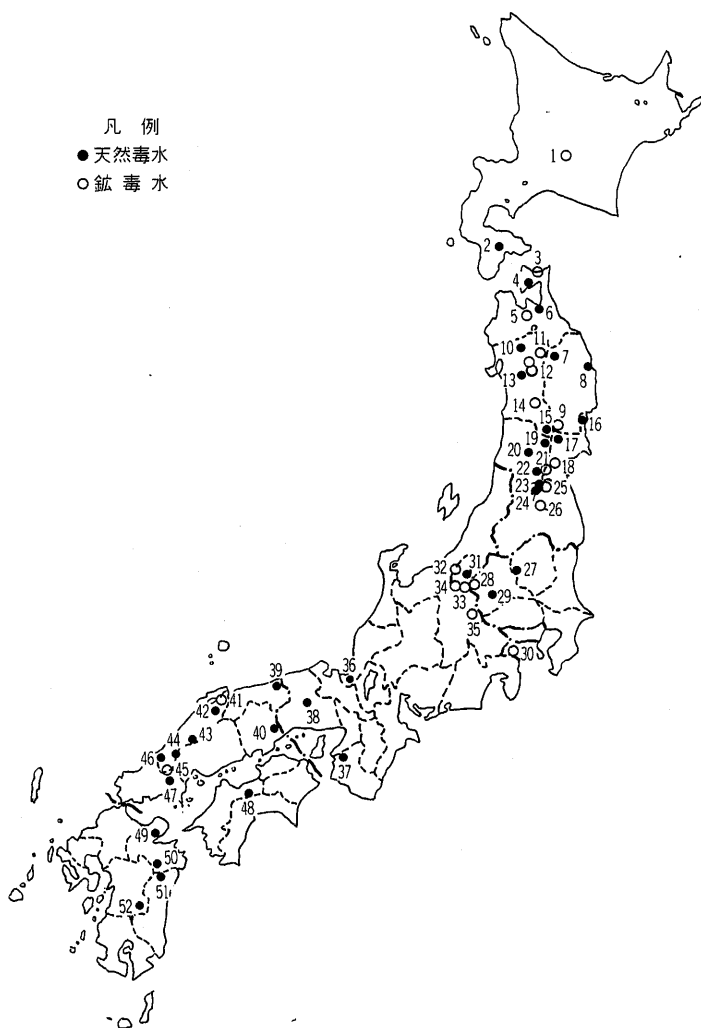


図-1 日本の毒水発生分布¹¹⁾

表-3 日本の主な毒水¹⁾

No.	地名	所在地	毒水の種類	備考
1	十勝岳	北海道・美瑛町、富良野市	天然(強酸性、硫酸)	
2	軍川	北海道・七飯町	鉱山(硫化銅)	日本硫鉄 K K
3	恐山	青森・大畑町	天然(強酸性)	
4	川内	青森・川内町	鉱山(硫酸銅)	安部城 鉱山
5	荒川・駒込川	青森・青森市	天然(強酸性、硫酸)	
6	大坪川	青森・天間林村	鉱山(強酸性、銅・鉄)	上北 鉱山
7	松尾	岩手・松尾村	鉱山(強酸性、硫黄)	松尾 鉱山
8	田老	岩手・田老町	鉱山(硫化鉄)	田老 鉱山
9	磐井川	岩手・一関市	天然(強酸性)	
10	岩神	秋田・大館市	鉱山(硫化鉄)	岩神 鉱山
11	赤川	秋田・鹿角市	天然(硫酸)	
12	玉川温泉	秋田・田沢湖町	天然(強酸性、Cl・SO ₂)	
13	入見内	秋田・角館町	鉱山(銅)	日三市銅 鉱山
14	須川	秋田・湯沢市	天然(強酸性、硫酸)	
15	東福寺	秋田・稲川町	鉱山(黄銅鉱)	田沢 鉱山
16	神山	宮城・気仙沼市	鉱山(砒素)	
17	細倉	宮城・鶯沢町	鉱山(亜鉛)	細倉 鉱山
18	蔵王濁川	宮城・蔵王町	天然(弱酸性)	
19	満沢	山形・最上町	鉱山(強アルカリ性、銅)	
20	睦合	山形・西川町	鉱山(硫酸銅)	睦合 鉱山
21	蔵王須川	山形・上山市	天然(強酸性、SO ₂)	
22	吉野川	山形・南陽町	鉱山(強酸性、SO ₂)	
23	小黒・小崎	山形・高島町	鉱山(亜鉛鉱、硫銅鉱)	小黒 鉱山
24	西吾妻	山形・米沢市	鉱山(強酸性、SO ₂)	西吾妻 鉱山
25	東吾妻	福島・福島市	天然(強酸性、SO ₂)	
26	長瀬川	福島・猪苗代町	天然(強酸性、SO ₂)	
27	足尾	栃木・足尾町	鉱山(鉛)	足尾 鉱山
28	吾妻川	群馬・草津町、長野原町	天然(強酸性)	
29	安中	群馬・安中市	鉱山(亜鉛)	東邦 亜鉛
30	大湧谷	神奈川・箱根町	天然(強酸性)	
31	高岡・野上	長野・牟礼村	天然(中性、MgO、Fe ₂ O ₃ 、Al ₂ O ₃)	
32	上高井・松川	長野・小布施町	鉱山(強酸性、SO ₂)	横手、小串 鉱山
33	菅平大明神沢	長野・真田町	天然(強酸性)	
34	佐野川	長野・更埴市	天然(強酸性、硫酸)	
35	八ヶ岳	長野・小海町、南牧村	天然(強酸性、SO ₂)	
36	野尻芝崎	福井・大飯町	鉱山(硫化鉄)	野尻銅 鉱山
37	和佐	和歌山・和歌山市	鉱山(鉛)	弥宜山 鉱山
38	朝来	兵庫・生野町、朝来町	鉱山(硫酸)	生野 鉱山
39	川田川・山神	鳥取・岩美町	鉱山(硫酸銅)	荒金、銀山銅山
40	高根	岡山・勝央町	鉱山(不明)	高根炭 鉱山
41	内馬	島根・東出雲町	鉱山(鉛)	宝満 鉱山
42	大東	島根・大東町	鉱山(モリブデン)	太陽 鉱山
43	百石	島根・瑞穂町	鉱山(砒素)	久喜 鉱山
44	赤谷	島根・匹見町	鉱山(砒素)	
45	田丸	島根・六日市町	天然(砒素、塩素)	
46	畑迫	島根・津和野町	鉱山(砒素)	笹ヶ谷 鉱山
47	坂根	山口・鹿野町	鉱山(砒素)	坂根 鉱業
48	別子	愛媛・新居浜市	鉱山(鉛)	別子銅山
49	馬場	大分・山香町	鉱山(硫黄)	金山 鉱業
50	尾平	大分・緒方市	鉱山(鉛、砒素)	尾平 鉱山
51	見立	宮城・日影町	鉱山(鉛、砒素)	見立 鉱山
52	鷲巢	熊本・深田村	鉱山(鉛)	深田 鉱山

表-4 対策範囲設定基準⁽²⁾

物質	対策範囲設定基準値		
	溶出量値Ⅱ	溶出量値Ⅰ	含有量参考値
カドミウムおよびその化合物	検液1ℓにつきカドミウムとして0.3mg	検液1ℓにつきカドミウムとして0.01mg	乾土1kgにつきカドミウム9mg
シアン化合物	検液1ℓにつきシアンとして1mg	検液中に検出されないこと	
鉛およびその化合物	検液1ℓにつき鉛として0.3mg	検液1ℓにつき鉛として0.01mg	乾土1kgにつき鉛として600mg
六価クロム化合物	検液1ℓにつき六価クロムとして1.5mg	検液1ℓにつき六価クロムとして0.05mg	
ヒ素およびその化合物	検液1ℓにつきヒ素として0.3mg	検液1ℓにつきヒ素として0.01mg	乾土1kgにつきヒ素として50mg
水銀およびその化合物	検液1ℓにつき水銀として0.005mg	検液1ℓにつき水銀として0.0005mg	乾土1kgにつき水銀として3mg
アルキル水銀化合物	検液中に検出されないこと	検液中に検出されないこと	
P C B	検液1ℓにつきPCBとして0.003mg	検液中に検出されないこと	
セレンおよびその化合物	検液1ℓにつきセレンとして0.3mg	検液1ℓにつきセレンとして0.01mg	

注) 溶出量値Ⅰの、カドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、水銀およびセレンについては、汚染土壌が地下水面から離れており、かつ、原状において当該地下水中のこれらの項目の濃度がそれぞれ地下水1ℓにつき0.01mg、0.01mg、0.05mg、0.01mg、0.0005mgおよび0.01mgを超えていない場合には、それぞれ検液1ℓにつき0.03mg、0.03mg、0.15mg、0.03mg、0.0015mgおよび0.03mgとする。

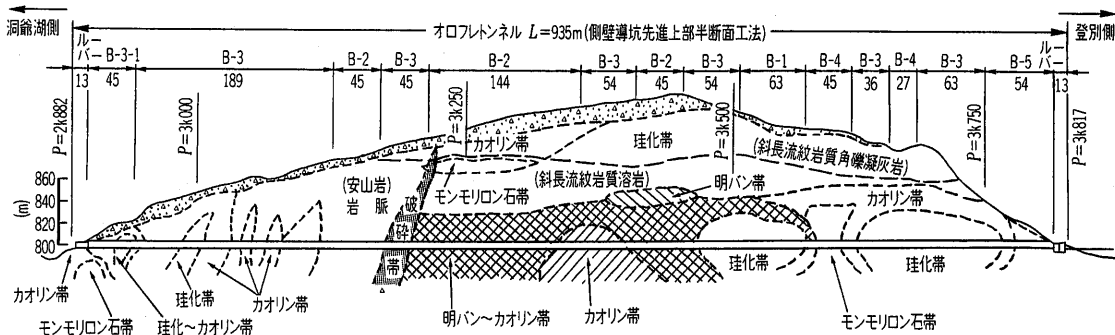


図-2 オオフレットトンネル地質断面図⁽³⁾

を図-2に示す。

熱水変質作用は、熱水変質の中心部に硬質の珪化帯があり、その周辺に粘土化帯を形成している場合が多いが、鉱化変質は熱水の噴出状況で変化に富み、地質構造による推定が困難なことが多く、詳細な調査による推定が重要である。また、蛇紋岩分布地域では変質の強い部分にヒ素の含有が多い。

イタイイタイ病は無機質の重金属を取り込んだ汚染米(1.0ppm以上のカドミウムを含有する米)の摂取が原因となったものである。坑内排水が重金属(カドミウム、ヒ素、銅)を含む場合は処理に十分な配慮が必要となる。

8) 大気汚染

大気汚染は、道路トンネル坑口付近の排出ガス濃度が

問題になる場合があり、計画域の気象条件や大気汚染物質データが重要である。とくに、都心ではバックランドとしての窒素酸化物の濃度が高く、トンネルによるわずかな窒素酸化物の増加で大気汚染防止法基準に抵触することがある。

また、道路トンネル坑口周辺に果樹園や茶畑など収益性のある農作物がある場合は、大気汚染防止法の基準の他、植生への影響評価が必要であり、夏季と冬季(一般には冬季のほうが汚染濃度が高い)に現地の観測などを行うことも必要な場合がある。

(2) トンネル周辺環境のその他留意点

1) 酸性土壌(土壌汚染)

土中に含まれる硫化鉱物が酸化し強酸性を示すものを

酸性土壌と呼ぶ(便宜的には、過酸化水素水(30%)処理後のpHが3.5以下の土壌を酸性硫酸塩土壌と呼ぶ¹⁴⁾)。この酸性土壌は、土木の分野では構造物の腐食、のり面の植生不良および水質汚濁などが問題となる。

こうした酸性土壌は、海成の堆積層中で硫酸還元菌などにより生物起源のタンパク硫黄や海水中の硫酸イオンが還元されて硫化鉱物イオンとなり、これが鉄などのイオンと反応してパイライトなどの硫化鉱物を生成する場合と硫化水素を含む熱水により熱水変質作用を受けた鉱化変質帯中で硫化鉱物が生成される場合がある。

酸性土壌は、古くは大阪万国博覧会場建設時に植生が枯れた事例¹⁵⁾があり道路のり面の植生問題¹⁶⁾(図-3)や北海道開発局の調査¹⁷⁾にあるように広域に分布している。前述のオロフレトンネルでも溶出試験後のpHが3.5以下であり、土壌汚染防止を目的にずりを密閉処理している。また、筆者の経験では熱水変質作用を受けた鉱化帯で比抵抗値の断面測定を行った際にパイライトを含む強酸性を示す地層が5~10mの低比抵抗を示したことがある。したがって、熱水変質作用を受けた地域の物理探査においては、この種の酸性土壌による低比抵抗化の影響にも配慮する必要がある。

2) アスベスト

流紋岩や角閃石からアスベストを産することがある。これに対する基準は建築物などの工事に設定¹⁸⁾されているが、トンネル工事においては明確な基準がない。アメリカでは重量比の1%をトンネルずりの処分の境界基準とした事例¹⁹⁾がある。

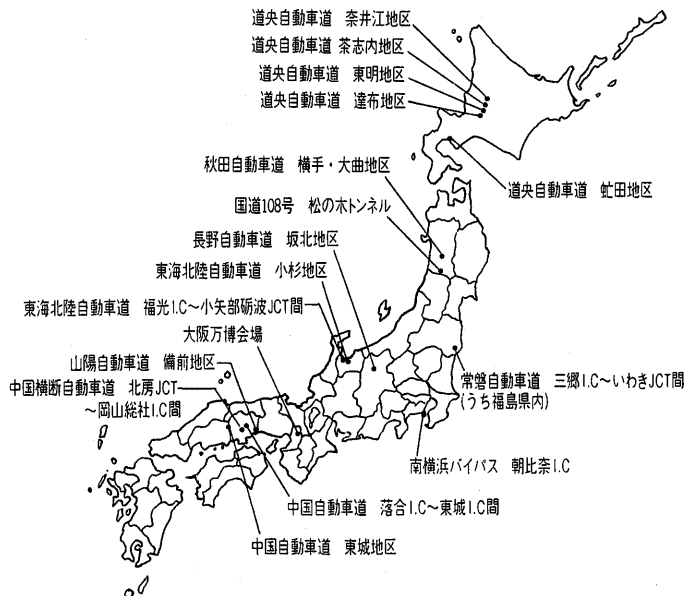


図-3 高速道路における酸性土壌の確認地点¹⁹⁾

3) 微生物

供用中のトンネルの微生物被害²⁰⁾は木材、プラスチック、金属材料などを劣化させるものである。立地条件としてこれらを避けることはできないが、将来の大深度地下開発でも微生物への影響を指摘²¹⁾しており、トンネルを計画する際には管理段階の対応を含めて微生物への配慮が必要と考える。

13-2 工事を規制する法規の調査

トンネル工事の計画・施工に際しては、表-5⁴⁾に示す公害防止、環境保全、災害防止、河川や道路などの利用に関する種々の法規制をよく理解しておかねばならない。

地質調査などでは国有林・県有林などへの立ち入りや物理探査のための火薬使用、あるいは国立公園内での作業(ボーリングなどによる土砂の採取)には書類の提出と許可までの時間を要する場合がありますので注意を要する。

13-3 補償対象調査

この調査の対象としては、用地の買収または借地等のための土地、建物、立木等、および各種利権(地上権、水利権、温泉権、漁業権、採石権など)に対する取得、制限、消滅などがあげられる。

地上権の設定はトンネルごとの坑口の条件などによって異なるが、基本的には土かぶりにより権利設定の範囲や条件を決めているようである。これにはトンネルの周囲に保護層を考慮することにより、地下開発の抑制が必要な範囲を決定するが、保護層は各企業者によって異なる。ロックボルトをその範囲とするか、切断されてもよいと考えるか、そのために切断の容易な材料をボルトに使用するかなど、詳細な検討が必要な場合があり、地山の地形・地質条件と土地の利用形態などを総合的に分析する必要がある。

水利権や温泉権はトンネル工事が影響を与えるかが重要な問題であり、水文学的な検討が必要となる。

採石権や鉱業権は、土地の所有とは別の権利設定である場合があり、十分な調査が必要である。トンネルから石油やガスが出る場合にその補償を行わなければならないことがある。さらに、トンネル完成後に採石権が設定された地域で土砂などの採取が行われる場合には、トンネル構造への影響が懸念されるため注意を要する。

13-4 坑外設備および土捨場などの調査

坑口設備(ずり処理設備、動力設備、換気設備、資材置場など)、運搬設備、

表-5 トンネル工事を規制する主な法規¹⁾

分類	根 拠 法	主 な 規 制 事 項
公害防止	環境基本法	環境の保全および公害の防止のための規制
	大気汚染防止法	排出ガスに係わる許容限度
	水質汚濁防止法	河川、湖沼、海などの公共用水域に排出される水に関する規制
	振動規制法	特定建設作業および道路交通振動に関する規制
	騒音規制法	特定建設作業および自動車騒音に関する規制
	悪臭防止法	悪臭物質の排出の規制
	農用地の土壌の汚染防止等に関する法律	排出ガス、排水に関する規制
	工業用水法	地盤沈下に関する規制
環境保全	建築物用地下水の採取の規制に関する法律	地盤沈下に関する規制
	廃棄物の処理及び清掃に関する法律	廃棄物の処理に関する規制
	自然環境保全法	自然環境保全地域内の行為の制限
	自然公園法	国立公園、国定公園、都道府県立自然公園内の行為の制限
	文化財保護法	史跡、名勝、天然記念物、埋蔵文化財包蔵地内の行為の制限
	森林法	保安林指定区域内の行為の制限
	鳥獣保護及狩猟ニ関スル法律	特別保護地区内の行為の制限
	都市緑地保全法	緑地保全地区内の行為の制限
災害防止	首都圏近郊緑地保全法	近郊緑地保全区域内の行為
	近畿圏の保全区域の整備に関する法律	近郊緑地保全区域内の行為
	都市の美観風致を維持するための樹木の保存に関する法律	保存樹または保存樹林に関する規制
	古都における歴史的風土の保存に関する特別措置法	歴史的風土保存区域内の行為制限
	砂防法	砂防指定地内の行為の制限
	宅地造成など規制法	宅地造成工事規制区域内の行為の制限
	地すべりなど防止法	地すべり防止区域内の行為の制限
	急斜面地の崩壊による災害防止に関する法律	急斜面地崩壊による災害防止指定区域内の行為の制限
河川海岸	海岸法	海岸保全区域内の行為の制限
	河川法	河川区域内の行為の制限
	公有水面埋立法	河川、湖沼、海等公共用水流または水面の占有および行為の制限
	水産資源保護法	保護水面の区域内の行為の制限
都市計画	都市計画法	都市の計画区域、風致地区および土地区画整理事業施工区域内の行為の制限
	都市公園法	都市公園内の行為の制限
道路	道路法	道路占用制限
	道路交通法	道路使用に関する制限
農地	農地法	農地の使用(転地)に関する制限
	農業振興地域の整備に関する法律	農業振興地域の使用に関する制限

骨材およびコンクリートプラント設備、受配電設備、用排水設備、仮建物設備(事務所、宿舍、倉庫、修理工場、火薬庫など)といった坑外設備の配置や設置場所は、周辺環境に配慮して計画する必要がある。例えば、山岳工法では、坑内換気にジェットファンを昼夜で稼働させて施工を行うことから、トンネル入口の防音扉やジェットファンの囲いが必要であったり、筆者の経験では、民家に隣接した工事で低騒音・低振動のために防音したことがある。

トンネル工事から発生する建設副産物は、建設省通達「建設副産物処理推進要項」などにしたがって処理する必要がある。産業廃棄物の対象となるコンクリート片、前述の汚濁水処理で生じた汚泥などの処理が対象となる。

重金属を含むずりや酸性硫酸塩土壌の扱いは、「土壌・地下水汚染に係る調査・対策指針 運用基準」(平成11年1月環境庁水質保全局)などの適用を考慮する必要がある。土捨場などの選定調査はこれらを配慮してなされる必要がある。

(文責：水野敏実・応用地質(株)技術本部道路部課長)

参 考 文 献

- 1) 中山 隆・大利泰宏・吉田広幸：膨張性地山と可燃性ガスを克服国道113号新宇津トンネル、トンネルと地下、Vol.22, No.10, 1991.10.
- 2) 佐々木隆男・山岸俊男：超膨張性地山区間と湧水区間におけるNATM、トンネルと地下、Vol.13, No.5, 1982.5.
- 3) 東京都水道局編：シールド工事におけるガス爆発事故防止

- の手引, 平成5年10月.
- 4) 土木学会: トンネル標準示方書 [山岳工法]・同解説, 平成8年5月.
 - 5) K. チェツキー著, 島田隆夫訳: トンネル工学, 鹿島出版会, 1971.
 - 6) 藤田圭一: 基礎工から見たシールド工法, 地山の沈下とゆるみ, 基礎工, 1983. 10.
 - 7) 高山博文, 吉田義雄, 前田正一: 未固結層での NATM 施工のための地下水処理 北総開発鉄道栗山トンネル, トンネルと地下, Vol. 18, No. 3, 1987. 3.
 - 8) 鈴木道雄, 諏訪義雄: 三国トンネルにおける酸性湧水による巻き立てコンクリートの侵食とその対策, 道路とコンクリート, No. 13, 1971. 9.
 - 9) 北海道開発局: 第31回北海道開発局技術研究発表会講演概要集, 新大沼トンネル掘削工法の検討, pp. 121~126 など.
 - 10) ジェオフロンテ研究会: 制御発破工法の実際, pp. 27~54, 1996年11月.
 - 11) 土木学会: トンネルライブラリー第5号山岳トンネルの補工法, pp. 166~167, 平成6年3月.
 - 12) 環境庁: 重金属等に係わる土壌調査・対策指針および有機塩素系化合物等に係わる土壌汚染・地下水汚染調査・対策暫定指針, 平成6年11月.
 - 13) 原田勇雄: オフロトンネルの設計施工-鉍化変質帯におけるトンネルの施工例, 土と基礎, 37-9, 1989.
 - 14) 佐々木信夫: 新第三系に由来する酸性硫酸塩土壌, ヘドロジスト22-1, pp. 2~11, 1978.
 - 15) 土質工学会: 大阪地盤, pp. 121~122, 1977.
 - 16) 中田正夫: 強酸性土壌における植生のり面対策について, 第20回日本道路会議論文集など.
 - 17) 北海道開発局開発土木研究所土壌保全研究室: 酸性硫酸塩土壌の分布(2), 開発土木研究所月報, No.447, 1990.8.
 - 18) 東京都環境保全局: 建築物等の工事に伴うアスベスト飛散防止対策指針要綱・同解説, 平成2年3月.
 - 19) Tim Arvey: Disposal problems in the US, TUNNELS & TUNNELLING, October 1991.
 - 20) 山野勝次: 微生物によるトンネルの被害とその対策, トンネルと地下, Vol. 19, No. 10, 1988. 10.
 - 21) 今田 徹: 大深度地下利用制度の意義と課題, 土木学会地下空間シンポジウム論文・報告集第4巻, pp. 1~7, 1999年1月.

(45頁からのつづき)

事業主体	工 事 名	請 負 会 社	請負額 単 位 百万円
道公・四国	高知道岡豊T	二神・晃立JV	1,100
"	" 細野T	鉄建・白石JV	1,885
"	" 津家T	大末・香長JV	1,390
水資公	房総導水路北部幹線上流BP第1工区	前田・三井JV	2,250
"	滝沢ダム付替え県道4号T他	住友建設	750
"	丹生ダム工事用道路2号線1号T他	公成建設	358
首都高	中央環状新宿線SJ43	熊谷・五洋・福田JV	9,150
"	" SJ61	奥村・淺沼・安藤JV	2,999
都・水道局	境浄水場浄水渠撤去および浄水管敷設	国土開・京王JV	974
"	八王子市南大沢3~多摩市唐木田3丁目地先間送水管用立坑	大林組	488
都・下水道局	豊島区南池袋2丁目付近再構築	佐田建設	471
"	小台処理場放流吐口	大林・鹿島・佐藤JV	213
"	新河岸東処理場右岸放流渠吐口	大林・奥村・地崎JV	348
"	台東区池之端2,文京区弥生2丁目付近再構築	佐藤工業	305
"	神谷幹線その3	奥村・鴻池・小田急JV	1,079
"	馬込東2号線立坑	五洋・西松・白石JV	120
山梨県	琴川ダム柳平T	植野・天川JV	372
滋賀県	湖南中部八日市幹線千僧供2工区管渠	東洋建設	376.5
仙台市	九ヶ村堀第3号雨水幹線16	鴻池・橋本JV	641
足利市	鹿島西污水幹線38工区他	佐藤・足利JV	263
名古屋市	第3次水里幹線下水道	三菱建設	195.3
"	丸野雨水準幹線他	森組	168
京都市	有栖川6号幹線雨水その1	熊谷・大豊JV	1,110
大阪市	地下鉄8号線東淀川区瑞光3~大洞1間および豊里停留場北部1工区	前田・大豊・日産特JV	4,960
"	" 大洞1~守口市京阪大通1 " 南部2工区	佐藤・五洋・東急・ハンシン特JV	7,610
"	" 守口市日吉町1~旭区清水3および清水停留場3工区	奥村・大日本・大本・久本特JV	6,400
"	" 旭区清水3~城東区古市3ほか出入線4工区その1	大林・戸田・銭高・森本・奥村土特JV	6,500
"	" 城東区古市3~今福西3および古市停留場5工区	鹿島・清水・住友・東洋・大鉄特JV	11,480
"	" 鳴野東2~東成区東中本1および緑橋停留場6工区	大成・青木・不動・松村特JV	7,600
広島市	八幡地区下水道11の51	鴻池・栗本JV	1,480

連載講座

都市部でのシールド立坑に係わる新技術(10)

立坑の構築技術(7) 特殊な立坑構築例(その3)

土留め壁材料に係わる新技術

「都市部でのシールド立坑に係わる新技術」

連載講座小委員会

1. はじめに

大深度のシールド立坑工事や重要構造物に近接した開削工事では、変形抑制を主目的として、剛性の高い土留め壁工法が採用されることが多い。大深度化や大型化に伴う課題としては、土留め壁の配筋が過密になり壁厚が増大することにより、①コストアップとなる、②止水性が確保できない、③施工精度が確保できない、ことなどが挙げられる。

本稿では高強度・高流動化コンクリートを用いた地下連続壁工法と、高剛性できわめて良好な止水性能を発揮する鋼管柱列式土留め壁工法(ONS工法)、掘削土を骨材として再利用するソイルセメントを製造して土留め壁体を形成する泥水固化壁工法(CRM工法)の3工法を例として工法概要を紹介し、計画・施工上の留意点について、施工例を挙げながら解説する。

2. 高強度・高流動化コンクリートを使用した地下連続壁工法

2-1 高強度・高流動化コンクリートの特徴

(1) コンクリートの高強度化

通常、地下連続壁に用いられるコンクリートの設計基準強度は $30\text{N}/\text{mm}^2$ (泥水中打設 $24\text{N}/\text{mm}^2$)であり、コンクリート強度を上げた場合でも $35\text{N}/\text{mm}^2$ から最高 $50\text{N}/\text{mm}^2$ 程度のものであった。

コンクリートを高強度化するには、水セメント比を小さくする必要があり、結果として単位セメント量が増大する。このためコンクリートの粘性が高まり、トレミー管での施工に支障をきたしたり、鉄筋の間への充填性が悪化する結果となる。また、高強度化のために高性能AE減水剤を大量に使用することから、材料の品質変動によりコンクリートの品質が安定しなくなったり、打設後のコンクリートの凝結、自立が遅れ、仕切り鉄板などにかかる側圧が大きくなるといった多くの問題点が指摘されていた。

これらの問題点を解決するために、高ビーライト系ポルトランドセメントの使用に加えて、高性能AE減水剤、分離低減剤(特殊増粘剤)などを添加することで、材齢91日の設計基準強度が $70\sim 100\text{N}/\text{mm}^2$ を超える高強度・高流動化コンクリートによる地下連続壁の施工が可能となった。

(2) 特徴

高強度・高流動化コンクリートを用いてシールド工事用立坑を計画すると以下のような長所、短所がある。

【長所】

- ・高強度であるため、円筒形連壁のように軸圧縮力が卓越する場合、壁圧を薄くすることができ、地下連続壁壁体の工事費を最大15%程度コストダウンすることが可能である。例えば、内径 $\phi 12\text{m}$ 程度、掘削深度 $40\sim 50\text{m}$ の場合、設計基準強度を $60\text{N}/\text{mm}^2$ とすることにより壁厚を 1.2m から 0.8m に低減できる。
- ・流動性のきわめて高いコンクリートを使用するため、過密配筋部やエレメント間継手部のコンクリートの充填性がよく、均質で止水性が高い壁体を構築できる。
- ・低発熱ポルトランドセメント(高ビーライト系セメント)を使用しているため発熱量が小さく、壁厚も薄いため、温度クラックが生じる可能性が低い。
- ・壁厚が薄いため、掘削残土量や安定液の廃棄量が少なく環境負荷が小さい。また、掘削機械の小型化も図れる。

【短所】

- ・流動性の高いコンクリートを用いるため、コンクリート打設時の側圧が大きく、コンクリートの打ち上り速度が制限されるので、打設時間が長くなる。
- ・安定した流動性と高強度を確保するためには、材料分離を起こさないことが重要であり、分離低減剤にはきわめて高い品質と機能が要求される。そのため高性能な分離低減剤を使用する必要があり、コンクリートの打設量は大幅に減るが、材料単価が高くなる。

阿賀 IC～郷原 IC 間が起工

中国地方建設局が整備を進めている高規格幹線道路・国道37-5号東広島・呉自動車道のうち広島県呉市側の阿賀 IC から郷原 IC 間 8.7km が 3月25日に起工した。

本格着工を迎えた同区間は、東広島・呉道路の2工区となる阿賀 IC～馬木 IC 間 21.1km のうち呉市内に位置し、同自動車道で一番長い横路トンネル(1,760m)など4か所のトンネル(約4km)と8か所の橋梁(約1.3km)が設置される。

1号中川共同溝が貫通

中部地方建設局が建設を進めている1号中川共同溝(名古屋市中川区昭和橋通9丁目～下之一色町権野)で3月27日シールド機が貫通した。

同工事は、電力、電話ケーブル用の共同溝を建設するもので、施工延長1,358m。1998年3月に着手し、99年4月に泥水式シールド機(外径5,190mm)を発進、庄内川に架かる一色大橋下部を通過するため土かぶり最大約41mと名古屋地区では最深での工事となった。また、2次覆工の省略に適したセグメントの採用、地震対策などが当初の課題に挙げられた。このため、急こう配(下り7%、上り15%)への対応では、中折装置のシールド機やピンラックレール軌条・ラック式バッテリー車(12トン)を採用。また、セグメントは、安全性、施工性に優れたKLセグメントを導入。地震への対応として、トンネルと立坑躯体や立坑付近の地盤とを免震層で絶縁し、地震時の安全性を大幅に高める「地下構造物の免震構造技術」を初めて採用。

外郭放水路第1Tが貫通

関東地方建設局が建設を進めている

首都圏外郭放水路第1工区トンネルが4月12日貫通した。

同放水路は、中川中流域の中小河川のはんらんによる浸水被害の解消を目的に整備を進めている地下河川。主に国道16号の地下約60mの大深度に築造され、大落古利根川から江戸川間の中小河川の流量を排水により調節する。

今回貫通した第1工区トンネルは、江戸川に近い第1立坑と第2立坑をつなぐ導水管で、直径12.4mの泥水式シールド機で、1999年6月のシールド本掘進から約7か月で約1,400mを掘進した。セグメント自動組立装置にコッター供給装置と打ち込み装置を装着した世界初の試みで、ボルトボックスの充てん作業などを省略することで工事費の4%程度のコスト縮減効果が確認された。

大江戸線一部区間開通

都営地下鉄大江戸線・環状部の一部区間(新宿～国立競技場駅間、延長2.1km)が4月20日に他区間に先行して運行を開始した。

今回の開業区間の工事は、代々木駅と国立競技場駅を開削工法で、各駅間は泥水式シールド工法で施工した。とくに代々木駅付近では、JR代々木駅前繁華街で道路が狭隘なうえ交通量が多く、また多くの大型地下埋設物が輻輳し、鉄道との交差や道路橋下を掘削するなど、複雑で困難な施工となった。シールド区間は、大工区制のメリットを生かし、作業基地を国立競技場駅に置き、3区間をすべて1か所の設備で連続施工し、工程の短縮と設備の効率的な活用を図ることができた。本年12月に全線の開業が予定されている。

青梅トンネル上り線が貫通

日本道路公団が建設を進めている

首都圏中央連絡自動車道(圏央道)の青梅トンネル上り線が4月19日貫通した。

同トンネルは、延長約2,100m。同公団で初めて上下線一体の2層構造を採用、上層の2階部分が上り線、下層の1階部分が下り線になる。トンネルは高さ約18m、幅約15mの卵形をしており、平均断面積は230m²。

今回貫通したのは上層部分で、夏から下層部の掘削を開始し、トンネル掘削を2001年度中に完成させ、02年度の開業を目指している。

下水道政策研究委が中間報告

建設省が日本下水道協会と共同で設置した「下水道政策研究委員会」(委員長・松尾友矩東京大学教授)は4月20日、下水道の新たな役割などを検討した中間報告を発表した。

大都市を中心に下水道の普及率が相当の水準に達した状況を踏まえ、今後は、近年増えている都市型水害への対策や、内分泌かく乱化学物質(環境ホルモン)といった有害物質のリスク管理などを下水道の新たな機能ととらえ、必要な施策を強化するよう提言している。

建設省は、報告内容を01年度予算要求に反映させるなど新しい下水道事業の展開に生かす。

湯之谷トンネルが貫通

日本道路公団四国支社が建設を進めている松山自動車道の湯之谷トンネルが4月25日貫通した。

同トンネルは、4車線化を進めている松山自動車道西条 IC～松山 IC 間約48.8kmに建設される17本のトンネルのうちの一つ。トンネル総延長約1,621m(3本)。発破掘削方式による補助ベンチ付き全断面掘削(NATM)。

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(16)

第四編 工事を対象とした地質調査の進め方(1)

「応用地質学」連載講座小委員会

はじめに

本連載講座は、トンネル技術者が現場で遭遇するであろう様々な地質に関する問題を基礎的知識から調査技術まで“できるだけわかりやすく”をコンセプトとして整理してきた。

本編では、これら個々の調査技術やその成果をトンネル工事の実務のうえでどのように適用、あるいは利用するかという観点から述べ、本連載講座のまとめとしたい。

1. 調査の基本

1-1 調査の目的

トンネル工事の計画を行うためには、計画地周辺の地山条件や立地条件などに関する十分な基礎資料を得られるように各種の調査を行う必要がある。しかしながら、

必要な調査精度は周辺の社会環境、工事の段階や規模などによって様々であり、また、目的とする調査対象が地下深部で直接的な情報が得にくいことや広範囲な地域となること、さらにわが国の特性として地質の複雑さや社会環境上の制約があることなど、調査を計画・実施するうえでの問題も多いのが現状である(第I, II編参照)。このため、可能な範囲で計画的かつ効率的に十分な調査を行い、計画の大幅な変更や工事費の増大、工期の延伸、あるいは周辺環境問題の発生などを防ぐことがそのもっとも重要な目的として要求される。

トンネルの建設に係わる作業の中で、これらの調査作業は工事計画の規模やトンネルの難易性にもよるが一般に表-1¹⁾に示すような流れで進められる。この表に示すように、トンネル工事は路線計画にはじまり、設計・施工段階を経て工事竣工により終了する。これに対し、調

表-1 調査の流れ¹⁾

工事と調査の流れ	比較路線の検討 ↓ 路線選定のための調査	路線の決定 ↓	設計・施工計画のための調査	工事着手 ↓	施工中の調査	工事竣工 ↓	施工後の調査
主な目的	地形・地質、その他の環境条件に適した路線を選定するために必要な資料と、次の段階の調査立案の基礎資料を得ること	当初設計、工事計画、積算などに必要な基礎資料を得ること		施工中に生じる問題点の予測および確認、設計変更、施工管理 補償および後日のための資料を得ること		施工中、施工後に生じた問題点の確認 補償あるいは変状の対策のための資料を得ること	
調査の内容	地形・地質調査、環境調査、その他 一般に概括的な調査	地形・地質調査、環境調査、その他 精密な地質調査、具体的な周辺対策を考えた調査、工事関係諸施設などのための調査など		地形・地質調査、計測、環境調査、その他 なお、坑内計測は地山状態の観察、支保の挙動に関する計測が主 トンネル周辺の環境調査・計測は工事による影響および対策の効果判定が主		地質調査、計測、環境調査、その他 トンネル周辺の環境調査・計測は工事による影響および対策の効果判定が主	
調査範囲	比較路線を含む広範囲	トンネル、これと関係があると推定される箇所およびこれらの周辺		トンネル内および施工により影響を受けるおそれがある範囲		問題箇所を中心とする影響範囲	

査は初期の計画から工事の段階に応じて、①路線選定のための調査、②設計・施工計画のための調査、③施工中の調査、に区分され、さらに必要な場合には、④施工後の調査、が工事竣工後まで継続されることもある。

また、トンネル工事に関する調査は対象とする問題点から主に地山条件調査と立地条件調査に区分される。その特徴は次のように要約される。

(1) 地山条件調査

トンネルおよびその周辺の地形・地質条件を把握するための調査であり、トンネルの設計・施工に直接関連する調査である。

(2) 立地条件調査

工事に関する周辺環境や規制する法規に関する調査で、近年の社会的な環境問題への関心の高まりや工事の円滑な進行を得るという面から重要度が増大している。

1-2 調査の進め方

このように、トンネル工事では様々な調査が工事の進捗や調査対象により必要となり、その目的も変化する。しかしながら、重要なことはこれらが一連のトンネル工事の円滑な進展を図ることを目的とする点であり、個々の調査の成果を常に集約し、総合的・工学的な判断資料とするよう心がけることが重要となる。次に調査の進め方に関する基本事項を示す。

【調査の進め方に関する基本事項】

- ① まず、概括的に広範囲にわたり全容を把握することから始め、順次、調査により判明した事項、さらに解明を要する事項などを整理しつつ絞っていく、という姿勢をとること。
- ② 先に行った調査によって得られた成果には、後に行った調査の成果によって絶えず評価・修正を加えるなど、調査の継続性、一貫性に留意すること。

また、調査を進めるうえでの問題として、近年の社会的な周辺環境との係わりという点が挙げられる。一般に土木工事は、社会生活上の利便性の向上を主な目的とするが、一方でその周辺の環境も社会生活の重要な要素であり、その共存が工事計画や施工を行ううえでの前提となることを十分認識することが必要である。とくにトンネルは地下構造物であるという特徴からこの問題を常に検討する必要があり、調査を進める場合には地山条件と立地条件の相互の関係を予測、評価することが重要である。

2. 地山条件の調査の流れ

前述のように、地山調査はトンネルおよびその周辺の地形・地質に関する調査であり、その精度が直ちに工事計画・設計の良否、施工の難易度などに結び付くという

意味でもっとも重要である。本章では主に地山条件に関する一般的な調査の流れを解説し、立地条件に関する調査については相互に関連する事項のみを概説するにとどめる。なお、立地条件調査については第Ⅲ編13章を参照されたい。

2-1 地質調査の一般的な流れ

地山条件の調査は、前述のように計画から維持管理までの各段階ごとに行われ、大別すれば計画段階で行われる路線選定段階の地形・地質概査(以下、概査と略す)と、設計・施工計画段階の地質精査(以下、精査と略す)に区分される。また、施工中の調査は通常の事前調査での不足と新たに施工中に発生した問題の解決を目的とするものであり、手法的には事前調査と同様であるが坑内からの調査が可能であるなどの状況から計画することが重要となる。図-1¹⁾に一般的な山岳トンネル工事に必要な調査の流れと主な取得情報および調査手法を示す。

一方、都市部の調査では都市部特有の近接施工の問題や地下水位低下工法などへの多様な制約条件により、シールド工法、開削工法あるいは山岳工法といった工法の選定を検討する場合があります。計画の初期段階で高い精度の調査を必要とする場合があります。このような場合には、地山条件と立地条件に関する十分な調査の結果から、工事の安全性、周辺環境への影響、施工上の制約による技術的問題の程度および経済性などを総合的に検討し、第Ⅱ編表-5(Vol.30, No.9)に示した各工法の適用性にもとづく判断が要求され、調査についても必ずしも一般的な流れによらないことがある。さらに近年、山岳部でもトンネルの用途や機械化掘削による効率化、あるいは地質条件からTBM工法やECL工法が採用されるなど、工法の多様化が進められ、工法の選定を目的とした調査項目も必要となっている。

このように、トンネルの地質調査は掘削する場所や延長、断面積、用途などの条件に応じて調査の計画を検討することが重要である。ただし、最終的にはトンネルの計画はその掘削位置の地形・地質条件をもっとも重要な判断資料とする。

2-2 トンネル工事のための地山条件調査

ここでは、一般的な山岳工法での計画に必要な地山条件調査について、図-1の左側に示した調査の流れの区分に沿って解説する。なお、個別の調査目的や調査法については既に第Ⅱ、Ⅲ編で概説している。

2-2-1 路線選定のための調査

(1) 目的

トンネルの路線選定には第Ⅱ編1章で解説したように、地形・地質に係わるもののほか、様々な選定のための条件項目が必要となる。このうち、とくに地質条件は計画

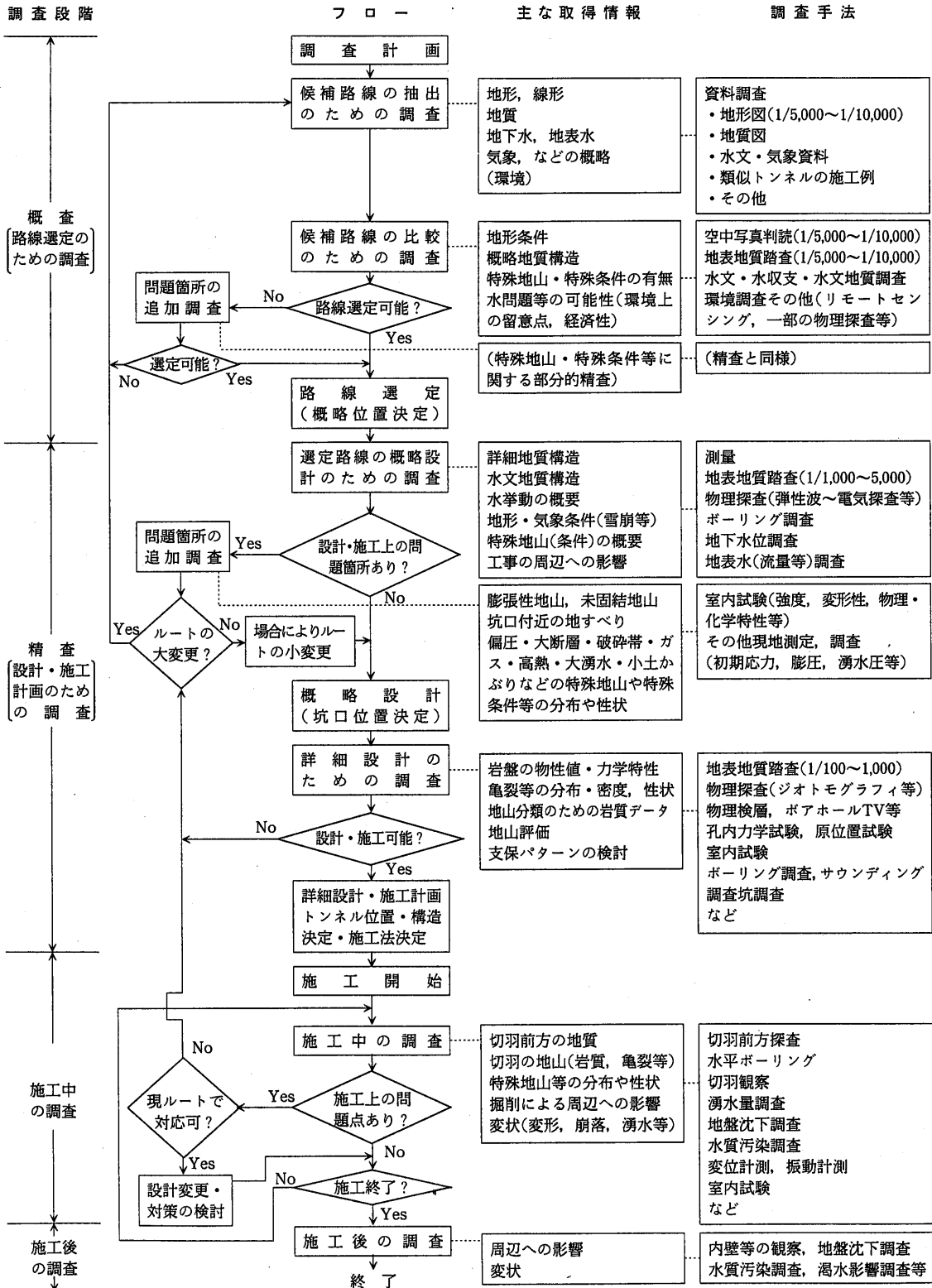


図-1 地山条件の調査の流れと調査手法および取得情報³⁾

初期の段階では情報の精度が他に比べて低い場合が多い。これらの問題点は、ロケーションを進める過程で順次解消されていくが、すでに他の条件項目により修正が難しい段階になってから、問題となる地質条件が明らかとなることもある。そのため、路線選定のための調査は一般には地形・地質概査と呼ばれるが、単に精度が粗い調査というのではなく、トンネル建設上の難易性に影響するような様々な条件を比較路線を含む広い範囲を対象として抽出することを目的とする必要がある。この際、初期の段階では調査精度の向上を図るとともに、応用地質学的な推定を含めた工学的な評価を加えることが重要である。そのうえで、調査成果は、路線選定を行ううえで必要な情報として整理・把握すること、さらにはその後の精査の対象とすべき問題点や地点を検討することに用いられる。この段階で推定、抽出すべき条件としては、岩種、一般的な地山強度、地下水の分布状況のほか、工事に多大な影響を及ぼす恐れのある後述する特殊な地山条件や立地条件がある。

また、調査の結果、とくに問題となる地山条件の存在が予測される場合にはできる限りこれを避けた路線を選ぶことが望ましい。しかしながら、現実的には路線選定はその他の判断すべき条件も考慮したうえで、その前後の明かり区間の問題や線形全体のバランスを十分に検討する必要がある場合も多い。何らかの問題の発生が予測される、あるいは問題がある立地条件下での路線を選定せざるを得ない場合には、後述する地質精査によって問題点をより詳細に調査することにより設計・施工法で対処することとなる。さらに、問題となる条件が以降の段階で明らかとなった場合にも、その程度によっては可能であれば路線選定の段階にもどった検討を行うことが、最終的に安全、かつ経済的なトンネル工事につながると考える。

(2) 方法

主な調査手法としては、資料調査(第Ⅲ編2章)、空中写真判読(第Ⅲ編3章)および踏査(第Ⅲ編4章)が用いられ、必要に応じてボーリング調査(第Ⅲ編8章)や物理探査(第Ⅲ編4～7章)なども実施される。一般にこれらの調査手順としては、資料調査をその始まりとして、空中写真判読などの調査結果にもとづき、地形・地質・水文上の問題点の抽出、あるいは残された問題点を整理し、それらを現地踏査で確認、さらに地点を選んでボーリング調査などを実施することとなる。ただし、踏査では地質や地下水の概要を把握することが困難な市街地、平地および台地下では既存資料の収集がこの段階での重要な方法となる。

また、この段階の踏査によって得られる地質図は、後

述する精査段階の調査結果を合わせ、主に地質縦断面図に整理したうえで第3章以降に述べる工学的な地山評価、分類など、以降に行われる調査結果を取りまとめるうえでの基図となる。なお、その精度は調査期間、調査密度あるいは使用する地形図の精度に左右されるとともに、露頭が限られるなどの自然要因や調査者の技術レベルに依存することを理解したうえで利用する必要がある。

2-2-2 設計・施工計画のための調査

(1) 目的と概要

この段階の調査は、トンネルの地山条件の全容を把握し、設計・施工計画に必要な基礎資料を得ることを目的に、必要な調査項目を選定し、とくに特殊な地山や立地条件ではそれぞれの条件に応じた調査を行う。具体的には概査によって推定された地形・地質上の問題点を解明し、次のような各項を把握、検討することを目的に実施する。

- ① トンネル区間の全体的な地質構造、地質分布およびその性状の把握
- ② 岩盤の物性値、力学特性などの調査結果にもとづき、これに技術的な判断を加えた地山分類
- ③ 坑口位置の地形・地質条件および問題となる事項とその対策設計に必要な基礎資料
- ④ 切羽の自立性評価、支保工の設計、補助工法の選定、掘削工法・掘削方式(序編2-1-2参照)の選定のための基礎資料
- ⑤ 特殊地山の分布・性状および問題となる現象の発生予測と対策工検討のための基礎資料

精査は、図-1に示したように概査で得られた調査成果にもとづいて計画し、概略設計から詳細設計・施工計画へと順次調査の精度を高めるように段階的に実施する。精査のうち、概略設計のための調査はトンネルの全区間を対象に、踏査、水文調査(第Ⅲ編12章)、弾性波探査が実施される場合が多い。また、湧水、濁水が問題となるような場合、電気探査が採用される。さらに、概査や上述の物理探査の結果をもとに、坑口部や問題となる箇所を絞って、ボーリング調査やその孔を利用した孔内試験、物理検層を地山条件に応じて実施する。次に概略設計のための調査で明らかになった問題点のうち、詳細設計・施工計画を立案するうえでとくに重要な問題点の調査精度を高めるため、あるいは、問題点を解明するために調査を実施する。この調査は範囲を限定した詳細な踏査やボーリング調査および特殊地山、特殊条件に応じた調査法による。さらに、問題が大きい場合は調査坑調査を実施する場合がある。

トンネルの設計に用いる地山分類や数値解析のための物性値はこの段階で得る必要がある。この際、出現する

岩種、掘削区間全域、特殊な条件区間などの条件ごとに、工学的な評価を加えた考察とともに、地山の物性値や力学特性を地山分類やモデル化などに活用できるように計画的に取得・整理しておくことが重要である。

なお、各調査段階で新たな問題が明らかになった場合には、それまでの調査成果を修正するとともに、調査方法や実施位置、必要に応じて当初の調査計画を速やかに変更する。

(2) 地山条件別の地質調査

トンネルの地質調査では、地山条件により必要な地山情報の種類や、その精度が異なるため、これに応じた必要な調査項目を整理、検討したうえで適切な方法を適宜選定する必要がある。地山条件ごとに明らかにすべき調査項目としては、第Ⅲ編表-1(Vol.30, No.11)に示した問題が一般に考えられ、さらに同表にはその解決のために有効な地質調査法を整理した。これらの地質調査法は、第Ⅲ編表-3(Vol.30, No.11)に整理・概説したように、それぞれ長所・問題点を有しており、第Ⅲ編で述べたような各調査法の特徴や問題点を理解し、適宜組み合わせる実施することが一般的である。また、地山条件別の室内試験項目は、第Ⅲ編表-2(Vol.30, No.11)に示したとおりである。

以下に、トンネルで考慮すべき地山条件を挙げ、調査の意義や考え方を概説する。なお、前編までの解説との重複をできる限り避け、必要事項のみを記述する。

1) 硬岩・中硬岩地山

主に岩種と地山弾性波速度を指標とした地山区分にもとづいて、掘削工法、支保方式の設計など事前設計を行う。そのために地表踏査、弾性波調査による調査を行い、これらの調査結果から想定される断層、低速度帯などを確認・把握するためのボーリング調査を実施する場合が多い。さらに、岩盤の硬さ、風化の状態、割れ目の程度を評価するために、岩石の一軸圧縮強度・弾性波速度を含めた岩石試験、ボーリングコアによるRQD・形状などの観察を実施し、定量的な指標として用いる。このほか、地下水圧が大きく、割れ目の発達する岩盤では、ボーリングを利用して帯水層の地下水位や透水性を評価する試験を実施する。

2) 軟岩地山

軟岩地山の評価においては、次のような内容について検討を行う、

- ① 支保工・覆工の設計のため土圧の形態を推定する重要な指標である。地山強度比に適用するため、ボーリングコアによる強度試験を実施する。この場合、地山を代表するようなコアを選定することが重要である。

- ② 膨張性地圧が推定される場合、第Ⅱ編表-17(Vol.30, No.10)に示した地山の膨張性を示す指標を検討するため、浸水崩壊度試験、膨張性の特性を求める物理・化学試験(粒度組成、コンシステンシー、X線回析など)を実施する。

- ③ 掘削工法、支保方式の設計のため、切羽、周辺地山の安定性を解析的に検討する場合には、単位体積重量、変形係数、ポアソン比、粘着力、内部摩擦角などの物性値を求める室内試験などを実施する。

- ④ 機械掘削工法を検討する場合、自由断面掘削機では、地山強度、切羽の自立性、トラフィカビリティーを、トンネルンボーリングマシンでは、切山の切削性や切羽の自立性などを検討するために、強度試験、浸水崩壊度試験や鉱物組成分析などの試験を追加する。

3) 土砂地山

土砂地山は、一般に固結度の低い地山であるため、地山安定工法の要否、掘削工法の選定などを目的として調査を行う。切羽の安定の指標として、一軸圧縮強度・ N 値による固結程度、粒度組成、透水係数などが重要である。土砂地山でも粘性土と砂質土では特性が大きく異なるため区別して考える必要がある。砂質土地山では、第Ⅱ編表-16(Vol.30, No.10)に示したような地山の流動性を示すような指標を得るために、地山の固結度、細粒分の含有率、均等係数、地下水調査などが重要である。

一方、粘性土地山では、軟岩地山と同様に地山強度や膨張性の可能性を検討するための試験が重要であり、後述する5) ②都市域を通過する場合、⑥近接施工となる場合、などを参考に必要がある。

4) 特殊地山

特殊地山については、第Ⅱ編1章で述べたような問題点が予想され、それに対する対策工を検討するため、とくに次のような調査が必要となる。ただし、調査の計画、実施にあたっては、専門家の意見を十分に聞いて行うことが望ましい。

- ① 地すべりなどの移動性地山および斜面災害が予想される地山

地すべりや斜面崩壊は特有な地すべり地形を呈している場合が多いので、概査段階での空中写真判読や踏査が有効である。また、地すべり指定地などを含む地すべり活動について、地元住民や関係機関で聞き取りをしたり、資料を調査して情報を得ることも大切である。精査段階では、踏査で地すべり地内の変状状況を把握したり、地表・地中変位などの計測により地すべり活動の危険性を判断することが大切である。また、地すべり規模を考慮してボーリング調査を計画的に実施し、地すべり深さなどを調査

するとともに、この孔を利用して地下水調査や地中変位測定を行うことが望ましい。

② 断層破碎帯・褶曲じょう乱帯

幅の広い破碎帯を伴った断層の存在は、概査段階の調査(資料調査、空中写真判読(第Ⅲ編3-2-4参照)、踏査など)で概略を把握できる。破碎の程度などの性状については、弾性波探査、ボーリング調査などにより想定する。また、断層破碎帯には大量の地下水を胚胎していることがあり、この面の調査が大切である。また、いわゆる活断層については、資料調査により活動度を把握したうえで必要により踏査やトレンチによる詳細観察などの調査を検討する。

褶曲では、とくに現在も進行中の第三紀グリーンタフ地域の褶曲が問題となるが、第Ⅰ編とくに6～8章、さらに第Ⅱ編の1-2-2を参考にするとともに、さらに後述の膨張性地山の調査が必要である。

③ 含水未固結地山

未固結砂層・砂礫層の場合は地質構造が単純なことが多いので、踏査、ボーリング調査、孔内検層、地下水調査などにより、地質性状や流動化のかんりの推定が可能である。とくに前述した土砂地山の流動化の判定指標(第Ⅱ編表-16(Vol.30, No.10))を求めるような室内試験が重要である。また、粘土などの不透水層と互層をなしている場合には、砂礫層の地下水は被圧している場合が多いのでボーリング調査、湧水圧測定が必要である。一方、火山地帯の場合は、旧地形に支配されるため地質構造が複雑で、さらに新期の堆積物が地表を被っている場合が多い。このため、ボーリング調査を主体に電気探査、地下水調査、弾性波探査(反射法)などにより総合的に評価する必要があり、さらに事前調査段階だけでなく、施工段階まで継続した調査が必要となるケースがよくある。

④ 膨張性地山

新第三紀の泥岩・凝灰岩では2)で述べたような評価指標(第Ⅱ編表-17(Vol.30, No.10))で評価しているので、その指標を求めるような室内試験やボーリング孔を利用した原位置試験も有効である。一方、蛇紋岩、粘土化した結晶片岩、温泉余土、断層粘土などでは分布が不規則で、変質状態なども様でないため過去の事例を参考に調査・評価する必要がある。

⑤ 山はね

第Ⅱ編1-2-5, 4-2-4参照。

⑥ 高い地熱、温泉、有害ガス、重金属などがある地山

この種の問題箇所は熱水変質帯、破碎帯、貫入帯

および石油、石炭や金属などの胚胎層のような地山であり、概査段階でその概要を把握できる。このような地域にトンネルを計画する場合、地熱、温泉、ガスなどがあるため貯留構造をボーリング調査、各種物理探査により入念に調査するとともに、浅所の地中温度分布から地下熱源の位置や形状を推定する地温探査法やガスの存在の確認のためのガス分布および重金属の分析などを実施する。

⑦ 高い水圧や大量湧水の発生が予想される地山

調査は、②、③や第Ⅲ編12章を参考に実施する。地質状況によっては弾性波探査、電気探査などの各種物理探査を追加する。しかし、事前調査だけで正確な把握は困難な場合が多く、施工中の先進ボーリングや水文調査などで調査精度を上げていく必要がある。

5) 特殊条件

特殊条件のトンネルの場合の調査とその留意点は以下のとおりである。

① 小土かぶりの場合

標準貫入試験やボーリング孔を利用した原位置試験および室内試験などを行い、3)、4)で述べたような自立性の評価や沈下量の予測を行っていく必要がある。

② 都市域を通過する場合

都市域を通過するトンネルでは、地表および地下構造物などの支障など、周辺状況の調査が必要であり、第Ⅲ編13章を参考に実施する。また、土かぶりが小さく未固結地山の場合、地下水障害や地表面沈下が問題となるので、前述したような、含水未固結地山や小さな土かぶりの場合を参考に、ボーリング調査やその孔を利用した各種原位置試験、室内試験、地下水調査などを実施する。

③ 水底を通過する場合

水底地質調査の手順は、資料調査、周辺陸上部調査の2段階の事前調査を経てから、水底部の調査の段階に入るのが一般的である。とくに陸上部の調査によって、予想される概略の水底地質図を作成する程度にまで進め、問題となる項目を把握しておく。これが水底調査法の選択に際し、重要な要素となってくる。水底部の調査では、水底表面部の観察・試料採取および音波探査法などの各種物理探査が主となる。

④ 斜坑や立坑部

第Ⅱ編 1-3-5参照。

⑤ 坑口部

坑口部分の状況はトンネルごとに様々であり、個々に検討する必要がある。とくに地すべりや斜面崩壊

の可能性のある坑口部では慎重な対応が必要で、前項①を参考に十分な調査を行う。また、地形・地質条件によっては切羽崩壊・偏圧などの可能性、トンネル構造物の支持力不足および土石流・雪崩・落石・地震などの自然災害の可能性もあり、垂直・水平ボーリングを主体に上記の問題点に応じた調査を行う。

⑥ 近接施工となる場合

第Ⅱ編 1-3-6参照

2-2-3 施工中の調査

(1) 目的

計画段階での調査は前述の調査精度の問題を伴うため、その全容を事前に把握することは困難なことが多く、とくに長大トンネルの調査精度には限界があると考えべきである。

このため、計画段階の調査で得た成果を基本として、施工中にこれを修正する、あるいは切羽前方の予測を行うことを目的とした調査が行われる。これらの調査は、通常計測作業として主に施工管理を主な目的とするが、計画段階に把握できなかった地山条件の調査や出現する位置を正確に予測するためのより詳細な地質調査と位置づけられる(第Ⅲ編11章)。

また、近年の山岳トンネル技術でとくに重要な位置を占める補助工法の選定や当初設計時の数値解析モデルの見直しに必要な計測結果や物性値は適切な地山評価とともにこの段階で求める必要がある。さらに、施工時には坑内と併せて坑外での地下水や地表面沈下などの周辺環境への影響調査が重要である。

(2) 方法

調査の方法については、第Ⅲ編11章に解説したように、切羽の観察、計測、各種試験・坑内探査、ボーリング調査および切羽前方探査が用いられる。このうち、通常は施工管理の意味合いが強い、観察、計測が行われ、施工に重大な支障を及ぼす地山条件の存在が予測される場合は、近接した地点から調査ボーリングや調査坑によって地山状態を直接確認するか、あるいは物理探査手法を用いて問題となる箇所的位置などを予測することが必要となる(第Ⅲ編(5)表-4¹⁾(Vol.31, No.3))。

このようにして得られた施工中の地山条件調査の結果は、直接施工管理上の重要な資料であると同時に、その後の切羽の状況を予測するうえでの貴重な資料となる。前述のように、計画段階で作成された地質縦断図は調査時の様々な制約により図化された地図縮尺の精度に比べ低い場合が多い。これに対し、トンネル切羽の情報は毎切羽ごとに確認することが可能なmオーダーの精度であり、切羽観察時のスケッチはおおむね1/100程度の精度で書かれる場合が多い。この精度の違いは、しばしば聞

く「地質調査の精度が悪い」と言われる理由の一つでもあるが、切羽観察の重要性を示す特徴ともなっている。なお、この段階で当初の地質縦断図を修正することの意義は、その時点で切羽に出現していない切羽前方や周辺の問題となる地質、地下水の有無を予測することにある。この点で、常にトンネル区間全体を把握できるスケールの縦断図と切羽の地質状況を整理した詳細な施工実績図を合わせて予測し、その工学的な問題点を考慮することが重要である。さらに、最近の技術としてデジタル画像の解析や転送による情報の集約システムの構築により、切羽情報をさらに客観的に整理・評価することが試みられている。

2-2-4 施工後の調査

(1) 目的

工事の竣工後まで行われる主な調査には、トンネルの建設による周辺環境への影響調査や地山応力の作用などによる構造物の変状調査がある。周辺環境調査は第Ⅲ編12, 13章で解説したように、トンネル施工と周辺地域での地下水位低下などの減・濁水や地表沈下に伴う構造物変状の因果関係を明らかにし、最終的には関係者の相互理解のもとに必要な補償を行うための資料を得ることを目的とする。

また、構造物の変状調査はトンネルの維持管理のための定期的な構造物の機能点検や周辺環境の変化に伴う影響の有無を把握することを目的とする。これらの調査は計画段階からの調査成果、施工中の地質状況などとの関係から検討し、施工後はその発生状況、進行程度や原因の特定、対策方法の検討のための資料を得ることが重要

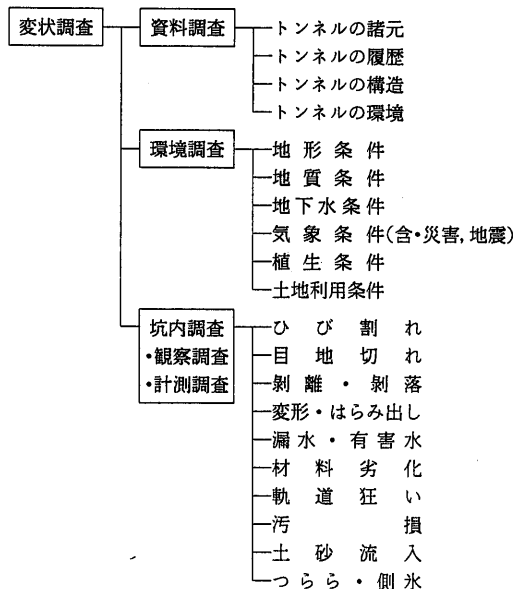


図-2 変状トンネルの調査項目²⁾

表-2 トンネル覆工(コンクリート構造物)の非破壊検査法とその評価³⁾

調査対象物 検査法	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	コンクリート					鉄筋			覆工表面のひび割れ		の覆工の浮き・空洞	覆工の厚さ	覆工背面空洞
	圧縮強度	配合推定	骨材反応	アルカリ	中性化深さ	塩化物量	位置・かぶり	径	腐食	深さ			
①目視検査			○					○		●	○		
②反発硬度法	○												
③超音波法	△					△			○		△	△	△
④電磁波法						●	△				◎	◎	◎
⑤電磁誘導法						●	○						
⑥レーザ法										●			
⑦写真画像による方法										○			
⑧赤外線法										△	◎		△
⑨打撃法・打診法	○										○	○	○
⑩アンカー引き抜き法	○												
⑪自然電位法								○					
⑫分極抵抗法								○					
⑬ハンマードリルによる試料採取法						◎							
⑭コア採取による方法	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

評価基準

- : 高精度で実用レベルに達している方法
- ◎ : 高能率で実用レベルに達している方法
- : 実用レベルに達している方法
- △ : 原理的には適用可能であるが、精度、効率、費用などに問題がある方法
- 無記入 : 適用できない方法

である(第Ⅲ編 11章).

(2) 方法

調査方法の詳細は、第Ⅲ編12, 13章による。このうち、周辺環境影響調査は、施工前の状態や施工中の問題発生時との比較検討が重要であり、例えば、トンネル掘削によって発生する周辺の水位低下などの評価を行うためには、最低限で施工前1年程度、影響範囲が大きいと予測される場合には渇水年、豊水年などの気象変動を考慮できるように数年程度の観測を事前に行っておくことが望まれる。

次に、構造物の変状調査はトンネル供用後のトンネルの機能維持という観点から、重要な課題となっている。

これは、トンネルに限られた断面からなる地下構造物であるために、供用後に変状などの問題が発生した場合の対策が限られるなど、その影響がきわめて大きいことを理由とする。調査すべき項目を図-2²⁾に示す。調査方法は調査項目に適應した資料調査とトンネル坑内での観察、計測を主とするが、とくにトンネル覆工コンクリートの検査手法として様々な非破壊検査法が近年用いられている(表-2³⁾。

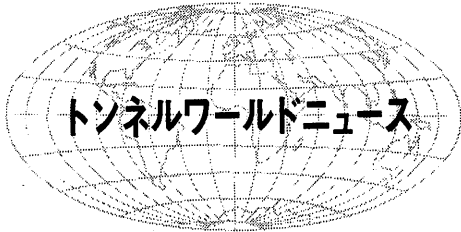
以上に示した調査の流れは、あくまで一般的な山岳トンネルでの考え方を示したもので、個々のトンネルが持つ様々な制約や技術的な条件にもとづき臨機応変に対応する必要があることは言うまでもない。ただし、トンネルにおける地山調査の結果は、構造物としてのトンネルの持つべき最小限度の機能を決定するものであり、その理解の程度は設計・施工の良否に直接反映される

点を忘れてはならない。この点については、3章以降に述べる。

(文責：木谷日出男・(財)鉄道総合技術研究所主幹技師/神藤健一・前田建設工業(株)技術研究所部長/大島洋志・国際航業(株)取締役技術センター長)。

参考文献

- 1) 土木学会編：トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説, 1996.
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：トンネル補強・補修マニュアル, 1990.
- 3) JTA保守管理委員会：トンネルの新しい検査手法(1), トンネルと地下, Vol.27, No.8, 1996.



(社) 日本トンネル技術協会
国際委員会国内広報ワーキング

モンブラントンネルの火災安全対策

1999年3月に発生したモンブラントンネルの大火災事故による損傷の修復だけでは既存の安全問題の解決にはならない、とイタリアの工業建築家 Fernando De Simone氏(Padua市にある Eko System Engineering社オーナー)が言っている。これは公共事業大臣、Aurelio Misiti 教授の意見でもあると De Simone 氏は付け加えた。

De Simone 氏はトンネル管理会社へ代替え案を提出したが、提案された改善策は2段階に分けられている。

第1段階は、既存のトンネル側面に250mごと(現状では600mごと)に、少し高めに気圧が保持された待避所を新たに建設する。

しかし、1000℃を上まわる火災が再発した際は、再びドアを溶かしてしまう恐れがあるため、この待避所は道路に直接面しておらず、トンネルの側面から30m奥の岩盤内に設けることにより、道路との間に緩衝帯を有すると同様の効果が期待でき、少なくとも24時間は安全が保てる(図-1)。

また、トンネルの300mごとに、油煙の粒子を除去する電気集塵機と、排気ガスを除去する活性炭素フィルターを備えた迂回坑を設置する。De Simone氏によれば、第1段階は完成までに12h/日で作業して18か月かかる

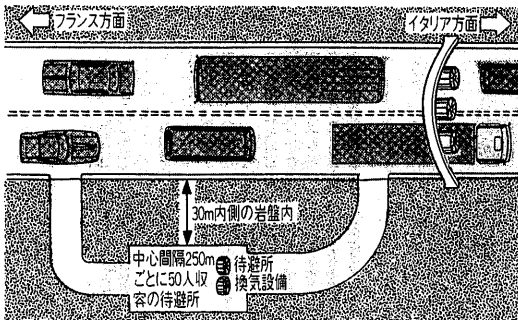


図-1 モンブラントンネルの火災の危険性に対して提案された解決策の第1段階。これは他の長大トンネルへも適用する。第2段階は第2トンネルの建設。

と見積もっている。

第2段階は、36m離れた場所に第2トンネルを建設することになっている。第2トンネルは待避所を通して既存のトンネルと連絡される。De Simone氏は完成には3年かかるとみている。

全体のコストは1.617億\$ (約167億円, 1\$=105円)と見積もっている。(T&T '99.12 担当:事務局)

Konigsberg の斜面安定対策

1980年代初めのアウトバーン建設以来、オーストリアのKonigsberg(Thomasberg~Aspang間)付近の切り取り区間ではくり返し発生する地すべりに悩まされており、多額な安定化対策が必要であった。問題となっている斜面から余剰水を逃がすための径1.5mの大口径杭、長さ30mの大型排水ボーリングおよびすべり止めによって斜面の安定化を図ったが、一時的に有効であるに過ぎなかった。

粘土状圧砕岩の破碎帯で、とくに降雨量の多い年ではすべり挙動が続いていた。

長さ60mでも、プレストレス抑止杭は効果がなく、地質の専門家であるBrandi教授の協力で、斜面安定対策が練りあげられた。同教授の案によりアウトバーンの現状ルートを変更せずに、斜面を恒久的に安定させることができた。

地すべり区間の上り・下り車線各々に、トンネル躯体を構築して、その上に12mの盛土を行った。これにより、アウトバーンの切り取り施工時に掘り出された発生土の大部分を元に戻して、斜面を再度安定化するだけの押さえ盛土としての効果を生み出した。

この斜面安定対策は、A2 Konigsberg JV(Hinteregger, Innerebner, Griln & Bilfinger社)によって実施された。同対策の総工費は約10.5億円かかった。この双設トンネルは斜面からの荷重に十分対抗するために、非対称に建設されなくてはならなかった。トンネルの床版は外力の一部を分担するために、B300(オーストリアのコンクリート強度規格)でインバートアーチとして構築された。

トンネルアーチ部分はB400で建設されたが、硬化熱やそれに伴う収縮を最小にするために特殊コンクリートの配合となった。トンネルアーチ部は厚さ95cm、トンネル全高は14.3mで内空高さは9.5mである。

ウィーン方向車線のトンネル(延長187m)は1997年に完成しており、1999年Graz方向車線のトンネル(延長168m)が埋め戻され工事は完成した。

(WT '99.12 担当:奥原 祐治)

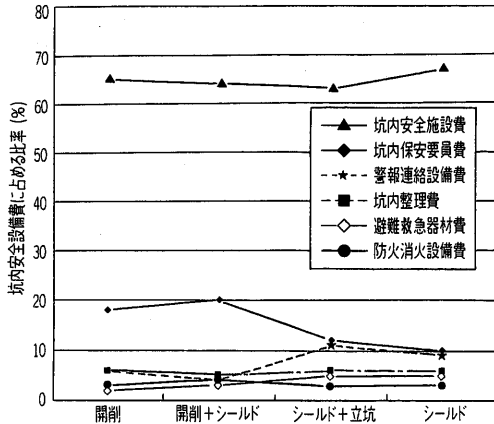


図-26 坑内安全設備費の比率(C区分)

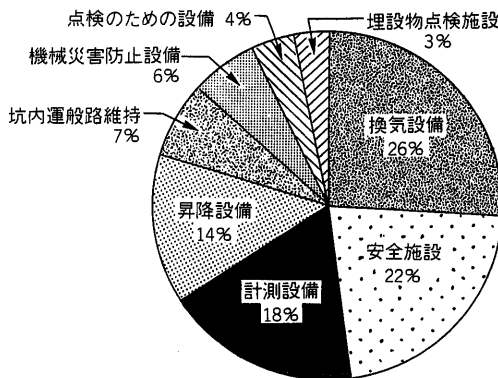


図-27 坑内安全施設費の内訳(全体平均)

22%), 計測設備(同18%)が大きな割合を占めている。

また、坑内安全設備費について、請負金額別やセグメント外径別に分析し、さらに坑内安全施設費について、セグメント外径別、シールド掘進延長別に分析したが、いずれも特徴的な傾向を見出すことはできなかった。

5-4 安全管理費の分析

5-4-1 安全管理費の内訳

安全管理費をC区分(安全管理要員費、安全教育費、労災保険料等)の比率による分析すると、図-28のとおり、労災保険料等の占める割合が79%となっており、安全管理費の大部分を占めている。

5-4-2 工法別の特性

安全管理費を工法別に分類した結果を図-29に示す。これを見ると、工法によらず労災保険料等が大きな比率を占めている。「開削」ではこの比率が63%で、他の工法と比較して20%程度低率となっているが、その分「開削」における他の項目の比率は高くなっている。

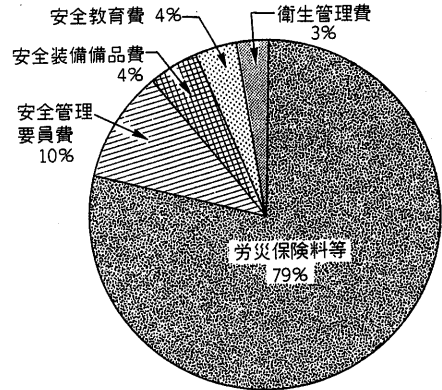


図-28 安全管理費の内訳(全体平均)

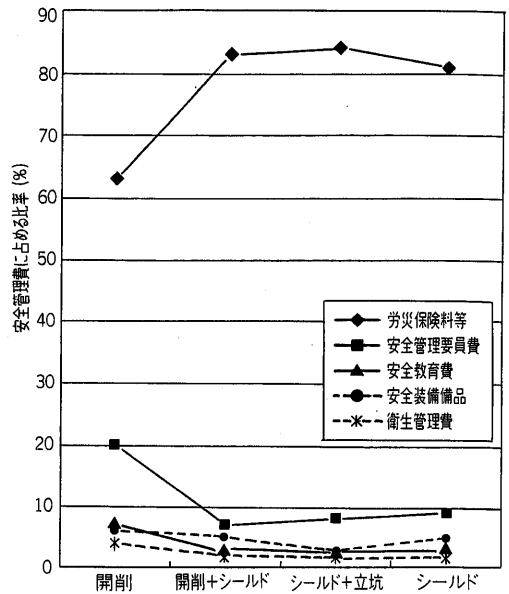


図-29 安全管理費の比率(C区分)

この違いは、「開削」と「シールド関連工事」の保険料率の違いもあるが、「開削」は「シールド」と比較して、とくに安全管理要員費が大きくなっており、このため相対的に労災保険料等の比率が小さくなっているものと推定される。

保険料のさらに細かい内訳の違いについては、保険の内容を細分して調査していないので不明である。

その他、請負金額やセグメント外径によっても分析したが、特徴的な傾向は見られなかった。

また、安全管理費の中で大きな割合を占める労災保険料等について、工法に対する地域別の分析を行ったが、これも特徴的な傾向は見られなかった。

連載講座

トンネル技術者のための応用地質学入門(最終回)

第IV編 工事を対象とした地質調査の進め方(2)

「応用地質学」連載講座小委員会

3. トンネル工事のための地山評価法

3-1 岩盤分類一般¹⁾

今までに述べた地質学の基礎知識や地質調査法をもとに、トンネル工事の設計や施工に必要な岩盤分類について考えてみよう。

第I編で述べたように、地質学では岩石を成因および粒子の大きさなどで分類している。しかし、この分類はトンネル工事にとっては重要なものではない。トンネル工事に必要な分類は各作業が直面する岩の本質を表したものでなければならない。例えば、トンネル工事では、せん孔、爆破、換気、ずり出し、支保工建て込み、覆工のサイクルをくり返しているが、これらの各作業と地山条件の関係については、第II編3,4章で述べた。これらの関係を一定の基準に従って、グルーピング(岩盤区分)あるいはランクづけ(岩盤等級)して、設計に必要な岩盤の物性分布や施工性の判断に利用しているのが岩盤分類である。

例えば、花崗岩についての岩盤分類を考えてみる。花崗岩は地質学的分類によれば火成岩であり、酸性の深成岩である。新鮮な花崗岩は、一軸圧縮強度が $1,000\text{kgf/cm}^2$ を超えるきわめて硬質な岩である。このような岩はトンネル工事にとっては硬岩、しわい岩、ずりの大きさと体積変化率(増え率)の大きい岩、安定した岩である。しかし、花崗岩は格子状の節理の発達が顕著な岩であり、熱膨張係数の異なる等粒状の鉱物から構成されているため、鉱物粒子間の結合が弱く、物理的風化分解作用を受けやすく、風化深さが50mを超えるような場合がある。強風化したものは砂質土になりやすく、いわゆる真砂と呼ばれる。風化を受けるのは長石であるが、分解して粘土化した長石が残っている場合は、この岩は軟岩、さくい岩、割れ目の多い緩みやすい岩、難透水岩(節理面に沿っては透水質であることが多い)である。長石の粘土が流出してしまった岩は見掛けは未固結土であり、破砕質岩、透水質岩である。

このように、同じ花崗岩でも生成後の環境条件によって、トンネル工事の岩盤分類のすべてにあてはまるような状態があり、これは他のすべての岩石にもいえることを認識しておかなければならない。

わが国の岩盤分類²⁾は、表-3に示すように各種土木構造物を対象に各機関・提唱者から提案されている。これらの分類は、同表の分類要素によって区分される。しかし、これらの因子は複雑にからみあっており、工事によっても岩盤のとらえ方が異なるので、単純に定量化することは困難であり、国際的に統一されたものはなく、いろいろな分類案が混在しているのが実態である。

また、岩盤分類には、定性的な表現が多く、定量的に評価できる項目が少ないため、判断に個人差がでるのは避けられないのが現状である。しかし、多少のばらつきを許すなら、実測した物性値や施工性と岩盤分類との関係に良好な相関が認められるので、岩盤分類がよく使われている。

3-2 岩石の硬軟や割れ目頻度などによる分類

(1) 岩石の硬軟による分類

わが国の岩盤分類のうち、ダム基礎や橋梁基礎の岩盤分類では、風化変質、割れ目の間隔、岩石強度、ハンマー打撃などをもとに、ダムや橋梁の設計に必要な岩盤の物性値を求め、基礎としての安定性を判断するものが多い^{9), 10), 18)}。また、切土のり面の岩盤分類は、標準のり面勾配などを示すものが多いが、硬岩・軟岩・土砂などの掘削の難易の分類にも利用されている^{12~14)}。

一軸圧縮強度は、岩石のもっとも基本的な物性であるので、その区分についての提案も多い。土質工学会の岩盤分類(1969)¹⁹⁾では、1, 10, 50, 100N/mm^2 に区分の境界がある。国際的な区分では、ISRM(1978)が「岩盤不連続面の定量的記載に関する指針²⁰⁾」の中で採用している区分がある。ここでは、 0.25N/mm^2 以上の岩の区分の境界を1, 5, 25, 50, 100, 250N/mm^2 に置いて7段階に区分し、軟岩は $0.25\sim 25\text{N/mm}^2$ 、硬岩が 50N/mm^2 以上である。今後の岩石強度区分の一つの基準になるものと思

表-3 わが国の岩盤

対象	分類名	機関	現在適用されている基準と(発表年)	表示法	分類要素														
					岩種	風化変質の程度	破碎状況	層理片理の状態	亀裂の間隔	割れ目の状態	固結度	岩石強度	変形特性	ハンマー打撃	弾性波速度	地山強度比	コア採取率	R	Q
トンネル	トンネルタイプ判定基準 ³⁾	農林水産省	(1975)	A~D	○	○	○						◎	◎	◎	◎			
	トンネルの岩盤分類 ⁴⁾	日本道路協会	1989(1975)	A~E	○	○	○	◎	○					○	◎		◎		
	トンネルの岩盤分類 ⁵⁾	日本道路公団	1997(1982)	A~E	○	○	○	◎						○	◎	◎	◎		
	トンネルの地山分類 ⁶⁾	日本鉄道建設公団	1996(1983)	I _N ~V _N , I _S , I _L , 特S, 特L	○										◎	◎			
	トンネルタイプ判定基準 ⁷⁾	水資源公団	(1974)	A~E	○	○			◎	○				◎					
切土	切土のり面のための分類 ⁸⁾	建設省	1977(1976)	硬岩・軟岩・砂、他	○	○		◎		○	○				◎				
	土研式岩級区分 ⁹⁾	建設省	(1976)	A~D				◎	○	○									
	電研式岩盤分類 ¹⁰⁾	電力中央研究所	(1964)	A~D(CはC ₁₅ , C ₁₆ , C ₁₇)		○				○	○								
	岩盤区分とのり面勾配 ¹¹⁾	全国治水砂防協会	(1982)	A~D(CはC ₁₅ , C ₁₆ , C ₁₇)		○				○					◎				
	掘削の難易による岩および土の分類 ¹²⁾	日本道路協会	(1986)	岩または石、土		○			○	○					◎	参考程度			
	切土に対する標準のり面勾配 ¹³⁾	日本道路協会	1999(1986)	硬岩・軟岩・砂~粘性土						○		○							
	土構造物の岩盤分類 ¹⁴⁾	運輸省鉄道局	1992(1978)	硬岩, 軟岩, 脆弱岩	○	○		◎		○	○								◎
岩盤分類基準 ¹⁵⁾	電源開発(株)	(1987)	a~e		○		◎		○	○									
ダム基礎	電研式岩盤分類 ¹⁶⁾	電力中央研究所	(1964)	A~D(CはC ₁₅ , C ₁₆ , C ₁₇)		○	○			○	○								
	土研式岩級区分 ⁹⁾	建設省	(1976)	A~D				◎	○	○									
	電研改良方式岩盤分類 ¹⁶⁾	電力中央研究所	(1976)	A~D(CはC ₁₅ , C ₁₆ , C ₁₇)硬岩・中硬岩・軟質岩		○	○		◎	◎	◎								
	岩盤分類 ^{17), 17)}	水資源公団	(1981)	A~E(CはC ₁₅ , C ₁₆ , C ₁₇)		○				○	○								
岩盤分類基準 ¹⁵⁾	電源開発(株)	(1987)	a~e		○		◎		○	○									
橋梁基礎	風化花崗岩の分類 ¹⁸⁾	本州・四国連絡橋公団	(1980)	A~D, C, Dは3区分		○	○		◎	○		◎	◎	◎		○	◎		
その他	岩の分類表 ¹⁹⁾	土質工学会	(1969)	A・H, B・S, Av, など						◎	○		◎		◎				

分類とその分類要素

岩盤分類と関連する設計・施工因子							記事	積算との関連	
鋼製支保工	ロックボルト	吹付けコンクリート	二次覆工	変形余裕	インパート	掘削工法	土圧		
○			○		○	○	◎	地山強度比は、単独で別分類地山強度比による分類では鋼製支保工について定量表示	◎
◎			◎			○			
◎	◎	◎	◎	◎	○	○	◎	地山強度比は、Dのみ	◎
◎	◎	◎	◎	◎	◎	○		地山強度比は中硬~軟岩のみ	◎
○			○			○			◎
切取高さ		のり面勾配		のり面処理					
◎		◎							◎
△		△						三要素の組み合わせによる総合評価	
△		△		△				硬さの程度をハンマー打撃で判断 水路トンネル、発電所基礎にも利用されている	
◎		◎		○					
◎		◎						岩盤の分類は、岩片のせん断強さと割れ目の多少およびゆるみの程度に左右される掘削の難易性から判断	
△		△		△				三要素の組み合わせによる総合評価	
△		△		△		△		硬さの程度をハンマー打撃で判断 水路トンネル、発電所基礎にも利用されている	
△		○		△		△		三要素の組み合わせによる総合評価	
○		△		△		△		物性値との対応付けが明確である	
○		△		△		△		電研式を一部修正	◎
		△		△				三要素の組み合わせによる総合評価	
岩盤物性値				許容支持力					
		◎							
								二要素の組み合わせによる	

われる。

なお、この一軸圧縮強度と穿孔速度(第Ⅱ編 3章 図-15)、硬岩・軟岩・土砂による容積変化率(第Ⅲ編 3章 表-14)、ビット適合性(第Ⅲ編 8章 表-15)、ボーリング掘削状況(第Ⅲ編 8章 表-18)との関係などについて参照されたい。

表-4 ISRMの割れ目区分

2 cm 以下	きわめて狭い
2 ~ 6	非常に狭い
6 ~ 20	狭い
20 ~ 60	普通
60 ~ 2 m	広い
2 ~ 6	非常に広い
6 m 以上	きわめて広い

(2) 割れ目間隔

割れ目は、岩盤区分の基礎的な指標として用いられ、さまざまな区分境界が用いられている。例えば、土質工学会の区分¹⁹⁾では、10cm 以下、10~30cm、30~90cm、90cm 以上に、ISRM(1978)では、表-4 のような区分を提案²⁰⁾している。

(3) 弾性波速度の利用²¹⁾

岩盤内を伝播する弾性波速度は、岩盤内の不連続面の分布と状態に強く依存する。そのため、岩盤の状態を表現する量には不連続面を含まないときの岩盤の速度と実際の岩盤の速度との比を採用することが多い。前者は、岩石供試体の速度とほぼ同じとみなすことができる。岩盤の状態を表現するには、速度そのものよりも、速度比の自乗を利用することが多い。

小野寺²¹⁾は、速度比の自乗を岩盤の良好度と定義した。良好度は1~0の間にある。一方、その値の低下量は、主として岩盤亀裂の多少に依存することから、(1-良好度)は亀裂係数と呼ばれる。

トンネルの分野でも、池田(1969)²²⁾が弾性波速度によるトンネルの岩盤強度分類を体系化してから、各機関で、弾性波速度が岩盤の状態を評価するための有力な指標として広く用いられている。

3-3 トンネル工事を対象とした岩盤分類

トンネル工事では、図-3²³⁾に示すような流れに沿って、地山条件調査の結果を整理し、設計・施工計画に活用できるように必要事項をとりまとめ、地山の性状を工学的に正しく評価しなければならない。この地山の評価には、経験的かつ定性的な地山の等級分類による方法と、次項で述べる解析的手法を用いて地山の物性値にもとづき工学的なモデル化により評価・検討する方法がある。ここでは、まず地山の等級分類による方法を述べる。この分類基準にもとづく地山の等級分類は、工事の契約における地山条件を指定する一つの物差しとして、また、施工の段階では、観察・計測結果の判定を総合的に補うものとして有効に利用されている。

地山分類を実用に供するための条件としては、①客観的かつ定量的な評価ができ、その評価に用いた因子は、

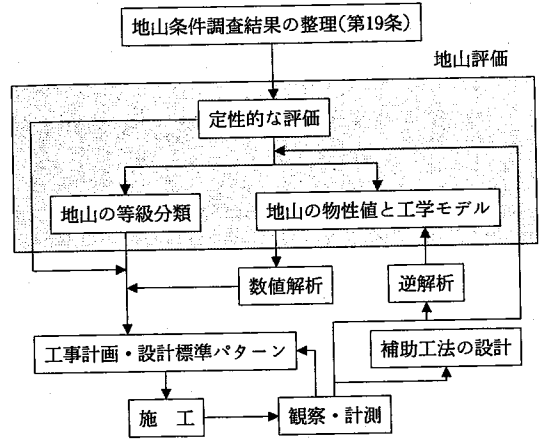


図-3 地山評価の位置付け²⁴⁾

トンネルの設計や用途と関連があること、②対象とするトンネルの工事区間の全長にわたり統一した分類・評価のための因子が得られること、③因子は通常に実施される調査法、試験法から得られるものであること、④その等級は設計・施工の区分と対応すること、などが挙げられる。

国内のトンネル工事を対象とした岩盤分類は、表-3に示したような分類要素によって区分されている。表-3より岩種、亀裂の間隔、割れ目の状態、地山の弾性波速度値を因子としているものが多い。とくに計画段階の岩盤分類では、地山の弾性波速度を重視しているものが多い。その理由は、トンネル調査に汎用されている弾性波探査では、探査測線に沿った速度断面図が作成でき、構成岩石の岩種、試験片の一軸圧縮強度、超音波伝播速度(弾性波速度)が明らかであれば、地山の強度や自立性を間接的に評価できるからである。しかし、健全な地山と不健全な地山の速度差が小さい軟岩地山や土砂地山では、土圧特性などを評価するために下式で算出される地山強度比が指標として用いられている場合が多い。

$$\text{地山強度比 } \alpha = qu / (r_v \cdot h)$$

ここに、 qu : 地山の乱さない試料の一軸圧縮強度

r_v : 地山の単位体積重量

h : 土かぶり厚さ

さて、岩盤分類による評価の対象となるのは、掘削地山の自立性や変位、土圧特性、地山の水による劣化特性、透水性、切削特性、破壊特性などであるが、海外の分類では、それらが直接分類の指標として用いられているものも多い。

わが国のトンネルを対象とした岩盤分類では、通常、地山においては、地山の性状に対応してトンネルの掘削工法、支保パターン、二次覆工などの標準パターンが示されている。この分類には等級に対応した地山の挙動も

併せて示されている。ただし、特殊地山や特殊条件では、地山等級あるいは、特性値などを的確に表すことが困難であり、既往の経験、資料などにもとづく定性的な判断を行わざるを得ない。

未固結の砂質地山、断層破砕帯などでは、湧水、とくに突発的な湧水による切羽の自立性の著しい低下または崩壊の有無について十分に検討すべきである。地山の流動化の有無に関する判定指標としては、第Ⅱ編 表-21に示した。また、膨張性地山の判定は、トンネル形状、掘削工法、補助工法、トンネル完成後の後荷の検討にとって重要である。膨張性の判定指標の例は第Ⅱ編 表-17に示した。

トンネルを実際に施工した場合、地山の状態が着工前の予想と異なっている場合も多い。これは、事前設計の段階において地質調査により地山の状態をトンネル全線にわたり詳細に把握することが困難な場合が多いためである。したがって、合理的なトンネルの設計・施工にとっては、事前設計を施工中に修正することが必要である。

施工により切羽やその付近で地山の状態を直接観測することが可能となり、また、トンネル掘削による地山や支保の挙動が確認できるようになる。実際に確認された地山の挙動を過去の類似の事例と照合したり、計測結果などを用いて逆解析をしたりして、適切に設計の修正などを行っていく必要がある。なお、施工中に地山の状態や挙動を把握するための、調査・観察および計測とその差眼点については、第Ⅲ編11章で述べたので、これを参考にされたい。

3-4 地質調査にもとづく地山評価の解析的手法

3-4-1 解析的手法一般

トンネル工事のための地山評価は、機械掘削とするか発破掘削とするか人力掘削とするか、NATMによる山岳工法にするかシールド工法にするか、開削工法とするか(第Ⅱ編表-5参照)など掘削方式や掘削工法あるいは支保パターンをどのように決定するかなど計画・設計・施工のためにきわめて重要な要素であり、これによって工事費や工期が決まる。

前節3-3で述べたように、岩石の分類方法は国内外を含めて各機関や学会および研究者によって目的とする構造物ごとにあるいは対象を特定しないものを含めて種々提案され、利用されている^{5)~7), 19), 22), 24)}。

分類要素は、トンネル工事を対象とした分類では前掲したようにいずれも地質調査結果を基本とした解析的手法を取り入れている。この解析的手法による現行の地山評価法は原則として当初設計に適用するものであり、適用するにあたっては十分な検討を行う必要がある。現実的には日本の地質が不均質で複雑であることから、後述

するように解析結果と実際の地山状況が合わない場合がしばしば見られることがあるので、施工中の計測結果や切羽の観察などによって逐次変更していくことが不可欠である。

とくに、膨張性地山などは過去の施工事例と各種岩石試験などから解析的手法によるいくつかの分類法が提案されている(第Ⅱ編表-17参照)。

3-4-2 NATMのための岩盤分類の解析的手法

わが国のトンネル対象の岩盤分類方法は、おおむね道路と鉄道、水路関係に大きく分けられる。そのうち道路と鉄道に限って記述するが、その分類はトンネルの標準工法をNATMとし、それに対応した地山分類を行っており、トンネルの適正な設計・施工へ反映させるように標準的な設計パターンを定めている。

(1) 道路トンネルの例⁹⁾

道路関係では、通常実施しうる調査法、試験法を用いて対象とするトンネルの全区間の地山性状について客観的かつ定量的な評価を行っている。

地山等級の区分は、硬質塊状岩盤、中硬質・軟質塊状岩盤、中硬質層状岩盤、軟質層状岩盤に分類されており、さらにそれらのグループごとに代表岩石名、弾性波速度、地山の状態(岩質、水による影響、不連続面の間隔、不連続面の状態、コアの状態・RQDおよび地山強度比)などを指標として等級分けをしている。また、これらの地山分類にあてはまらないほど地山が良好なものを地山等級A、劣悪なもの(内空変位200mm以上)を地山等級Eとしている。また、硬質(H)、中硬質(M)、軟質(L)の区分は、一軸圧縮強度で $H: 80N/mm^2$, $M: 20N/mm^2 \leq qu < 80N/mm^2$, $L: qu < 20N/mm^2$ としている。さらに、塊状、層状の区分について前者は「節理面が支配的な不連続面となるもの」、後者は「層理面あるいは片理面が支配的な不連続面となるもの」としている。なお、道路関係の地山分類表は、上記の評価項目から事前の地山評価のほかに施工中のトンネル切羽の地山評価にも用いられるようになっている。

また、近年ビニアウスキーのRMR (Rock Mass Rating)法をもとにして、切羽観察などによって得られる各種パラメーターから新地山評価法が研究され適用されている。

(2) 鉄道トンネルの例⁹⁾

一方、鉄道関係の地山等級の区分は、鉄道トンネルのNATMの施工実績について統計的な分析を行い、地山等級と実施工がなるべく整合するようにまとめられている。表-3のようにA, B, C岩種では弾性波速度によって等級分けし、ほとんど機械的に分類作業が可能である。D, E岩種は弾性波速度と地山強度比によって行い、F,

G岩種(土砂)では粘性土のF岩種は地山強度比、砂質土のG岩種は砂の相対密度と細粒分含有率によって行うものである。また、 I_s 、 I_L および特S、特Lについては地山の膨張性や切羽の自立性に関する区分であり、弾性波速度や地山強度比のみによっては判断できない場合の区分である。同表の地山分類基準を適用するにあたってはいくつかの注意事項がある。例えば、土かぶり(H)は $500m > H > 2D$ (D:トンネル幅)程度のトンネルの計画に適用するものとしているほか、幅の広い断層破砕帯、偏圧地形や偏圧を及ぼす地質の地山およびトンネル断面が著しく小さいか大きい場合、そして作業に支障する湧水がある場合あるいは水圧を設計に考慮しなければならない場合などについては十分検討のうえ適用するものとしている。また、軟岩のE岩種は新鮮な岩石の一軸圧縮強度がおおむね $20MN/m^2$ 以下のものとしている。そして砂質土と粘性土の区別は、前者が細粒分(粒径 $75\mu m$ 以下の土粒子)含有率が30%程度未満の土、後者が細粒分含有率が30%程度以上の土としている。

なお、鉄道関係の地山等級区分は事前調査により計画・設計を行うための支保パターンを決めるためのもので、施工中の支保パターンを決定するためのものではない。

3-4-3 地山評価の今後の方向

弾性波探査による調査法は、トンネル全体の地山状況を比較的容易に把握できる調査手法である(第Ⅲ編5-1-3)。そして、その結果得られる弾性波速度による岩盤分類法は有効な地山評価法であり、便利な数値である。しかしながら最近、弾性波速度による地山等級評価の予測と実際との乖離(とくに土かぶりが大きな地山において実際よりも良い地山と評価しがちである)が問題とされることが多くなってきている。このことから一部のトンネル技術者の中には弾性波探査に懐疑的な方もいるようである。

乖離がみられる原因は単純ではなく、以下の事項が相互に関係しあっているものといえる。

- ① 弾性波そのものが最短時間で地山中を伝播する初動をもとにするものであり、実際の地山よりも良好なものとして評価しやすい(第Ⅲ編6-3-3)。なぜならば、屈折法の原理から離れた地質構造などの場合(Ⅲ編5-1-4)、地質不良部よりもその近辺の地質良好部を伝わる波を初動として拾ってしまうからである。この逆に、電気探査では実際の地山よりも悪い方に評価しやすいともいえる(第Ⅲ編6-3-3)。
- ② 岩石の弾性波伝播速度は圧力を受けると速くなる傾向にある。したがって、同じ地質であっても、土かぶりが大きくなるほど地山の伝播速度は速くなる傾向にあり、この効果を考慮した評価をしなければ、

深部ほど良い地盤であるということになってしまう。

- ③ 弾性波探査にもとづく地山区分が作られた頃のトンネル工事の実態が現在とかなり異なっていることも考慮する必要がある。すなわち、当時の工法は矢板工法が標準の時代で、底設導坑や側壁導坑などを先進させ、地質を確認し、先行して水を抜くなどをしたうえで、上半断面の掘削や支保や覆工を行うのが一般的でありかつ土かぶりも今ほど大きなものが少ない時代であったといえる。前者に関しては、現在のNATMはいきなり上半断面などの大断面が最先端切羽にあるため、導坑などの露排的な要素をもった先進坑があった以前の工法に比較し、現在の工法の方が負担は大きいと考える(第Ⅲ編11-1)。後者に関しては当時のトンネルは200~300m程度の土かぶりを標準的に考えていたので、それよりも土かぶりの大きなトンネルに関しては、①に述べたような効果を配慮する必要性を本質的にもっていると考えるのが常識的である。

トンネル工事に係わる地質技術者やトンネル技術者はこれらの問題を無視することなく真摯に受け止め、あるべき姿を追求していくことが必要である。トンネル建設現場が、「トンネル製作工場」的なものになっていくとともに、アンタッチャブルなブラックボックスを経て出てくる測定結果や解析結果は、機械あるいはコンピューターが出した数字だから間違いないだろうという過信が生じ、原理・原則の枠組みへの無理解が誤った結論を出す可能性を否定できず、問題があるといった主張ともども謙虚になって対処すべき問題であると考えられる。

例えば、最近自然界に存在する表面波(レーリー波)のうち0.15Hz程度から15Hz程度までの微動を観測し、S波速度として解析し、これをP波速度に換算して利用する微動探査法が試みられている。この方法はS波で構造解析するので上部の速い地層の下部に遅い速度層が分布するような速度構造であっても原理上、測定・解析が可能であるので、より正確な地山状況を把握し、より実際に近い岩盤評価を行うことができる。ただし、この方法も万能ではなく、現在のところいくつかの制約がある。例えば、地形的な制約として急峻な山岳地帯であることや地形は急峻でなくとも山岳部の非常に静寂で自然界の微動の信号が少ないところなどでは適用が困難であること、また、弾性波探査と違って点の情報しか得られないなどの欠点がある。しかしながら、原理的には有望な探査法であると期待されている。

トンネルの計画や設計・施工で基本の一つとなる岩盤分類の解析的手法は、トンネルの施工法の高度化とともにここ数年の間に地質調査手法やコンピューターの著し

い発達により急速に進歩してきたが、まだまだその途上にあるように思われ、今後の研究課題としてさらなる技術開発が期待される。

他方、トンネル技術者は各種地質調査の必要性を認識するとともに一般に地質調査の絶対的な実施数量が少ないという現状や調査結果の限界をも十分念頭におき、同時に地質調査を調査屋に任せっぱなしにすることなく、その結果に理解を深め、設計・施工に反映させるという心構えが肝要である。

また、地質調査の担当者が、施工中あるいは施工後の調査結果のアフターケアを行っている例は少ない。換言すれば調査者は自分が行った調査結果がどの程度妥当であったかを検証する機会を与えられていないのが一般的である。調査技術の向上のためには事前の調査結果と実際の地山状況を比較し、以後の調査・解析技術の向上に役立てることが必要と思われる。こうしたことから今後は発注者側も調査者側から要請があれば現場見学や施工時の資料の提供を惜しむことなく協力する姿勢が必要と考える。このような体制づくりが地山評価などの地質調査技術や調査精度の向上に結びつくものと思われる。

4. 調査の成果

4-1 調査成果一般

調査成果は、その目的を十分理解し、地山条件や立地条件など各種の調査、試験結果や新たに生じた問題などを総合的に判断したうえで必要な様式に取りまとめ、工事の各段階で活用できるように整理・保管しておく必要がある。

成果をまとめる際の留意点としては、調査成果は調査により得られた事実とその情報量の多少により、また一部想定によるものが含まれるなど合成されたものとなるので全体として精度が異なる。さらに、ある場合には2通り以上の想定がなされる場合がある。したがって、施工計画を立てるうえで想定による不確実性が大きな問題となるのであれば、これにもとづく解釈を明確に区別して記述するとともに、残された問題点を明示し、追加の調査の必要性を明記し、以後の方針を明らかにしておくことが肝要である。

かつて青函トンネルでは4回の異常大出水を生じ、工事費や工期に大きな影響を与えた。後日、4回の異常大出水はすべて断層に起因していることがわかった。しかもこれらの断層のうち3回はいずれも正断層であったことは注目に値する。他の1回は安山岩の貫入岩の存在など切羽の地質状況が複雑であったため正断層か逆断層かは定かではなかった。さらに特筆すべきはこれらの断層については長年の事前調査にもかかわらず、断層の存在

をあらかじめ把握することができなかったことである。ちなみに施工後、それらの断層が存在するという目で事前調査の資料を改めて調べてみたが、やはり断層があるという兆候を確認することはできなかった。

事前調査で最初から存在を把握していた他のいくつかの断層では結果として一度も異常大出水などのトラブルを生じることがなかった。このことは事前に切羽前方の地質状況がわかっている場合とそうでない場合の施工時の対応に雲泥の差があることを如実に物語っている代表例であるといえる。

調査の成果は、計画、路線選定、設計・施工など調査を実施した時点からトンネル供用後までの一連の経過段階で担当する技術者が異なることが多いので、それぞれの段階での有効利用に備えて整理・保管することが望ましい。

整理・保管にあたっては、調査の成果を利用しやすくするためできるだけ図表化、数値化するなどの配慮が必要である。とくに、大規模で長期にわたる調査の場合は、個々の調査が適当に累積された時点で「中間報告書」や「総合報告書」などの形に整理しておくのがよい。成果物の形としては、最近では製本による報告書のほかパソコンなどの電子メディアを多く使用するようになってきており、CD-ROMやMOそしてフロッピーディスクなどの電子媒体に収録して提出を義務づけているところも出てきている。この方法であれば保管スペースの縮小化や検索の高速化など合理的に行うことができる。

また、調査成果の整理は、各調査項目ごとの結果を単に記録しておくだけでなく、調査の種類や段階ごとに得られる調査精度にもとづく総合的な評価を併せて取りまとめる必要がある。

例えば、地山条件調査では地質分布や地質構造を示す地質断面図が作成されるが地質図のほかに記事欄に距離程、地層名、岩石の種類、弾性波速度、岩石の一軸圧縮強度、地山強度比、割れ目などの亀裂の状態、湧水状況、膨張性など各種の調査結果を記入し、これにもとづく地山等級を併記した成果物が多く用いられている。この断面図は単に調査結果による事実を示すだけでなく、トンネル全体の掘削工法、掘削方式、施工パターンなど施工計画を策定するのに利用されやすいように、工学的観点からまとめたものでなければならない。例えば、分布する地質が凝灰角礫岩であっても礫の大きさ、硬さ、割合、基質部(礫でない部分)の固結状態などがわかるように記載する必要がある。また、同じ地質でも土かぶりに応じて土圧現象、湧水状況が異なるため注意を要する。

各種の岩石試験の試験値などは局所的なものであることが多く、この試験値がトンネル周辺全体を代表するも

のかどうか十分検討したうえで、地山全体としての評価を行わなければならない。試験結果の物性値を設計などに用いる場合にも他の調査結果と矛盾しないことを確かめておく必要がある。また、試験結果はばらつきを持つのが当然であり、そのばらつきの中から適宜代表値を定めなければならない。

同様に立地条件調査についても、トンネル工事の実施により自然環境、社会環境および生活環境などに問題が発生することがある。それゆえ工事および施設の使用によって環境が受ける影響を最小限にとどめ、環境に調和した設計・施工をするためトンネルの計画路線を包含する適正な範囲について環境保全に関する調査を行う必要がある。以下、地山条件調査結果と立地条件調査結果の整理と利用について記述する。

4-2 地山条件調査結果の整理と利用

地山条件調査結果の整理は、地表踏査やボーリング、各種試験結果を総合的に判断し、トンネルの断面や用途の目的に応じて一般事項、特記事項および地山分類を適切に行うための必要事項を整理する。また、調査結果の利用は、トンネル地山の工学的な特性を明らかにして、適切に地山評価を行うことである。下記に地山調査結果の概要を述べる。

4-2-1 地山条件調査結果の整理

地山条件調査結果の整理は、トンネルの断面形状、掘削工法、掘削方式および補助工法を決定するために、的

確に整理する必要がある。とくに、事前調査や設計段階では、建設費用や工期を左右するため、施工時に大幅な変更が生じないように注意する必要がある。維持管理段階などでは地山条件を前述のような記録媒体に確保し、変状や湧水などの原因を判断できるようなデータベース化が望まれる。

(1) 一般事項

トンネルの設計や施工中の補助工法などの対策あるいは維持管理段階での変状原因の推定のため、一般事項として下記の基本事項を整理する。

- ① 調査目的、調査場所、調査範囲、調査方法、調査担当
- ② 地形・地質概要、地質構造
- ③ 地質平面図：地質構造を考慮し、地質区分を行う。縮尺は1/5,000~1/1,000程度とし、地すべり、砂防指定地、崩壊地、湧水地点、露頭位置、地層の走向・傾斜などの踏査結果やボーリングの実施位置などを記入する。
- ④ 地質断面図：地質構造、地質分布、トンネル設計・施工上の問題点、弾性波、比抵抗値、ボーリング柱状、原位置試験位置と結果、試料採取位置、坑内検層結果などを記入する。
- ⑤ トンネル中心線に沿った地質断面図(図-4²³参照)を作成する。地質断面図の情報に加え、トンネル計画高さの地質分布、RQD、弾性波速度、地山強度

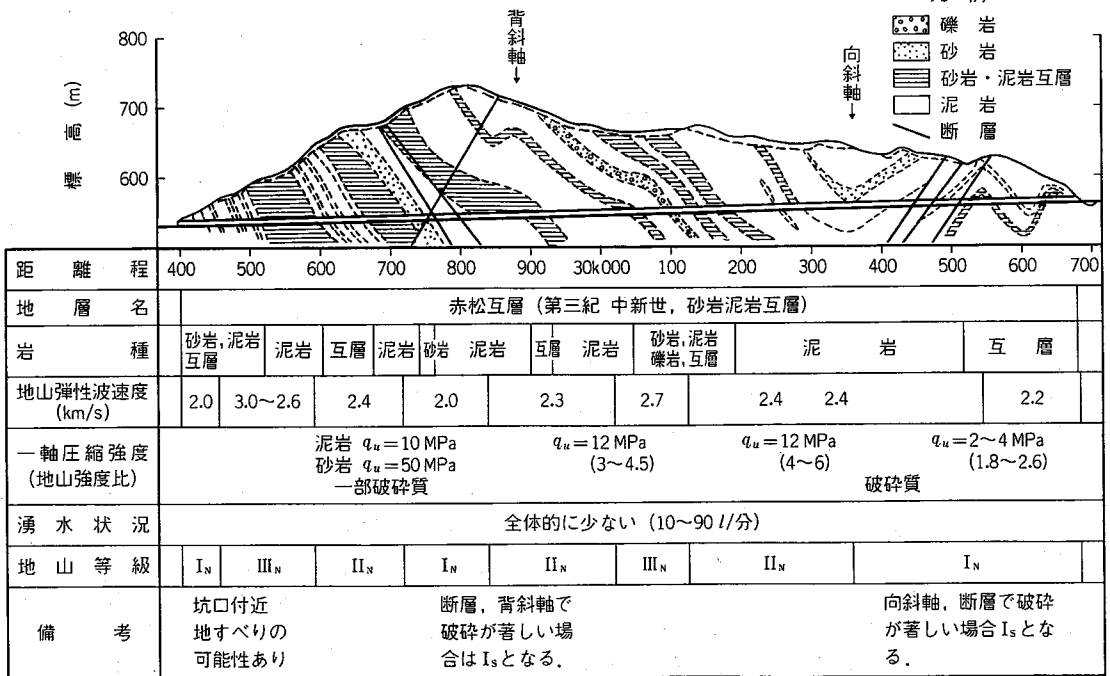


図-4 地質縦断面図の例²³⁾

および地山強度比、湧水の有無、地山分類について1/5,000~1/1,000程度で図示し、坑口などは1/500~1/100などの詳細な断面図とし、トンネルの坑口形状やのり面処理、基礎構造の検討を行うための基礎資料とする。

(2) 地山分類

地山分類は3-4-2に示したように鉄道や道路で弾性波、地質、層相(塊状、層状)、地山の状態(湧水状況、不連続面の状況など)、RQD、地山強度比などによって、ボーリング結果や試験結果を総合して判断される。

3-4-3において地山分類と実際の施工の結果の乖離について示したが、経験的に言えば中古生層などの古い岩盤が弾性波速度の割には地山の自立性が悪い場合が多いことがある。筆者は三波川変成帯の黒色片岩で弾性波速度4 km/sec以上の地質が容易にピックハンマーでの掘削が可能で、大きな沈下と壁面変位を生じるのを目のあたりにした。片理面は流れ盤で、強度にせん断抵抗角を見込むことが難しいような地質であった。このような点に配慮して剥離性の著しい中古生層の地質について支保パターンを1~3ランク下げて施工せざるを得ない例について指摘⁹⁾があり、調査の制約などから強度の推定や不連続面の強度への影響評価が困難な場合、地質技術者はこうした点に十分配慮して地山分類を行う必要がある。とくに、鋼製支保工の要否や掘削間隔など切羽の自立性に留意する。なお、この問題の背景にⅢ編11-1で指摘した以前の工法と今の工法による差がありうることも考慮しておく必要がある。

(3) 特記事項

路線の選定や設計・施工にあたって留意すべき地山条件(第Ⅱ編1-1(1)参照)について特記し、設計・施工に充分反映されるようにする。図-4の備考に示すような地すべりや断層などの記述は具体的かつ設計・施工上の対応をまとめる必要がある。

4-2-2 地山条件調査結果の利用

地山条件調査結果を利用し、適切な地山評価を行う。地山評価の位置付けは、図-3²³⁾に示すように当初設計において設計の手法や標準パターンを決定するほか、施工結果をフィードバックして適宜見直しを行うものである。地山評価は定性的な評価と数値解析などによる評価ならびに地山分類(3-4-3参照)がある。

定性的な評価には、類似地山や近隣の施工例の分析のほか、特殊地山における流動化ならびに膨張性に関する指標があり、それぞれ第Ⅱ編表-17、21²³⁾に示したとおりである。また、近接施工などの影響についての定性的な評価は第Ⅲ編13-1-2を参照されたい。近接条件が複雑な場合は数値解析手法を使用する場合もある。さらに、

最近では切羽の安定性の評価として地山の粘着力とトンネル直径および単位体積重量の比 $c/\gamma D$ (c :地山の粘着力、 γ :単位体積重量、 D :トンネル径)による簡易判定法が提案²⁶⁾されており、岩井²⁷⁾や足立²⁸⁾はその有効性を指摘している。

数値解析は地山の物性値を用いて行う理論解析や離散化モデルによる解析がある。理論解は壁面変位、塑性領域、地表面沈下を概略想定するには簡易で利便性のある方法である。有限要素法などの解析は複雑な掘削工程や近接施工の影響把握には現状では有効な方法である。数値解析は複雑な地山の弾性・塑性の挙動や実際には不連続な岩盤を理想化したものであるため、入力物性値の選定や解析結果の利用には留意する必要がある。

4-3 立地条件調査結果の整理と利用

立地条件調査結果は、工事の計画や設計・施工法に充分反映する必要がある。

公園や砂防などの指定地は路線選定のコントロールポイントになることや地質環境として油田・ガス田地域、金属鉱床跡などは工事の計画に充分な検討を要する。トンネル周辺の環境が地盤沈下あるいは地下水対策などの補助工法や周辺環境対策に大きく影響するほか、補償問題の発生やその規模を確定するための継続的な調査・計測の実施にも配慮する必要がある。とくに水文問題は第Ⅲ編12章を参照のうえ、基礎データの施工前から施工後に至るまでの適切な観測を行うことが重要である。

環境問題では土壌汚染や水質汚染問題などにより、工事により発生しつづるの適正な処理のほか、リサイクルの促進を行うための建設副産物の有効利用にも留意する必要がある。また、近年では、工事区域に隣接して動植物の貴重種が生息する場合には、生息域の水面の保全や猛禽類の棲息域の確保といった問題も生じる。

(文責: 蝦名克彦・日本鉄道建設公団設計技術室補佐/神藤健一・前田建設工業(株)技術研究所部長/水野敏実・応用地質(株)技術本部岩盤技術部副部长)

参 考 文 献

- 1) 池田和彦・大島洋志:「トンネル技術者のための地質学入門」, 土木工学社, 1997.5.
- 2) 吉中龍之進・桜井春輔・菊地宏吉:「岩盤分類とその適用」, 土木工学社, 1989.7.
- 3) 農林水産省:土地改良事業計画基準, 農林省構造改善局, pp.25-30, 1975.
- 4) 社団法人日本道路協会:道路トンネル技術基準(構造編)・同解説, pp.72-77, 1989.
- 5) 日本道路公団:設計要領第三集トンネル, pp.66-74, 1997.
- 6) 日本鉄道建設公団:NATM設計施工指針, 平成8年2月
- 7) 水資源開発公団:水路工設計指針, 1971.
- 8) 日本河川協会編:建設省河川砂防技術基準(案)・計画編,

- 日本河川協会, 1977.
- 9) 建設省: 建設省河川砂防技術基準(案)調査編, 山海堂, pp.469-470, 1976.
 - 10) 田中治雄: 土木技術者のための地質学入門, 山海堂, pp.34-36, 1964.
 - 11) 全国治水砂防協会(建設省河川局砂防部監修): 急傾斜地崩壊防止工事技術指針, 全国治水砂防協会, pp.41-42, 1982.
 - 12) 社団法人日本道路協会: 土質調査指針, 道路土工, pp.294-297, 1986.
 - 13) 社団法人日本道路協会: のり面工・斜面安定工指針, 道路土工, pp.137-155, 1999.
 - 14) 鉄道総合技術研究所編(運輸省鉄道局監修): 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, pp.79-83, 1992.
 - 15) 電源開発(株): 岩盤分類・評価について(案), 1987.
 - 16) 菊地宏吉・斎藤和雄・ほか: 耐荷性を対象とした岩盤分級基準の提案, 第9回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.66-70, 1976.
 - 17) 水資源開発公団: ダム設計指針, 1981.
 - 18) 本州・四国連絡橋公団: 風化花崗岩の支持特性判定要領(案), pp.96-101, 1980.
 - 19) 土質工学会(岩の力学委員会): 岩の工学的性質と設計・施工への応用, 土質工学会, pp.353-360, 1969.
 - 20) ISRM(1978)岩の力学連合会: ISRM 指針岩盤不連続面の定量的記載法, 日本語訳(1985年11月).
 - 21) Onodara, T. Dynayus investigation of foundation roos in-situ.P.
 - 22) 池田和彦: トンネルの岩盤強度分数, 鉄研究報告, No.695 1969.
 - 23) 土木学会: トンネル標準分書(山岳編)・同解説1996.7.
 - 24) 日本応用地質学会: 岩盤分類「応用地質」特別号, 1984.8.
 - 25) 近藤達敏: 地質調査の不確実性とトンネル工事のリスク要因評価, 応用地質, 日本応用地質学会, 第40巻6号, pp.340-345.
 - 26) 真下英人・猪熊 明: トンネル切羽の安定性評価に関する遠心力模型実験, トンネル工学研究論文報告集, 第5巻, pp.117-122, 平成7年11月.
 - 27) 岩井勝彦・中田雅博・矢野 寛: トンネル切羽安定性の評価手法に関する一考察, トンネルと地下, No.3, Vol.29, 1998.3.
 - 28) 田村 武・足立紀尚・小西真治・辻 鉄也: 剛塑性有限要素法によるトンネル切羽の安定性評価について, 土木学会論文集, NO.638/Ⅲ-49, pp.301~310, 1999.12.

シールドトンネルの新技術

シールドトンネルの新技術研究会編 代表 鈴木 章

B5判 289頁 本体価格4,660円 円380円

本書は、最近のシールドトンネルの新技術を実務経験者を中心にまとめたものである。本書の特色は、シールド工法の変遷と将来の技術開発の方向性の現況をまとめたうえで、新技術について調査・計画編、設計・施工編とに分けて、その理論と実際についてソフト、ハードにわたり記載している。また、これらのことを実務にすぐさま活用できるように、付録としてセグメントの設計、地盤変位予測解析、施工計画についての計画・設計例も紹介し、実務者をはじめトンネル技術者のニーズに応えた内容となっている。

〔目次〕第一章 概説 1. シールド工法の変遷と将来の技術開発の方向性○シールド工法の歴史○シールド工法誕生以前のトンネル工法○シールド工法の登場 2. わが国におけるシールド工法の歴史○シールド工法の導入と発展の経緯○シールド工法の現況 3. 今後の技術開発の方向性 第二章 調査・計画編 1. シールド工法の調査技術 2. 断面および線形計画 3. シールド機種の種類と選定 4. 新しいシールド工法 第三章 設計・施工編 1. 覆工○一次覆工の設計○二次覆工の設計と施工○シールドトンネルの防水技術 2. 立坑の設計と施工設備○立坑の設計と施工○シールド機の構造と装備○仮設備の計画○シールド工事による自動化 3. 掘進と施工管理○シールド掘進と施工管理○シールド発進と到達○裏込め注入工法と注入効果○曲線施工と地中接合○補助工法の種類と選定 4. 近接施工と環境対策○近接施工と対策○アンダーピニングおよび支障物対策○シールド工事と環境対策○新工法の現状と将来展望○ECL工法 5. 切羽の安定と地盤変位防止○切羽安定の理論と実際○泥水式シールド工法の切羽安定○土圧シールド工法の切羽安定 6. 地盤変位の理論と実際 付録 1. セグメントの設計例 2. 地盤変位予測解析手法の例 3. シールド工事の施工計画

 株式会社 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03) 3267-2888 (代) 振替 00110-8-190072

連載講座

都市部でのシールド立坑に係わる新技術(12)

発進・中間・到達部の防護方法と実施例(2)

「都市部でのシールド立坑に係わる新技術」
連載講座小委員会特殊モルタル置換による
大深度シールド発進防護工

1. はじめに

シールド工事における発進は、施工上かなり重要な位置を占め、その方法については過去において数多くの施工例が示されている。最近ではシールドトンネルを大深度に設置し、かつ大型化する傾向にあり、発進のための防護工としての補助工法の進歩も著しい。現在ではより強度が強く、確実性の高い、しかも深度の大きい場所でも施工可能な工法へと進んできており、以前では薬液注入工法が主体であったものが、高圧噴射注入工法や凍結工法などの採用が増え、より安全な施工方法へと変わってきている。

ここで紹介する特殊モルタル置換による大深度シールド発進防護工は、注入工法による地盤改良に代わって、防護部を地上から直接掘削し、特殊モルタルによって全置換する工法であり、発進の形態としては、切羽地山の自立を図り、自立した切羽にシールド機を貫入させていく方法である。

2. 施工事例

本工事は、川崎市下水道事業にもとづき当地区の浸水対策を主目的として新設される「渋川雨水貯留管」のシールド(掘削外径 $\phi 12,340\text{mm}$ 泥水式)発進部の防護工である。シールド発進防護工には一般的に注入工法による地盤改良や凍結工法が多く用いられるが、当工事の場合は、大深度施工による注入効果の不確実性や、発進部(泥岩と細砂の互層)凍結による凍土圧の立坑への影響などの問題がある。そこで安全性、経済性、施工ヤード、工程などを考慮し検討した結果、地中連続壁工で用いる掘削機により防護部を地上から掘削し、水中においても材料分離を起こさず、かつ材齢2年での圧縮強度が $9.8\text{N}/\text{mm}^2$ となる特殊モルタルを開発し、発進部を全置換する工法を

採用した。ここでは、その施工方法、置換材料に使用した低強度・水中不分離性モルタル、上部埋め戻しに採用した泥水固化工法、およびシールド発進状況について記述する。

2-1 工事概要

工事件名：渋川雨水貯留管その1-4工事

工事場所：神奈川県川崎市幸区矢上

工期：1994(H6).1~1994(H6).12

発注者名：川崎市建設局

施工者名：大成・前田・フジタ・東急・白石・淺沼建設共同企業体

2-2 工事数量

シールド機外径： $\phi 12,340\text{mm}$ (泥水式)

掘削深度：59.12m

改良幅：19.6m

改良長さ：5.7m

エレメント数：7エレメント

水中不分離性モルタル： $3,102\text{m}^3$

泥水固化： $6,349\text{m}^3$

掘削機(EM320)：1基

エレメント割り付け平面図を図-1に、断面図を図-2に示す。エレメントの平面割り付けは、防護部改良体と

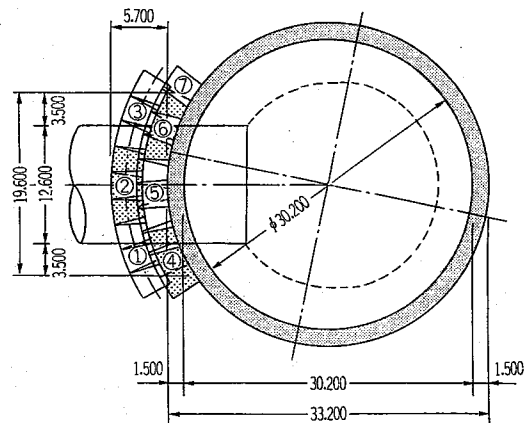


図-1 エレメント割り付け平面図