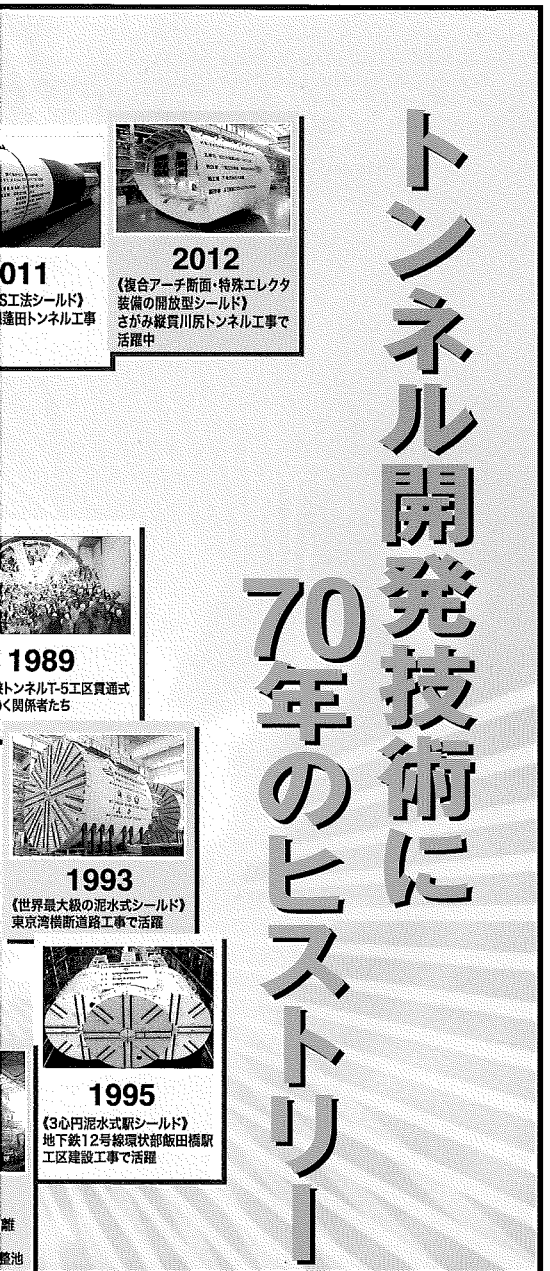
都新宿区岩戸町16番地メイジャー神楽坂



成24年4月1日発行(毎月1回1日発行)　第43巻第4号　通巻500号　ISSN 0285-631X

トンネルと地下 4

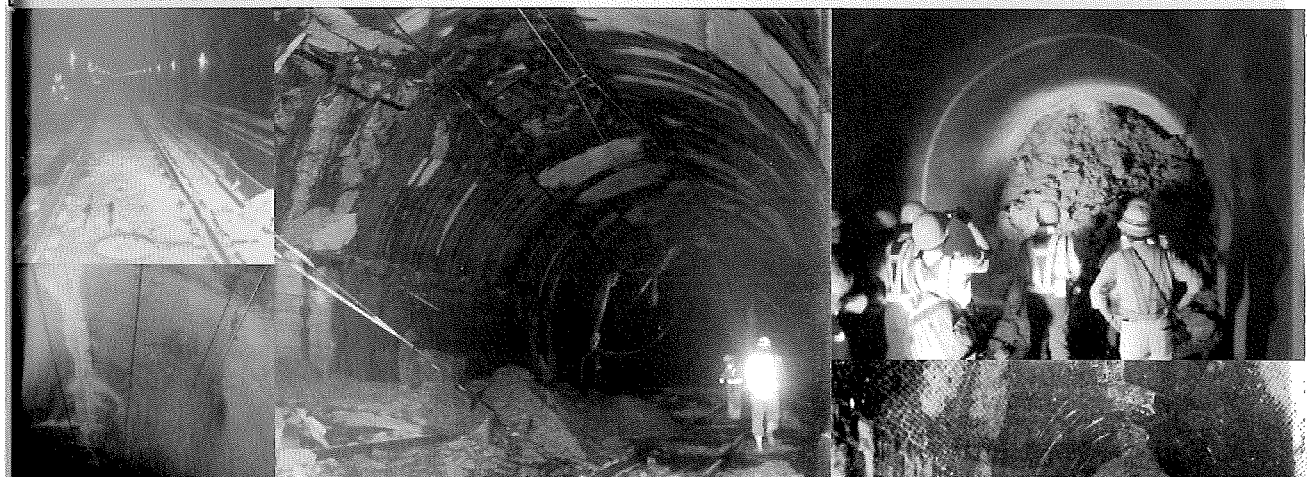
vol. 43
no. 4
2012

Tunnels and Underground

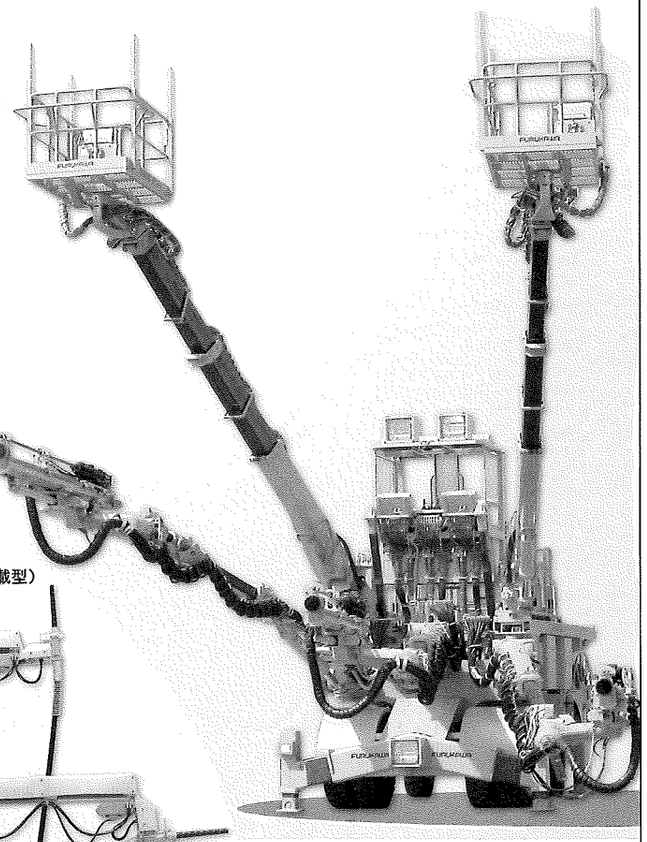
創刊500号記念特集「地震とトンネル」

トンネル，地震と断層と
地震と都市地下施設の整備
地震とトンネル
地震時における山岳トンネルの挙動に関する基礎的研究
JR東日本におけるトンネル地震被害の事例
中越沖地震による高速道路トンネルの被災事例分析
東京メトロにおける地震への取組み
首都東京の下水道管路の耐震性向上の取組み
座談会「トンネル千思万考」

日本トンネル技術協会誌



様々なトンネル工事に挑戦し、実績を積み重ねてきた各種製品と全国に広がる安心のサービス網でお客様をバックアップします。

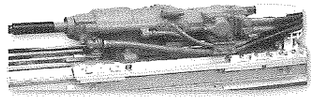


ホイール式ドリルジャンボ

JTH2200R/JTH3200R

新幹線・道路・水路等の全断面および補助ベンチ工法のトンネルさく孔に威力を発揮します。

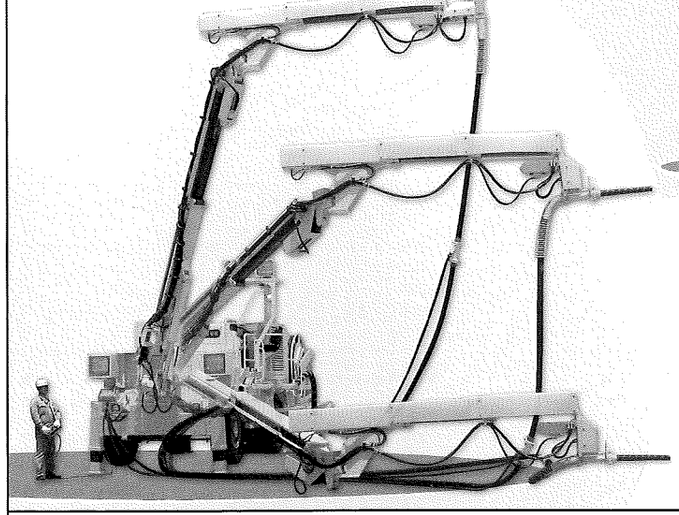
新世代型油圧ドリフタHD210Ⅱ搭載。



◆主な仕様	JTH2200R 2ブーム、2ケージ	JTH3200R 3ブーム、2ケージ
質　量	35.5 ton	43 ton
全　長	14,270 mm	14,760 mm
全　幅	2,690 mm	3,140 mm
全　高	4,000 mm	4,190 mm
水平さく孔範囲		
幅	12,770 mm	13,220 mm
高　さ	8,490 mm	8,840 mm

自走式コンクリート吹付機(コンプレッサ搭載型)

CJM2200E-Ⅲ



◆CJM2200E-Ⅲ　主な仕様

質　量	24 ton
全　長	15,600 mm
全　幅	3,000 mm
全　高	4,000 mm
水平さく孔範囲	
幅 × 高 さ	13.3m x 10 m

自走式キャリアに、コンクリートポンプ、急結剤供給装置、コンプレッサ、高圧水ポンプ等、吹付け作業に必要な装置を搭載したコンパクトな一体型コンクリート吹付け機です。

古河機械金属グループ
FRD FURUKAWA 古河ロックドリル株式会社
www.furukawarockdrill.co.jp
本　社　〒103-0027　東京都中央区日本橋一丁目5番3号　特機部　☎03(3231)6966
札幌支店☎011-861-3261　東北支店☎022-384-8991　関東支店☎027-326-9611　名古屋支店☎0568-77-7700
関西支店☎06-6475-8221　広　島☎082-832-3542　九　州☎092-948-2010

長尺鋼管切羽補強工　高付着型長尺鋼管切羽補強工

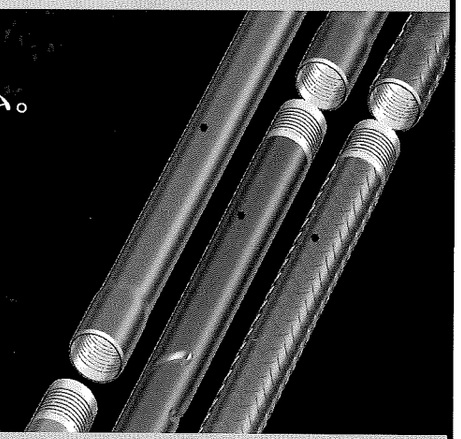
Me 工法 Metal eco

特許第3882118号
NETIS 番号:KT-080027

Me fix Metal eco

エコロジー&地山拘束効果。新しい長尺鋼管切羽補強システム。





特徴①　分別回収による鋼材のリサイクル化

「Me 工法」の切除管は、掘削時に鋼管と注入材を分別回収できる構造で、鋼管のリサイクルが図れます。

特徴②　接続部拡径（ソケット方式）により鋼管の薄肉化

「Me 工法」は接続部拡径によりネジ部耐力の増強を図り、小口径薄肉鋼管(Φ76.3×4.2～4.5 ㎜)の使用を可能とし、軽量化に伴い経済性、施工性が向上します。

特徴③　長尺鋼管切羽補強工の付着耐力の向上

「Me-fix」はこれまでの鋼管による切羽補強工の弱点であった付着耐力の向上を図り、確実な地山拘束力が期待できる長尺鋼管切羽補強工です。適用条件によって「type A」、「type B」の選択が可能です。

		Me	Me-fix (typeA)	Me-fix (typeB)
形状		φ 76.3 (t=4.2)	φ 76.3 (t=4.2)	φ 76.3 (t=4.5)
概要図				
付着耐力 (kN/m)	プレミックスモルタル	50	150	500 以上
	ウレタン	75	100	250
	シリカレジン	25	50	130

※付着耐力は室内試験結果。プレミックスモルタルは材令24hr(qu≒12N/mm²)
ウレタン:4倍発泡(qu:5±0.5N/mm²)、シリカレジン:3倍発泡(qu:4+1.0/−0.6N/mm²)



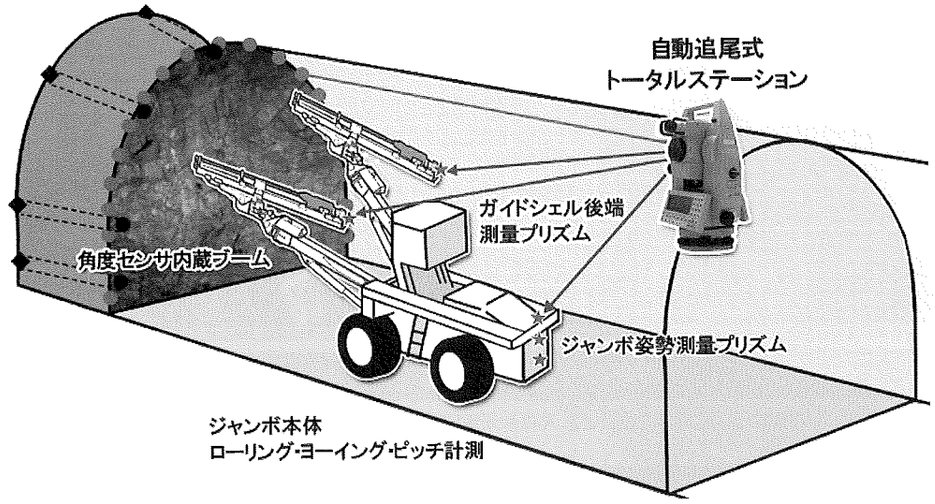
KFC 株式会社 ケー・エフ・シー
東京土木営業部:東京都江東区青海2丁目4番32号　TEL 03−3570−5223
大阪土木営業部:大阪市北区西天満3丁目2−17　TEL 06−6363−1884
技術部　:東京都江東区青海2丁目4番32号　TEL 03−3570−5186

NETIS登録番号:KK-100049-A

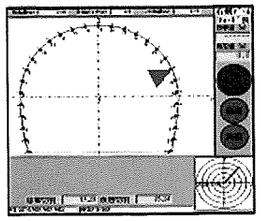
自動追尾式余掘り低減システム

国土交通省　公共工事等における新技術活用システム『NETIS』に登録。

自動追尾式測量器(トータルステーション)との連動により、外周装薬孔の高精度さく孔を可能にしました。余掘量の低減に効果を発揮し、余吹き・覆工コンクリート量を低減することが可能です。



■ディスプレイ表示



さく孔位置・さし角表示

1. 最も重要な外周孔(追尾視準範囲)に限定することにより、従来のナビゲーションと比較し低コストを実現しました。
2. ガイドシェルの後端のターゲットを自動追尾することにより常に高い精度を得る事ができます。
3. 自動測量により本体セットアップが簡単に行なえます。
4. 操作方法が簡単でオペレータへの特別な教育を必要としません。

多数の採用実績および余掘り低減の実績を有する本システムのご用命は

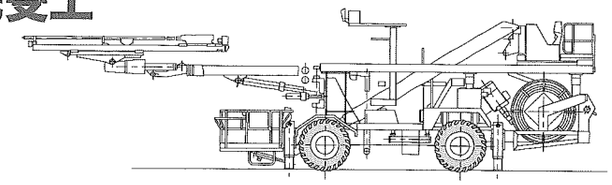
MAC マック 株式会社
〒272-0832　千葉県市川市曽谷8-16-3
TEL:047-371-3191　FAX:047-371-3190

FRD FURUKAWA 古河機械金属グループ 古河ロックドリル株式会社
〒103-0027　東京都中央区日本橋1-5-3
特機部
TEL:03-3231-6966　FAX:03-3231-6993

環境対応型長尺鋼管先受工

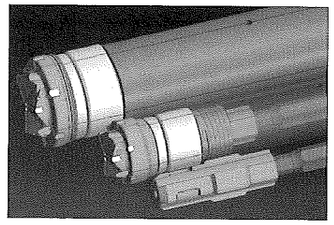
TOHO AGF System

All Graund Fastening;
Long-Distance,.Fore-Pilling Method

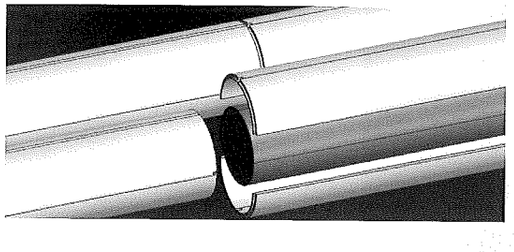


AGF-Me工法

- トンネル掘削時に露出した端末管を容易に切除可能
- 硬化注入材と鋼管を容易に分別処理して、鋼管はリサイクルへ
- 豊富なサイズ、114.3mm・101.6mm・76.3mm・60.5mm



最後端部に接続される鋼管は、縦貫通スリット管を用いることにより、掘削時に露出した鋼管を折り曲げ除去するだけで、内部の硬化した注入材と鋼管とを分離して、分別処理を簡便に行えるようにした環境対応型長尺鋼管先受工です。



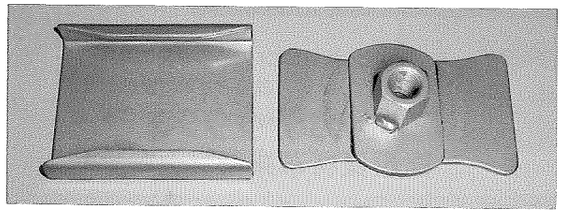


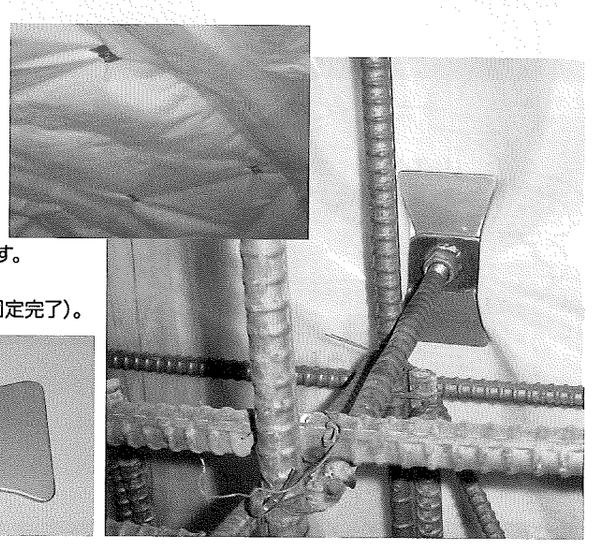
防水シート非貫通型鉄筋吊り金具

TKグリッパー

- 防水シートへの穴あけ不要
- 一人で容易に取り付けが可能
- 外れ防止機構付き、施工後の高い安全性

固定方法は3ステップ
1. 支保工へ溶接したグリップに防水シートを当てます。
2. 回転プレートを押し込みます。
3. ナットを回し、止め位置まで90度右回転します(固定完了)。





㈱東邦金属株式会社　東京営業部
TOHO KINZOKU Co., LTD
〒107-0052
東京都港区赤坂2-19-8　赤坂２丁目アネックス６Ｆ
Tel: 03-5545-7900　Fax: 03-5545-7905
URL:http://www.tohokinzoku.co.jp

株式会社 トーキンオール
〒210-0854
神奈川県川崎市川崎区浅野町4-11
Tel:**044-333-0012**　Fax:**044-333-0321**
(お問い合わせ先)

パターンボルトのGRP化

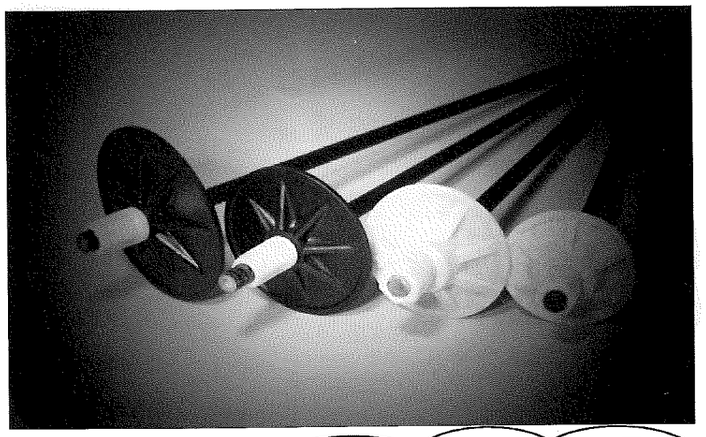
POWERTHREAD

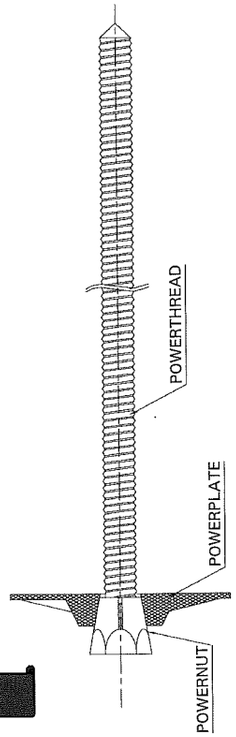
FiReP® Fiber Reinforced Polymer

耐食機能に優れるロックボルト

POWERTHREADは，POWERNUT/POWERPLATEを組み合わせることにより，
全てGRP製に！！

※ GRPとは，Glassfiber Reinforced Plastic
(ガラス繊維強化プラスチック)の略.





- 棒鋼型ロックボルトと同等の耐力を有する.
- 軽量である.
- 腐食しない．錆びない.
- 導電しない．耐電しない.
- 製造過程でのCO_2排出量が少ない.

環境にやさしいロックボルトシステム

KATECS

株式会社 カテックス
建設資材事業部

ホームページ http://www.katecs.co.jp/

技術営業部
TEL)052-331-8821 FAX)052-332-0164

東京支店
TEL)03-3260-8321 FAX)03-3266-1648

九州営業所
TEL)092-574-0856 FAX)092-574-0846

中部営業部
TEL)052-331-8821 FAX)052-332-0164

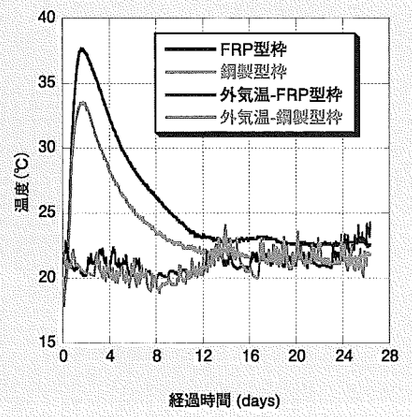
関西営業所
TEL)06-6578-3235 FAX)06-6578-3237

北海道地区(㈱エイチ・アール・オー)
TEL)011-821-5868 FAX)011-821-6644

覆工コンクリート革命

◎型枠脱型時の強度が15～20%向上
⇒コンクリート剥離の低減

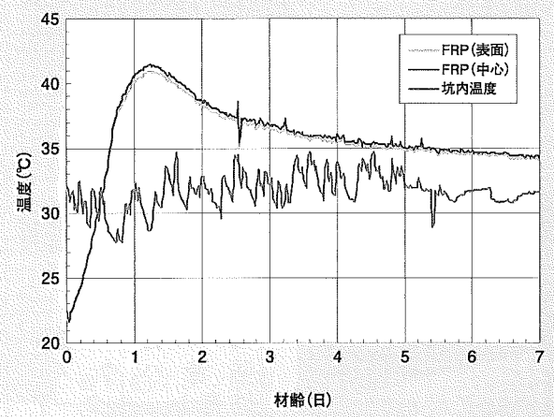
[宮崎大学との共同研究により、㈱フジタ 古江トンネル南にて測定]



■覆工コンクリート温度の比較

◎コンクリート中心温度と型枠背面の温度差が1～2℃
⇒温度ひずみによるクラック低減

[㈱フジタJV宮崎県野地トンネルにて計測]



■コンクリート中心温度と型枠背面の温度差

特 徴

1. すぐれた断熱効果により、保温養生を実現(鋼製型枠に対し熱伝導率1／150以下)
2. 外気の温度変化に対する影響が少なく、寒冷地でも最適
3. 剥離性がよく、ケレン作業が低減

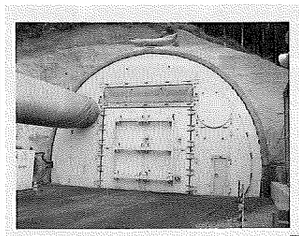
保温養生FRPセントル ハイパーフォームG



MKE 株式会社 エムケーエンジニアリング

■ 本　　社　〒553-0006　大阪市福島区吉野1-20-30 阪神野田駅前ビル　TEL:06-6443-7060
■ 九州営業所　〒812-0011　福岡市博多区博多駅前2丁目20番1号　TEL:092-409-8008
■ 指定工場　〒919-0441　福井県坂井市春江町定重(森本工業)　TEL:0776-51-2410

快適な作業環境を提供する騒音対策システム
～25年の実績が最大級の安心をご提供いたします～



【防　　音　　扉】

『防音扉マークⅡ』の音響性能

対　策	騒音レベル	低周波音圧レベル
1基設置	18 dB(A)	13 dB
2基設置	28 dB(A)	19 dB

『防音扉マークⅡ10s』の音響性能

対　策	騒音レベル	低周波音圧レベル
1基設置	19 dB(A)	16 dB
2基設置	29 dB(A)	25 dB

『防音扉マークⅡ10c』の音響性能

対　策	騒音レベル	低周波音圧レベル
1基設置	19 dB(A)	20 dB
2基設置	29 dB(A)	33 dB

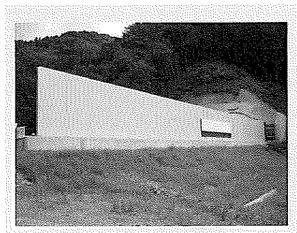
『防音扉マークⅡ15c』の音響性能

対　策	騒音レベル	低周波音圧レベル
1基設置	21 dB(A)	23 dB
2基設置	30 dB(A)	36 dB

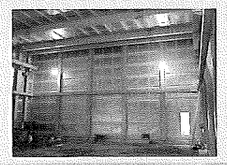
HFS型　マ　ー　ク　Ⅱ
HFS型　マークⅡ10s
HFS型　マークⅡ10c
HFS型　マークⅡ15c

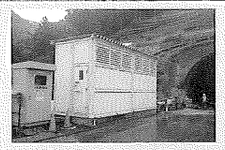


防音扉には生産物賠償責任保険(対人)が付いております。



【防　　音　　壁】
【防 音 ハ ウ ス】
【防音シェルター】
【防 音 ボ ッ ク ス】



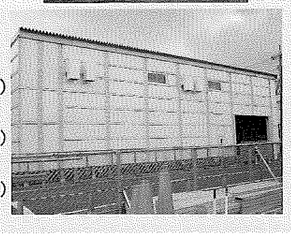


『防音パネルSタイプ』の音響性能

項　目	1/1オクターブバンド中心周波数【Hz】					
	125	250	500	1k	2k	4k
透過損失【dB】	14	18	29	36	43	49
吸音率【%】	33	80	89	84	81	76

『防音パネルDタイプ』の音響性能

項　目	125	250	500	1k	2k	4k
透過損失【dB】	22	32	37	38	37	43
吸音率【%】	51	77	75	81	71	62



『防音パネルHタイプ』の音響性能

項　目	125	250	500	1k	2k	4k
透過損失【dB】	32	32	38	46	50	53
吸音率【%】	57	48	61	76	86	91

Sタイプ(スタンダードタイプ)
Dタイプ(デラックスタイプ)
Hタイプ(ハイデラックスタイプ)

【建設騒音対策協会】

株式会社 牛尾商店　　株式会社 カテックス　　株式会社 ティーエムシー　　日豊 株式会社
株式会社 野佐和商会　　株式会社 ピーエスアイ　　古河ロックドリル 株式会社

E-mail：souon@fuse-ind.co.jp

◆防音設備の設計、製造、施工、リース
◆建設業登録　東京都知事 許可　般－２０　第１３０１５３号

株式会社ヒューズ

□本　　社　〒132-0035　東京都江戸川区平井 6-35-5　TEL. 03-3617-8111　FAX. 03-3617-7565
□大阪営業所　〒531-0072　大阪府大阪市北区豊崎 3-4-14 ショーレイビル　TEL. 06-6359-2611　FAX. 06-6359-2288

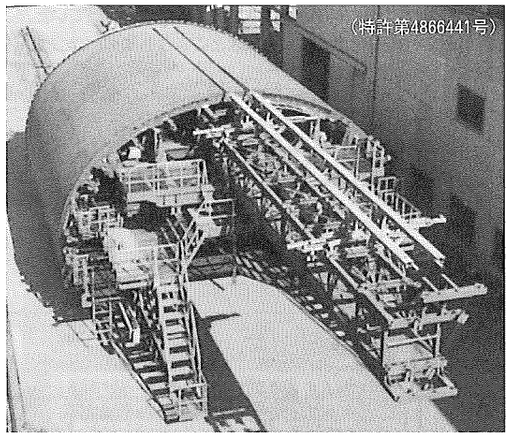
E-mail：info@fuse-ind.co.jp　　http://www.fuse-ind.co.jp

各種トンネル覆工型枠・施工設備メーカー

東和機電工業株式会社　顕田(かいた)工場

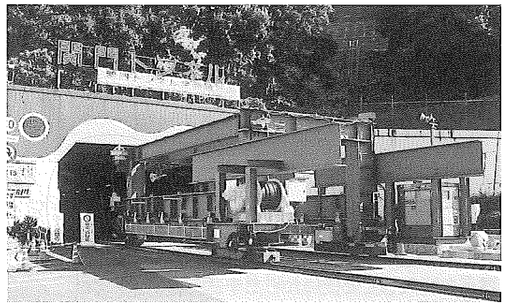
〒820-1111　福岡県飯塚市勢田(せいた)2594番地の18
電　話：(09496)2-3500(代表)
ＦＡＸ：(09496)2-6310
E-mail：towakiden@yahoo.co.jp

● 中流動コンクリート用ステンレスフォーム
クラウン部締め固めバイブレーター(特許)

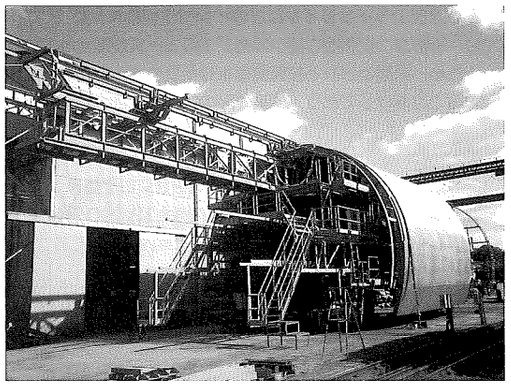


◎強靭なガイドセルに支えられたトンネルクラウン部の締め固めバイブレーターは，前進後進同一の力で抜き差し出来ます．
◎円周方向にスライドするガイドセルは，クラウン部の任意の位置にセットする事が出来ます．
◎ガイドセルの上昇・下降により，任意の高さを締め固める事が出来ます．

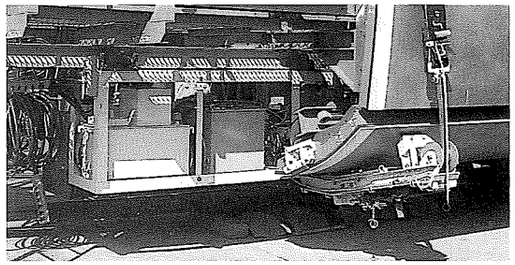
● トンネル床版撤去架台
勾配対応四駆型(関門トンネル)



● 新幹線用ステンレスフォーム



● 自動ケレン装置



- ベルコン通過型スライドフォーム(特許)
- ロータリー式自動配管切替装置
- 油圧式伸縮バイブレーター装置
- ラップ側押上防止センサー及び警鳴装置
- クラック防止用ラップウレタンゴム
- コンクリート圧力センサー
- コンクリート充填センサー
- 2段式伸縮型エア抜き
- 本坑通過型非常駐車帯セントル
- 横移動式桟橋

常に顧客のニーズに応えるため，安全性と施工効率を追求し，高品質な製品を納めさせて頂きます．

月刊推進技術
定期購読のご案内



定期購読料金 **12,000円**（@1,000円/月×12ヶ月　税・送料込）

わが国のライフラインなどのインフラ整備またはその再構築や新たな地下空間の築造に、掘削残土量やCO_2排出量を抑制し、なおかつ耐震性の高い推進工法のニーズが高まっています。月刊推進技術では、円滑かつ適正に推進工事を行っていただくため、必要とされる技術情報をわかりやすく解説をしております。また、推進関連のニュースはどこよりも早く、かつ情報満載でお届けしており、管渠埋設の計画・設計・施工の業務にお役立ていただける内容となっています。

申込方法

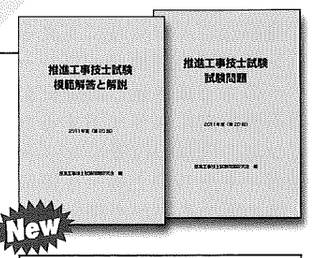
お申込は、郵便局備え付けの払込取扱票に口座番号：00130-3-576039 加入者名：株式会社エルエスプランニングとして、通信欄に購読開始月を明記し年間購読料金12,000円（毎月1冊×12ヶ月　税・送料込）をお支払いください。
詳しくは、月刊推進技術編集室にてご案内いたしております。

定期購読のお申し込みは
右のQRコード
または本誌ホームページから

http://www.lsweb.co.jp/micro-tunnelling/ 月刊推進技術 検索

お問い合わせ先
月刊推進技術 編集室
http://www.lsweb.co.jp/micro-tunnelling/
〒135-0046　東京都江東区牡丹2-2-3-105　株式会社 LS プランニング内
電話 03-5621-7850　FAX 03-5621-7851　E-mail akasaka@lsweb.co.jp

推進工事技士試験　過去10年間（平成14～23年度）
試験問題と模範解答・解説集
推進工事技士試験問題研究会編



平成23年度版発売中!!

推進工事技士試験は、推進工法に係わる技術、技能を適正に認定することを目的に㈱日本下水道管渠推進技術協会（現㈳日本推進技術協会）が平成4年度より実施している制度で、管渠施工の安全性と品質を確保する上で有益な制度です。
解答付きの解説書に対する受験者の皆様からのご要望に応えて、この程、推進工事技士試験過去問題集を刊行しました。受験対策書としてご活用いただければ幸いです。

1．内容と特長
○過去10年間の試験「学科」と「実地」問題を一年単位に収録
○各年度の試験問題と模範解答・解説集は別冊になっており実力テストに最適
○解説には設問に採用された図書（推進工法体系）の出典箇所を明記

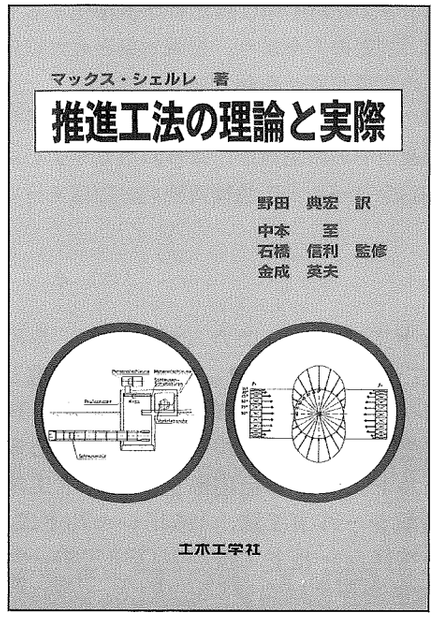
2．価格
各年度単位に 1set 2,000円（消費税・送料込）

3．申込方法
本図書のお申込は前金でお願いしています。
ご購入ご希望の方は、郵便局備え付けの払込取扱票に①「通信欄」に購入したい年度と冊数②「ご依頼人」欄に発送先の郵便番号、住所、会社（団体）名、氏名、電話番号を記入して郵便局からお申込下さい。
これらのことをインターネットでご案内しています。 推進工事技士試験 検索

お問い合わせ先
株式会社 LSプランニング
http://www2.ocn.ne.jp/~ls_siken/
〒135-0046　東京都江東区牡丹2-2-3-105
電話 03-5621-7850　FAX 03-5621-7851　E-mail oda@lsweb.co.jp

推進工法の理論と実際

マニュアルを超えて
推進工法の理解を
さらに深める一冊



マックス・シェルレ 著，野田典宏 訳
中本 至・石橋信利・金成英夫 監修
B5 判　定価：8,500 円＋税

推薦の言葉

中本　至・石橋信利・金成英夫

推進工法によって、下水道をはじめ多くの管渠が布設されている。下水道については一九六〇年にはわが国の普及率は十五％にすぎなかったが、今日では六〇％近くになっている。当初、一五〇〇キロしか施工実績がなかったが、近年の施工延長は年間一五、〇〇〇キロになっている。下水管渠の施工方法の選定にあたって、施工条件や建設環境、地下埋設物や地盤条件などの関係から、開削工法より推進工法などの特殊工法が選定されることが多くなり、その中でもとくに推進工法の適用は多くなった。ところが、わが国では推進工法に関する実務書は多いが理論面を記述したものはあまり見当たらず、推進工法の一層の発展のためにも理論書が求められていた。

本書では、ドイツで推進工法の研究開発で著名なマックス・シェルレ博士が推進工法における いろいろな疑問について理論的に解明した古典的な名著である。博士は理論面のみではなく、実務にも精通していたので、実務面の良さも持っている。

私たちは、野田氏（訳者）の翻訳を監修したわけだが、推進工法の理論面と実務面を実に詳細に解説している点に驚いた。したがって推進工法に従事し、一層活躍しようとする人たちに本書を推薦したいと思う。

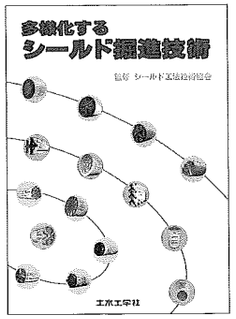
〒162-0832　東京都新宿区岩戸町 16 メイジャー神楽坂
tel: 03-3567-2888　fax: 03-3267-2807　http://www.tunnel.ne.jp
株式会社 土木工学社

好評発売中

多様化するシールド掘進技術

監修 シールド工法技術協会

B５判　141頁　　本体価格2,500円



日本のシールド掘進技術は，国際プロジェクトに多くの日本企業が参画していることが示すように，国内はもとより海外でも高い評価を受けている．とりわけ，世界のスタンダード工法の感がある各種の泥土圧式や異形断面の掘進技術は，まさに日本が世界に発信している技術と言える．これらの掘進技術のほかにも，最近の技術開発の成果により実用化に至った掘進技術は数多く，毎年，新しい技術が更新を繰り返している．

このような背景を踏まえて，掘進技術を広くシールド技術者の参考となることを意図し，最近に開発，実用化された技術を中心に日本トンネル技術協会誌「トンネルと地下」に平成16年春より約１年にわたり『多様化するシールド掘進技術』という連載講座を設け紹介した．その結果，読者の方々より，掲載対象とした以外の技術との関係，従来工法との関わりなどの情報が欲しいとの意見が寄せられた．

このため，読者の声に応えるべく，連載講座には掲載しなかった工法，技術などを整理，体系化するとともに，各種工法の境界，システム・考え方の違い，適用での留意点が，よりわかりやすいように手を加え再度，同名の図書「多様化するシールド掘進技術」をシールド工法技術協会が監修を行い，発刊することとなった．

〔掲載工法〕

①ラチス式同時施工シールド工法，②F-NAVIシールド工法，③ハニカムセグメントを用いた同時施工法，④ロングジャッキ式同時施工シールド工法，⑤ダブルジャッキ式同時掘進シールド工法，⑥充塡式シールド急曲線工法，⑦地下茎シールド工法，⑧T-BOSS工法，⑨球体シールド工法，⑩上向きシールド工法，⑪MMST工法，⑫拡大シールド工法，⑬偏心多軸(DPLEX)シールド工法，⑭ワギング・カッタ・シールド工法，⑮自由断面シールド工法，⑯OHM工法，⑰H&Vシールド工法，⑱単円～三連型駅シールド工法，⑲MFシールド工法，⑳DOT工法，㉑MSD工法，㉒親子シールド工法，㉓拡径シールド工法，㉔DSR工法，㉕泥土加圧シールド工法，㉖ケミカル・プラグ・シールド工法，㉗気泡シールド工法，㉘コンパクトシールド工法，㉙既設シールド撤去工法

本書は東京都立大学名誉教授の山本稔先生よりご推薦いただいております

申し込み先
㈱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
TEL：03-3267-2888　　FAX：03-3267-2807

【好評発売中】

セグメントの新技術

監修　小泉　淳

B5判　132頁　本体価格 2,000円　送料 290円

いわゆるバブルがはじけたここ数年，コスト縮減はすべてに優先する至上命題となっており，シールド工事もその例外ではない．シールド工事の直接費に占めるセグメント費の割合は約４割程度と言われているが，シールド工事費の縮減のためにはセグメントの製造コストの縮減は避けて通ることのできない課題の一つとなってきている．

このような状況を受けてここ10年ほどの間に，急激にいろいろなセグメントが提案され実用化された．

これらのセグメントのうちにはよく似たものも多く，名称もバラエティに富み，その特徴や適用範囲などが明確でないため混乱が起きている例もある．

このため「トンネルと地下」の編集委員会では過去10年間に開発され，実用化されたセグメントを中心に開発中のものも含めてアンケート調査を実施し，また，土木学会の年次学術講演会における発表状況も参考にして34件のセグメントを抽出し，「セグメントの新技術」の連載講座を設けてこれらのセグメントを順次紹介した．セグメントの名称，特徴，開発目的，適用範囲などは同じフォーマットで掲載され，また，最終回では，そこで紹介されたセグメントを整理分類し，新しいセグメントの開発の動向や今後の展望を総括した．

本書はこの連載講座をもとに新たに「セグメントの新技術」編纂委員会を作り，個々のセグメントに加筆，修正を加え，より充実した内容にまとめたものである．

〈セグメントの新技術〉

1．薄型化・高強度セグメント
2．サンドイッチ型合成セグメント
3．矩形トンネル用合成セグメント
4．NM セグメント
5．二次覆工省略型ダクタイルセグメント
6．リングシールド工法用セグメント
7．コンクリート中詰め鋼製セグメント
8．DNA シールド
9．ガイドロックセグメント
10．ウイングセグメント
11．ハニカムセグメント
12．CONEX-SYSTEM
13．スパイラルセグメント
14．コッター・クイックジョイントセグメント
15．ワンパスセグメント
16．AS セグメント
17．マルチブレード式継手セグメント
18．シンプロセグメント
19．WB セグメント
20．リングロックセグメント
21．KL セグメント
22．コーンコネクターセグメント
23．FRP-Key 継手
24．ほぞ付きセグメント
25．HOT セグメント
26．インサート継手(その１：アーチ形)
27．インサート継手(その２：NF 型)
28．CPI セグメント
29．PPC セグメント
30．FBR セグメント
31．NRT セグメント
32．タイドアーチセグメント
33．遠心力締固め RC セグメント
34．高流動コンクリートセグメント

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

き…り…と…り…線

《ご　注　文　票》

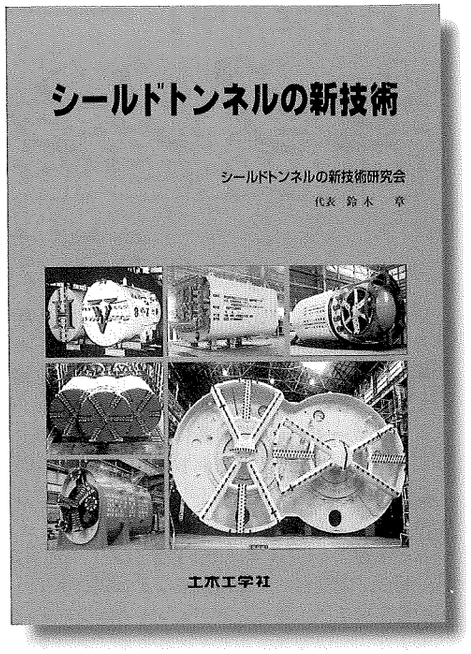
セグメントの新技術 ＿＿＿＿ 冊　申込みます．

所 在 地　〒(　　)

事業所名　　☎

部 課 名　　申込者名　　㊞

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

B5判　280頁　定価：4,660円＋税

進化を続けるシールド工法．その誕生から技術の変遷，将来の技術開発の動向までをまとめ，最先端の技術について理論と実際にいたるまで記載した．
豊富な設計・施工例を掲載し，応用のしやすい的確な解説を加えた好評の一冊．

主 要 目 次

第1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／わが国におけるシールド工法の歴史／今後の技術開発の方向性

第2章　調査・計画編
1. シールド工法の調査技術
シールド工事における調査の取り組み方／基本計画時の調査(予備調査)／設計時の調査(基本調査，詳細調査)／施工時の調査(確認調査，管理調査)／施工後の調査(追跡調査)
2. 断面および線形計画
断面および線形／鉄道用シールド／下水道用シールド／断面と線形における今後の展開
3. シールド機種の種類と選定
シールド機の構造と装備／現状のシールド機種の種類と選定方法
4. 新しいシールド工法
大断面化，大深度化，長距離化への展望

第3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
3. 仮設備
仮設備の計画
4. シールド工事の自動化
掘進管理システム／方向制御システム／セグメント自動組み立てロボット／自動搬送システム／その他の自動化技術
5. 掘進と施工管理
シールド掘進と施工管理／シールド機の発進と到達／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
6. 近接施工と環境対策
近接工法と対策／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
7. 新工法の現状と将来展望
自由断面シールド掘進(縦楕円断面)／異形断面シールド／分岐・接合シールド／球体シールド(ホルン)工法／複円形，矩形および拡大シールドの開発動向／ECL工法
8. 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／土圧式シールド工法の切羽安定／特殊条件下の切羽安定
9. 地盤変位の理論と実際
地盤変位の実態／地盤変位の予測解析

付録
1. セグメントの設計例
セグメントの設計例／外国の設計手法との比較／有限要素法を用いたシールド覆工設計例
2. 地盤変位予測解析手法の例
地盤変位の一般的性状／予測解析手法の例
3. シールド工事の施工計画
施工計画書とは／施工計画立案手順／シールド工事施工計画書の参考例

参考文献／索引

株式会社 土木工学社　〒162-0832　東京都新宿区岩戸町メイジャー神楽坂
TEL: 03 3267 2888　FAX: 03 3267 2807　http://www.tunnel.ne.jp

トンネル工事からパンクを追放

坑内用特殊複層タイヤ



特許第1610830号

建設車両のタイヤのパンク、磨耗、破損を大幅に低減、車両の有効利用、修理に伴う人件費の削減等、工事の進捗に大いに貢献します。

- タイヤ間の間隙が無いため石を噛まない
- サイドの切断に強い
- 石および普通釘に強い
- 弾性波

0～20（約2年）　20～30（1年6か月）
30～40（約1年）　40～50（6か月）

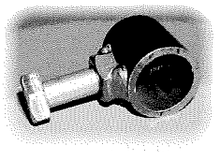
【営業品目】複層タイヤ／油圧ホース／マテリアルホース／各種中古車／触媒／線路（中古）

中濃産業株式会社
代表取締役 土田義式
本　社　〒501-1534 岐阜県本巣市根尾神所 362-1
TEL(0581)38-2241㈹　FAX(0581)38-3383
営業所　〒501-1203 岐阜県本巣市文殊 64-387
TEL(0581)34-3990㈹

コストダウンを可能にする
Kリング・Kプレート

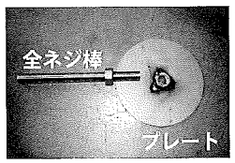
施工方法等詳細については下記までご連絡ください
製造・販売元 **静岡スチール**
〒436-0342　静岡県掛川市上西郷 765-1
TEL：0537-24-3886　FAX：0537-24-3859
Mail：ktk@r5.dion.ne.jp

①アーチ鉄筋組立金物（Kリング）特許出願中（特願 2001-309314 号）
トンネル施工時の覆工工事におけるアンカー筋に段取り筋を設置する際のコスト、安全、工期、品質の向上を可能にすることができます。

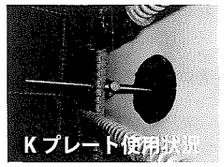


②防水シート接着ジベル筋（K プレート）組立
ウォータータイト（全周止水）トンネルにおいて覆工コンクリートの鉄筋を自立させることによって、鉄筋受け架台の鋼製支保工コストの大幅削減を可能にすることができます。





コンパクトサイズ
Kプレートは分割方式により現場での組立が可能です。ナット付きのプレートと全ネジ棒



設置は簡単
円型プレートを直接支保工下地防水シートに接着して使用します。
Kリングと併用します。



スーパージャッキシステム

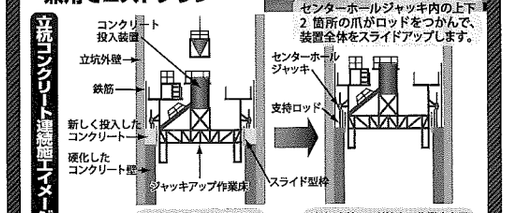
トンネル・地下工事に貢献！

立坑スリップフォーム工法

- コンクリート連続打設で工期短縮
- 型枠・足場組ばらし不要
- 掘削・グラウトスカフォード兼用でコストダウン

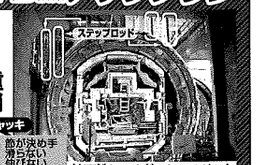


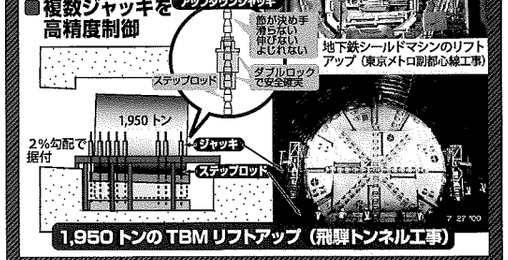
センターホールジャッキ内の上下2箇所の爪がロッドをつかんで、装置全体をスライドアップします。



シールドマシン・TBMアップダウン

- 安全確実で経済的なステップロッド方式
- イコライザー機構で荷重・変位のバラ付きを解消
- 複数ジャッキを高精度制御





営業品目
- ジャッキリース・オペレータ
- 架台・型枠足場　設計・製作・据付工事

JFE シビル 株式会社
JFE　都市基盤営業部　特殊工法グループ
〒111-0051 東京都台東区蔵前2丁目17番4号（JFE蔵前ビル）
TEL:03-3864-5293　FAX:03-3864-7319
URL http://www.jfe-civil.com/　E-mail jack@jfe-civil.com



トンネルが貫通するまでの長い道のりの中で、工事完了までの間に大いなる違いを生む原動力となるのは、トンネル進捗率における日々改良の積み重ねです。もちろん、発破のたびに進捗度を上げたいとご希望されることでしょう。

オリカ社は、今まで積み重ねてきた研究開発と技術力を駆使して、お客様が毎日直面する課題の解決策をご提供することができます。自由に延時設定可能なトンネル専用電子雷管eDev、トンネル発破デザインソフト New SHOTPlus-T™、高エネルギーエマルション爆薬の結果をご覧になることができます。これらはすべて、お客様のご要望に沿って全てのプロジェクトに最適な技術サービスとサポートをご提供した結果です。

これこそがオリカ社が提案する「Power of Partnership（パートナーシップの力）」です。

www.oricaminingservices.com にアクセスして頂ければ、トンネル現場の最新技術をご覧になることができます。

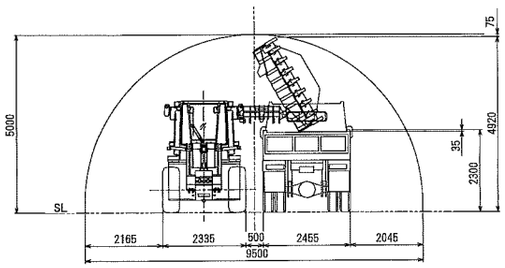
ORICA MINING SERVICES



サイドダンプ

CAT 924H

1.5m³



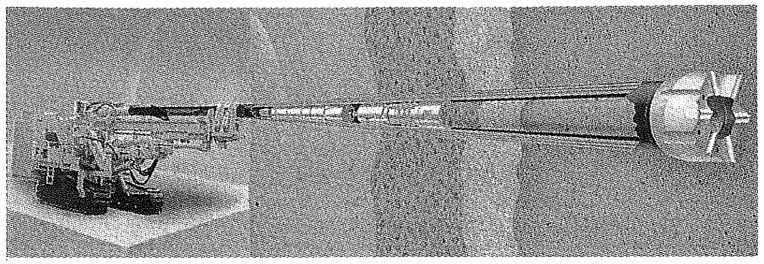
k lea 株式会社 ケイ・リー

仙　　台：TEL.022-359-5331
東　　京：TEL.03-3661-5651
大　　阪：TEL.06-6838-1372
尾　　道：TEL.0848-56-1124
機材センター：TEL.022-359-4951

URL http://klea.catrent.com

トンネル掘さくの安全施工に
アロードリル前方探査システム

パーカッションワイヤーライン サンプリング工法



■ 特長

①断層破砕帯や湧水をともなう難地層のコアサンプリングをスピーディかつ確実に行え、施工時間が大幅に短縮できます。

②2重管ワイヤーライン サンプリングシステムにより、地質条件にかかわりなく、コアサンプルの採取率が従来とくらべて大幅に向上しました。

KOKEN 鉱研工業株式会社

本社　〒171-8572 東京都豊島区高田2-17-22 目白中野ビル1F
TEL（03）6907-7888（大代表）　FAX（03）6907-7527

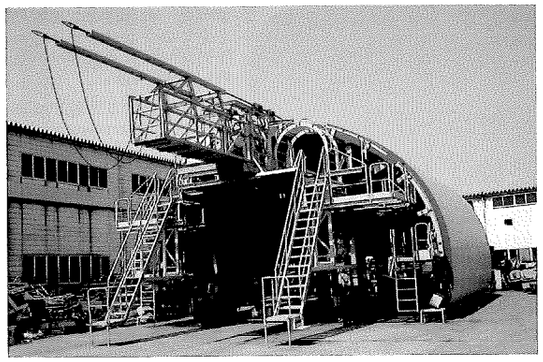
お問い合わせ先 ： 工事営業本部
TEL.（03）6907-7512　FAX.（03）6907-7522
http://www.koken-boring.co.jp

要求性能を満たす
覆工コンクリートの品質向上技術

鉄筋区間併用タイプ

天端引抜バイブレータ装置

NETIS 登録 No.HR-080001-A



期待される効果・特徴

- トンネルクラウン部の締固めと密充填が出来る
- 高品質な覆工コンクリートが形成出来る
- 鉄筋区間で一部主筋をずらして使用することが出来る
  (但し，カープ区間はケーブル式を推奨します)
- 覆工表面の縞模様を減らすことが出来る

コンクリート湿潤養生システム

NETIS 登録 No.HR-080002-A



期待される効果・特徴

- セントルと養生台車を連続してシートで覆い，坑内通気から遮断し，乾燥収縮クラックを防止する
- 脱型直後の覆工コンクリートに水(冬場は温水も可)を噴霧し，湿潤状態を保持し，初期強度を向上させる
- 養生中に追加噴霧することで湿潤状態を長期保て，覆工コンクリートの長期強度が増進する
- ３台連結することにより７日間の湿潤養生が出来る

北陸鋼産株式会社

(旧社名　株式会社 佐賀)

URL http://www.hokuriku-kosan.co.jp

射水工場：〒934-0056 富山県射水市寺塚原 720 番 1　TEL0766(82)1500　FAX0766(82)1501

滑川工場：TEL076(476)0333　FAX076(475)9121　東北営業所・工場：TEL0223(32)2420　FAX0223(32)2423

東京支店：TEL03(3851)1016　FAX03(6908)6789　大阪支店：TEL06(4963)3520　FAX06(4963)3521

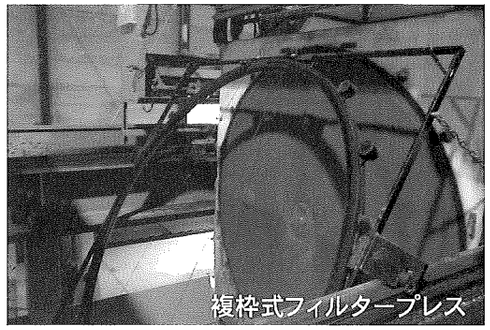
濁水処理からズリ出しまで
トータルにフォローアップいたします

環境にやさしい TWS 型濁水処理シリーズ

小規模のpH中和装置～ダム骨材用の大規模処理装置まで対応します



100.0㎥/Hr 濁水処理設備



複枠式フィルタープレス

【TWS型濁水処理装置の特徴】

1. シックナーを大型化し，沈降面積を増やし槽内流速を抑えています
2. 複枠式フィルタープレスにより，確実な自動運転を実現しています
3. 砂ろ過装置，高分子自動溶解装置等豊富なオプション設備で様々な条件に対応します

≪汎用車輌全般≫



VOLVO ダンプトラック (A25CTS,A25CTR,A20/30CT)





10T ミキサー



4.5㎥ベッセル搭載ダンプ



10T 低床ダンプ



10T ダンプ

各種車輌 取り扱っております

株式会社 フジテックス

〒930-0821　富山市飯野 12-1　TEL (076)452-1616(代)　FAX(076)452-1617

トンネルと地下　4月号目次　Vol.43, No.4, 2012 Apr.

■巻　頭　言

継続は力なり　記録を後世に残そう
大島　洋志……5

■特集「地震とトンネル」

トンネル，地震と断層と
足立　紀尚……7

地震と都市地下施設の整備
小泉　　淳……10

地震とトンネル
朝倉　俊弘……15

地震時における山岳トンネルの挙動に関する基礎的研究
真下　英人・日下　　敦……25

JR東日本におけるトンネル地震被害の事例
清水　　満……37

中越沖地震による高速道路トンネルの被災事例分析
―北陸自動車道　米山トンネル―
中野　清人・小川　　清……49

東京メトロにおける地震への取組み
武藤　義彦……55

温泉とは？　温泉の有効利用は？　この１冊であなたの疑問を解決します!!



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217頁　本体価格1,200円(税込1,260円)
【主要目次】１.バブル景気と『ふるさと創生一億円』　２.バブル崩壊後の温泉景気　３.温泉とは　４.温泉の分布と特徴　５.温泉の成因と寿命　６.温泉の探査技術　７.温泉談義アラカルト　８.外国の温泉　９.日本の地熱開発　１０.将来の温泉開発と建設の考え方
お申し込みは当社へFAX，または，お近くの書店にてお申し込みください
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
TEL　03-3267-2888　　FAX　03-3267-2807

CONTENTS CONTENTS CONTENTS CONTENTS CONTENTS CONTENTS

首都東京の下水道管路の耐震性向上の取組み
黒住　光浩……61

■座　談　会

トンネル千思万考……79

■連 載 講 座

最新推進工法技術（最終回）
―推進工法の施工管理―
「最新推進工法技術」連載講座小委員会……91

■現場だより

「被災地」仙台より
平山　国弘……24

■語り継ぎ　言ひ継ぎ行かむ

山岳トンネル技術の変革期を経験して
竹林　亜夫……71

■資　　料

土木情報
編　集　部……36

工法・技術・製品ニュース
編　集　部……78

トンネルジャーナル
編　集　部……70

■会　　報

会　　報
日本トンネル技術協会……101

【表紙説明】　特集：「地震とトンネル」



2011年３月11日に発生した東日本大震災から１年が経過し，国民の地震に対する関心がますます高まっていることもあり，創刊500号の記念号として「地震とトンネル」と題した特集とした．写真は，地震の被害状況である．

〔写真提供：東日本旅客鉄道(株)〕

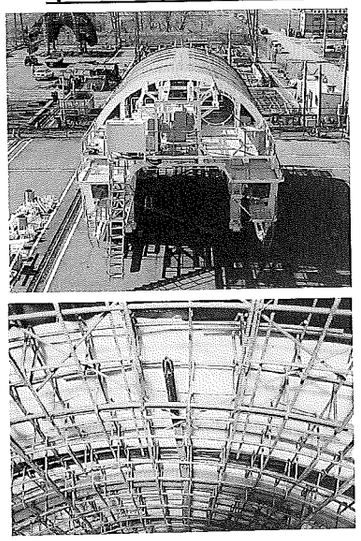
高品質なトンネル覆工に挑む

高品質なトンネル覆工を実現する
引抜バイブレータ締固システム

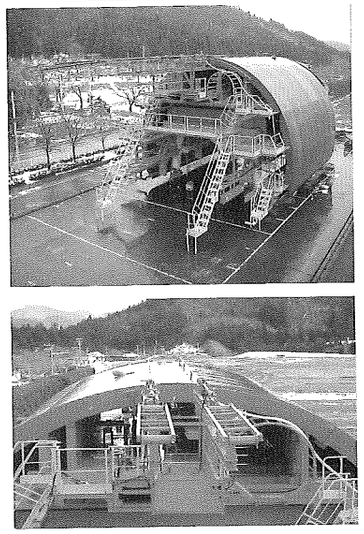
トンネルの二次覆工コンクリートには、トンネルクラウン部の締固め方法に課題があり、結果として漏水や空隙の発生など、覆工コンクリートの品質に問題が生じるケースがありました。また、覆工コンクリートの締固め作業は、狭隘部での苦渋作業という問題もあります。そこで、引抜バイブレータ締固めシステムを用いることにより、上記の課題を克服し、高品質な覆工コンクリートの構築を可能としました。

【特許出願中】

ホースバイブ巻取り式



パイプバイブ伸縮式



特願　2000-073694・2002-329301・2004-021814・2004-021817

効果・特徴

1. 覆工コンクリートの品質が向上する。
2. トンネルクラウン部の締固めが省力化できる。
3. 作業環境が改善でき、狭隘なヶ所での作業が無くなります。
4. 鉄筋、無筋区間での共用が可能で、経済性に富んでいます。

岐阜工業株式会社
GIFU KOGYO CO.,LTD
本　　社　岐阜県本巣市十四条１４４番地　〒501-0464
本社工場　TEL (058)323-2000(代)　FAX (058)323-1176

本社営業部　(058)323-2001
東 京 支店　(03)5836-0531
仙台営業所　(022)259-2239
九州営業所　(092)713-5265

URL http://www.gifukogyo.co.jp/

総務委員会広報小委員会会誌WGの構成（五十音順・敬称略）

〔主　　査〕

大 島 洋 志　国際航業株式会社上席フェロー技術センター長

〔幹　　事〕

居 相 好 信
株式会社大林組生産技術本部統括部長

岩 田 美 幸
国土交通省大臣官房技術調査課技術企画官

大 石 敬 司
東京地下鉄株式会社鉄道本部改良建設部
改良建設企画課課長

大 津 敏 郎
株式会社高速道路総合技術研究所道路研究部
トンネル専門主幹

金 山 洋 一
独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構
鉄道建設本部計画部計画課長

久多羅木　吉治
東亜建設工業株式会社土木事業本部技術部長

志 岐　　寛
清水建設株式会社土木技術本部地下空間統括部
部長

濱　　建 介
株式会社ANET取締役

福 家 佳 則
鹿島建設株式会社土木管理本部土木工務部
トンネルグループ長

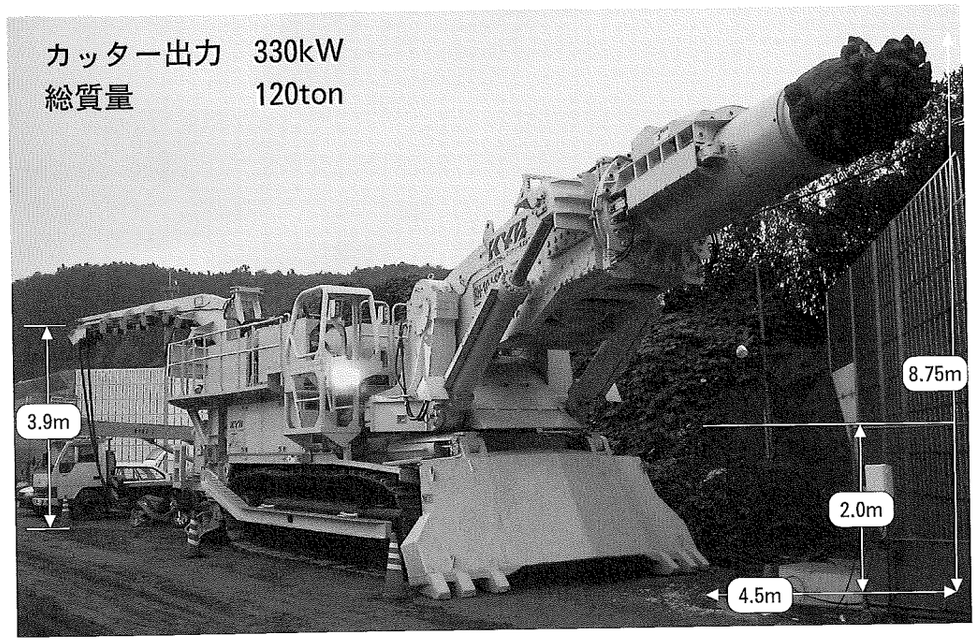
松 原 利 之
飛島建設株式会社建設事業本部
エンジニアリング事業推進部長

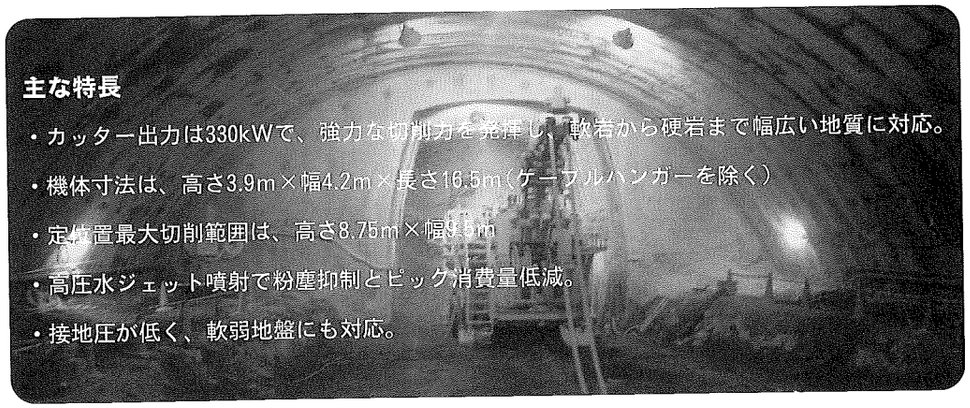
三 浦　　克
株式会社竹中土木常務執行役員

領 家 邦 泰
大成建設株式会社土木本部土木技術部
トンネル技術室参与

ミニベンチ工法 両用型 ショートベンチ工法

RH-10J-SS 強力型ブームヘッダー





KYB カヤバ システム マシナリー株式会社

KAYABA SYSTEM MACHINERY CO.,LTD.

http://www.kyb-ksm.co.jp

本社・営業 〒105-0012 東京都港区芝大門2丁目5番5号 住友不動産芝大門ビル TEL 03-5733-9444
カスタマーサービス相模事業所 〒252-0328 神奈川県相模原市南区麻溝台1丁目12番1号 TEL 042-767-2586
大阪支店 〒564-0063 大阪府吹田市江坂町1丁目23番地20号TEK第二ビル TEL 06-6387-3371
西部支店 〒812-0016 福岡県福岡市博多区博多駅南1丁目7番14号 ボイス博多 TEL 092-411-4998
三重工場 〒514-0396 三重県津市雲出長常町1129番地11 TEL 059-234-4111

編集委員会の構成（五十音順・敬称略）

〔編集委員長〕

大島洋志　国際航業株式会社上席フェロー技術センター長

〔編集参与〕

木谷日出男
国際航業株式会社技術センター
地盤研究室長

今田　徹
東京都立大学名誉教授

高橋良文
東京都下水道サービス株式会社専務取締役

橋本定雄
（元）東京都公営企業管理者下水道局長

濱　建介
株式会社ANET取締役

三浦　克
株式会社竹中土木常務執行役員

〔委員〕

大津敏郎
株式会社高速道路総合技術研究所道路研究部
トンネル専門主幹

亀山　勝
東京地下鉄株式会社鉄道本部改良建設部
計画担当課長

坂口淳一
東京都交通局建設工務部計画改良課長

佐原圭介
独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構
鉄道建設本部工務部工務第一課総括課長補佐

清水　満
JR東日本研究開発センター
フロンティアサービス研究所次長

新谷康之
東京都下水道局建設部設計調整課長

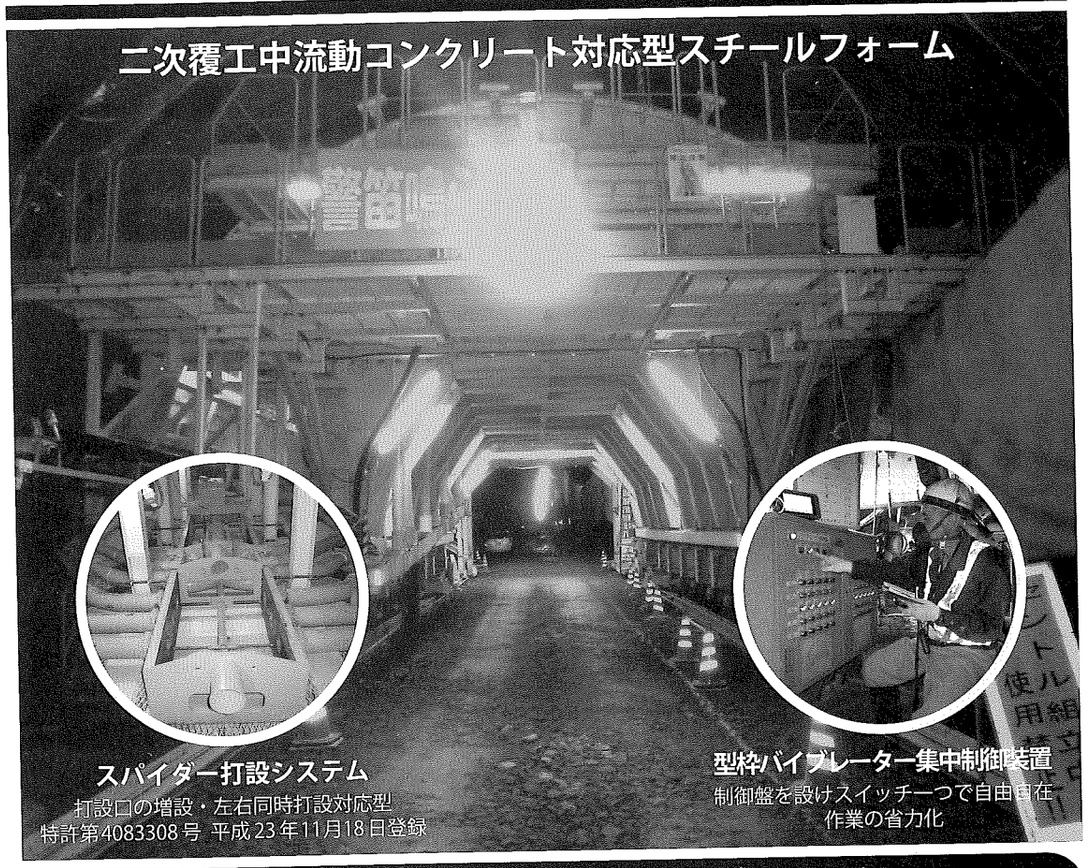
高橋　晃
東京電力株式会社電力流通本部工務部
地中送電グループ課長

藤村和彦
東京都水道局建設部工務課長

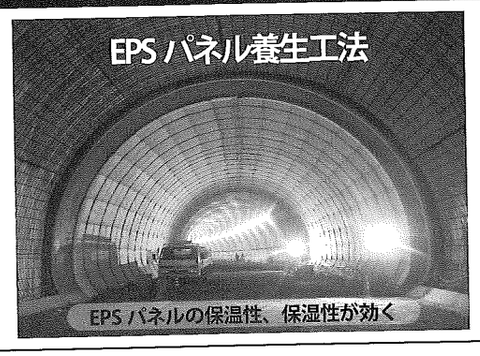
真下英人
独立行政法人土木研究所
道路技術研究グループ長

焼田真司
公益財団法人鉄道総合技術研究所
構造物技術研究部トンネル研究室主任研究員

トンネル二次覆工型枠総合メーカー



新しいタイプの覆工コンクリート養生システム



実績および計画		
施主	実績	計画中
国土交通省	18	2
NEXCO	6	1
地方自治体	8	3
鉄道・運輸機構	1	1

平成24年1月31日　現在

実施権許諾第 10396 号
NETIS 登録　(No.CB-090003-A)

一歩前進！　～限りない未来への挑戦～

㈱ 大栄工機株式会社

本社　〒526-0842　滋賀県長浜市春近町 90 番地
TEL 0749-64-0246 ／ FAX 0749-63-6765 ／ URL http：//www.daieikouki.co.jp/
営業品目　各種鋼製型枠(セントル)の設計・製造・販売　※詳しくはホームページを御覧ください

トンネルと地下　VOL. 43　No. 4　掲載概要

創刊500号記念特集「地震とトンネル」

今号で創刊500号となります．昨年３月11日に発生した東日本大震災より１年が経過し国民の地震に対する関心が高まっていることもあり，本特集では地震とトンネルとのかかわりについて企画しました．

500th Commemorative Issure: Earthquakes and Tunnels

This is our 500th issue. It has been one year since the Great East Japan Earthquake struck on 11th March and, as there has been an increase in interest in earthquakes among the Japanese people, we decided to feature the relation between earthquakes and tunnels.

掲載頁 7

トンネル，地震と断層と

(財)地域地盤環境研究所　足立　紀尚

わが国のトンネルにおいて地震および断層がはじめて話題になった東海道本線の丹那トンネルを『丹那トンネルの話』を引用しながら当時を振り返り，また，青函トンネルおいて，地震に対しトンネル内の安全な輸送を確保することを目的に設置された地震防災設備について報告する．

Tunnels, Earthquakes and Faults

By Toshihisa Adachi, Geo-Research Institute

Quoting from "The Story of Tan-na Tunnel", this report looks back on the era of Tanna Tunnel on the Tokaido Line when the relation of tunnels and earthquake and faults had become topical in Japan and gives information on earthquake prevention facilities inside the Seikan Tunnel installed with the purpose of ensuring safe transit.

掲載頁 10

地震と都市地下施設の整備

早稲田大学　小泉　　淳

一般に，構造物の構築される深度が大きくなるにつれて水圧は大きくなるが，地山は堅固になり構造物に作用する土圧は小さくなる．また，大深度に構築される構造物は，耐震性の観点からみれば有利になるが，密閉性や閉鎖性が高いという特性を考えると，地上とは異なったものとなる．また，巨大地震後の火災や津波などの二次的災害に対しては，どのように避難するのかなどの対策は十分に整理できておらず，課題が多く残されている．本稿では，地震に対して有利と思われている大深度の地下施設，とくに都市部のトンネルを中心に，その整備に際しての課題についての私見を述べる．

Earthquakes and Building Underground Urban Facilities

By Atsushi Koizumi, Waseda University

In general, the deeper a construction of underground structure goes, the higher the water pressure becomes but the ground becomes more stable and earth pressure against structure decreases. Further, deep underground structures are advantageous from the point of view of seismic stability but they have different condition from above-ground structures when considering characteristics of confined spaces. In addition, with respect to secondary disasters such as fires and tsunamis after major earthquakes, stuies of countermeasures including evacuate route are still not adequate and many problems still remain. This report states the author's personal opinions on deep underground facilities that are thought to be advantageous in earthquakes and problems in construction focusing particularly on urban tunnels.

掲載頁 15

地震とトンネル

京都大学　朝倉　俊弘

本稿は，筆者が30年あまり前に地震とトンネルにかかわりをもって以来の経験と，その経験を通じて得た技術的な知識について回想したものである．その後，これらの経験と知識は，京都大学，鉄道総合研究所，鉄道・運輸機構の三者による共同研究「山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性向上に関する研究」に反映され，さらに深度化した．

Earthquakes and Tunnels

By Toshihiro Asakura, Kyoto University

This is my mommentaries about over 30 years experience and technological knowledge since I first involved in earthquakes and tunnels. This experience and knowledge was then reflected on and further deepened in the joint research "Seismic Damage Mechanisms and Improvement of Seismic Strength of Mountain Tunnels" conducted by Kyoto University, the Railway Technical Research Institute and Japan Railway, Construction, Transport and Technology Agency.

掲載頁 25

地震時における山岳トンネルの挙動に関する基礎的研究

(独)土木研究所　真下　英人

山岳トンネルは，基本的には地震に強い構造物であるが，地震の規模，震源からの距離，地山条件，トンネルの構造などによっては，大規模な被害を受ける場合がある．山岳トンネルの耐震対策を合理的に実施するには，山岳トンネルの地震時における挙動を明らかにし，耐震対策が必要となるトンネルの条件および効果的な耐震対策の方法とその設計法を確立する必要がある．本研究は，地震時における山岳トンネルの挙動を明らかにすることを目的として，地震で発生したトンネルの変状を再現するための数値解析，実トンネルにおける地震時の挙動計測，観測された地震動を用いた地山の変形挙動に関する数値解析を行い，検討した結果を示したものである．

Basic Study on Seismic Behaviour of Mountain Tunnels

By Hideto Mashimo, Public Works Research Institute

Mountain tunnels are basically earthquake-proof structures. But there are cases in which they sustain large -scale damage due to such conditions as the scale of the earthquake, the distance from the hypocentre, ground conditions and construction methods. In order to rationally implement countermeasures against earthquakes for mountain tunnels, it is necessary to discover seismic behaviour of mountain tunnels and conditions of tunnels that require seismic countermeasures and to establish effective methods of designs and reinforcement against earthquakes. This study shows the results of numerical analysis to simulate seismic defomation of tunnels, measurements of seismic behavior in actual tunnels and numerical analysis of seismic behaviour based on measured earthquake wave with the aims of discovering seismic behaviour of mountain tunnels.

掲載頁 37

JR東日本におけるトンネル地震被害の事例

東日本旅客鉄道(株)　清水　　満

本稿は，JR東日本のトンネルが顕著な地震被害を受けた2004年の新潟県中越地震と2007年の新潟県中越沖地震，そして昨年2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の３地震について，その被害について述べる．

Examples of JR East Japan Tunnel Earthquake Damage

By Mitsuru Shimizu, East Japan Railway Company

This report is about earthquake damages on JR East Japan tunnels caused by the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004, the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake in 2007 and the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

掲載頁 49

中越沖地震による高速道路トンネルの被災事例分析
—北陸自動車道　米山トンネル—

(株)高速道路総合技術研究所　中野　清人

これまで東北地方太平洋沖地震をはじめ，大きな地震が数度発生したが，新潟県中越沖地震で北陸自動車道米山トンネルが被害を受けた以外は，高速道路のトンネルでは被害は生じておらず，一般的にトンネルは他の構造物に比べて地震に強いと考えられてきた．本稿は，米山トンネルの被害状況とその復旧方法について報告するとともに，被害の要因を探るべく再現解析を行いその結果を考察した．これらを通して得られた知見から，山岳トンネルの耐震性についての考え方を取りまとめたものである．

Earthquake-stricken Expressway Tunnel by the Niigataken Chuetsu-oki Earthquake—Hokuriku Expressway Yoneyama Tunnel—

By Kiyoto Nakano, Nippon Expressway Research Institute Company Limited

Recent years some major earthquakes struck Japan including the off the Pacific coast of Tohoku Earthquake but there has been no expressway tunnel damage apart from the Yoneyama Tunnel on the Hokuriku Expressway sustained in the Niigata Chuetsu Earthquake. Hence it has been thought that, in general, tunnels are more resistant to earthquakes than other structures. Along with giving information on the damages and recovery works on the Yoneyama Tunnel, this report discusses simulation analysis results conducted to find the causes of the damage. It summarizes attitudes to seismic resistance of mountain tunnels from the knowledge gained from these.

掲載頁 55

東京メトロにおける地震への取組み

東京地下鉄(株)　武藤　義彦

東京地下鉄(株)は，首都東京の交通を９路線の地下鉄の運行によって支えており，構造物は約84%がトンネルである．今回の東日本大震災においては地上建物およびトンネルの部分で軽微の被害は発生しているが，列車の営業には影響はなかった．本稿では，東日本大震災後の検討経緯を踏まえ，地震への主な取組みについて紹介する．

Tokyo Metro Efforts toward Earthquakes

By Yoshihiko Muto, Tokyo Metro Co., Ltd.

Tokyo Metro supports transport in the capital, Tokyo, by operating 9 metro lines, approximately 84 % of lines are composed of tunnels. There was minor damage in above-ground buildings and tunnels caused by the Great East Japan Earthquake but it had no effect on the operation of trains. This report gives information about main efforts toward earthquakes based on the results of consideration after the Great East Japan Earthquake.

掲載頁 61

首都東京の下水道管路の耐震性向上の取組み

東京都下水道局　黒住　光浩

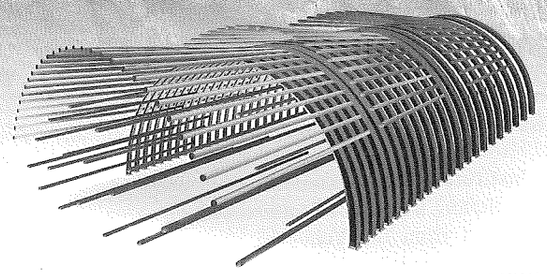
東北地方太平洋沖地震で下水道施設も，数多くの処理場が津波で被災するなど甚大な被害を受けた．震源から500km以上離れた東京都区部においても，下水道管路をはじめ下水道施設に被害が発生した．当局では，従前より下水道管路を含めて耐震化の取組みを進めてきており，幸いにして下水道使用に影響を与えるような規模の被害はなかったものの，首都直下地震のリスクの高まりや震災対策の強化が求められるようになっている．本稿では，東日本大震災における被災状況と復旧状況を含めて，当局のこれまでの下水道管路の耐震化にかかわる取組み状況と，今後の課題とその対策などについて報告する．

Efforts foward Improve Seismic Capacity for Sewage Pipelines in Tokyo

By Mitsuhiro Kurozumi, Bureau of Sewerage, Tokyo Metropolitan Government

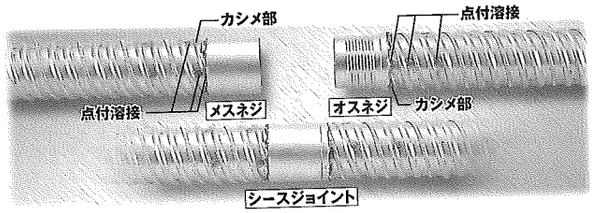
the Great East Japan Earthquake caused extensive damage on Sewarage facilities. Many treatment plants sustained serious damage from the tsunami. In Tokyo, 500km away from the epicenter, there was even damage to sewage facilities including sewage pipes. Our bureau has been progressing with efforts toward seismic retrofit of sewage pipes and others. Fortunately, there wasn't effective damage to the use of the sewerage system, the risk of a near-field earthquake under the capital has heightened and enhancement of earthequake disaster countermeasures are required. This report gives information on the status of efforts toward seismic retrofit for sewage pipes by our bureau up until now, including the damage and recovery from the Great East Japan Earthquake and reports on future challenges and measures.

ユニークな発想と高品質・自信の価格



FIXチューブ工法

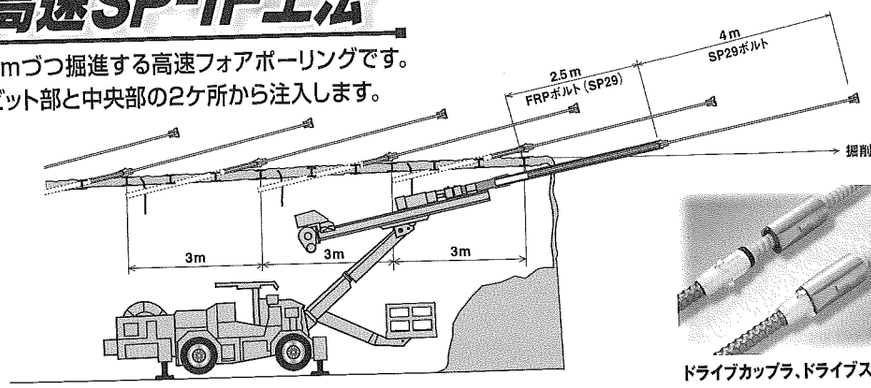
※天端にφ76.3長尺鋼管、鏡部に連続突起を有する長尺鋼製シースを引込み薄肉鋼管を挿入して注入。周辺地山にしっかりと"FIX"します。

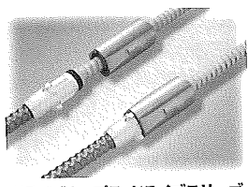




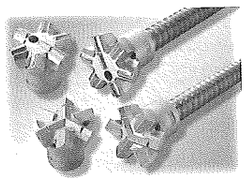
高速SP-IF工法

※3mづつ掘進する高速フォアポーリングです。
ビット部と中央部の2ケ所から注入します。



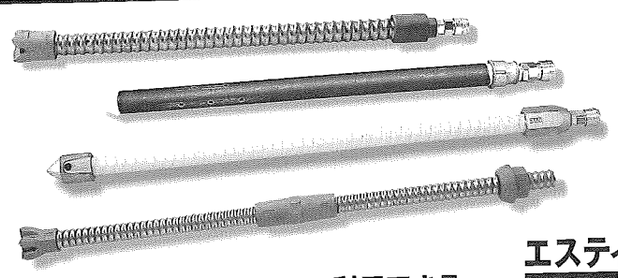


ドライブカップラ、ドライブスリーブ



φ65mm ロストビット(SP29)

自穿孔ボルト&注入管



※他にも脚部や坑口周りに利用できる各種の補強土工法、マイクロパイル工法を準備しております。

STE
エスティーエンジニアリング株式会社
ST ENGINEERING CORPORATION
〒581-0833 大阪府八尾市旭ヶ丘1丁目108番地2
TEL.0729-90-0250 FAX.0729-90-0251
http://www.st-eng.co.jp

巻頭言

（題字　佐藤信彦会長）



継続は力なり　記録を後世に残そう

本誌編集委員長・JTA会誌WG主査
大島洋志

本誌『トンネルと地下』は今月号で通算500号の栄えある節目を刻むこととなりました．創刊から41年と８か月が経過したことになります．本誌が精機通信社（編集責任者山本尚志氏）から創刊されたのは昭和45（1970）年９月です．第三次佐藤栄作内閣が成立，東名高速道路開通，そして大阪万博が開催（東海道新幹線は開催に先行し，前年12月から国鉄スワローズの金田正一投手の「長い，なが～い！」というコマーシャルのもと16両編成の運転を開始）された年であります．私自身は当時国鉄の本社で山陽新幹線を建設する部署の課長補佐，翌年１月にはその建設を推進する現場長の任にあった新進気鋭？の若手技術者でありました．

以降の本誌の歩みを，節目となった号数で振り返ってみますと次のようになります．

①昭和49（1974）年６月　　46号　土木工学社発行（編集責任者山本氏独立）となる

②昭和49（1974）年９月　　49号　日本トンネル協会会報掲載開始（会誌１号）

当誌は土木工学社編集・出版の形のまま，昭和49年10月より日本トンネル協会監修，昭和50年１月より日本トンネル協会誌となり，昭和50年５月の（社）日本トンネル技術協会（以下，「JTA」と略す）設立に伴い，同年９月号（61号）からJTA機関誌となる

③昭和53（1978）年12月　100号　創刊100号＆会誌50号特集号を組む

④昭和62（1987）年４月　200号　創刊200号特集号を組む

⑤平成７（1995）年８月　300号　JTA設立20周年とあわせ特集号を組む

⑥平成15（2003）年12月　400号　江戸開府400年とあわせ特集号を組む

⑦平成23（2012）年４月　500号　東日本大震災１周年とあわせて特集号を組む

私は当誌とは創刊号のころから関係がありましたが，本格的な関与は編集委員に就任した昭和48（1973）年８月（36号）からです．当時，OECDの勧告のもとに国内にトンネル

技術の集まりを設けようという動きがあったころでした．私も下っ端としてその設立にかかわっていましたが，JTAの設立が順調に進んだ背景には，本誌の存在(トンネル技術専門誌としての本誌の創刊に関係され，それを４年以上も刊行し続けた産官学の強力・協力メンバーの存在と，それを購読する多くの会員の存在)があったことを忘れてはならないと思います．本誌をJTAの機関誌とし，雑誌の購読会員はそのままJTAの正会員に移行するという措置がとられましたが，JTA設立の経緯からすると当然の成り行きだったと思います．

当誌には創刊のころからの次のような伝統的な編集方針があります．

- トンネルにかかわる発注機関を網羅したお役所を中心にした編集委員会で審議
- 産官学の有識者にトンネル技術関連の課題や抱負を述べていただく巻頭言の掲載
- ビッグプロジェクトや難工事が予想される事業計画を臨機に掲載
- トンネルの施工記録を主体に編集(結果として国内のトンネル全貌が把握可能)
- 題名は簡明簡潔を旨とし，いわば新聞や週刊誌の見出し的なものとする
- 現場目線で，現場技術者(とくに若い技術者)が手軽に読めるものを目指す

若手技術者を対象とした連載講座の掲載

技術継承を意識した『語り継ぎ 言い継ぎいかむ』的連載の掲載

『現場便り』のようなトンネル建設現場の雰囲気を伝える記事の掲載

『Tunnel Wall』『トンネル千夜一夜』のようなトンネルにかかわる話題の掲載

寡聞にしてよくは存じませんが，本誌のように500号に至る刊行を続けている個性ある雑誌は，世界のトンネル技術界において皆無なのではと思っております．委員長としての約７年も含め，委員歴が40年近くになろうとする私ですが，委員になりたてのころ，「継続は力なりというが，本誌も発行を続けていくうちに，本誌を見るだけで日本のトンネル技術の歩みがわかる他に類を見ない雑誌になるはずだ．そのつもりで編集をして欲しい」と，当時の高坂紫朗委員長らがおっしゃっていたのを思い出します．

編集委員会や会誌WGは，「価値あるトンネルの記録を後世に残そう」という当誌伝統の重みを忘れることなく，この個性ある雑誌をより良きものへとする改善を図りながら，本誌の継続出版に努力をする所存であります．そのためにも，今後とも会員各位のさらなるご協力を切に願うものであります．

特集：地震とトンネル

トンネル，地震と断層と

(財)地域地盤環境研究所理事長(京都大学名誉教授) 足立紀尚

1 はじめに

地震には，2011年３月11日に発生した東北沖太平洋地震のようなプレート境界で生じる海溝型地震と1995年１月17日の兵庫県南部地震に代表される内陸型地震とがある．地震動の構造物に与える影響には基本的な差はないが，内陸型地震は直下型など近傍で生じることや場合によっては構造物が断層により切断される可能性もあり，トンネルは内陸型地震により被害を受けることが多い．しかし，海溝型地震の再来周期は100年オーダーであるが，内陸型地震のそれは1,000年オーダーであることは幸いというべきであろうか．

なお，地球を科学する者，また地球を相手にする技術者は，自然現象に関する情報を収集し，的確に予測する必要がある．むろん，すべての事象に対応できる対策の実施は不可能にしても，対策を超過する事象においては適切な対処策を立案しておくことが大切である．

2 丹那トンネルと地震

わが国のトンネルにおいて，関東大震災で幾多の鉄道トンネルが被災したが，はじめて地震および断層が話題となったのは，東海道本線の丹那トンネル建設時であったと考える．これに関しては，1923(昭和８)年12月，鐵道省熱海建設事務所発刊による『丹那トンネルの話』[1]が第一級の資料であり，これを引用しながら，当時を振り返ってみよう．

丹那トンネルは，国府津から御殿場経由で沼津に至っていた東海道線を小田原，熱海，三島を通り沼津へと短絡させるため建設された，全長7,804mの複線断面トンネルである．トンネルは，熱海側を1918(大正７)年３月に，函南側を同年７月に，工期７年の予定で着工したが，大出水事故などにより類をみない難工事となり，67名の犠牲者と16年半を要し，1934(昭和９)年に完成をみた．

建設途上の1930(昭和５)年11月26日午前４時，伊豆地方は激しい地震(北伊豆地震)に襲われた．函南口近くの大場，韮山地区では家屋の大半が倒壊し，圧死者も多数出た．地震時，坑内では，16名が作業中であった．坑内は停電で暗闇となったが，ボーリング中の４人と立坑掘削中の７人の計11名は無事脱出した．その後，２名は救出されたが，3,300m付近の崩壊で３名は犠牲となった．崩壊箇所を避けて，奥の第二水抜き坑を3,600m付近まで行くと，切羽に充塡しておいた松丸太がすべて45度程度，南に向きを変えていた．南側の第三水抜き坑に入ると，正面にきれいな断層鏡面が現れ水平に條痕がついていた．この断層を境に，東西の地塊が運動し，西側が南に2.4mずれたことが判明した．なお，3,600mの断層のほかにも，煉瓦巻きに亀裂の入った場所を調べると，いずれも不良地山区間であった．

1923(大正12)年９月１日の関東大震災の際には，函南方は，難航した1,500m付近の断層破砕帯を

掘削中であり，坑外は大騒ぎであったが，トンネル内では山鳴りがしたため崩壊だと逃げ出したものの，山には異常もなく，はじめて地震だと気がついたとのことである．丹那トンネルはこのように，1923年の関東大震災と1930年北伊豆地震の2回の激震を受けたが，それらによって，コンクリート巻きの部分に少々亀裂が入る程度で，掘削箇所の崩落を除けば，トンネルが破壊されることはなかった．

北伊豆地震の場合には，震源から近く，山鳴りや上下動を感じたが，地表に比べると震動は小さく，地震の後．丹那の地表とその直下の水抜き坑に地震計を設置してその後の地震を計測したところ，地下では地上の3分の1程度の震動であることが判明した．

3 青函トンネルと地震[2)]

青函トンネルには，地震に対しトンネル内の安全な輸送を確保することを目的に，地震防災設備が設けられている．この設備は，地震時における走行中の列車群を制御する警報地震計(NEWS＝New Earthquake Warning System改良型，設置箇所：中小国(蟹田より移設)，本州方トンネル入口(増川)，竜飛方出水断層部(トンネル入口から16km地点)，火砕岩脈部(同21km地点)，吉岡方不整合部(同30km地点)，F10断層部(同33km地点)，北海道方トンネル出口(湯の里)，木古内駅の8か所)と運転再開用の情報を提供するためのモニタリングシステムから構成されている．

モニタリングシステムは，青函トンネルの地震対策を特徴づけるもので，トンネルに被害をもたらす程度の地震であったか否かを早期に検知，判断する早期地震検知・警報システム(UrEDAS＝Urgent Earthquake Detection and Alarm System，設置箇所：増川(地表)，竜飛斜坑口(地表)，竜飛方出水断層部(16km地点)，火砕岩脈部(21km地点)，吉岡方不整合部(30km地点)，F10断層部(33km地点)，吉岡斜坑口(地表)，湯の里(地表)の8か所)，さらに覆工コンクリートの変状を検知するひずみ計およびトンネル湧水の異常の有無を検知する流量計で構成されている．1994年以降の主な地震による地表とトンネル内の加速度は以下のようであった．

北海道東方沖地震(1994年10月4日22時23分，M8.2，釧路で震度6)の加速度は，蟹田で65gal，木古内で53galであったが，海底部を含め，ほかでは検知しなかった．最大余震(10月9日16時55分)の加速度は，木古内で10galあったが海底部を含め，ほかでは検知しなかった．

三陸はるか沖地震(1994年12月28日21時19分，M7.6，八戸で震度6，青森震度5)の加速度は，増川で21gal，木古内で79gal，海底部の16km，21kmで8gal，30kmで9galであったが，その他は検知しなかった．最大余震(1995年1月7日7時37分)の加速度は，蟹田で34gal，木古内で26galであったが，海底部を含め，ほかでは検知しなかった．

2003年7月20日，津軽海峡でM4.1の地震があり，K-net松前郡福島で285galを記録したが，直近の青函トンネル33km地点では19galであった．

また，2011年3月11日に発生したM9.0の東北地方太平洋沖地震では中小国の71galに対し30km地点では10galであった．

陸地表面および海底部に設置した地震計の加速度を比較すると，木古内，増川など地表の加速度に対して海底部の加速度は1/10～1/4である．

4 おわりに

一般にトンネルは，構造物全体が地山で取り囲まれており，地震時の挙動は周辺地山の挙動に支配されるため，周辺地山が地震時に安定していれば，耐震性に富む構造物である．このため，地山が良好なトンネルでは，地震の影響を考慮する必要はないと考える．しかし，1995年の兵庫県南部地震では，被災地域内にあった100を超える山岳トンネルのうち，約10本のトンネルが補強・補修を要す被害を受けた．また，2004年10月23日の新潟県中越地震によるトンネルの被害も記憶に新しい．これらの被害は，1923年の関東大震災の際に，熱海以東の被災地域内にあった百数十本の国有鉄道トンネルの6割以上が補修や改築を要する被害を受けたことに比べればきわめて少ない．しかし，難航した箇所や断層部などでは地震による被害を受けることもあるから，北陸新幹線飯山トンネルの崩落箇所へのパネル設置[2)]に倣い，それらの箇所の覆工にパネルを設け地質状況や工事の難航度合いなどを明示しておくことを希望する．

参考文献

1) 鐵道省熱海建設事務所：丹那トンネルの話，1923.12.
2) 日本鉄道建設公団札幌工事事務所：青函トンネル維持管理関連文献II，1998.3，および鉄道・運輸機構からの資料提供．

わかりやすい トンネルの力学
B5判 286頁 本体価格 5,825円 〒340円
福島啓一 著

NATMの導入以来，トンネル工事の現場に計測が大幅に取り入れられるようになって，トンネルの力学がますます重要視されるようになった．
本書はトンネル力学の基礎的な事項に基づく問題点を経験則と理論則から説明し，設計・施工に携わる実務者がトンネルを掘るとき，また，計画・設計するときに考慮しなければならないトンネルの力学を主眼にした入門書である．

〔目 次〕 ○従来のトンネル力学の考え方／トンネル力学の発展，NATM以前の考え方／ゆるみ高さの推定，ゆるんだ地山の釣り合い，沈下量の差により変わる土圧，切羽の安定，地山の分類による支保の設計，NATMの考え方／せん断破壊説，変形による圧力の低減，地山のゆるみ防止，アンカーボルトによる地山の補強，地山挙動の時間依存，せん断破壊説による設計法，経験的設計法，地山分類と地山等級に対応した支保工の標準設計，NATM力学についての問題点，○弾性論による解析／弾性学の基礎，軸対称円形トンネル，線対称円形トンネルの弾性解，円形トンネルの弾性解析，地表面に近いトンネル，だ円形のトンネル，球形空洞周わりの応力と変位 ○弾そ性論による解析／そ性力学の基礎，軸対称円形トンネル，線対称円形トンネルの弾そ性解，円形トンネルで地山の自重を考えた弾そ性解析 ○弾そ性解以外の検討／トンネルの大きさの影響，時間の影響，表面の影響，山はね，ゆるみと締まり，地山のゆるみ，再圧密を考えた考察 ○その他の検討／二次覆工の役割とひび割れ，安全率，支保工の設計・観察・計測の解釈と逆解析，力学的に好ましい，または好ましくないトンネルの設計および施工法，有限要素法，トンネルと地下水

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

特集：地震とトンネル

地震と都市地下施設の整備

早稲田大学理工学術院教授　小　泉　　淳

1　はじめに

平成23年３月11日に，わが国は観測史上最大となるマグニチュード9.0の巨大地震にみまわれた．この地震により亡くなられた多くの方々のご冥福を心よりお祈り申し上げるとともに，被災された方々や，いまなお不便な生活を強いられている方々にお見舞い申し上げる．

わが国は４つのプレートが重なり合う地域に位置しており，「地震大国」であると言われて久しい．近年だけでも平成７年の兵庫県南部地震(M7.2)，平成15年の宮城県沖地震(M7.1)と十勝沖地震(M8.0)，平成16年の新潟県中越地震(M6.8)，平成19年の新潟県中越沖地震(M6.8)などが発生しており，それらのたびに多くの土木構造物が被災し，地震後の救出活動や避難生活に欠くことができないライフライン施設などにも大きな被害がもたらされた．これらの被災の経験から，国や自治体，公益企業者などは，耐震設計基準類の改訂や耐震補強工事などを順次すすめてきてはいるが，わが国の最近の厳しい経済状況のために，十分な資本が投入できておらず，重要度の高い施設からこれらの対策を優先的に施さざるを得ない実状にある．また，現在の科学技術では十分に解明できていない事象が多く残されており，想定外の事象に対するリスクが多く存在していることなどから，すべての施設について万全な対策を施すことは不可能に近いものと言わざるをえない．

今回，「地震と都市地下施設の整備」とのタイトルで書くように依頼された．地震に関する専門書は多くあり，先般の巨大地震の発生のメカニズムや甚大な被害の状況などに関する詳細なレポートも多く発表されている．都市部の地下施設にはその規模の大小だけでなく，面的に構成されたもの，線的なもの，点的に整備されているものなど，非常に多様な施設がある．これらに応じて地震時の挙動が異なり，とるべき対策も異なるものと考えられる．これらのすべてについて論じられるものではなく，また，論じる能力もないため，本稿の執筆を依頼いただいた当初はお断りしようかと思った．しかし，近々には，東京外郭環状道路や中央リニア新幹線などの建設工事への着手が報道されている．これらの建設工事は大規模な，いわゆる「国家的プロジェクト」ともいうべきものであり，かつ，われわれがこれまであまり経験してきていない「大深度地下」の領域で工事が行われる．

一般に，構造物の構築される深度が大きくなるにつれて水圧は大きくなるものの，地山は堅固な状態になり構造物に作用する土圧は小さくなる．また，大深度に構築される構造物は，耐震性の観点からみれば有利な状況になると思われるが，密閉性や閉鎖性が高いという地下施設の特性を考えると，それが保有すべき機能などは地上とはまた異なったものとならざるを得ない．今回の巨大地震のように，地震後の火災や津波などの二次的災害に対しては，どのように避難するのかなどの対策は十分に整理できておらず，課題が多く残されているように感じられる．そこで，地震に対して有利と思われている大深度の地下施設，とくに都市部のトンネルを中心に，その整備に際しての課題について以下に私見を述べることにした．

2　既往の被災事例からの知見

都市部の地下施設は，開削工法，シールド工法，ケーソン工法，推進工法，沈埋工法，HEP＆JESやURTなどの線路下横断工法，パイプルーフまたはパイプビーム工法，各種の地盤改良工法など多様な工法を用いて整備されてきている．これらのうち，比較的規模の大きな構造物の建設に多くの実績を有する工法は，開削工法とシールド工法であり，これらは現在，都市部の地下工事の代表的な工法となっている．今後，大深度の領域に地下施設を整備する場合にも，これら２つの工法は欠くことのできない工法と考えられる．まず，この２つの工法により構築された構造物を対象に，地震による既往の被災事例を整理し，都市部の地下施設の地震時挙動と今後建設される地下施設が具備すべき性能について考える．

開削トンネルは，その施工法の特性や経済性，掘削される内空の有効性などから，矩形断面で建設されることが圧倒的に多い．矩形断面の構造物は，その隅角部で曲げモーメントやせん断力が大きくなる特徴があり，地震時に構造物がせん断変形を生じるとこれらの断面力が累加して大きくなる特徴がある．

兵庫県南部地震の以前までは，地震時に地盤と一緒に挙動する地下構造物は，地上の構造物に比べて地震に強い構造物であると考えられてきており，特別な場合を除いて耐震検討を実施することはほとんどなかった．しかし，この地震で神戸市高速鉄道の大開駅で甚大な被害が発生したことはわれわれの記憶に新しい．

大開駅は，相対式のホームを内含する１層２径間と２層２径間のボックスカルバートで構成されており，このうち１層２径間部分の鉄筋コンクリートの中柱に甚大な損傷が生じた[1]．断面が左右対称であるならば，中柱には常時の状態で軸圧縮力のみが生じていたと推定できるが，地震時の変形によりその隅角部に大きな曲げモーメントとせん断力が作用して，完全に破壊した．この大開駅の事例では，土に接する両側面の部材の中央部には，軸方向のひび割れが連続してみられたものの，中柱のような破壊には至っていない．中柱は上床版と下床版を支え，鉛直方向の土水圧荷重を受ける重要な部材であり，この中柱の破壊の結果として，上床版の中央部が落下してトンネル断面が崩壊した．これにより，鉄道施設としての機能を喪失しただけでなく，大開駅直上の国道に大きな陥没を発生させて，周辺地域の救出活動や避難生活にも多大な影響を与えた．

兵庫県南部地震でのこの被災を経て，国や自治体は緊急的な耐震措置を命じるとともに耐震基準類の整備をすすめ，各企業者は耐震補強工事を順次進めてきた．その結果，この地震以降，開削トンネルには地震による軽微な損傷事例が多少みられるものの，トンネル断面が崩壊するような甚大な被害は報告されていない．現在では，兵庫県南部地震の経験を反映した耐震基準類にもとづき，開削トンネルの設計では原則的に耐震検討を実施するようになってきている．

一方，シールドトンネルは，力学的に有利な円形断面が圧倒的に多く，数多くの継手を有する比較的柔な構造であること，トンネルの建設位置が開削トンネルと比較して深いことなどもあり，これまでのところトンネル断面が崩壊するような甚大な被害は発生してない．

シールドトンネルの被災事例[2]としては，メキシコ・ミチョアンカ地震(1985年，M8.1)や兵庫県南部地震の事例がよく知られている．これらの被災事例の特徴は立坑部近傍でのリング継手ボルトの破断やセグメント端部のコンクリートの剝落，また，二次覆工内面の軸方向のクラックの発生などであり，トンネルとしての機能を喪失するような被害はいまのところ皆無である．これらのほかに，新潟県中越沖地震における排水路トンネルの

被災事例があるが，この事例ではトンネル円周方向の二次覆工に，セグメント幅の間隔でひび割れが発生した．ひび割れの発生状況からみると，トンネルが軸方向に伸縮したものと思われる[3]．

また同じ円形断面をもつ構造物であっても，浅層部に設けられた管渠やマンホールなどでは，地盤の液状化による浮き上がりや埋戻し部の地表面の沈下などの被災が多くの地震で確認されている．しかし，比較的深い位置に建設されているシールドトンネルではこのような事例は報告されていない．

以上のことから，既往の被災事例によれば，とくに円形断面をもつ地下構造物は，地上の構造物に比べて耐震性能が比較的高いと考えることができる．一方，矩形断面の地下構造物においても，所要の変形性能を有するような部材を用いれば，トンネル断面が崩壊するような甚大な被害を生じる可能性は小さいものと思われる．大開駅の事例でも，中柱が上下の床版と剛結されていなければ，トンネル構造全体の崩壊には至らなかったかも知れない．また，トンネルは横断面方向が主断面であり，トンネル全体の崩壊を防ぐためには，トンネル横断面が保持されていればよく，トンネルが輪切り状態になったとしても，構造上の問題はない．もちろん，この場合には，地下水や土砂がトンネル内に流入して，トンネルを使用するうえでの機能が確保できない状況になることも予想される．トンネルの地震時の挙動について，とくに着目すべき点は，地盤の変形を吸収できるような柔軟な構造が望ましいという点にある．万が一の際にも部材が甚大な損傷を発生しないような性能を付与することが必要である．

3　大深度における都市地下施設の整備の課題

大深度地下は地盤が堅固であり，せん断波速度も十分に大きく，いわゆる耐震設計上の基盤に相当する場合も多い．この領域では発生する地盤変位は一般に小さく，構造物の耐震上の問題は多くないように思われる．しかし，大深度地下に構築される構造物には，どのような形状の構造物であっても地上へのアクセスが必要となる．立坑や斜坑，らせん状坑などのアクセス構造物は，大深度の堅固な地盤から軟弱な地盤を通って地上に出ることになるが，この場合には，地表からの深さに応じた地震時の地盤変位を受ける．また，トンネルのような線状に長い構造物は，堅固な地盤だけでなく軟弱な地盤を通過することもあり，場合によっては活断層などを横断することも考えられる．トンネルが特性の異なる地盤や断層を横断するような場合には，地震時に地盤の境界付近で大きな地盤変位の差が発生する．これらの場合に，構造物の強度を増しても発生する地盤変位に抵抗することは困難である．

構造物に力が作用する場合には，例えば式(1)に示すように，部材の断面積を増やして発生する応力度を制御することができるが，地中の構造物は地盤変位，すなわち，ひずみを受けるため，例えば式(2)のように，部材の断面積を増やすのではなく，部材の剛性を落として変位を吸収し，発生する応力度を減少させることで，部材の破壊を抑えることになる．一方で，剛性を落としすぎれば変形は増大し，構造物の機能を損なうことから，その兼ね合いがもっとも重要な視点になるものと思われる．トンネルに限っていえば，少なくとも主構造であるトンネル断面の崩壊を防ぎ，トンネルの施設としての機能を喪失しないように，または，一時的に機能を喪失したとしても短期間で機能を回復できるようにすることが要求される．

$$\sigma = P/A \tag{1}$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{2}$$

シールドトンネルが地震に対して強いのは，継手を有する柔構造であることによる．斜坑やらせん状坑などのアクセス構造物はシールド工法によって構築されるものと思われるが，立坑の構築にケーソン工法や地下連続壁などによる開削工法を適用する場合であっても，その断面形状は円形が有利であると考えられる．また，大深度地下に面的にまたは立体的に広がりをもって整備される地下構造物は，大きな水圧に対して有利な球状やドーム

形状になるものと思われ，やはり曲面形状をもつ断面が耐震上も有利になると考えられる．

これらの構造物の主断面を構成する部材には，その急激な破壊を防ぐために適切な変形性能を付与することが要求される．また，内空断面を必要な大きさよりも大きくして，ある程度の変位やずれが許容できるようにしておく配慮も必要になる．

立坑はシールド工事中には資機材の搬入や掘削土砂の搬出に使われるが，トンネルの完成後には点検や補修・補強などのためのアクセス構造物としても使用される．現在のところ，大深度地下にまで達する立坑は少ないこともあって，中浅深度の立坑と同様に相当に剛な構造として設計され構築されている．立坑の床付けが支持層を超えて大深度の堅固な地盤まで達すると，地震時には立坑の途中に片持ちばりの固定端に近い状態の部分が存在することになり，そこには大きなせん断力と曲げモーメントが発生することが予想される．このような断面力が発生する近傍では，立坑は剛な構造ではなく柔構造とすることが望ましい．どのようにして柔構造の立坑を施工するかは，今後の検討課題の一つとして考えておく必要がある．

現在，都市部の地下施設を日常的にどのくらいの人々が利用しているかは定かではないが，首都圏では少なくても何百万人かの人々が通勤や通学などの移動のために，また，地下街でのショッピングやそこで働くために，地下施設を利用しているものと想定できる．東日本をおそった先の地震では，その発生から30分程度で津波が到達したり，潮位が上昇したりすることを学んだ．わずか30分の間に地下にいる人々のすべてを地上のしかもそれなりの高さへ避難させることは困難であると思われる．

地下には閉鎖性や密閉性が高いという特性がある．一度地下に入ってしまえば，限定されたアクセス部以外からの脱出は困難である一方で，津波による浸水を食い止めることは容易である．このような特性を積極的に活用して，例えば，アクセス部のすべてに防水扉のようなものを設けて浸水を一時的にロックアウトしたり，地下にいる人々を一定期間地下に留まってもらったりするための避難設備を設けることは十分に可能である．もちろんそのためには，飲料水や食料などの必要量の備蓄や，酸素の供給や照明などに欠かせない電力の確保が必要である．電力の供給施設は地上部にあることが多いが，今回の津波では，非常用の電力供給設備は地上にあったため，浸水によってその機能が失われた．現在では都市部にあるほとんどの変電所が地下に作られており，燃料の供給や換気などの課題はあるものの，非常用電源を完全に遮水された地下に置くなども検討してよいものと思われる．

また，地震とは直接的な関係はないが，都市地下の今後の大規模な整備を考えるうえでもっとも重要な点は，掘削により生じる土の処理の問題である．東京外郭環状道路や中央リニア新幹線の建設工事では，その断面の大きさやトンネルの長さから相当量の掘削土が生じる．これらの工事では建設発生土のトンネルからの搬出，地上での運搬，処分の方法や場所が最大の課題になるものと思われる．このような大プロジェクトで発生する掘削土の量は半端なものではなく，これを船舶や鉄道などによって，先の巨大地震で広大な範囲にわたって地盤沈下が生じたところに運搬し，埋立てや盛土の材料として使用することは考えられてもよいことのように思われる．そのためには政と官が連携して，喫緊に必要な法整備を行うとともに，国費を投じてこれらの建設プロジェクトによる掘削発生土を復興プロジェクトに有効に利用するような新たな都市整備計画の枠組みも是非考えて欲しいところである．

脱線ついでにもう一つ二つ述べる．東京外郭環状道路や中央リニア新幹線の建設では，大量のセグメントが必要になる．詳細に調べたわけではないが，わが国の主要なセグメントメーカーの現在の年間製造能力はせいぜい20万m^3，多く見積もっても25万m^3程度と思われ，2つのビッグプロジェクトが同時期に重なれば，いくつかのほかの工事なども予想されており，セグメントやそれに使用する材料の供給が間に合わなくなる恐れが強い．

工事に着手する早い段階，あるいは，工事に着手する前の段階からセグメントの製造を開始したり，メーカーがJVを組んで，セグメントの現地生産に踏み込んだりすることも考えておかなければならない．

いまひとつは，福島の原子力発電所の被災によって生じた放射能汚染土などの廃棄物の問題である．とりあえず中間処分を行うとのことであるが，最終処分地やその処分方法は決まっていない．セシウムなどの自然崩壊を待つつもりなどとは考えないにしても，これらを海に投棄できない以上は，土中に埋めざるをえないことは誰の目にも明らかである．このようなことに大深度地下を使うのは残念であるが，それしか残された道はなさそうである．逃げてばかりではなく，土木技術の総力を挙げて真剣に取り組まなければならない状況にある．

4　おわりに

以上，だいぶ脱線したが，地震と今後の都市地下整備についてその課題を述べた．現在までのところ，地上の構造物に比べて地下構造物は地震やその後の二次的災害に強い構造物であることは間違いなさそうである．しかし，一部の事例を除いて，地下構造物が甚大な被害を経験していないという実績だけを過信するのは危険であり，想定外をつねに想定内にする努力が要求される．これまで，都市部の地下施設の整備は，事業者ごとにばらばらに行われてきたが，今後はこれらを横断的に連携させて整備を進めることが，とくに重要であると思われる．

最後に，震災の復興に寝食を忘れて文字どおり不眠不休で取り組んでおられる多くの土木技術者の方々に敬意を表してこの稿を閉じる．

参考文献

1) 例えば，土木学会ほか：阪神・淡路大震災調査報告，土木構造物の被害原因の分析，1999.8.
2) 例えば，土木学会：シールドトンネルの耐震検討，トンネルライブラリー第19号，2007.12.
3) 谷ら：中越沖地震におけるシールドトンネルの被災事例，土木学会論文集A，Vol.66，No.1，pp.56-67，2010.

『トンネルと地下』投稿原稿応募のご案内

1. 原稿は弊社ホームページ(http://www.tunnel.ne.jp)に掲載されている投稿規定により執筆して頂きます．
2. 原稿のボリュームは，原則として刷上がりで8頁以内とします(図・表・写真含む)．
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支払いいたします．
5. 原稿は，原則として返却いたしません．

(注：「現場だより」の投稿は受付けしておりません)

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)



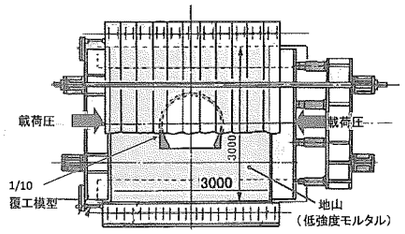
1　はじめに

初めにお断りしておくが，本稿は筆者が30年あまり前に地震とトンネルにかかわりをもって以来の筆者の経験と，その経験を通じて得た技術的な知識について回想したものであり，決して厳密な約束事にもとづいて書かれた論文ではない．もし，本稿に書かれた内容に興味をもたれ，さらに詳しく技術的な内容を知りたいと思われる方は，末尾に示された参考文献を参照されたい．

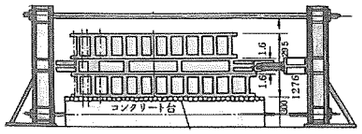
2　1979(昭和54)年

この年の10月，筆者は国鉄入社後の1年半の研修と2年の現場経験を経て，鉄道技術研究所トンネル研究室に配属された．最初に命じられた仕事が「トンネルの耐震補強」のためのロックボルト工の補強効果に関する実験(図-1, 2)であった．

国鉄では1960(昭和35)年から地震対策の研究を進めていたが，1978(昭和53)年に，発生が懸念されるマグニチュード8クラスの東海地震を想定して公布された「大規模地震対策特別措置法」に対応するために「鉄道土木構造物耐震強化の研究委員会(委員長：岡本舜三・埼玉大学長(当時))」[1)~3)]を日本鉄道施設協会に設置した．土木，地震の大先生，国鉄の技術系幹部を網羅する大委

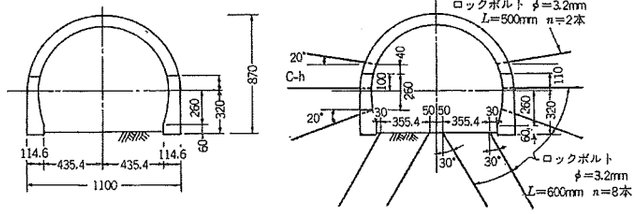


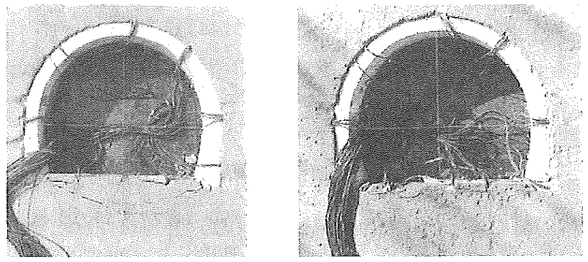
(a)　上面図



(b)　側面図

図-1　模型実験装置[10)を修正]





(a)　ボルトなし　　(b)　ボルト補強

図-2　ロックボルト補強効果に関する模型実験結果の一例[10)]
(インバートがないと地圧(側圧)の増大により路盤部にせん断破壊が生じる．ロックボルトはそれに抵抗することで効果を発揮する．)

員会であった．この委員会は後に「鉄道地震対策の研究委員会(委員長同上)」[4)~8)]に引き継がれることになるが，上記の研究は，この委員会の活動の一環として計画されたものであった．

実験は新幹線複線トンネルの1/10模型を用いて行われ，インバートの効果やロックボルト補強によるその代替効果などが確認された．その成果は『トンネルのロックボルトによる耐震・補強工設計・施工指針(案)』[9)]に活かされ，さらに東海道新幹線興津トンネルにおける試験施工へと結びついた．

当時，実験は若手研究員による直轄作業が当たり前の時代で，予算がつくのが遅いため，毎年冬の寒風のなか実験準備作業を行っていたことが懐かしく思い出される．また，委員会において実験結果の報告を行った際，「具体的にどのように耐震補強工事の設計に反映させるのかね？」と想定外の質問をされ，答えに詰まって目を白黒させたものである．

3　吉川恵也氏によるトンネルの震災事例調査

前項で述べた模型実験に先立って，上司の吉川恵也主任研究員(当時)は過去の鉄道トンネルの震災事例調査を行い[10)]，その結果を『鉄道技術研究報告』[11)]にまとめておられた．これは1923(大正12)年の関東地震から1978年(昭和53年)伊豆大島近海地震までの7地震による鉄道トンネルの被災事例を，震源断層からトンネルまでの距離(図-3)，被災状況，被害要因としての地形・地質・構造などの条件に関して要因分析したもので，その後のトンネル地震対策の研究の基礎を築いた画期的な成果と言える．

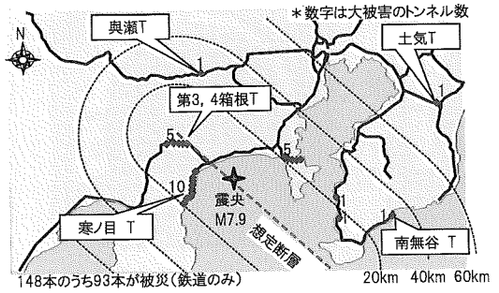


図-3　関東地震の被害マップ[10),11)を修正]
(吉川氏は，トンネルと震源の離隔を震央距離ではなく，震源断層面からの距離で整理している．)

吉川氏はこの報告の中で，①特殊条件の介在によって被害規模が拡大する．②経年が長いほど被害が大きくなる．③震度が大きいほど被害が大きくなる．④深部の被害は特殊条件(図-4)が介在した場合にのみ発生する．などの傾向をデータにもとづき示し，さらに耐震対策の要点を簡潔にまとめている．

筆者を含む以降のトンネル耐震の研究は，すべてこの吉川氏の築いた基礎の上に立っていると言っても過言ではない．

4　その後のトンネル震災事例調査

鉄道構造物に被害がでるような地震が起こると，国鉄では本社，鉄道技術研究所，構造物設計事務所が調査団を組み，現地局と協力して被害状況と被害原因を調べ基本的な復旧方針を立てた．筆者も1983年(昭和58年)日本海中部地震での調査に加わったのを皮切りに，各地に出かけ経験を重ねた．

1987年(昭和62年)千葉県東方沖地震[12)]では，外房線のトンネルを中心に調査を行ったが，一部トンネルで目地切れによるコンクリートブロックの落下が見られたが，ほとんど無被害と言ってもよい状況であった．ところが震央から100km以上も離れた中央本線横吹第1トンネルで被害が生じた(図-5)との報告があった．本トンネルは破砕質の砂岩・頁岩の互層という地質条件に加え，側壁直という力学的に不利な構造ゆえに既に変状が生じていたもので，地震動により側壁が最大9㎜押し出した．

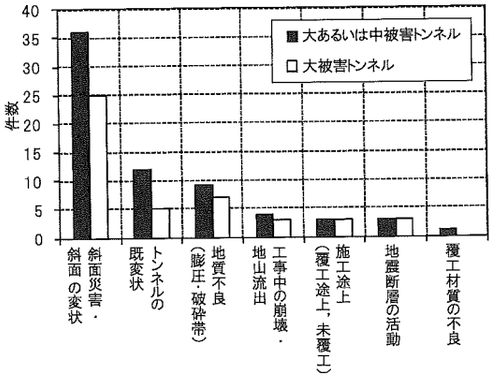
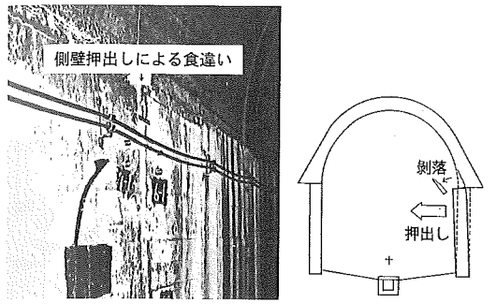


図-4　特殊条件の介在頻度[10),11)を修正]
(「斜面災害・斜面の変状」の頻度が高いのは，関東地震により多数の斜面災害が発生し，多くのトンネルに「もらい災害」が発生したため)



(a)　被害写真　　(b)　変状模式図

図-5　横吹第1トンネルの地震被害[12)]
(側壁直の構造は，側圧にきわめて弱い．同様の被害が他の地震でも発生している．)

報告書をまとめる段階で，あまりにも離れたところに被害がプロットされることになり，地震の専門家は地震による被害事例に含めることを嫌がったものである．

この経験から，地震被害の距離依存は当然ではあるが，地質条件や構造条件の影響が大きいという(今思えば当たり前のことであるが)事実を強く実感する機会となった．

ちなみに，わが家では地震速報で震度5が報じられると直ぐにキャンセルできる予定をチェックし，財布の中身を確認し，作業服などの準備にかかる習慣になっている．何時でも調査要請に応えられるように備えるわけである．震度4以下だと何も準備しない．

5　1995(平成7)年兵庫県南部地震

筆者は，当時，多忙な業務の合間を縫って学位論文の仕上げにかかっており，まさに盆・正月もない毎日を送っていた．そこに1月17日朝5時46分，実家のある神戸を含む阪神地区を直下型地震が襲ったのである．

5-1　震災直後の調査(六甲トンネル)

震災直後は，実家にも連絡がとれず(17時間後に実家半壊なるも怪我人なしの連絡を受けた)，被災域内とは全く連絡が取れなかった．2日後にJR西日本より山陽新幹線六甲トンネルの被害が酷いようなので調査に協力するよう要請があり出かけた．JRから調査に同行するのは構造物検査センター所長と保線区長の2名である．要は危険を伴う調査であり，管理職で対応，とのことだったらしい．

トンネル内は覆工コンクリートの剝落跡が多数あり，惨憺たる状況であった．被害の状況をキロ程ごとにメモしながら写真を撮り，空腹にめげそうになりながらも16km余りを歩き切った．途中，疲労で朦朧となりつつあるとき，ゴオーという山鳴りを聞き，トンネルで死ねば本望，などと悲壮なことを考えたりした．トンネル内で地震に会い山鳴りを聞くのは，伊豆群発地震の際に，建設中の新宇佐美トンネルで経験して以来2回目であった．

調査を終えてJR本社ビルに戻り，早速調査結果をまとめる．被害程度の大きい12か所を大被害箇所と定義して，被害状況，想定されるメカニズム，復旧対策の基本方針を整理し，時計をみたらもう明け方であった．会議まで少し時間があったので，被害箇所を工事記録と照らしてみると，驚くべきことに大被害箇所のほとんどが高圧の集中湧水や膨圧などで難工事を強いられた断層破砕帯などの地質不良箇所に位置していた(図-6参照)．

5-2　劣悪な作業環境と入坑制限？

地震直後のトンネル内は剝落したコンクリート塊が散乱し，また剝離して落下しそうな箇所も多く大変危険な状況にあった．また16kmを超える長大トンネルではあるが坑内の移動手段が徒歩によるしかなく，さらに停電中の復旧作業のため坑内で発電機を運転せざるを得ず，きわめて換気状態が悪かった．しかしながら，JR社員の献身的努力によって何とか早期復旧へと工事が進められていった．「完全徹夜3日目になると歩きながら寝てしまいます．」との言葉も聞いた．

そんな状況の中，六甲トンネルへのトンネルの専門家の入坑申請が相次いだそうである．JRでは，危険なこと，移動手段がないこと，早期復旧を目指しており案内に人が割けないこと，いったん認めると次から断れなくなることなどのため，調査のための入坑を一切お断りしたそうである．

そんな中，ただ一人社員以外で入坑を要請され，復旧のために協力を続けたわけであるが，事情が十分に理解されていなかったためか，JRのみならず筆者までが謂れのない責めを受けたこともあった．

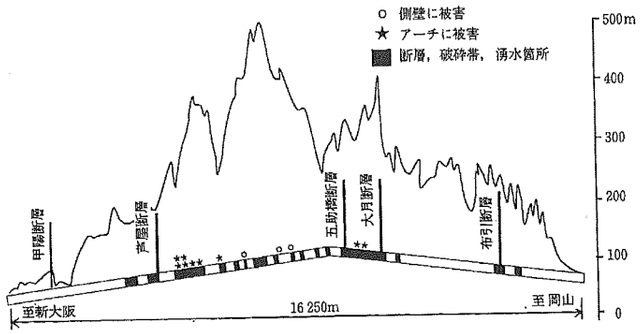


図-6 六甲トンネル縦断図と被災箇所[13]
（大被害は難工事区間と一致する．またアーチの被害と側壁の被害には規則性があるようだ．）

もちろん被災状況をその道の専門家に見ていただきき，以降の技術の進歩に役立てることは重要であるが，反面JRの事情も理解できるので複雑な立場，心境であり，ずいぶん責任とプレッシャーを感じたものである．

筆者はこの経験以降，地震が発生しても，前述のように準備はするが，決して自分から調査させて欲しいとは言わず，要請があって初めて出かけるようにしている．

5-3 断層が動いた？

上述のように，トンネルに入坑できる人が限られていたためか，六甲トンネルは断層が動いてトンネルが屈曲してしまい列車が走れなくなったのではないか？ とまことしやかに囁かれ，マスコミから質問を受けた．六甲トンネルは建設時，著名活断層が5本も横切っており，断層の巣であるためトンネルを建設すべきではない，との主張もあったので，このような懸念が強かったものと考えられる．

確かに1930年(昭和5年)北伊豆地震では，建設中の丹那トンネルで水抜き坑切羽において約2.3mの横ずれ変位が生じているし[14]，1978年(昭和53年)伊豆大島近海地震では，伊豆急線稲取トンネルで数十cmの横ずれ変位が生じている[15]．また，兵庫県南部地震でも震源近くの塩屋谷川分水トンネルを横切る横尾山断層が動き，輪切り状にひび割れが生じている[13]．

列車運転再開を控えてトンネルの中心測量を行った結果，幸いなことに六甲トンネルと交差する著名活断層に残留変位を伴うようなずれは生じなかったようである．ただし，地震動に伴う地山の変形挙動の結果，トンネル幅が広がった区間，狭くなった区間があり，場所によって卓越するせん断変形モードが異なっていたことをうかがわせた．

5-4 炭素繊維シートによる補強

復旧対策は，小規模なひび割れや剥落に対しては，叩き落とし，断面修復(アンカー付き)が採用されたが，大被害箇所(前出)に対しては大きくひび割れ，剥離した覆工を一体化して安全を図るために，叩き落とし，断面修復に加えてロックボルト工と炭素繊維シートによる内面補強工を採用した[13]．

当時，新素材を活用した変状トンネル補強法として，炭素繊維シートを研究していたこともあり，内空断面を侵さず，かなりの補強効果が見込めるということで，本工法を提案し，採用されたものである．まださほど実績のなかった工法ではあるが，列車が通っていない状態で工事するので問題はないものと考えていた．酷い被害を受けた高架橋が案外と順調に復旧が進み，トンネルが運転再開のネックにならないかと心配しながらも無事工事を終え，ホッとしたものである．

ところが問題はその後に訪れたのである．列車運転再開に向け試運転が始められたが，六甲トンネルで車両のモーター故障が何回か起きたのである．調べてみると，張り付けた炭素繊維シートの端部をグラインダーで削って整えたときに発生し，バラスト上に飛散した微細な削りかすがフィルターを通ってモーターに吸い込まれ故障の原因になったらしい．

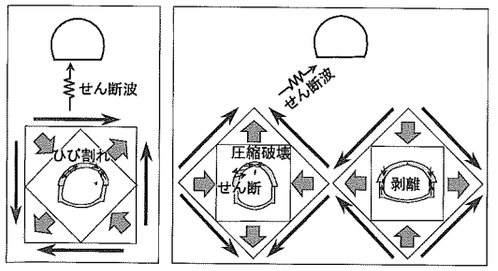


図-7 せん断波入射角と被害パターン[16]

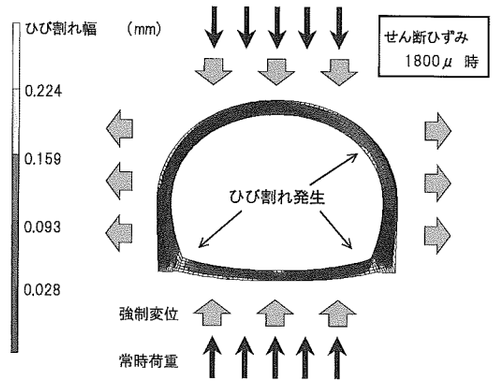


図-8 斜めひび割れの図面[16]
（常時の地圧が作用していると想定した解析でようやくせん断破壊が生じた．）

また，張り付けたシートの一部が壁面から剥がれて列車風に舞い，それが電車線に触れて短絡し列車を止めたことも一度ならずあった．

炭素繊維シートを提案した者として，申し訳なく，身の縮む思いであった．以降，少なくとも電化された線区のトンネルで炭素繊維シートが使われることはなくなった．

5-5 被害メカニズムの検討

六甲トンネルの特徴的な被害形態(アーチ部のせん断破壊，アーチ天端の曲げ圧縮破壊，逆巻き側壁迫め部のせん断破壊)を再現すべく種々の条件でひび割れ進展解析を行ったが，なかなか実際の被害のような形態でひび割れや破壊が生じなかった．結局，試行錯誤の末，トンネルを変状させるような常時荷重を加えた状態で地震によるせん断変形を与えると，アーチ部のせん断破壊や逆巻き側壁迫め部のせん断破壊が表現できた．

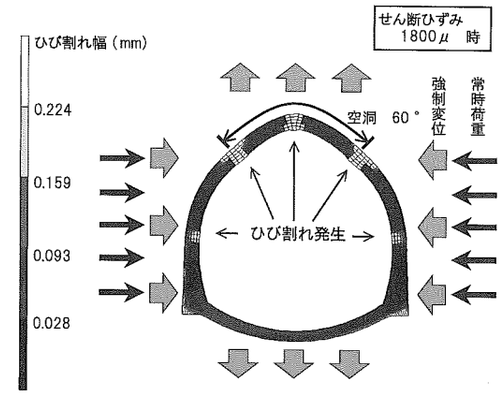


図-9 圧ざの図面[16]
（天端背面空洞を想定すると局所的な曲げが生じ，圧ざ(曲げ圧縮破壊)が生じた．）

また，アーチ天端背面に空隙を設けてやることによって初めてアーチ天端の曲げ圧縮破壊が表現できた(図-7～9)．

このことは，地震被害は，もちろん大きな地震エネルギーであるほど，また，震源から近いほど，生じやすいのであるが，それらが同じ条件であっても(断層破砕帯のように)地質条件が悪く，また構造条件に問題のある箇所で選択的に被害が生じることの裏づけになるものと考えてよいであろう．

6 2004(平成16)年新潟県中越地震

2004年10月23日17時56分にマグニチュード6.8の直下型地震が中越地方を襲った．新潟県川口町の震度7をはじめとして震度5以上の地域が広範囲に広がっており，前述したように，これはかなりの被害がでた可能性があると考え，出かける準備だけは整えた．

夜中の3時半ごろであったろうか，案の定JR東日本より電話があり，「新幹線トンネルの被害調査を依頼したい．翌朝，ヘリコプターで迎えに行くのでそれに同乗してほしい．」とのこと．いったい京都市山科区の街中のどこに着陸するのだろう？ と思っていたら再度電話があり，「ヘリコ

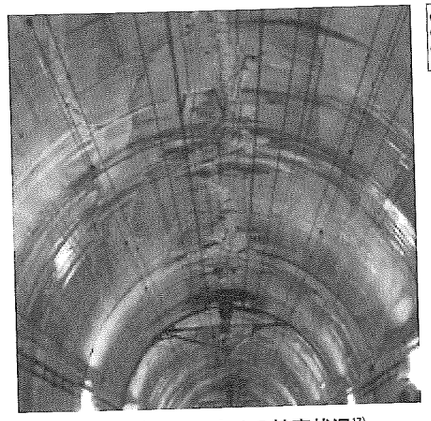
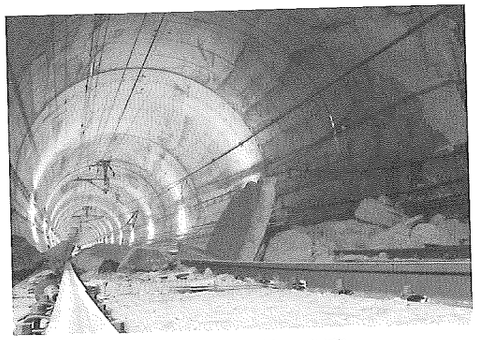


写真-1　妙見トンネルの被害状況[17]

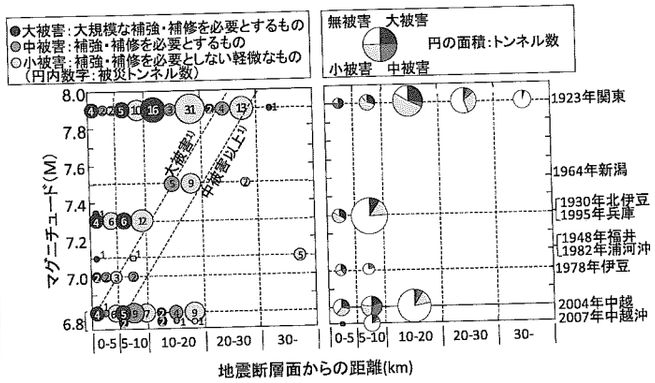


(a)　アーチ肩部の剥落



(b)　路盤部の隆起

写真-2　魚沼トンネルの被害状況[17]



(a)　被害トンネル数　　(b)　被害割合

図-10　地震の規模，断層面からの距離，トンネルの被害の関係[21]

プターは他用で使えなくなったので，飛行機で来られたい．」ということで，伊丹から一番機で新潟空港へと飛んだ．後は自動車で長岡を経由し，滝谷トンネル(延長2,673m)，妙見トンネル(延長1,459m)，魚沼トンネル(延長8,624m)と順次徒歩にて被害状況を調べた．今思うと，往復で30kmもよく歩けたものである．

徐々に震央に向かって近づくにつれ，被害の跡が見られるようになってきた．滝谷トンネルでは被害箇所も少なく，あまり大したことはないな，と思っていたら，妙見トンネルでは1995年兵庫県南部地震の時の六甲トンネルと同様なアーチ部の圧ざ(**写真-1**)に加え，一部，路盤隆起が見られた．さらに魚沼トンネルの震央直上近くまで来ると，覆工コンクリートがアーチ肩部から側壁にかけて大きく剥落している[17]．ただ地山は崩れていないので，見た目は酷いが案外復旧は早いかな，と思ったが，軌道を見るとかなりの隆起が見られる(**写真-2**)．もし，インバートが破損し，路盤部の地山から浮いているなら，レール撤去→スラブ版撤去→インバート取壊し・撤去→(必要な場合)地盤改良→インバート打設→スラブ版敷設→レール敷設，それにアーチ部の復旧と工期を要し，年内開通は難しいぞ，と算盤をはじいた．

翌日のJR本社における復旧計画の会議に出られたし，ということで，新潟から直接東京へ移動する手段がないため，新潟から伊丹乗換えで空路東京へ移動した．会議で被害状況と概略の復旧方法の案を述べ，年内復旧が叶うか否かは，インバートが地山から浮いているか否かにかかっている．早急に調査するよう進言した．「余震が続いているので，落ち着いたら早急に調査する．」と言われ，内心，私は昨日トンネルに入っていたんですよ，と少々憤慨したものである．後日，幸いにもインバートは浮いてはおらず，何とか12月28日に運転再開にこぎつける，との報を聞きホッとしたものである．

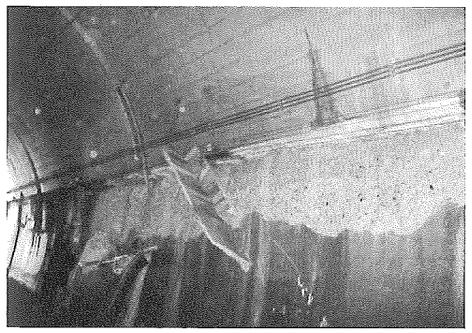
なお，この地震では地震規模に応じた被害範囲の関係が従来の実績から大きくはみ出していた(**図-10**)[21]．被災地域がグリーンタフ地域でかつ山岳地帯にあり，比較的不安定な地形・地質条件であることに起因しているものと考えられる．

7　2007(平成19)年新潟県中越沖地震

2007(平成19)年7月16日10時13分に中越沖の海岸線に平行な二つの断層を震源とする地震が発生した．この地震でも依頼を受けて鉄道トンネルの被害調査を行った．被害を受けたトンネルの数は少なく，震源断層の延長線上に被害トンネルが位置しているのが特徴である．被害はアーチ部覆工の曲げ圧縮破壊，側壁部のせん断破壊(**写真-3**)といった，これまでの地震被害で見られたパターンであった．これは，震源からの方向性に起因するものというよりは，被害地域の地質構造の特異性によったものと考えられる[22]．



(a)　天端圧ざ(第一米山トンネル)[19]



(b)　側壁圧ざ(第二米山トンネル)[19]

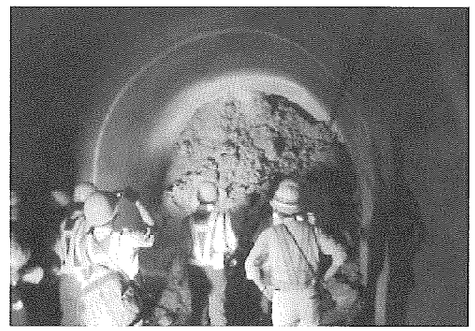
写真-3　中越沖被害写真[19]

なお，この地震で，すでに廃線になっていた古い煉瓦造りの単線トンネルのアーチ部が崩落し，地山がトンネル内に崩積していた．これは1923年関東地震で，いくつかのトンネル(土気トンネル，南無谷トンネルなど)で見られた被害形態と類似している(**写真-4**)．煉瓦積みのようなブロック積みトンネルは，アーチ部に地山の緩み荷重を受けていると，地震時の横断面方向の揺れによって軸力が抜け，崩落が生じやすいものと推察される．

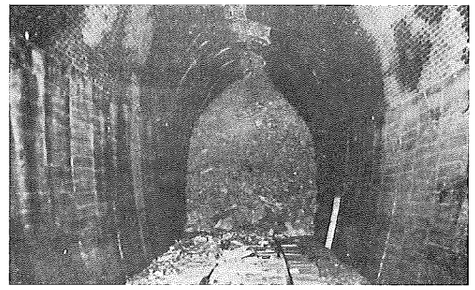
8　2011(平成23)年東北地方太平洋沖地震

2011(平成23)年3月11日14時46分に東北日本の東方沖約130km，深さ24kmを震源とするマグニチュード9.0の巨大地震が発生した．この地震の本震により東北日本で広く震度6強が観測され，最大震度は7であった．

この地震により，巨大な津波が発生し，死者・行方不明者あわせて約20,000名，負傷者約6,000名，



(a)　旧第一米山トンネル(煉瓦＋吹付け)[19]



(b)　南無谷トンネル[20]

写真-4　煉瓦トンネルの地震被害
(煉瓦積アーチは荷重増大には強いが，除荷による軸力低下には弱い．)

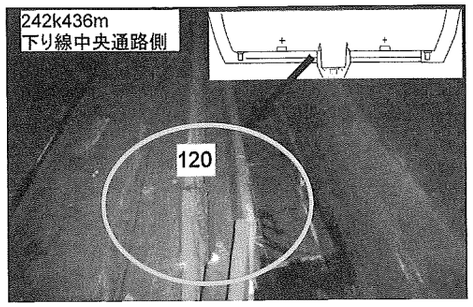


写真-5　ひび割れ状況[23]

被災家屋約900,000棟などの被害が生じ，道路構造物，鉄道構造物，海岸構造物，港湾構造物，発電設備などにも多数の被害が発生した．

今回の地震はマグニチュード９と地震規模は巨大ではあったが，震源からトンネルまでの離隔が130km以上と大きかったため，トンネルの被害は少なかった．道路トンネルではほとんど無被害であった．鉄道トンネルでも被害は比較的軽微であり，復旧工事を要するほどの被害は新幹線で４トンネル，在来線で13トンネルであった[23]．大半はアーチ部覆工の小規模な剝離・剝落であったため，復旧工事も剝離した覆工コンクリートの叩き落とし程度の軽微なものがほとんどであった．

筆者は，JR東日本の要請を受け，東北新幹線福島トンネルと志賀トンネルを調査したが，もっとも被害が大きかったのは，福島トンネルであった．福島トンネルは震源からの距離が約150km，延長11,705mの複線トンネルで地質は凝灰岩，泥岩で褶曲しており，主な被害は中央通路の損傷，路盤部の隆起に伴う軌道変状であった．覆工コンクリートの崩落，あるいはアーチ部や側壁部にひび割れ，剝離，剝落などは発生していない．

中央通路と路盤コンクリートの間には最大120㎜の開口が生じた(**写真-5**)．**図-11**には下り線，**図-12**には上り線の軌道の水準測量結果を示す．これによると軌道隆起は約250m間のみで生じ，最大隆起量は150㎜程度である．トンネル内空断面の幅については，被害のなかった区間を基準とした場合，最大175㎜程度の縮小となるが，建築限界に支障はなかった(**図-13**)．被害の原因は，軟弱で複雑な地質構造に加えて，厚さと曲率が不

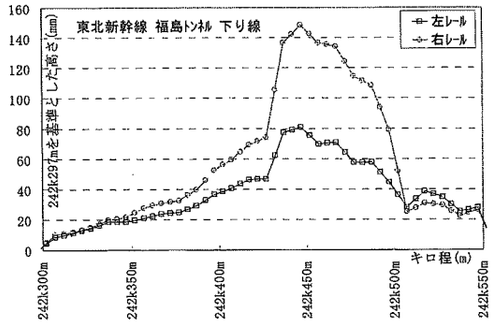


図-11　軌道の水準(下り線)[23]

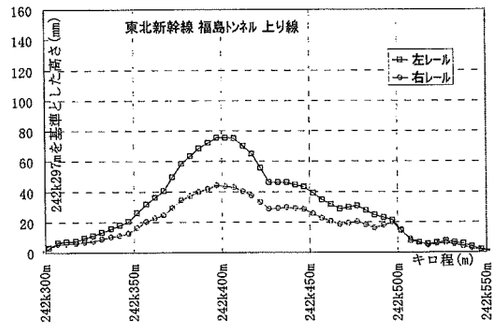


図-12　軌道の水準(上り線)[23]

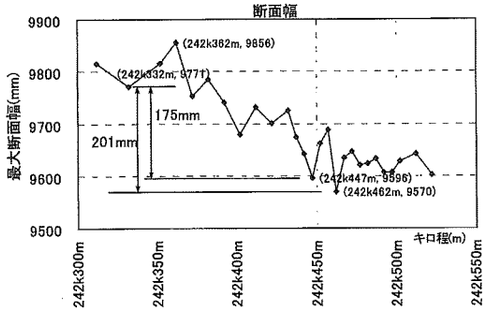


図-13　トンネル幅[23]

十分な梁盤コンクリート構造であったためと考えられている．

なお，多大な人的被害をもたらした津波によるトンネル構造の被害は報告されていない．

9　おわりに

トンネルと地震に関する筆者の経験と，得られた知識などを時系列的に示した．これらの経験と知識は，その後，京都大学，鉄道総研，鉄道・運輸機構の三者による共同研究「山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性向上に関する研究」[24]に反映され，さらに深度化した[25),26)]．

本文でも述べたが，地震規模が大きく，震源に近くて，地形・地質に問題があり，トンネル構造に問題があると地震時に被害が生じやすい．わが国においては国土のどこの場所でも地震が起こりうるものと考えねばならないから，要注意箇所は，地形・地質・構造に問題のある箇所である．これらの条件は，常時でも変状が生じやすい条件である．ということは，日常の点検をきちんと行い，必要な箇所に対して適切に補強・補修を行っておけば，そのことが同時に耐震補強になっていることを示している．

また，新設のトンネルであれば，地形・地質条件が悪い箇所については構造に不具合が生じぬよう設計・施工に万全を期すことが重要である．考えてみれば，これらはトンネルの建設，維持管理における基本である．何事においても肝心なのは基本に忠実に，ということである．

筆者の研究室では学生たちが私のこれまでの経験や研究をさらに発展させようと「動的解析による静的解析の妥当性の確認」「３次元解析による２次元解析で検討することの妥当性の検証」「裏込め注入による耐震性向上の検討」「地震時のロックボルトの補強効果の検討」等々に取り組んでくれている．いずれ遠くない将来，彼らは私の知らなかったこと，間違っていたことをたくさん教えてくれるであろう．その日が来るのがとても楽しみである．

本稿が今後トンネルの耐震性向上に取り組むことになる若い技術者の一助となれば幸いである．

参考文献

1)～3) 日本鉄道施設協会：鉄道土木構造物耐震強化の研究報告書，1979.3．1980.3．1981.3.
4)～8) 日本鉄道施設協会：鉄道地震対策の研究報告書，1982.3．1983.3．1984.3．1985.3．1986.3.
9) 国鉄施設局・鉄道技術研究所：トンネルのロックボルトによる耐震・補強工設計・施工指針(案)，1985.11.
10) 吉川惠也・朝倉俊弘・川上義輝：既設トンネルの補強に関する模型実験，トンネルと地下，Vol.15，No.6，pp.49-59，1984.6.
11) 吉川惠也：鉄道トンネルの震災事例調査，鉄道技術研究報告，No.1123，1979.9.
12) 鉄道総合技術研究所：千葉県東方沖地震調査報告書，1988.6.
13) 土木学会：阪神・淡路大震災調査報告，土木構造物の被害原因の分析，第５章　トンネル・地下構造物，1999.9.
14) 鉄道省熱海建設事務所：丹那トンネルの話，1934.
15) 小野田耕治・楠山豊治・吉川惠也：伊豆大島近海地震による被害(1)，鉄道トンネルの例，トンネルと地下，Vol.9，No.6，pp.7-12，1978.6.
16) 朝倉俊弘・志波由紀夫・松岡茂・大矢敏雄・野城一栄：山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム，土木学会論文集，No.659/III-52，pp.27-38，2000.
17) 清水満・齋藤貴・鈴木尊・朝倉俊弘：新潟県中越地震による鉄道トンネル被害調査結果，トンネルと地下，Vol.38，No.4，pp.49-57，2007.4.
18) 土木学会トンネル工学委員会新潟県中越地震調査特別小委員会：新潟県中越地震調査特別小委員会報告書，2005.6.
19) 土木学会トンネル工学委員会新潟県中越沖地震調査特別小委員会：新潟県中越沖地震調査特別小委員会報告書，2008.1.
20) 土木学会：大正12年関東大地震震害調査報告，第二巻　鉄道・軌道の部，No.337，南無谷トンネル，1927.3.
21) 鉄道総合技術研究所：既設山岳トンネル地震対策・震災復旧マニュアル(案)，2010.
22) 辻健・山本勝也・山田泰広・松岡俊文・朝倉俊弘：干渉SAR解析による新潟県中越沖地震に伴う山岳トンネル被害メカニズムの解明，土木学会論文集C，Vol.65，No.4，pp.989-997，2009.
23) JR東日本：SED(Structural Engineering Data)特集，東北地方太平洋沖地震と鉄道構造物，No.37，2011.11.
24) 鉄道・運輸機構：山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性向上に関する研究，http://www.jrtt.go.jp/02Business/Research/Research-H18KadaiGaiyou.html
25) 野城一栄・小島芳之・深沢成年・朝倉俊弘・竹村次朗：地質不良区間における山岳トンネルの地震被害メカニズム，土木学会論文集C，Vol.65，No.4，pp.1045-1061，2009.
26) 宮林秀次・井浦智実・小島芳之・野城一栄・朝倉俊弘：小土被り山岳トンネル覆工の耐震性能と耐震設計手法に関する基礎的研究，土木学会論文集F1，Vol.67，No.2，pp.126-143，2011.



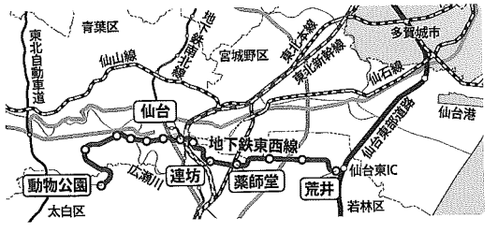
「被災地」仙台より

平　山　国　弘

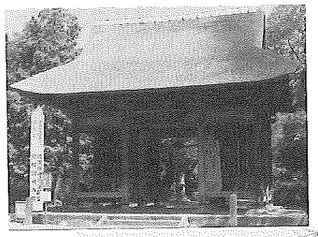
平成23年３月11日午後２時46分，ここ仙台市若林区は震度６弱の地震に見舞われた．足元からの縦揺れが数秒間続いたかと思うと，突然大きな横揺れが３分近く続いた．地震発生時，筆者は地下鉄の駅舎部開削トンネルのスラブ上，路面覆工の直下約７mの地下にいた．激しい横揺れで，土留め支保工や覆工部材などの鋼材の激しく軋む音が坑内に響きわたったが，倒壊や部材の大きな変形は生じなかった．また，地上でも周辺建物の倒壊，道路の陥没などの被害も見当たらなかった．その後は停電のため情報も入らず，沿岸部で起こっていることは想像もしなかった．

仙台市若林区は東に海岸線を有する．海岸線から３～４km内陸に若林区を南北に縦断するように仙台東部道路が海岸線に平行して走っており，この道路を境に海側と山側の震災後の状況はまったく異なる．道路より海側は津波の被害が甚大だが，山側は津波の被害はほとんどなかった．これは仙台東部道路の盛土部分が海水の流入に対して堤防となり，山側の被害を最小限にとどめることができたためと言われている．

私どもの現場は，この東部道路からさらに内陸4.5kmに位置している．付近の地質は深部までほぼ一様なN値50以上の礫質土層であるため，地震による被害も比較的少ない地域だった．周辺は中心市街地に接する閑静な住宅街の趣で，付近に高校や小学校などもあり，このような穏やかな環境に溶け込むように，国指定史跡でもある陸奥国分寺跡がある．陸奥国分寺は741(天平13)年に聖武天皇の勅願により全国に建立された国分寺のうちもっとも北に位置する．その後，時代の流れに従い徐々に衰退していくが，慶長年間(1596～1615)仙台藩主伊達政宗が，かつての講堂や南



位　置　図(駅名は仮称)





(上)夏の仁王門と(下)冬の薬師堂

大門跡地に薬師堂，仁王門を建立，今日まで受け継がれている．

仙台市地下鉄東西線は，地下鉄南北線と一体となって21世紀仙台の均衡ある発展を支えることを目的とした基幹プロジェクトであり，南西部の八木山動物公園付近から都心部の仙台駅付近を経て，仙台市東部道路の仙台東インターチェンジ付近に至る約13.9kmの路線である．今回の震災に関して，東西線建設にかかわるすべての工区において人的被害はなく，また構造物も事業継続に支障となるような大きな損傷はなかった．東西線の早期開業が，甚大な被害を受けた東部仙台地区の復興に大きく貢献することが期待されている．

私どもが担当する薬師堂工区は(仮称)薬師堂駅の構築とともに，(仮称)薬師堂駅から泥土圧気泡式シールドを発進させ，隣接駅である(仮称)連坊駅でUターンを行い，(仮称)薬師堂駅に到達する区間延長999mの木ノ下トンネルを施工するものである．工事は平成19年９月に着手し，途中約３か月の震災による工事中止もあったが，駅舎部はほぼ完成し，現在，シールドトンネルを平成27年度地下鉄開業に向けて鋭意施工中である．

(佐藤工業・不動テトラ・アイサワ工業・伊藤組土建共同企業体地下鉄薬師堂作業所所長)

地震時における山岳トンネルの挙動に関する基礎的研究

(独)土木研究所道路技術研究グループ長　真　下　英　人
(独)土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム研究員　日　下　　敦

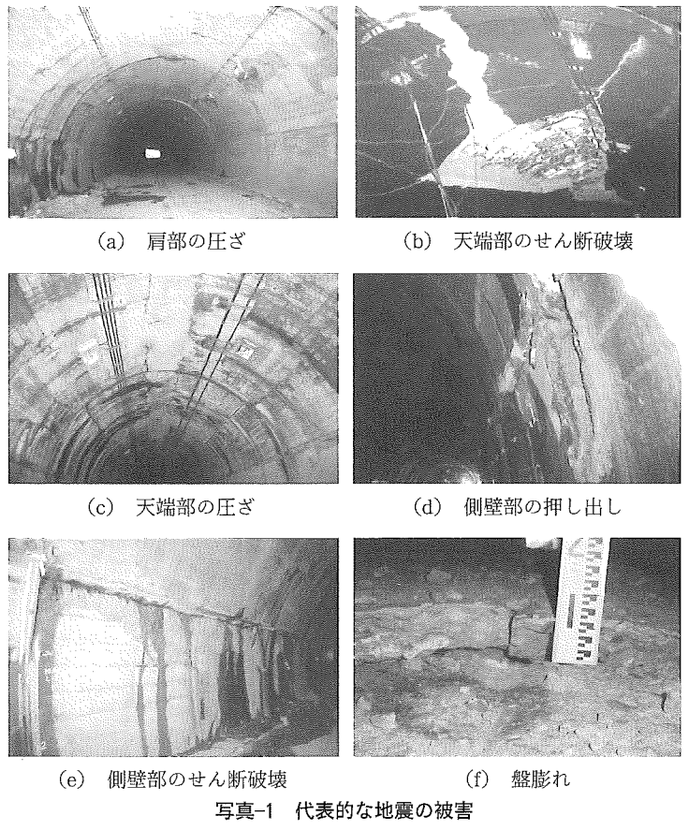
1　はじめに

主として岩盤に掘削される山岳トンネルは，基本的には地震に強い構造物であるが，地震の規模，震源からの距離，地山条件，トンネルの構造などによっては，地震により大規模な被害を受ける場合がある．例えば2004年10月に発生した新潟県中越地震では，多くの山岳トンネルで覆工に変状が発生し，数は限られるものの規模の大きな覆工の崩落を伴う被害を受けたものも見られた[1),2)]．このような被害を最小限にするための耐震対策を合理的に実施するには，山岳トンネルの地震時における挙動を明らかにし，耐震対策が必要となるトンネルの条件および効果的な耐震対策の方法とその設計法を確立する必要がある．

本研究は，地震時における山岳トンネルの挙動を明らかにすることを目的として，地震で発生したトンネルの変状を再現するための数値解析，実トンネルにおける地震時の挙動計測，観測された地震動を用いた地山の変形挙動に関する数値解析を行い，検討した結果を示したものである．

2　地震により発生するトンネルの変状

地震による山岳トンネルの変状は，大きくは坑口付近における地すべり，斜面崩壊あるいは断層部における地山のずれなど地震によって地山全体



(a)　肩部の圧ざ　(b)　天端部のせん断破壊
(c)　天端部の圧ざ　(d)　側壁部の押し出し
(e)　側壁部のせん断破壊　(f)　盤膨れ

写真-1　代表的な地震の被害

に滑りあるいはずれが発生し，これらの動きにトンネルが巻き込まれるものと，地山全体に滑り，ずれが発生することはないが，地震動により発生するトンネル周辺の地山の変形にトンネル構造が追随できずにトンネルが破壊するものとに大別される．本研究では変状が発生するときのメカニズムに未解明な部分が多く残る後者を対象とする．

写真-1は，2004年の新潟県中越地震により山岳トンネルの覆工に発生した変状の代表的なものを示したものである．これらは地質の急変部にトンネルが位置するなどの特殊な場合を除けば，大まかに**図-1**の３パターンに大別されると考えられる[3]．すなわち，肩部に圧ざ(曲げによる圧縮破壊)や曲げ引張ひび割れが発生するTYPE-Ⅰ，天端部に軸力によるせん断破壊や圧ざが，側壁部に内空側への押し出しが発生するTYPE-Ⅱ，側壁部，とくに矢板工法で施工された側壁とアーチ部継目に軸力によるせん断破壊が発生するTYPE-Ⅲである．

3　覆工に発生した変状から推定される地震時のトンネル挙動

本研究では，まず，上述したような変状が覆工に発生するときのトンネルの挙動を数値解析により検討した[3]．**図-2**は解析に用いたモデルを示したものである．解析は二次元の線形弾性解析とし，覆工をはり要素，地山を平面要素でモデル化した．地震の影響は，**図-3**に示すように地山の変形モードとしてせん断変形，水平方向の圧縮変形，鉛直方向の圧縮変形を想定し，せん断ひずみあるいは圧縮ひずみ0.2%に相当する強制変位を境界条件として与えた．ここで，せん断変形は地中構造物の地震時の挙動を検討する場合に一般的に用いられる変形モードであり，水平方向，鉛直方向の変形は，地震時に発生した圧ざ，せん断破壊，盤膨れなどと同様の変状が膨張性地圧や緩み土圧などの静的荷重により発生するときの変形モードである．

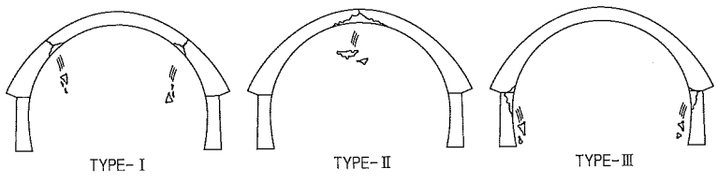


図-1　地震時による被害の発生パターン

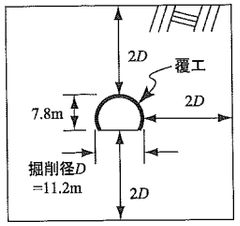
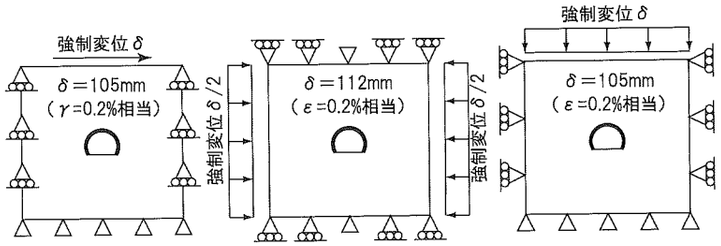


図-2　解析モデル

表-1　解析に用いた物性値

	地　山	覆　工
要　素	平面ひずみ	はり
弾性係数 (MPa)	E=50～500 (基本：150)	基本：22,000
ポアソン比	ν=0.15～0.45 (基本：0.30)	0.20



(a) せん断変形　(b) 水平圧縮変形　(c) 鉛直圧縮変形
図-3　解析で与えた地山の変形モード

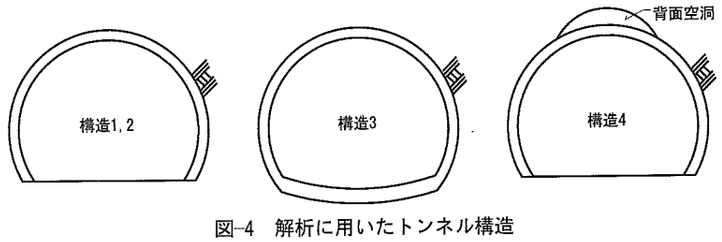


図-4　解析に用いたトンネル構造

表-2　トンネル構造の諸元

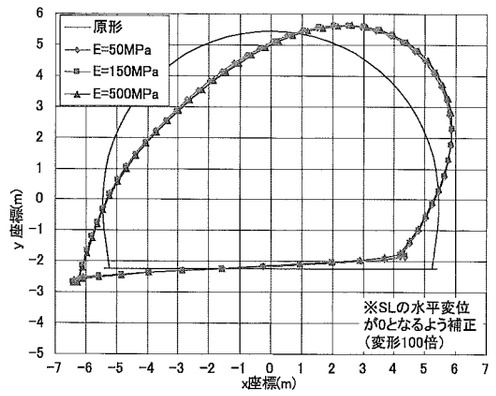
覆工構造No.	概　要	覆工弾性係数 (MPa)	インバート厚 (cm)	背面空洞範囲 (deg)	覆工厚 (cm)
1	基本ケース	22,000	—	—	30
2	覆工剛性小	150	—	—	
3	インバートあり	22,000	50	—	
4	背面空洞あり	22,000	—	60～120	

※背面空洞は，覆工と地山の節点間における力の伝達を０とすることでモデル化

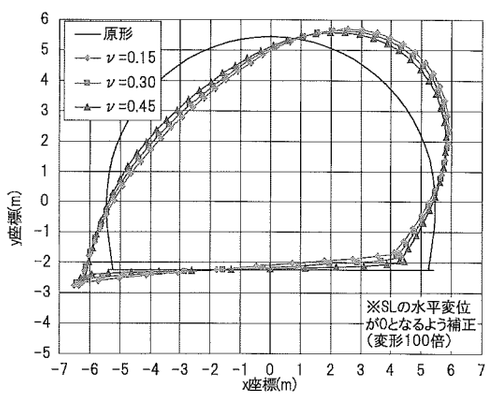
物性値は**表-1**に示すとおりであり，地山の弾性係数およびポアソン比がトンネルの挙動に及ぼす影響を調べるためにこれらを変化させた．また，トンネルの構造の影響を調べるために，**図-4**，**表-2**に示すように覆工の弾性係数を地山の弾性係数と同一の値まで低減させたケース，インバートを設置したケース，天端部に背面空洞が存在するケースについての解析も行った．なお，本検討で採用した地山弾性係数150MPaは，ポアソン比0.3，単位体積重量23kN/m³の場合で弾性波速度V_P=300m/s，V_S=160m/sに相当し，比較的軟質な岩に相当すると考えられる．

3-1　せん断変形による挙動

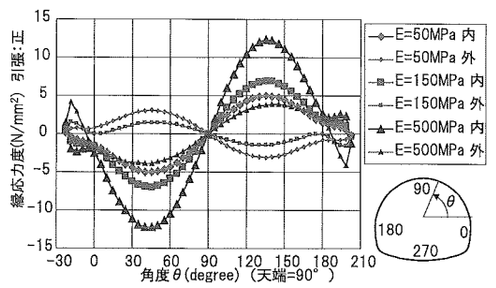
地山にせん断変形を与えた場合の覆工の変形状態を**図-5**に示す．覆工の変形はせん断変形が卓越し，天端沈下，内空変位および盤膨れはほとんど発生しないことがわかる．また，覆工の変位は地山の弾性係数の影響をあまり受けないが，ポアソン比が大きくなると覆工の変位は減少する傾向にある．**図-6**は覆工の縁応力分布を示したものである．いずれのケースも肩部に応力が集中しており，地山の弾性係数が大きくなると，応力状態は全圧縮状態あるいは全引張状態となり，軸力が卓越する応力状態となる．一方．ポアソン比が応力状態に及ぼす影響は比較的小さい．これらの結果から，地山にせん断変形が発生するとTYPE-Ⅰに見られる両肩部での圧ざあるいは曲げ引張ひび割れが発生するものと推定される．



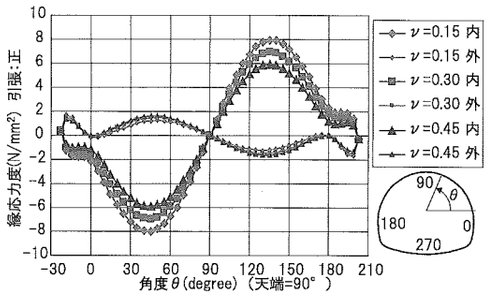
(a)　弾性係数の影響



(b)　ポアソン比の影響
図-5　覆工の変形状態(せん断変形)



(a)　弾性係数の影響



(b)　ポアソン比の影響
図-6　覆工の応力分布(せん断変形)

次に，トンネル構造の安定性に大きな影響を及ぼす覆工内面の圧ざあるいは軸力によるせん断破壊に着目し，覆工内面の縁応力が，一般的な覆工コンクリートの圧縮基準強度である18N/㎟に達するときの覆工の変位を，覆工応力と覆工の変位が比例関係にあると仮定し，上記の解析結果を用いて算出した．実際には圧ざあるいはせん断圧壊の発生より前に覆工には曲げ引張ひび割れなどが発生し，覆工は非線形挙動を示すため，精緻な解を得るためには非線形挙動を考慮した検討が必要となるが，本研究では概略の値を得ることを目的として上述の仮定の下で算出することとした．なお，後述する他の変形モードに対しても同様の方法により覆工破壊時の変位を求めている．**図-7**はこのようにして得られた覆工破壊時のせん断変位(天端とSLの相対変位)であるが，覆工破壊時の変位は地山の弾性係数およびポアソン比の影響を受け，本研究で設定した地山物性値の範囲では，覆工肩部に圧縮破壊が発生するときのせん断変位は15～35㎜程度となる．また，一般に地山の弾性係数が大きいと地震時には地山の変形は発生しにくいと言えるが，覆工が破壊するときの覆工の変位は弾性係数が小さな地山よりも小さくなる結果となっている．

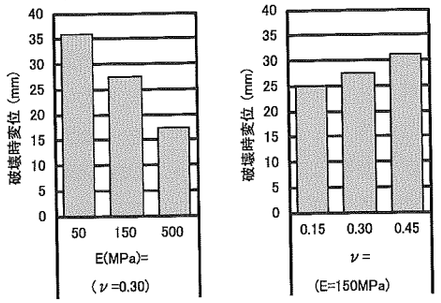


図-7　覆工破壊時の変位(せん断変形)

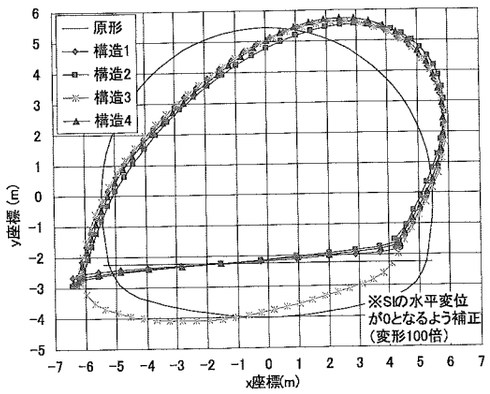


図-8　トンネル構造が変形に及ぼす影響(せん断変形)

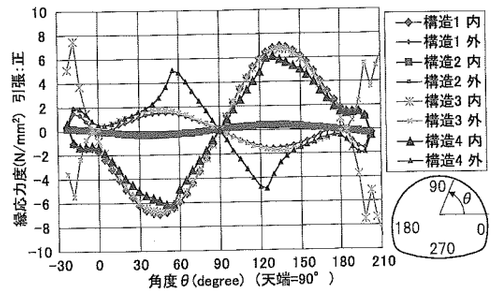


図-9　トンネル構造が覆工応力に及ぼす影響(せん断変形)

図-8, 9にトンネル構造が覆工の変形および覆工応力に及ぼす影響を示す．覆工の弾性係数が地山の弾性係数と同一の値まで減少すると，覆工の変位は若干増加するものの，応力はほとんど発生しないことがわかる．

これは，覆工の剛性が地山の剛性に近づくと覆工が地山の変形に追随できるようになり，覆工には過大な応力が発生しなくなることを示すものであり，地震動によりトンネルに変状が発生する一つの要因としてトンネルの剛性が地山の剛性よりも大きいことが考えられる．インバートあるいは背面空洞の影響については，背面空洞がある場合に肩部外面での曲げ応力が増加していることを除けば，変位および覆工応力には大きな変化は認められない．

なお，地山にせん断変形が発生した場合でも，

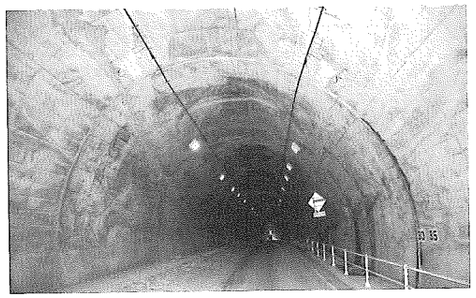
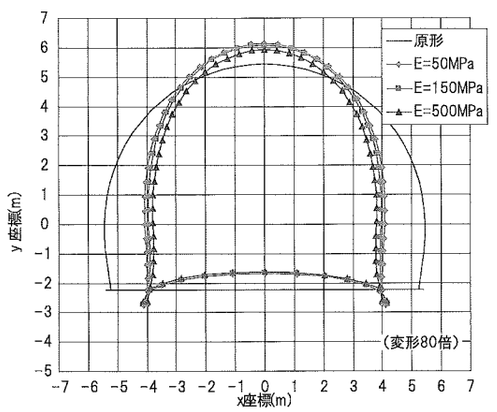


写真-2　トンネルが地質境界部に位置するときの変状

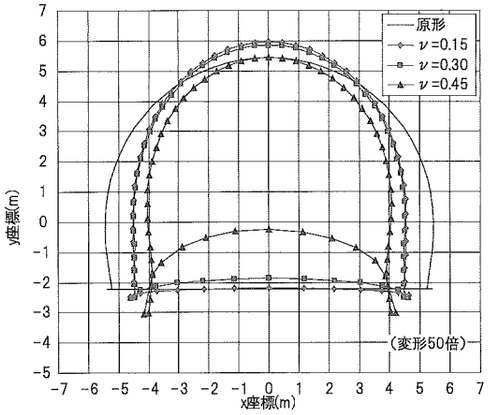
剛性が大きく異なる地質の境界部にトンネルが位置する場合には，地質の境界部でせん断破壊が発生することがある[4]．**写真-2**は，新潟県中越地震で両側の側壁部に大規模なせん断破壊が発生した木沢トンネルの例である．本トンネルはNATMにより建設された全幅９mの２車線道路トンネルで，インバートを有する構造となっている．とくに被害の大きかった北側坑口から30～80m付近では，側壁から肩部にかけて覆工両側で連続したひび割れが発生するとともに，ひび割れ上部の半断面が谷側に変位した．この変状区間で行った縫返し工事の際に，露出した地山を目視観察するとともに採取したコアの一軸圧縮試験を行った結果，トンネルはトンネル縦断方向に傾斜した，剛性の大きく異なる新鮮な岩と強風化岩の境界部に位置しており，覆工のひび割れはそれにほぼ平行して発生していることがわかった．また，別途，応答震度法を用いた数値解析結果からも地質の境界部においてこのような変状が発生する可能性が高いことが確認された．

3-2　水平方向の圧縮変形による挙動

地山に水平方向の圧縮変形を与えた場合の覆工の変形状態を**図-10**に示す．いずれのケースも覆工は水平方向に縮小し，天端部が上方へ変形するとともに盤膨れが発生していることがわかる．また，地山の弾性係数あるいはポアソン比が大きくなると，天端部における上方への変形が減少し，内空変位が若干増加している，**図-11**は覆工に発生する縁応力分布を示したものである．いずれのケースも覆工内面の縁応力は天端部で最大となっており，弾性係数あるいはポアソン比が大きくなると，発生応力は覆工全体にわたって圧縮側に増

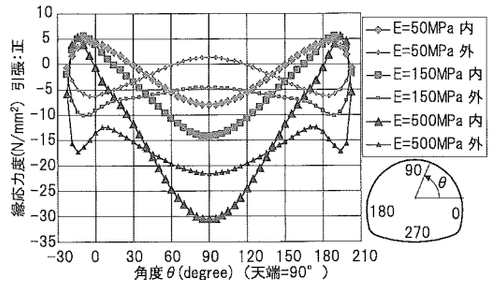


(a)　弾性係数の影響

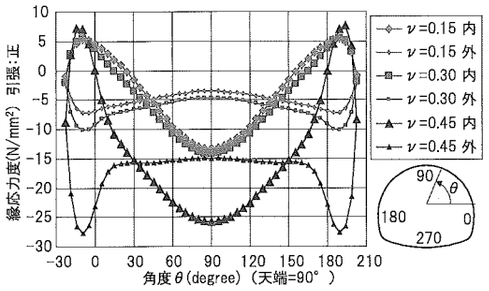


(b)　ポアソン比の影響

図-10　覆工の変形状態(水平圧縮変形)



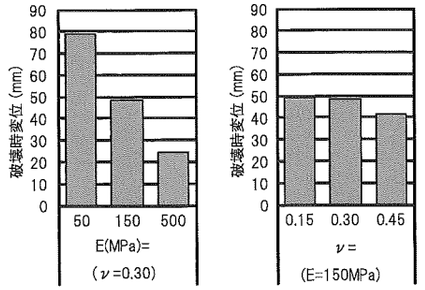
(a)　弾性係数の影響



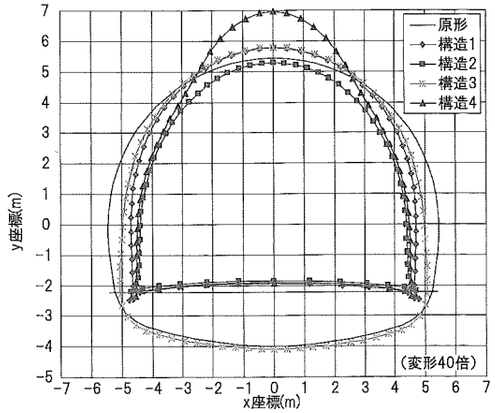
(b)　ポアソン比の影響

図-11　覆工の応力分布(水平圧縮変形)

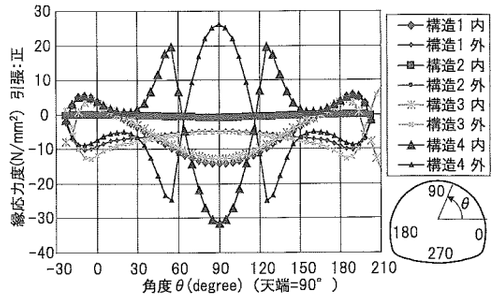
加し，軸力が卓越する応力状態となる．これらの結果から地山が水平方向に圧縮変形すると，TYPE−Ⅱに見られる天端の圧ざあるいはせん断破壊が発生するものと推定される．**図−12**は覆工破壊時の内空変位(左右SLの相対水平変位)を示したものである．覆工破壊時の変位は，せん断変形のモードの場合と同様に地山の弾性係数，ポアソン比の影響を受け，天端部に圧ざあるいは軸力によるせん断破壊が発生するときの内空変位は25～80㎜程度となる．



図−12　覆工破壊時の変位(水平圧縮変形)



図−13　トンネル構造が変形に及ぼす影響(水平圧縮変形)

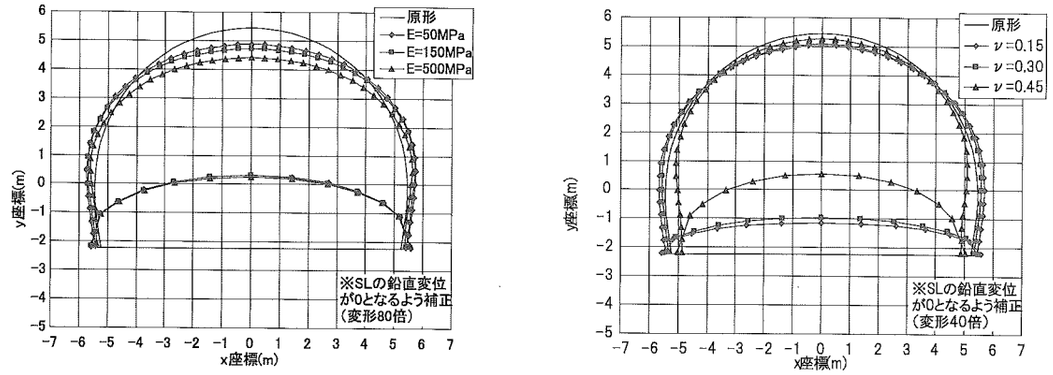


図−14　トンネル構造が覆工応力に及ぼす影響(水平圧縮変形)

図−13, 14は，トンネル構造が覆工の変形および覆工応力に及ぼす影響を示したものである．覆工の弾性係数が地山の弾性係数と同一の値まで減少すると，側壁部の変位は若干増加するが，せん断変形のケースと同様に覆工に応力はほとんど発生しないことがわかる．天端部に背面空洞がある場合は，天端部では地山から反力を得ることができないため，上方への変位が増加する．応力状態は，背面空洞がない場合は，天端部では全圧縮状態となっているのに対し，背面空洞がある場合は曲げ圧縮状態になるとともに応力が大幅に増加し，さらに両肩部の覆工内面に大きな引張応力が発生している．したがって，地山に水平圧縮変形が発生した場合，背面空洞がないと天端部に軸力によるせん断破壊が生じ，背面空洞があると天端部に圧ざ，両肩部に曲げ引張ひび割れが発生しやすくなると言える．インバートがある場合は，ない場合に比較して内空変位および盤膨れが減少するものの，天端付近の変形状態にほとんど変化は見られない．また，覆工の応力状態も上半アーチ部ではほとんど変化は見られない．

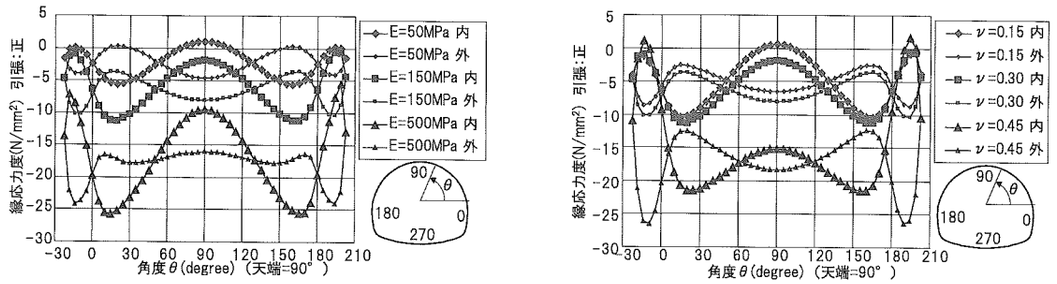
3-3　鉛直方向の圧縮変形による挙動

地山に鉛直方向の圧縮変形を与えた場合の覆工の変形状態を**図−15**に示す．いずれのケースも全体的に縦方向につぶれ，側壁部が水平方向に広がるとともに盤膨れが発生していることがわかる．また，地山の弾性係数が大きくなると側壁部の変位は減少するが，天端部の沈下は増加する．一方，ポアソン比が増加すると，天端部の沈下は減少し，側壁部は水平方向に縮小するとともに，盤膨れは増加する．**図−16**は覆工の縁応力分布を示したものである．いずれのケースも，側壁部は全圧縮状態で覆工内面の縁応力は最大となっており，地山の弾性係数あるいはポアソン比が大きくなると，発生応力は覆工全体にわたって圧縮側に増加し，軸力が卓越する応力状態となる．これらの結果から，覆工が鉛直方向に圧縮されると，TYPE−Ⅲに見られるような側壁部での軸力によるせん断破



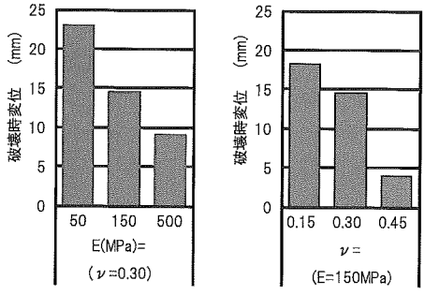
(a)　弾性係数の影響　　(b)　ポアソン比の影響

図−15　覆工の変形状態(鉛直圧縮変形)



(a)　弾性係数の影響　　(b)　ポアソン比の影響

図−16　覆工の応力分布(鉛直圧縮変形)

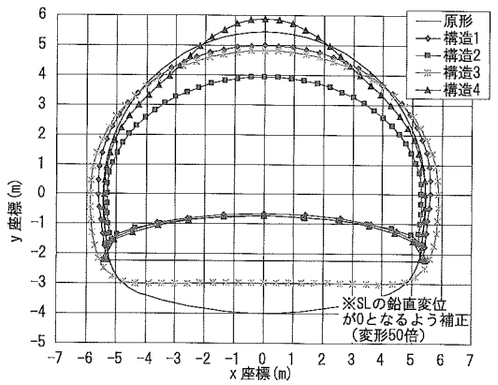


図−17　覆工破壊時の変位(鉛直圧縮変形)

壊が発生するものと推定される．

図−17は，覆工破壊時の天端沈下(天端とSLの相対鉛直変位)を示したものである．覆工破壊時の変位は，他の変形モードの場合と同様に地山の弾性係数，ポアソン比の影響を受け，側壁部に軸力によるせん断破壊が発生するときの天端沈下量は5～25 ㎜程度となる．

図−18, 19は，トンネル構造が覆工の変形，覆工応力に及ぼす影響を示したものである．覆工の弾



図−18　トンネル構造が変形に及ぼす影響(鉛直圧縮変形)

性係数が地山の弾性係数と同一の値まで減少すると，上半アーチ部の変位は若干増加するが，他の変形モードの場合と同様に覆工に応力はほとんど発生しないことがわかる．天端部に背面空洞がある場合は，天端部および肩部に曲げ圧縮による大きな応力が発生しており，天端部に圧ざ，両肩部

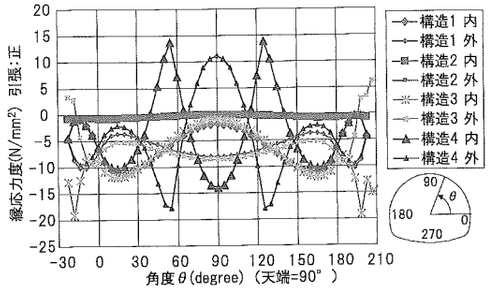


図-19　トンネル構造が覆工応力に及ぼす影響（鉛直圧縮変形）

に曲げ引張ひび割れが発生しやすくなる．インバートがある場合は，ない場合に比較して，内空変位は増加し，盤膨れは減少するが，覆工の応力状態は上半アーチ部ではほとんど変化は見られない．

4　現場計測結果から推定される地震時のトンネル挙動

山岳トンネルは他の構造物と比べて地震による被害事例が少ないことから，実トンネルにおける地震時の計測事例が比較的少なく，大きな地震動がトンネルに作用した場合の動的挙動はほとんど明らかになっていない．そこで，既設の実トンネルに動的計測機器を設置したところ，トンネル周辺で震度6強の強い揺れを観測した地震において，トンネル覆工の動的な挙動に関するデータが得られた[5]．計測機器を設置したトンネルは，宮城県石巻市所管のサンファントンネルである．本トンネルはNATMにより建設された延長689mの2車線道路トンネルで，2011年現在で竣工から約15年が経過している．周辺地山は砂岩および頁岩が主体で，明瞭な断層・破砕帯などの不良地山区間は記録されていない．なお，地震発生後の目視点検では監査歩廊に軽微な浮き上がりと縁石の変形が確認されたが，覆工には目立った変状は確認されていない．

本計測では，**図-20**に示すように覆工表面にひずみ計を5か所，加速度計を1か所に設置し，動的計測を行った．ひずみの計測断面は，西側坑口から約100m，土かぶり約40mの地点で，地山等級はDIであり，トンネル軸はほぼ東西方向を向

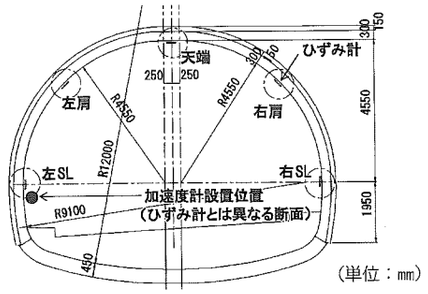


図-20　計測器の設置位置

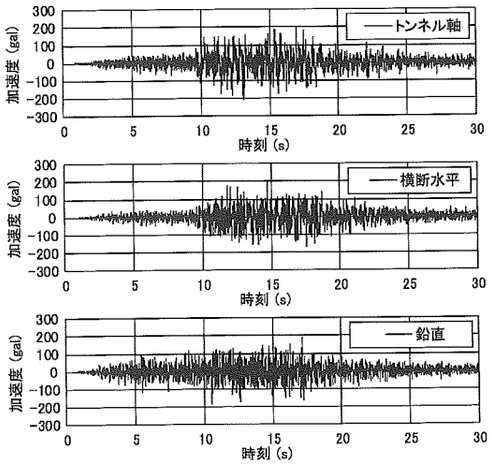


図-21　計測されたトンネルの加速度

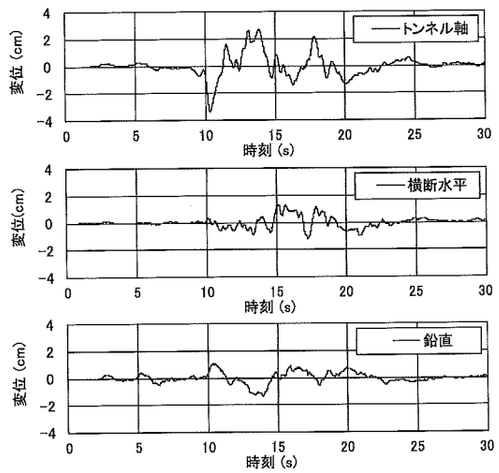


図-22　加速度から求めたトンネル変位

いている．加速度は，ひずみ計測断面から14mほど坑奥の左側側壁において，トンネル軸方向，横断水平方向，鉛直方向の計3成分について計測し

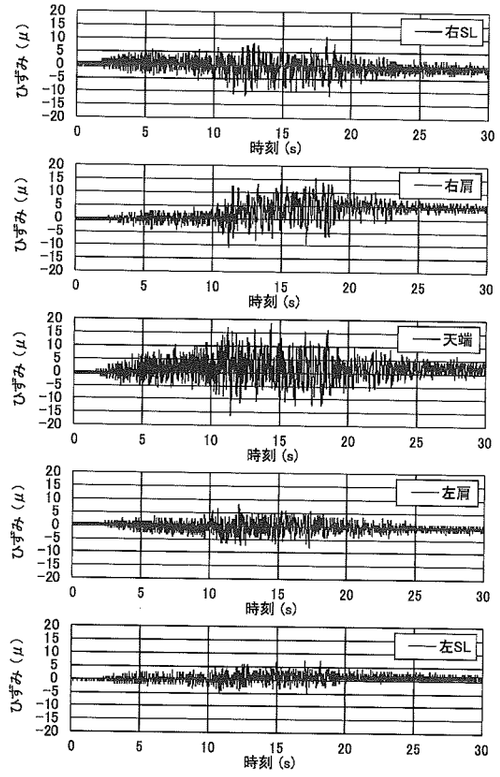


図-23　計測された覆工内面のひずみ

た．計測した振動は，2011年4月7日23時32分に宮城県沖で発生したマグニチュード7.1の地震によるものである．トンネルは，この地震の震央から西北西約60kmに位置しており，近隣の宮城県栗原市，仙台市宮城野区で震度6強を観測した．

図-21は，トンネルの覆工側壁で計測された加速度の時刻歴波形である．最大加速度は200gal程度と比較的大きな値であったが，3成分とも大差はなかった．**図-22**は，加速度波形を2回積分（10秒以上の長周期成分は除去）し，変位波形を求めたものであり，最大でトンネル軸方向に3cm程度，横断方向に1cm程度の変位が発生している．

図-23は，覆工のひずみの時刻歴波形を示したものであり，ひずみは引張が正となるよう示してある．比較的大きなひずみが発生した箇所は天端と右肩であるが，いずれの箇所においても，発生したひずみは圧縮側，引張側ともに高々20μ程度の小さな値であった．ただし，部位によっては5

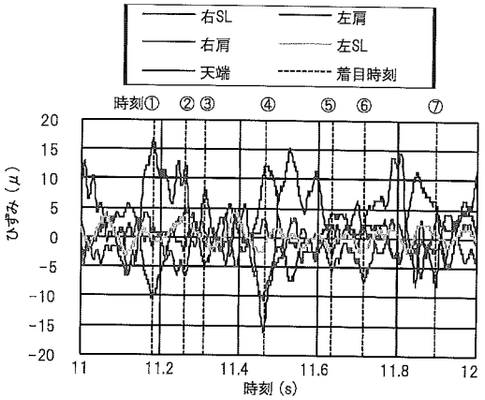


図-24　覆工ひずみの径時変化

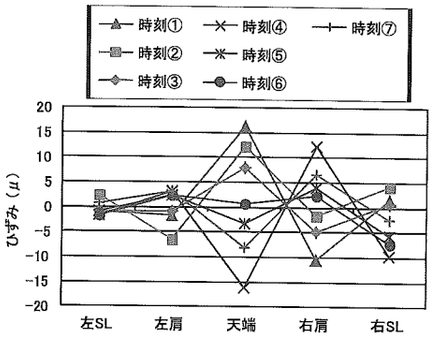


図-25　覆工のひずみ分布

μ程度の残留ひずみが生じており，地震動がくり返し作用した場合の影響は今後検討する必要があるものと思われる．

図-24は，最大圧縮ひずみが発生した，時刻11～12秒付近のひずみ値を示したものである．この時刻の範囲で圧縮ひずみが極大となった着目時刻①～⑦におけるひずみの分布を示すと**図-25**のようになった．この分布を見ると，図-11, 16に示した応力のモードと完全に一致するものではないが，地山がせん断変形したというよりは，むしろ水平方向あるいは鉛直方向に圧縮変形した場合のモードに近いと思われる．これらのことは，従来もっとも基本的な地震時の地山の変形モードと考えられている地山のせん断変形だけでは説明しがたい挙動が観測されたことを示しており，今後，山岳トンネルの地震対策を考えるうえでは，せん断変形以外の地山の変形モードも考慮に入れる必要があることを示唆しているものと考えられる．

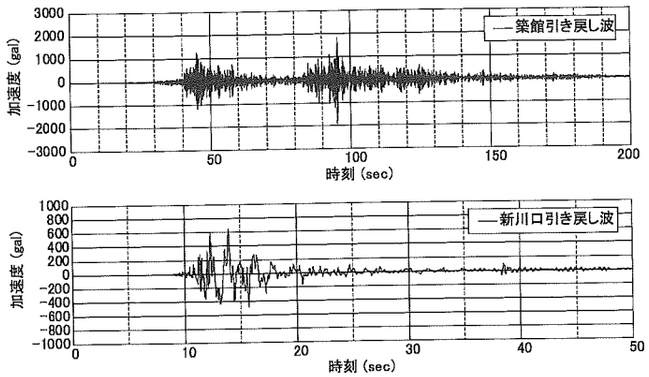


図-26　解析に用いた入力地震動

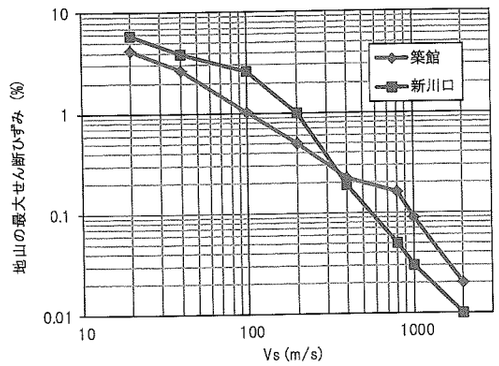


図-27　解析から得られた地山のひずみ

5　数値解析から求まる地震時の地山挙動

多くの山岳トンネルに被害が発生した新潟県中越地震で観測された地震動と，被害がほとんど発生しなかった東北地方太平洋沖地震で観測された地震動を用いて，地震時に地山に発生したと推定されるひずみを算出し，3章の解析で得られた覆工に変状を発生させる地山の変形挙動との比較を行った．ひずみの算出は，地下構造物の地震時挙動の検討に用いられることが多い一次元地盤応答解析を用いて，地山の弾性波速度V_sをパラメーターとした．入力地震動は，基盤面から地表面までがV_s=300m/secの一様な地山(層厚50m)で構成されていると仮定し，新潟県中越地震時にJR東日本の新川口変電所で観測されたEW方向および東北地方太平洋沖地震時にK-NET築館観測点で観測されたNS方向の地震動を基盤面に引き戻して得られた図-26の波形を用いた．

図-27に解析から得られた基盤面から地表面までの地山(層厚50m)に発生するせん断ひずみの最大値と地山の弾性波速度V_sとの関係を示す．解析にあたっては，いくつかの仮定を設けているため，絶対量を用いた詳細な議論はできないが，3-1節で示したせん断変形に対する解析結果から覆工に圧縮破壊が発生するときの地山のせん断ひずみを，覆工の破壊変位と同様の方法により求めると0.3～0.7%となる．したがって，どちらの地震動も地山条件によっては覆工の破壊が起こりうるレベルのせん断ひずみが発生すると言える．また，2つの地震動によるせん断ひずみの比較ではV_sが小さい，すなわち地山条件が悪い領域では築館よりも新川口の地震動の方がより大きなせん断ひずみが発生し，V_sが大きい，すなわち地山条件が良い領域では逆の傾向を示すという興味深い特徴を示している．なお，鉛直方向の変形については，新潟県中越地震において地中で観測された水平方向と鉛直方向の2成分の波を同時に入力し，一次元地盤応答解析により鉛直方向の地山のひずみを求めてみたが，覆工に破壊が発生するひずみよりもはるかに小さな値となった．鉛直方向あるいは水平方向の圧縮変形が算出できる解析手法の開発は今後の課題として残る．

6　結　　論

本研究で得られた結論を以下にまとめる．

① 地震により発生する山岳トンネルの変状は3つのタイプに大別され，それぞれトンネル周辺の地山が地震によってせん断変形，水平方向に圧縮変形，鉛直方向に圧縮変形することにより発生するものと推定される．

② 地山に発生する変形が同一であっても，覆工の変位および覆工応力は，地山の弾性係数およびポアソン比によって異なり．地山の弾性係数が大きいほど軸力が卓越した応力状態になるとともに覆工が破壊するときの覆工変位は小さくなる．

③ 地山に変形が発生したときのトンネルの挙動は，覆工の剛性の影響を大きく受け，覆工の剛性が地山の剛性に近づくと覆工に応力はほとんど発生しなくなる．

④ インバートがあると，地山が水平方向に圧縮変形する場合は内空変位や盤膨れが減少し，鉛直方向に圧縮変形する場合は盤膨れが減少するが，覆工の上半アーチ部の応力状態はインバートがない場合とほとんど変化は見られない．

⑤ 覆工天端部の背面に空洞があると，地山が水平方向に圧縮変形あるいは鉛直方向に圧縮変形することにより，天端部に圧ざ，肩部に曲げ引張ひび割れが発生しやすくなる．

⑥ 現場計測から得られた地震時に発生する覆工のひずみは，地山がせん断変形よりも，水平方向あるいは鉛直方向に圧縮変形した場合に発生するモードに近いものを示した．

⑦ 地震時に観測されたせん断波を用いた一次元地盤応答解析により算出された地山のせん断変形は，覆工に変状を発生させるレベルにあることが確認されたが，地山の鉛直方向あるいは水平方向の圧縮変形を算出する解析手法は今後の課題として残る．

さいごに，本研究の数値解析においては，防災科学研究所が運用しているK-NETの波形データおよび土木学会観測地震記録ダウンロードサイトで提供されたJR東日本の新幹線地震計波形データを利用した．ここに記して謝意を表す．

参　考　文　献

1) 真下英人：新潟県中越地震における道路トンネルの被害，トンネルと地下，Vol.36，No.11，pp.55-63，2005.11.
2) 清水満・齋藤貴・鈴木尊・朝倉俊弘：新潟県中越地震による鉄道トンネル被害調査結果，トンネルと地下，Vol.38，No.4，pp.49-57，2007.4.
3) 日下敦・真下英人・砂金伸治・角湯克典：山岳トンネルにおける覆工構造と地震時挙動の関係に関する一考察，トンネル工学報告集，Vol.20，pp.1-8，2010.
4) 日下敦・真下英人・水川雅之・森本智：地震による山岳トンネルの被害発生メカニズムに関する基礎的研究，トンネル工学報告集，Vol.18，pp.15-21，2008.
5) 日下敦・砂金伸治・真下英人・角湯克典：山岳トンネルの地震時挙動に関する計測，トンネル工学報告集，Vol.21，pp.147-151，2011.

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．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14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）

土木情報 No.466 今月の主な入札結果

（2月10日～3月9日）

事業主体	工事名	請負会社	請負額 単位 百万円
北海道開発局	北海道横断自動車道釧路市小音別T	竹中土木	561.33
〃	R40音威子府村物満内T	前田・札建JV	1,660
東北地整	R108花渕山３号T	岩田地崎建設	468.3
〃	R45吉浜道路	清水・青木あすなろJV	4,480.8
〃	R45釜石山田道路	熊谷・オリエンタル白石JV	4,965.7
北陸地整	筒石函渠	後藤組	171
〃	坂又川排水樋門新設	松本建設	246.8
〃	能越道水見第12T	ハザマ	1,418.9
中部地整	19号桟T	戸田建設	932
〃	紀勢線古里第1T	奥村組	1,246
〃	天城北道路日向T	前田建設工業	878
近畿地整	大阪北共同溝枚方・交野地区洞内設備他設置	ハザマ	2,169
〃	R1葉山川横断函渠設置	西松建設	1,043
〃	那智勝浦道路天満T	前田建設工業	1,383
〃	〃 金剛寺T	西松建設	2,123
〃	奥瀞道路峰T	鴻池組	580.4
〃	鍋谷峠道路鍋谷峠T	佐藤工業	5,454.2
〃	近畿自動車道紀勢線見草T	大林組	5,058
〃	〃 〃 田野井第１T他	大豊建設	1,002.9
〃	〃 〃 見老津第１T他	鴻池組	909.74
〃	〃 〃 鳥賊坂T	佐藤工業	3,325.4
〃	〃 〃 周参見第２T	西松建設	5,133
〃	〃 〃 黒崎T	三井住友建設	6,290
〃	〃 〃 安宅T	ハザマ	3,567.5
〃	R8三明川横断函渠設置	真柄建設	342
〃	永平寺大野道路吉野堺地区地下道設置	名工建設	336.3
〃	橋本道路中島側道１号函渠他	東組	240
〃	丹波綾部道路瑞穂T水呑地区	佐藤工業	3,113
九州地整	東九州道(佐伯～蒲江)上岡T新設	奥村組	1,359.53
〃	九州横断道(嘉島～山都)田代第１T新設	前田建設工業	1,304.55
水資源機構	大規模地震対策西部幹線水路山村T外改築	前田建設工業	225
原子力機構	第２排水溝隧道部補修	日特建設	106
〃	23東濃 瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削(A工区その５)	大林・大成・ハザマJV	1,859
〃	〃 (B工区その５)	清水・鹿島・前田JV	1,370
都・財務局	H23晴海四丁目雨水管布設	金寿建設	150.88
都・建設局	道路改修に伴う雨水貯留施設設置(南西-新滝第三工区その２)	土方建設	118.7
都・交通局	浅草線蔵前駅北行線エレベーター設置土木・建築その他	錢高・東武谷内田JV	438.1
都・水道局	金町浄水場送配水ポンプ所(仮称)及び共同溝築造	清水・鴻池・坂田JV	8,376
〃	町田市相原町2768番地先から1241番地先間送水管(1500㎜)トンネル内配管及び立坑築造	清水・不動テトラJV	856
都・下水道局	港区西新橋三丁目付近再構築その３	中黒建設	315
〃	芝浦水再生センター雨天時貯留池導水渠及び返水ポンプ室建設	鴻池組	619.8
〃	北区赤羽西一丁目付近枝線	新井組	191.85
〃	〃 十条台一丁目，上十条一丁目付近再構築	エムテック	388.7
〃	堀船１号幹線	五洋建設	815.8
〃	豊島区目白二丁目付近再構築	鴻池組	632.8
〃	〃 東池袋四丁目，文京区大塚六丁目付近再構築	日特建設	275.11
〃	世田谷区岡本一丁目付近枝線	馬淵・片倉JV	505.6
〃	野川処理区下流部雨水貯留池その３	前田・奥村組土木JV	1,217.4
さいたま市	鴨川第38処理分区下水道(南建－23－39)	荒木・松永JV	431.76
横浜市	久保沢ずい道耐震補強	西松・石田JV	865.62
三条市	新保裏館線(アンダー工区)道路改築その２	吉田建設	136.5
名古屋市	熱田区千年二丁目地内紀左ヱ門幹線改良	大豊・森本・中日JV	976.89
京都市	(主)京都広河原美山線(二ノ瀬BP)T新設	吉村・村井・協栄JV	1,462
大阪市	新今里～寺田町幹線下水管渠築造(その２)	大成・東急・村本JV	4,981.7
〃	佃幹線下水管渠築造(その２)	森長組	477.04
福岡市	春吉３号幹線築造	錢高・日本国土・羽野JV	1,114.29
熊本市	都計事業加勢川雨水６号幹線BP管(シールド)築造	鹿島・山本JV	1,656.13

特集：地震とトンネル

JR東日本におけるトンネル地震被害の事例

JR東日本研究開発センターフロンティアサービス研究所次長 清水 満

1 はじめに

JR東日本は，1987年の会社発足以来，いくつかの地震災害を受けているが，トンネルが顕著な地震被害を受けたものは2004年の新潟県中越地震と2007年の新潟県中越沖地震，そして昨年2011年に発生した東北地方太平洋沖地震の３地震である．

このうちもっとも大きな被害を受けたのは，直下型地震である2004年の新潟県中越地震であり，覆工コンクリート崩落や大規模な損傷などが発生し，鉄道の運転再開のネックがトンネルの復旧作業となった．また，その３年後に発生した直下型の新潟県中越沖地震でも，覆工コンクリートの圧ざやひび割れの発生などの比較的大きな覆工コンクリートの損傷が発生した．一方，高架橋などに地震被害を及ぼした海溝型大地震である2011年の東北地方太平洋沖地震では，広い範囲でトンネルに被害が発生したものの，その被害は路盤損傷に伴う軌道変状や中央通路部の損傷であり，直下型地震に比べ軽微な損傷であった．以下に各地震におけるトンネル被害について述べる．

2 中越地震における被害

2-1 地震被害の概要

2004年10月23日17時56分ごろに発生したM6.8の新潟県中越地震は，地震には強い構造物と言われていたトンネルにもさまざまな被害が発生した．被災したトンネル数は21に及んだが，2004年12月27日までに在来線が運転再開し，上越新幹線は12月28日に運転再開を果たした．

2-2 鉄道トンネルの被害状況

2-2-1 被害概況

被害は，覆工コンクリートの剥離・剥落といった小規模なものから，軌道隆起や覆工コンクリートの崩落といった大規模なものまで，多岐にわたっていた．図-1に被害を受けたトンネルの位置図を

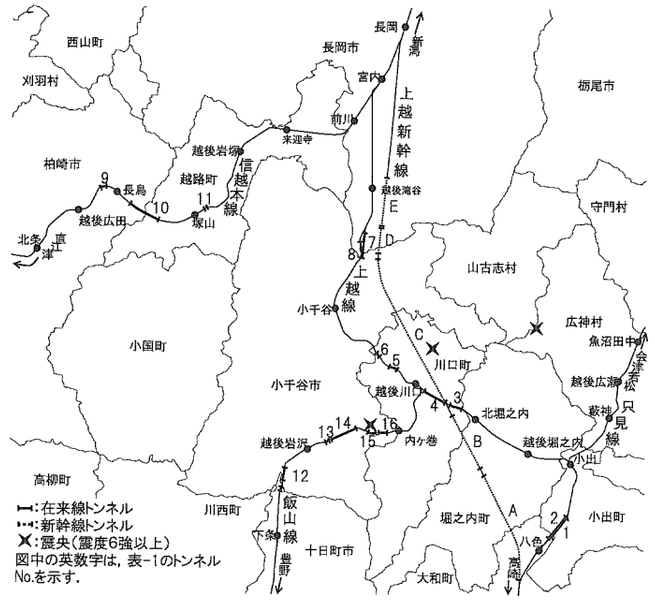


図-1 新潟県中越地震による被害トンネル位置図

表-1　被害トンネルの基本データと被害状況

No.	被害程度	トンネル名	線　名	被　害　状　況
A	C	浦佐	上越新幹線	中央通路側壁ひび割れ
B	B	堀之内	上越新幹線	打ち継ぎ目部の剝落，ひび割れ，側壁食い違い
C	A	魚沼	上越新幹線	アーチ部の崩落，打ち継ぎ目部の剝落，ひび割れ，軌道隆起
D	A	妙見	上越新幹線	アーチクラウン部の圧ざ，打ち継ぎ目部の剝落，ひび割れ，軌道隆起
E	B	滝谷	上越新幹線	アーチクラウン部の圧ざ，打ち継ぎ目部の剝落，ひび割れ
1	B	福山	上越線	ひび割れ，剝落
2	B	新福山	上越線	アーチクラウン部の圧ざおよびせん断ずれ，ひび割れ
3	A	和南津	上越線	アーチクラウン部の圧ざ，アーチ部の崩落，打ち継ぎ目部の剝落，ひび割れ，トンネル坑口部のずれ
4	B	中山	上越線	打ち継ぎ目部の剝落，アーチ肩部のひび割れ
5	B	牛ケ島	上越線	打ち継ぎ目部の剝落，トンネル坑口部のずれおよび面壁の亀裂
6	A	天王	上越線	トンネル上部斜面崩壊に伴う側壁の亀裂，打ち継ぎ目部の剝落，ひび割れ，トンネル坑口部面壁のひび割れ
7	A	新榎峠	上越線	アーチクラウン部の圧ざ，ひび割れ，側壁部の押し出し
8	B	榎峠	上越線	斜面崩壊に伴うトンネル坑口部の損傷，ひび割れ，剝落
9	C	鼻田	信越本線	剝離
10	B	塚山	信越本線	アーチクラウン部の圧ざ，打ち継ぎ目部の剝離，ひび割れ
11	B	東山	信越本線	打ち継ぎ目部の剝離，ひび割れ
12	C	岩山	飯山線	剝落
13	B	岩沢	飯山線	アーチ肩部の軽微な圧ざ，補修用吹付けコンクリートの剝落
14	B	妙高山	飯山線	アーチクラウン部の軽微な圧ざ，剝落
15	B	高場山	飯山線	アーチクラウン部の圧ざ，ひび割れ，打ち継ぎ目部の剝離，トンネル坑口部のずれ
16	B	内ケ巻	飯山線	アーチ肩部の軽微な圧ざ，ひび割れ

・被害程度　A：大規模な補強，補修を必要とした被害　B：補修を必要とした被害　C：補強，補修を必要としなかった軽微な被害
・覆　　工　C：コンクリート，CB：コンクリートブロック

示す．**表-1**は，これら被害を受けたトンネルの基本データと被害の概要を示したものである．

2-2-2　魚沼トンネルおよび妙見トンネルの概要と被害状況

（1）　魚沼トンネルおよび妙見トンネルの概要

上越新幹線魚沼トンネルと妙見トンネルが位置している地質は，新第三紀中新世および鮮新世の層の堆積岩が中心である．

このうち魚沼トンネルの被害箇所は鮮新世西山層のシルト岩層と中新世椎谷層の泥岩・砂岩互層部であり，妙見トンネルの被害箇所は鮮新世灰爪層のシルト岩層である．

この区間のトンネルは矢板工法で施工されており，掘削工法は地山条件に応じて底設導坑先進工法，側壁導坑先進工法により建設されている．

覆工巻厚は，岩種別に50cm，70cmを標準としているが，地山条件によっては90cm以上の区間もある．

また，この区間のトンネルはすべてインバートコンクリートが施工されており，その厚さは覆工と同様に地山条件に応じて30～50cmとなっている．路盤はスラブ軌道構造のため，全区間25cm厚さの路盤鉄筋コンクリートがインバートコンクリート上に施工されている．

（2）　魚沼トンネルの被害状況

魚沼トンネルでは，トンネル中間部の3か所で大きな被害が発生したが，このうち195k080m付近の被害がもっとも大きく，覆工コンクリートアーチ部の崩落(延長約5m)，覆工コンクリートのひび割れ，側壁の押出し，路盤コンクリートの隆起(約250㎜)，インバートコンクリートのひび割れなどの被害が発生した(**図-2, 3**)．

路盤コンクリートの隆起に伴う軌道隆起は，この区間ばかりでなく，195k500m(約100m)，198k700m(約50m)の区間でも発生していた．

195k080m付近の覆工アーチ部コンクリート崩落は，下り線側のアーチ部を中心に発生しており，この区間の一部は鋼製支保工や木矢板が露出したものの，地山の崩落は生じなかった．なお，崩落コンクリート塊の最大長は1辺2m近くのものもあった(**写真-1**)．

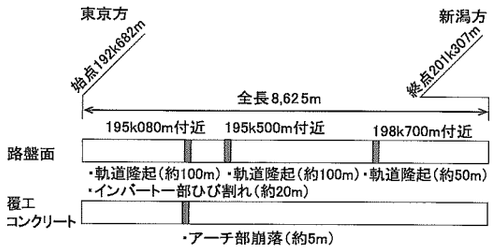


図-2　魚沼トンネル全体被害状況

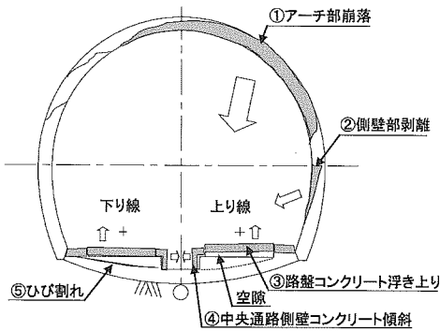
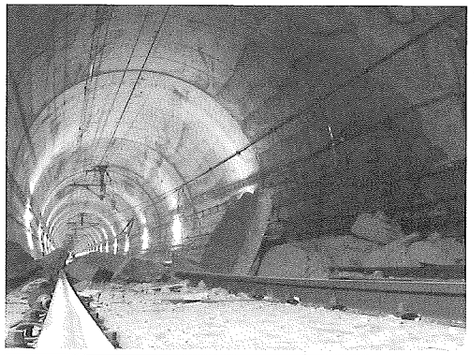


図-3　魚沼トンネル被害状況(195k080m付近)



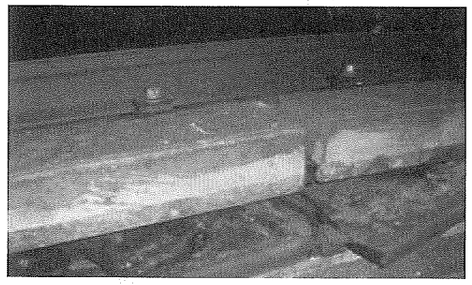


写真-1　魚沼トンネル被害状況

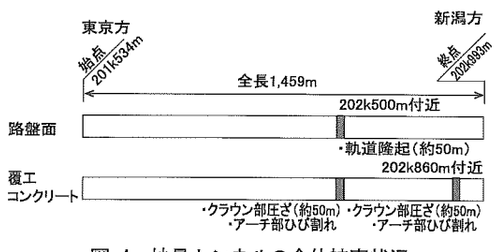


図-4　妙見トンネルの全体被害状況

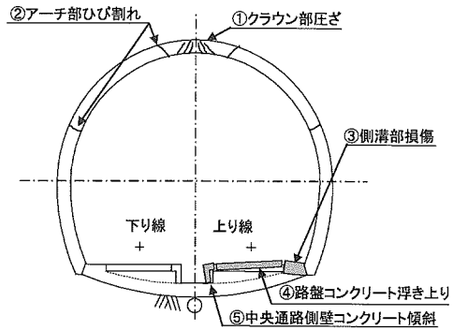


図-5　妙見トンネル被害状況(202km500m付近)

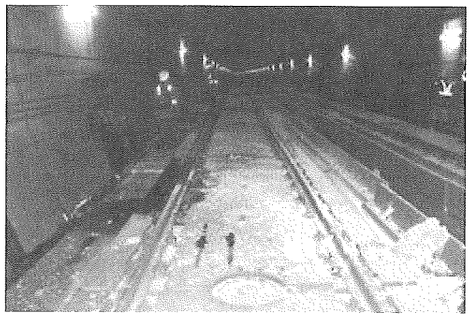




写真-2　妙見トンネル被害状況

（3）　妙見トンネルの被害

妙見トンネルでは，202k500m付近において，クラウン部に大規模な圧ざ(約50m)と，これに伴う覆工コンクリートの剝落が発生し，この圧ざ区間にはアーチ部にトンネル軸方向および斜め方向の多数のひび割れが発生した．

また，この区間の一部下り線側路盤コンクリートが隆起し，インバートコンクリートの一部損傷が生じた．(**図-4, 5, 写真-2**)

また，202k860m付近においても同様にクラウン部に大規模な圧ざ(約50m)とアーチ部にひび割れが生じたが，202k500mのような路盤隆起は発生していない．

2-2-3　上越線和南津トンネルの概要と被害状況

（1）　和南津トンネルの概要

上越線和南津トンネルは，延長725mの複線断面トンネルである(**図-6**)．地質は砂岩が主体であるが，終点側坑口付近は粘土質の地山となっている(**図-7**)．施工は，在来工法であり，底設導坑先進上部半断面工法により掘削されており，支保工は150H，175H，覆工はコンクリート造で，巻厚は50cmを標準としている．なお，このトンネルは，今回の地震により被害を受けた国道17号線和南津トンネルと坑口より約570mの位置で交差している．

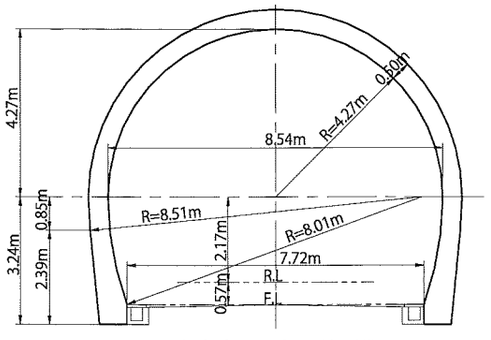


図-6　和南津トンネル断面図

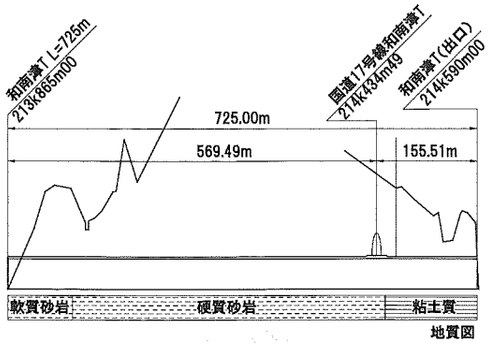


図-7　和南津トンネル縦断図

（2）　和南津トンネルの被害

和南津トンネルでは，ほぼ全線にわたり，ひび割れの発生，ひび割れからの漏水，アーチ・側壁打ち継目部の剝離・剝落が生じた．被害のうち最大のものは，坑口から500m付近で発生し，約40m区間にわたりアーチ部の覆工コンクリートが断続的に崩落しており，一部背面地山が露出している箇所があった．また，この区間を中心に延長50mにわたりクラウン部に圧ざが生じていた(**写真-3, 4**)．また，トンネル入口のコンクリート製の雪覆いが線路方向および線路直角方向に約40cmずれるなどの被害も発生した(**写真-5**)．

2-3　トンネルの復旧方法

地震発生直後より復旧に向けた調査を開始し，早期に被害状況に応じた復旧・補強方法の方針を策定し，この方針を復旧マニュアルとして現場に周知させた．このため，現場においては被害パターンに応じた復旧計画を現場担当者が即座に判断でき，担当者の裁量で詳細な施工方法を決定することができることとなった．なお，魚沼トンネル，妙見トンネル，和南津トンネルといった大きな被害箇所については，個別に復旧方法を検討した．

2-3-1　魚沼トンネルの復旧方法

魚沼トンネルの復旧工事は，覆工部の復旧工事と路盤部の復旧工事に大きく分けられた．

覆工コンクリートの復旧は，不安定なコンクリートをはつり落とした後，ロックボルトを打設し

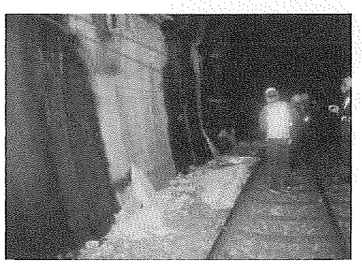


写真-3　アーチ・側壁打継目部の剝落

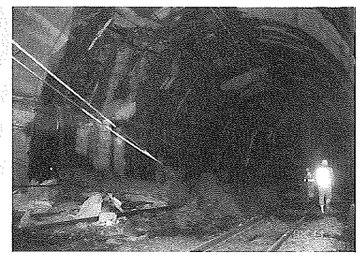


写真-4　アーチ部の崩落

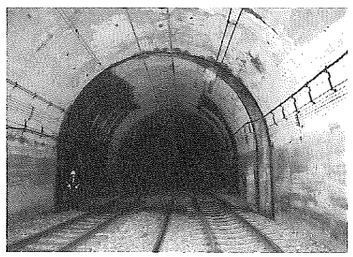


写真-5　坑口部雪覆いのズレ

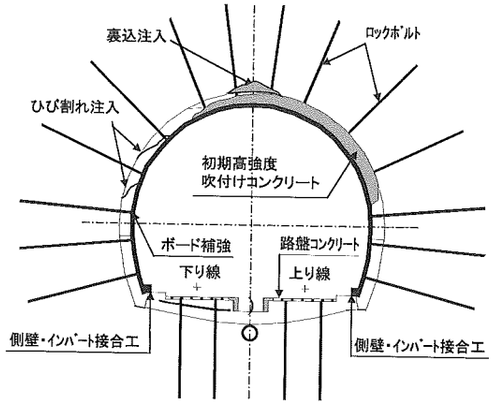


図-8　魚沼トンネルの復旧イメージ(195k080m付近)

(L=3.0m，D29，自穿孔ボルト)，吹付けコンクリートとひび割れ注入による現状復旧を行った．

その後，厚さ6㎜のセメントボードを覆工全周にわたり配置し，ボードと既設覆工の隙間に無収縮モルタルを打設，最終的に厚さ50㎜の内面補強板として強化工事を行った．

路盤部の復旧では，軌道スラブ撤去後インバートコンクリートのひび割れ部へモルタルおよびセメントミルク注入を行った．次に，測量結果を踏まえ必要な箇所は路盤鉄筋コンクリートの取壊しおよびインバートコンクリートの切削を行った．さらにインバートコンクリートの一体化とインバートコンクリートと地山の一体化を目的に，路盤部の鉛直方向ロックボルトを施工した．その後，路盤鉄筋コンクリートを打設したが，隆起量に応じて厚さを調整することで，限界支障に対応した(**図-9**)．

2-3-2　妙見トンネルの復旧方法

202km500mの大規模な圧ざ発生区間の覆工コンクリートの復旧は，圧ざ箇所のひび割れ注入，吹付けコンクリート，アーチ部のひび割れ注入により原形復旧を行い，さらに覆工内面全周を繊維補強板(50㎜厚)で覆い，側壁部にロックボルト(L=3.0m，D29，自穿孔ボルト ctc 1.0m)を施工した．また，復旧工事の最終段階でトンネルクラウン部の裏込め注入を実施した．

路盤コンクリート隆起箇所は，覆工部の工事終了後に路盤部のはつり，インバートコンクリート

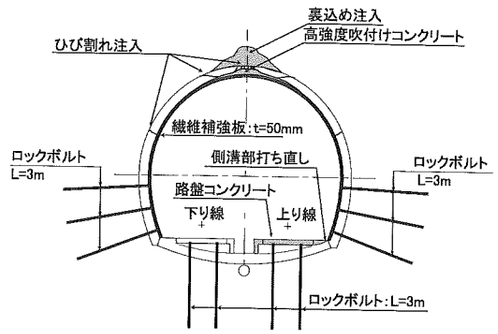


図-9　妙見トンネルの復旧イメージ(202k500m付近)

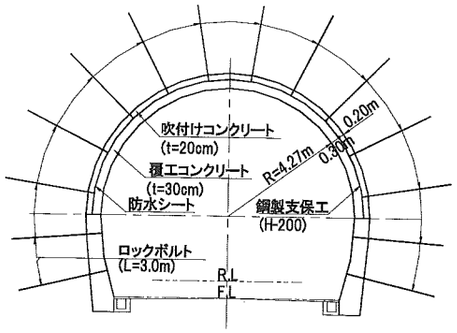


図-10　アーチ部崩落箇所の復旧概要

のひび割れ注入，路盤部ロックボルト打設，路盤コンクリートの打ち替えを行った(**図-10**)．

（1）　和南津トンネルの復旧

覆工コンクリートの崩落箇所付近は，被害が大きかった上半断面の覆工コンクリートを延長48mにわたり撤去し，新たに覆工コンクリートを打ち替えることとした(図-10)．

2-4　被害原因の推定

今回の地震で甚大な被害を受けた位置は，いずれも震央から非常に近接しており，水平距離が約5 km以内であった(**図-11**)．また，地震規模もM 6.8と大きかった．つまり，今回トンネルが大きな被害を受けた条件として，①震央から近い，②地震規模が大きい，の2つがまず挙げられる．さらに，追加調査を行った結果から，次のようなことがわかった．

地質調査の結果からは，魚沼トンネルでは，全体には泥岩を主体とするものの，被害位置に沿うように細粒凝灰岩のクラック帯がトンネルを横断していることが確認された(**図-12**)．妙見トンネ

ルでは，被災箇所直上の地上部において大規模な地滑りを確認しており，周囲に比べて地山が悪いことが想定された．和南津トンネルはとくに固結度の低い低強度の地山が確認され，いずれも非常に弱い地質であったことが確認された．一方，被害の軽微なトンネルの地質はクラックも少なく，圧縮強度も大きなものであったことが確認された．

また，覆工背面空洞調査では，被害箇所の覆工クラウン部背面に空洞が存在していたことが確認できた．

以上のように，今回の地震によりトンネルが被害を受けた原因としては，先の２つに加え，詳細な調査により明らかになった「地質上の問題」と「トンネル構造上の問題」が加わった場合と考えられる．

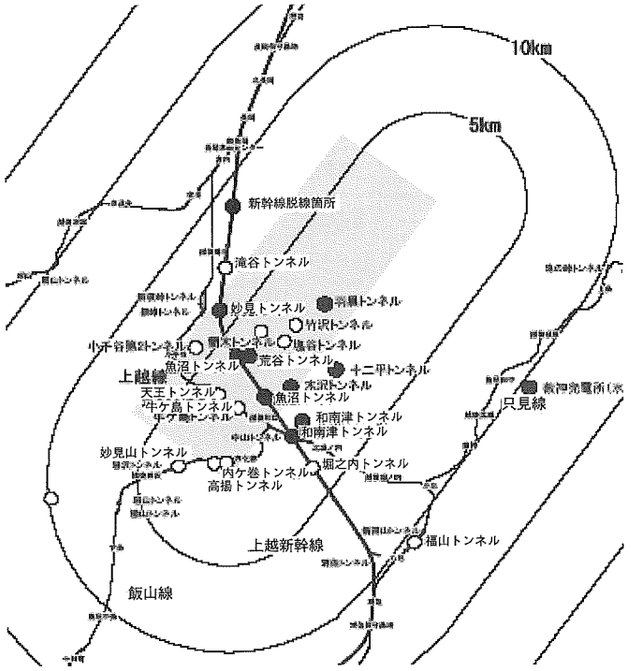


図-11　推定震源断層と被害位置図

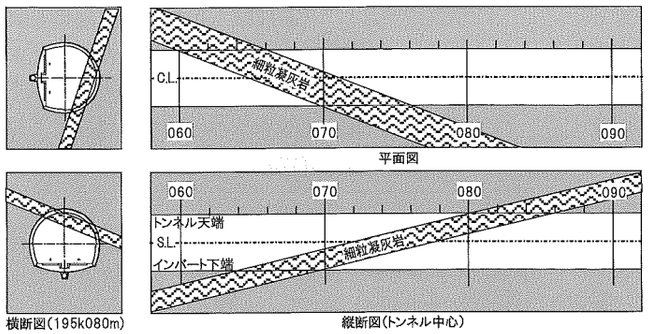


図-12　魚沼トンネル195k080m付近地質概要図

3　新潟県中越沖地震における被害

3-1　地震被害の概要

2007年７月16日10時13分ごろ，新潟県中越沖（北緯37度33.4分，東経138度36.5分）を震源とするM6.8の地震が発生した．本震の最大震度としては，長岡市，柏崎市，刈羽村にて震度６強を記録した．この地震により比較的顕著な被害を受けたトンネルは，本震震央に近い信越本線第一米山トンネル，第二米山トンネル，第三笠島トンネルの３トンネルであり，主な損傷は，トンネル軸方向の連続した圧ざ，覆工コンクリートのせん断ひび割れに伴う覆工コンクリートの剝落，側壁コンクリートの損傷，坑門コンクリート既設変状箇所の目開きであった．

3-2　鉄道トンネルの被害状況

3-2-1　被害概況

地震発生を受け，信越本線米山・柏崎間の８トンネルについて被害状況調査を行った．調査の結果，比較的顕著な被害を受けたトンネルは，信越本線第一米山トンネル，第二米山トンネル，第三笠島トンネルの３トンネルであった（表-2）．以下に，比較的顕著な損傷を受けた３トンネルについて，各トンネルの損傷状況を述べる．なお，各トンネルの諸元などは財産図にもとづく情報を示す．

3-2-2　第一米山トンネル

第一米山トンネルは，米山駅～笠島駅間において，代表地質が軟質砂岩，土かぶり約66m，導坑先進上部半断面工法で施工された在来線複線断面トンネルであり，インバートは施工されていない．第一米山トンネル縦断図を図-13に示す．なお，第一米山トンネルは，本震震央からの距離は約30kmであり，以下の２区間について顕著な損傷が見られた．

（１）　24k569m～24k686m

天端部に連続的に圧ざが発生し覆工コンクリートの一部（落下片：幅約30～60cm×厚さ約20cm程度）が剝落した．また，24k600m付近では，とくに損傷が激しく，天端部の圧ざ，アーチ肩部での覆工コンクリートのせん断ひび割れに伴う損傷，側壁部の損傷などが発生した（写真-7, 8）．

（２）　25k316m～25k327m

軟質砂岩と破砕状安山岩の地質境界付近であり既変状（アーチ部に複雑なひび割れ）が生じているとともに，漏水箇所でもある．損傷状況は，下り線側天端部で圧ざが発生し，覆工コンクリートの一部が剝落した．

3-2-3　第二米山トンネル

第二米山トンネルは，米山駅～笠島駅間において，代表地質が泥岩，土かぶり約60m，導坑先進上部半断面工法で施工された延長1,397mの在来線複線断面トンネルであり，インバートは施工されていない．第二米山トンネル縦断を図-14に示す．なお，第二米山

表-2　トンネル損傷状況

No.	トンネル名称		キロ程		主な損傷状況
1	第一米山トンネル		24k569m	24k686m	天端部の圧ざ，アーチ肩部せん断ひび割れ，側壁コンクリート損傷など
			25k316m	25k327m	アーチ肩部圧ざなど
2	第二米山トンネル		26k183m	26k193m	アーチ両肩部軸方向ひび割れ
			27k163m	27k178m	側壁コンクリート上部剝落など
5	第三笠島トンネル		28k930m付近		坑門コンクリート既補修箇所目開きなど
		上	28k930m	28k938m	食い違い，目開き
			28k938m	28k949m	側壁折れ込み
		下	29k060m付近		天端山側に一部浮きおよびひび割れ

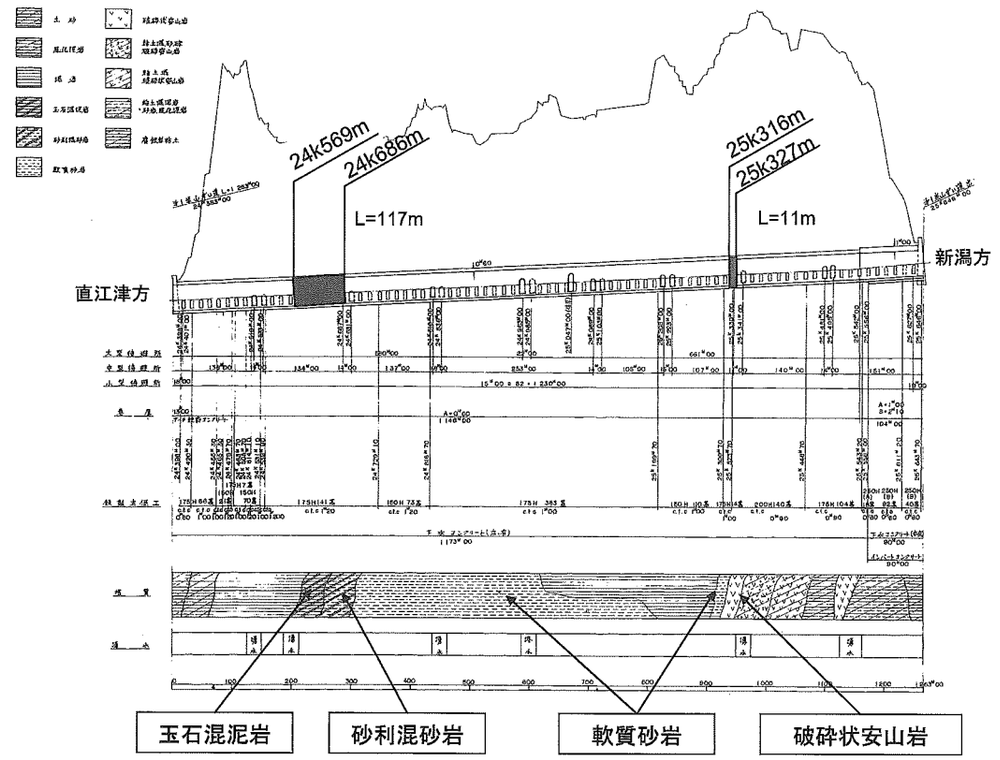


図-13　第一米山トンネル縦断図

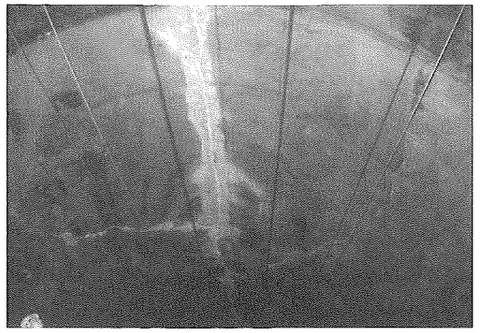


写真-6　第一米山トンネル(天端)

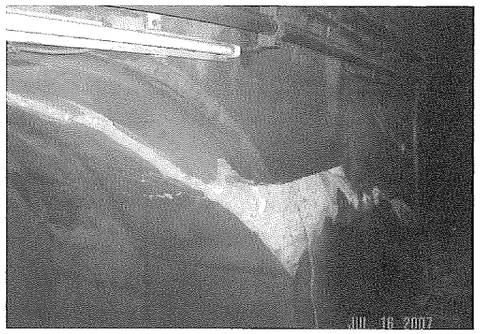


写真-7　第一米山トンネル(側壁)

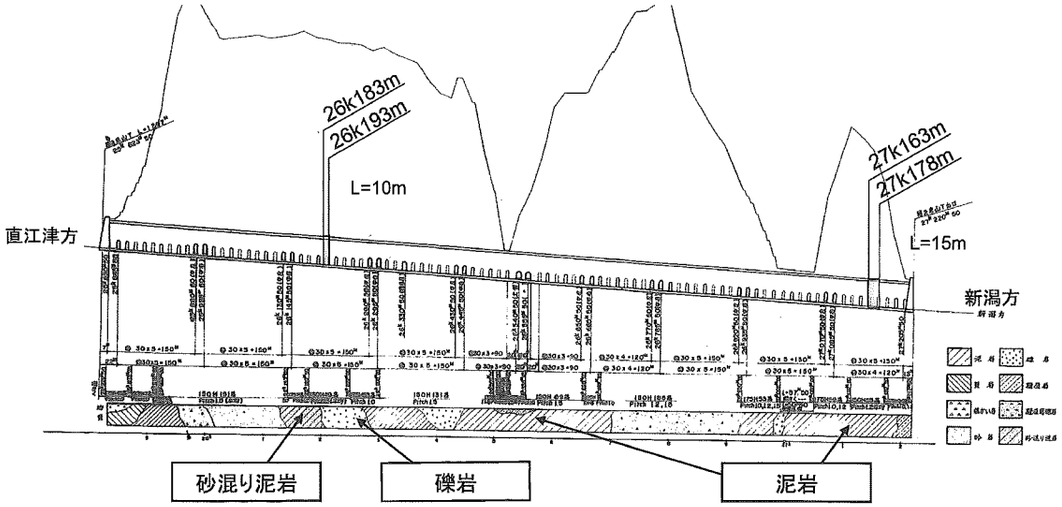


図-14　第二米山トンネル縦断図



写真-8　第二米山トンネル(上り側壁)

トンネルは，震央からの距離は約28kmであり，以下の2区間について顕著な損傷が見られた．

(1)　26k183m～26k193m

砂混じり泥岩と礫岩の地質境界付近であり，両アーチ肩部に軸方向ひび割れが発生し，施工基面上からの目視では，約5㎜程度の開口が生じた．

(2)　27k163m～27k178m

両側壁上部のコンクリートが損傷し，せめ部とともに剝落した．とくに上り線側の側壁の損傷が大きかった(**写真-9**)．ただし，アーチ部の覆工コンクリートは健全であった．

導坑先進上部半断面工法による施工であったため，逆巻きで覆工コンクリート打設が行われており，足付けコンクリート間の側壁コンクリートの打設は，打込み口を設置(打込み後に撤去し，後埋めモルタルを充填)し打設するため，アーチ部下端は斜めになっている．このため，今回のような損傷を生じたものと推定される．

3-2-4　第三笠島トンネル

第三笠島トンネルは，下り線は第七米山トンネルとして竣功したが，その後の線増工事による上り線建設に伴い，改築工事(甲型煉瓦造から単線1号型コンクリート造に改築)を行い，第三笠島トンネル(下)と名称変更した延長約347mのトンネルである．上り線については，代表地質が集塊岩，土かぶり約40m，導坑先進上部半断面および全断面工法，一部開削工法により施工された延長約375mのトンネルである．第三笠島トンネル付近の航空写真を**図-15**に示す．なお，震央からの距離は約26.5kmである．

(1)　上り線28k930m(坑門コンクリート)

第三笠島トンネルは，線増工事に伴い海側のトンネル(下り線)と国道8号線の間に建設されたトンネルである．直江津方坑口の坑門コンクリート(擁壁コンクリート)は，地震発生前の既変状(ひび割れ)部分にアングル補強を行っていた箇所であった．今回の地震により，補強材(アングル)の変形，ボルトの破断が生じ，更なるひび割れの開口を生じた(**写真-9**)．

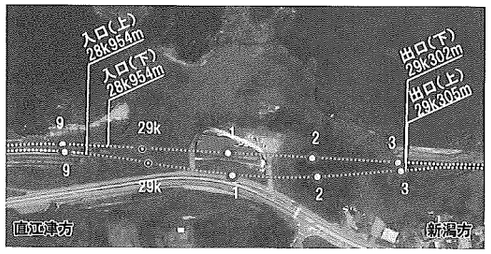


図-15　第三笠島トンネル付近航空写真



写真-9　第三笠島トンネル(上り線)

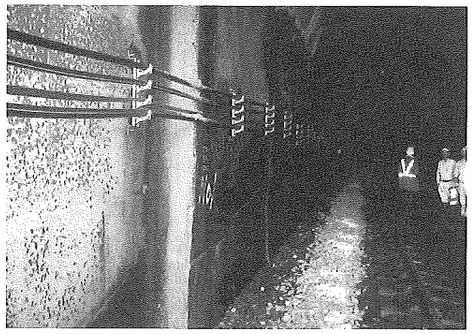


写真-10　第三笠島トンネル(上り線)

(2)　上り線28k930m～938m

当該区間は，坑口部の1スパン分が海側に170㎜ずれ(食違い)，トンネル軸方向には，2スパン目との開口幅が70㎜(海側側壁部での測定結果)であったため，建築限界を支障しているおそれがあった(**写真-10**)．

3-3　被害原因の推定

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震のさい検証した被害原因の3条件，距離条件，地質条件，構造条件より本中越沖地震の被害原因を想定した．

3-3-1　距離条件

被害を受けた3トンネルは，いずれも推定された震源断層モデル(国土地理院，7月26日16時00分発表)のすべり面を地表に投影した線から5km以内に位置し，断層面の延長線上に位置している．

3-3-2　地質条件

第一米山トンネルにおいて，とくに被害の大きかった24k569～686mの地質は，礫岩および砂岩でありトンネル上方では大規模な斜面崩壊も発生している．新潟方で被害を生じた25k316～327mの地質は，軟質砂岩と破砕状安山岩の境界部であった．第二米山トンネルにおける26k183～193mの地質は，砂混じり泥岩と礫岩の境界部であった．

第三笠島トンネルにおいて被害を生じた上り線坑口部については，開削工法により施工され，トンネルと国道8号線間の斜面に盛土を行っている．今回の地震により，この斜面も崩壊している．地震によりトンネル側部の盛土部が押されることにより，当該区間に食違いを生じたものと推定される．

3-3-3　構造条件

地中レーダーによる覆工巻厚および背面空洞調

査をトンネル全線にわたり実施した．その結果，天端部の覆工背面に平均約30cm程度の空洞がトンネル軸方向に連続的に存在した．また，被害を受けた3トンネルは，いずれもインバートのない構造となっている．さらに，地震前の変状展開図より，ひび割れや漏水などの既変状が発生していた箇所でもあった．

3-4　復旧方針

トンネル復旧に際しては，新潟県中越地震の復旧法と同様に，損傷状況に応じた復旧方法をパターン別に示し，現地では損傷状況に応じて復旧パターンを組み合わせ，範囲，順序などを適宜変更し復旧作業を行うこととした．

4　東北地方太平洋地震におけるトンネル被害

4-1　地震被害の概要

2011年3月11日14時46分ごろに発生したM9.0の東北地方太平洋沖地震は，広範囲かつ長時間にわたる揺れを発生させ，高架橋をはじめとするJR東日本管内の鉄道構造物に大きな被害をもたらした．このうち新幹線トンネルの主な被害は，郡山～福島間に位置する福島トンネルをはじめとした，4トンネル(那須，福島，志賀，第一梅ノ沢)で発生した．4トンネルのうち被害が大きかったのは志賀，福島の2トンネルであり，被害内容は路盤の隆起に伴う軌道変状と中央通路部の損傷であった．**図-16**に各トンネルの位置を示す．今回の地震においては，被災したトンネルは那須塩原から仙台間の広範囲にわたることが特徴である．なお，被害を生じた箇所は，トンネル延長に対し，一部区間のみの限定的な被害であった．

4-2　新幹線トンネルの被害状況

4-2-1　福島トンネル

(1)　トンネル諸元

福島トンネルは，東北新幹線郡山～福島間に位置する延長11,705mのトンネルである．被害を生じた区間の代表地質は，凝灰岩，泥岩であり，褶曲構造の泥岩層と凝灰岩との互層からなる地層構造である．掘削工法は，上部半断面先進レール工法，底設導坑先進上部半断面工法で施工され，支保工はH175 ctc 1.3m，覆工厚は50cm，路盤構造は，りょう盤コンクリートである．なお，震央からの距離は153kmである．

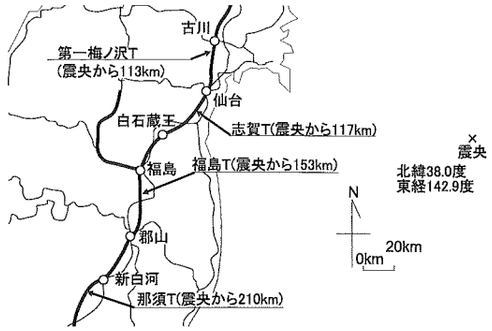


図-16　被災トンネル位置図

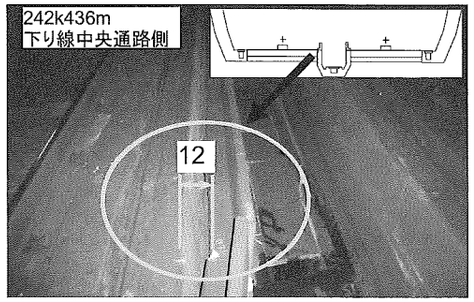


写真-11　下り線路盤コンクリート―中央通路部の開口状況

(2)　被害概要

主な被害は，242k370～500m間の中央通路部の損傷，242k351～511m間の路盤部の隆起に伴う軌道変状である．

(3)　中央通路部の損傷

242k370～500m間において，上下線間の中央通路部に側壁傾斜，底版損傷などの被害を生じた．**写真-11**に，242k436m付近の下り線中央通路部の被害状況を示す．当該箇所では，中央通路底面のサブドレーンの蓋やトンネル巡回車の走行路部分が損傷した．また，下り線の路盤コンクリートと中央通路との間に120㎜の開口を生じた．中央通路と路盤コンクリートとの間の開口は，上り線側でも生じ，開口量は最大50㎜であった．

(4)　路盤部の隆起に伴う軌道変状

242k351～511mにかけての約160m間において，

軌道の変状が顕著に現れた．当該区間の軌道の高低データを**図-17**に示す．図中，横軸がキロ程，縦軸が242k297mを基準とした軌道の高低(レベル測量による相対高さ)を示す．中央通路側が側壁側に比べ，相対的に高くなっていることを示している．

(5)　トンネル内空断面について

路盤部の隆起に伴う軌道変状を生じた区間について，建築限界確認のためトンネル断面測定器により計測した断面データを用いて，S.L.付近の内空断面幅の確認を行った．設計上のS.L.付近の内空断面幅は9,600㎜であるが，施工余裕を考慮し，大きめな断面で施工されるのが一般的である．このため，軌道の隆起が相対的に小さい242k332mにおけるS.L.付近の内空断面幅9,771㎜を基準として内空断面の変化を想定することとした．

図-18は，今回の路盤部の隆起に伴う軌道変状を生じた区間のうち，242k300～522m間の内空断面幅を示したものである．内空断面は縮小傾向にあり，下り線の軌道の水準変位が最大となった付近の242k447mでは想定内空縮小幅は175㎜であった．

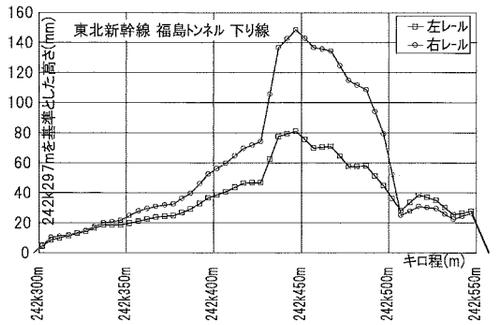


図-17　下り線軌道高低データ(レベル測量)

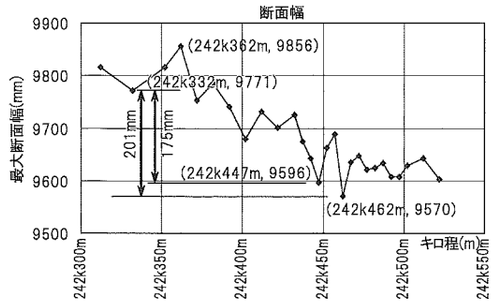


図-18　トンネル内空断面幅

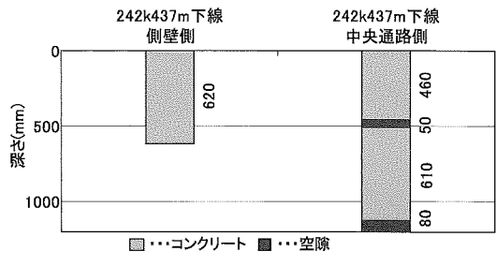


図-19　コア削孔結果(242k437m付近下り線)

(6)　コア削孔による調査結果

トンネル内空の縮小に伴い，路盤コンクリートとりょう盤コンクリートとの打継ぎ目，あるいは，りょう盤コンクリートと地山との間に空隙が生じ，路盤部が隆起したことが想定された．そこで，コア削孔(φ100)による空隙調査を行った．コア削孔調査は，下り線軌道の水準変位が最大となった242k437m付近および242k442m付近，上り線についても同様に242k407m付近の3地点とした．それぞれの地点において，中央通路側と側壁側の2か所の計6本のコア削孔を行った．

242k437m付近の下り線のコア削孔結果を**図-19**に示す．中央通路側のコア削孔結果から，路盤面からの深さ460㎜の位置で50㎜程度の空隙が確認された．さらにコンクリートは，その先も深さ方向に610㎜にわたって続き，最終的なりょう盤コンクリートと地山との空隙は80㎜であった．一方，側壁側については，路盤面から480㎜の深さまでコンクリートコアが得られ，りょう盤コンクリートと地山との間に空隙は確認されなかった．

4-2-2　志賀トンネル

(1)　トンネル諸元

志賀トンネルは，東北新幹線白石蔵王～仙台間に位置する延長3,502mのトンネルである．被害を生じた区間の代表地質は，泥岩や頁岩，凝灰岩，角礫凝灰岩などの堆積岩，および安山岩などの火成岩から構成され，火山活動などに伴う安山岩の貫入により各々の地質が複雑に組み合わさった地質，地層構造となっている．

掘削工法は，側壁導坑先進上部半断面工法のほか，2段サイロットやスプリングサイロット工法

が用いられ，支保工はH200 ctc 0.9，1.0m，覆工厚は70，90cm，インバート構造である．なお震央からの距離は117kmである．

（2） 被害概要

志賀トンネルの主要な被害は，福島トンネルと同様に路盤部の隆起に伴う軌道変状である．軌道の変位は，309k545～310k177m間において発生した．また，309k690～683m間の上下線のアーチ部および310k080～136m間の上下線の側壁部において軸方向のひび割れが発生した．

（3） 路盤部の隆起に伴う軌道変状

309k545～310k177m間の上下線軌道の高低データを**図-20**に示す．軌道変状箇所は，3か所で顕著であった．

なお，水準変位は最大で16㎜となった．

（4） トンネル内空断面について

志賀トンネルについても福島トンネル同様に被災前の断面計測データがないため，被災後の建築限界確認のためトンネル断面測定器により計測した断面データより，309k555mのS.L.付近の内空断面幅9,715㎜を基準とした．なお，設計上の内空断面幅はA～C区間とも9,600㎜である．

図-21は，A～C区間の内空断面幅を示したものであり，図中の横軸がキロ程，縦軸が断面幅である．初期値に対し，A～Cの3区間において，それぞれ最大80㎜，220㎜，242㎜の縮小幅であった．

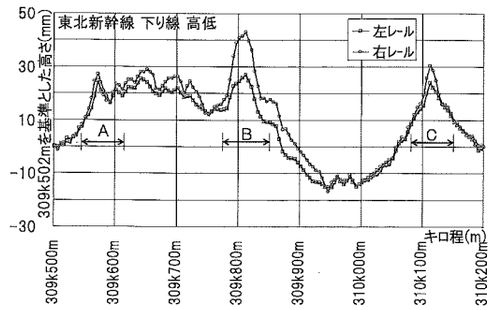


図-20　下り線軌道高低データ（レベル測量）

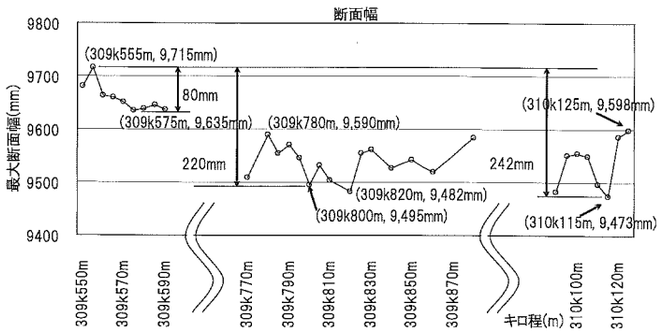


図-21　トンネル内空断面幅

4-3　被害原因の推定

両トンネルの変状区間は，調査の結果水平方向の内宮断面が縮小している．また，福島トンネルではコア削孔調査の結果，りょう盤，路盤コンクリートが損傷し，空隙が発生していることが確認されている．これより軌道の変状（路盤隆起）は，トンネルが地震時に水平方向に縮小変形し，これにより路盤，りょう盤コンクリートまたはインバートコンクリートが損傷し，空隙が発生したためと推定される．

福島トンネルの変状区間は泥岩と凝灰岩の互層であり，変状区間の終点側以北ではインバートが施工されており，インバート施工区間では変状は発生していなかった．これより他のりょう盤コンクリート区間に比べ地山が軟弱であったため水平方向のトンネル変形が生じたものと考えられる．

志賀トンネルの変状区間は，工事誌によると複雑な地層構造のうえ膨張性粘土鉱物を含む軟弱層であった．このため，この区間の掘削工法は2段サイロットなど特殊な掘削工法を用いたが，工事が非常に難航したことが記録されていた．また，インバートが施工されているが，これが直線に近い形状のためトンネルの変形に有効に作用しなかったものと想定される．

4-4　復旧方針

福島トンネル，志賀トンネルともりょう盤コンクリートまたはインバートコンクリートの空隙部へのセメントミルクおよびモルタルの充填を応急復旧として実施し，その後，営業運転再開後に本復旧として路盤部および側壁部のロックボルトの打設を行った．

施工方法は新潟県中越地震の復旧法と同様にマニュアル従い実施した．

特集：地震とトンネル

中越沖地震による高速道路トンネルの被災事例分析
—北陸自動車道　米山トンネル—

(株)高速道路総合技術研究所道路研究部トンネル研究室室長　中野清人
(株)高速道路総合技術研究所道路研究部トンネル研究室主任研究員　小川　澄

1　はじめに

平成19年7月16日に新潟県中越沖を震源としたM6.8（震度6強）の地震が発生した．この地震による高速道路の被害は，北陸自動車道の約95kmにわたって発生し，路面の陥没，橋梁の損傷，トンネル覆工のクラック・はく落が生じた．トンネルの被害は，米山トンネル（上下線）において発生した．これまで大きな地震が数度発生したが，高速道路のトンネルでは明らかに地震に起因するような大きな被害は生じておらず，一般的にトンネルは他の構造物に比べて地震に強いと考えられてきた．昨年の東北地方太平洋沖地震においてもNEXCOのトンネルは被害は見られなかった．

本稿では，米山トンネルで発生した地震被害の状況とその復旧方法について報告するとともに，被害の要因を探るために行った再現解析から，山岳トンネルの耐震性について考察したものである．

2　中越沖地震による被害[1)]

2-1　米山トンネルの概要

米山トンネルは，北陸自動車道米山IC～柿崎IC間に**図-1**のとおり位置する．

トンネル延長1.6km，地質は泥岩と砂岩の互層で一部凝灰岩を含む．矢板工法にて施工され，昭和58年に供用し，供用後約24年経過していた．

図-2に示すとおり被害があった区間は覆工巻厚45cmの無筋コンクリートで，インバートは設置されていない．また，覆工背面への裏込め注入はなされていない．他の覆工巻厚60cmでインバートを有する区間もあるが被害は生じていない．トンネルの土かぶりは最大で280mあり，被害位置は土かぶりが約190mであった．

2-2　被害状況

被害状況は**写真-1**，損傷の形態を**図-3**に示す．上り線は延長45m程度の範囲（**図-4**，KP381.8付

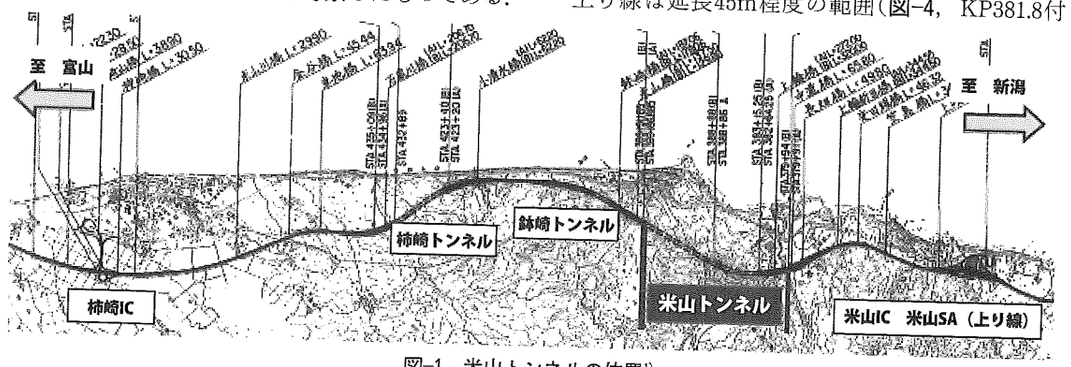


図-1　米山トンネルの位置[1)]

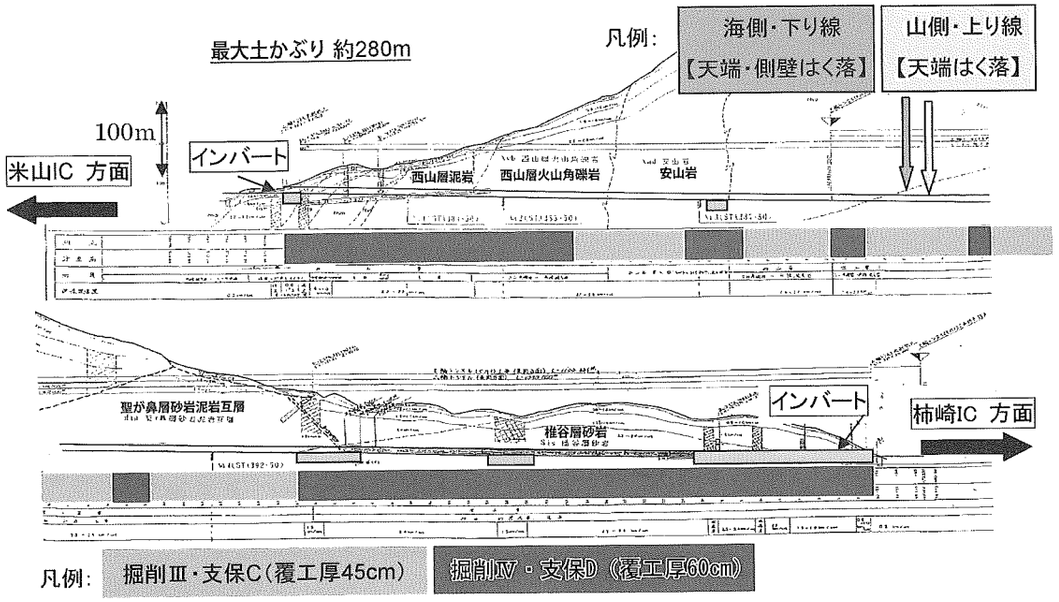
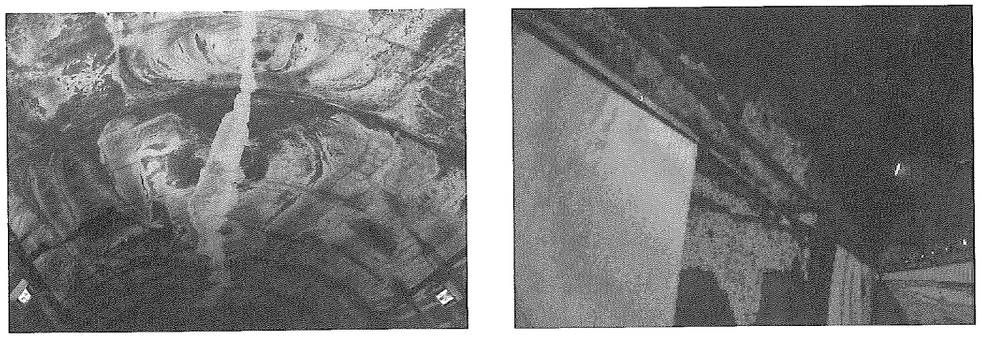


図-2　被害位置[1)]



(1)　上り線　天端部覆工コンクリート損傷　　(2)　下り線　側壁部覆工コンクリート損傷

写真-1　米山トンネル被害状況[1)]

近)に集中して天端部の覆工コンクリート表面のはく落が生じた．はく落部の横断方向は最大で1m幅程度，厚さは打ち継目部で最大15～20cmであった．

下り線は延長200mの区間で天端部のコンクリートで最大厚さ5cmほどの表面はく落が数箇所生じた．また写真-1のとおり側壁部のコンクリートについても延長130m区間でアーチコンクリートの打ち継目付近から高さ70cm，厚さ10cmのはく落が生じた．

その他，上下線とも円形水路の開口部が閉じており，その縮小量は最大で100㎜であった．一般

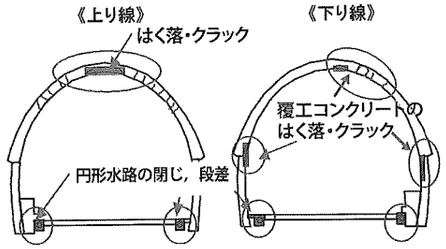


図-3　損傷の形態[2)]

的に内空の平均ひずみ0.5～1.0%を覆工が損傷する目安としているが，そのレベルの変位量であった．変形のメカニズムとして，上下線とも地震時の水平方向の大きな震動により，地山が塑性変形

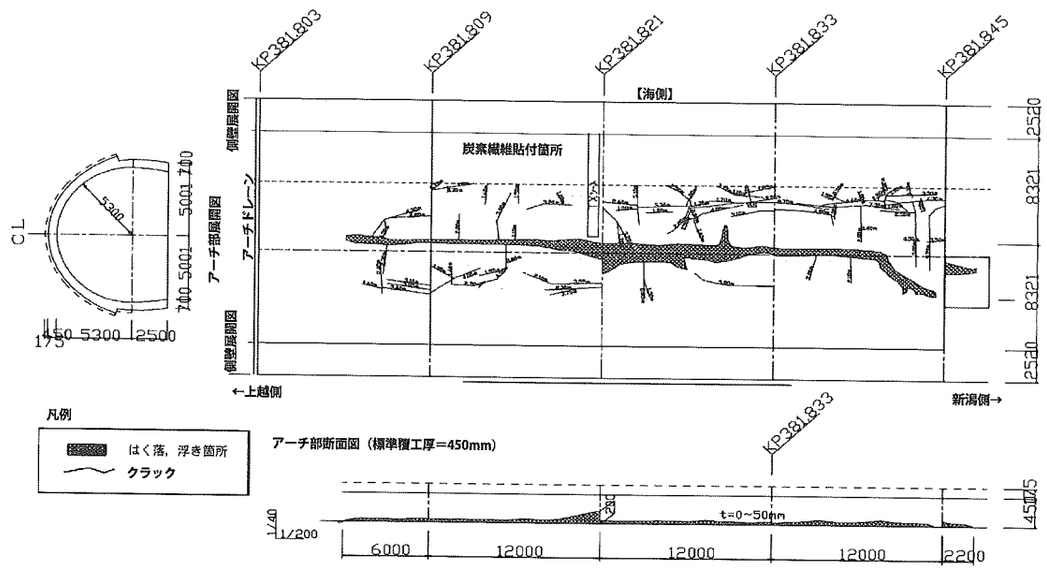


図-4　上り線のはく落状況[1)]

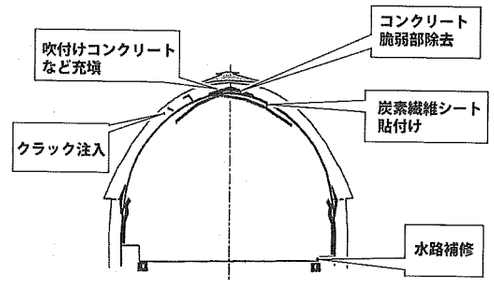


図-5　上り線の応急復旧概要[1)]

し，トンネル天端部・側壁部に圧ざ破壊が生じたと考えられる．また円形水路と舗装面との段差が生じている箇所もあった．

被害状況は全般的に上下線とも覆工コンクリート表面のはく落に留まっており，トンネル構造として問題となるレベルではなく軽微であった．

2-3　応急復旧

まず，緊急対策として下り線において天端部および側壁部のコンクリート浮き部分を除去し，仮設シートを貼ることにより通行の安全性を確保し，震災2日後には対面通行で供用した．

次に行った応急復旧対策工の概要を図-5に示す．天端部のコンクリート浮き部分と脆弱部を除去し，クラック注入を行った後，断面欠損部は繊維補強モルタルを吹付け充填した．はく落対策として炭



写真-2　炭素繊維シート施工状況[2)]

素繊維シート(写真-2)で補強して応急復旧を終え，17日後には下り線の対面通行を上り線の対面通行に切り替えた．その後，下り線の側壁部のコンクリート脆弱部を除去し断面欠損部は同様に繊維補強モルタルを充填し，天端周辺のクラック注入および水路の一部を補修した．きわめて迅速に応急復旧が行われた．

3　現地調査から本復旧まで

3-1　地震後の内空測定

地震発生後，SLでの内空幅，路面と天端の高さを上り線全線で実測し，内空幅と内空高の設計値との差を図-6に整理した．これは設計値と差であり，完成当初の実測値ではなく直接に比較することはできない．しかし，マクロ的に見ると損傷

範囲周辺では内空幅，内空高ともに収縮している傾向となっている．

3-2　保全点検資料，施工時資料の分析

被災前の保全点検では，損傷区間の覆工の判定は，「A2」判定が多くあった．判定区分を**表-1**に示す．損傷しなかった区間についてもA2が多くあり，A3の判定もあった．両者間において覆工の健全度に明確な差は見られない．しかし，損傷区間においては，以前から路面の隆起，つまり盤ぶくれと思われるような現象が確認されていた．

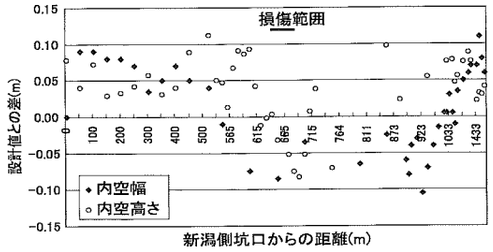


図-6　内空寸法の設計値との差(下り線)[3]

表-1　点検結果の判定区分[4]

判定区分		一般的状況
機能面に対する判定	AA	損傷・変状が著しく，機能面からみて速やかに補修が必要である場合．
	A	損傷・変状があり，機能低下が見られ補修が必要であるが，速やかに補修を要しない場合．
	A1※	速やかに補修を要しないが，機能低下が見られるとともに，損傷の進行が早いと予想され，おおむね2年以内に補修が必要になると判断される場合．
	A2※	速やかに補修を要しないが，機能低下が見られるとともに，緩やかに損傷が進行すると予想され，おおむね5年以内に補修が必要になると判断される場合．
	A3※	機能低下が見られるが，損傷の進行は遅く，今後5年以降もしくは継続的な観察により適時補修判断を要する場合．
	B	損傷・変状はあるが機能低下が見られず，損傷の進行状態を継続的に観察する必要がある場合．
	C	機能面に対する判定を行うために，調査を実施する必要がある場合．
	OK	損傷・変状がないか，もしくは軽微な場合．
第三者等被害に対する判定	E	安全な交通または第三者に対し支障となる恐れがあり，緊急的な対応が必要な場合．

※日常点検の安全点検以外は，A判定区分を3区分に細分化した判定を実施する．

これは3-1節の測定結果の内空高さについては地震前から生じていた．原因は，泥岩が応力解放で膨張し，地質状況が時間とともに悪くなったと考えられている．

完成図から見た損傷区間の地山状況は，地層境界付近ではあるが，弾性波速度が2.0km/s程度であり，泥岩において比較的良好な状況といえる．施工は矢板工法の底設導坑先進上部半断面掘削工法であったが，覆工巻厚は標準的な45cmであり，インバートはない．他の損傷しなかった区間は覆工巻厚60cmでインバートを有する．損傷区間は壊れなかった区間より地山が比較的良好であったことから覆工巻厚は薄く，インバートなしの構造で施工されたと考えられている．

3-3　本復旧

本復旧[5]は，上記調査以外に調査ボーリング，岩石試験も実施し，検討された．覆工背面の空洞はあるが，変位はなく，緩み領域が少ないと考えられた．トンネル構造体として問題はないと判断し，覆工背面の空洞充填を実施し，円形水路を取り換え，本復旧を修了した．

4　再現解析による要因推定[3]

4-1　検討の着目点

米山トンネルの地山は，比較的地山条件が良く，被害は危険性が高いとは考えにくい．損傷状況は，天端部のはく落，側壁部のはく落および円形水路開口部の縮小などであり，内空が縮小する方向に残留変形となったと考えられる．

そこで，周辺地山にトンネル掘削に伴うせん断力が発生し，地震時のくり返しせん断によって内空が縮小する方向に残留変形が生じたと考え，この現象について着目することとした．あわせて地震時の上下動についても考慮することとした．また，覆工の変形特性として，覆工の非線形性，覆工背面空洞の有無，覆工厚さの不均一(実測値考慮)，覆工に作用していた荷重(初期応力)を取り上げた．

4-2　解析手法

検討対象は，損傷規模が大きい上り線とし，解析断面は被災区間の中央付近とした．**図-7**に解析モデル，地山の物性値および入力地震動を示す．解析方法は動的解析とし，トンネル覆工を梁要素またはファイバー要素で，地山を平面ひずみ要素でモデル化し，地震時増分の断面力を算出した．入力地震動は，近傍で観測された実波形を解析モデルの基盤面まで引き戻して使用した．なお，解析プログラムは「TDAPⅢ」を用いた．

また，被災箇所は比較的土かぶりがあり(190m程度)，かつ地質境界付近の泥岩であるため，覆工に荷重が作用した状況が想定される．この状況を再現するために，覆工だけのモデルに作用荷重として鉛直と水平を与え，覆工に発生する初期応力を解析で求めた．検討ケースは背面空洞の有無，側圧係数は地山の良好でない場合も想定し0.5，1.0，1.2，1.5の4パターンを設定した．

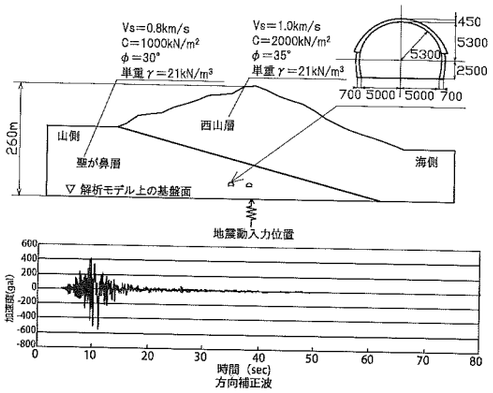


図-7　解析モデル，地山条件，入力地震動[3]

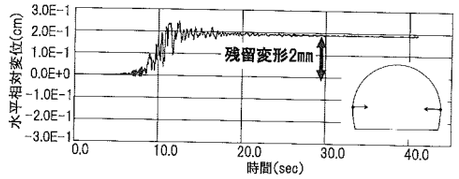


図-8　内空変位時刻暦波形(ケース2)[3]

4-3　動的解析

動的解析における検討ケースと解析結果から得られる地震増分による覆工圧縮応力を**表-2**に示す．天端よりも45度方向の圧縮応力が大きくなり，上り線の天端部損傷の事象を再現していない．ケース2とケース5およびケース8とケース10の比較から，天端に背面空洞があると天端の圧縮応力が大きくなった．

すべてのケースにおいて，地震時増分の圧縮応力だけでは覆工コンクリート設計基準強度18N/mm²，つまり圧壊が生じるレベルに達しない．動的解析で再現することの難しさも考えられるが，地震だけでは損傷を説明することは難しいことがわかる．

参考としてケース2の内空変位の時刻歴波形を**図-8**に示す．加振とともに内空が縮小し，2㎜

表-2　動的解析結果

	覆工の変形特性	地山の初期応力算出における開放応力の考慮	緩みの考慮	天端背面空洞	上下動	覆工厚	覆工内側の最大圧縮応力(N/mm²)	
							天端	45度方向
ケース1	線形	—	—	—	—	設計値	1.88	7.08
ケース2	線形	○(注)	—	—	—	設計値	3.76	10.68
ケース3	線形	○	○ H-Dモデル	—	—	設計値	3.70	8.19
ケース4	線形	○	○ モールクーロン	—	—	設計値	4.65	9.42
ケース5	線形	○	—	○	—	設計値	6.27	10.75
ケース6	線形	○	—	—	○	設計値	4.71	10.59
ケース7 上り線	線形	○	—	—	—	実測値	3.67	12.68
ケース7 下り線							2.84	11.15
ケース8	非線形(ファイバーモデル)	○	—	—	—	設計値	1.92	10.26
ケース9	非線形(ファイバーモデル)	○	○ H-Dモデル	—	—	設計値	1.69	5.77
ケース10	非線形(ファイバーモデル)	○	—	○	—	設計値	3.40	9.67

注)○はH-Dモデルを用いた．：ハーデイン・ドネルビッチモデル(双曲線モデル)[6]

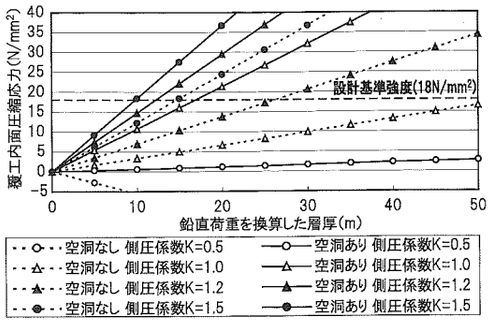


図-9　覆工天端の初期応力解析[3)]

(内空ひずみ0.02%)程度の残留変形が発生する結果となった．一般的に，覆工が損傷する目安とされるレベルの変形量に至っていない．

4-4　覆工初期応力解析

図-9に天端の覆工内面圧縮応力−鉛直荷重(土かぶり高換算)関係を示す．

天端は設計基準強度18N/㎟を越え厳しくなるものがあり，上記の地震時増分の圧縮応力よりも影響が大きいことがわかる．45度方向はすべてのケースで18N/㎟に達することなく安全サイドである．天端は，「空洞あり」の条件で危険となり，側圧係数が大きいほど危険性が高くなることがわかる．

4-5　再現解析の考察

動的解析の地震時増分だけでは覆工の圧壊レベルの応力は生じず，残留変位量もきわめて小さいレベルである．初期応力解析では，天端の危険性が高く，背面空洞がありかつ側圧係数が大きくなるほど危険性が高くなる．

今回は，上述の解析手法で試行し検討したが，地山の構成則など課題はあるものの背面空洞，覆工天端に作用する初期応力もしくは盤ぶくれなど変状に起因する可能性も考えられる．

5　おわりに

米山トンネルの被害状況は覆工表面のはく落に留まっておりトンネル構造体として問題があるような損傷ではなく，軽微であった．地震後，現地調査や内空測定によりトンネルの安定性を確認し，速やかに復旧が行われた．損傷の要因としては，以下のことが導かれる．

① 解析手法には課題はあるものの動的解析結果から，地震力だけで覆工が損傷したとは考えられない．

② 矢板工法に特有の背面空洞，もしくは覆工に作用する初期応力が損傷に影響している可能性がある．

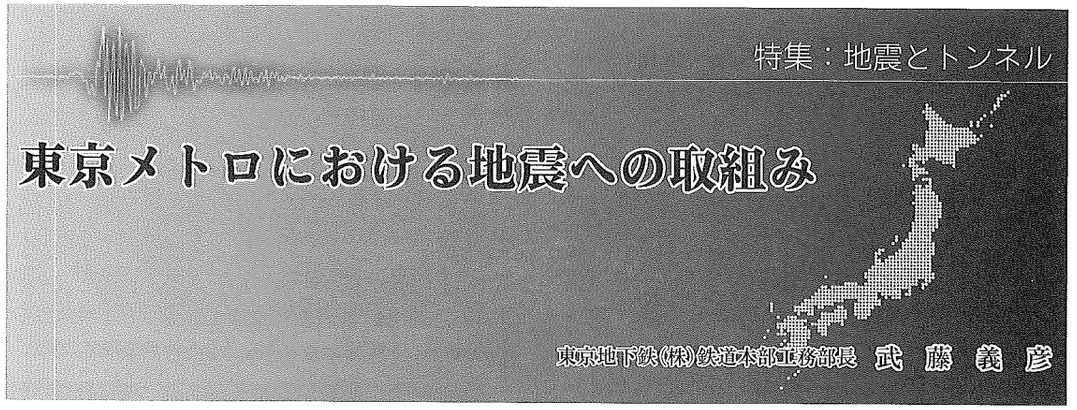
③ 震災前から盤ぶくれが生じており影響を及ぼしている可能性もある．

上記とは逆に，山岳トンネルで背面空洞がなく，覆工に初期応力が作用していない，または変状がない場合は，中越沖地震のレベルであれば被害が生じないといえる．今回の検討ですべてを説明できるわけではないが，米山トンネルのような矢板工法については，背面空洞が少なくとも存在することから，ひとつの考え方として裏込め注入など補修・補強を計画的に行うことで天端部の健全性を増し，その結果，トンネル構造に一定の耐震性を確保することになると考えている．

最後に，震災後の調査・復旧，被害の要因などに関して複数の委員会で検討をしてきた．その中で貴重なご指導いただいた今田徹委員長(東京都立大学名誉教授)，朝倉俊弘委員長(京都大学教授)および関係された委員の方々に感謝の意を表します．

参　考　文　献

1) 土木学会トンネル工学小委員会：新潟県沖中越沖地震調査特別小委員会報告書，2008.1.
2) 東日本高速道路：平成19年(2007年)新潟県中越沖地震　災害報告書〔高速道路の被災状況と応急復旧概要〕.
3) 小川澄・中野清人・清水雅之：トンネルの耐震性能に関する検討―被災トンネルの再現解析による要因分析―，土木学会年次講演会，2009.9.
4) 東・中・西日本高速道路：保全点検要領，2002.5.
5) 渋谷優：新潟県中越沖地震における高速道路の復旧，基礎工，2008.9.
6) 国生剛治・桜井彰雄：MODIFIED HARDIN-DRNEVICHモデルについて，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集，第Ⅲ部門，pp.1181-1184，1979.



1　はじめに

東京地下鉄(株)(愛称，「東京メトロ」)は首都東京の交通を地下鉄の運行によって支え，1日平均631万人のお客様に利用していただいている．現在9路線の交通ネットワーク，合計195.1kmを営業しており，そのうち7路線で他社鉄道との相互直通運転を行っている．

2008年6月に開業した副都心線は東武東上線，西武有楽町線との相互直通運転を行っており，2012年度末には渋谷駅において東急東横線，横浜高速鉄道線との相互直通運転が開始される計画となっている．

当社の構造物は地下鉄の名のとおり約84%がトンネルであり，それ以外は高架橋，橋梁，盛土などとなっている．

今回の東日本大震災においては地上建物およびトンネルの部分で軽微の被害は発生しているが，列車の営業には影響はなかった．

本稿では，東日本大震災後の検討経緯を踏まえて，当社における地震への主な取組みについて紹介する．

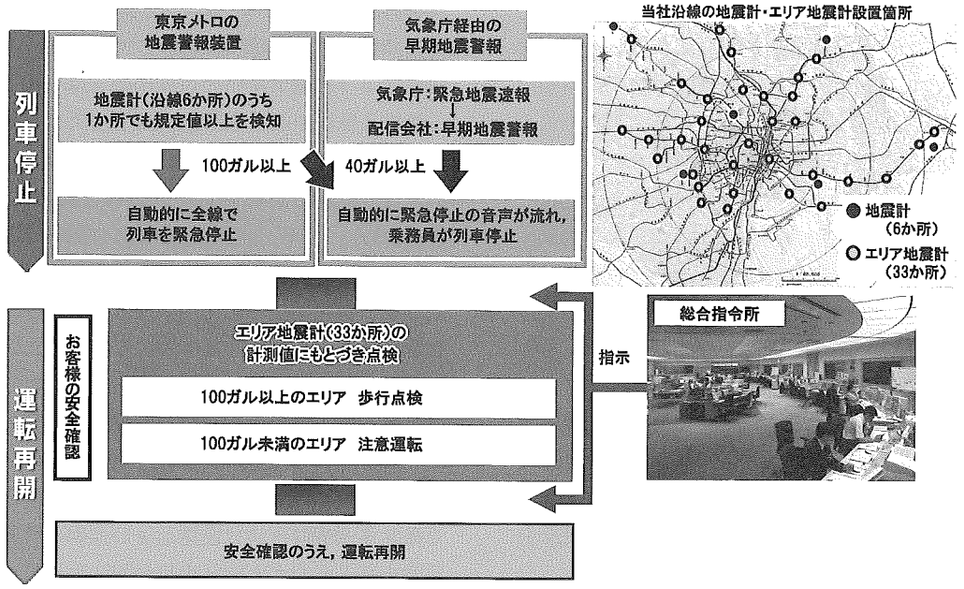


図-1　地震発生時のプロセス

2　地震発生時の対応

当社では運行している列車の安全を確保するために，強い地震が発生したときに車両基地など沿線6か所に設置した地震計から，地震警報が表示され，直ちに地震の大きさに応じた列車の運転規制を行う．さらに気象庁から発信される緊急地震速報を活用した早期地震警報システムの運用を行っており，既設の地震警報装置と併用している(図-1)．

地震警報が40ガル以上では音声による警報が発信され，列車の乗務員による停止操作を行う．100ガル以上では音声による警報に加え，緊急停止信号が全路線の全列車に送られ自動的に緊急停止する．

また，33か所の鉄道構築物に設置されている簡易なエリア地震計から表示されるガル数に応じて点検を行い，安全が確認された区間から運転を再開している．

3　東日本大震災時の対応

2011年3月11日，東北地方太平洋沖地震が発生して，首都圏でも震度5強の大きな揺れを記録した．当社でも直ちに運行中の全列車を停止するとともに，速やかに設備などの点検を行い，安全確認した後に早期の復旧と運転再開を図った．

3-1　地震時の対応

震源地での地震発生直後，14時47分に早期地震速報によって緊急停止指令が全列車に発信され，乗務員の操作により営業していた175本の列車を緊急停止した．その後，首都圏に地震の揺れが到達し，当社の地震計は足立区の綾瀬車両基地で最大179ガルを記録した．

15時ごろからお客様の安全確保と運転再開に向けて，各駅ではお客様の安全な場所への避難誘導を行い，そして駅間で停止した列車を駅まで運転するために安全を確認して速度5 km/h以下で最寄りの駅まで移動し，15時36分(地震発生後50分後)にすべてのお客様の避難を完了した．

余震の状況を考慮し，16時ごろから運転再開に向けて技術社員を総動員して全路線の施設点検を開始した．鉄道構築物に設置したエリア地震計の計測結果にもとづき100ガル以上で徒歩による点検を行うことになっており，今回は100ガル未満のエリアもあったが，すべてのトンネル，高架橋，橋梁および地上部建物の点検作業を行った．

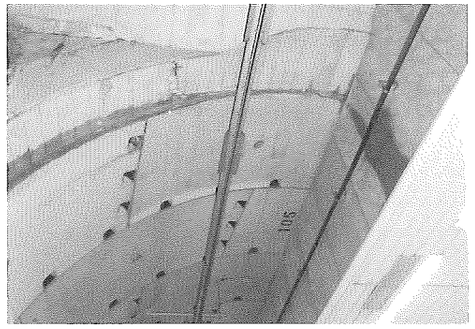


写真-1　駅部開削トンネルとシールド接続部の漏水

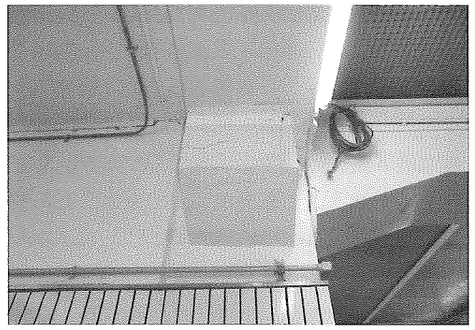


写真-2　地上駅内装部のひび割れ

設備点検の結果，駅構内の漏水，軽微なひび割れなどの一部不具合があったが，運転に支障がないことが確認された路線から運転を再開した(写真-1, 2)．

20時40分に銀座線の運転を再開し，相互直通区間で運転を再開できない区間を除いて最後に23時32分日比谷線，副都心線で運転を再開した．さらに25時25分には終夜運転の実施を発表して，朝までできるかぎりの列車運行を確保した．

3-2　構造物などの被害状況

技術社員による徒歩点検の結果，列車の運転に支障する大きな被害は発生していなかった．運転再開を遅らす原因となったのは地上区間で，当社の財産ではないが，橋梁部に隣接する塀の一部が傾いており，運転を再開すると倒壊して沿線に被害が出る可能性があった1か所のみであった．鉄道の土木構造物，建築施設物は阪神淡路大震災を受けて実施された耐震補強工事の効果によって被害が軽減できたと考えられる．

地震力による構造的な被害は認められなかったが，補修などの対応を必要とする変状は数多く発生し，そのほとんどは漏水であり，通常でも漏水の弱点箇所や漏水履歴のある箇所であった．

なお，3月12日以降も地震発生直後に行った点検を補うため，通常の点検とは別に列車巡回の実施，地上構造物の近接目視点検，駅構内の目視点検などを順次実施した．

4　営業線の耐震対策

当社の土木構造物および地上部建物は関東大震災クラスの地震に耐えられるように造られている．さらに1995年1月に発生した阪神淡路大震災を受けて旧運輸省の通達にもとづき，当社を含めた鉄道事業者は緊急耐震補強工事を実施した．また，2008年に開業した副都心線は現行の耐震標準にもとづいて耐震設計を行った．

営業線における緊急耐震補強の対象構造物として，ラーメン高架橋およびラーメン橋台(RC柱)，開削トンネル(RC中柱)，橋梁および高架橋(落橋防止工)を実施した．また，当社独自の耐震補強工事として，営業線坑口部3か所の液状化対策として地盤補強を実施した．

さらに2001年の国土交通省からの追加指針にもとづき，橋梁のRC単柱の補強工事を行った．

4-1　ラーメン高架橋(RC柱)

高架橋のRC既設柱の曲げ耐力発生時におけるせん断力とせん断耐力を比較し，せん断先行破壊モードの柱に対して補強を行った．補強工法は，鋼板巻立て補強を基本としているが，施工環境が狭隘な場合はアラミド繊維補強，高架橋下部が店舗などの利用により柱周囲の施工環境が大きく制約を受ける場合は一面補強とした(写真-3, 4)．

高架橋柱の補強対象数量3,263本をほぼ完了しており，他鉄道委託駅の中目黒駅，代々木上原駅に残る数本については現在施工中である．

4-2　開削トンネル(RC中柱)

大規模地震が発生した場合に大きな地盤変位を起こしやすい地盤条件にあり，その場合に箱型構造物のRC中柱がせん断破壊先行の破壊モードとなるものを補強対象とした(図-2)．

補強工法は，基本的に地上部ラーメン高架橋のRC柱と同様に鋼板巻立て補強であるが，柱断面の縦横比が大きい(扁平)場合は，巻立てによるはらみ出し効果が薄いと評価し，既設柱の両側に合

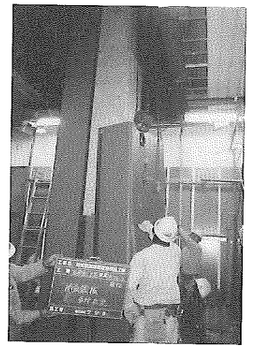


写真-3　鋼板巻立て補強

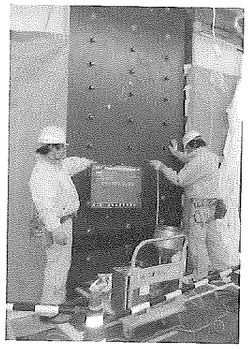


写真-4　一面補強

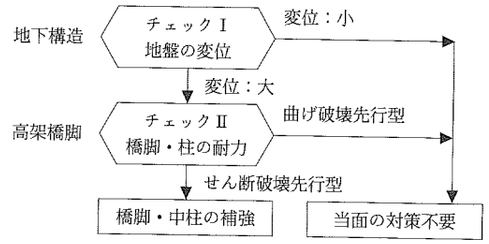


図-2　耐震性の判定

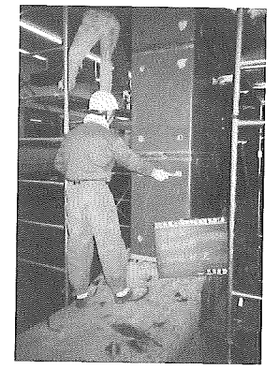


写真-5　トンネル中柱・鋼板巻立て補強



写真-6　添え柱補強

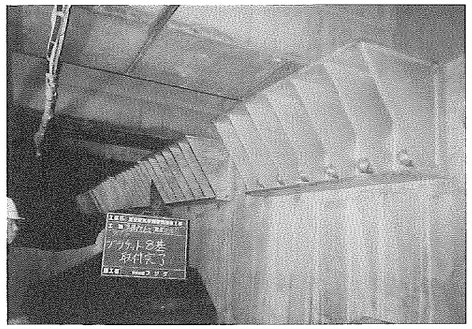


写真-7　鋼製ブラケット

成鋼管柱を設置する添え柱補強を行った(**写真-5, 6**).

開削トンネル中柱の補強対象数量1,204本は2003年度にすべて完了済みである.

4-3　落橋防止工

新潟地震以降，当社では落橋防止工を実施していたが，阪神淡路大震災での被害状況にもとづき見直しを行った．阪神淡路大震災クラスの地震発生時に，橋梁間の離間量が大きく，橋桁が落下すると考えられる箇所については，桁座拡幅のための鋼製ブラケットを設置した．鋼製ブラケットは拡幅量と上部桁の重量により，12タイプに分けて標準として施工を行った．鋼製ブラケットの設置が困難な場合は，連結板やチェーンなどで桁を連結した(**写真-7**).

落橋防止工の設置対象数量949連については2009年度にすべて完了済みである.

4-4　液状化対策

地下トンネルが地下から地上に変化する箇所では，液状化による構造物の浮き上がりなどが懸念されるため，地質調査などによる周辺地盤状況，

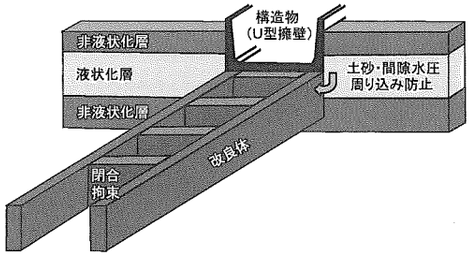


図-3　液状化対策工イメージ図

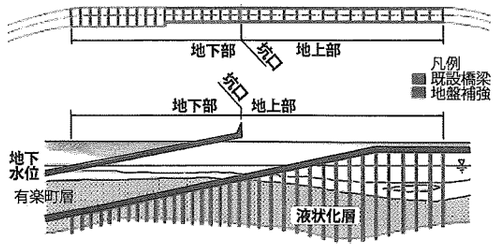


図-4　液状化対策全体平面・縦断面図

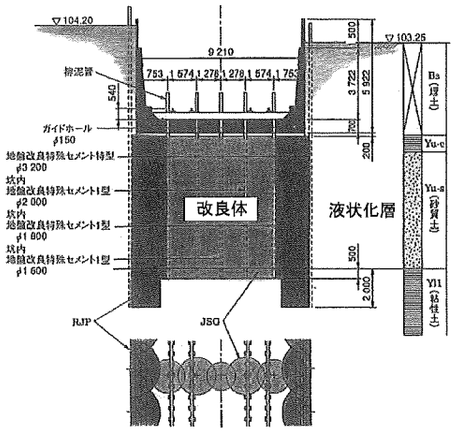


図-5　液状化対策詳細横断面・平面図

構造物の形式・設置状況などから液状化判定を行い，対策を実施した．全路線にある20か所の坑口付近について検討を行い，東西線の南砂町坑口と深川車両基地線坑口，千代田線北千住坑口の3か所で液状化対策が必要であることが判明した.

工法としては，構造物下部の液状化層を高圧噴射攪拌工法や鋼矢板を用い格子状に拘束・併合することとし，3か所の施工を完了している(**図-3～5**).

4-5　橋梁単柱

橋梁橋脚の中でラーメン構造ではなく，単柱形



写真-8　仮締切り設備の設置

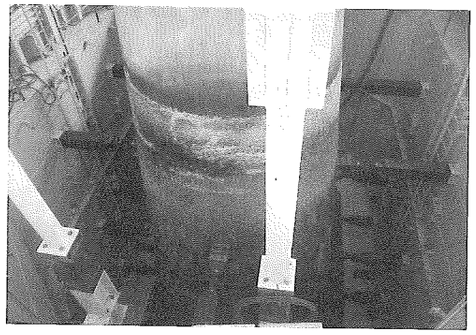


写真-9　仮締切り設備内の排水後の橋脚

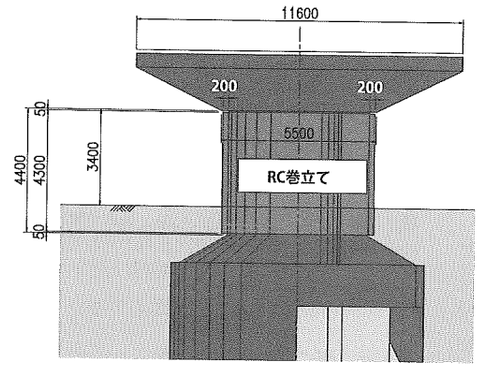


図-6　鉄筋コンクリート巻立て補強図

式の柱においても主筋の段落し部などでの損傷が懸念されたために補強を実施した．ラーメン高架橋の柱と比較して断面は大きいが，同様にせん断先行破壊となる橋脚について補強を行った.

工法としては，すべての橋脚で厚さ200㎜の鉄筋コンクリート巻立て補強とした．河川区域内の橋脚のため橋脚の周りに仮締切り設備を設置し，周辺をドライにしたうえで施工した(**写真-8, 9, 図-6**).

補強が必要となる日比谷線隅田川橋梁，東西線荒川中川橋梁と第2江戸川橋梁，千代田線荒川橋梁の橋脚，計30基について2009年度に施工を完了した.

5　今後の地震対策の考え方

東日本大震災の地震において，当社の構造物は，補修が必要なものも発生したが，補強など列車運行に支障する損傷は発生しなかった．しかし，地震時の課題は施設面およびソフト面ともに浮かび上がり，当社では課題ごとにグループ分けしてこれらの課題の解決を進めている.

5-1　土木構造物の耐震補強の考え方

東北地方において高架橋の柱が損傷した事例が報告されたことを受け，緊急耐震補強を行ったもの以外の高架橋の柱について耐震診断を実施しているところである．阪神淡路大震災を受けての補強では，構造物が崩壊しないことを第一の目標とするとともに復旧の困難さを考慮してきた.

今回の検討ではいかに早く列車運行を再開するかを目指し，せん断抵抗比だけでなく，靭性率を見極めることで，復旧に運行停止を伴うような軽微な損傷が懸念される構造物も対象としている.

未補強柱をすべて照査すると期間と費用がかかるため，1995年の計算結果と現行基準のパイロットケースを比較しながら照査を実施している．これらの結果をもとに2012年度から順次，高架橋柱の補強を開始する計画である.

なお，高架橋柱以外の土木構造物についても地上部の盛土・切土区間や擁壁など，順次耐震性を検討していく計画である.

5-2　ソフト面の課題

東日本大震災では，当社は首都圏で初めに運転を再開し，お客様の足を確保するために終夜運転を実施して，多くのお客様から感謝のお言葉をいただいた．この地震は平日の午後，まだ日が明るい時間に発生し，対応可能な人員も十分に確保できる状態であったが，それでも鉄道事業者として多くの課題が浮かび上がった.

鉄道事業者としてやるべきことがさらにあった

と考え，課題を整理し，その解決に向けて土木技術的観点のみならず関係部署で組織する全社的なワーキンググループを作り，課題解決に向け検討を進めている．

具体的な課題としては，主に下記の事項を検討している．

（1） 地震発生直後の対応

運転取扱い・駅間停止列車の駅への収容など

（2） 設備の点検

点検時の報告・連絡，点検方法，移動手段など

（3） 運転再開・運転整理

他鉄道事業者との連絡・調整，応援要員の配置・移動手段など

（4） お客様・社員の対応

帰宅困難者への対応，通勤困難社員への対応，社員の安否確認など

6 おわりに

東日本大震災以降，関東圏にも近い将来，大きな地震が発生すると言われている．鉄道事業者として地震時の安全性をさらに上げるために，できることを確実に実施していかなければならない．鉄道という特性から安全性の向上はもとより，いかにお客様の利用に不便をおかけしないかという視点を大切にし，構造物の補強を進め，早い復旧と運行の確保を行っていきたいと考えている．

参考文献

1）山下清貴・吉村正：地下鉄坑口付近の液状化対策―営団地下鉄 東西線・千代田線―，土木施工，2001.3.
2）渡邊正美：添え柱工法による地下鉄トンネル中柱補強，基礎工，1999.4.
3）武藤義彦・吉村正：営団地下鉄の耐震対策，コンクリート工学，2003.5.

■図書案内

地 下 水 の 科 学 ― 全3巻 ―

P. A. ドミニコ・F. W. シュワルツ 共著
地下水の科学研究会・大西有三 監訳

地球という複雑なシステムを循環する水，とくに地下水循環を考え，汚染地下水など環境問題を地下水理学の立場から取り扱うため，水の物理的・科学的性質，地球の状況，水資源としての地下水の状況，地下水の水理学的特性とその調査方法などをわかりやすく解説した．



第Ⅰ巻 地下水の物理と化学
4,078円＋税 B5判
■序論■岩石における空隙の起源と透水性■地下水の動き■岩石の弾性的な性質と流れの方程式■水理試験（モデル，方法と応用）■溶質と粒子の輸送■汚染物質の水理地質学入門

第Ⅱ巻 地下水環境学
4,272円＋税 B5判
■地下水の化学■化学反応■物質輸送の数学理論■地下水による物質輸送（水質編）■地下水による物質輸送（地質編）■物質の輸送のモデル■輸送プロセスとパラメータ同定■水質浄化対策

第Ⅲ巻 地下水と地質
3,689円＋税 B5判
■水資源■堆積盆水循環における地下水■地殻における地下水■地下水流動における熱輸送

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
TEL: 03 3267 2888 FAX: 03 3267 2807 http://www.tunnel.ne.jp

特集：地震とトンネル

首都東京の下水道管路の耐震性向上の取組み

東京都下水道局計画調整部長 黒 佳 光 浩

1 はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は，日本観測史上最大のマグニチュード9.0もの巨大地震で，震源である三陸沖に近い宮城県北部では震度7を記録した．この地震による東日本大震災では，地盤の大きな揺れや膨大なエネルギーをもった津波などによって，東北地方の太平洋沿いなど東日本の広い範囲で壊滅的な被害を受けた．

下水道施設も，数多くの処理場が津波で被災するなど甚大な被害を受けた．管路施設については，下水道管とマンホールとの接続部や本管部分などが破損したり，液状化によってマンホールが浮上するなどの被害が各地で発生した．それらの中には，上水道の復旧後も下水道が使えず，お客様のくらしや震災復興に重大な影響を与えた地域もあった．

震源から500km以上離れた東京都区部においても，震度5強の激しい揺れに見舞われ，下水道管路をはじめ下水道施設に被害が発生した．当局では，従前より下水道管路を含めて耐震化の取組みを進めてきており，幸いにしてお客様の下水道使用に影響を与えるような規模の被害はなかったものの，首都直下地震のリスクの高まりや震災対策の強化が求められるようになっている．本稿では，東日本大震災における被災状況と復旧状況を含めて，当局のこれまでの下水道管路の耐震化にかかわる取組み状況と，今後の課題とその対策などについて報告する．

2 東日本大震災における東京の下水道管の被災状況

2-1 下水道管の被害概況

東日本大震災では，液状化現象が広範囲で発生し，さまざまなインフラが被害を受けた．国土交通省が設置した液状化対策技術検討会議によると，液状化現象の発生した範囲は1都6県にわたって少なくとも96市区町村に及んだことが報告されている．その規模は世界においても過去にない規模であり，まさに世界最大規模の液状化が発生したと言える．

下水道管の被害は1都10県におよび，その総延長約6万5千kmのうち約635kmが被災し，一部の地域では，被災した下水道管から雨天時などに下水が溢水したり，お客様に下水道の使用制限をお願いせざるを得ない事態が発生した．

東京都では，江東区新木場地区や葛飾区東金町地区などにおいて，液状化現象が発生した（国土交通省・地盤工学会調べ）．被害が甚大だったのは江東区新木場地区内で，約30kmの下水道管（本管）のうち約25kmにおいて液状化現象が発生し，約10kmについて損傷などの被害を受けた．迅速な応急対応により，お客様への下水道使用制限などの影響はなかったものの，全面的な復旧には1年以上の期間を要する規模の被害であった．

2-2　地震の特徴

東日本大震災をもたらした地震の特徴として，前述の液状化対策技術検討会議では，既往の地震と比較して，マグニチュード5.0以上の地震の発生回数が非常に多いことが報告されている．

また，関東地方周辺で観測された地震の中で一番大きい本震の加速度と過去の地震との比較では，今回の地震は，過去の地震よりも最大加速度は小さいが地震動の継続時間が長いことが特徴として挙げられている．

このような既往の分析を受けて，江東区新木場地区について，現地調査（常時微動計測）を行い解析した結果が**図-1**である．新木場での地震動も既往の観測地震動に比べて最大加速度は小さいが，地震動の継続時間が長い特徴が見られた．

また，地表面を観察すると，噴砂や沈下など液状化特有の現象が顕著に見られたことから，地震動の継続時間が長いことが，地盤変況を大きくした一因と考えられる．

2-3　江東区新木場地区における地盤と液状化現象

東京都江東区新木場地区は，東京都において東日本大震災による液状化現象がもっとも顕著に発生した地域である．

図-2は新木場地区で液状化現象の発生したエリア（以下「液状化エリア」）として，国土交通省・地盤工学会が示したものであるが，同地区全体において液状化現象が発生したことがわかる．

また，同地区での地震発生前後でのボーリングデータを見ると，地下水位はG.L.－1.6mと高く，かつ，地下水位以下の砂層が10m程度分布しており，液状化の発生しやすい地盤であると考えられる（**図-3, 4**）．

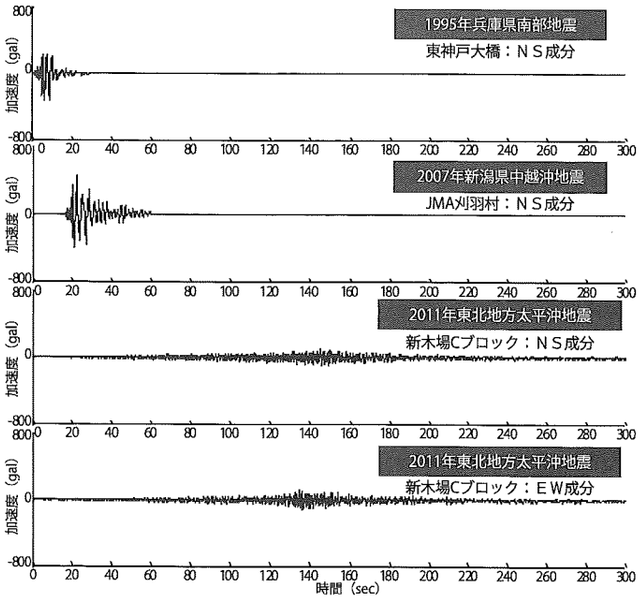


図-1　江東区新木場地区の推定地震動と既往の観測地震動の比較

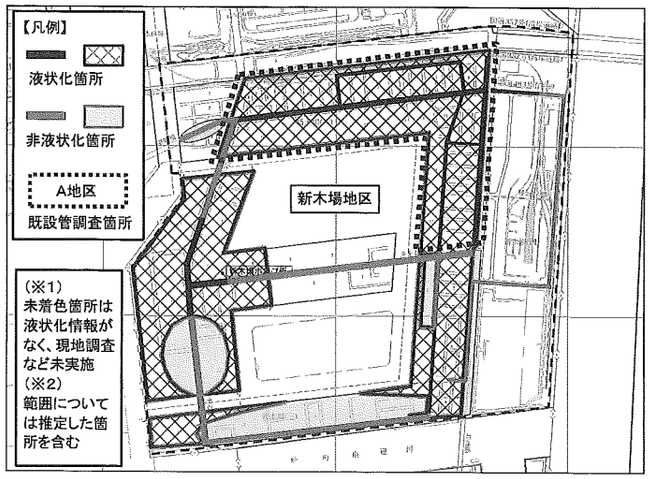


図-2　新木場地区の液状化エリアおよび既設管調査箇所（国土交通省）

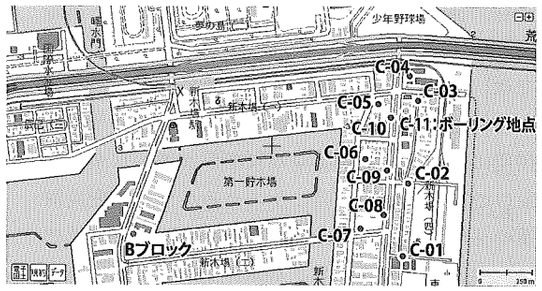


図-3　ボーリング位置図

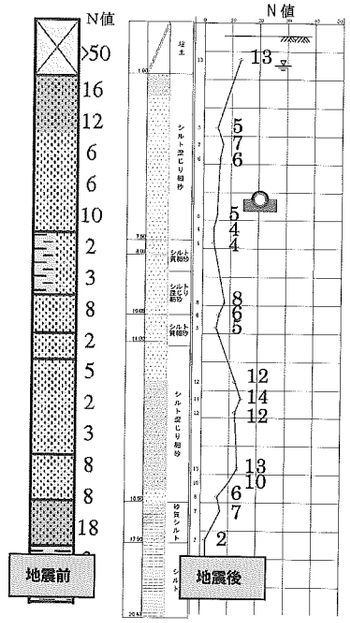


図-4　C-11脇のボーリング柱状図（(独)防災科学技術研究所 K-NETをもとに補正，算定）

2-4　液状化現象による下水道管への被害

2-4-1　下水道管の損傷状況

東京都区部の下水道は，明治時代以降，市街地の拡大と浸水防除の両方に対応するため区部の約8割の面積の地域では，汚水と雨水を同一の下水道管で収容する合流式で整備されてきた．一方，昭和の時代に埋立地としてつくられた臨海部では，公共用水域の水質保全の観点から，汚水と雨水を別々の管路で収集する分流式下水道として整備されてきた．江東区新木場地区の下水道も，昭和40年代後半に分流式として整備された．

東日本大震災において，同地区の液状化エリア内の下水道管（本管）は汚水管約13.0kmのうち約5.9km，雨水管約11.8kmのうち約4.3kmが被害を受けた．

液状化エリア内で既設管調査を行った箇所（以下「A地区」，調査実施箇所は図-2参照）の下水道管（本管）の被害状況について見ると，「クラック」「破損」が約38%，「たるみ」が被害全体の約29%を占めていた（**表-1**）．

また，A地区（液状化エリア内）内で損傷のあった下水道管（本管）とA地区内の下水道管（本管）すべてを管径別に集計したところ，汚水管では内径300㎜以下の管が線路延長の95.1%を，雨水管では内径600㎜以下の管が70.5%を占め，合わせて89.4%であった（**表-2**）．いずれも，A地区内のすべての下水道管（本管）の構成比よりも高いことから，江東区新木場（A地区）では，小口径管の被害が多かったことがわかる．

表-1　A地区内（液状化エリア内）の下水道管（本管）の被害状況

			クラック	たるみ	破損	浸入水	合計
損傷度	A	損傷大	134	30	45	30	239
	B		124	128	29	131	412
	C	損傷小	232	287	18	344	881
小計			490	445	92	505	1,532
割合			32%	29%	6%	33%	100%

表-2　A地区内（液状化エリア内）の下水道管（本管）管径別の被害状況

	管径（㎜）	A地区内（液状化エリア内）で損傷のあった下水道管（本管）		A地区内（液状化エリア内）すべての下水道管（本管）	
		線路延長（m）	割合	線路延長（m）	割合
汚水系統	～300	3,527	95.1%	8,654	88.9%
	310～400	141	3.8%	896	9.2%
	410～500	40	1.1%	187	1.9%
	小計	3,708	100.0%	9,737	100.0%
雨水系統	～300	426	20.4%	956	11.4%
	310～400	255	12.2%	954	11.4%
	410～500	300	14.3%	845	10.1%
	510～600	494	23.6%	1,093	13.1%
	610～700	274	13.1%	1,372	16.4%
	710～800	37	1.8%	625	7.5%
	810～	306	14.6%	2,520	30.1%
	小計	2,092	100.0%	8,365	100.0%
全体	～600	5,183	89.4%	13,585	75.0%
	700～	617	10.6%	4,517	25.0%
	合計	5,800	100.0%	18,102	100.0%

2-4-2　下水道管内への土砂流入

下水道管路の復旧手順として，被災状況を調査し，損傷状況に合わせて開削工事や更生工法による内面被覆工事などの復旧工事を実施する．今回

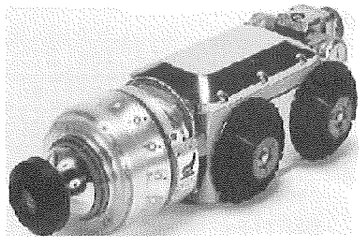


写真-1　テレビカメラ搭載ロボット



写真-2　管内に堆積した土砂(江東区新木場)

の地震の後，被災状況の調査として，主に内径800㎜未満の小口径管路では管路内にテレビカメラ搭載ロボット(**写真-1**)を走行させ，内径800㎜以上の管路では主に目視による調査を行った．

しかし，今回の江東区新木場地区では，液状化で噴出した砂が下水管に大量に流入しており，テレビカメラ搭載ロボットや人が入れない状況であるばかりか，下水の流下機能を大きく低下させている状況であった(**写真-2**)．

このため，同地区のほぼすべての下水道管路について，最低限の下水道機能を回復したのち，管路内調査を行う前に，管路内清掃を行い大量の土砂除去することが必要であったため，平常時であれば２～３週間で完了する程度の規模の管路内の調査に１か月半以上もの時間を要した．これは，液状化現象により発生した砂混じりの水が，道路上の雨水桝などから下水道本管内に流れ込んだことなどが主な原因と考えられる．

2-5　復旧に向けた取組み

前述のような被害が下水道管路に生じたことから，当局では，国の災害査定を経て，現在，復旧工事を施工中である．損傷状況は管きょ全体に及ぶことや，地盤の再液状化に備えて，液状化抵抗性のある改良土による埋戻しを行うために，開削工法を主体として，新管と取換えて工事を進めている．鋭意復旧を急ぎ，平成24年度末までに復旧完了させる予定である．

また，東京都以外の地域の復旧支援にも取組んでいる．具体的には，仙台市，千葉県浦安市，同県香取市について，震災発生後に各市からの支援要請を受けて，下水道管の被災状況の調査や復旧支援を行ったほか，現在も宮城県に当局職員を派遣して，下水道施設の復旧支援を行っている．

とくに，浦安市や香取市では，液状化による被害が大きかった．これらの市や江東区新木場地区での調査復旧には，当局の監理団体である東京下水道サービス(株)や，民間企業で構成する東京下水道メンテナンス協同組合の力が欠かせなかった．被害の復旧にあたっては，今後も引続き，復旧のための支援を行っていくつもりである．

3　これまでの下水道管の耐震性確保の取組み

3-1　耐震指針の内容

当局では，管路施設を「重要な幹線等」と「その他の管路」に分類し，「重要な幹線等」は，既設，新設ともにレベル１地震動に対して設計流下能力を確保するとともに，レベル２地震動に対して流下機能を確保するものとしている(**表-3**)．

「重要な幹線等」には，下水道幹線，避難所などからの排水を受ける管路，避難所などへの避難路に指定された道路下に埋設されている管路などが該当し，これらを優先して耐震化の取組みを進めている．

3-2　東京都における対策

次に，当局で進めてきた下水道管路耐震化の具体例を紹介する．

3-2-1　マンホール浮上抑制工法

（１）　開発の経緯および対策の概要

当局では，昭和63年以降，建設発生土の有効利用のため，開削工法で下水道管布設やマンホール

表-3　「重要な幹線等」の考え方

①公共下水道の幹線	「その他の管路」 「重要な管路」 ①、②(A幹線)	⑦後方医療施設からの排水をうける管路	⑦後方医療施設からの排水をうける管路 後方医療施設
②流域下水道の幹線		⑧幹線からの雨水を分水し，排水するための管路施設	⑧分流雨水管 河川
③河川，軌道を横断する管路(管理者との協議による)	河川 ③伏越し区間(河川横断)	⑨幹線を結ぶ管路施設	⑨分流汚水管
④広域避難場所からの排水をうける管路	④広域避難所からの排水をうける管路 広域避難所 ⑤広域避難所への避難路	⑩再生水管，送泥管などの圧送管路	処理場A ⑩送泥管 ⑪光ファイバーの布設される管路 処理場B
⑤広域避難場所への避難路に指定された道路に埋設される管路		⑪光ファイバーの布設される管路	
⑥避難所からの排水をうける管路	⑥避難所からの排水をうける管路 避難所	⑫システムとして重要な管路	⑫雨水貯留管

【凡例】⟹：「重要な幹線等」　⟶：「その他の管路」

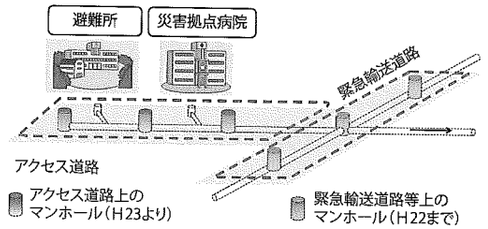


図-5　対策箇所の模式図

設置を行う場合，建設発生土をセメント系の改良剤と混合処理した改良土で埋戻している．この改良土は液状化抵抗を有しており，改良土で埋戻した箇所は，地震時に液状化の懸念がない．

しかし，昭和63年以前に設置されたマンホールは，液状化抵抗の低い砂で埋戻されている．埋戻し時に改良土を使用していないマンホールには液状化対策が必要なため，既設マンホールの浮上を抑制する工法を民間と共同で開発し，事業を実施している．

マンホール浮上抑制工法は，都心部の緊急輸送

表-4　経営計画2010における３カ年の到達目標

事業指標		単位	22年度末累計(決算)	23年度末累計(予算)	24年度末累計(目標値)
排水を受け入れる下水道管を耐震化した避難所などの施設数		箇所	1,713	1,935	2,120
マンホール浮上抑制対策を実施した道路延長	緊急輸送道路など	km	500	500	500
	避難所などへのアクセス道路	km	—	100	300

道路約500kmに設置されたマンホールについて，平成20年度から本格的に対策工事を進め，平成22年度に浮上抑制対策を完了させている．平成23年度からは，緊急輸送道路と避難所などを結ぶアクセス道路(**図-5**)に対象を拡大し，平成24年度までに約300kmのアクセス道路に設置されたマンホールについて浮上抑制対策を実施する予定である(**表-4**)．

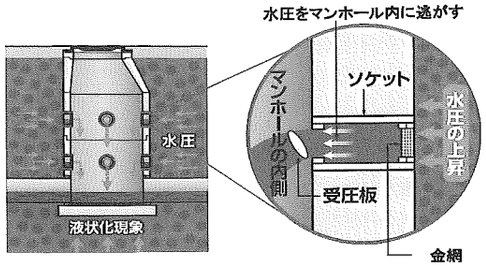


図-6　マンホール浮上抑制工法の概要

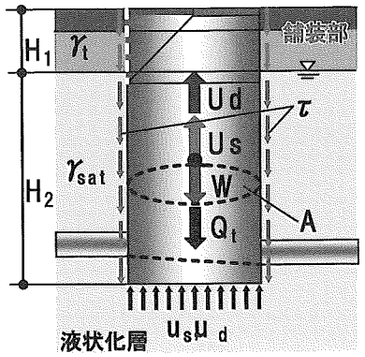


図-7　マンホール浮上モデル

（2）　浮上防止のメカニズム

マンホール浮上抑制対策工法は，マンホールの側壁に設置した「消散弁」と呼ばれる装置で，周辺に生じる過剰間隙水圧を消散するものである．過剰間隙水圧が発生すると，消散弁の受圧板が外れ，地下水を内側に導くことで，過剰間隙水圧を消散させ，浮上を抑える仕組みとなっている(図-6)．

具体的に解説すると，マンホール周辺には通常，マンホール重量(W)，静水圧による揚圧力(U_s)，底面に作用する過剰間隙水圧(U_d)，側面と地盤間のせん断抵抗(Q_t)などの応力が働いている(図-7)．地震によって地盤が液状化すると，液状化(過剰間隙水圧)に伴う揚圧力が発生すると同時にマンホール側面のせん断抵抗が減少するため，働く応力のつり合いが崩れ，浮上する．

（3）　浮上抑制目標値

新潟県中越地震など近年発生した大規模地震において，液状化に伴い浮上したマンホールが緊急車両の通行障害など，道路交通に影響を与えた．このことを踏まえて，『下水道の地震対策マニュアル2006年度版』(日本下水道協会)には，通行障害の目安として緊急措置実施目安の判断基準(表-5)が示されている．

表-5　緊急措置実施目安の判断基準

施設	調査項目	被害程度		
		小	中	大
道路	路面とマンホールの段差	車の走行で衝撃を感じる(段差3 cm以下)	車の走行に支障あり(3 cm～10cm)	車の走行不能(10 cm以上)

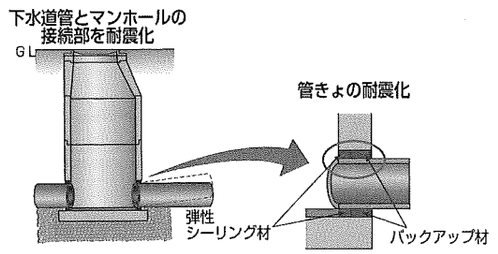


図-8　既設マンホール取付け部耐震化工法の概要

一方，道路交通において許容できる路面の段差は最大15cmと言われている．地盤沈下による沈下量を仮に5 cm程度見込むとすると，段差の発生を15cm以下とするためには，マンホール浮上量を10cm以下に抑制する必要がある．そこで，当面の浮上抑制目標値を10cm未満とした．

3-2-2　非開削耐震化工法

（1）　工法の概要

平成7年1月に発生した阪神淡路大震災において，下水道管きょの破損，抜出し，ズレ，ひび割れが発生し，とくにマンホールと管きょの接続部およびマンホールから1本目の管に被害が多く見られた．これは，マンホールと管きょが剛接合になっているために，地震動に対するマンホールと管きょの動きの違いを接続部が吸収できないことに起因している．

当局では，これを受けて，発災後もトイレ機能を確保するため，「既設マンホール耐震化工法」を用いて，マンホールと管きょの接合部の可とう化を進めている(図-8)．

この工法は専用の切削機により，マンホールの壁を管外周に沿って切削することで，縁を切り，切削した溝に土砂の流入を防止するバックアップ材，地下水の流入を防止するシーリング剤を充填し，接続部を可とう化するものである．作業はマンホール内で行い，非開削で施工する．このため，施工にあたって周辺地盤や地下埋設物に対する影響がほとんどなく，地域のお客様の生活や交通への影響が少ない．

この工法を用いた耐震化事業を平成9年度から試行，平成13年度より本格的に進めてきており，現在，内径700㎜以下の下水道管に対応している．

対策箇所は，地震発生後に多くのお客様が集中するとみられる避難所や災害拠点病院などからの排水を受け入れる下水道管路を優先しており，対象となる下水道管とマンホールとの接合部の耐震化を重点的に進めている．これまでに，区部にある約2,500か所の避難所などからの排水を受け入れる下水道管路で工事を進めてきており，平成22年度までに約1,700か所において耐震化を実施した．さらに，平成24年度までに累計2,120か所の対策を完了させる予定である(表-4：前掲)．

（2）　耐震性能

この非開削耐震化工法は，マンホールと管きょの接続部を可とう性を有する構造とするための工法であり，レベル2地震動による屈曲角，地盤の永久ひずみによる抜出し量(突出し量)および地震動による抜出し量(突出し量)に対応している．具体的には，最大屈曲角1.0°，最大突き出し長さ40㎜，最大抜け出し長さ40㎜までの変位に対応できる．

4　耐震化対策箇所の追跡調査

4-1　追跡調査の概要

前節で述べた耐震化対策の効果を確認するため，マンホール浮上抑制工法および既設マンホール耐震化工法をすでに施工済みである箇所について，追跡調査を行った．

4-2　調査結果(マンホール浮上抑制工法)

調査対象地域は，マンホール浮上抑制対策工法の効果検証のため，東日本大震災において東京都区部で液状化現象が発生した箇所とした．

調査結果は**表-6**のとおりである．地盤高変化を調査したうえで，詳細な分析が必要であるが，調査を行った3地区のマンホール浮上抑制工法施工済み箇所において，目視により浮上していると見られるマンホールはなく，正常に下水が流下していた．とくに液状化現象の著しかった江東区新木場地区では，消散弁が開放されていたマンホールは，特定の区間に集中しており，それらの区間のマンホールに設置した消散弁のほぼ全数が開放していた．これは，地震による過剰間隙水圧の発生が顕著なマンホールにおいて，消散弁が開放されたことにより，浮上抑制効果があったことが推測される．

表-6　マンホール浮上抑制工法の追跡調査結果(東京都区部)

	調査マンホール数	消散弁設置済箇所数	消散弁開放箇所数	浮上したマンホール数(目視)
(A)江東区新木場一，四丁目	36	265	114	0
(B)江戸川区臨海町一，二丁目	6	77	0	0
(C)葛飾区東金町	6	35	0	0
合　計	48	377	114	0

4-3　調査結果(既設マンホール耐震化工法)

既設マンホール耐震化工法の追跡調査は，当該工法が未施工で被災したマンホールと，その周辺で施工済みのマンホールで行った．調査の結果，耐震化工事未施工箇所では，本管とマンホールの接続部が損傷したのに対し，耐震化工事施工済みの箇所では地震動の影響を受けていないこと，下水道の流下機能が確保されていることが確認できた．

5　耐震性能確保に向けた課題と今後の取組み

5-1　マンホール浮上抑制対策の対象拡大

マンホール浮上抑制対策については，平成23年度から緊急輸送道路と避難所などとを結ぶいわゆるアクセス道路に対象を拡大して，事業を実施している．

今後は液状化の危険性の高いエリア内にあって，かつ，避難者が滞留しやすいターミナル駅などか

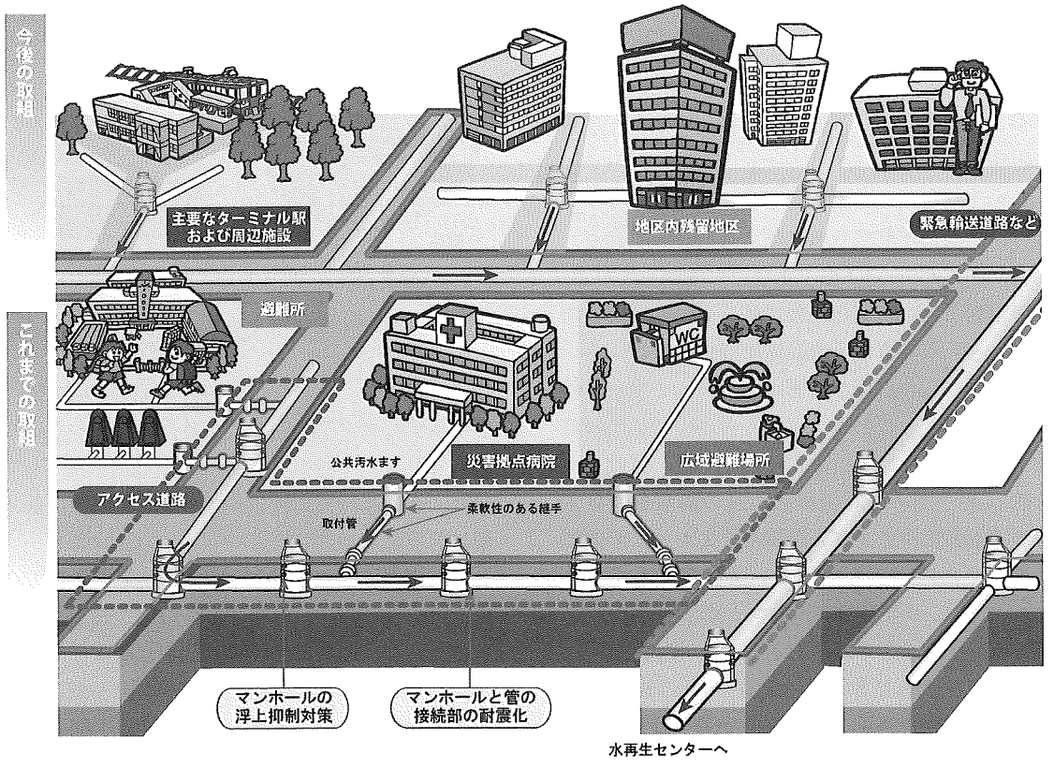


図-9　今後の耐震化事業の拡大対象

らの排水を受けるマンホールや地区内残留地区(火災が発生しても大規模な延焼のおそれがなく，広域的な避難を要しない地区)などへ対象を拡大していくべきと考えている(図-9).

また，東日本大震災では，液状化に伴う地盤沈下量が5 cmを大幅に超える地域が多くみられたことから，それらのマンホールにも対応できる新たな浮上抑制対策についても検討していく.

5-2　マンホール接続部耐震化の取組み強化

東日本大震災後の震災対策の強化が求められる中，地震に強い東京下水道の早期実現を図るため，マンホールと管きょの接合部の耐震化事業のスピードアップを図る．これにより，区部2,500か所の避難所などにかかわる対策完了時期を，当初予定していた平成27年度よりも2年間の前倒しを行い，平成25年度に完了させるべく取組む.

また，従来のマンホール接続部耐震化工法では施工できなかった内径800㎜以上の大口径管きょについて，新たな非開削の耐震化技術の開発を進めている．すでに，実用化のめどがつき，当局事業で採用できるものとしており，現在は大口径の下水道管の耐震化事業の実施に向けて，歩掛りなどの調査工事を行っている．今後，具体的な事業計画を策定し，本格的に展開していきたい.

さらに，都心区など防災計画上の重要な場所が多く残されており，地区内残留地区において，枝線管路の再構築にあわせて下水道管の耐震化を進めていく．また，発災時に多くの帰宅困難者が滞留するターミナル駅周辺などについても対象を拡大して対策を進めていく必要がある.

実施にあたっては，都心部で現在老朽化対策としての再構築事業を進めていることから，事業の効率化のため，再構築事業と耐震化とを一体的に進めていくことが求められる．このため今後は，更生工法と組み合わせて耐震化を行う工法である「更生管マンホール接続部耐震化工法(耐震一発くん)」(図-10)も活用するとともに，実施箇所の優先順位を検討するなどの工夫を行うことで，耐震化を老朽化対策と組み合わせながら効率的かつスピーディに事業を推進していく.

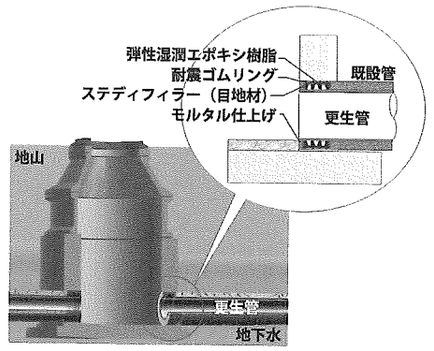


図-10　更生管マンホール接続部耐震化工法の概要

5-3　光ファイバーケーブルの耐震化

今回の東日本大震災で当局のソフトプランについて，光ファイバーケーブルや伝送装置などの異常は発生せず，通信事業者の通信網が大混乱するなか，自営通信網として大きな効果を発揮し，貴重な情報伝達手段となった.

しかし，液状化などにより，一部のマンホール内で光ファイバーケーブルの緊張や曲げが発生したことから，より一層の信頼性向上策を講じる必要がある．具体的には，前述の既設マンホール耐震化工法による，マンホールと管きょの接続部を柔軟性を持たせる構造への変更に合わせて，光ファイバーケーブルについても，マンホールと管きょの動きに追随できるような構造への見直しや，歪みの監視などについての検討を行っていく.

また今後は，自営通信網ループ化，それらを活用した情報通信設備の拡充や高潮防潮扉の遠隔操作による自動閉鎖などの新たな震災対策への利用を試みていきたい.

5-4　維持管路しやすい施設整備と発災後の迅速な機能回復の取組み

前述したとおり，新木場地区では大量の土砂が下水道本管内に流入し，復旧の大きな障害となった．これは，下水道の構造上，ハード面の対策だけでは対応が難しい．そのため，発災後に速やかに下水道機能を復旧させるためには，平素より維持管理しやすい施設の設計を工夫するとともに，地震後に迅速に土砂の除去などを行うための，協力体制や仕組みを整えておくことが必要である.

6　首都東京の高度防災都市づくりに向けて

今回の東日本大震災では，一度液状化した地盤の再液状化現象などのように，既往の研究では起こりにくいと考えられていた現象や新たな現象が起こったことが報告されている．このような現象について，今後も分析や対策の検討を行いながら，東京都新木場地区での再液状化のように首都東京でも今後，起こりうる問題としてとらえ，真剣に対策に取り組んでいく必要がある.

これらを踏まえ，首都東京において，一層求められている地震対策強化について，これまでに述べた取組みを急ぐとともに，発災時には下水道機能の迅速な回復に対応できるよう協力体制や仕組みを整備していきたい.

また，被災地の復興や他都市の防災力強化も支援していくことで，東京のみならず日本の復興・再生に貢献していく所存である.

参　考　文　献

1) 国土交通省関東地方整備局・地盤工学会：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明，2011.8.
2) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，2009年度版，2009.
3) 東京都下水道局：下水道施設耐震構造指針，2002.
4) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説，2006年度版，2007.
5) 東京都下水道サービス：TGS技術集大成，2010.

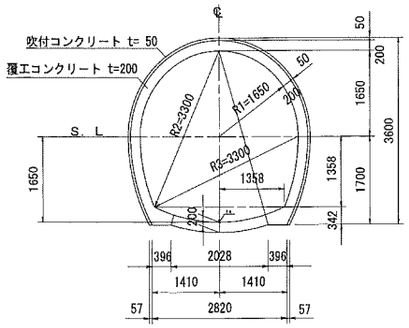
トンネルジャーナル

五ヶ山ダム仮排水トンネル起工式

福岡県が整備する五ヶ山ダム建設事業の本体関連工事である「仮排水トンネル工事」で，2月18日起工式が開催された．式は地元の小学校で行われ，国会議員，知事，地元地権者，流域の子供たちなど約50名が参加した．県知事から「平成29年度の完成に向け，事業の推進に全力で取り組んでいきたい．」とのあいさつのあと，記念植樹やくす玉割りなどで，工事の無事と一日も早い完成を願った．

同トンネルは全長365m，内空断面積9.0m²で，おもに花崗岩からなる地山を発破NATMにより施工する計画．来年3月の完成を予定している．

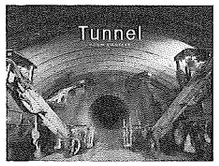
五ヶ山ダムは那珂川水系の福岡県筑紫郡那珂川町大字五ケ山に位置する重力式ダム．総貯水容量は4,020万m³で，洪水調節，那珂川の流水の正常な機能の維持，水道用水の供給，異常渇水時の緊急補給などを目的に整備される．下流域では洪水と渇水が頻繁に発生し，被害も大きいことから，早期の供用が望まれている．





図面および写真の提供：福岡県

写真集『Tunnel for iPad』リリース記念イベント開催



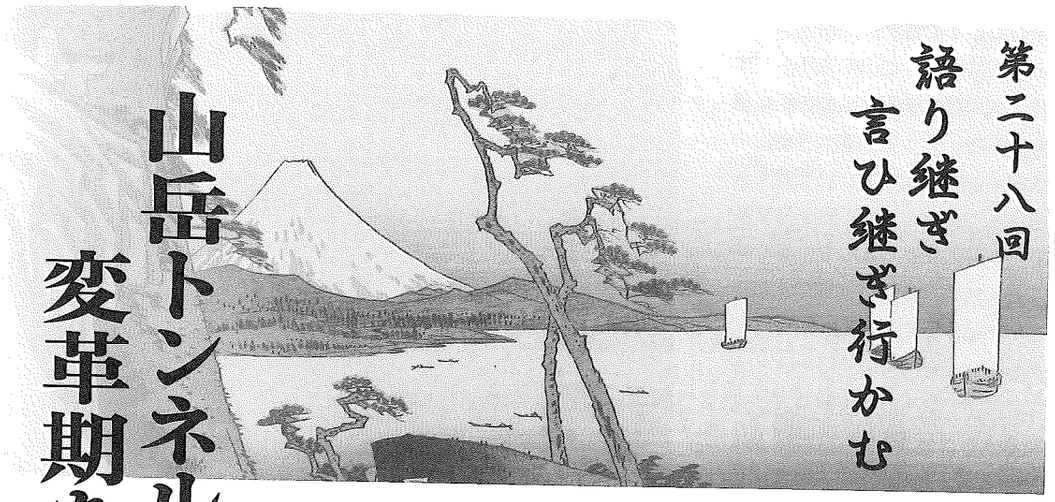
土木写真家・西山芳一氏の電子書籍写真集『Tunnel for iPad』の発売にあたり，2月11日，東京都内で記念イベントが開催された．主催は写真集の出版元である108UNITEDで，代表の黒岩広義氏によると，イベントには著者の西山氏と『ダムマニア』などの著書のある宮島咲氏が登壇，著者が写真集に掲載された写真を一枚一枚スライドで紹介しながら撮影エピソードを紹介し，トンネル施工の現場や構造物の魅力などについて両氏で語りあった．

同写真集は，2005年10月に日本建設機械化協会・施工技術総合研究所が限定1,500部で出版した『トンネル　地下の星にエールを！』をベースに，その後撮影された作品など30点を追加し，全56カットで構成されたもの．電子書籍にふさわしくBGMやスライドショーを付けるなどして再編集するとともに，土木学会トンネル工学委委員長・中田雅博氏(中日本高速道路)のコラムを新たに採録した．

電子書籍のコンテンツとしてビジュアルが強い写真集を構想していた黒岩氏が，西山氏を紹介されて，トンネルが持つ魅力を世間に広めるべく，このたびの出版に至ったとのこと．

同写真集は，Apple社のタブレット型コンピュータiPadの専用アプリで，Apple社の運営するApp Storeから購入できる．なお，要望に応え『Tunnel for iPhone』も追加販売．価格は850円(税込)．


(右)西山芳一氏，(左)宮島咲氏 / 写真提供：108UNITED



第二十八回 語り継ぎ 言ひ継ぎ行かむ

山岳トンネル技術の変革期を経験して

(元)清水建設
竹林 亜夫

プロローグ

清水建設の志岐と申します．今日はわが先輩の遺稿を紹介させていただきます．

竹林亜夫先輩は，昨年11月に急性白血病により急逝されました．かねてより「語り継ぎ　言い継ぎ行かむ」の執筆をお願いしており，思いもよらない事態にどうすべきかと考えましたが，先輩の『想い』を尊重するのが良いとの考えに至りました．

その『想い』は，執筆依頼を快諾していただいた経緯から，『語り継ぎたい』に違いないと考え，運よく遺稿も見つかりました．おそらく本稿は未完のものですが，それでも『想い』は伝わるだろうと考え，この遺稿を皆様にご披露させていただくことにしました．

これより先は，竹林先輩が直接ご自分で執筆された文章です．読まれた若いトンネル技術者の方々に，少しでも『想い』が伝わればと願っています．

はじめに

振り返ってみると，山岳トンネルの現場に従事しはじめた40年前は矢板工法を，30年前ごろからNATMを，20年前ごろからアンブレラ工法を，そして10年前ごろから鏡補強工法を，そのときの立場でそれぞれ参画でき，いわば施工技術の革新期を連続して経験してきたことになる．その中から，現場での経験をとおして習得できた技術についていくつか紹介する．

現場経歴概要

昭和43年に清水建設に入社し，新設された本社の土木技術課に配属された．翌年に凍結工法の現場を経験したあとに，3年目に希望していた山岳トンネル現場に勤務できた．当時の現場は，鋼アーチ支保工の普及に伴って新しい技術が次々に導入され，先輩技術者は多忙で，若手技術者にも計測業務などを任されて，新鮮な気持ちで仕事に没頭しつつ，現場業務に馴

染むことができた．山岳トンネルの最初は膨張性地山の道路トンネル，次に含水未固結地山の新幹線トンネル，そして地すべり地山の道路トンネル現場で，いずれも矢板工法で，主に切羽観察と計測管理および工務を担当した．その後，工事の管理，本社技術部の業務などで山岳トンネルの関連技術を担当した．

現場と主な習得技術の紹介

■東電磯子火力洞道で凍結工法の現場計測を担当

昭和44年に根岸線（現在の京浜東北線）の盛土の下を横断する電力洞道（掘削高さ４m，幅４m，延長21m）を建設するために，凍結工法が採用された．盛土の両側に立坑を設置して，水平ボーリングで凍結管を洞道の外周部に30本設置して，地盤を３か月間かけて凍結したあとに，トンネル掘削を行って洞道を建設する工事である．技術課の上司が作成した現場計測計画を約半年間担当した．工事に先行して線路に仮設桁が設置され，電車の速度制限もされて，地盤の凍結に伴う地表面の隆起変位，解凍時の地表沈下変位量などの計測管理を行い，トンネル掘削，洞道本体の構築も予定工期内で完成できた．この間に，同じ現場内の開削工法，シールド工法および立坑掘削などの都市土木の各工種も体験することができた．

■膨張性地山トンネルの原因は地山の吸水膨張か塑性域の形成か

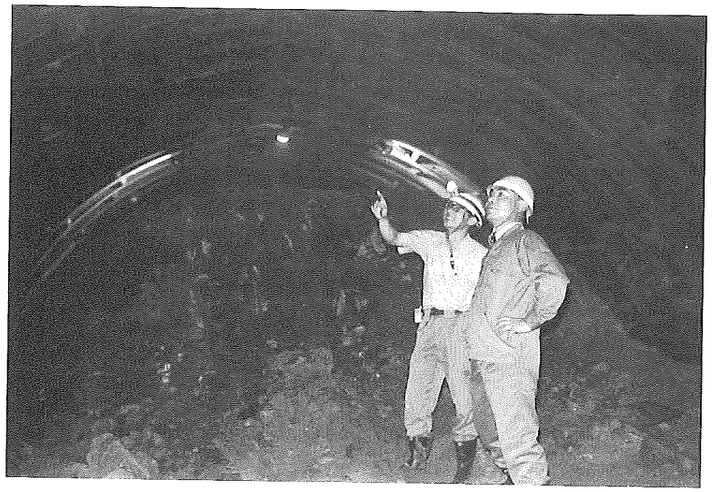
山岳トンネルの最初の現場は延長720mの国道128号線嶺岡トンネルで，全区間に蛇紋岩が分布するために，掘削工法は側壁導坑先進上部半断面工法であった．当時，蛇紋岩は膨張性地山として知られていたが，膨張の原因は吸水膨張によると一般に考えられていたのに対して，その当時の現場経験者から塑性域の形成が主な原因との貴重な報告もあった．膨張性の原因により，地山を支保する方法が異なるために，現場では支保工の変状観察，地表沈下計測を実施するとともに土質試験室を設置し，切羽試料を順次採取して室内吸水膨張試験および一軸圧縮試験などを行った．破砕変質により粘土化した地山の含水比はおおむね10～20%と粘土状態としては低く，坑壁部地山の掘削後の含水比もほとんど変化なく，室内吸水膨張試験でも膨張現象が顕著でないのに対して，土かぶりが小さい箇所でも支保に作用する土圧は大きく，トンネル掘削に伴う切羽付近の地表



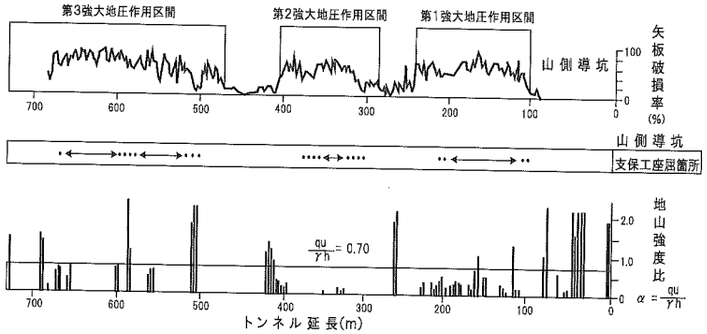
滋賀県大津市の旧竹林院にて

著者略歴

昭和43年	清水建設入社
昭和43～45年	土木技術課
昭和45～47年	国道128号線嶺岡トンネル新設工事 （蛇紋岩分布域の膨張性地山対策）
昭和49～52年	上越新幹線堀の内トンネル新設工事（未固結含水地山対策）
昭和52～54年	北陸自動車道地蔵トンネル新設工事（坑口付近の地すべり対策）
昭和54～58年	秩父セメント（株）叶山鉱山開発工事 （鉱山内運搬トンネル，ずり搬出立坑，ベルコンTほか）
昭和58～平成３年	土木技術本部技術２部
平成３～６年	東京電力（株）葛野川発電所新設工事・取水口工区 （不良地山条件における矢板工法およびNATMの施工対策について数編報告）
平成６～８年	土木技術本部技術２部
平成８～12年	土木技術本部技術２部部長



嶺岡トンネルにて



嶺岡トンネルの縦断方向の支保の変状と地山強度比分布

面は隆起でなく沈下現象を伴うことなどから，工事の初期段階で吸水膨張説は否定された．

■強大な土圧に悩まされ，計測結果から地山強度比の提案

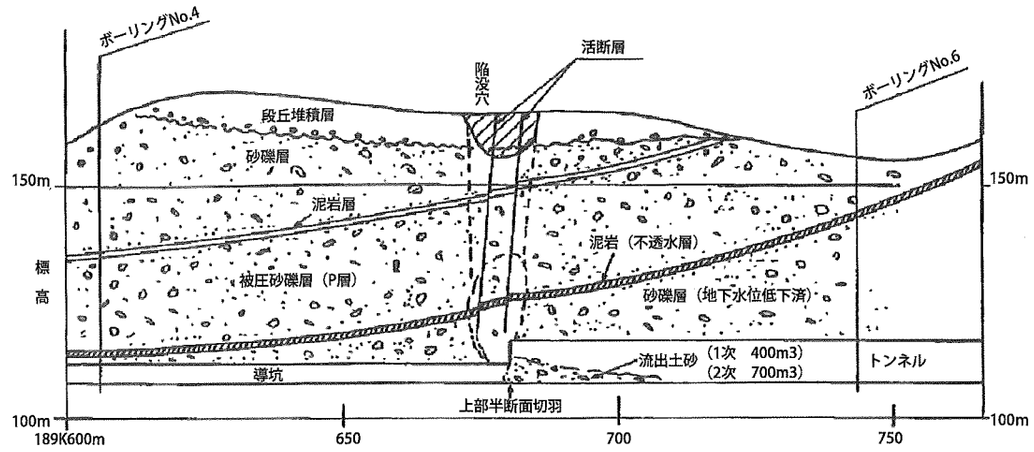
側壁導坑が１本だけ先進している状態で鋼製支保工が安定していても，後続の導坑切羽が接近して並列すると，双設トンネルの相互干渉により強大な土圧が作用して，鋼製支保工の変状が発生したり，矢板が破損した．各支保工に設置した矢板が破損する枚数の割合を破損率として，坑内観察の記録とした．強大な土圧が作用する地山では掘削時に切羽の押出し崩壊が顕著で，鏡押さえ工で対応した．上部半断面掘削には，余掘りが防止できるメッセル工法を採用し，切羽崩壊防止工として核部を延長10m程度残すリングカットを採用した．上部半断面の支保工は曲げ加工できる最大のH-250を75cmピッチに配置し，側壁コンクリートを基礎にしている．坑口から100mほど進むと，大きい作用土圧によりメッセル矢板の推進に20t用ジャッキを２台使用したり，矢板通過後の地山面は鏡肌に変化したり，支保工の座屈変状や，脚部軸力が300tに達した．このような支保の変状とともに切羽崩壊現象も発生し，掘削を停止して対応策をよぎなくされ，類似リスクを回避できるように努めた．

導坑が貫通したころに計測結果を整理して，トンネル縦断方向に支保の変状が顕著な箇所とその箇所の地山の一軸圧縮強度を土かぶり荷重で除して「地山強度比」と称して，あわせてプロットして，図を作成した．この図などから強大な膨張性土圧が作用する区間の「地山強度比」はおおむね0.7以下であることが明らかとなり『土と基礎』などに報告した．このころ，仲野良紀氏も農業土木学会誌に一軸圧縮強度を土かぶり荷重で除した指数と膨張性土圧に関係する論文を掲載されていたので，直接お会いしたおりに，その指数を改めて「地山強度比」と命名し，互いに使用することにした．

また，破砕変質した地山の岩石名は特定しがたく，切羽観察の信頼性を向上させるために，蛇紋岩研究者の故鈴木守氏の指導を受けたことが縁となり，導坑貫通時に切羽観察結果をまとめて地質縦断図を作成して，連名で『応用地質』に報告した．

■含水未固結地山の土砂流出現象とその原因

２番目の上越新幹線堀之内トンネル[5]は，新第三紀の鮮新統から第四紀の更新統に堆積した砂層，砂礫層と泥岩層の互層地山であった．地層の走行方向はトンネルにほぼ直交し，傾斜は約45°で，受け盤構造で，坑口から1,000m以奥では土かぶり厚さも約100mに達し，地下水位も高い状態であり，



上半切羽土砂流出付近の地質縦断図

導坑切羽からの水平水抜きボーリングを実施しつつ，砂層（層厚4～10m）の地下水位を低下した．ボーリングにより清水状態で排水できて地下水位が低下する砂層と，ボーリング孔が濁水で閉塞して地下水位が低下できがたい砂層があった．

後者の場合で複数本のボーリングを実施するが，いずれも閉塞するために，やむなく底設導坑の掘削を強行すると難透水層である泥岩部の厚さが薄くなるところで，切羽前方の含水未固結層が湧水とともに土砂流出し，トンネル掘削が停止した．残りの区間に約30枚の砂層が存在するために，本線の外側に地下水位低下のために迂回坑を掘削した．迂回坑掘削時にも切羽から水抜きボーリングを実施し，孔内から土砂が流出して閉塞するために，同一切羽から最大20本のボーリングを根気よく実施して，地下水位の低下をはかった．上半掘削時に，各砂層の単位体積重量と粒度試験を実施したところ，乾燥密度が17kN/m³以上で締まった砂層は，清水状態で地下水位が低下できて自立性が良好であったのに対して，流出した砂層の乾燥密度はそれ以下の締まりの弱い状態だった．

■土砂流出に伴い表面陥没

その後，地層構造が水平に変化しはじめた土かぶり厚さが約60mのところで，水抜き迂回坑2本と側壁導坑2本が通過した後にも，水抜きボーリングが土砂流出で閉塞するために，トンネル上部の含水砂礫層（p層）の地下水位は低下できなかった．砂礫層（p層）の下には泥岩の難透水層（厚さ約2m）の存在が地表からの調査ボーリングで確認されていた．難透水層の下の砂礫層は既に地下水位が低下していたために上部半断面掘削は比較的順調に進んで，切羽の約10m上に難透水層が接近していた．そのとき，切羽に湧水がみられ，徐々に砂礫層が流動化し，鏡押さえを行っていたところ一次崩壊（約300m³）が発生した．それにより生じた崩壊空洞が自立できずに，さらに1時間後に大音響とともに二次崩壊が発生し，合計約1,000m³の土砂が坑内に流出した．その影響で切羽直上の地表部には直径15m，深さ約10mの陥没穴が発生し，その体積は坑内流出量にほぼ等しい量であった．地表部の陥没穴の壁面には第四紀ローム層を切る活断層（落差1.2m）が観察され，図に示すように，崩壊地点の前後約70m離れた位置で事前に実施したボーリング調査で2m厚さの難透水層を確認していたが，活断層により難透水層の役割が果たせない状態であることが判明した．このような地山の細部の状態は事前に推定できるものではなく自然の複雑さでもあり，リスクでもある．

■地すべり域の基盤岩は良好か

3番目の北陸自動車道の地蔵トンネル西工区は，上り線と下り線の両坑口付近（延長約150m）に複数の地すべりが分布していて，地すべり専門家の指導を得ながら各種の地すべり対策工が実施された．とくに，深礎掘削時には，地すべり面の観察と簡易な現地せん断試

験を実施し，対策工の設計に使用した．地すべり対策工を設置したあとに，側壁導坑先進上部半断面工法でトンネル掘削に入った．地すべり域の基盤岩部分が図のように破砕帯になっていて，側壁導坑の支保工が大きく変形し，縫返し掘削を実施した．上部半断面掘削時には切羽崩壊を防止するために鏡押さえ工とリングカットを行った．同様な事例は北陸自動車道の春日山トンネルのII期線でも報告されている．また，以前より高橋彦治氏は膨張性地山の多くのトンネルでは，地表面の斜面は地すべりが分布していることを指摘されている．地すべり域のトンネル掘削で支保工が変状する大きい土圧が作用する要因は，基盤岩も破砕されていて一軸圧縮強度も弱いために，小さい土かぶりにおいても地山強度比が2以下の膨張性地山の条件に達していることによると考えられる．

したがって，地すべり域の調査では基盤岩の状態についても慎重な調査が必要となる．

■欧州のNATMツアーの成果

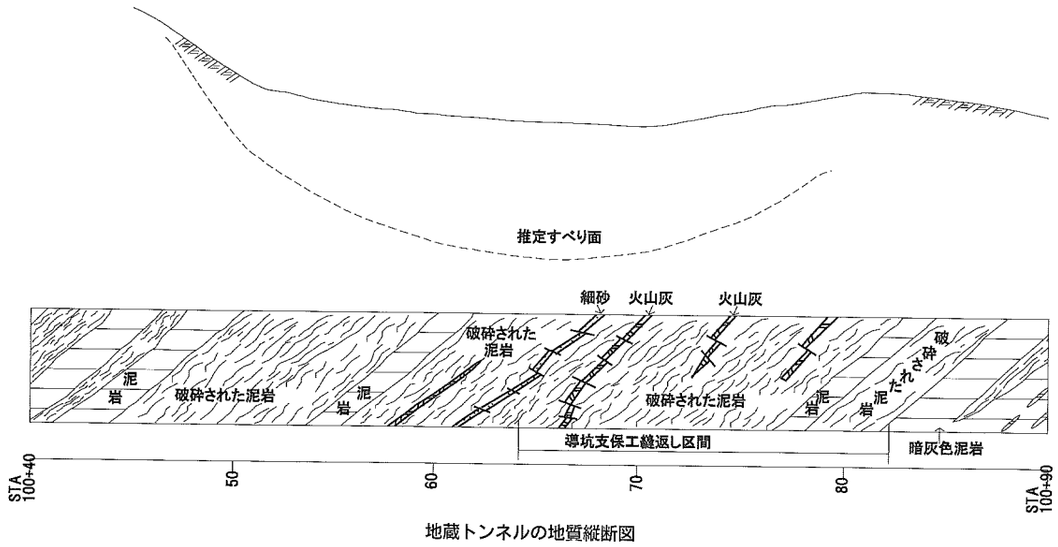
現場経験も約10年が経過したころに，会社からの推薦で3週間の欧州NATMツアーに参加できた．同業各社の現場責任者やトンネル技術者の一行三十数名で，欧州各国のトンネル現場を視察でき，現場での質疑応答，同行の先輩たちの感想などを聞きながら見聞を広めることができた．

■素掘りトンネルと鉱山保安法

4番目の現場は秩父セメント(株)の叶山鉱山開発工事で，第一工区の鉱山部分の各種運搬トンネルと長距離ベルトコンベヤトンネルの最上流部区間の延長2.7kmを担当した．鉱山となる石灰岩体はメランジュ地山に，幅約500m，延長約2km，根入れ部を含めて深さ約500mで，周囲は高さ約300mのほぼ垂直の絶壁をなしていた．場所は群馬県の西南で神流川の上流に位置している．

標高540mの坑口から，標高1,100mの鉱山作業ベンチまで，延長約40,00mの資材運搬トンネル（断面積22～35m²）で，延長のほとんどは石灰岩が分布していて，素掘りトンネルで施工した．素掘りはトンネル技術の原型でもあり，緩み域を最小にする丁寧な発破技術を作業員とともに検討し，油圧削岩機を採用して一掘進長さ2.5mで極力ノミ跡が残るように努めた．切羽観察で割れ目の多い区間は矢板工法を採用したが，全延長の約1割であった．素掘りトンネル部の維持補修として，月に一度，浮石落としを実施し，不良な箇所にはロックボルトと金網支保を施した．

鉱山内のベルトコンベヤトンネルが鉱山保安法の管轄とされ，枕木間隔と道床およびレール継ぎ目の高低差などの軌道検査は厳格で，許可後の鋼車運搬は騒音が小さく，安定していた．これまで経験した，膨張性地山や，含水未固結地山お



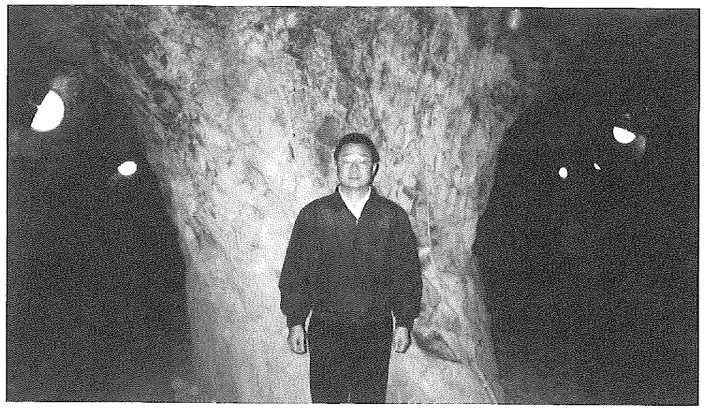
地蔵トンネルの地質縦断図

よび地すべり地山などの不良地山において，導坑に敷設した軌道は道床がぬかるみ枕木間隔も開きやすく，鋼車の脱線などが発生して，危険で作業能率が低下することがあった．鉱山保安法を経験して，今後計画する軌道の参考にした．

延長約2.7kmの長距離ベルトコンベヤトンネルはいわゆる古生層区間で，小断面トンネル(断面積約6 m²)のために吹付けコンクリート構造のNATMで設計・施工し，工事の安全性と経済性に寄与できた．

先受け工法(アンブレラ工法)の技術推移と定着

その後，本社技術部に転勤となり，発足間もないジェオフロンテ研究会のWG活動に参加した．すでに現場は矢板工法からNATMに移行しつつあり，技術の進歩は日進月歩の勢いで，切羽の安全性確保および近接構造物の安定性確保でアンブレラ工法の必要性が増加し，この研究会ではイタリアより技術導入したRJFP(Rodin Jet Forepiling)工法，トレヴィチューブ工法の普及に協力するとともに，わが国で発案されたAGF(All Ground Fasten)工法，MJS(Metro Jet System)工法の技術開発と実用化に研究会は協力した．わが国で最初のアンブレラ工法は，イタリアより導入されたRJFP工法で二十数年前に千葉県の分水路トンネル建設工事の未固結砂層区間に採用された．本工法は400kgf/cm²の高圧セメントミルクジェットを使用するためにロッドの継ぎ足し



なしに，長さ9～11m，直径60cm程度のモルタル改良体が確実に形成されて，先受け効果が明瞭なため，その後ほかの各種地盤条件の工事でも採用された．

数年遅れで，トンネル現場に常備している油圧削岩機を使用して，長さ12m程度の鋼管製注入管を挿入し，その後に地盤注入を行うAGF工法が国内で開発され，特殊機械を用いないことと専門技術者を必要としないなどの扱い良さから，急激に普及して定着した．

その直後に再びイタリアよりトレヴィ工法が導入され，長さ約20mのガイドセルにダブルロータリー式削孔機を搭載した大型専用機により能率よく鋼管製注入管方式とジェットグラウト方式のアンブレラ工法が施工できる特徴があり，都市域の大型NATM工事に採用された．また，国内で技術開発していたMJS工法も都市域で使用されはじめ，先端技術を取り入れた工夫を各所に取り入れた水平方向のジェットグラウト方式で，圧縮空気と圧力水を併用することから改良体の半径が大きくなることと，特殊なボーリング機械を用いることから施工延長が50m程度まで可能となっていて，他の工法で補強できない場合などに採用されて，着実に普及している．

最近では，特殊な機械を使用しないで，現場に常備している削岩機を使用するAGF工法が一般的に普及して，定着している．

トンネル技術の革新に伴う工事の安全性向上

以上のように，トンネル技術はほぼ10年ごとに技術革新の波が押し寄せて，次々と現場の姿も大きく変化してきた．とくに，NATMの定着に伴い，導坑の先進掘削方式から，ベンチ掘削に移行し，坑内運搬方式がレール工法からタイヤ工法に変わり，あわせて，削岩機が圧縮空気駆動から油圧削岩機となり作業人員も大幅に削減され，経済施工の社会的要請にも対応してきた．

一方，切羽崩壊を防止する補助工法の技術革新の潮流も著しいものがあり，アンブレラ工法および長尺鏡補強工が普及して，切羽の安定化対策が向上した．これらの補助工法は，現場に常備している油圧削岩機を有効に活用しつつ，必要な補強部材を設置する各種の技術工夫がなされて発展し，切羽の安全性も向上している．

エピローグ

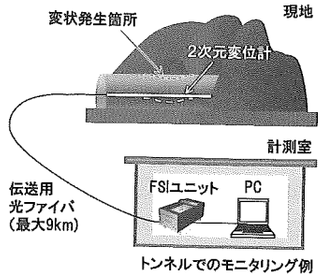
以上で竹林先輩の原稿は終わりです．奥様からは，現役を完全に引退したら，ライフワークとして東日本大震災からの復興に役立つ仕事に取り組みたいと言っておられたと聞いております．そのためにも，もっと書きたかった，もっと後輩に伝えたかったことがあったのではないかと思います．紹介を終えるにあたり，指導を受けた後輩に，強い印象を残した先輩の言葉を列記させていただき，その『想い』を少しでも伝えられればと思います．

■『語り継がれた』言葉

○自然は驚くほど素直に反応する．地山の動きは切羽から学べ．
○地山の状態は事前に推定できるほど簡単ではない．謙虚さを忘れるな．
○観察・計測はトンネル技術の基本．基本なくして技術レベルは向上しない．
○切羽観察で異常現象の前兆を見抜け．
○地表沈下計測および地表の変状観察で切羽前方を読んで，先手必勝．
○坑内観察はトンネル地質縦断を思い出しつつ，変状の早期発見で速やかに対処．
○観察・計測計画は地山条件に応じて柔軟に変更し，即時実行．
○観察・計測結果を直ちに図表化，それではじめてフィードバックが可能となる．

工法・技術・製品ニュース

工法　FBGセンサを用いた高精度2次元変位計を開発





飛島建設(株)経営管理本部
経営企画部広報室
TEL：044-829-6751
http://www.tobishima.co.jp/

飛島建設は，FBGセンサを用いて，構造物の軸直角方向の変位分布を高精度に計測する2次元変位計を開発したと発表した．

FBGセンサは光ファイバを用いたセンサのひとつで温度や歪みの変化を，光波長の変化として検出するもの．同社はこれを使った長さ10mの2次元変位計作成．その両端を固定し，中央部に所定の変位が生じるよう3台のジャッキで側面から変位を与え，計測結果を接触式変位計による実測値と比較した．その結果，誤差の最大値はともに1.0㎜未満となり，高精度で変位分布が得られることを確認した．

この変位計を用いると，軸直角方向の変位を上下・水平方向の2次元で1.0㎜未満の誤差で監視・モニタリングすることができ，既存の折れ角を利用した計測器と比較して，振動に強くメンテナンスが容易になるとしている．そのため，トンネルの変状発生箇所付近に設置することで，GPSでは計測不可能なトンネルの側壁や天端のはらみ出し・沈下をモニタリングでき，水の浸入や衝撃や振動に強く高耐久性なため，長期間のモニタリングが可能となる．

また，光測定器は2次元変位計から最大9km離れた場所に設置しても計測が可能なので，トータルステーションやデータロガーのような計測機器を計測箇所付近に置く必要がなく，機器の管理が容易になる．

同社では，室内の精度検証試験で，建設構造物の計測・モニタリングに十分な計測精度を確認できたことから，今後現地適用を進め，積極的に活用していきたいとしている．

製品　CAT　2種類のダンプトラックを発表





(上)Cat740B，(下)Cat773G

キャタピラージャパン(株)広報グループ
TEL：03-5717-1122
http://japan.cat.com/

キャタピラージャパンは，土木工事などで活躍する，3軸6輪駆動のCat 740B アーティキュレートダンプトラックとCat 773GおよびCat 775G ダンプトラックを発売した．

Cat 740Bアーティキュレートダンプトラックは最大積載量39.6tで，Cat 740のフルモデルチェンジ機となる．ダンプトラックとしては国内初となるオフロード法2011年基準をクリアする環境性能を備えた．また，エンジンの出力およびトルク向上やトランスミッションの改良などによりパワフルで粘り強い走りを実現するとともに，悪路においても優れた走破性を実現するオートマチックトラクションコントロールを採用するなど，優れた生産性を実現．さらに，車両の状態やリアビューカメラの映像などを表示するカラーマルチパーパスディスプレイを搭載し，オペレータ環境を向上させた．

Cat 773G(最大積載量52.2t)およびCat 775G(同60.6t)は，Cat 773FおよびCat 775Fのフルモデルチェンジ機で，エンジン出力の向上によりパワフルな走りを実現した．また，よりスムーズなシフトチェンジを実現する電子制御式クラッチ圧コントロールシステムをはじめとした各種パワートレインを改良．生産性・走行性の向上により，サイクルタイムの短縮を実現する．このほか，車両管理に役立つバイタルインフォメーションシステムの標準装備やハイドロリックオイルフィルタの交換間隔の延長などにより，メンテナンス性も向上させた．

創刊500号記念特別企画

座談会　トンネル千思万考

【出席者】(50音順)

大島洋志	国際航業(株)上席フェロー技術センター長(司会；本誌編集委員長)
久多羅木吉治	東亜建設工業(株)土木事業本部技術部長(本誌元編集委員)
小山幸則	京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授(本誌元編集委員)
今田徹	東京都立大学名誉教授(本誌編集参与)
高橋良文	東京都下水道サービス(株)専務取締役(本誌編集参与)
濱建介	(株)ANET取締役(本誌編集参与)
三浦克	(株)竹中土木常務執行役員(本誌編集参与)

司会　創刊500号の特別企画として座談会を企画させていただきました．司会は本誌編集委員長である大島が務めるのがルールとか．どうぞよろしくお願いいたします．

昭和45年9月の本誌創刊から本号までに41年8か月が経過したことになります．創刊の当時は東名高速道路の開通や大阪の万博が開催された時期で，私自身はまだ国鉄本社の新進気鋭の若手技術者でありました，今振り返りますと，まさに「光陰矢の如し」です．

(本誌の歩みに関する発言は，巻頭言の記載と重複するので省略)

本誌とのかかわり

司会　最初に，本日ご参加の方々に，簡単な自己紹介をしていただきたいと思います．まず，濱さんからお願いいたします．

濱　昭和22年に国鉄に入社し，信濃川の水路トンネルに初めて携わってから現在に至るまでトンネルにかかわっております．

本誌とのかかわりは，青函トンネルの函館から本社に戻った昭和45年ごろ，OECD(経済協力開発機構)のトンネル諮問会議がワシントンで開かれ，地下利用についての世界との連絡機関が必要となり，建設・運輸両省の指導のもと検討が始まりました．時を同じくしてこの『トンネルと地下』が発刊され，以来ずっとお付き合いをしています．

当時は，東海道新幹線のトンネル群や上越の新清水，また道路の六甲山，日本坂など，ダム分野で黒四，佐久間に関連するトンネルが完了，青函をはじめ，山陽や上越新幹線，中央高速道路の工事がはなやかな時代でした．

司会　私の本誌とのかかわりは，創刊から約3年経過した後でした．当時の上司，島田隆夫氏が濱さんと同期の方で，本誌の創刊に深くかかわっておられました．島田さんから「本誌と類似の雑誌が2，3誌スタートしたが，なかなか継続できなかった．本誌は精機通信社の山本尚志さん(土木工学社創業の先代)が創刊したのだが，当時の発注側トンネル技術者仲間が彼の熱意にほだされて，みんなで応援しようじゃないか！という空気になったから雑誌が続いたのだ」と聞いたことを覚えています．

今田先生も昔から本誌にかかわっておられますが，そういう経緯も含めて自己紹介をお願いいたします．

今田　大島さんが言われたような話は耳にしたことはあります．

私は昭和35年に建設省土木研究所に入りました．当時，関門道路トンネルは終わっていまして，名神のトンネルが始まった時期でした．以来50年，トンネルと関係さ



大島洋志氏

昭和40年　九州大学理学部地質学科卒
　　日本国有鉄道入社
昭和45年　本社山陽新幹線建設部課長補佐
昭和48年　鉄道技研地質研究室主任研究員
　　(兼)本社建設局課長補佐
平成２年　(財)鉄道総合技術研究所研究室長
平成５年　国際航業(株)技師長
平成８年　同　取締役技術センター長

を務めさせていただきました．産官学の連携ということで，いろいろな方がJTAに結集して活発な議論をされていました．それが現在のトンネル技術の発展に非常に貢献したのではないかと思っております．

小山　昭和46年に国鉄に入社し，横須賀線のシールドなどの現場を経験した後，49年に本社に配属になりました．ちょうどJTAをつくるのだということで国鉄もいろいろお手伝いをしていた時期です．私は新人でしたから，先輩の命令でいろいろ雑用をやらされているうちに「JTAができるからおまえも会員になれ」と言われて会員になったのが最初の出会いです．

その後，どちらかというと読者という立場でずっと本誌を見ていましたが，途中，JTAに研究委託をしたり，担当している現場の原稿を執筆したりしましたが，鉄道総研に配属になったのをきっかけに，大島さんに代わって編集委員になりました．

委員会に参画させていただいて鉄道トンネルのほかに道路やサービストンネルなどのいろいろな情報を聞けて，非常にためになったと思っています

高橋　昭和46年に東京都下水道局に入りました．当時は，下水道事業が飛躍した年で，45年度の年間予算が400億円だったのに対し，次年度は800億円へと倍増するような状況で，都内各地で下水道管の埋設工事，トンネル工事が盛んに行われていました．

編集委員会には，下水道局の歴代の先輩方が参加しておられました．その代表が前編集委員長の橋本定雄さんです．私もここ十数年は編集委員として携わらせていただいております．

委員として苦労したのが連載講座です．委員長から依頼され，テーマ選びから講座の構成，講座委員の選出，執筆までとくにタイムリーなテーマを企画するのに苦労しましたが，形に残る仕事をさせていただいて今では非常に有意義だったと思っております．

また，編集委員会に参加させていただいて，幅広い人脈なり知見をいただいたことは，個人的にも組織的にも本当にありがたく思っています．

例えば，事故が起きたときに小山先生にお願いして，調査委員会の委員になっていただいたこともありました．

久多羅木　昭和46年に当時の交通営団(営団地下鉄)に入団し，現業実習後，新線建設を所管する建設本部に配属となりました．そのころの営団は営業キロが100kmを超えたばかりで，昭和35年から13年間連続して毎年新規開業が続いている状況でした．

最初は設計部でルート選定や構造物の設計などをしていました．また現場では有楽町線，南北線，そして東京で一番新しい副都心線などの建設に従事しました．この間，メキシコの地下鉄計画のマスタープラン改定のため現地に派遣されてメキシコ政府の地下鉄部門の方々と協議を重ね，プランを提言してきたこともありました．

せていただいております．

本誌とのかかわりは，土木研究所のトンネル室長になった昭和48年からです．編集委員会は非常に楽しくて，いろいろな情報を皆さんからお聞きできて，大変役に立ちました．

三浦　私は，昭和48年に日本道路公団に入りまして，現場を経た後，53年に本社技術部のトンネル担当となりました．

JTA(日本トンネル技術協会)とのかかわりは，ロックボルト工の設計指針の委員会でお世話になったのが最初です．その後，現場と本社の技術部とを往復し，計３回，10年半ほどトンネル担当ということで，JTAと関係させていただきました．

本誌については，平成５年から４年半ほど，会誌委員と編集委員

JTAとのかかわりはセグメントシール材マニュアル特別委員会や地下鉄12号線環状部特別委員会などに参画したことなどからです．また本誌とのかかわりは，会誌委員会や編集委員会で委員として誌面づくりに関係してまいりました．創刊300号記念号のとき「トンネル技術の変遷」と題して執筆したことが思い出として残っております．

トンネル技術の画期的な出来事や変遷

司会　次にトンネル技術というものがどのように変わってきたのか，それぞれの立場で，画期的な出来事をお話ししていただければと思います．

濱　私にとっては支保工が木から鉄に変わったことです．戦後すぐには，まだ鉄が非常に貴重でしたので，従来どおりの松丸太による支保工で底設導坑から逐次切り拡げていく工法でした．

二木島(紀勢線)の直轄工事は鉄道単線でしたが全断面工法で古レールを利用したアーチ支保工を用いました．次に北陸トンネルの複線断面を全断面掘削で施工しましたが，途中難航し，全断面工法は結局約半分しかできず，残りは底設導坑先進半断面工法などに変更しています．

青函トンネルでは，吹付けやロックボルト，あるいは先進ボーリング，こういったものが今後も長大トンネルには欠かせないということをしみじみ感じて，いろいろ研究をしました．数kmの長い先進ボーリングをやりましたし，曲げてボーリングをするという技術も随分勉強しました．そういったのがこれからさらに発展していくのではないかと思っております．

司会　全長13kmの北陸トンネルは本邦初の10kmを超える長大トンネルですが，途中に立坑や斜坑を入れて施工されたことを学生時代に知って驚きました．

大先輩の齋藤徹さんが山陽新幹線三原−広島間のルート選定で，工期短縮を考慮した作業坑の設置しやすさも条件に入れ，西条盆地を南に垂れ下がる感じの，「急がば回れ」的なルートを選らばれた．そのとき，ルート選定の極意を教わったような気がしました．

次に，道路関係のトンネルを中心に多くの技術開発にかかわっておられる今田先生いかがでしょう．

今田　一言で言えば，昔のトンネルの常識は必ずしも今の常識ではなくなったことだと思います．先ほど，北陸トンネルを全断面で掘削するというお話が出ましたが，そのころ先輩から，日本の地質では全断面は不可能だ，複線トンネルだと非常に難しいということを聞かされていました．しかし，長い月日が経って考えてみると，今の時代は，地質が悪ければ悪いほど全断面を採用しなければいけないというように技術が変わってきたと思っています．その間，どうしてこうなったかというと，支保の方式，機械設備，設計に対する考え方など，いろいろな変遷があったからです．技術というのは常識を余り信じず，常にチャレンジングでなければいけないと思っています．



濱　建介氏

昭和22年　東京帝国大学第二工学部土木工学科卒
　　運輸技官　鉄道総局施設局
昭和24年　信濃川，東京工事事務所
昭和27年　施設局土木課
昭和29年　岐阜工事事務所
昭和37年　建設局線増課補佐
昭和39年　鉄道公団青函トンネル調査事務所長
昭和45年　同　海峡線調査部長，計画部長
昭和50年　同　東京支社長
昭和54年　同　理事
平成４年　前田建設工業(株)専務
平成13年　同　顧問退任
平成22年　(株)ANET取締役

三浦　最初にトンネルの担当になったころは，ちょうど各機関がNATMを導入しようというときでした．鉄道が先行されたのですが，高速道路も昭和58年以降は原則NATMだという決定をしました．現在供用中の高速道路では７割がNATM，３割が矢板工法で造ったトンネルになっているようです．北陸道をはじめ，非常にトンネルの多い路線が展開し出した時期でしたので，非常にタイミングが良かったと思います．NATMの導入により，維持管理上漏水などの問題が少ない優利なトンネル

がたくさんできました．

現在，３割の矢板工法によるトンネルについては，漏水の処理や背面空洞の充塡作業を行って長寿命化していこうという方向になっております．

小山　私は，横須賀線のシールドの現場から入りました．非常に切羽が不安定で，ちょっと行けば切羽が返ってくるというような工事を町の真ん中でやっていました．その後，鉄道公団が羽田トンネルで泥水シールドを始めたので見に行ったのですが，これも坑外に泥水処理のために泥の田んぼがあって，都会の真ん中でこんなことをやったら怒られないのかと思っていたら，泥水シールドが急速に進歩して，町の中で堂々とできるようになったのに驚きました．その後，土圧シールドが出てきて，こちらも進歩を遂げました．

実は，泥水も土圧もいいねという話になったのですが，そのころはどっちがいいという技術的な決着がつかない状態で，何となく好き嫌いで決めていたところがありましたね．

司会　小山先生はどちらがよいと思っていらっしゃいますか．

小山　私はそのころはあまりよく理解していなかったため，それぞれに聞くと，泥水派は土圧のよくないところを，土圧派は泥水のよくないところを言うのですが，どちらも理にかなっていたので，これはJTAとか本誌で公開討論したらおもしろいんじゃないかと思いました．

司会　どこかに向き不向きがあるのですか．

小山　向き不向きがあるのと，密閉型シールドで切羽が見えないから，みんな頭の中の想像でしか言っていないのです．今ならいろいろ計測をするのでしょうが，計測もあまりしない状態だったので，なかなか決着しなかったと思います．

それにしても，今はシールドに関しては，不得手な地盤はありますが，それを除けば，よほどのことがなければうまく掘れるところまで行っています．やはり密閉型シールドの出現というのは大きかったと思います．

その後，NATMの現場の新宇佐美トンネルを計画しました．戦前に掘った宇佐美トンネルは，温泉余土という地質で，掘るのはきれいに掘れるのですが，すぐに膨れてきて支保がつぶれてしまう状況で，非常に苦労したようなので，これはロックボルトをやったりしないとうまく掘れないだろうということでNATMについて勉強することになりました．

しかし，勉強しようにも，国内に現場が少なく苦労しました．あちらこちら見に行ったのですが，ボルトの現場と吹付けの現場をばらばらに見ているため，なかなか評価をするのが難しい状況でした．これはいっそのこと試験工事と称して坑口の近くでいろいろなことをやってみるほうがよいと思いました．あのころは，膨れる山には可縮支保工がよいというので，可縮支保工も入れてみようとか，いろいろなメニューをたくさん盛り込んだ試験工事を計画しました．残念なことに計画した段階で配属が変わってしまいました．この試験工事により皆さんが少しずつNATMを始めることができたのだと思うと良いことをしたと思います．

NATMの経験が本誌に掲載されているのを見ると，われわれが計画していた当時の情報と比べるとはるかに重要な情報が書かれていると思います．実際に施工してうまくいったとか，苦労したとかが残っているのが本誌の価値ではないかと思います．　NATMの出始めのころの現場の記事は今見ると非常に勉強になるのではないかと思います．

高橋　下水道局に入った当初は，現場で開削・推進・シールド工事の設計・施工監理に携わっていましたが，4,5年後に技術開発部門に移りました．そこでシールド工法にかかわる調査，研究に携わるようになりました．

当時，下水道局だけでも毎年30～40件のシールド工事が発注されていました．その中で一番大きな課題は，掘進に伴う地盤沈下とそれによる家屋などへの影響でした．この課題を克服することが組織共通の目標になっていました．そこで，徹底した調査をすることになり，下水道局の技術管理委員会にシールド分科会が設けられました．まず現場の実態を詳しく調べるため，軟弱地盤である葛飾区から江戸川区にまたがる篠崎幹線を調査することになりました．

同幹線は，手掘りから圧気，泥水，土圧などさまざまな工法，口径も3,000～8,000㎜という具合に，調査結果を比較検討するには絶好の条件を兼ね備えていました．そこに徹底的に地中沈下計や水位計，土圧計などを入れてシールド掘進と地盤変状との関係を詳細に調査しました．その後，近接施工ということで，今考えれば非常に大胆なことだと思うのですが，50cm離れとか１m離れのところを，下水道同士ですから，相互の構造物がどう動くのか，地中の地盤がどう動くのか，なども含めて調査をしました．その結果，地盤変状と掘進との相互関係のメカニズムを明らかにしながら，それを実際の仕事に生かそうということでやってきました．後に『トンネル標準示方書(シールド編)・同解説』の改訂にも生かされました．

また最近，(財)下水道新技術推進機構から『下水道シールドトンネルの歴史とその評価に関する調査研究』という冊子が出版されました．そこには下水道局の一連の活動とそれがシールド工法の発展に寄与したことが紹介されています．例えば，地盤変状の分類とメカニズムの解明，地盤変状予測法の開発などが評価されていました．当初の目標が一定程度達成できたと思っています．

久多羅木　地下鉄建設の場合，密集した市街地での大規模工事ですので，路面交通や沿道に対する工事の影響度合いが少ないシールド工法によるトンネルの割合が開削工法によるものより増えてきたということでしょうか．

トンネル延長に対するシールド工法を採用した延長割合を見ますと，1960年代前半に建設の日比谷線は全区間開削工法でしたが，その後建設された東西線で約10%，千代田線で約20%，有楽町線で34%と徐々に比率が高まってきまして，最近の南北線，副都心線ではともに約75%になっています．これは何といっても時代背景とともに技術発展の証の一つと感じております．

また，シールド工法そのものも，被圧水を抑えるために，当初は圧気を用いていましたが，次第に泥水，あるいは泥土圧に代わってきました．形状も，単円形から複合の円形，着脱式のものとか，いろいろな形に多様化されてきているのもその一つの現れだと思います．しかし，形状の自由度の高い開削工法がなくなるということは決してないでしょう．親杭横矢板から柱列式地下連続壁などの土留めについても絶えず改良が行われ，芯材もいろいろなものが開発されてきております．開削工法についても今後さらに改良が進められていくものと思っています．

司会　皆様方の話を聞いていて思い出したことがあります．私が30歳前後のころでしたが，山陽新幹線の現場へ青函トンネルから転勤して来られた方が，「これからはロックボルトを普及させなければいけない」と言って，それを一生懸命採用しようとされていましたが，作業員が「こんなボルトが何の役に立つんだ」と強く抵抗していました．一方で，青函では矢板の上から一生懸命吹付けをやっておられました．無駄なことですが，こういったことをやってみせないと作業員が納得してくれないのだということでした．その後はNATMに移行していきましたが，もし吉村恒さん((元)国鉄新幹線建設局長)のような強いリーダーシップをとる人がいなかったら，旧態依然のままだったかもしれないと思います．濱さんはどうお考えでしょうか．

濱　青函の場合は直轄工事でしたので，職員が先頭を切って作業員を指導したのでそのようなことはありませんでした．しかし，請負工事の場合，なかなか作業員はいうことを聞いてくれなかった時代だったかもしれませんね．

地震とトンネルへの想い

司会　今回の500号は，3.11の東日本大震災から約１年ということで，「地震とトンネル」という特集を組んでおります．皆さんの立場で，このテーマに関し何かお話をお聞かせください．

濱　私は青函トンネル工事が始まって２年ぐらいのころ，函館で十勝沖地震を経験しました．十勝と函館ですからかなり距離はあるのですが，函館の大学の１階部分が完全につぶれてしまいました．私は函館の事務所の５階にいましたが，相当揺れましたね．連絡船の埠頭も壊れましたが，坑内にいたほとんどの連中は，全然知らなかったようです．距離もありましたが，坑内ではあまりわからないというのは本当のようですね．



今田　徹氏

昭和35年　東京都立大学工学部土木工学科卒
　　建設省土木研究所道路部道路研究室
昭和48年　同　土木研究所道路部トンネル研究室長
昭和55年　建設省退職
　　東京都立大学工学部土木工学科助教授
昭和59年　同　教授
平成13年　東京都立大学退職　名誉教授

今田　今，これだけの災害があって，皆さん，地震というものに非常に興味を持っておられると思います．地震に対してトンネルは強いものだと思っているし，事実そうなのですが，それをわかりやすく説明しなければいけないと思います．そういう点で見た場合に，地震によってトンネルで起きている現象をなかなか計算などによって再現できません．その辺のところを是非これから勉強して，地震に強い理由を説明していかなければいけないと思います．そうすることによって，地震に対して問題が生じやすいところが明らかになってくると思います．

司会　ありがとうございます．

先ほど濱さんがおっしゃったことと関連して，鉄道の地質関係の大先輩で，渡邊貫さんという有名な方がお書きになった『地質工学』という本があるのですが，この本の中に丹那トンネルのことが書いてあります．丹那トンネル施工中に関東大震災と北伊豆地震を経験したそうです．トンネルの中に入っていたので全く地震には気づかず，外へ出てから地震があったのを知ったと書いてありました．

その最後の部分に，東大地震研究所で，地下30mぐらいの深さに地震計をセットし，地表と地下でどれぐらい揺れが違うか計ってみると，地表の揺れに対して地下は1/30だったという記述があります．都市トンネルの工事でそういった地表と地下の地震動を計っている事例はありますか．

久多羅木　計測値は聞いていませんが，保守の方々から，地上と地下では体感の差が明らかに違うということはよく聞きますね．

司会　海上がしけているときでも，うねりの高さと同じぐらい深いところに行くと揺れが少なくなる．深海に行けば行くほど，ほとんど揺れない．それと同じように，地震動というのは，被害を及ぼすのはP波，S波ではなくて表面波だから，海と同じで下に行くと揺れが少なくなるのだと説明している物理探査関連の本があります．ですから，そういった分野も，今田先生がおっしゃったようなところにも使えるのではないかと思っています．

今田　地下から地震波が入ってきますよね．その地震波が入ってきたときに実際に覆工にクラックが入ったり壊れたりした事例があります．それを十分に説明できるような解析の結果が今のところないのです．トンネルというのは非常に複雑で，地山と覆工との間のインタフェースがありますし，なかなか一筋縄ではいかないと思いますが，ちゃんと説明できるような努力をしていかなければいけないと思います．

高橋　私のかかわる分野では今回の地震で一番問題になったのが液状化です．これまでに阪神大震災や新潟中越地震を経験しましたが，それらと今回のとは別ものだったと思います．

東京都の新木場，千葉県の浦安市，香取市の3つのところで応急復旧の支援や調査に直接携わる機会がありました．下水道管内に液状化した土砂が満杯になって，それが固結してにっちもさっちもいかないという状況だったのです．これまでの地震ではそういう状況はありませんでした．

司会　管の中に土砂が入り込んでしまったのですか．

高橋　原因は，揺れの大きさが従来と全く違ったのではないかと想像しています．下水管の場合，取り付け管が本管から抜け出て，そこから液状化した土砂が入ってきたり，あるいは，下水管のジョイント部が開いて流入したのかもしれません．もしシールドトンネルだったらどうなっていたか気になるところです．

司会　深さと関係しますか．

高橋　関係すると思います．今回は非常に深いところまで液状化

現象があったと言われていますが，被害を受けたなかには土かぶり7mほどのものもありましたが，下水管は比較的浅い埋設ですので全容はわかっておりません．今後の調査や復旧工事が行われる中で明らかになってくると思われます．

今田　シールドトンネルはたくさんあると思いますが，具体的な被害はありますか．

高橋　私どもがかかわった液状化が起きた地域には残念ながらシールドトンネルがありませんでした．

三浦　阪神大震災のときは，ITAのシンポジウムに参加するためタイに行っていたためニュースで知りました．その後，現地に行ってみますと，三宮の地下街は，すでに復旧の作業を開始していました．舞子トンネルが建設中でしたが，地上の建物は壊れているのに，トンネルはほとんど被害がありませんでした．

ただ，大開駅の問題があったため，マスコミにはトンネル神話が崩れたと書かれましたね．ですから，先ほど今田先生が言われたように，その辺を整理して，トンネルは地震に強いのだということをもう一回提唱したいと思っています．

司会　私は地震で一番怖いと思うのは，丹那トンネルの施工中の北伊豆地震で見られたようなズレ（水平約2.4m，高低約0.8m）が生じることです．ズレが生じた丹那断層付近に三島方の切羽があり，その先約1,000mが幸いにも未掘削だったため，その間にS字カーブを入れて，縦断もちょっと変更してトンネルをつないでいますが，あの地震が開業後だったとしたらどうなったんだろうと思います．

三浦　有珠山の噴火のときは地盤が動き，そのためトンネル坑口が4～5m移動してしまいました．覆工はねじれに弱く，崩落していまいました．

濱　丹那トンネル開通後にあの地震が起きたら，間違いなくずれているでしょう．導坑は2mぐらいが完全にふさがってしまって，中にあったスコップなどがそのまま後で出てきました．でも，あのときに坑内でつぶれたのは，支保工などの建設物で，地山自体はしっかりしていました．

小山　まさにそうですね．兵庫県南部地震のときも，中越地震でも，トンネルの覆工は落ちていますよね．でも，トンネルの覆工が落ちても地山はしっかりしています．基本的に覆工は靭性がないというか，脆性材料のため，ちょっとズレたでけで剝がれてしまいます．でも，地山は，ちょっとズレても，そんなに脆性材料ではないから残っています．

司会　NATMのトンネルだったら大丈夫ですか．

小山　兵庫県南部地震のとき，NATMで施工したトンネルの覆工も落ちています．要するに，変位を吸収できるような構造にしておかないとコンクリートを巻いただけでは無理だと思います．

久多羅木　阪神大震災の直後に，被害を受けた地下鉄の調査現場に派遣されまして，被災の様子を目の当たりにしたときにはショックを受けました．それ以降，地下構造物を含めて耐震補強がさらに強化されております．



三浦　克氏

昭和48年　京都大学大学院工学研究科終了
　　日本道路公団入社
平成5年　本社技術部調査役
平成10年　名古屋建設局建設第二部長
平成11年　試験研究所総括研究主幹
平成13年　東北支社副支社長
平成14年　静岡建設局長
平成15年　日本道路公団退社
　　(株)竹中土木入社

1923年の関東大震災のときには小田原以遠まで被害が報告されていますが，トンネルの被害報告はあまりありませんですね．中央線の四ツ谷にある御所トンネルも，坑口の一部に落下があったものの無事だったと当時の文献にも書かれております．

一般にトンネルは地上構造物に比べ地震に強いというのが定説として考えてよろしいのではないでしょうか．

今後のトンネル技術に関する展望や夢

司会　今後のトンネル技術に対する展望や夢などを語ってください．今田先生は，以前の日本はシー



小山幸則氏

昭和46年　東京大学工学部土木工学科卒
　　日本国有鉄道入社
昭和57年　同　東京第一工事局地下鉄線課長
昭和59年　同　構造物設計事務所主任技師(地下構造担当)
昭和62年　(財)鉄道総合技術研究所地盤・防災研究室主任研究員
平成３年　同　トンネル研究室長
平成７年　同　技術開発事業本部構造物技術開発事業部長
平成15年　(財)地域地盤環境研究所東京事務所長
平成20年　京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授

ルド技術のトップランナーだったが，今はそうとも言いがたい面もあって，努力しなければいけないのだとよくおっしゃっていますが，そういった面で何か夢を語っていただければと思います．

今田　技術というのは常に進歩するものです．その進歩をさせるものはニーズだと思います．そのニーズを考えてみると，リニアの新幹線とか，外環の工事とか，いろいろな工事がまた新しく始まろうとしています．それらをうまく利用して技術開発に挑戦してもらいたいと思っています．今は非常に世の中が沈滞していて，技術開発に向いていない時代になっています．それを何とか打破して，一生懸命努力していかなければいけないし，ニーズをつくることも必要だと思います．

世界の人口の半分は都市に住んでいる時代を迎えていますが，さらに何年か後には70～80％の人が都市に住むというような環境になります．都市化は避けられないということになりますと，望ましい都市とはどういう都市なのかということを考えなくてはなりません．地下の利用なしに都市というのはあり得ないと思います．そういう意味で，これから都市をどのようにつくっていくのか，地下利用のあり方，その地下利用を進めるために必要な技術は何なのかということを勉強していく必要があると思っています．日本はそういうことに対応する十分なポテンシャルを持っています．日本のポテンシャルは世界に役立つ技術になりますので努力をしたいと思っています．

司会　仕事がなければなかなか技術は発展しないということかと思いますが，三浦さん，いかがですか．

三浦　道路の最近の一つのテーマは，大断面トンネルの需要が出てきたことです．新東名静岡区間が間もなく開通しますが，掘削断面積が200m²クラスのトンネルが大きなトラブルもなく掘れたという実績はできたと思います．この事業のときには，ニーズがありましたので，いろいろな人が勉強して，研究成果を報告したり，非常に活発だったと思います．そういう大きなニーズをつくり出して，それに向かってみんなが努力する必要があると思います．東日本大震災の教訓から，命を守るためにも道路が必要だと言われ始めて，例えば三陸縦貫道や紀伊半島の道路を早く整備しろとか，そういう声が起こりつつあります．そういう動きをとらえて，トンネル建設によって命までも守れるぞと，そういうことを世間に訴えていくことも必要かと思っています．

今田　先ほどニーズをつくると言いましたが，ニーズをつくるためには，こういう技術開発の可能性があるとしっかりと示していかないとニーズはできないわけです．例えば，首都高の日本橋川の上に架かっている高速道路を何とかして景観をよくしたいという世間の要望があります．それに対して技術としてはこういうことができるということを世間に示していくことが必要だと思います．

小山　夢ではないのですが，トンネル技術は，一見あまり進歩していないように見えますが，実はすごく進歩しています．それは多分，みんなが困っていたとか，バランスが悪いと思っていたところを何とかしたいという気持ちがあったから，何か新しい発想が出てきて，みんなが努力した結果だと思います．

私は，トンネルに携わっている人は常に自分のやっていることにずっと心の中に不満を抱きながらやっていて，何かいい発想が出たら解決しようと思っていないといけないのではないかと思っています．今田先生が挙げられた中央リニアにしても外環にしても，今の技術でやるとこんなことだけれども，これでいいのかと思うことがたくさんありますので，そういうことをみんなが意識して何とかしようとすることが大事だと思っています．

司会　日韓トンネルという壮大な夢を追い続けておられる濱さんはいかがでしょうか．

濱　今はNPO日韓トンネル研究会のもとで，概略の地質図をもとにいろいろ検討しています．ユーロのように両国首脳の合意形成がなされるよう少しずつでも前進したいところです．個々の技術の問題はたくさんあります．地質調査もまだまだですし，シールド自体，セグメント，また湧水，水圧などに対する問題点の解決には多くの技術者の総力，新進気鋭の方々の英知に期待するのみです．

高橋　現状を見ると，先ほど今田先生がおっしゃったように，今は新技術の開発という動きはあまり見受けられません．むしろ価格競争に疲弊していて，そちらに人や費用を回せないという状況にあるのではないでしょうか．現実に新しい技術を開発するには，事業やニーズがあって，それに対応する人がいて，それを進めるためのお金がなくてはできません．この３つの条件がそろって初めてできると思います．

私は東京都下水道サービスというところにおりますが，10年くらい前はゼネコンの方と一緒に，知恵やお金を出し合いながら共同開発をやりました．例えばシールドで言えば，T-BOSSとか，コンパクトシールドなどを実用化しました．ところが，現在では，なかなか参加する企業がいないのが実情です．

一方で，東京都では，豪雨対策としてまだまだトンネルを掘らなくてはいけないし，老朽化対策も急がれています．

そういう中で，われわれが今一番直面しているのは，地中に存置された仮設材があるため，工事に支障をきたしている問題です．それが，東京だけではなくて，広島や福岡などでも散見されています．また，シールド工法を採用して50年が過ぎようとしており，その老朽化対策が必要になってきます．下水を供用させながらリニューアルしていく技術なども求められています．そういったニーズを表に出しながら，それに対応するようなものを開発していただければというのが，夢というよりお願いです．

司会　戦前からのトンネルも使っている鉄道分野ではトンネルの更新は，以前から相当なされていますが，下水道のトンネルはまだ歴史が浅いので，更新がこれからという感じなんですかね．

高橋　事業としては老朽化対策である更新，再構築事業がメインになってきています．

下水の特徴は，下水が流れたまま，供用したままやらなければいけないという条件があるので厄介です．

濱　新しく簡単につくれるなら，取り替えるという手もあると思いますが，地中にいろいろなものがあると更新をやるよりはるかに難しいので大変ですね．だから，恐らく今まで以上に困難な仕事が増えるのではないですかね．

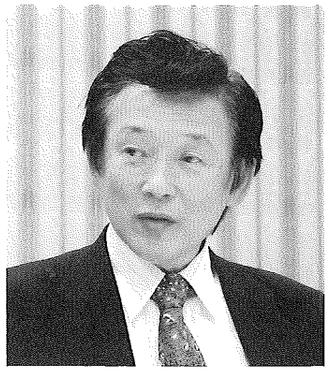
久多羅木　都市トンネルについて言えば，今後のトンネル技術に求められているものは，まず，さらなるコスト縮減だと思います．次にトンネル工事の施工量の減少や世代の急速な交代による新たな技術者の確保と技術の伝承だと思います．これらを含めて，従来以上に，需要，費用対効果，あるいは効率性を一層考えていかなければならないと考えています．

夢はいろいろありますが，地下空間の有効利用という観点から言えば，やはり新たなニーズを掘り起こして，技術の面，活用の面，



高橋良文氏

昭和46年　日本大学理工学部土木工学科卒
　　東京都下水道局入局
平成５年　同　計画部総合計画課課長補佐
平成14年　同　計画調整部事業調整課長
平成17年　東京都下水道サービス(株)技術部長
平成19年　東京都下水道局技術開発担当部長
平成20年　東京都退職
　　東京都下水道サービス(株)入社



久多羅木吉治氏

昭和46年　千葉工業大学工学部土木工学科卒
帝都高速度交通営団入団
平成７年　同　７号線白金工事事務所副所長
平成９年　同　建設本部計画部計画課長
平成10年　同　建設本部設計部計画課長
平成13年　同　13号線渋谷工事事務所長
平成15年　東亜建設工業(株)土木事業本部技術部長

それから大深度という領域もこれからということから，夢というか希望は持っていきたいと考えております．

司会　現実的な問題として，早く掘ろうと思えば掘れるけれど，掘削土の捨て場が簡単に見つからないという問題があります．これもトンネル施工に関連した大問題の一つですが，これは技術屋がいくら考えても法体制も含めて何かやっていかない限りは解決しない問題です．土対法の問題も含めて，これらが足を引っ張っている面もあると思いますが，今田先生，何かご意見はございませんか．

今田　世の中の動きですから仕方がないと思いますが，ある見方をすると，出てくる土というのは資源です．その資源を有効に活用するという視点から考えていくことが必要だと思います．土は捨てるべきものではないので，少しずつ努力していかなければいけないと思います．

司会　それも展望の一つかもしれませんね．

小山　夢を見るのは非常に大事だと思いますが，夢をかなえるためには，若手にトンネルの分野はおもしろいと思ってもらわなければいけないと思います．

司会　それは大学の先生の立場で大事なんじゃないですか．

小山　大学だけではなくて，トンネルの世界っておもしろいということを子供のころから教えていかなければいけないと思います．われわれ年寄りだけが夢を見ても夢はかなえられないですよね．

司会　そうですね．私の学生時代は，ああいうトンネルの仕事をやってみたいと憧れていましたが，最近では，勉強しないとあの人みたいになるよとヘルメット姿が忌避の対象にされたりしていますから，認識を変えさせなければいけないですね．

三浦　日建連や土工協で一般の方を対象に見学会をやっています．トンネルは未来的なところもあるし結構人気がありますので，見学会などに子供たちを招待することによって，効果が期待できるのではないでしょうか．

「トンネルと地下」の今後の希望

司会　最後に，本誌に対する希望などを伺いたいと思います．

濱　トンネル年報を見ましてもここ５年間は工事が減少しているのがよくわかります．その中で鉄道や道路は大規模な工事なので請負額も大きいのですが，一方上下水道もかなりの額を示しております．このような状況の中，いろいろな部門からなる編集委員の方々の努力で非常に内容が充実していると思っております．今後も新しい工法や技術をできるだけ皆さんにお知らせするのが本誌の使命と思っております．

久多羅木　今回500号を迎えるわけですが，本誌は，発刊の第１号から自宅に保管しております．実は鉄道の建設史を集めているもので，その一環として保管しているわけですが，今回の500号はまさに節目で，トンネルに対する要望は時代とともに絶えず変化しているのが，改めて思い起こされます．本誌がトンネル技術者の伝承を担う有力なツールとして参考になるよう願ってやみません．これが当誌への希望でして，今後も一歩一歩積み重ねられ，来る600号，700号を目指していただきたいと思っております．

三浦　施工記録が詳細に載っており，非常に参考になったという記憶がございます．私は，転勤で引っ越しが多かったため，コンパクトに保存できるように電子化をしていただくとありがたいです．

高橋　わが国唯一と言っていいトンネルの専門誌なので，長く続けてほしいと思います．そのためには，良いものだから売れるとか，読んでもらえるというわけではないので，そのあたりをどう工夫するのかが課題だと思います．そういう意味では，一つの思いつきですが，読者や企業の方に外部モニターになってもらい，今以上に読み手が求める連載講座や質問コーナーなどにしていったらどうでしょうか．

司会　本誌は「施工報告」や「Tunnel Wall」などで投稿を受けていますが……

濱　前にJTAで質問コーナーもありました．

司会　そういうたぐいの努力は，JTAの仕事なのか，当編集委員会の仕事なのか，ちょっと難しいところはありますが，出版社としても努力は必要になるかもしれませんね．

司会　雑誌がマンネリ化しておもしろくないという意見をたまに耳にすることもありますが，この辺を変えた方が良いなどのご意見があれば伺いたいのですが．

小山　残しておかなければいけない現場の記事や報告がたくさん載っているということで，非常に役立っております．今でも昔の「トンネルと地下」を探してきて，非常に便利に使わさせていただいております．そういう意味でも，あえてあまり変えてはいけないんじゃないですか．継続していることに価値があるで，そのいいところを消してしまったら元も子もないと思います．でも，プラスアルファで何かやってみるというのはいいと思いますが．

司会　今田先生は，巻頭言に２回登場され，協会の委員会委員長などに従事しておられますが，雑誌という立場から見たとき，企画として何か印象的なものはございますか．

今田　特に企画としてこれということはあまりありませんが，この「トンネルと地下」は，言ってみればトンネルの施工記録の宝庫といいますか，問題となった主なトンネルはほとんど載っていてそこに非常に重要な意義を持つ雑誌であり，これからもそうであらねばならないと考えております．

ただ，簡単に検索できるシステムをつくっていただければ，この雑誌はもっと生きるのではないかと思います．非常に地味なですが，これだけ実績を積んだ雑誌ですから，そういう方向で利用しやすくすることが大切だと思います．

司会　私が委員になったころは，他界された加納(本誌初代編集委員長)さんの後を受けて高坂さんが委員長になられてすぐのころだったと思いますが，高坂さんや遠藤浩三(東京都)さんがよく，「この雑誌は施工の記録がいろいろ載っていることに価値があり，見るだけで日本のトンネル技術の歩みがわかるので続けることに意味がある．だから君らは頑張ってくれ」と言われたのを思い出します．私もそっちの方が本誌にとって価値があることだと思います．

すでに編集委員長を７年ほど務めてますが，濱さんをトップバッターに略称「語り部シリーズ」を始めました．私としては，いい企画ができたと思っていますが，この企画についてご意見がございましたらお願いします．

濱　第１回目の執筆を大島さんから依頼されたとき，昔の資料を探したりするのが大変なので，大分ごねたのですが，書いてみれば自分の整理になったと感謝しております．やはりこういう企画がないと．私自身の遍歴が戦後のトンネルの流れの一部になっていますから，読んでいただいてもかなりトンネルの移り変わりがわかるのではないかと思います．そういう点では，それぞれの人の流れがまた同じように出てくると思います．第２回以降も非常におもしろく読んでおります．

司会　三浦さんにもご登場いただきましたが．

三浦　私は元上司である長友さんについて書かせていただきました．長友さんだったらこういうことを言うんじゃないかというところを書いたつもりです．

今田　本当にいい企画だと思います．私は雑誌が届くと最初に読みます．

司会　今田先生にそう言っていただくとうれしですね．これは，少なくとも５，６年は続けたいと思っています．書きたいと思っている人が結構おられるようですから，心強く思っています．そのほかに，こういった企画があった方がいいとか，何かございませんか．

今田　できるだけ早く情報が提供できれば非常にいいと思います．これはなかなか難しいことですが，そういう努力は必要なのかなと思います．

司会　これは編集委員会の仕事でもありますが，なかなか書いて



もらえないことが多いのです．

今田　とくに最近はそうでしょう．

小山　書いてもらえないというのは結構あるのですか．私が最近心配しているのは，現場に人がいなくなってきたから，書きたくても書ける人がいなくなってしまった，あるいは時間がないということが心配です．だから，そういうのが落ちこぼれないように編集委員会がサポートしていかなければいけないと思います．

司会　それは言えますね．確かに現場の若い人たちも含めて書く能力が落ちているのかもしれません．本誌を発表の場として気軽に活用してもらいつつ，発表力を磨いていただければと思います．

濱　でも，昔よりもゼネコンの人が筆をとるのが多くなったのではないかと思います．技術士などを取るために勉強しているでしょう．連名で執筆している場合，本当にやった若手が書いているのが多いでしょうから，結構慣れてきていると思います．各部門から出ている働き盛りの人が編集委員になってくれているから，うまく拾い出してくれていると思います．

司会　本誌が500号まで長く続けられた秘訣何でしょう．

濱　読みやすいということと，使えるということ．あまり数字やら数式が出てこないので頭が痛くならない．

司会　土木学会や地盤工学会のような学会誌とは一線を画さないといけないということですか．

濱　やはり使える情報というのがあるんじゃないですかね．さっき言ったように，開いてみたら似たようなところでいろいろなことをやっている．そういう情報を参考にして，自分のところでもいろいろな工夫を凝らしたことに使えるということじゃないですかね．

司会　どうも長時間ご議論をありがとうございました．

連載講座

最新推進工法技術（最終回）

—推進工法の施工管理—

「最新推進工法技術」連載講座小委員会

① はじめに

工事の施工とは，環境・安全に配慮し，無理・無駄なく工程を円滑に進め，最終的に目的の品質・出来形の構築物を適正な価格で無事故・無災害で完成させることである．そのためには，過程におけるさまざまな条件変化などに対しても適時適切な対応を行う施工管理が必要である．施工管理の手順は，各管理区分・範囲および作業ごとにP(計画)・D(実施)・C(検討)・A(処置)のサイクルを反復進行させて行うことが大切である．

推進工事では一般的な土木工事とは異なり，特殊な環境下での作業である．前回までの連載で解説されたそれぞれの工法により，独自の管理手法をとる場合も多い．本稿では，下記の内容について日常の管理手法の要点，注意点を解説する．

- 施工準備
- 施工計画書
- 施工管理
- 施工(各工種ごとの要点と注意点)
- トラブルと対策事例

② 施工準備

推進工事は，本来通行の用に供され，住民の生活，企業の生産活動の場となっている道路上で工事が行われるため，その機能に相当な制約が与えられる．事前に関係機関との協議連絡が必要であり，各種管理者，住民に十分な説明を行って，理

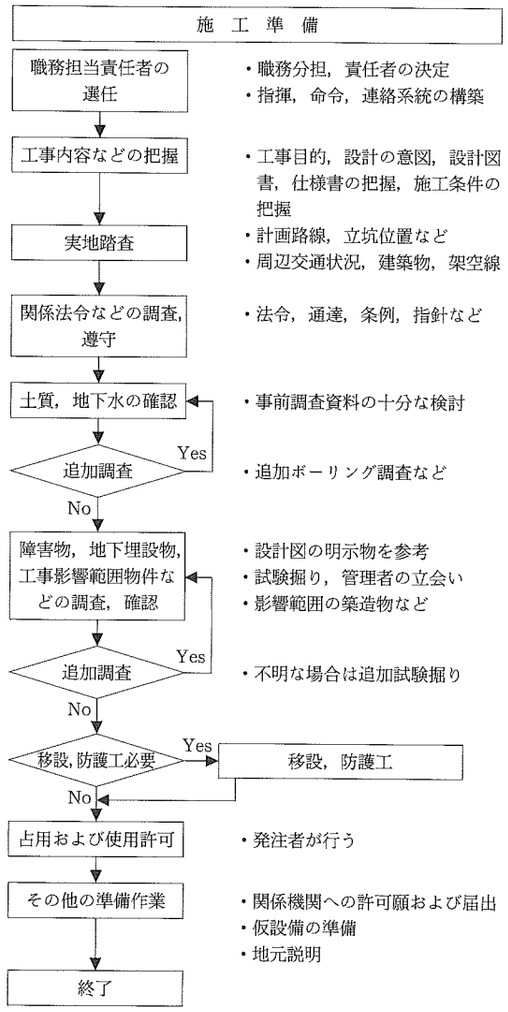


図-1　施工準備のフロー

解と協力が得られる処置をしておかなければならない．施工に先立って次の施工準備を行い安全，適正な施工管理ができるようにしなければならない．

③ 施工計画書

施工計画書は，自然条件，社会的条件を考慮し，契約書および設計図書に定められた工事目的物を所定の工期内に安全，かつ，経済的に工事を実施するための指針となるものである．工事の内容および現地調査の結果をもとに十分な技術的検討を行って作成しなければならない．計画書の作成にあたっては，契約条件，工程条件，工事現場周辺の状況，関係法令，契約図書による施工条件明示などを十分把握し，さらに工事監督員と十分協議したうえ，工事着手前に作成する必要がある．

施工計画書に記載する主な内容は，表-1のとおりである．

表-1　施工計画に記載する内容

大項目	中項目	小項目	内容
(1)工事概要			目的，名称，施工場所，工期，工事内容，案内図，その他
(2)現場組織表			命令系統，業務分担，責任区分，下請会社の業務と責任，施工体制台帳，体系図
(3)緊急連絡体制			連絡系統，方法，連絡場所，連絡先，組織編制，担当業務
(4)工程表と作業編成			ネットワーク，搬入資機材，予定人員，予定機械など
(5)共通仮設備	1)仮設建物など		現場事務所，作業員宿舎，材料置場，倉庫，仮囲い，導線など
	2)給排水設備		給水系統，径，排水量，期間，放流先，位置，排水基準を満たす設備
	3)仮設電気設備		受変電設備，分電，配電盤の位置および系統，動力，照明設備，非常時設備
	4)通信設備など		使用機器，期間，使用方法
(6)施工	1)立坑		構築位置，大きさ，構造，応力計算，土留め工，掘削工，水替工，路面覆工，埋戻工，舗装工
	2)推進工	①推進力	推進力の計算，管の許容耐荷力と推進力との比較，許容推進延長
		②反力受	耐力計算，推進力との比較，背面地山の強度計算
		③掘削機	形式，諸元，構造図，応力計算
		④推進設備	坑口設備，元押ジャッキ，油圧ポンプユニット，ジャッキ台，推進台，押輪，ストラット，押角，中押装置，中押用油圧ポンプユニット
		⑤運搬設備	坑内外土砂搬出設備，クレーン設備
		⑥その他	泥水還流設備，送排泥ポンプ，送排泥管径の検討，制御管理計画，泥水処理設備の検討，計画
	3)曲線推進施工		設計条件の検討，諸数値計算，施工要領，測量要領
	4)滑材，裏込め注入および目地工		配合，注入設備計画，目地工の施工方法など
	5)地下埋設物などの移設，防護計画		支障物件調書，移設・防護方法，近接構造物防護措置
	6)補助工法		薬液注入，地下水位低下工法，攪拌混合工法，圧気工法など
	7)発生土処分		仮置場，処分場，搬出方法，搬出経路など
	8)その他		仮排水路，仮締切，仮設道路の構造，設置期間
	9)施工管理		測量，推進力，注入材の管理要領
	10)支給材料，調達材料一覧表		構築物，仮設用の使用予定，搬入時期
	11)使用機器一覧表		
(7)安全，衛生，環境管理	1)安全衛生管理	①安全衛生対策	基本計画，管理工程表，工種別災害防止重点対策，官公庁届出書類一覧表
		②安全衛生管理体制	管理表，職務と責任，協議会の設置と運営，防火管理，自衛消防隊，緊急時の対応
		③具体的災害防止実施活動	具体的活動，安全，衛生対策，就業管理，宿舎などの管理，各種点検項目
		④公衆災害対策	公衆災害防止，交通対策
	2)環境管理	①建設公害管理	騒音，振動，地盤沈下対策，粉じん対策，その他環境保全
		②建設副産物対策	産業廃棄物管理
		③地域環境の保全	地域施設の把握，環境保全方法，広報方法，道路交通管理，積載方法，路面管理

④ 施工管理

施工管理とは，工事を無駄なく，無理せず円滑に進めるために，綿密な計画を立て，計画にもとづいて施工し，計画どおりに適正に施工されているかを工程，品質，作業管理を種々の手法を用いて確認する．そして，計画との差異があればその原因を追究し，改善するとともに施工中における条件の変化に適時適切に対応することをいう．

次に工程管理，品質管理および作業管理について解説する．

4-1　工程管理

工程管理は，施工計画書により各工程の内容と所要期間を確認し，所定の工期内に工事を完了させるため，作業量，材料，労務，機械などの手配とその工期の進行を管理することである．

推進工法は地中を掘り進んでいくため，土質，湧水などの工程を左右する不確定要素が多い．常に差異を分析し問題点を把握する必要がある．

工程管理上のチェックポイントとなる要素は次のとおりである．

- 立坑の構築完了時期
- 補助工法の完了時期
- 各種防護工事の完了時期
- 推進機械設備の製作または整備，搬入時期
- 推進管の現場への搬入時期
- 推進作業の開始時期
- 各工程の前後の承認および確認，工法の変更などが生じた場合における工程の修正
- 日進量

4-2　品質管理

推進工法に使用する製品および材料は，所要の試験，検査を行い，仕様書にもとづき品質を確認する．とくに推進機，推進工法用管は推進してからの欠陥発見はトラブルの発生の原因になるので事前に十分な品質の確認が必要である．また推進管が所定の方向，勾配および高さになるように精度の管理も行う．

4-3　作業管理

施工計画書にもとづき切羽の土質，地下水の状況，推進管中心線の変位に留意し，切羽水圧，土圧，排土量，地表面の変動状況などの管理を行わなければならない．日常管理においては，たえずP・D・C・Aを廻し管理することが重要である．

⑤ 施工

5-1　立坑の施工

5-1-1　埋設物などの処置

埋設物管理者立会いのもと，試験掘りを行い事前に位置を目視で確認しておく必要がある．

支障となる地下埋設物や架空線は管理者と協議のうえ，移設または防護を行う．その際工期に与える影響も大きいので，十分考慮しておく必要がある．吊り防護や受け防護を行う場合は，管理者の指示により行わなければならない．

5-1-2　立坑の構築

掘削の際は，土質，周辺の状況，使用目的，および維持期間などを考慮し，十分堅固に構築しなければならない．

掘削の際は，ボーリングデータとの比較を行い，計画との差異がないかを確認する．

5-2　補助工法の施工

補助工法には，薬液注入工法，地下水位低下工法，噴射攪拌杭工法，圧気工法，凍結工法などがある．主要な工法は次のとおりである．

5-2-1　薬液注入工法

試験注入などを立坑で行うことにより，効果確認や詳細な情報が得ることができる．

材料は，水ガラス系に限られており，注入の際は，注入管理(注入材料，圧力，量)，地下埋設物

に対する管理(破損，損傷，薬液浸入など防止)，井戸・植物，農作物に対する管理，薬液材料の管理(薬液混入物の処理)に注意する必要がある．

5-2-2 地下水位低下工法

ウエルポイント工法は，実用的に揚程は6m程度とし，それ以上は，ディープウエル工法を検討する．適用土質は，砂礫からシルト層までであるが，集水パイプのまわりに十分な集水層(サンドフィルタ)が必要である．

本工法の採用にあたっては，観測点を設け地下水位の低下と近隣構造物，地下埋設物の変位などを定期的に観測する必要がある．

効果が現れるには，2～7日程度の期間を必要とするが，停電などにより機器が停止した場合に地下水位が非常に早く復元することがあるので事前の対策が必要である．

5-2-3 噴射攪拌杭工法

超高圧による改良材の噴射攪拌で固化体の造成を行うものであるため，地下水，農作物，植物，地下埋設物，周辺構造物などへの影響，スライムの法にもとづく処理に留意し，施工を行わなければならない．

5-3 防護工の施工

防護工は，軌道，河川護岸，橋脚・橋台など，地下埋設物などの既設構造物を直接・間接に仮受け，地盤改良による地盤の支持力増加，締切りなどの方法で保護，保全するために行われる．工事着手前，中，後の計測や監視を行い，必要があれば適切な処置を行わなければならない．

5-4 施工設備の点検

設備の機能を発揮できるように良好な状態を保つ必要がある．

5-4-1 刃口または掘進機および先導体

形状，寸法，ひずみの有無および掘進機，先導体は試運転を行い性能確認を十分行う必要がある．

5-4-2 推進設備

各々の設備の点検留意事項は次のとおりである．

(1) 推進用油圧機器

作動油の中にゴミが入らぬよう注意する．不純物が混入した作動油は速やかに交換する．

(2) 押輪，ストラット，当輪

事前にひずみや溶接箇所の割れの有無を点検する．

(3) 推進台

推進台は推進中に変位を生じることが多いので適宜点検する．

(4) 支圧壁

推進中変位が生じないように推進力に注意しながら監視を行い，恐れがある場合は，適切な処置を取らなければならない．

(5) 坑口設備

掘進中に地下水，滑材，泥水などが坑口から立坑内に流入することを防止する設備の機能を有しているか点検する．

5-4-3 運搬設備

トロバケット，流体輸送，ポンプ圧送あるいは吸引輸送などの坑内土砂搬出設備，クレーンおよび坑外土砂搬出設備の点検整備，日常点検を実施する．

5-4-4 注入設備

圧力計，注入管の整備を行う．

5-4-5 電力設備

電力設備は，電気設備に関する技術基準を定める省令にもとづいて設置および維持管理を行う．設置，保守管理上の注意事項は次のとおりである．

(1) 施工上の注意事項

① 取扱い者の限定
② 感電防止措置
③ 電線の整理および損傷防止

(2) 発電機を使用する場合の注意事項

使用する発電機の容量は接続される定常負荷と始動容量などを検討して決定する．使用に際しては，アースを十分必ずとる必要がある．

5-4-6 保安設備

換気設備，照明設備，連絡通信設備，交通保安設備のほか環境管理測定器，救護設備，各機器の防護設備，安全設備なども保守点検を行う．

5-5 発 進

5-5-1 支圧壁

支圧壁は，コンクリート製や鋼材などで構築され，土質の変化や管の蛇行などにより異常な推進力が加わっても，破壊や変形が生じないよう十分な強度が必要である．

5-5-2 推進台

立坑内の基礎の上に設計図書に示された高さ，勾配，水平方向に合わせて堅固に安定よく据え付けなければならない．

5-5-3 掘進機および先導体の試運転

掘進機および先導体は，工場における試運転状態と異なり，湿気の高い環境で使用されるため，発進前に次のポイントを十分に点検しておかなければならない．

① カッタ回転の確認
② 旋回ベアリング部の確認
③ 計器類の確認
④ 修正ジャッキの確認
⑤ 油圧ユニットおよび配管ラインなど
⑥ 泥水式の泥水還流設備，土圧式のスクリュコンベヤなど，泥濃式の排土関係設備など

5-5-4 坑口の地山の安定と鏡切り

鏡切りは，段階的に切羽部の地盤の安定を確認して行う．山留めのシートパイルなどが掘進機に当たらないように，またカッタチャンバ内に鉄片が入らないように十分確認する．

鏡面の崩壊など不測の事態に対し，いつでも刃口や掘進機および先導体を鏡面に押付け貫入できるように，元押ジャッキ，ストラットなどの準備をしておく．

5-5-5 発進坑口内への掘進機押込み

発進坑口内に密閉型の掘進機を押込むとき，掘進機の外周ビットにより，発進坑口のゴム板を切断する危険性がある．このため外周ビットの位置が真下に来ないようにするとともに，押込み時に外周ビット位置とゴム板の状態を確認しながら，坑口内に押込むようにする必要がある．

5-5-6 初期推進

初期段階は，掘進機および先導体先端部の下がりやローリングが発生しやすいため，掘進速度を落とし，慎重に運転しなければならない．

また，初期掘進時に段取替えなどで元押ジャッキを戻した際に掘進機および先導体前面の土圧および水圧により掘進機および先導体が後退することがある．これにより，地盤沈下や陥没を招くことがあるので注意が必要である．とくに土かぶりが大きく被圧水圧が高い場合には押戻されないような処置が必要である．

土圧式(泥土圧式)，泥濃式推進工法では本掘進開始前にカッタチャンバ内を良質な泥土あるいは高濃度の泥水で充満させなければならない．

5-5-7 停止時の切羽の安定

休日，段取替え，推進管の据付け時などには，切羽面を抑えたり，土砂流入，地下水の浸入防止などの処置をし，切羽面の安定を図らなければならない．

5-6 推進作業

推進工法においては，切羽崩壊による掘削作業の支障や地山の緩みによる陥没などを発生させないために切羽の安定を図ることが大切で，掘削は，原則として刃口推進の場合の先掘り，余掘りあるいは土砂の取込み過ぎをしてはならない．

5-6-1 地盤の変動とその防止対策

地盤の変動は，周辺に及ぼす影響が大きいので常に監視し，切羽土砂を適正に取込むことにより，これを防止するように努めなければならない．

地表面変状の発生現象と原因をまとめると**表-2**のようになる．

また，地下水の管内への流入や立坑での湧水があると地下水位の低下を招き，地盤沈下を生じる

表-2 地表面変状の発生現象と原因

	原因
先行隆起	・掘進管理土圧が高すぎる ・添加材の注入量が多すぎる ・掘削土砂の取込み量が少なすぎる
先行沈下	・掘進管理土圧が低すぎる ・カッタチャンバ内が非常に軟らかい泥土または多量の水で充満され，切羽が崩壊している ・掘削土砂の取込み量が多すぎる
後続隆起	・先行隆起の影響がそのまま残っている ・滑材の注入量が多すぎる
後続沈下	・先行沈下の影響がそのまま残っている ・掘削機によるオーバーカットに対し充満する滑材の注入量が少なすぎる

ことがある．変位の測定は，計画線上に方眼に組んだ測点を設けて掘進機および先導体通過直前，直後の水準測量を密に行う．また通過後も動向を調べるため引き続いて行う．

5-6-2　推進作業

推進作業においては，推進設備を常に良好な状態に整備し管理すること，推進管および支圧壁が損傷しないようにすること，また測量管理を行い，蛇行の防止を図ることが必要である．

5-6-3　管の接合

管の接合は，推進工事の中でも重要な作業であるので，次の順序で，各作業とも点検を実施しながら，確実に実施する．

① ゴム輪の点検
② 管の吊り下ろし
③ 接合用滑材の塗布
④ ケーブル・配管などの接続替え
⑤ 先行推進管と接続管の高さと方向の調整

表-3　各推進工法の管理計測項目

管理項目	設備装置	計測項目		計測単位	推進工法				
					刃口	密閉型	泥水式	泥土圧式	泥濃式
掘進管理	方向制御ジャッキ	ストローク(上・下，左・右)		mm	○				
	測量	センタ(水平)		mm	○	○	○	○	○
		レベル(垂直)		mm	○	○	○	○	○
	掘進機	カッタヘッドトルク		kN・m		○	○	○	○
		方向制御ジャッキストローク		mm		○	○	○	○
		測量	ピッチング	度		○	○	○	○
			ヨーイング	度		○	○	○	○
			ローリング	度		○	○	○	○
	元押ジャッキ	推進力		kN	○	○	○	○	○
		推進速度		mm/min	○	○	○	○	○
滑材裏込め	滑材・裏込め注入設備	注入圧		MPa	○	○	○	○	○
		注入量		ℓ/min	○	○	○	○	○
泥水管理	還流装置	切羽圧力		kN/m²			○		
		送水圧力		kN/m²			○		
		送排泥濃度		%(重量濃度)			○		
		送排泥流量		m³/min			○		
	泥水設備	泥水比重		—			○		
		泥水粘性		秒(ファンネル粘性)			○		
		ろ水量		mℓ			○		
		砂分濃度		%(体積濃度)			○		
土圧管理	排土装置	スクリュコンベヤトルク		kN・m				○	
		同上回転数		rpm				○	
		排土量		m³/min				○	
	掘進管理土圧			kN/m²				○	
	添加材注入設備	注入圧		MPa				○	
		注入量		ℓ/min				○	
	カッタチャンバ内土圧			kN/m²					○
	高濃度泥水注入設備	注入圧		MPa					○
		注入量		ℓ/min					○

⑥ 推進ジャッキによる管の接合の取付け

5-6-4　推進管理

各工法の推進管理項目を**表-3**に示す．

(1) 掘進機および密閉型先導体における留意事項

1) 粗石・巨石などを含む地盤

切羽の崩壊が生じやすいため，崩壊防止の補助工法として薬液注入工法，礫処理工法としてディスクカッタによる一次破砕，機内および後方での破砕・分離がある．土圧式(泥土圧式)では，その他にカッタスリット幅，スクリュコンベヤ口径を大きくしたり，リボンタイプのスクリュコンベヤの使用検討を行う．

2) 透水性の高い緩い地盤

泥水式において，地山に泥水が逸泥しやすく，泥水圧が有効に作用しない場合，切羽崩壊が生じやすい．送泥水の比重，粘性を高くし，逸泥防止材の使用も検討する．また掘削土量の計測監視を実施する．

3) 不透水性の粘性地盤

固い不溶解性の粘土地盤では，土がカッタビットやカッタヘッドに付着し掘進不能になることがある．カッタヘッドの開口率，カッタビッドの形状，配置などを粘土の付着しにくい構造にする．泥水式や泥濃式では，分散材(トリポリリン酸ソーダ)の混入などの処置を考慮する．

4) 泥土の性質

泥土は，常に適正な固さ，塑性流動性を保持した状態を保つ．調整は，添加材の注入量や配合で調節する．

5) カッタチャンバ内の閉塞防止

閉塞は，事前に次のような現象を伴い起きる．

- 排土量が徐々に減少し，土砂が摩擦により熱をもつ．
- カッタトルクが上昇する．
- カッタチャンバ内土圧が上昇する．
- 推進力が上昇する．

このような場合は，添加材を少し多めに注入する．改善されない場合は，ウォータジェットや圧縮空気の吹込みなどを講じる．

6) 小口径管推進工法の場合における留意点

- 圧入方式の第一工程では，軟らかい地盤に適用されるため，近接の既設構造物への影響に注意する．誘導管推進途中では，周囲から激しく締め付けられ推進力の急増で推進不能になることがあるので中断せず貫通させる．地下水位が高く，緩い砂質地盤ではカッタ回転を止めたときに土砂が流入し，取込み土量が過多になることがあるのでカッタスリットの開口率を調整する．
- オーガ式は高地下水位の場合，取込み土量に注意し，過多の場合は補助工法の併用が必要になる．粘性地盤では先導体ヘッド部に土が付着し，先端抵抗力が急増する場合は，注水し切羽部の土を軟弱にするか，カッタヘッド開口率の調整が必要である．
- ボーリング方式は，地下水位以下の砂質地盤では補助工法により地盤の安定処理を行い，取込み過多にならないように取込み土量管理を行う．

5-7　運搬作業

5-7-1　坑内運搬作業

坑内土砂搬出設備は，作業員の安全を確保しながら円滑な土砂搬出が行われるように常に点検整備を行う．

5-7-2　坑外運搬作業

坑外土砂搬出，管の小運搬，吊り下ろし，ストラットの入替えなどは，クレーンを用いる作業になるため，常に設備の点検整備を行い，その技能を有する者に行わせ安全の確保を図る．

5-7-3　推進管の取扱い(鉄筋コンクリート管)

運搬および保管の際は，管体の損傷，カラーの変形が生じないよう注意して行う．運搬および吊り下ろしの際は，ワイヤロープを管の外周に掛けるか専用吊り具を用いて行う．

5-7-4　推進管の取扱い(硬質塩化ビニル管)

軽量で取扱いが容易であるが，衝撃を与えるような乱雑な扱いをしてはならない．保管は直射日光を避け，熱気のこもらない，風通しの良い状態を保つ．積上げ段数は，呼び径150～300は5段以下，350以上は4段以下とする．吊り下ろしは

損傷を与えないようにナイロンスリングを外周に掛けて行う．管の接合の際は，水密性を保つためゴミなどの汚れを十分落とし行う．

5-8　測　量

測量は，管１本推進するごとに掘進機および先導体のピッチング，ローリング，ヨーイング，ジャッキストローク，中心線・水準測量の測定値，余掘り量などにより姿勢および現位置の確認をし，掘進している方向を把握する．そして，推進管が所定の方向，勾配および高さになっているかをたえず確認するために掘進機後方10m程度の各管両端部の中心線，水準測量を行い，10～20m程度推進するごとに全管を測定し，計画線との差異を確認する．また基準となる基準点(基線)，水準基標の点検は毎日行うことが望ましい．一般に推進速度が速い小口径管推進工法，曲線推進施工時には先導体，掘進機の姿勢を頻繁に確認する必要がある．また推進に伴う地表面の変位の把握は１日１回以上行う必要があり，方法は5-6-1項に記したとおりである．

5-9　注入工

5-9-1　滑材注入工

管周辺部に均等に滑材が注入されるように注入予定箇所に注入孔が向くように推進管を配置する．とくに周辺抵抗が大きい土質では，先導体に注入孔を設ける必要がある．注入は，推進中に推進力の推移を確認して一定量注入する．１日以上の長時間，推進を中断する場合は，追加注入を行う．

滑材は地山の土質にもっとも適したものを使用する．注入孔には逆止弁を取り付ける．注入圧力の上限は注入孔口で0.1MPa程度とする．長距離推進の場合は，滑材の地山への流出および劣化が起こりやすく，１次，２次注入を行う．

5-9-2　裏込め注入工(大中口径管推進工法)

裏込め注入材は，地山の土質条件にもっとも適したものを使用する．注入時期は，推進完了後すみやかに注入する．注入の方法は，注入孔より所定の圧力を保ちながら行い，圧力が高まり所定の圧力に達したとき，その圧力を保持する．圧力を高め過ぎて地表面や地下埋設物に影響を与えないように圧力の上限は普通0.2MPa以下とする．圧力の測定は，圧送に伴う圧力損失を考慮し注入孔の口元で行う．

5-10　目地工(大中口径管推進工法)

管の継手部は浸透水の防止などのために目地工を施す．

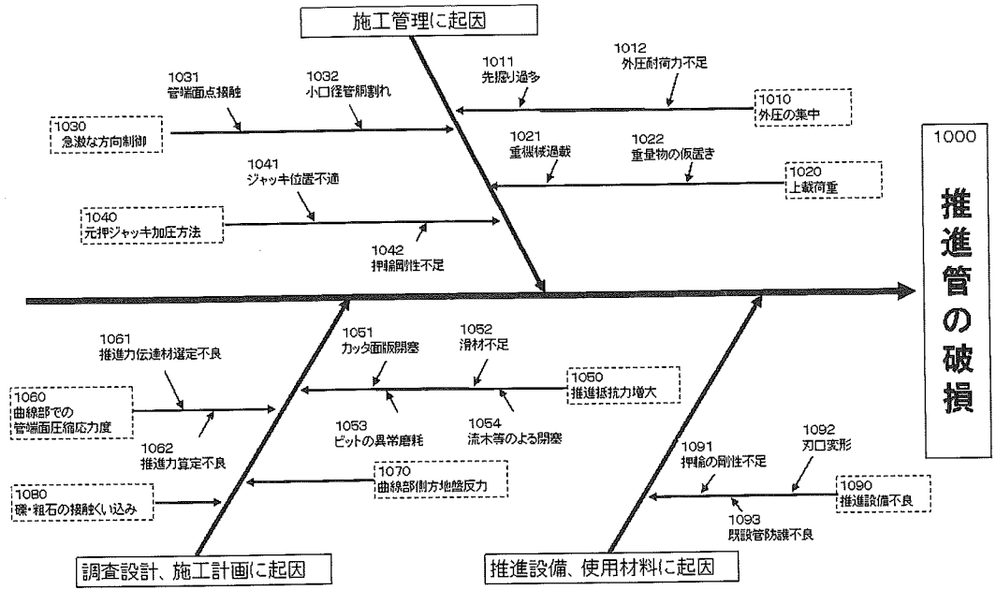


図-2　1000推進管の破損

⑥ トラブルと対策

推進工事における主なトラブルには次のようなものがある．

- 推進管の破損
- 地盤変位

表-4　推進管の破損の原因と対策

番号	名　称	工　法	状　況	原　因	対　策
1010	外圧の集中	刃口式	蛇行修正のための先掘りを行った場合	掘り残した地山が推進管の一部分に集中的に作用し，管の許容耐荷力を上回った場合	推進時先掘りを極力避ける． 管の外圧に対する耐荷力の事前検証
1020	上載荷重		土かぶりが小さい場合	重機類の通過，重量物の仮置きなどに推進管に予想以上の上載荷重増加	重機類などの載荷重に対しての事前検証 敷鉄板などによる荷重分散の検討・検証
1030	急激な方向制御	小口径管	急激な方向制御	管径に比べて管長が相対的に長いため管体に働く曲げモーメントの増大による胴割れ	常に適正な方向制御，徐々に緩やかな方向修正
1040	元押ジャッキの加圧方法	半管・大口径管使用	管径に比べ管長が短い場合	推進管の外面左右にせん断応力発生	剛性の高い押輪使用
		曲線施工	推進伝達材の位置とジャッキ位置が異なる場合	内面に引張応力発生しひび割れ	推進伝達材位置とジャッキ位置の一致させる
1050	推進抵抗力増加	密閉型	粘性土地盤での推進	カッタ面板へ付着し開口閉塞，掘削土取込み不足による先端抵抗力の増大	事前にカッタの開口率の大きな機械の選定
				管周辺の付着力増加，推進抵抗力(初動抵抗力)の増加	適切な時期の滑材注入により，摩擦抵抗力の増大防止
			砂礫地盤	滑材が地下水に希釈され，滑材効果がなく推進抵抗力増加	固結型滑材を使用して逸散防止
			粗石，巨石地盤	掘進機の外周切削ビットの異常摩耗で急激に推進抵抗力が増加し継続し更に増加で管の軸方向耐荷力超過	事前にビットの耐久性UP 事前にビット交換方法，位置の決定
			流木など出現する地盤	流木，木杭を切削後，カッタ面板が閉塞し，取込み不足発生で推進抵抗力の増大	事前に調査と事前除去 地盤改良で固定し，流木破砕可能ビット装着で破砕
1060	曲線部での管端面圧縮応力度	曲線施工	管の目地が開くことで管端部内側の限られた範囲で推進力を伝達	限られた範囲に生じた最大圧縮応力度が推進管のコンクリートの設計基準強度を超過	推進力伝達材の圧縮特性，厚さおよび貼付け位置を検討し推進管の許容圧縮応力度以内での推進
1070	曲線部側方地盤反力	曲線施工	推進力の分力により，地山側から大きな側方分力を受けた場合	推進力に比例して増加する側方反力が推進力の耐荷力を超えた場合	事前に管種の耐荷力と許容推進力の検証にもとづいた施工
1080	礫・粗石の接触，くい込み		礫・粗石混じり地盤で粗石が推進管と接触し，推進中に粗石と接触	前方に推され集中荷重が作用，回転しながらくい込み破損	事前に地山緩み防止の防護工の実施，固結型滑材注入，薬液注入による地盤改良，外圧強さの大きい特殊管の使用
1090	推進設備の不良		押輪の剛性不足，支圧壁の耐力不足	推進管の端部に偏荷重が作用	十分な剛性を有する押輪の使用，十分な耐力の支圧壁
		刃口式	刃口が外圧などにより変形	推進管に異常な土圧が加わる	十分な刃口強度の確認
			両発進立坑で施工済みの推進管の一部を反力受けとして利用する場合	推進反力が作用	直接反力が伝わらないように防護

表-5　推進管の破損に対する措置

番号	破損した場所	工　法	措置方法	内　容
1	発進立坑内		取替え	破損の程度に拘らず取替え
2	地中に押し込まれた状態	大中口径管推進	補修	破損が小さい場合，損傷部分を除去し，合成樹脂接着材と樹脂モルタルで補修
			押し出し	推進施工が可能な場合，十分な滑材注入を行い，推進力の低減を図り，推進を続行し，破損した推進管を到達立坑まで押し出し新しい推進管と入れ替える
			立坑掘削	推進施工が不可能になった場合，破損した管の位置に立坑を掘削し，破損した管を取り壊し，後続管を押し当て再開する
			迎え掘り	推進施工が不可能になり前記の措置が取れない場合，停止位置から到達立坑までの距離が短い場合，掘進機より外径より大きい管を刃口式推進工法で被せ掘進機，破損管を回収後，鋼管内に推進管を押込む
		小口径管推進	押し出し	推進施工が可能な場合，十分な滑材注入を行い，推進力の低減を図り，推進を続行し，破損した推進管を到達立坑まで押し出し新しい推進管と入れ替える
			引き抜き	先導体の引き抜きが可能な場合，引き抜いた空洞部を充填し，引き抜き，新しい管と交換し再開する
			立坑掘削	押し出し，引き抜きが不可能の場合，破損した管を取り壊し，後続管を押し当て再開する
			迎え掘り	到達立坑から発進できる場合，刃口式推進工法または鋼製さや管ボーリング方式で推進し，先導体から破損した管まで被せ，破損管を撤去するか，到達立坑まで押し出す

・支圧壁の変位，破損
・発進坑口の破損
・掘進機，推進設備の破損など
・推進精度不良(蛇行)
・浸水，出水
・その他のトラブル

要因は，①調査設計および施工計画，②推進設備および使用材料，③施工管理に起因するものに分類することができる．ここでは例として「推進管の破損」の特性要因図と原因と対策および処置について**図-2，表-4**に示す．

6-1　トラブルの原因究明と対策手順

トラブルは，一つ発生すると連鎖的に他のトラブルが発生することが多いので細心の注意が必要であり，発生したときは，初期の段階で次の方法で原因の究明と対策を確実に実施する必要がある．

（1）　事実の確認
・発生直前までの経過(一事象一項目)
・発生後の経過，処置(一事象一項目)
・その他の事実(一事象一項目)

（2）　問題点の発見と原因分析
・特性要因図を作成して分析
施工管理に起因(行動・状態・管理)，調査設計・施工計画に起因，推進設備・使用材料に起因に分けて分析し，問題点を把握する．

（3）　対策の樹立
5W1Hで具体的に実施対策を決める．

⑦　おわりに

以上，推進工法の施工の流れと留意点について概要をまとめた．施工は，いままで進めてきた計画の調査，路線計画，工法選定，詳細設計など一連の流れの最終段階で具現化した構築物を造ることであり，完成させた構築物が，長い期間運用に供される始まりとなる重要な作業である．

このように重要なことを無事竣工させるには，工事着手前に必ず設計段階での種々前提条件を確認し，綿密な施工計画をたて，極力不明点をなくし工事を開始することが必要であり，各段階でP・D・C・Aの反復により施工管理を行うことが重要と考える．

(文責：林　進造・(元)りんかい日産建設(株))

参考文献

1) 日本下水道管渠推進技術協会：推進工法講座Ⅱ．

社団法人 日本トンネル技術協会 会報

1. 会員の現状

	2月29日現在
正　会　員	1,544名
団体会員	361名
個人会員	1,183名

2. 委員会の開催状況（2月1日～29日）

①運営広報関係委員会

◎総務委員会

広報小委員会会誌WG(2/8)
大島洋志主査ほか9名，3月号の会誌と3か月計画を検討

企画運営幹事会(2/16)
小松秀樹幹事長ほか10名，法人移行および決算予算等を検討

総務委員会(2/24)
宮林秀次委員長ほか6名，決算見込みと予算および移行方針を検討

◎国際委員会

海外文献小委員会海外文献WG(2/20)
大久保誠介主査ほか18名，海外文献を翻訳

海外文献小委員会対外広報WG(2/24)
早坂治敏主査ほか5名，和文・英文原稿を検討ほか

海外文献小委員会海外ニュースWG(2/28)
早坂治敏主査ほか8名，海外ニュースを翻訳

ITA統括WG(2/29)
石田積主査ほか7名，ITAバンコク総会対応を検討

◎事業委員会

40周年記念事業準備会(2/17)
久多羅木吉治主査ほか7名，計画方針を検討

計　8回開催　76名出席

②調査研究関係委員会

◎技術委員会

都市トンネル小委員会(2/6)
岡野敏彦委員長ほか19名，調査検討課題を検討

安全環境小委員会(2/9)
豊澤康男委員長ほか17名，平成23年度以降作業方針を検討

山岳工法小委員会支保WG(2/14)
深沢成年主査ほか20名，海外文献調査結果および国内アンケート調査結果を検討

◎受託研究特別委員会

掘削土砂処理特別委員会切羽安定WG(2/6)
中村俊明主査ほか6名，取りまとめ方針を検討

掘削土砂処理特別委員会土砂運搬WG(2/7)
滝本邦彦主査ほか6名，取りまとめ方針を検討

掘削土砂処理特別委員会土砂運搬WG(2/7)
河本武士主査ほか5名，取りまとめ方針を検討

掘削土砂処理特別委員会土砂改良処理WG(2/29)
滝本邦彦主査ほか5名，報告書原稿を検討

効率的掘削工法特別委員会高速施工WG(2/13)
領家邦泰主査ほか8名，報告書原稿を検討

効率的掘削工法特別委員会補助ベンチWG(2/14)
鈴木雅行主査ほか10名，報告書原稿を検討

効率的掘削工法特別委員会覆工養生WG(2/21)
西村和夫主査ほか7名，報告書とりまとめ方針を検討

相鉄・JR・東急直通線検討委員会開削駅検討WG(2/29)
館山勝主査ほか29名，躯体構築に伴う地下水の影響および開削・非開削区間の検討

八甲田トンネル技術委員会(2/2, 3)
福士憲一委員長ほか17名，土捨場の浸出水データを検討

北海道新幹線(本州方)委員会機械化施工WG(2/22)
小山幸則委員長ほか40名，施工の検討

計　13回開催　202名出席

合計　21回開催　278名出席

3. 国際会議の開催予定

会議名	開催日	場所	主催者等
第38回ITA総会およびコングレス 「Tunnelling and Underground Space for a Global Society」	2012. 5. 18～24	バンコク(タイ)	International Tunnelling and Underground Space Association (国際トンネル協会) Thailand Underground & Tunnelling Group http://www.wtc2012.com/
第39回ITA総会およびコングレス 「Underground －the way to future－」	2013. 5. 10～17	ジュネーブ (スイス)	International Tunnelling and Underground Space Association (国際トンネル協会) Swiss Tunnelling Society http://www.wtc2013.ch/
第40回ITA総会およびコングレス 「Tunnels for Better Living」	2014. 5. 9～15	サンパウロ (ブラジル)	International Tunnelling and Underground Space Association (国際トンネル協会) Brazilian Tunnelling Committie

＊国際会議の開催予定に関する詳細は事務局(担当：関)までお問い合わせください．(社)日本トンネル技術協会　TEL：03-3524-1755

4. 平成23年度催物開催現況

催物名	開催日	人数	場所	CPD取得単位
(現場研修会)				
舞鶴若狭自動車道トンネル建設工事現場研修会	2011. 7.29	26	福井県	2.8
小田急下北沢地区複々線化工事建設現場研修会	2011.10. 7	16	東京都	2.0
横浜環状北線シールドトンネル工事現場研修会	2011.11. 4	36	神奈川県	2.0
大師線連続立体交差事業(地下化)工事建設現場研修会	2011.11.28	29	東京都	2.0
第二東名高速道路トンネル工事現場研修会	2012. 2.10	23	愛知県	2.5
九州新幹線(西九州)トンネル現場研修会	2012. 2.28	27	長崎県	3.7
東京地下鉄有楽町線立体交差事業建設現場研修会	2012. 3.14	30	東京都	2.0
(施工体験発表会)				
第68回(山岳)「様々な課題克服に取り組んだ山岳トンネル工事」	2011.10.13	126	東京都	5.1
第69回(都市)「都市トンネル工事におけるコスト縮減・工期短縮の施工事例」	2011.10.14	74	東京都	4.6
(講演，講習会)				
山岳トンネルのインバートに関する講習会	2011. 6.15	86	東京都	3.5
第13回トンネル技術ステップアップ研修会(シールド部門)	2011. 9.29,30	23	東京都	17.3
第14回トンネル技術ステップアップ研修会(山岳部門)	2011.12.14,15	24	東京都	9.3
山岳トンネルの地質に関する講演会	2012. 1.24	109	東京都	2.0

催物の案内は逐次協会のホームページに掲載いたしますので閲覧くださいますようご案内します．一般検索サイトで〈トンネル技術協会　国内催物〉，あるいは，〈http://www.japan-tunnel.org/event_japan〉の入力で辿りつけます．

会員の皆様へ

4月は，転勤など異動の多い時期です．会誌の送付先などの変更が生じた場合は速やかにご連絡くださいますようお願いいたします．変更手続きの様式が協会のホームページ(http://www.japan-tunnel.org/kaiin_paper)に掲載されていますのでご利用ください．

【本会協賛の催物紹介】

第13回岩の力学国内シンポジウム(併催：第6回日韓ジョイントシンポジウム)のご案内

共催：岩の力学連合会，土木学会(幹事学会)，地盤工学会，資源・素材学会，日本材料学会

岩の力学国内シンポジウムは，1964年以来，3～4年に1度，岩の力学連合会と組織4学会によって開催されています．今回は日韓ジョイントシンポジウムと併催するとともに，東日本大震災の発生を受け，今一度基本に返ることを考え「原点回帰―岩盤力学のさらなる発展のために」をテーマとして，国内だけでなくアジアの研究者や学生とともに，今後の研究・技術・人の交流の方向性を模索することを企画しています．また，このシンポジウムとしては初めての沖縄開催であり，地域の特色を生かしたシンポジウムを目指します．どうか多数の皆様の講演応募とご参加をお願いいたします．

―記―

日　　時：2013年1月9日(水)～11日(金)
(11日は現場見学会：沖縄やんばる海水揚水発電所見学を予定)
会　　場：沖縄コンベンションセンター(沖縄県宜野湾市)
講演募集：岩の力学および岩の工学分野における特色ある研究，提案，技術開発，事例報告などに関して幅広く受け付けます．講演募集の詳細はホームページ(http://www.rocknet-japan.org/jsrm2013/)において公表しますのでご覧ください．
講演概要申し込み期限：2012年5月11日(金)
講演原稿提出期限：2012年8月24日(金)
問い合わせ先：公益社団法人　地盤工学会内　一般社団法人岩の力学連合会　事務局　冨田
〒112-0011 東京都文京区千石4-38-2　TEL：03-3946-8671　FAX：03-3946-8678
E-mail: jsrm2013@rocknet-japan.org

【本会後援の催物紹介】

トンネル技術講演会のご案内

主催：(財)災害科学研究所・同トンネル調査研究会

このたび，災害科学研究所・同トンネル調査研究会による「トンネル技術講演会」を開催することとなりました．山岳トンネルの調査と施工に関するテーマについての講演を企画いたしましたので，皆さまのご参加をお待ちしております．

―記―

日　　時：2012年4月9日(月)　14：00～17：00(受付開始13：30)
場　　所：大阪大学中之島センター7階セミナー室(大阪市北区中之島4-3-53)
プログラム：
14：00～14：10　開会の挨拶　災害科学研究所理事長　トンネル調査研究会委員長　松井　保
14：10～15：10　講演「トンネル変状，災害の力学的メカニズム」　京都大学大学院教授　朝倉　俊弘
15：10～15：55　講演「掘削用発破を用いた屈折法による切羽前方探査の試み」
応用地質(株)関西支社専門職　山内　政也
15：55～16：05　休憩
16：05～17：00　講演「比抵抗モニタリングによるトンネル周辺地盤の性状変化の把握」
韓国 地質科学・鉱物資源研究所室長　朴　三奎
(Korea Institute of Geoscience & Mineral Resouces)
17：00　閉会
参　加　費：2,000円(資料代を含む)　※当日支払い
そ　の　他：都合により講師やテーマに変更のある場合があります．
参加申し込み：下記連絡先へ，FAXまたは電子メールにて，所属・氏名・TELをご連絡ください．
(申し込み締切3月30日，定員100名先着順)
連　絡　先：(財)災害科学研究所・同トンネル調査研究会 宛　TEL：06-6202-5602　FAX：06-6202-5603
E-mail：saiken@f2.dion.ne.jp

5月号予告[5月1日発売予定]

新東名高速道路(御殿場～三ヶ日間)開通記念号

●新東名高速道路トンネルの建設を省みて
●新東名高速道路(御殿場～三ヶ日間)の建設経緯と路線概要
●大断面トンネルの建設技術
●大断面トンネルの計画・調査
●大断面トンネルの設計・施工
●大断面トンネルの新技術・新工法
●安全・安心・快適なトンネル施設
●随想
●開通区間の主なトンネル
【連載講座】
●トンネル技術者のための地相入門(1)

＊内容等は変更になる場合がございます

編集後記

本号で弊誌も500号を迎えることができました．これもひとえに読者のみなさまからのご愛顧の賜物と存じます．誌面より厚く御礼申し上げますとともに，今後とも変わらずお引き立てのほどをよろしくお願いいたします．

さて，来月も特集号です．上記のように，「新東名高速道路」を特集いたします．いままで，下道から，完成区間の2主鈑桁やストラット付きPC桁の陰影の深い張り出しや伸びやかなスパンを見上げては，美観と経済性を兼ね備えた現代的な構造美に感心し，いっぽうで，茂みに覆われた山地の中腹を走る高架橋の橋脚基部に目を向けると，大口径深礎杭の施工にあたって採用された竹割り型土留め壁によって良好に保全された自然と構造物が共存して織りなす景観に目を奪われます．トンネルは下道からはその良さがなかなか見てとることができないので，開通したあかつきには，トンネルも含めた高規格な走行感を，味わえると思うと楽しみです．

(K.K)

★購読の申し込み，または，送付先変更などの問い合わせは(株)土木工学社までご連絡ください．
★(社)日本トンネル技術協会会員の方の住所(送付先)変更は直接(社)日本トンネル技術協会へご連絡ください．

トンネルと地下
第43巻 第4号〔通巻500号〕
ISSN 0285-631X
Tonneru to chika
平成24年3月20日　印刷
平成24年4月1日　発行

社団法人日本トンネル技術協会
会長　佐藤　信彦
〒104-0045　東京都中央区築地2丁目11番26号(築地MKビル6階)
TEL：03-3524-1755
FAX：03-5148-3655
http://www.japan-tunnel.org
発行所　株式会社土木工学社
〒162-0832　東京都新宿区岩戸町16番地メイジャー神楽坂
TEL：03-3267-2888
FAX：03-3267-2807
http://www.tunnel.ne.jp
発行人　山本 育徳
編集人　山本 勝誉
印　刷　新協印刷株式会社

本誌の購読について

■購読をご希望の方は，書店または土木工学社へ直接お申し込みください．
■お申し込みの際は，誌名，購読期間，住所，所属，氏名などを明記のうえ，FAX(03-3267-2807)にてお申し込みください．後日，小社より振込用紙をお送りいたします．

購読料
1冊　1,575円(送料108円)
　　(本体価格　1,500円)
1年　15,000円(前納)
振替　00110-8-190072

本誌広告のお申し込み方法

本誌への広告掲載は小社「トンネルと地下」営業部までご連絡ください．
TEL：03-3267-2888

本誌掲載記事を無断で複写(コピー)および転載することは，著作権上での例外を除き，禁じられております．本誌から複写または転載を希望される方は，小社(03-3267-2888)までご連絡ください．



図書案内

株式会社 土木工学社

山岳トンネル設計の考え方



今田　徹　著
3,200円＋税　B5判

地山の力学状態を表す理論式から導かれる地山挙動の特徴を図表などを用いて手際よく説明した．トンネル掘削における工学的な理解を深化させる一冊．

わかりやすいトンネルの発破技術



山田隆昭　監修
1,500円＋税　B5判

火薬類や発破技術の基礎的な知識から最新の技術まで幅広く取り上げ，また，火薬類を使用するうえで避けては通れない振動や騒音などの環境対策についても詳しく解説．

多様化するシールド掘進技術



シールド工法技術協会　監修
2,500円＋税　B5判

近年に開発，実用化された29工法を整理，体系化するとともに，各工法の境界，システム・考え方の違い，適用での留意点などをわかりやすく説明した．

推進工法の理論と実際



マックス・シェルレ　著，野田典宏　訳，
中本　至・石橋信利・金成英夫　監修
8,500円＋税　B5判

推進工法の理論を，多くの挿図を用い解説した．日本の現在の推進工法の基本となった原著を斯界の権威が翻訳・監修．

わかりやすい土木地質学



大島洋志　監修
2,500円＋税　B5判

土木工事にかかわりのある地質学の基礎知識を盛り込み，土木工事において問題となる地質事象や，各種地質調査の原理についてわかりやすい解説を与えた．

セグメントの新技術



小泉　淳　監修
2,000円＋税　B5判

1990年代から急速に機能が拡大したシールド用セグメント34種を掲載．セグメントの設計・施工の際に利用しやすいよう各々の特徴を整理して掲載した．

続 きみの庭にも温泉が出る



石井康夫・俣野恭寛　共著
1,200円＋税　新書判

温泉開発における一般論から探査技術についてまとめ，今後の温泉開発の考え方を，外国の事例も交えながらわかりやすくまとめた．

建設工事の保安地質学〔改訂版〕



石井康夫　著
6,000円＋税　A5判

建設技術者に必要な地質・岩石・岩盤などの基礎知識と酸欠・有害ガス・ガス爆発・湧水などの建設災害について，著者の経験を交えながらまとめた．

地質工学概論



菊地宏吉　著
4,757円＋税　B5判

土木構造物や岩盤構造物の計画・調査から設計・施工において必要と地質や岩盤に関する情報を得るために必要な理論および技術を平易に解説した．

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
4,660円＋税　B5判

シールド工法について変遷から将来の開発の動向にいたるまで広範にわたり掲載した．シールドトンネルの計画・設計・施工に用いるときに参照しやすくまとめた．

地下水の科学Ⅰ～Ⅲ（全3巻）



P.A.ドミニコ・F.W.シュワルツ　共著，
地下水の科学研究会・大西有三　監訳

地球という複雑なシステムを循環する水，とくに地下水循環を考え，汚染地下水など環境問題を地下水理学の立場から取り扱うため，水の物理的・科学的性質，地球の状況，水資源としての地下水の状況，地下水の水理学的特性とその調査方法などをわかりやすく解説した．

第Ⅰ巻　地下水の物理と化学
4,078円＋税　B5判
第Ⅱ巻　地下水環境学
4,272円＋税　B5判
第Ⅲ巻　地下水と地質
3,689円＋税　B5判

わかりやすいトンネルの力学



福島啓一　著
5,825円＋税　B5判

トンネルを掘るときに，どのような力学的な問題が生じるかについて，わかりやすく解説した．トンネル工学の理論と実際が統一されることを願って記された一冊．

ブロック理論と岩盤工学への応用



R.E.グッドマン・G.H.シー　共著，
吉中龍之進・大西有三　共訳
4,855円＋税　A5判

岩盤内に分布する不連続面と，掘削面など自由面の間の三次元的幾何学的関係から安定に影響する岩塊を見出す新手法を解説．

山岳トンネルの新技術



ジェオフロンテ研究会　編
14,573円＋税　B5判

NATMによるトンネルを施工する際の基本事項を概説するとともに，1990年頃までに実用化された各種工法・補助工法について理論から施工のポイントを掲載した．

ジオテキスタイル設計マニュアル



T. A. Haliburton・J. D. Lawmaker・
V. C. McGuffer　共著，
田中　茂・山岡一三・廣田泰久　共訳
8,000円＋税　A5判

ジオテキスタイルの交通施設への利用について詳述された1981年の報告書を完訳．

岩盤地下空洞の設計と施工



E.フック・E.T.ブラウン　共著，
小野寺透・吉中龍之進・斉藤正忠・
北川　隆　共訳
9,800円＋税　B5判

岩盤内に地下空洞の設計を行うための地盤工学上の基本的事項について詳述した．

建設工事の地質診断と処方



石井康夫・矢嶋壯吉　共著
4,300円＋税　A5判

地質の基礎知識を説明して，調査・試験方法とその判断と評価について解説を加え，地すべり・斜面崩壊・山岳・都市トンネル・ダムなどの地質診断の要点を解説．

トンネル工事の衛生と環境保全



臼谷三郎・橋本康孝・友田　孝　共著
3,200円＋税　A5判

トンネル工事の際の労働衛生と環境保全の検討に有用な項目について，医学分野の知見から職業性疾病や有害環境条件，健康障害，衛生管理，保護具などを解説した．

岩盤の計測と解析



鈴木　光　著
4,200円＋税　A5判

地質や地盤の事前調査と測定，工事中の施工管理計測，さらには，地盤や構造物の変形や応力分布に関する予測解析などの計測法と解析法を解説した．

わかりやすいトンネル技術入門〈都市トンネル編〉



橋本定雄・松本崇義・松本正敏　共著
2,800円＋税　A5判

都市の代表的な地下施設である地下鉄，上水道，下水道の各トンネルについて，それぞれの主だった工法ごとに計画から施工まで実例をまじえてわかりやすく解説した．

海洋資源開発



稲田善紀　著
3,400円＋税　A5判

海洋の石油・天然ガス・石炭などのエネルギー資源と，マンガンノジュールの鉱物資源，また，海洋エネルギーなどの開発と利用についてまとめた．

トンネルと地下



1,500円＋税　B5判　月刊(毎月1日発売)

日本で唯一のトンネルと地下構造物の専門月刊誌．研究，調査・設計から施工にいたるまで，その時点での技術的問題点を中心に，業界の動向などをあわせて網羅しながら，新鮮な情報を提供する．

書籍のお申し込み

ご注文は当社へFAXまたは，書店にてお申し込みください．FAXでご注文の際は，書名，部数，送り先，氏名，電話番号を明記のうえ下記までお送りください．

(株)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
TEL: 03 3267 2888　Fax: 03 3267 2807

覆エコンクリート湿潤養生システム

パラソル３０ミスト工法

1．一週間湿潤状態を保ち乾燥収縮によるひび割れを抑制
2．パラソル内でミストを噴出するため坑内の視界が良い
3．天井部から吊っているためレール敷設が無く移動が簡単
4．超細霧のため効率的な養生が出来て路盤の泥濘化を防止



特許出願中

SUGA スガキカイ 菅機械工業株式会社
URL http://www.suga-kikai.co.jp

本社・大阪支店	〒550-0015	大阪府大阪市西区南堀江3-9-27	TEL 06(6541)7931
東京支店	〒101-0042	東京都千代田区神田東松下町12番地	TEL 03(5296)0551
福岡支店	〒812-0013	福岡県福岡市博多区博多駅東1-16-8	TEL 092(431)7181
名古屋営業所	〒455-0008	愛知県名古屋市港区九番町3-37	TEL 052(653)2491
京都営業所	〒615-0022	京都府京都市右京区西院平町25	TEL 075(314)4460

本製品は特許出願中の技術であり、弊社はその特許出願について製品の実施権許諾を受けております

そろそろ夏の対策を考えてみませんか？
快適環境を応援します！



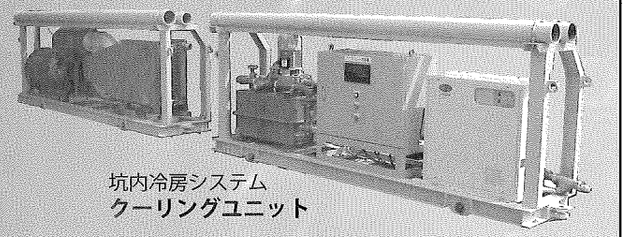
冷房除湿も暖房も可能
モービルエアコン



大風量ミストファン
FA-COOL



山岳トンネル用 坑内冷房装置
トンネルクーラー



坑内冷房システム
クーリングユニット

さまざまな冷房ニーズにお応えします。

- 地下工事、建築工事、除湿冷房、環境改善
- 大型テントなどイベント会場、海の家など仮設冷房
- 大型店舗、工場、倉庫の夏場ピーク冷房
- ホール・体育館の冷房、オフィスビル故障時対応
- 船舶キャビン、大型船槽、タンク内冷房
- ブラスト、塗装の品質向上、除湿、防錆
- 電力ケーブル洞道、変電所点検時冷房
- 農事園芸ハウス温度のピークカット冷房
- 空港整備ハンガー内、スポット冷房、機内冷房

※その他幅広くお客様のニーズに合わせた冷房の設計・ご提案をさせて頂きます。

おかげさまで 35 Years ANNIVERSARY
最適環境を創造する
株式会社 流機エンジニアリング
〒108-0073 東京都港区三田 3-4-2 COI 聖坂ビル
TEL：03-3452-7400
URL：http://www.ryuki.com/
E-mail：eigyobu@ryuki.com