

シールドトンネルにおける地盤の挙動と土質力学

シールドトンネル工法は、1936年関門トンネルで本格採用されて以降、周辺地盤に影響をほとんど与えない工法として長年、都市部のインフラ整備に用いられてきました。その間、実務適用数とともに技術も発展し、泥水式シールド工法、土圧式シールド工法や異形断面など多くの形式・形態が開発されてきました。近年は、都市部インフラの地下化が進み、さまざまな分野においてシールドトンネル工法が活躍する機会が増えましたが、従来では考えられないような厳しい条件下で施工することが増えてきております。

そのような難工事化してきたシールドトンネルにおいて切羽の安定保持は、周辺地盤への影響を最小化できる安定したトンネル掘削の基本とされており、すなわち切羽の安定が保持されたうえで、切羽土圧が周辺地盤に有效地に作用し、掘削土量が適切に管理されることで安定した地盤の応力変形挙動の制御が可能となります。

本特集号では、さまざまな分野におけるシールドトンネルの工事実績と研究成果を要約し、シールドトンネルにおける地盤の挙動に関する諸問題の最新の検討状況について土質力学を鍵としてとりまとめました。各分野の第一線で活躍される方々に執筆していただきました内容が、大深度・高水圧対応、安全性確保、効率性向上など、要求事項と技術的難度が高まるシールドトンネル工事に関わる技術者・研究者と、地盤工学に関わる広い読者に有益な情報になることを期待しております。

(渡邊 陽介、小島 悠揮、小山 彰、藤名 瑞耀、森藤 遥平、吉川 高広、昆 周作)

総説	シールドトンネルにおける地盤掘削プロセスの土質力学 赤木 寛一	1
報告	シールドトンネル掘削における地盤挙動の数値解析と土質力学 小宮 一仁	5
報告	地下鉄シールドトンネルにおける地盤挙動と土質力学 小西 真治／伊藤 聰／岡ノ谷 圭亮	11
報告	地下高速道路シールドトンネルにおける地盤挙動と土質力学 土橋 浩／遠藤 啓一郎	16
報告	鉄道シールドトンネルにおける掘進管理と影響予測の取組み 焼田 真司／仲山 貴司	21
報告	電力シールドトンネルにおける地盤挙動と土質力学 岡 滋晃／伊藤 喜広	25

報告	泥水式シールド工事における地盤挙動と土質力学 中川 雅由	30
報告	土圧式シールド工事における切羽安定と地盤挙動 松原 健太	36
報告	気泡シールド掘削プロセス管理における土質力学 安井 利彰／赤木 寛一	42
<hr/>		
学会の動き	令和6年度地盤工学会の表彰に関する報告 北田 奈緒子	48
	地盤工学会技術業績賞を受賞して 大規模な自然災害を考慮した防潮堤の設置(女川原子力発電所 防潮堤かさ上げ工事) 尾形 芳博／尾崎 充弘／瀬戸 謙一郎／田村 廣丈／岡 史浩／戸田 孝史 ／岡本 道孝	65
	地盤工学会技術業績賞を受賞して 受入土量の変更に対応した大規模土砂処分場のフレキシブルな埋立技術の開発 鈴木 賢治／西ノ園 憲人／山口 圭治／梶木 薫／森 晴夫／加藤 亮輔 ／片桐 雅明	67
	地盤工学会技術開発賞を受賞して 頭部固定式二重土留め工法の開発 永谷 英基／井上 直史／坂梨 利男／渡邊 洋介／重松 慶樹／那須 郁香 ／西岡 英俊／菊池 喜昭	70
	地盤工学会論文賞（和文部門）を受賞して 固相内拡散を考慮した固液間物質移動モデルに関する実験的検討 奈佐原 寅太郎／肴倉 宏史／加藤 智大／高井 敦史／勝見 武	72
	地盤工学会論文賞（和文部門）を受賞して SCP工法による締固め改良地盤の微視構造変化に関するX線CT模型実験 江副 哲／梅田 洋彰／原田 健二／佐藤 宇絃／大谷 順	74
	地盤工学会論文賞（和文部門）を受賞して 風化に対する切土法面の管理優先度の決定方法 永田 政司／村上 豊和／佐藤 尚弘／菊本 統	77

地盤工学会論文賞（英文部門）を受賞して

79

Linking inherent anisotropy with liquefaction phenomena of granular materials by means of DEM analysis

大坪 正英／Sanjei Chitravel／桑野 玲子／Kevin Hanley／京川 裕之／古関 潤一

地盤工学会論文賞（英文部門）を受賞して

81

Centrifuge modeling of scale effect on hydraulic gradient of backward erosion piping in uniform aquifer under river levees

岡村 未対／露口 祐輔／泉 典洋／前田 健一

地盤工学会研究奨励賞を受賞して

83

Multi-physics numerical analyses for predicting the alterations in permeability and reactive transport behavior within single rock fractures depending on temperature, stress, and fluid pH conditions

緒方 奨

地盤工学会研究奨励賞を受賞して

85

Suffusion in densely compacted Satozuka pumice sand and its impact on static loading undrained shear strength and dilation behaviour

Sarmah Rupali

地盤工学会研究奨励賞を受賞して

87

Sheet-coating mitigation for membrane penetration in undrained triaxial tests and evaluation of comprehensive liquefaction resistance of crushed gravel

笹岡 里衣

国内外の動き 小林正樹博士のご逝去を悼む

89

元理事、名誉会員、小林ソフト化研究所所長（元運輸省港湾空港技術研究所長）

土田 孝

講座 地盤災害の現地調査

第4回 洪水・地震による河川堤防被災の調査

91

川尻 峻三／石原 雅規／新清 晃

(担当 園田 悠介)

会告

地盤工学会活動支援 酒金のお礼

102

(公社) 地盤工学会

「令和7年度地盤工学会賞」候補募集要項

104

(公社) 地盤工学会

「令和7年度地盤工学貢献賞」候補募集要項

107

(公社) 地盤工学会

公募中の特集記事および今後の特集・講座の予定

公益社団法人 地盤工学会 「地盤工学会誌」編集委員会

公募中の特集記事

発刊号	テーマ（仮題）	公募締切り
	(現在公募中は無し)	

公募中の特集記事の詳細ならびに新規公募の最新情報は、https://www.jiban.or.jp/?page_id=12274 をご覧ください。

今後の特集の予定

発刊年月	テーマ（仮題）	公募の有無
2025年8月号	山岳トンネルの耐震設計およびその施工事例	無
2025年9月号	循環型社会と地盤工学（仮）	無
2025年10月号	農業水利施設の維持管理（仮）	無
2025年11月号	第60回地盤工学研究発表会	無
2025年12月号	海洋・港湾の地盤工学の新展開（仮題）	未定

※以降は未定。括弧内はテーマ（予定）の分類名を示す。

2026年1月号	(調査技術・実験法)	未定
2026年2月号	(地盤の工学的問題の解析)	未定
2026年3月号	(地盤防災)	未定
2026年4月号	(建設プロジェクト)	未定
2026年5月号	(教育・技術継承)	未定
2026年6月号	(その他（他分野、支部、委員会など）)	未定
2026年7月号	(地盤材料物性・地盤拳動)	未定

今後の講座の予定

発刊年月	テーマ（仮題）
2025年4月号～2025年9月号	地盤災害の現地調査
2025年10月号～2026年3月号	悩めるフレッシャーズのための地盤工学（仮）
2026年4月号～2026年9月号	物理探査技術の基礎と応用（仮）

新入会員（5月理事会承認）

正会員

上野 圭祐	応用地質(株)	反田 亨	(株)日水コン
九石公道	国土防災技術(株)	藤田 義成	ヒロセ補強土(株)
大坪俊介	国土防災技術(株)	林 正道	国土交通省中国地方整備局
渡邊哲朗	(株)キタック	PIPATPONGSA THIRAPONG	陽明交通大学
浅香康弘	鹿島建設(株)	鈴木 聰恵	新潟大学
高橋 充	東亜建設工業(株)	嶋田 理那	早稲田大学
佐田谷 典郎	日鉄エンジニアリング(株)	小島 隆平	(株)構造計画研究所
相原大介	(株)アースリサーチ	菅原 和弥	中央開発(株)
杉森健作	JFE エンジニアリング(株)	田邊 陸	名古屋工業大学
森永貴之	大成建設(株)	渡邊亮太	名古屋工業大学
鈴木知晃	(株)アーク情報システム	芦田 梨沙子	名古屋工業大学
相原一貴	レイズネクスト(株)	林 涼	名古屋工業大学
東 龍道	ライト工業(株)	水口 恭吾	名古屋工業大学
秋山尚之	アース・リサーチ(有)	木俣 千晴	(株)日本構造橋梁研究所
福田靖浩	(株)データ・ユニオン	原岡 志帆	関西大学
中溝大機	早稲田大学	野口 新之助	関西電力(株)
千ヶ崎 健司	M&K コンサルタンツ(株)	井上 峻	神戸大学
和田克人	自営業	矢野 未悠	佐賀大学

国際会員

マイケル サポン 北海道大学

特別会員（）:所属支部

4級 (一財)北海道道路管理技術センター	(北海道)	4級 関西大学 デザイン地盤工学研究室	(関西)
4級 東亜グラウト工業(株) 改良グループ	(関東)		

会員現在数（令和7年4月末現在）

名誉会員： 201名（国際会員100名含む） 正会員： 6,926名（国際会員850名含む）

特別会員： 915団体（国際会員57団体含む） 合計 8,042名・団体

会費（年額）

正会員： 9,600円 国際会員（特別もしくは正会員に限る）： 2,000円

特別会員： 特級 300,000円 1級 240,000円 2級 160,000円 3級 100,000円 4級 60,000円

複写をされる方へ

地盤工学会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、同協会より許諾を受けて下さい。

権利委託先：一般社団法人 学術著作権協会 <https://www.jaacc.org/>

但し（公社）日本複製権センター（同協会より権利を再委託）と包括複写許諾契約を締結されている企業等法人による社内利用目的の複写はその必要はありません（社外頒布用の許諾が必要です）。なお、複写以外の許諾（著作権の引用、転載、翻訳等）に関しては、同協会に委託しておりません。直接、地盤工学会へご連絡下さい。

		令和7年度 役員					
会長	渦岡 良介 (総務部)	副会長	野田 利弘	川村 志麻	平永 佐知子		
理事	(事業企画戦略室) (会員・支部部) (国際部) (公益出版部) (調査・研究部) (理事・基準部)	笠間 清伸 石井 裕泰 竹内 秀克 西村 聰 畠 俊郎 山川 優樹 小濱 英司	山田 勉	藤澤 和謙			
			左近 利秋	佐藤 真吾			
			藤井 幸泰				
			パンダリ ネトラ プラカシュ				
監事	肴倉 宏史	川井田 実	倉重 毅				

		令和7年度 公益出版部会					
理事・部長	畠 俊郎	副会長	平永 佐知子				
理事	藤井 幸泰						
部員	井上 玄己 高井 敦史	岩竹 要 田村 修次	岩波 基 肥後 陽介	笠間 清伸 松田 圭大	河井 正	菊本 統	

令和7年度 「地盤工学会誌」編集委員会									
委員長	石井 裕泰	菊本 統							
副委員長	澤田 昌孝								
一般記事グループ	主査委員	藤原 覚太 阿部 栄一 中村 公一	梅木 健太郎 夏坂 亮太	御廻敷 公平	北岡 貴文	崔 瑛	辻 良祐		
第1グループ	主査委員	石黒 直紀 太田 遥子	倉澤 智樹	黒田 卓也	小林 昌弘	高梨 諒	豊田 智大		
第2グループ	主査委員	富田 直幹 東野 圭悟	佐藤 武斗	里見 知昭	重松 慶樹	寺本 俊太郎	山本 淳史		
第3グループ	主査委員	神山 憐 井上 波彦	Ganiev Jakhongirbek		佐々木 克祥	珠玖 隆行	半澤 孝樹		
第4グループ	主査委員	吉川 富雄 大石 雅人	昆 周作	田中 諒	藤名 瑞耀	森藤 遥平	渡邊 陽介		
講座グループ	主査委員兼幹事	中村 圭太 澤田 昌孝	加村 晃良 伊藤 大知	梅原 由貴	片山 遥平	木戸 隆之祐	熊田 健太		
	委員	安達 夏紀 酒本 真先	園田 悠介	張 聰悦	富田 佑一	森崎 孔太			

2025年7月1日発行	地盤工学会誌 2025年7月号 Vol.73, No.6 通巻810号	無断転載を禁ずる
編集	「地盤工学会誌」編集委員会	PDF作成 (有)FAST PLANNING
発行所	公益社団法人 地盤工学会 〒112-0011 東京都文京区千石4丁目38番2号	https://www.jiban.or.jp/
ISSN	1882-7276	定価 1,760円 (本体価格1,600円)

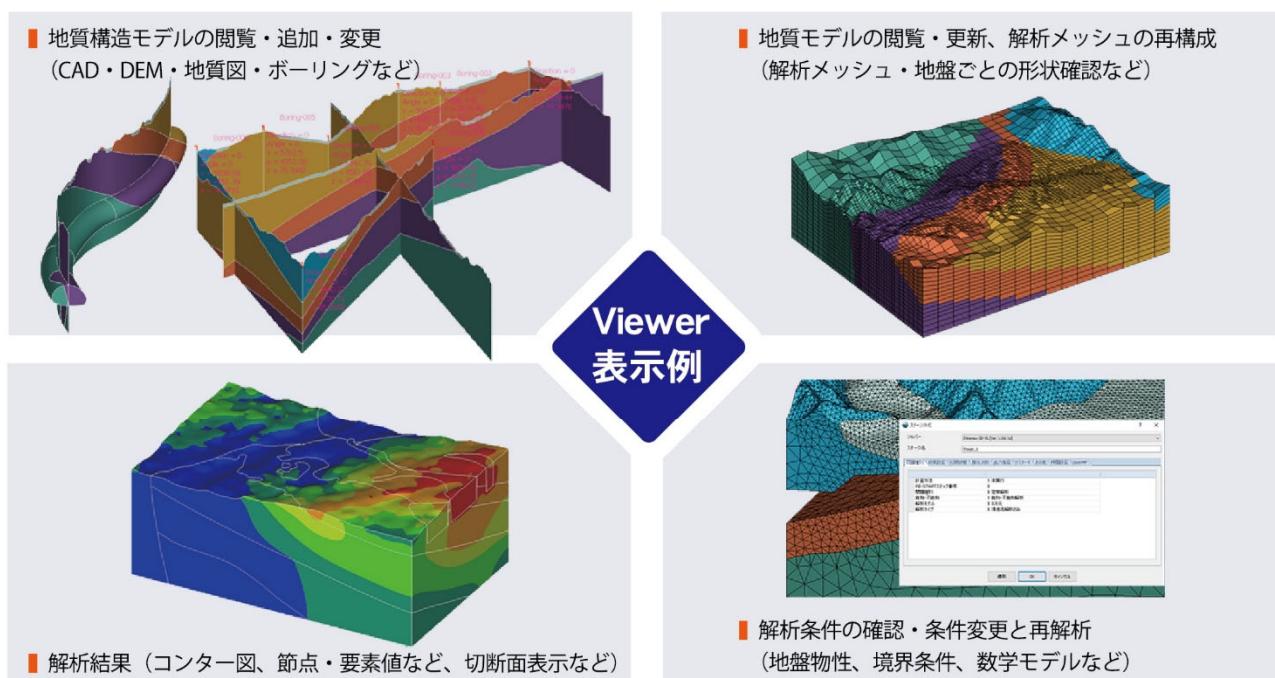
見る、伝える、やり直す、数値解析結果の新しい活用法

～Viewerで共有・Geo-Graphia3で再解析～

土木設計・施工の現場では、解析結果が「見てわかる」「伝えて納得できる」ものであることが求められます。Geo-Graphia3による地質構造モデルの作成と数値解析、さらにViewerを用いた可視化・共有により、説明や判断を支える確かな裏付けとして活用いただけます。



① 受託解析のご依頼はもちろん、自社での継続利用に向けたソフトウェア導入のご相談も承ります。



第60回地盤工学研究発表会・技術展示コーナー参加・2025/7/22(火)～24(木)



(株)地震工学研究所と共同出展 ● 3次元地質モデリング・メッシュ生成ソフトウェア Geo-Graphia3 の紹介とデモほか ● 受託解析に関するご相談を承ります ● お気軽にお立ち寄りください



株式会社 地層科学研究所

本社 神奈川県大和市大和東3-1-6 JMビル4F TEL.046-200-2281
東京事務所 東京都文京区後楽2-3-25 金子ビル6F TEL 03-5842-7677
大阪事務所 大阪市淀川区西中島5-7-9 第7新大阪ビル301号 TEL.06-6886-7774

数値解析ソフトウェアの開発 ● 販売／受託解析

<https://www.geolab.jp>
gyoumu@geolab.jp

広告目次

株式会社 地層科学研究所 viii

電子版「地盤工学会誌」企業・団体広告のご案内

2020年4月より学会誌を完全電子化し、会員のアクセス性・利便性の向上を図り、電子版に対応したコンテンツや速報性を高めた記事などの充実に努めています。

新しくなりました電子版学会誌においても、企業・団体広告を是非、ご活用ください。

- 各号学会誌の目次に設けた完全カラーの広告スペースをご提供致します。
- 学会誌は個人会員および特別会員（法人会員）に配布し、一般向けに個別販売も行います。また、広告を含めた目次ページは、学会ホームページに掲載し、会員以外の方々にも広くご覧いただけるようになります。
- 掲載サイズとして、1/3, 1/2, 全面スペースから選択いただけます（下記イメージ参照）。
- あわせて学会ホームページポータル、学会誌電子版掲示画面のバナー掲示も承っています（ただし学会の法人会員（特別会員）にご入会いただくことが前提となります）。

掲載枠	サイズ	料金	備考
電子版「地盤工学会誌」 目次ページ内	1頁	110,000円	
	1/2頁	55,000円	
	1/3頁	38,500円	
学会誌掲載 Web ページ内バナー (会員限定利用サイト)	180×70 ピクセル	55,000円	特別会員限定

【ご案内 Web ページ】 https://www.jiban.or.jp/?page_id=12555

公益社団法人 地盤工学会 学会誌担当

〒112-0011 東京都文京区千石4丁目38番2号

電話 : 03-3946-8677 FAX : 03-3946-8678 E-mail : k-haishin@jiban.or.jp

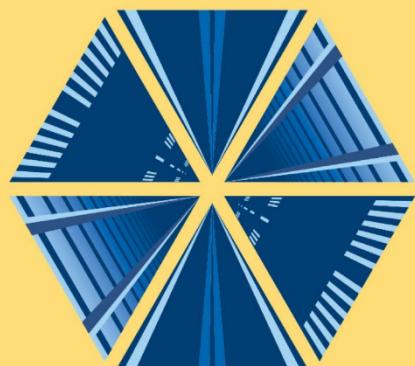
公益社団法人 地盤工学会 新刊本のご紹介

地盤工学会が発行する最新の書籍をご案内!!

ご購入は地盤工学会のショッピングカート(<https://www.jgs-shopping.net/>)をご利用ください。

入門シリーズ**40**

交通地盤工学入門



公益社団法人 地盤工学会

入門シリーズ 40 交通地盤工学入門

定 価 3,800 円（税抜）
送 料 800 円（税抜）

A5 判 302 頁
2025 年 3 月 27 日発行
ISBN 978-4-88644-441-7

本書は、交通インフラ実務に携わる技術者の方はもちろんのこと、道路・鉄道などに
関して初学者の方も含めた幅広い方々に向けた内容となっており、交通地盤工学の概論
から、交通インフラ（道路、空港、鉄道）の設計・解析・試験・調査・施工・維持管理
の技術向上に地盤工学が果たす役割と貢献について、実務への応用を念頭に詳しく解説
しております。

目次

第 1 章 交通地盤工学とは	第 5 章 道路舗装の設計施工・維持管理
第 2 章 交通インフラのための地盤工学	第 6 章 空港舗装の設計施工・維持管理
第 3 章 舗装の設計	第 7 章 鉄道線路の設計施工・維持管理
第 4 章 表層材料、路盤・路床材料	第 8 章 交通地盤工学の今後の可能性

総説

シールドトンネルにおける地盤掘削プロセスの土質力学

Soil mechanics-based excavation process during shield tunnelling

赤木 寛一 (あかき ひろかず)

早稲田大学 名誉教授

e-mail: akagi@waseda.jp

キーワード：シールドトンネル，掘削プロセス，地盤沈下，土質力学

1. はじめに

シールドトンネル工法は 19 世紀前半にイギリス、テムズトンネル掘削に適用された後に、日本では 1964 年に大阪市営地下鉄中央線で、日本初の複線シールドトンネルが採用された。その後は、日本の高度成長期にあわせた社会資本整備を目的として地下に各種の都市施設を収容するために、膨大なシールドトンネルが建設され、その技術水準は世界的にみて指導的な立場にあるといえる。しかしながら、近年都市部におけるシールドトンネルの地盤条件、施工条件が厳しくなるにつれて、シールドトンネル工事で地上に達するような陥没が観察される事例が見られている。

筆者は、従来のシールドトンネルは比較的浅い深度でそのトンネル横断面積の小さいものが大半であったので、多数のシールド工事で積み重ねられた施工経験に基づく設計、施工管理でその安全性が技術的に十分カバーしてきたと考えている。

これに対して、近年のシールドトンネルは、従来経験のない地盤条件や地表面からの深さが 50 m を上回る大深度を対象とする場合が増えている。また、トンネル直径が 15 m を超える大断面で断面上部と下部での水圧、土圧を含めた圧力差が、トンネルの安全な施工のポイントである掘削部先端の切羽面の安定に重大な影響を与える状況となっている。

このような難しい地盤条件、施工条件におけるシールドトンネルの設計、施工にあたって、地盤技術者は従来にもましてその技術の根本となる土質力学に基づく技術判断が求められている。このような考え方をもとに、筆者らは土木学会トンネル工学委員会における 2026 年度をめざしたトンネル標準示方書の改訂にあ

わせて、「(仮) 土質力学に基づくシールドトンネル掘削プロセス管理」と題するトンネルライブラリー発刊に向けて執筆を進めている。

地盤工学会誌における本特集号「シールドトンネルにおける地盤の挙動と土質力学」は、上記のトンネルライブラリーの執筆者を中心としたメンバーで、シールドトンネルにおける地盤挙動の特徴と考え方を土質力学の立場から豊富な現場事例、解析事例をはじめて解説を試みたものである。

2. ペック教授の教え

来年 6 月には、国際地盤工学会 (ISSMGE) の 4 年に一度の一大イベントである第 21 回国際地盤工学会議 (ICSMGE) がオーストリアのウィーンで開催が予定されている。この会議では、土質試験、模型実験、地下掘削などの各専門分野におけるその時点でのエキスペートが各分野の技術 (Art) に関する現況報告を行う State of the Art Report (技術現況報告) が恒例である。

今から 56 年前の 1969 年にメキシコで開催された第 7 回 ICSMFEにおいてペック教授 (図-1) の行った地



Peck

<https://peck.geoengineer.org/about/biography>

図-1 ペック教授

下掘削分野の技術現況報告、「Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground」(軟弱地盤における深い開削とトンネル掘削)はこの分野におけるバイブルと目されているものである¹⁾。地下掘削分野の日本を含む世界各国の専門家へのアンケートデータに基づくペック教授のレポートは、当時の技術水準を網羅したものであり、AI万能の現代の技術者にとっても是非ご一読をお勧めしたい名著である。

ペック教授は、日本では星埜和先生の和訳版で有名なテルツアーギ、ペックの教科書「Soil Mechanics in Engineering Practice」(土木工学実務における土質力学)の著者の一人である。奇しくもペック教授は、この技術現況報告の冒頭で、良好なトンネル掘削における要求性能について土質力学の応用技術としての観点から考察を加えることを高らかに宣言されている。この点が、筆者がペック教授のこの技術現況報告を土質力学に基づくトンネル掘削プロセス管理におけるペック教授の教えと呼んでいるゆえんである。

第1章で述べたようにシールドトンネル工法は、この技術現況報告の行われた1969年当時はトンネル切羽が大気圧または圧気圧に開放された「開放型シールド工法」が支配的で、日本で先駆的に泥水式シールド工法や土圧式シールド工法の「密閉型シールド工法」の開発が進められようとしていた頃である。したがって、技術現況報告の内容的には密閉型シールド工法が主体の現在から見ると、なじみが薄い工法、用語が多く、また英文語彙的にも理解が難しい部分もある。とはいえてトンネル切羽の安定、掘削に伴う地盤損失やトンネル覆工設計に関する事象を土質力学の応用技術として解説された内容は示唆に富むものといえる。

ペック教授は、良好なトンネル掘削における三つの要求性能項目を挙げている。1つ目は、トンネルが施工可能であること、すなわち地下トンネル空洞の健全性をトンネル覆工により保った状態で掘進可能とする性能項目である。具体的には、この性能は地下トンネル空洞先端の切羽面を破壊させないで安定を保持することを意味している。

この性能は、次に示すように掘削対象地盤の地盤種別、地盤種別に応じたトンネル切羽面の自立時間と切羽面の大きさに応じて決まることがある。

1) Firm ground (硬質地盤)

切羽は、即時的な支保なしで手掘りや機械で数フィート以上掘削可能である。硬質粘土、固結した粘性を持つ粒状土で構成される。

2) Raveling ground (ゆるみ崩壊性地盤)

切羽面内の土は、時間的にゆるみが生じてトンネル坑内に崩壊するが、初期段階で支保すると安定化する。わずかに粘性を有する砂、見かけの粘着力を有するシルトや細砂、母岩に起因する構造を有する残積土で構成される。

3) Running ground (崩壊性地盤)

切羽面内の土は、無支保状態でトンネル坑内に崩壊堆積するが安息角を持つ斜面を形成すると安定化する。乾燥砂、細粒分を含まないゆるい礫で構成される。

4) Flowing ground (流動性地盤)

ゆるみ崩壊性地盤や崩壊性地盤で切羽面に浸透水圧が作用すると、切羽面内の土は懸濁流体となってトンネル坑内に流入して不安定化する。

5) Squeezing soils (押し出し性地盤)

切羽面内の土の押し出し速度が小さい場合には手掘り掘削が可能であるが、押し出し速度が大きい場合にはシールド掘削が必要である。極めて軟弱な粘土や中程度の粘性を有する土で構成される。

これらからわかるように、トンネル切羽面の安定には地下水圧の制御が重要であることが明らかである。

2つ目の要求性能項目は、トンネル掘削に伴う地盤内の応力状態の変化に伴う土の体積変化を含むひずみや変位に基づいて、過大な地表面の沈下すなわち地盤損失が生じて地表面付近の施設に損傷を及ぼさないことがある。この性能についても、次の4種類の地盤種別に応じて地盤損失、地盤沈下などの変状の実測結果をもとに考察が加えられている。

1) 粘着力を持たない粒状土地盤

地盤損失や地盤沈下に関する実測データが提供されているのは、密度の大きい締まった砂地盤なので全般に極めて小さな地盤損失、地盤沈下量となっている。

2) 粘着力を有する粒状土地盤

このような地盤では、単一トンネル掘削に伴う地盤損失や地盤沈下は切羽地盤の流動がなければ無視しうるものである。

3) 脫離性のない硬質固結粘土地盤

このような地盤では手掘り掘削トンネルが一般的であり、地盤損失や地盤沈下量はトンネル断面の大きさ、施工手順に依存するが極めて小さい。

4) 軟弱粘土から硬質粘土で構成される飽和地盤

このような地盤のトンネル掘削に伴う地盤損失や地盤沈下量の大きさは、前述の粘着力を有する粒状土地盤の場合の数倍になっている。

以上より、トンネル掘削に伴う地盤損失や地盤沈下量を支配するのは、トンネル周辺地盤の土の応力変化に伴う体積変化を含むひずみや変位量であることが理解できる。

3つ目の要求性能項目は、良好なトンネルはその供用期間を通して想定されるすべての影響下で地下トンネル空間を保持しうることである。具体的には、トンネル覆工はトンネルと周辺の地盤の間に作用する土圧のみならず、近傍の駆や換気孔の存在や近接施工による影響を支保する性能が必要である。

このようなトンネル覆工の合理的な設計にあたっては、トンネル周辺地盤の土の特性、トンネルの幾何学形状、施工法、施工細目や施工速度を含む多くの要因を考慮する必要がある。

以上のような良好なトンネル掘削のための要求性能に関するペック教授の教えを要約すると、1つ目のトンネル切羽の安定性を支配する性能、2つ目のトンネル掘削に伴う過剰な地盤損失や地盤沈下を生じさせない性能、3つ目の健全な覆工設計のもととなる性能はすべて地盤種別、土の特性に基づく土質力学的理解が鍵となることが明らかである。

3. トンネル切羽安定と掘削土量管理の土質力学

3.1 トンネル切羽安定の土質力学

第2章で述べたようにトンネル切羽の安定性を支配する鍵は切羽面における地下水制御なので、近年一般的な泥水式シールドや土圧式シールドのような密閉型シールドにおける切羽面における安定性保持条件は以下のようないくつかの項目に集約することができる。

1) 切羽面における適切な遮水性の保持に係る条件

泥水式シールドの場合には、チャンバー内泥水によ

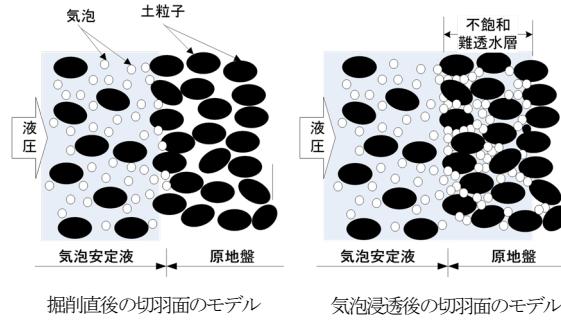


図-2 気泡安定液の難透水層の形成

る切羽面における遮水性を支配する泥膜や切羽地盤内における泥水浸透領域の形成である。土圧式シールドの場合には、チャンバー内土砂に添加剤を加えた安定液浸透による切羽地盤内における難透水層の形成が重要である。

2) 泥水と安定液の適切な密度と流動性に係る条件

泥水式シールドの場合には、チャンバー内泥水密度とその流動性による切羽面に形成された泥膜や泥水浸透領域を介した切羽面に対する適切な泥水圧のむらのない作用である。土圧式シールドの場合には、チャンバー内土砂に添加剤を加えた安定液密度とその流動性による切羽地盤内に形成された難透水層を介した適切な安定液圧の有効な作用が重要である。

特に、土圧式シールドにおいて添加剤として界面活性剤を発泡させた気泡安定液の場合の難透水層の形成機構の模式図は、図-2のように示すことができる²⁾。

さらに、気泡安定液を用いる場合には、下記の2項目について考慮する必要がある。

3) 気泡安定液の分離に係る条件

気泡安定液はチャンバー内土砂に水と気泡を加えた懸濁液なので、含水量や気泡の添加量が多くなると土粒子が溶媒内で自重により沈降して分離が生じる。気泡安定液が分離すると、チャンバー内上部に圧縮性の大きい気泡が浮上集積して切羽面に有効な安定液圧が作用しないのみならず、地下水がチャンバー内に切羽地盤内土砂とともに流入して切羽の崩壊が発生する。

この気泡安定液の分離現象は、チャンバー内土砂の粒度分布の変化に着目することで土質力学の観点から定量的に判断することができる。

4) 気泡安定液の消泡に係る条件

掘削対象地盤が例えれば土丹と呼ばれる自然含水比の

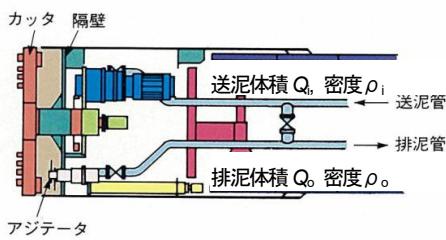


図-3 泥水式シールドの送排泥機構

小さい硬質な粘土地盤の場合には、気泡安定液に含まれる水分が硬質粘土に吸着されて気泡が消泡する現象が発生する。気泡が消泡すると気泡安定液の流動性は著しく損なわれて、切羽面に適切な安定液圧を効果的に作用することが不可能になる結果、切羽面の崩壊を招くことになる。

この気泡安定液の消泡現象は、チャンバー内土砂に含まれる細粒分の液性限界や塑性限界のコンシステンシー特性と気泡安定液の含水比をもとにして土質力学の観点から定量的に判定することができる。

3.2 トンネル掘削土量管理の土質力学

第2章で述べたトンネル掘削に伴う過剰な地盤損失や地盤沈下を生じさせない性能は、トンネル掘削土量の管理と密接に関係している。

切羽面が大気圧や圧気圧に開放されている開放型シールドの場合には掘削土量の管理は極めて困難であるので、ペック教授の技術現況報告の中でも触れられていない。しかしながら、切羽面が隔壁によって密閉された密閉型シールドの場合には切羽面での掘削から排土に至るプロセスがある程度閉じた系を構成しているので、物理学の質量保存則に着目して考察するが合理的である。

一例として、図-3に示す泥水式シールドの送排泥機構に着目した質量保存則に基づく掘削土量管理の考え方次のように示すことができる。

図-3に示す排泥の乾燥質量 m_o は水の密度を ρ_w とすると、

$$m_o = Q_o(\rho_o - \rho_w) \quad (1)$$

一方、送泥の乾燥質量 m_i は、

$$m_i = Q_i(\rho_i - \rho_w) \quad (2)$$

このとき、切羽掘削土の乾燥質量 m_s は質量保存則により、

$$m_s = m_o - m_i = Q_o(\rho_o - \rho_w) - Q_i(\rho_i - \rho_w) \quad (3)$$

であり、これは通常乾砂量と呼ばれる量を質量表示したものである。

これに対して、トンネル施工計画上想定される、いわゆる理論掘削土の乾燥質量 M_s は湿潤体積 V_0 と湿潤質量 M_0 と現場の土質調査結果から求めた湿潤密度 ρ_0 と含水比 w_0 （%）を用いて、次のように求めることができる。

$$M_s = \frac{M_0}{1 + \left(\frac{w_0}{100}\right)} = \frac{\rho_0 V_0}{1 + \left(\frac{w_0}{100}\right)} \quad (4)$$

なお、理論掘削土の湿潤体積 V_0 は、シールド掘削断面積 A_0 と掘削長さ L_0 を用いて次式で求められる。

$$V_0 = A_0 \times L_0 \quad (5)$$

したがって、掘削土の乾燥質量に基づく排土率 R_0 （%）は次式のようになる。

$$R_0 = \frac{m_s}{M_s} \times 100(\%) \quad (6)$$

トンネル掘削土量の管理にあたっては、この排土率 R_0 を100（%）とすることが土質力学の観点から考えて合理的である。

4.まとめ

本稿では、特集号「シールドトンネルにおける地盤の挙動と土質力学」の導入として、その趣旨を述べるとともに、その基礎となるペック教授の教えを詳細にレビューしてシールドトンネル掘削プロセスにおける土質力学の重要性を述べた。さらに、具体的なアプローチとして、土質力学の観点からシールドトンネル切羽の安定条件と質量保存則に基づく掘削土量管理の重要性を要約した。

参考文献

- 1) Ralf, B. P.: Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, Proc. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, ISSMFE, pp. 225-290, 1969.
- 2) 近藤義正・伸山貴司・赤木寛一：掘削土砂に気泡と水を添加した地盤掘削用安定液の開発と適用、土木学会論文集 C, Vol. 64 No. 3, pp. 505-518, 2008.

（原稿受理 2025.4.20）

シールドトンネル掘削における地盤挙動の数値解析と土質力学

Soil mechanics in numerical analysis of ground behaviour during shield tunnel excavation

小宮 一仁 (こみや かずひと)

千葉工業大学 工学部 教授

e-mail: komiya@p.chibakoudai.jp

キーワード：シールドトンネル，掘削，地盤，数値解析，有限要素法，変位，応力，間隙水圧

1. まえがき

本稿では、シールドトンネル掘削における地盤挙動の数値解析について、主に、掘削要素を用いた有限要素法解析（以下では、掘削解析という）を取り上げ、いくつかの解析の例を示す。更に、掘削解析によって明らかになった、地盤挙動に与えるさまざまな影響要因を考慮できる簡便な有限要素法解析モデルを示し、施工時に現場において数値解析によって地盤挙動を逐次予測し、その予測を施工時のオペレーションに役立てる方法について考察する。

本稿では、土や地盤を連続体と仮定する。厳密にいえば、固体である土粒子と液体である水（間隙水）と気体である空気（間隙空気）の混合体である土は連続体ではなく、土を連続体として取り扱うことは是非については、さまざまな意見があることは事実である。しかし、本稿では、例えば、物理学者の Jacques Duran (デュラン) の著書¹⁾にある「ほとんどの土質力学のエンジニアは、粉粒体物質を連続体と見なす傾向があり、それを均質な地質の固体に適用されるような通常の古典力学の法則（摩擦や応力・歪みの塑性変形など）に従うものとして取り扱う。この方向性には深刻な問題を引き起こす場合がある。しかし、実際的な観点からは利点がある。即ち、十分な安全係数を取りさえすれば、これを用いた単純な計算から、道路のような粉粒体物質でできたさまざまな構造物の振る舞いを、一般に予想できるのである。」と同じ立場をとる。なお、筆者らは²⁾、Duran の著書以前に、土質力学が取り扱う内容を一貫して微分・積分を用いて説明し、この立場を明確に示している。

また、本稿では、連続体力学に基づく力学場の保存

則と構成則の連立微分方程式の近似解を数値的に得る方法の一つである、有限要素法³⁾を用いた数値解析のみを取り上げる。連続体力学に基づく有限要素法解析において、混合体としての土の挙動を合理的にモデル化したものとして、飽和地盤を対象とした土～水連成解析法がある。飽和地盤の力学挙動を表す土質力学モデルは、初め Terzaghi⁴⁾ (テルツァーギ) によって提案された。Terzaghi の理論が土要素の連続条件から過剰間隙水圧を未知数にもつ支配方程式を導いているのに対し、Biot⁵⁾ (ビオ) は変位と過剰間隙水圧を未知数にもつ微小な土要素のつり合い式および要素の体積変化と排水量の関係を表す連続条件式を導き、二相混合体の多次元圧密理論を展開した。この土粒子骨格と間隙水の相互作用を含む力学挙動を表現する Biot が導いた支配方程式を、有限要素法を用いて解析し、未知量としての土粒子骨格の変形と間隙水圧を求める方法が、Sandhu (サンドゥ) と Wilson⁶⁾ (ウィルソン), Christian (クリスチャン) と Boehmer⁷⁾ (ベーマー) によって提案されている。節点における未知量として得られた土粒子骨格の変位および間隙水圧をさらに時間的に離散化する有限要素法解析法を提案した Sandhu らの方法は数学的に高度に完成されたものであるが、一方で係数行列内に土粒子骨格の剛性と間隙水の浸透性が混在しているために、外力載荷直後の非排水解析時には係数行列の対角線上に 0 項が多く出現し精度の良い解を得るのが困難であるという欠点を有している⁸⁾。一方、間隙水圧を要素の重心点で評価する Christian らの方法は Sandhu らの方法に比べて未知量としての間隙水圧の計算の精度はやや劣るが、載荷直後の非排水解析が容易であり、シールドトンネル掘削のように何段階も

載荷が繰り返される問題には適していると考えられる。本稿で取り上げる有限要素法解析において、間隙水圧の挙動を扱った数値解析では Christian らの方法を用いている。

2. 掘削要素を用いたシールドトンネル掘削の有限要素法解析

シールドトンネル工事に伴い発生する地盤の変形挙動を有限要素法を用いた数値解析によって予測しようとする試みは、昔から盛んに行われていた。それらの解析の多くは、シールドトンネル工事をトンネル横断面方向あるいは縦断面方向の平面ひずみ問題・軸対称問題として取り扱い、工事に伴う周辺地盤の変形に影響を及ぼすさまざまな要因を節点外力や節点変位でモデル化して解析を行うものである。これらの要因には、シールド機切羽面における押さえ圧力と土圧の差、シールド機切羽面の切削による応力解放、シールド機周面とそれに接する地盤との間の摩擦、テールボイドの発生による応力解放および裏込め注入圧の負荷等がある。

シールド機切羽面における押さえ圧力と土圧の差が地盤の挙動に及ぼす影響に関する解析の例は多くみられ、それらの大部分は橋本・高見ら⁹⁾研究に代表されるようにシールド機切羽面に作用する土圧や切羽の押さえ圧力を等価な節点力に置き換えて地盤の変形解析を行い、シールド機接近時の地盤の先行隆起や先行沈下を解析したものである（図-1 参照）。テールボイドの発生、裏込め注入時の応力解放および地盤の押し抜けに伴う地盤変形を等価節点力を用いて解析した例には森ら⁹⁾がある。その他の要因に伴う解析も、多くが等価節点力を用いる方法で行われており、シールド機切羽面の切削現象¹¹⁾、シールド機の掘進に伴う地盤の変形状況¹²⁾、シールド機周面とそれに接する地山との摩擦現象¹³⁾等に関する解析がある。これらは、掘削以前の地盤の状態を初期条件として個別の要因に基づく解析を行っているものである。シールドトンネル工事の施工過程を考慮した解析の例としては、太田・勝又ら¹⁴⁾や亀村・桑田¹⁵⁾が切羽面における土圧のつり合いとテールボイド発生に伴う地盤の応力解放と裏込め注入の両者を等価節点力に置き換えて地盤の経時的

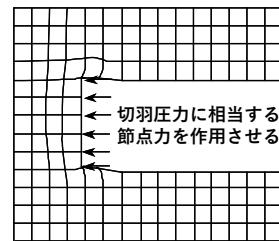


図-1 従来の解析方法のイメージ

な変形解析を行っている。これらの解析は、シールドトンネル工事に伴い発生する地盤の変形挙動の予測のために多くの成果をあげているが、シールドトンネル工事の施工状況を再現するには至っていない。

実際のシールドトンネル工事では、シールド機の接近・通過過程において地盤の応力状態やひずみ状態は経時的に変化する。また、シールド機の姿勢の変化の影響とシールド機の周面摩擦の影響がそうであるように、複数の要因が同時に地盤に影響を及ぼす場合が多く存在する。さらに、シールドトンネル施工時の地盤変形に加えて、シールドトンネル施工後長期間にわたって発生する後続沈下等の地盤変形の大部分が、シールド機通過時に生じる地盤の変形や応力状態・ひずみ状態の変化に起因していると考えられる。したがって、シールドトンネル施工過程を考慮した解析を行い、シールド機の接近・通過に伴う地盤の応力状態・ひずみ状態の変化を精度よく定量的に求めることが、シールドトンネル掘削に伴う地盤挙動を合理的に予測するうえで重要である。

従来、有限要素法によるシールドトンネル工事の施工過程を考慮した解析が困難であった理由は、シールド機掘進状況のモデル化、特にシールド機切羽面における掘削地山の取り込み現象のモデル化が困難であったためと考えられる。例えば泥水式シールド機切羽面ではカッターによって切削された地盤が泥水等と共にシールド機切羽面の取り込み口からシールド機内部に取り込まれる。有限要素法を用いてこのような現象を厳密に解析することは、解析の複雑さから現状では不可能と言わざるを得ない。

実際のシールドトンネル工事では、シールド機切羽前方部分のカッターカット等によって地盤が搅乱された領域が常にシールド機切羽に存在する。著者らは、有

限要素法解析において、シールド機要素の切羽部分にこの搅乱領域を想定した掘削要素を配置し、各計算ステップで掘削要素および地盤要素を再分割することによって、シールド機が掘削地山を取り込みながら掘進する状況のモデル化を提案した¹⁶⁾。そして、提案した解析法を用いて実際の泥水加圧式シールドトンネル工事の三次元土～水連成弾粘塑性有限要素法解析を行い、シールドトンネル掘削における地盤変位、間隙水圧挙動、シールド機の姿勢の変化挙動の計測値との比較から、これらが精度よく解析できることを示した¹⁷⁾。さらに、シールド機通過時の周辺地盤の有効応力経路等を明らかにした¹⁸⁾。以下に掘削解析の概略を示す。

図-2(a)～(c)は、掘削解析の切羽掘削と掘削土砂の取り込みの有限要素法のモデル化を示したものである。図中赤の斜線がある要素が掘削要素である。

ある時刻 t において図-2(a)の状態にあるシールド機要素にジャッキ推力に対応する節点力を作用させると、シールド機要素は掘削要素および切羽近傍の地盤要素を押して変形させ、1 計算ステップ dt 時間後には図-2(b)の状態になる。ここで次の計算ステップ実行の前に、掘削要素と地盤要素について、シールド機要素の切羽部分に図-2(a)の掘進前と同じ厚さと形をもつ掘削要素が存在するように要素の再分割を行うと、結果的にシールド機が地山を取り込みながら掘進した状況をモデル化することができる(図-2(c)参照)。この方法では掘削要素が常にシールド機切羽前面に配置されるため、泥水加圧式シールド工事の泥水圧力や気泡シールド工事の気泡圧力に相当する圧力を掘削要素に作用させて、シールド機切羽の泥水圧力や気泡圧力等の影響を考慮することができる。また三次元掘削解析では、シールド機のジャッキ推力を、現場と同じジャッキ力とジャッキパターンで与えることができる。このため、シールドトンネル掘削に伴うシールド機の姿勢の変化が解析できる。

図-3 は、土～水連成弾粘塑性三次元掘削解析で得られた、シールド機掘進に伴うシールド機の姿勢の変化状況のうち、シールド機の鉛直方向の傾斜角度(ピッチング角度)を示したものである¹⁷⁾。図中の実線が現場での実測値、破線が解析値であり、また赤矢印は工事においてシールド機の掘進が行われた時点である。

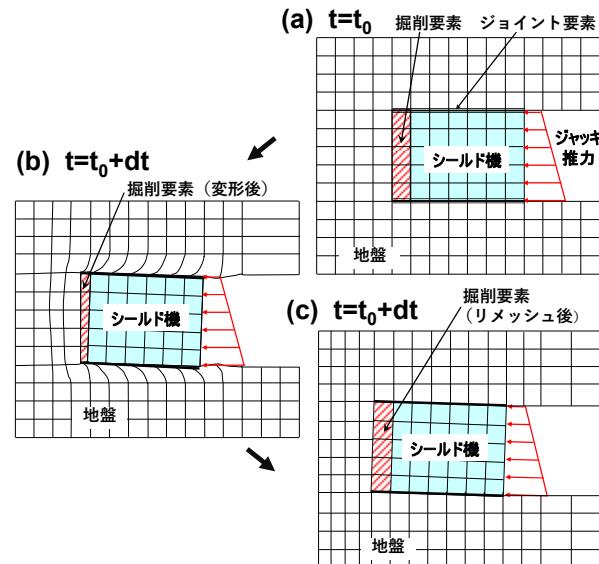


図-2 掘削要素を用いた有限要素法解析

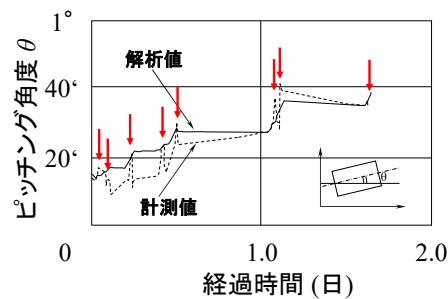


図-3 シールド機の傾斜角度

図-3 から明らかなように、シールド機の姿勢の変化はシールド機掘進時に大きく発生しており、シールド機停止時にはシールド機の姿勢の変化はほとんど見られない。解析の対象とした工事ではシールド機は水平方向よりも上向きに掘進しており、その傾斜角度はシールド機の掘進に伴って増加している。このようにシールド機が上向きに掘進しピッキング角度が増加する状況では、剛性の大きなシールド機の姿勢の変化に伴いクラウン部ではシールド機が地盤から離れるよう 移動するため地盤の応力は減少し、一方インバート部では地盤の押し抜けによって地盤の応力が増加することが予想される¹⁹⁾。そこで、シールド機切羽通過時からテールが通過するまでの、解析で得られたシールド機に接する地盤の応力状態を見ると¹⁸⁾、シールド機上方の地盤の有効応力は除荷され、逆にシールド機下部の地盤は負荷を受け、有効応力は降伏点に達し弾塑性

挙動が生じていた。このように、シールドトンネル掘削過程をモデル化した掘削解析を行えば、地盤の変位や変形、有効応力や間隙水圧の挙動が明らかになり、シールドトンネル掘削に伴う地盤挙動を土質力学を用いて詳細に考察することが可能となる。

3. 掘削解析の例

3.1 取り込み土量と地盤変位

掘削解析では、掘削要素の変形と有限要素メッシュの再分割の両者を利用することによって、シールド機が掘削土を取りながら推進する状況をモデル化している。掘削要素の体積は各計算ステップ前に有限要素のリメッシュによって常に同じになるため、例えば、図-4に模式的に示すように、掘進前の掘削要素の体積を V_0 、掘進後に変形した掘削要素の体積を V_1 とすれば、 $V_0 - V_1$ が掘削され取り込まれた土量になる。計算ステップごとの掘削要素の変形量は、掘削要素の剛性(変形特性)を変化させることによって制御することができる。掘削要素の材料特性を変えて、シールド機の推進速度や取り込み土量を任意に設定できる²¹⁾。したがって、掘削要素を用いた有限要素法解析では、シールドトンネル工事の施工管理でよく用いられる次式の排土率 R (%)を自由にコントロールした解析を行うことができる。

$$R = \frac{V_0 - V_1}{(\text{シールド機の断面積} \times \text{掘進距離})} \times 100(\%) \quad (1)$$

図-5(a)～(c)は、それぞれ(a)排土率 $R < 100\%$ 、(b)排土率 $R > 100\%$ 、(c)排土率 $R = 100\%$ の解析における、シールド機直上の地盤変位の解析結果である。 $R < 100\%$ の場合はシールド機切羽前方地盤には隆起が生じ、逆に $R > 100\%$ の場合は沈下が生じている。 $R = 100\%$ の場合は地盤変位はほとんど生じていない。仮に、掘削要素の剛性を極端に小さくすれば、シールド機切羽前方の地盤が大きく取り除かれたような状況下での地盤や既設構造物の挙動を、解析で明らかにすることも可能である²²⁾。

この他、掘削要素と地盤の間に泥膜を模した要素を配置し、その透水係数を変化させることによって泥膜の形成がシールド機切羽前方地盤の土圧や水圧に与える影響²³⁾を明らかにした例、掘削要素に切羽泥水の密

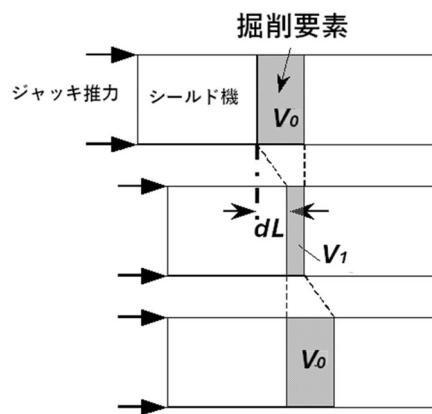


図-4 取り込み土量の計算

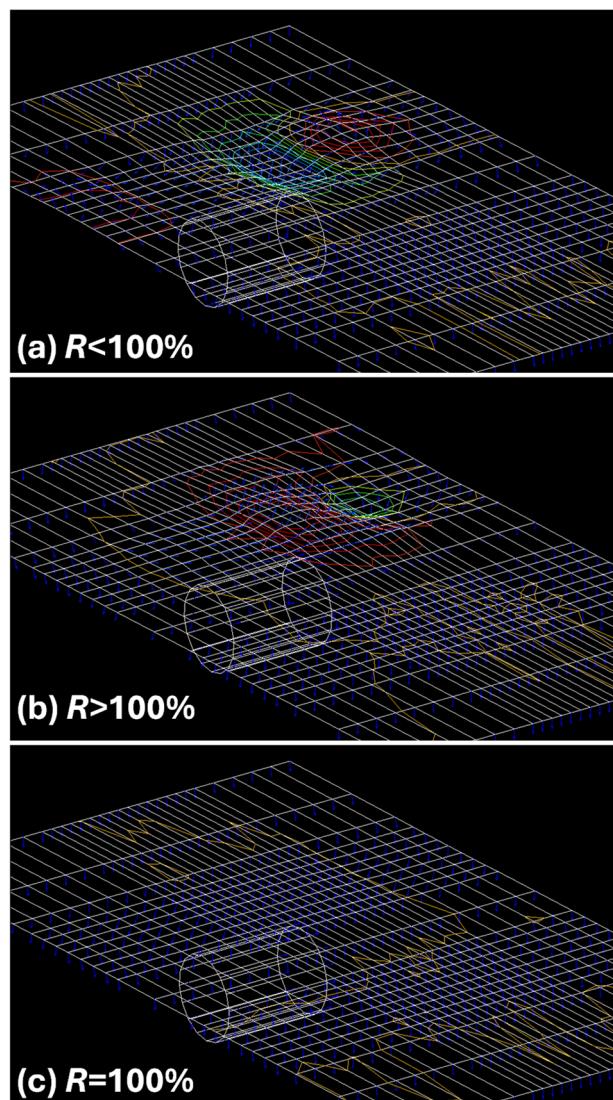


図-5 排土率と地盤挙動

度を与え大断面シールド工事における地盤の密度とチャンバー内の泥水の密度の差から生じる地盤挙動を明らかにした例など、解析結果を用いて掘削に関するさ

さまざまな土質力学的な問題の考察が行われている。

3.2 三連マルチフェースシールド等の解析

掘削解析では、双設シールド工事や多円形断面シールド工事のような、複雑な境界条件を有するシールドトンネル掘削に伴う地盤挙動や既設構造物の影響を解析することができる。双設シールドトンネル工事の掘削解析は既に本紙で紹介しているので²⁷⁾、ここでは三連マルチフェースシールド工事および非円形断面の掘削解析の結果を示す。

図-6は、沖積粘性土地盤における三連マルチフェースシールド工事の三次元掘削解析²⁵⁾で得られた、地表面の地盤沈下の計測値と解析値を、シールド機切羽通過時（1月24日）、テール通過時（2月1日）、圧密沈下終了時（4月20日）の時系列で表したものである。図から、シールド機通過後の圧密沈下を含め、計測値に近い解析結果が得られていることがわかる。

この他、非円形（複合円形）円形断面シールドトンネル掘削の掘削解析²⁶⁾では、横断方向の地盤沈下の影響範囲が、円形シールド工事における地盤沈下の影響範囲に類似していることが明らかにされている。

4. 今後の展開

筆者らは1996年から、図-7に示すように、施工中にリアルタイムで数値解析を行い、解析結果を逐次工事のオペレーションに反映させることができれば、工事に伴う地盤挙動を合理的に小さく抑えることができると考え、研究を行ってきた²⁸⁾²⁹⁾。また、当初は掘削解析をこれに活用することを想定した。しかし、掘削解析は、有限要素の再分割のために大きな計算時間を要するため、近年のパーソナルコンピューターの進歩をもってしても、現場での施工のオペレーションに使えるだけの計算速度が得られていない。そこで、掘削解析等によって明らかになった知見を従来の解析法にフィードバックし、シールドトンネル掘削における施工過程を考慮できる簡便な有限要素法解析モデルを提案しているので、その一つを示す。

高橋ら³⁰⁾は、592の掘進データと地盤変位の計測データから、泥土圧式シールドトンネル工事のシールド機切羽直前の地盤変位には、切羽おさえ圧力と共に掘

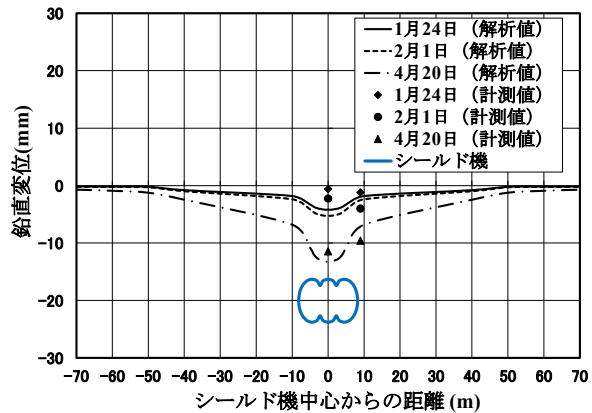


図-6 三連マルチフェースシールド掘削に伴う地盤沈下

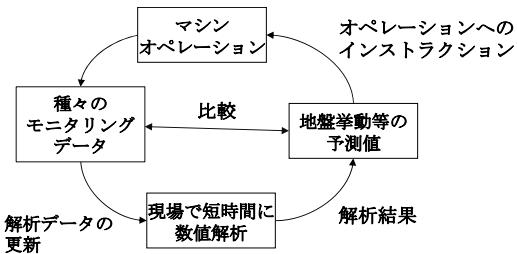


図-7 マシンオペレーションを補足する数値解析

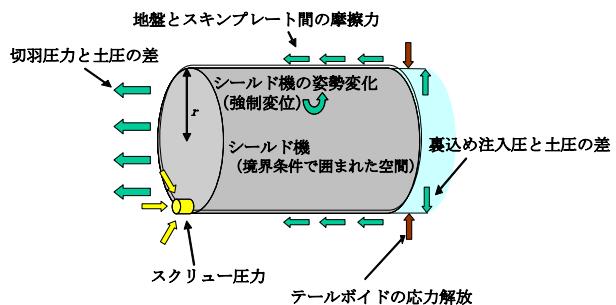


図-8 考慮する外力 (三次元解析)

削土砂を取り組むためのスクリュー圧力が影響していることを明らかにした。そこで、切羽圧力に加えてスクリュー圧力を外力として用い、シールド機と地盤の境界を変位境界として、図-8に示す外力条件で施工過程を考慮した有限要素法解析を行った。シールド機の姿勢の変化は節点の強制変位で与えた。また、シールド機の周面摩擦力は掘削解析によって明らかになった値を用い、テールボイドの発生に伴う地盤の応力解放と裏込め注入は掘削解析と同じ方法で解析した。更に三次元解析で用いる外力を、単位奥行き当たりの等価な節点力として作用させた二次元平面ひずみ有限要素法解析を行い、三次元解析と二次元解析の計算時間

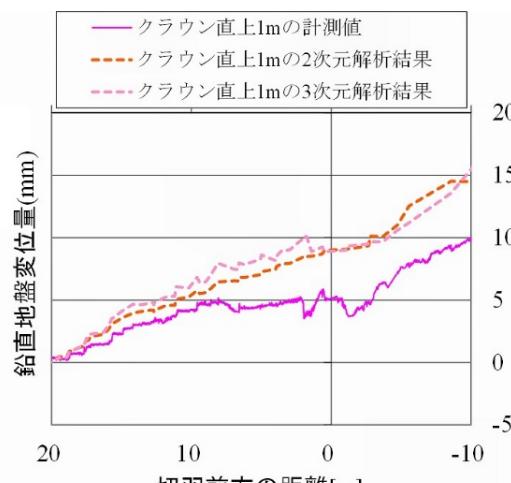


図-9 解析結果と計測値の比較

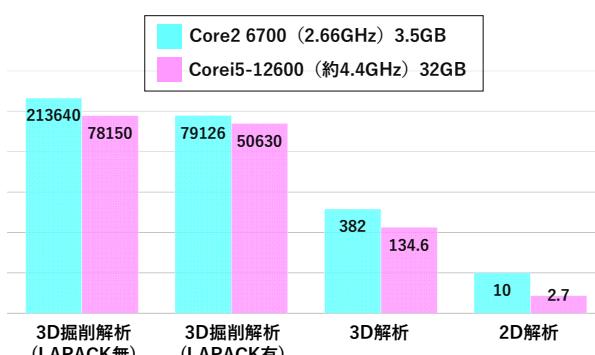


図-10 計算時間(秒)の比較

や精度を確認した。

図-9は解析結果と計測値の一例を示したものである。図から、三次元解析と二次元解析の結果に大きな違いは見られないことがわかる。どちらも解析結果は現場計測結果よりもやや大きい変位量を示しているが、シールドトンネル掘削に伴う地盤の変位挙動が解析において概ね再現されていることがわかる。

図-10は、提案した三次元と二次元の有限要素法解析と、同じ工事について行った三次元掘削解析の計算時間を比較したものである。縦軸は対数軸である。提案した解析法は、計算時間が飛躍的に短縮されている。今後は、このように短時間に精度よく地盤挙動を得られる数値解析を、実際の現場のシールド機のオペレーションに組み込むことによって、情報化施工の発展にも寄与できると考えている。

参考文献

- 1) J.デュラン (中西秀・奥村剛訳) :粉粒体の物理学, 吉岡書店, p. 8, 2002.
- 2) 赤木寛一・小宮一仁: 土質力学, 彰国社, 2000 (初版), 2025 (第6刷).
- 3) 赤木寛一・大友敬三・田村昌仁・小宮一仁: 地盤工学における性能設計, 丸善, 第4章, 2010.
- 4) Terzaghi, K.: Die berechnung der durchlassigkeitziffer des tones aus dem verlauf der hydrodynamischen spannungserscheinungen, 1923.
- 5) Biot, M. A.: Journal of Applied Physics, Vol. 12, pp. 155-164, 1941.
- 6) Sandhu, R. S ら : Proc. ASCE., Vol. 95, EM3, pp. 641-652, 1969.
- 7) Christian, J. T. ら : Proc. ASCE., Vol. 94, SM4, 1970.
- 8) 山上拓男ら : 土と基礎, Vol. 37. No. 2, pp. 98-101, 1989.
- 9) 橋本正ら : 第23回土質工学研究発表会発表会, pp. 1941-1942, 1988.
- 10) 森鱗ら : トンネルと地下, Vol. 14, No. 11, pp. 25-31, 1983.
- 11) 小宮一仁ら : 第26回土質工学研究発表会, pp. 1181-1184, 1991.
- 12) 山田孝治ら : 土木学会論文集, 第373号, VI-5, pp. 103-112, 1986.
- 13) 森鱗ら : 土木学会第41回年次学術講演会, pp. 827-828, 1986.
- 14) 太田秀樹ら : 第20回土質工学研究発表会, pp. 1525-1528, 1985.
- 15) 亀村勝美ら : 山留めとシールド工事における土圧・水圧と地盤の挙動に関するシンポジウム論文集, pp. 281-284, 1992.
- 16) 小宮一仁ら : 第5回計算力学シンポジウム報文集, 日本科学技術連盟, pp. 243-248, 1991.
- 17) 赤木寛一ら : 土木学会論文集, III-25, No. 481, pp. 59-68, 1993.
- 18) Komiya, K. ら : Soils and Foundations, Vol. 39, No. 4, pp. 37-52, 1999.
- 19) 安田秀幸ら : 第26回土質工学研究発表会発表会, pp. 1833-1834, 1991.
- 20) Ohta, H. ら : Proc. of Third International Conference on Numerical Method in Geomechanics, Vol. 1, Aachen, pp. 475-484, 1979.
- 21) 吉野修ら : 軟弱地盤における地下建設技術に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会, pp. 174-177, 2002.
- 22) 吉野修ら : トンネル工学研究論文・報告集, Vol. 11, 土木学会, pp. 51-56, 2001.
- 23) 内田了司ら : 第52回土木学会年次学術講演会講演概要集第3部(A), pp. 428-429, 1997.
- 24) Kobayashi, M. ら : Geotechnical aspects of underground construction in soft ground, Vol. 4, ISSMGE, pp. 405-410, 2002.
- 25) Komiya, K. : Geomechanik und Tunnelbau, Vol. 2, No. 2, pp. 199-208, 2009 (in German).
- 26) 高橋博樹ら : 第63回土木学会年次学術講演会第3部, pp. 821-822, 2008.
- 27) 小宮一仁ら : 土と基礎, Vol. 52, No. 8, 地盤工学会, pp. 13-15, 2004.
- 28) Soga, K. ら : Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Vol. 3, pp. 425-430, 1999.
- 29) 中村智哉ら : 土木学会論文集(F1), Vol. 72, pp. 82-93, 2016.
- 30) 高橋博樹ら : 第46回地盤工学研究発表会講演集, E-11, pp. 1435-1436, 2011.

(原稿受理 2025.5.6)

報告

地下鉄シールドトンネルにおける地盤挙動と土質力学

Ground behavior and soil mechanics in subway shield tunneling

小西 真治 (こにし しんじ)

(株) アサノ大成基礎エンジニアリング 事業推進本部 理事

e-mail: konishi-s@atk-eng.jp

伊藤 聰 (いとう さとし)

メトロ開発 (株) 取締役

岡ノ谷 圭亮 (おかのや けいすけ)

東京地下鉄 (株) 改良建設部 主任

キーワード：地下鉄シールドトンネル，密閉型，土圧式シールド工法，泥水式シールド工法，シールド駅

1. はじめに

日本の地下鉄は全国 9 都市 10 社で営業しており、42 路線、総延長 765km¹ (2022 年) に及ぶ。そのうちトンネル区間は約 90% の 679 km である¹。東京地下鉄 (株) (以下、東京メトロと呼ぶ。) ではトンネル区間 166.8km の約 30% の 49.3 km がシールドトンネル²、また、大阪市高速電気軌道 (株) (以下、大阪メトロと呼ぶ。) はトンネル区間 115.0 km の約 39% の 44.8km (リニア地下鉄含む) がシールドトンネルである²。地下鉄工事では、古くから開削工法が適用されてきたが、高度経済成長期を経て、路上の交通混雑や浅層地下のインフラ設備の輻輳 (ふくそう) に伴い、開削工法の適用が困難になってきたことから、近年ではシールドトンネルの適用が主力になっている。

シールドトンネル工事は、適切に施工されれば、山岳工法や開削工法等他の工法と比べて、周辺地盤への影響が少ないと加え、切羽崩落、ヒービング、盤ぶくれ等が発生する可能性は稀であり、土質力学から見て都市部における安全な工法である。また、騒音、振動等の環境への影響も少ない工法である。

これまで、地下鉄のシールドトンネル工事は大きな事故もなく安全に施工してきたが、都市高速鉄道 13 号線 (東京メトロ副都心線 2008 年竣工) を最後に、国内の工事量は減少し、地下鉄各社ともシールドトンネル工事に携わる技術者が減少している。東京メトロでは、地下鉄連絡線設置に伴うシールドトンネル工事や推進工事などにより技術を継承してきたが、将来に渡りシールドトンネル工事を安全に施工していくために

は、シールドトンネル技術者の育成・教育が不可欠と考えている。

2. 地下鉄シールドトンネルの特徴

地下鉄シールドトンネルの断面は、トンネル通過地の施工条件のほか、経済性等を考慮したうえで、単線断面、複線断面等から選定している。具体的には、車両限界、建築限界のほか、保守待避空間、列車運行に必要な設備、照明、排水等の諸設備に必要な空間を考慮して決定されている。各社の車両寸法に大きな差異がないため、断面の大きさや形状もある程度定まっている。東京メトロの場合、単線シールドトンネル外径約 6600 mm、複線シールドトンネル外径約 9800 mm である²。

近年、経済性の問題から車両にリニアモーターを用いたリニア地下鉄を採用する例も増えており、この場合は大阪メトロの例で単線シールドトンネルの外径が約 5300 mm と小さくなっている²。曲線半径や縦断勾配等は、鉄道の技術上の基準を定める省令³により制限があるため、トンネル通過地の地形・地質や既設構造物に配慮したトンネルルートの選定が求められる。近年、都市部の地下は大型埋設物、道路橋や建築物の基礎等が輻輳しているため、新設するシールドトンネルは、その間を縫うようにルート選定しなければならず、おのずと近接施工が多くなる。この場合には、管理者の条件に従って近接影響解析を実施し、当該シールドトンネルの応力解放率等を定めて影響を把握している。また、地下鉄は都市部を中心に造られるため、

鉄道や道路の山岳部のトンネルと比べて対象都市の建設工事のデータや既往の地質調査結果から地盤の特徴を把握しやすく、過去のシールドトンネル工事を含めた経験が工事を進めるうえで非常に重要になってくる

3. 地下鉄シールドの変遷

地下鉄のシールドトンネル工事では、1970年代までは圧気を併用した開放型シールド工法やブラインドシールド工法により施工されていた。1980年代から密閉型シールドの泥水式シールド工法、2000年代からは土圧シールド工法が多く用いられるようになった。

東京の地下鉄の路線別地下駅の平均深さを図-1 に



写真-1 ルーフシールド工法⁵⁾

表-1 東京メトロにおける路線別建設工法の変遷

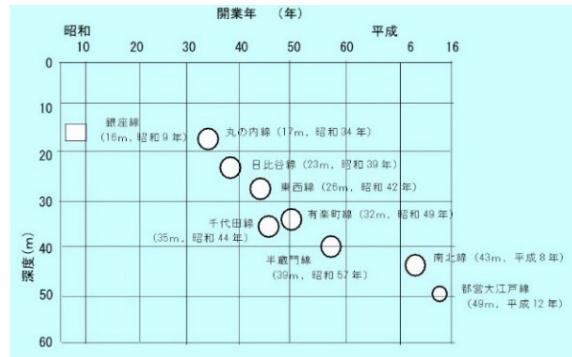


図-1 東京における路線別駅（地下部）平均深さ

年代	開放型	部分開放型	密閉型	
	機械掘り・手掘り等	ブラインド	泥水式	土圧式 (泥土圧)
~1965	2本	—	—	—
~1970	13本	4本(一部区間)	2本	—
~1975	23本	—	—	—
~1980	20本	—	1本	—
~1985	2本	—	5本	—
~1990	—	—	9本	—
~1995	1本	—	11本	—
~2000	1本	—	17本	2本
~2005	—	—	4本	9本
~2010	—	—	2本	3本
~2015	—	—	—	2本
合計	62本	4本	51本	16本
			総計	133本

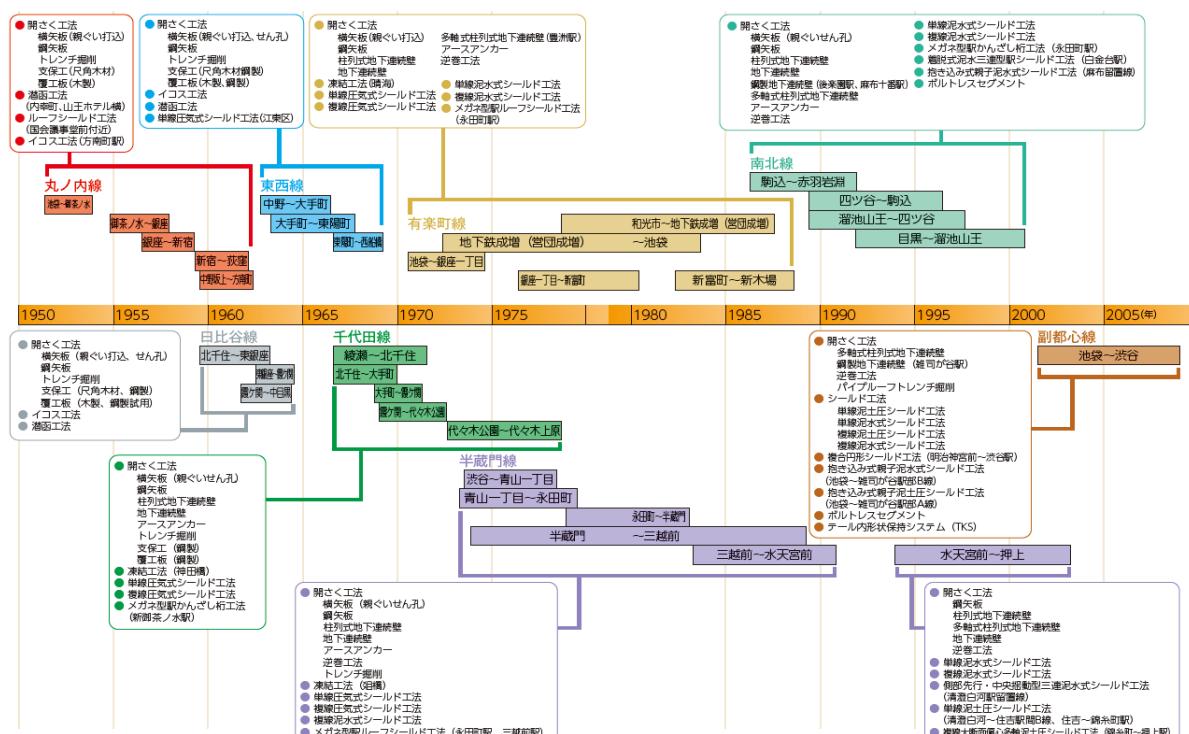


図-2 東京メトロにおける路線別建設工法の変遷⁴⁾

示す。地下鉄は浅深度から築造され、年代を追うごとに深くなっている。これに伴い、年代別・路線別に建設工法も変化してきた。東京メトロの例を図-2⁴⁾に示す。地下鉄建設で、シールドトンネルが初めて建設されたのは、1957年に施工された丸ノ内線国際会議事務館前付近のトンネルの一部であり、断面が半円形上のルーフシールド工法であった（写真-1）⁵⁾。なお、地下鉄シールドトンネル工事において円形トンネルが初めて採用されたのは、1961年、名古屋市営地下鉄覚王山トンネル工事であった。東京では1964年に東京メトロ東西線で海に近い軟弱地盤でシールドトンネルが施工された。同年大阪メトロでも谷町線谷三シールドが建設されている。東西線では、開放型の圧気式シールド工法が採用されたが、すべてが手探りで難工事となつた。セグメントの設計法もまだ確立されていなかったため、若干内空に余裕を持たせていたが、後にこの余裕度を用いて内巻補強が行われたのは、当時の技術者に先見の明があったといえる⁶⁾。このように、シールド工法黎明期は開放型や東京や大阪の軟弱地盤でブラインドシールド工法が用いられていた（表-1）。

しかし、切羽の土圧管理が難しく安定保持が困難であったことや、圧密沈下などの周辺地盤への影響の問題から、シールド技術の進歩とともに密閉型の泥水式シールド工法が用いられるようになった。東京メトロでは、1967年に千代田線でパイロットトンネルをφ3.1mの泥水加圧式シールドで施工している。1970年代後半からは泥水式シールドが多く用いられるようになり、1978年には、世界に先駆けて有楽町線氷川台駅付近に直径10m級の大断面泥水式シールド工法を採用している（写真-2）⁵⁾。この付近の地盤は、地下水が非常に多く、また地層は砂と礫が交互に層をなしており、礫層には直径30cmほどの玉石が多く混じっていた。このような地盤条件および環境条件から、地盤沈下等を発生させない工法として泥水式が採用されたが、当時泥水式は導入初期の時期で中小断面でも切羽の崩落事故が見られた。そこで、事業者、施工業者、メーカーで施工研究会を作り、実験のデータを基にした安全な掘削の検討を行い、現地試験で確認してから実施工に導入した⁷⁾。

このころ切羽の安定化以外に、大阪や東京の軟弱地



写真-2 氷川台駅付近泥水式シールド機⁵⁾

盤での地表面の沈下対策で可塑状固化タイプの裏込め材の開発やテールブラシの開発が進み、大阪メトロの中央線の工事で1982年にはじめて裏込め材の同時注入が用いられた⁸⁾。また、東京メトロでは、沈下の問題に対してシールド掘進に伴う地盤の変形計測を実施し、地盤変形の発生機構を明らかにして、予測解析手法を提案している^{9,10)}。

1999年に、半蔵門線水天宮前～押上間に東京メトロで初めて土圧式シールド工法を採用した⁵⁾。土圧式シールド工法は泥水式シールド工法と比較して掘削土砂の処理設備がコンパクトにでき、その結果コストを抑えられるという利点がある一方で、掘削残土の処理方法によっては工事費が高くなることがある。当該地域の地層に目を向けると、粘性土層と砂質土層の両方を含む工区と、ほぼ均一な粘性土層のみの工区に分けられた。前者では掘削した土砂を砂礫分と粘性土に分離して処理できる泥水式が有利であるのに対し、後者ではその必要がない土圧式で十分と判断した。しかし、掘進では、切羽圧および土量管理に加えて、裏込め注入量の管理を確実に行うことが必要不可欠であった。

4. 地下鉄シールドの変遷

4.1 側部先行中央搖動三連型駅シールド（東京メトロ半蔵門線水天宮前駅・留置線部）

東京メトロの半蔵門線清澄白河駅には、軟弱な地盤中に留置線の設置が必要であった。道路幅は狭く、道路交通量も非常に多いことから駅始終端部と留置線端部に設置する変電所部を立坑型にして開削トンネル区間を最小限にとどめ、駅部立坑間および留置線部を三連型シールドで施工した（図-3）。世界初の側部先行

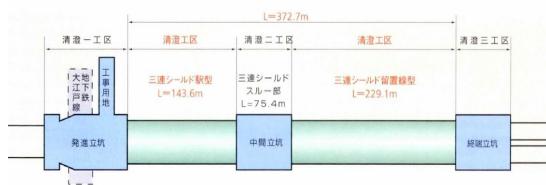


図-3 清澄白河駅・留置線部平面図



写真-3 泥水式三連シールド機

(回転作動), 中央揺動型の泥水式三連シールド機を採用するとともに, セグメントについても三連シールドトンネルとしては初めて, 鉄筋コンクリートセグメントとしたことが特長である(写真-3)。これにより軟弱地盤でも周辺への影響も少なく安全に施工が行えた。

4.2 三心円複合円形シールド機（東京メトロ副都心線明治神宮前～渋谷間）

東京メトロ副都心線の明治神宮前駅と渋谷駅を結ぶ複線トンネル（延長 738.5m）では、東京メトロにおける最後の新線建設工事として、鉄道複線シールドトンネルのあるべき姿を追求し、以下に記述する「複合円形断面」の複線トンネルを採用したのが特長である。一般的な円形複線シールドトンネルの直径は約10mであるが、列車走行に必要な空間の確保という観点では、トンネルの上部および下部に鉄道トンネルとしてはあまり利用されない空間ができてしまうといった課題があった。この空間を可能な限り減らす一方、構造的に有利な円形の形状特性を活かすことが可能な断面形状の検討を行った。図-4に示すように、上部、下部および側部の各々に異なる半径を設定し、これを連続的に組み合わせることで円形断面を押しつぶしたような形状（複合円形断面）を構成させてトンネル高さを縮小することを試行した。ここで、トンネル高さを縮小す



写真-4 複合円形断面シールド機

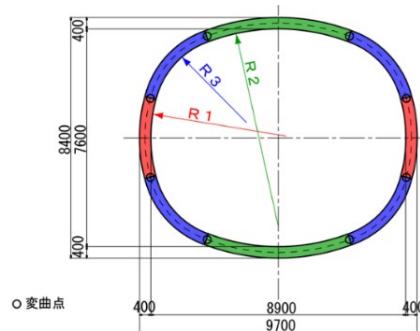


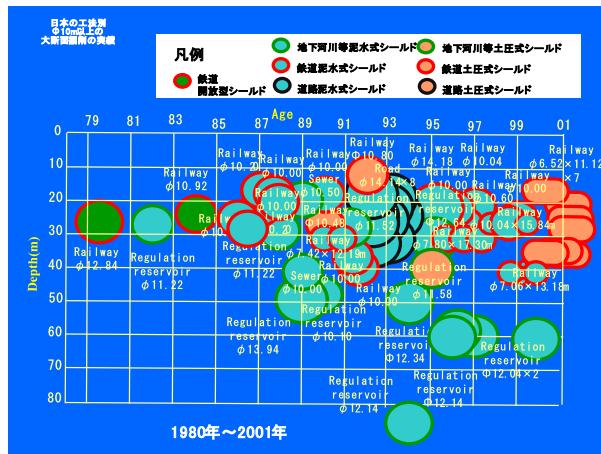
図-4 複合円形断面の考え方

ると必然的に断面形状に隅角部が発生してしまうため、構造的には円形断面の特性を有することに留意しながらトンネル幅は 9.7 m に固定する条件で三つの半径の組み合わせについて検証した結果、幅 9.7 m、高さ 8.4 m の複合円形断面を導出した。

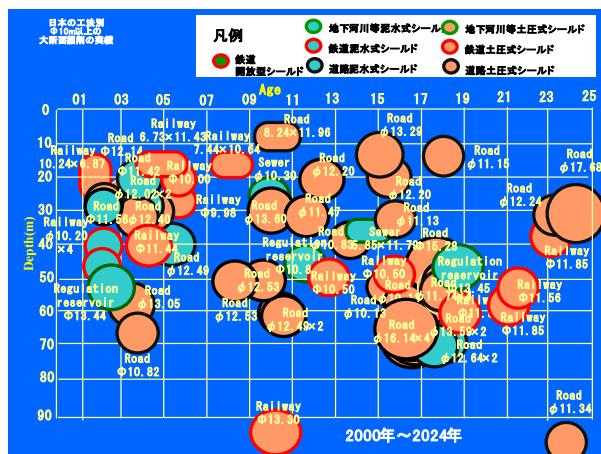
また、インバートや側道コンクリート部分の占有面積を控除した内空面積（トンネル純空間）は円形断面とほぼ同等程度確保しながら、トンネル断面積は約 10% 低減するとともに、さらに、この複合円形断面を採用したことにより、シールド掘進に伴う発生土量の抑制という環境負荷低減にも寄与するとともに、都市部の限られた地下空間をより有効に利用できる一つの考え方を提案した(写真-4)。

5. おわりに

我が国のシールドトンネルの建設技術は、発展を遂げ、世界でもトップレベルに位置していると考える。地下鉄のシールドは、これまで多数の工事実績があり、地盤に応じて適切な工法で安全に工事を遂行してきた。しかし、近年では、鉄道事業や道路事業において地表面に影響を与える事故が発生した。再発防止策を含め



a) 1980年～2001年



b) 2001年～2024年

図-5 日本の工法別大断面シールドの実績 ($\phi 10\text{m}$ 以上)

た対策など、さまざまな施策に取り組んでいるが、これには国内のシールドトンネル工事が減少し、技術の継承や技術者の育成が順調に進んでいないことや、急激な大断面化などが要因と考えられる(図-5)。今後、国内のシールドトンネルは、大プロジェクトが計画されており、大断面化、大深度化、長距離化など、技術

のさらなる高度化に取り組まなくてはならない。また、今後は残された地下部分を活用していくことになるため、一様の地盤ではなく、巨礫や軟弱地盤等が混在かつ地下水を有するような地盤の掘削も検討する必要性が発生する場合も考えられる。シールドトンネルの基本は切羽の安定を図り、安全に工事を進めることである。ここ数年、建設現場では、生産性の向上やDXによる自動化が進んでいるが、改めてシールドトンネルの原理原則に立ち返り、土質工学を含めた工学的視点をもって、安全に工事を進めていかなければならない。

参考文献

- 1) 国土交通省：鉄道統計年報令和4年度, 2022.
- 2) 鉄道総合技術研究所：シールド工法による鉄道トンネル実施例集（その4）, 2010.
- 3) 国土交通省：鉄道に関する技術上の基準を定める省令（平成13年国土交通省令第151号）
- 4) 東京地下鉄株式会社：東京メトロハンドブック 2024, 2024.
- 5) 東京地下鉄株式会社：営団地下鉄建設技術史, 2006.
- 6) 東京地下鉄株式会社：工務部のあゆみ（土木編）, pp. 735-751, 2005.
- 7) 土木学会：目から鱗のトンネル技術史—先達が語る最先端技術への歩みー, トンネルライブラリー, 第22号, pp. 152-153, 2009.
- 8) 土木学会：目から鱗のトンネル技術史—先達が語る最先端技術への歩みー, トンネルライブラリー, 第22号, pp. 205-210, 2009.
- 9) 中山隆・中村信義・中島信：泥水式シールド掘削に伴う硬質地盤の変形解析について, 土木学会論文集, 第397号, VI-9, pp. 133-141, 1988.
- 10) 藤木育雄・横田三則・米島賢二・村田基代彦：軟弱地盤でのシールドトンネル掘進に伴う周辺地盤の変形について, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第1巻, pp. 83-88, 1991.

(原稿受理 2025.5.2)

報告

地下高速道路シールドトンネルにおける地盤挙動と土質力学

Geotechnical behavior and soil mechanics in underground highway shield tunnels

土橋 浩 (どばし ひろし)

(一財) 首都高速道路技術センター 副理事長

e-mail: dobashi@tecmex.or.jp

遠藤 啓一郎 (えんどう けいいちろう)

首都高速道路 (株) 更新・建設局 土木設計課 課長代理

キーワード：高速道路，シールドトンネル，地盤挙動，近接施工，併設シールド

1. はじめに

近年、首都圏をはじめとする都市部において道路などのインフラを建設する場合、都市空間の有効活用や環境負荷軽減の観点などから、トンネルの採用が増えている。その際、周辺環境、特に地上への影響を最小限にするため、非開削工法の中からシールド工法が、標準的な工法として採用されている。一方、高度に開発された都市部では既に地下構造物が輻湊（ふくそう）しているため、こうした構造物に近接した施工となることが多い。また、複数の車線を有する道路トンネルでは、直径 10 m 以上の大断面トンネルとなる。

このため、大断面シールドの掘進において、地盤の挙動を踏まえた近接構造物に対する影響を正確に把握することは、安全に工事を進めるうえで極めて重要である。しかし、近接による影響は、対象構造物や地盤条件などによって異なることから、標準的な検討手法が確立しているとは言い難い。

本稿では、首都高速道路のシールドトンネルの施工事例を基に、特に併設シールドトンネルに着目して、近接施工による地盤挙動、影響検討について述べる。

2. 地盤挙動を踏まえた近接施工

2.1 高速道路におけるシールドトンネル

シールドトンネルは、日本において 1900 年代前半から採用実績があり、時代とともに実績を重ねてきた。一方、高速道路におけるシールドトンネルの採用は、1997 年に開通した東京湾横断道路が初めてであり、他のインフラと比較して、シールド工法の採用に時間を要している。これは、高速道路の空間を確保するため

にシールドトンネルが大断面となるため、高度な掘削技術が求められたことから、技術開発に時間を要した経緯がある。東京湾横断道路は、当時世界最大径となる 14.14 m の泥水式シールド工法で、最新の技術を開発、取り入れることで無事完工し、大断面シールド技術の実用化と発展に重要な役割を果たした。

その後、当初は橋梁構造を想定していた首都高速道路中央環状新宿線において、沿道環境負荷を最小限にするためトンネル構造を採用することとしていたが、さらに地上の交通への影響、コストや工期のバランスなどから、全線の約 7 割にシールドトンネルを採用した。その中でも、中落合シールドトンネルでは、建設当時、世界最大級となる泥土圧式シールドトンネルの技術が開発され、現在の東京外環自動車道等に至るまで、多くの実績を残している。また、現在掘進準備を進めている枚方トンネルでは、トンネル外径約 17.4 m、シールド外径 17.6 m の工事が進められており、これまで以上に大断面化が進んでいる。

2.2 道路シールドトンネルにおける近接施工

前述のとおり道路シールドトンネルは一般的に大断面となるため、特に地下化が進む都市部においては、道路空間の確保が課題である。加えて、道路空間が確保できた場合においても、既に存在する地下構造物と近接した施工となることが多い。

また、道路シールドトンネルの多くは、上り線や下り線を構築するために、2 本の大断面シールドトンネルを併設して施工することが、大きな特徴として挙げられる。なお、併設においては、地下空間の制約や区分地上権の設定などから、双方のトンネル離隔が小さ

くなる箇所や、特殊な位置関係となる箇所においては、近接施工に起因する相互影響の評価と対策が、特に重要な課題となる。

2.3 併設シールドトンネルにおける地盤挙動のメカニズム

首都高速道路では、併設シールドトンネルによる影響検討について、先行トンネルと後行トンネルの離隔が、後行トンネルの外径 (D) の $1D$ 以上確保される場合、先行トンネルへの影響が小さいものと判断し、検討を省略しており、離隔が $0.5D$ 未満の場合、詳細な検討を実施することとしている。ただし、検討対象地盤が軟弱地盤の場合や、施工により周辺に重大な影響が生じる可能性があると考えられる場合には、 $0.5D \sim 1D$ の離隔であっても詳細な検討を必要としている。

併設シールドトンネルの影響検討においては、後行トンネルの通過に伴い先行トンネルに一時的に生じる影響に加え、先行トンネルと後行トンネル双方に長期的に及ぶ相互干渉の影響を考慮しなければならない。一時的な影響は、後行トンネルの掘進に起因して発生する影響であり、切羽の不安定化による地山の呼込みおよび押込み、曲線および勾配を有した施工に伴うシールド側面からの地山の押込み、裏込め注入圧などが主な要因として想定される。一方、長期的な影響としては、双設トンネル構築による土圧および地盤反力が単一トンネルの場合とは異なる状態となることに起因

する影響を考慮している。これらの影響は、地盤状況や各トンネルの併設パターンによって異なることが想定される。

例えば、トンネルの離隔距離が小さい場合、後行トンネルの掘進による推力等が、先行トンネルに影響を与える可能性があることから、トンネル周辺の地盤挙動に留意する必要がある。また、左右にトンネルを併設する場合、後行トンネルは、先行トンネルの隣接地盤中を掘削するため、応力の再配分による先行トンネルへのゆるみ土圧が増加する傾向にある。一方、先行トンネルの位置によって、後行トンネルに作用する側方からの土圧や地盤反力は、地盤の変位や地山の乱れによる強度低下に伴い増減する。さらに併設が上下および斜めになる場合には、より複雑な現象となる。

このため、併設トンネルの位置や離隔が三次元的に変化する場合は、その影響が複合的に作用し、近接施工による影響評価がさらに困難となることが想定されるため、施工にあたっては事前の詳細な調査、三次元的な検討が求められる。

2.4 近接影響の検討手法

首都高速道路では併設トンネルの影響検討にあたっては、実績の多い FEM 解析を基本的な手法としている。影響検討フローを図-1 に示す。はりーばねモデルを用いて算出される单設トンネルの断面力に、FEM 解析から算出される併設の影響による断面力の増分を加

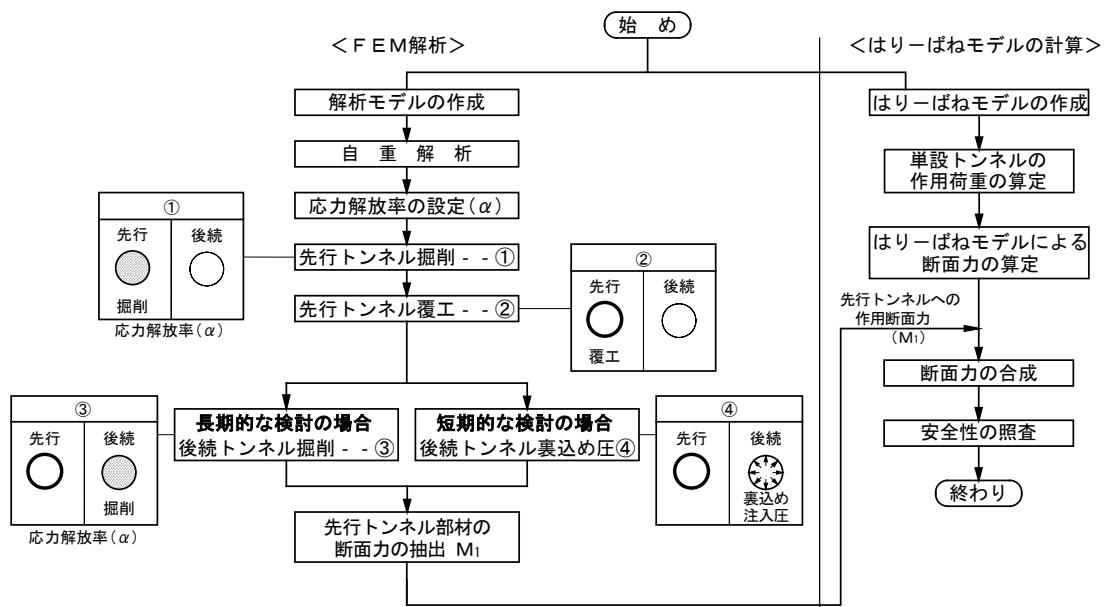


図-1 併設トンネル影響検討フロー

算し、設計断面力を決定する方法を基本としている。

FEM 解析は二次元での検討を基本としており、先行トンネルの掘削と覆工、後行トンネルの掘削や裏込め注入圧の作用を考慮して断面力を算出している。また、応力解放率の設定は、中央環状新宿線の現場計測結果とのフィッティング解析によって算定された応力解放率を参考値として用いることもある¹⁾。なお、応力解放率の設定は、解析結果に大きく影響するため、検討にあたっては、現場の地盤条件や施工条件が工事によって異なることを考慮し、過去の類似事例における検討結果と整合性を図りながら、各種定数等を設定し、施工に活かすことが望ましい。

その他、検討手法において特筆すべき点を以下に示す。なお、設計においては過去の実績に基づき定めているものが多いが、個々の現場条件との適合性については検証が十分でない場合もある。したがって、現場条件が異なる場合、併設トンネルへの影響が設計の想定を超える可能性を考慮する必要がある。このため、過去の実績と異なる特殊な線形、地盤条件等が考えられる場合には、特に注意が必要である。

(1) 先行トンネル覆工時の応力解放

先行トンネルの覆工時においては、後行トンネル掘削時により後行トンネル側に引き込まれる状態を考慮するために、(1-a) の応力解放は行わない。

(2) FEM 解析における覆工剛性 (EI)

覆工の剛性については、剛性を小さく設定した場合、覆工に発生する断面力が小さくなり危険側の設計となる傾向があるため、安全側となる適切な EI を設定する。

(3) FEM 解析モデルの領域設定

モデルの解析領域の設定は、過去の類似する解析実績に基づき、水平方向の全体幅はトンネル側部から $45^\circ + \alpha$ の範囲、鉛直方向の下方境界高さは $2D$ とする。

3. 併設トンネルの施工事例

3.1 施工概要

首都高速道路は、これまで数多くの併設シールドトンネルの施工実績を有する。ここでは、その中でもランプトンネルの線形、位置関係、離隔が三次元的に複雑に変化しながら先行トンネルに近接するという特殊な条件下で施工された首都高速神奈川 7 号横浜北線（以下、横浜北線）の中央に位置する馬場出入口トンネルの事例について紹介する。

横浜北線は、2017 年 3 月に開通した延長約 8.2 km の自動車専用道路であり、その 7 割以上の約 5.9 km がトンネル構造で、うち約 5.5 km にシールド工法が採用されている。本路線は、横浜市の交通ネットワークの骨格を形成する横浜環状道路の北側区間に位置し、第三京浜道路「横浜港北インターチェンジ」から首都高速神奈川 1 号横羽線「生麦ジャンクション」をつなぎ、2024 年度に事後評価報告書がまとめられた²⁾。

馬場出入口は、横浜北線の港北および生麦の両方向へのアクセスが可能な 4 枝のランプウェイが現道に接続するフルランプ構造である。その平面図を図-2 に示す。横浜北線本線トンネル（以下、本線トンネル）に接続する馬場出入口は、土被りが 40~50 m の位置となる。このため、4 つの出入口から本線トンネルに接続する出入口トンネルについても、周辺環境への影響を最小限に抑えるため、シールド工法が主に採用された。

限られた用地の制約条件の下、かつ大深度の本線トンネルへ接続するため、各出入口トンネルは、図-2 に示すように急曲線かつ急勾配という特徴を有している。各出入口トンネルの最大縦断勾配は 7% 以上で、最小曲線半径は約 50 m である。また、本線トンネルと出入口トンネルの接続部は、切抜げ工法を用いて本線トンネル側から拡幅している。出入口トンネルのランプシール

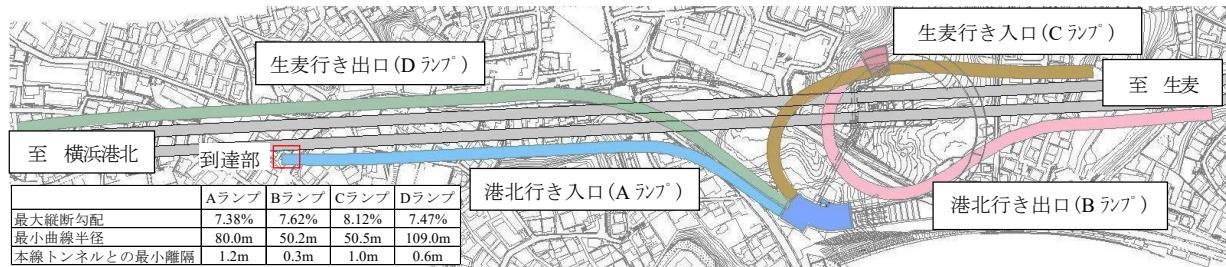


図-2 馬場出入口全体平面図

ルドが本線トンネルに到達する概要を図-3に示す。

出入口トンネルは、掘進開始から本線トンネルに到達するまで急曲線かつ急勾配で離隔が三次元的に変化しながら本線トンネルに近接するため、出入口トンネルと本線トンネルの位置関係は常に変化する。したがって、到達部以外においても全掘進区間における本線トンネルへの影響を正確に把握することが重要となる。

本稿では、平面的な離隔が約1.2mまで近接するという条件に加え、本線トンネルが供用中という条件下で掘削されたAランプシールドを代表例として述べる。

3.2 掘進管理

到達部における掘進においては、本線トンネルへの影響を最小限にするため、掘進とともに周辺地盤の

緩みを極力低減することが重要である。そのため、切羽土圧の適切な管理とテールボイドへの裏込め注入材の確実な充填管理および早期の硬化が必要であると考えた。上記方針にしたがい、Aランプシールドの到達部の掘進では、図-4に示す掘進管理を実施した。

3.3 先行トンネルに対する影響検討

先行する本線シールドトンネルに対する影響検討は、図-1に示す首都高速道路の標準的な影響検討フローに基づき実施した。二次元FEM解析を用いて、ランプシールド掘削による本線トンネルへの影響を増分断面力として算出し、これに別途はり一ばねモデルによる自重、土圧、水圧等による断面力と合成することで、本線トンネルのセグメントの安全性の照査を実施する手法を採用した。検討の概要を表-1に示す。

3.4 影響検討を踏まえた施工実績

影響検討の結果、Aランプシールド掘進時の本線トンネルの許容変形量について、スプリングライン部における水平変形量の最大値を、本線トンネル内空側に12mm、外側に18mmと定め、これを掘進における管理値の基本とした。

Aランプシールド掘進による本線トンネルの最大変形量は、スプリングライン部で外側に11.8mmであり、これは事前に算出した最大変形量の7割未満とな

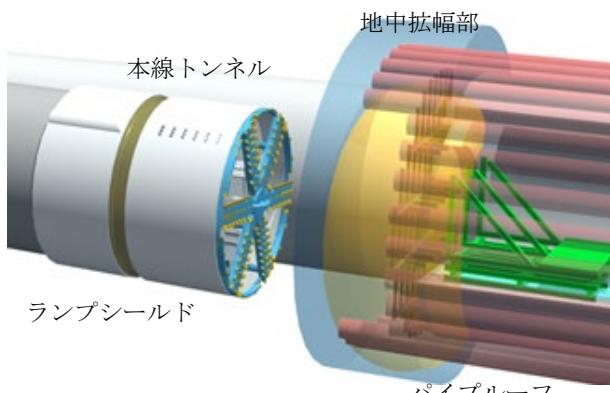


図-3 ランプシールド到達部概要図

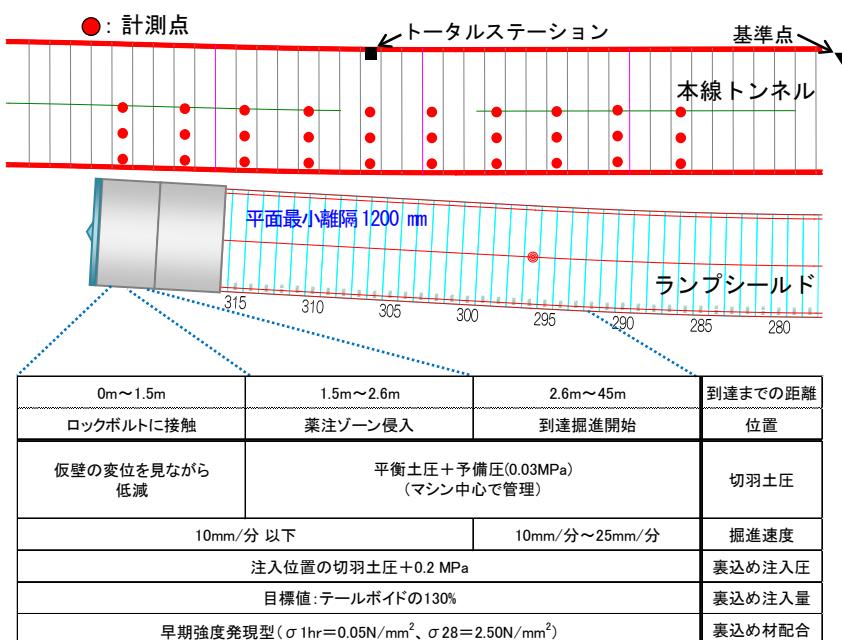


図-4 Aランプシールド到達部掘進管理

表-1 二次元はり一ばね解析の検討概要

	シールド掘進時	シールド通過後
荷重	土水圧+掘進時の計画切羽圧の30%~100%が側方から作用 計画切羽圧は主働土圧+水圧	土水圧 (Aランプ近接側の側方土圧を0%~50%に低減)
地盤ばね	全周設定	Aランプ通過側90度を除いた範囲
許容応力度	長期許容応力度に対して評価	

った。この施工結果が得られた要因は、事前検討を踏まえた綿密な掘進管理の実施に加え、Aランプシールドが最後の掘進であったため、先行する3本のシールドの掘進による本線トンネルへの影響を考慮した掘進管理計画を事前に立案できたことも要因の一つである。

また、全てのランプシールド掘進に共通した変形量の特徴として、掘進時の影響は小さく、掘進後に影響が大きくなり、シールド通過後の残留変位が最大変位を示す結果となった。

4. 施工実績を踏まえた影響検討

馬場出入口シールドは、本線シールドと位置や離隔が三次元的に変化しながらに近接し、併設して掘削されるため、シールドの掘進による地盤および併設するトンネルへの影響は三次元的な挙動となる。この影響を適切に把握するためには、三次元モデルによる解析を実施することが望ましいと考える。そこで、施工後に施工状況を踏まえた三次元FEM解析を用いて地盤挙動の再現を試みた。本線トンネル内に設置した代表的な計測点[1]から[3]³⁾における計測値、はり一ばねモデルによる検討結果、三次元FEM解析を比較した結果を図-5および図-6に示す。

比較の結果、はり一ばねモデルによる検討結果は安全側の評価となるものの、特に計測点通過前の挙動を過大に評価する傾向がある。三次元FEM解析では、現場の状況や施工時のトンネル掘進の影響を考慮することで、地盤挙動をより適切に再現できることがわかる。

5. おわりに

本稿では、地下高速道路のシールドトンネル掘進における地盤の挙動ならびに影響検討について、施工実

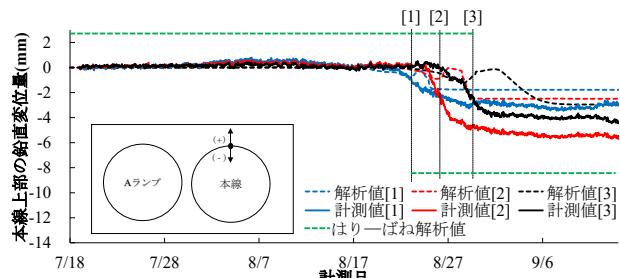


図-5 本線トンネル天端（クラウン部）の鉛直変位の比較

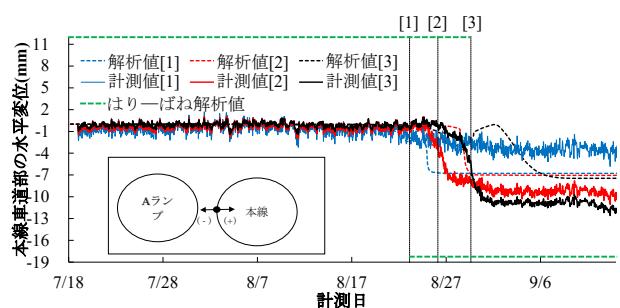


図-6 本線トンネルスプリングライン部の水平変位の比較

績に基づき、併設されるトンネルに求められる留意すべき事項をまとめた。

高速道路のシールドトンネルは、大断面であること、加えてシールドトンネル同士の併設、既存の構造物への近接施工といった特有の条件下で施工されることが多い、施工による影響が複雑となる要因が多い。首都高速道路においては、今後都市内で、日本橋シールドや新京橋連結路シールドの施工が予定されている。地下鉄をはじめ多くの幅狭する地下構造物に近接するため、これまで以上に精度の高い影響検討、施工が求められる。また、他高速道路会社においても国内最大級のシールドトンネルの発進が予定されており、安全なシールドトンネルの施工に向けた技術の一層の発展が望まれる。

本稿が、今後のシールドトンネルの掘進管理に関する検討の一助となれば幸いである。

参考文献

- 田嶋仁志・岸田政彦・川田成彦・小林靖典・斎藤正幸：併設シールドトンネルの影響評価方法に関する検討、トンネル工学研究・報告集、第13巻、pp.407-412、2003。
- 首都高速道路株式会社、<https://www.shutoko.co.jp/company/enterprise/road/committee/2024>
- 遠藤啓一郎・赤木寛一・Alireza AFSHANI・土橋浩：離隔が三次元的に変化する併設トンネルにおける新設シールド掘進の影響評価、土木学会論文集F1（トンネル工学）、Vol. 77、No. 1、pp. 60-75、2021。

（原稿受理 2020.5.1）

報告

鉄道シールドトンネルにおける掘進管理と影響予測の取組み

Ground behavior and soil mechanics in railway shield tunnel management of shield tunnel excavation and methods for predicting

焼田 真司 (やきた しんじ)

東海旅客鉄道 (株) 中央新幹線建設部 担当部長

e-mail: shinji.yakita@jr-central.co.jp

仲山 貴司 (なかやま たかし)

(公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部

トンネル 主任研究員 (上級)

キーワード：シールドトンネル，掘進管理，影響予測

1. はじめに

本稿では、鉄道シールドトンネルを対象として、掘進管理と影響予測解析に関する取組みを報告する。

2章「掘進管理に関する取組み」では、まず中央新幹線におけるシールドの概要を紹介するとともに、シールド掘進における主たる管理項目のうち、切羽土圧、泥土の品質・性状、掘削土量および裏込め注入に関する実現場での取組み例を紹介する。一方、3章「影響予測解析に関する取組み」では、鉄道分野における基準や関連図書を紹介するとともに、鉄道総研が取り組んでいる研究のうち、トンネル交差部の影響予測解析、軟弱地盤における長期挙動予測解析について紹介する。

2. 掘進管理に関する取組み

2.1 はじめに

中央新幹線は、既に高度に市街化された首都圏、中京圏において、鉄道で初めて大深度地下使用の認可を受け、シールド工法でトンネルを構築している。

しかし近年、シールド工事に起因した陥没事故が複数事例発生し、これを受け 2021 (令和 3) 年には設計・施工に関する技術的知見を取りまとめた「シールドトンネル工事の安全・安心な施工に関するガイドライン」(以下、「ガイドライン」と記す) が作成された。本章では、類稀な大口径、大深度、高水圧、長距離シールド工事における掘進管理計画の概要を報告する。

2.2 中央新幹線のシールドの概要

首都圏では、東海道新幹線の駅直下に設ける品川駅から神奈川県相模原市内に設ける次の駅までの約 37 km を 4 工区に、その駅から相模川左岸までの約 3.6 km を 1 工区、中京圏では、愛知県春日井市内から名古屋駅までの約 20 km を 3 工区に分け、シールド工法で施工する (図-1, 図-2)。

シールド形式は地盤条件、施工条件等を考慮し、中京圏の一部で泥水式を採用したが、他の工区では、主たる添加材を気泡とする泥土圧としている。



図-1 首都圏の位置図



図-2 中京圏の位置図

2.3 シールド掘進管理計画

ガイドラインに準拠したうえで、各工区特有の施工条件を考慮し、かつ、有識者で構成される「トンネル施工検討委員会シールドトンネル部会」での審議を踏まえ、掘進管理計画を策定している。このうち、首都圏で主として固結シルト層を掘進している工区の主な考え方を示す。

(1) 切羽土圧管理

切羽土圧の管理は、数多の掘進管理項目の中でも特に重要であると考えている。固結シルト層とその一部に介在している砂質土層では、それぞれ作用する水圧も土圧も異なると考えるが、地盤そのものは硬質で自立性が高いことから、介在砂質土層の間隙水圧を保持することで切羽の安定は確保できると考えている。そして、その間隙水圧は掘進停止時に計測される停止時土圧とほぼ等しいものと考え、正しい停止時土圧の把握に努めている。

よって、管理土圧は、停止時土圧に土圧と変動圧を見込むこととし、土圧は緩み土圧程度の鉛直土圧に適度な土圧係数を見込み、粘着力は評価していない。

なお、このような条件下で掘進した事例はなく、既往の知見もないことから、絶えず、掘進データの分析と検証に努め、必要に応じて適宜見直しを図る予定である。

(2) 泥土の品質、性状管理

安定した泥土圧シールドの掘進に不可欠である泥土の塑性流動性を管理するため、チャンバー内から泥土を直接採取できる「土砂サンプリング装置」を新たに開発し、すべての泥土圧シールドに装備した(図-3)。

装置の構造は工区によって異なり、加圧状態でサンプリングできるものとできないものがあるが、各工区で適切に活用し、掘進管理に反映している。詳細は今後改めて報告したい。

(3) 掘削土量管理

掘削土量は理論土量を設定したうえで、これと計測された排土量とを比較する、取込み率で管理すべきであるが、平均からのばらつきで評価する、所謂トレンド管理で行われることが一般的であった。それは、理論土量は事前調査では完全に地盤を再現できないことや、間隙水や添加材の挙動、更には余掘りした土量の取込み等について高精度に把握する方法が確立されて



図-3 土砂サンプリング装置の例

いないことによると考えている。

しかし、ガイドラインには「排土量管理の精度の維持・向上（中略）に努めることが必要である」と記載された。このため、土砂サンプリング装置を活用し、各種条件を仮定するなどして理論土量と取込み率の精度向上を目指して取り組んでいる。こちらも詳細は改めて報告したい。

(4) 裏込め注入管理

従来の一般的な浅深度シールドでは、裏込め注入率はテールボイドの130～170%程度、注入圧は切羽圧+200 kN/m²とされている。しかし、大深度硬質地盤で自立性が高く、地表面の変状計測の結果を掘進管理に直ちにフィードバックできないこともあります、これまでの延長線で管理することはできないと考えている。

現在、初期掘進および本掘進で得られたデータを検証しているが、注入圧については切羽土圧の変動やテールシールの状況に注視しながら設定している。また、注入率についてはコピーカッターで余掘りした分を含めた掘削外径を基準としたうえで、余掘り土量の取込み率を考慮しながら整理している。

2.4 まとめ

大口径、大深度、高水圧、長距離というこれまでに例のないシールド工事における掘進管理計画の概要を簡単に紹介した。現時点（令和7年3月末）での総掘進延長は首都圏が約2.7km、中京圏が約0.5kmで全体の一割にも至っていない。しかし、これまでのシールド工法の基本を忘れずに、中央新幹線特有の条件を踏まえつつ、データの分析と検証に努め、掘進管理の精度を高めていきたいと考えている。

3. 影響予測解析に関する取組み

3.1 はじめに

現在、鉄道分野におけるシールドに関わる基準や関連図書はさまざまなものがある。主なものとして、新設設計の基準については、近年、性能照査型設計体系が導入された「鉄道構造物等設計標準（トンネル）」に統合された。より具体的な方法については「鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル） シールド工法編¹⁾」にて解説するとともに、計算例なども整備したところである。また、他の構造物と共にまとめた書籍であるが、維持管理については「鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編） トンネル²⁾」において、近接施工については「都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル」（以下、「近接施工マニュアル」と記す）³⁾を整備している。これらの2冊については、発刊から15年以上が経過しているものの、現在もさまざまな場面で広く活用頂いている。

近接施工マニュアルについて更に触ると、この書籍では、新設構造物の種類毎に図-4のような近接程度の区分図を示しており、近接施工にあたるか否かを簡易に判定することができる。新設構造物が「要注意範囲」または「制限範囲」と重なる場合が近接施工にあたる。また、近接施工にあたる場合には、影響予測と対策検討を行うこととしており、このための影響予測解析法や対策事例、計測監視の方法も掲載している。

図-4のような基軸となる影響評価の方法については、汎用性が非常に高く、永続的に利用され続けると考えられている。しかし一方で、影響予測解析法や対

策事例、計測監視の具体的な方法の部分については、技術の進歩とともに改良が進められ、さまざまな方法が提案されている。

新設設計については、前述したように近年に基準が改訂されたため、このような新たな方法は概ね文献1)に取り込まれている。本章では、近接施工、維持管理に関する影響解析法の研究の取組みとして、著者らが取り組んでいるトンネル交差部の影響予測、軟弱地盤における長期挙動予測についての概要を紹介する。

3.2 トンネル交差部の影響予測解析⁴⁾

都市部にトンネルを新設する場合、既設トンネルのごく近傍に交差して建設せざるを得ない場合があるが、近年は、地下空間利用の過密化に伴い、その離隔が小さくなる傾向にある（図-5）。このような近接施工の場合、地盤変位を抑制するため、あらかじめ薬液注入による地盤改良などの実施が検討されるが、特に、既設トンネルとの離隔が10m以下のような非常に近接する場合は地盤の変形を予測することが難しいため、地盤条件に応じた定量的な検討が困難であった。

文献4)は、このような場合にも定量的に影響程度を予測し、合理的に設計施工するための影響予測解析を検討した事例である。この解析手法には、トンネルを三次元モデルで精緻にモデル化しつつ、中間地盤の相互作用はばねで表現したという特徴がある（図-6）。

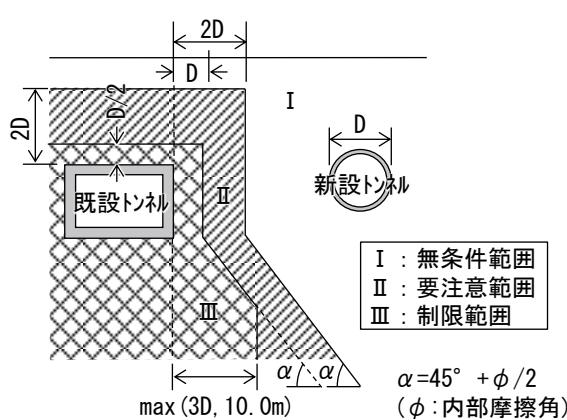


図-4 近接程度の判断区分図の例³⁾

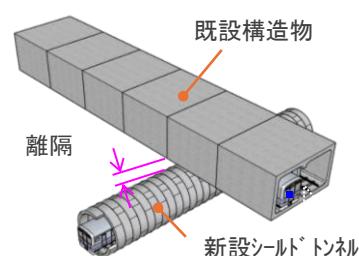


図-5 トンネル同士の交差のイメージ図

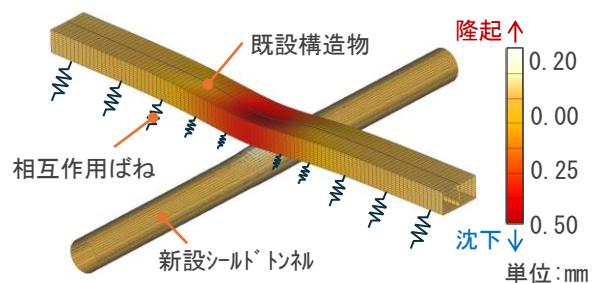
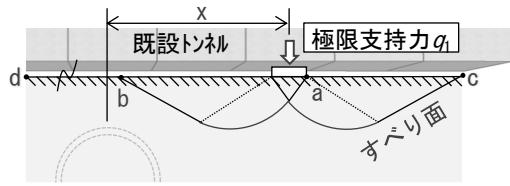
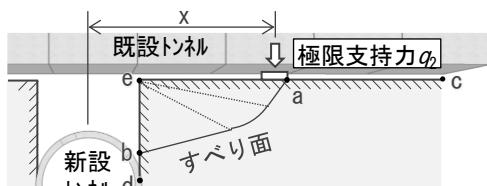


図-6 影響評価のシミュレーション例



a) シールド通過前



b) シールド通過後

図-7 相互作用ばね値の算定方法の概念図

新設シールドと既設トンネルが非常に近接する場合には、トンネルの形状や構造とともに、新設シールド近傍に少なからず発生する緩み領域の影響が無視できない。これらを全て精緻にモデル化すると計算コストが膨大となるため、文献4)では、シールド通過後は安全側に緩み領域内の地盤はないものと仮定し、シールド通過前後の地盤の安定度に応じてばねの硬さを変化させることで表現している(図-7)。この精度についてはトンネルの近接工事を模擬した土槽実験により検証しており、交差位置に近づくにつればねが軟らかくなる傾向や既設トンネルに生ずるひずみなどを適切に再現できることを確認している。

3.3 軟弱地盤における長期挙動予測解析^{5), 6)}

都市部の軟弱地盤中に建設されたシールドトンネルには、トンネル施工後に生じた変状と施工中に生じた変状がある。トンネル施工後に生じた変状の場合は、セグメント覆工に生じる変形やひび割れ等の変状の進行性が大きい場合が多く、対策が必要となる場合があるが、施工中に生じたひび割れとの区別が困難であるという課題があった。文献5), 6)は、圧密に伴うトンネル施工後の変状進行を予測できる再現解析法と、トンネル施工中に生じた変状を推定する接触解析法を検討した事例である。再現解析法は、トンネルの長期間の地盤の圧密に伴って生じる変形の解析とひび割れ進展解析を組み合わせたもので、圧密によって生じたひび割れの位置が特定でき、時系列で覆工の応力増分を把握することができることを確認している(図-8)。また、接触解析法によるシールド機と覆工の接触シミ

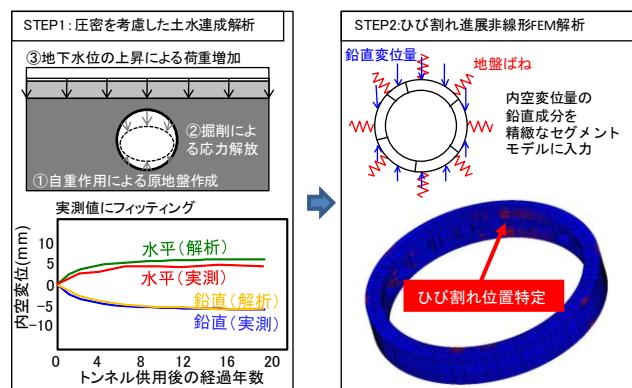


図-8 再現解析法の流れ

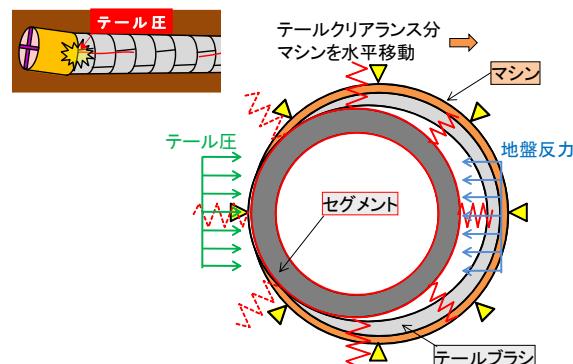


図-9 接触解析法の概念

ュレーションにより、施工中のシールド機の姿勢コントロールによって生じたひび割れを検証することができるることを確認している(図-9)。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修 公益財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル）シールド工法編、公益財団法人鉄道総合技術研究所、2022.
- 2) 国土交通省鉄道局監修 公益財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル、公益財団法人鉄道総合技術研究所、2007.
- 3) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル、2007.
- 4) 仲山貴司・三輪陽彦・清水達貴：トンネル同士が極近接する工事の影響予測解析法、日本鉄道施設協会誌、Vol. 62, pp. 286-289, 2024.
- 5) 燃田真司・仲山貴司・津野究・高橋博樹・小宮一仁・赤木寛一：地盤沈下に起因するシールドトンネルの長期変形挙動に関する解析的検討、土木学会論文集C, Vol. 69, No. 4, pp. 457-468, 2013.
- 6) 木股浩孝・仲山貴司・津野究・粥川幸司・小西真治：シールドテールとセグメントの接触を考慮した施工時荷重の解析的検討、土木学会論文集F1, Vol. 69, No. 1, pp. 73-88, 2013.

(原稿受理 2025.4.21)

報告

電力シールドトンネルにおける地盤挙動と土質力学

Ground behavior and geotechnical mechanics on the power shield tunnel

岡 滋晃 (おか しげあき)

東京電力ホールディングス（株） 土木・建築統括室

e-mail: oka.shigeaki@tepco.co.jp

伊藤 喜広 (いとう よしひろ)

東電設計（株） 社会基盤ユニット ジオフロント本部

キーワード：地中送電用トンネル、中位の粘性土、有効土圧

1. はじめに

東京電力パワーグリッド（株）（以下、東電 PG と称する）は、1964 年の東京五輪前後から始まった首都圏の電力需要増に対応するために、地中送電線路の建設を進めてきた。図-1 に示すように、地中送電ケーブルを収容し管理用の通路を有する地中送電用トンネルの設備量は、2018 年度末で約 420 km に達している。

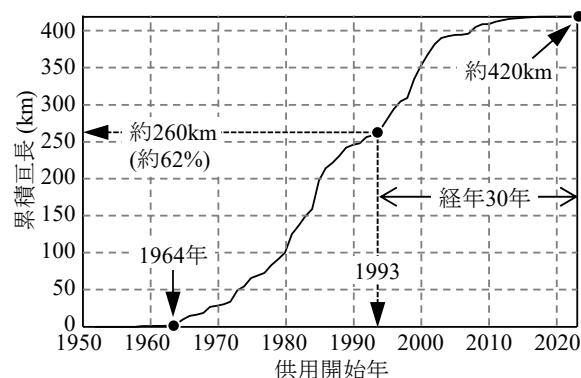
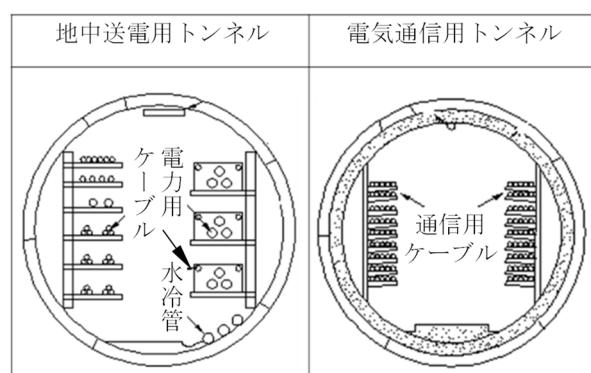
東電 PG の地中送電用トンネルは都市部に多いことから、建設工法も都市トンネル工法であるシールド工法によるものが全体の半分程度を占めている。図-2 に示すように、地中送電用トンネル内には電力用ケーブルが収容されるが、外径は最大でも 5 m 程度で規模としては中小径である。しかし、都心湾岸部の深度 40 m 付近には、 N 値が $4 \leq N < 8$ の中位の粘性土と呼ばれる粘性土地盤が分布する場合がある。このため、トンネル掘進後にセグメントに発生する荷重を把握し、適切な荷重のセグメント設計への反映が課題となっていた。

セグメント設計時に考慮すべき荷重については、トンネル周辺の土質条件や地下水位等の条件のほか、既往の設計実績に基づく緩み土圧の適用等が挙げられるが、詳細は設計者の工学的判断に委ねられている。したがって、安全側となる考え方を採用して土水一体かつ全土被り圧による設計を行うと、セグメント厚さが不合理に厚くなることや、RC セグメントでは構造が成立せず合成セグメントの採用を検討する場合がある。

一方、中位の粘性土地盤に建設されたシールドトンネルで、過去に実施された土水圧の計測結果によれば、セグメントには静水圧程度の水圧が作用し、鉛直有効

土圧は全土被り圧以下であったとの報告がある。このことから、自立性が高い場合の中位の粘性土地盤では、全土被り圧以下の鉛直有効土圧を設計で適用できる可能性があると考えられる。

以上を背景として、東京電力ホールディングス（株）では過去、中位の粘性土地盤での 3 か所のシールド工事における土水圧の計測を実施している。本稿では、計測事例とともに中位の粘性土地盤でセグメントに発生する土圧の挙動を検討した内容について報告する。

図-1 地中送電用トンネルの設備量¹⁾図-2 電力と通信のインフラトンネルの比較¹⁾

2. 中位の粘性土地盤における掘進時の土水圧の現場計測

2.1 計測概要

図-3～図-5に、地中送電用トンネルにおいて、中位の粘性土地盤を通過し、かつ土水圧の計測を実施した3か所のトンネル（以降、トンネルA～Cと称す）の計測断面と土水圧の計測配置を示す。トンネルCは、地質区分上は有楽町層（粘性土層）で施工されたが、 N 値は4以上であり、七号地層（粘性土層）に相当する地盤条件であった。また、いずれのトンネルにおいても土圧計測にはパッド式土圧計、水圧計測には間隙水圧計を用いた。特に、土圧計ではテール通過時の裏込め注入材を介して、地山側からセグメントに作用する圧力を計測した。一方、間隙水圧計では、後続台車が通過した後、セグメントおよび裏込め注入層を削孔し地下水をシールド内に導水して水圧を計測した。したがって、土圧計の計測値は、セグメントに作用する土圧と水圧の合計であり、間隙水圧計で得られる計測値は、セグメントに作用する水圧となる。このことから、土圧計の計測値から間隙水圧計の計測値を差し引いた値をセグメントに作用する有効土圧とみなした。

2.2 計測結果

図-6にトンネルA～Cの土圧計測結果と間隙水圧計測結果を示す。

図-6に示したトンネルA～Cの間隙水圧計測結果より、全てのトンネルで裏込め注入圧の影響を受けるが、数日後にはほぼ一定値に収束していた。また、いずれのトンネルにおいても間隙水圧は静水圧とほぼ同等となった。そこで、図-6には、土水圧が概ね一定となる時期における、土圧計の計測値から間隙水圧（間隙水圧計の計測値を土圧計位置の静水圧に換算した値）を差し引いた有効土圧を併記した。

図-6の土圧計測結果と間隙水圧計測結果の比較より、セグメントに作用する土水圧の大部分は間隙水圧が占めたことがわかる。さらに、土水圧から間隙水圧を差し引いた鉛直有効土圧は数十 kN/m²程度であり、今回の土被り厚さが20 m以上ある現場の全土被り圧と比較しても非常に小さな計測結果となった。

以上より、トンネル掘削深度付近の中位の粘性土地

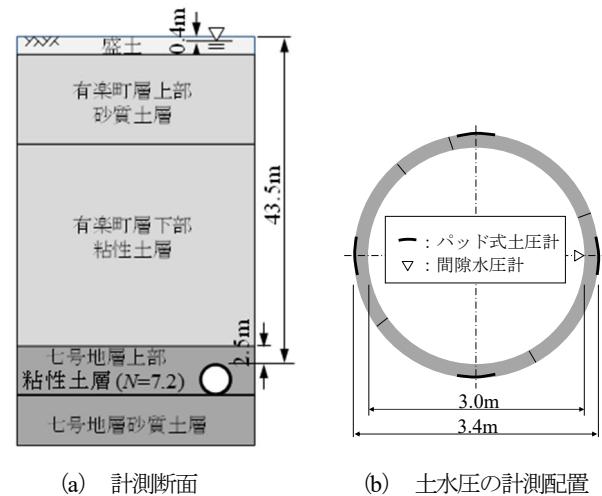


図-3 トンネルAの計測概要²⁾

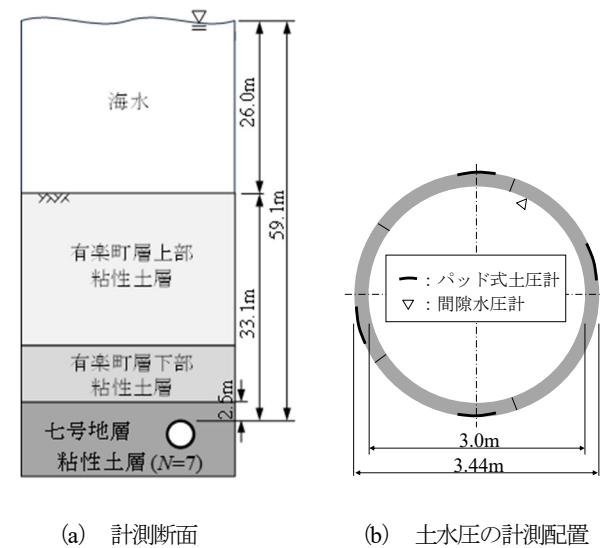


図-4 トンネルBの計測概要³⁾

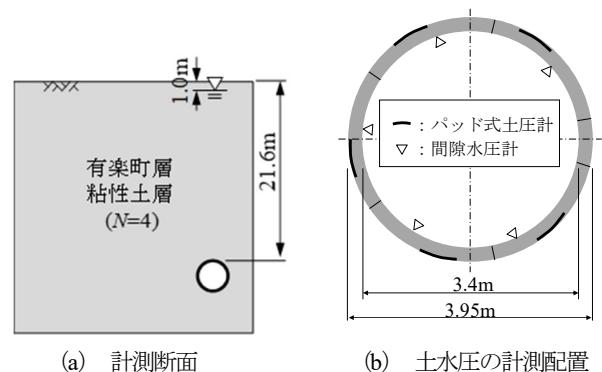


図-5 トンネルCの計測概要⁴⁾

盤は土水分離地盤として扱うことができ、セグメントには、土水圧から静水圧相当の間隙水圧を差し引いた鉛直有効土圧が作用すると考えられる。

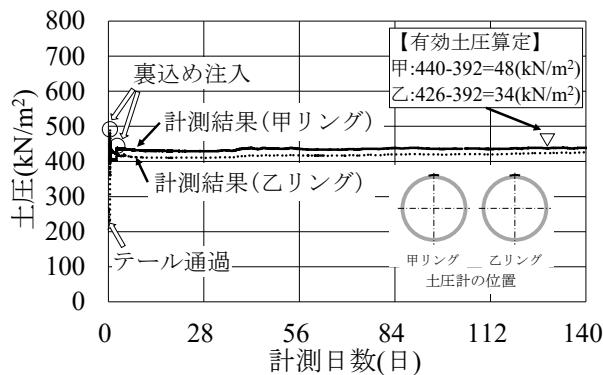
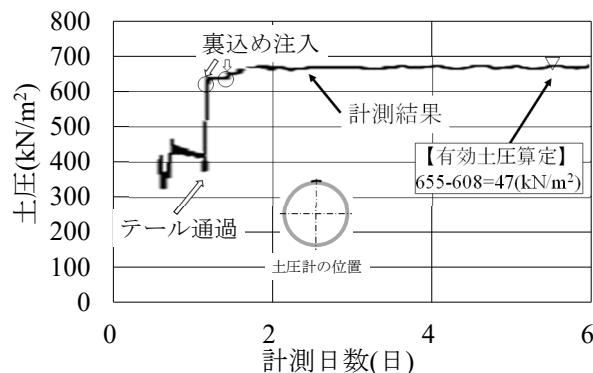
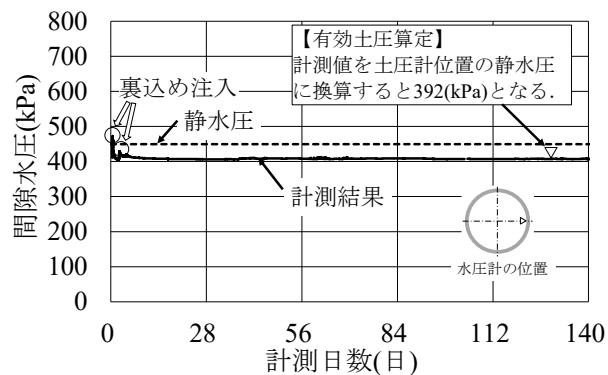
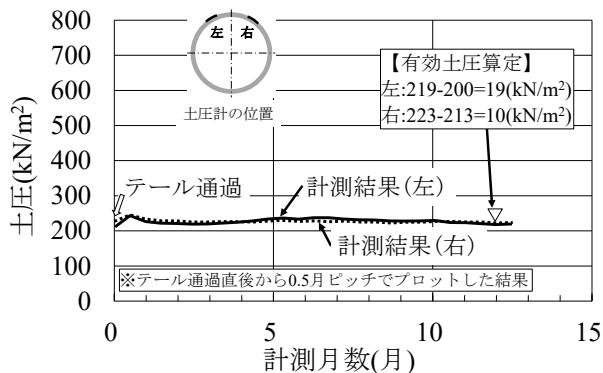
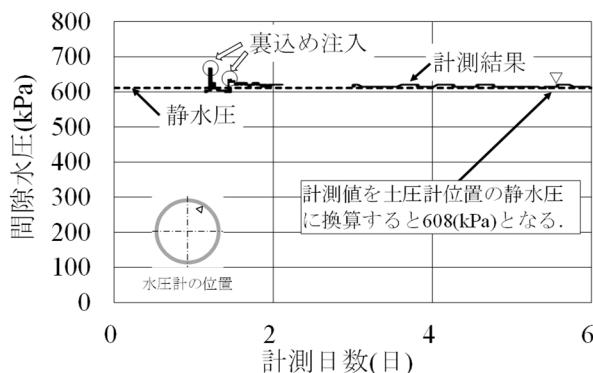
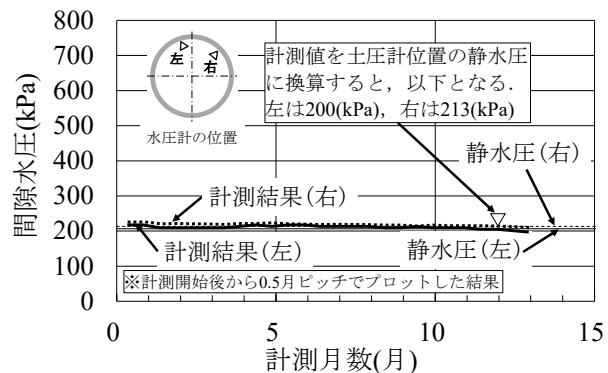
(a) トンネルA²⁾(b) トンネルB³⁾(c) トンネルC⁴⁾

図-6 各トンネルの土圧計測結果（左）と間隙水圧計測結果（右）

3. 二次元剛塑性解析による有効土圧の挙動の把握

3.1 挙動把握に使用する解析モデル

前章に示した現場計測結果より、中位の粘性土地盤のシールド工事では、セグメントに作用する鉛直方向の土水圧を分離して扱うことができ、土圧を鉛直有効土圧、水圧を静水圧として扱うことができると考えられる。そこで、金子ら⁵⁾の研究を参考に、トンネル横断

面を対象とした二次元剛塑性解析により、地盤の有効土圧の挙動を確認した。

構成則には、関口と太田⁶⁾が提案した粘性土の降伏関数を破壊基準に適用する、いわゆる関口・太田モデルを使用した。また、図-7に示すように、解析モデルはトンネル断面を二次元の半断面でモデル化した。解析領域の大きさについては、解析領域の右端および下端の境界の影響がトンネル位置で現れていないかを、解析における変位速度の発生状況を参考にして設定し

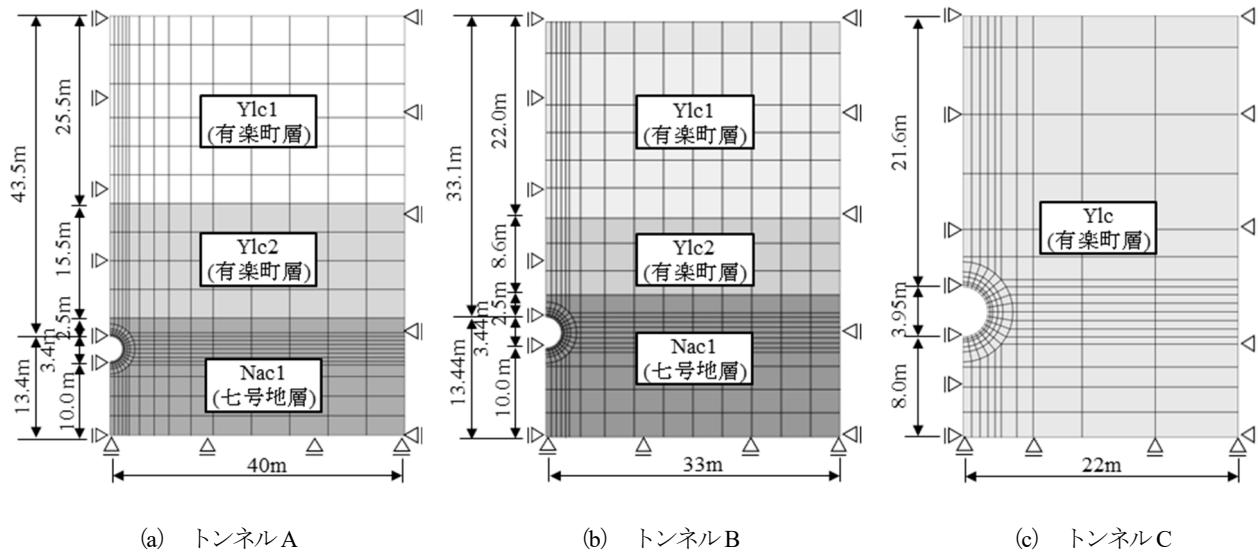


図-7 解析モデル

表-1 入力物性値

物性値	単位	トンネルA	トンネルB	トンネルC	設定根拠
湿潤単位体積重量	γ	kN/m ³	17.0	17.0	17.2
非可逆比	A	—	0.890	0.900	地質調査結果より設定
限界応力比	M	—	1.109	1.2	$M = 6 \sin(\phi') / (\beta - \sin(\phi'))$
過圧密比	OCR	—	1.70	2.0 ^{注1)}	地質調査結果より設定
先行時静止土圧係数	K_0	—	0.53	0.50	$K_0 = 1 - \sin(\phi')$
原地盤静止土圧係数	K_i	—	0.68	0.69	$K_i = K_0 \times OCR^{0.54} \exp(-I_p/122)$
有効内部摩擦角	ϕ'	°	27.9	30.0	地質調査結果より設定
塑性指数	I_p	—	15.4	20.0	地質調査結果より設定

注1) タンネルBは逆解析により同定した。

注2) タンネルCは既往文献をもとに設定した。

た。その結果、水平方向の解析領域の大きさはトンネルの土被り厚さ程度とし、トンネル下端から解析領域下端までの大きさは外径の3倍程度とした。

地盤掘削のモデル化は、掘削面に均一の単位変位速度1.0をトンネル中心方向に向けて各節点に強制的に与えることで模擬した。

表-1にトンネル通過地層における入力物性値を示す。入力物性値は、地質調査結果による設定を基本としたが、一部の入力物性値は有効土圧の計測結果からの逆解析により同定した。

なお、地下水位は図-3～図-5に示すように、トンネルAとトンネルCは地表面付近にあることから、解析では便宜上、地下水位を地表面に設定した。また、

トンネルBは海平面に設定した。

3.2 解析結果と挙動の考察

トンネル周辺地盤の挙動として、図-8にせん断応力比が極大となり破壊する要素の解析結果を示す。同図でせん断応力比が極大となり破壊する要素のみを示した理由は、今回ターゲットとしているトンネル上半に作用する鉛直有効土圧との関連が強いと考えられるためである。図-8に示すように、せん断応力比が極大となり破壊する範囲は、トンネル上半から斜め方向に立ち上がり、ある程度進んだ位置から地表面に向かって鉛直に立ち上がるエリアが該当する。以上のような地盤の挙動により発生した有効土圧は、表-2に示す

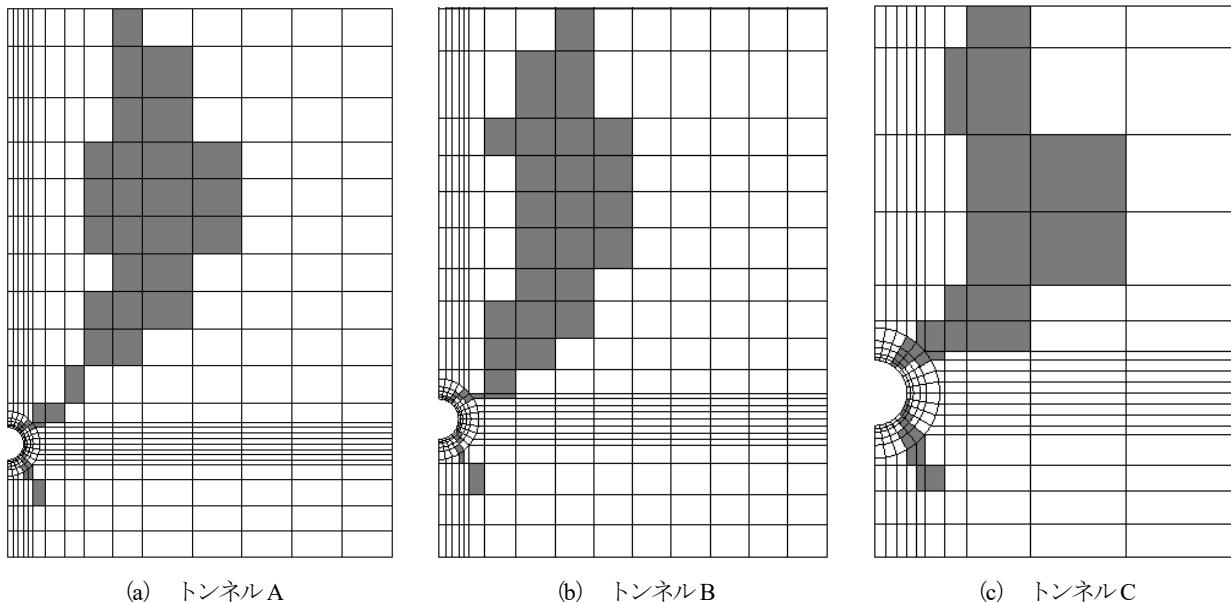


図-8 せん断応力比が極大となり破壊する要素の解析結果

ように、2章で示した計測結果とほぼ一致する。このことから、自立性が高い場合の中位の粘性土地盤では、全土被り圧以下の鉛直有効土圧を設計で適用できると考えられる。

4. おわりに

現場計測結果より、中位の粘性土地盤のシールド工事では、セグメントに作用する鉛直方向の土水圧を分離して扱うことができる事が示唆された。また、二次元剛塑性有限要素解析により、自立性の高い中位の粘性土地盤における地盤の挙動を表現することができた。紙面の都合上割愛したが、上述の成果をもとに著者らは手計算により有効土圧の計算手法も開発している⁷⁾。このような地盤におけるシールド掘削工事は今後も発生すると考えられる。したがって、今後も引き続き、安全かつ安心なトンネル構造物の施工および構築のため、設計上考慮すべき土圧の精度向上を検討する予定である。

参考文献

- 1) 岡滋晃・中島陽・吉本正浩：地中送電用シールドトンネルの維持管理，コンクリート工学，Vol. 62，No. 1，pp. 83-88, 2024.
 - 2) 金城佑紀，出雲力斗，小寺洋，斎藤仁：大深度・高水压かつ塩害環境下での RC セグメントの設計—東京電力

表-2 有効土圧の解析結果と計測結果の比較

トンネル	解析結果	計測結果
	(kN/m ²)	(kN/m ²)
トンネルA	55.8	34
トンネルB	47.8	47
トンネルC	18.6	8~16

葛西橋通り付近管路一, トンネルと地下, Vol. 48, No. 12, pp. 49-59, 2017.

- 3) 斎藤仁, 中島崇, 竹林基, 白井伸一: 東京湾海底下七号地層におけるセグメントの荷重計測結果について, 土木学会第 60 回年次学術講演会, pp. 219-220, 2005.
 - 4) 有泉毅, 岡留孝一, 長屋淳一: シールド洞道に働く荷重計測結果とその分析について, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第 8 卷, 土木学会, pp. 367-372, 1998.
 - 5) 金子俊輔, 日下部治, 有泉毅, 山崎剛: 剛塑性有限要素法による粘性土地盤中トンネルの覆工作用土圧に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 4, pp. 846-856, 2009.
 - 6) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clays, Int. Proc. of Speciality Session 9, 9th ICSMFE, pp.229-238, Tokyo, 1977.
 - 7) 伊藤喜広・篠口洋子・岡滋晃, Alireza AFSHANI・金子俊輔・斎藤仁・赤木寛一: 中位の粘性土地盤におけるシールドセグメント設計時の鉛直有効土圧の算定方法, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 77, No. 2, pp. I-44-I 57, 2021

(原稿受理 2025 4 20)

泥水式シールド工事における地盤挙動と土質力学

Geotechnical behavior and soil mechanics on slurry shield construction

中川 雅由 (なかがわ まさよし)

鹿島建設 (株) 土木管理本部 統括技師長

e-mail: nakagmas@kajima.com

キーワード：泥水式シールド，地盤挙動，泥水性状管理，切羽圧管理

1. はじめに

本稿では、泥水式シールド工事における地盤挙動と土質力学と題して、シールド掘進時における泥水性状管理、切羽圧管理、掘削土量管理と地盤挙動に着目し、具体的な施工事例を含めて土質力学の観点から泥水式シールドの掘進管理について紹介する。

2. 泥水式シールドの切羽安定機構

2.1 泥水式シールドの切羽安定メカニズム

泥水式シールドのチャンバー内は管理された泥水圧と比重等を持つ泥水によって満たされ、密閉加圧状態において切羽安定を図っており、次に示す三つの作用の総合的な効果によって保持されている（図-1）。

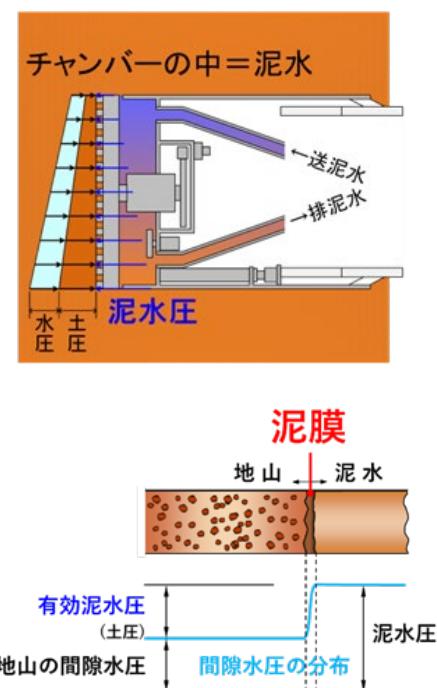


図-1 泥水式シールドの切羽安定メカニズム

- ・泥水圧により土圧および水圧に対応する
- ・泥水が切羽面に不透水性の泥膜を作り、泥水圧を有効に作用させる
- ・泥水が切羽面からある程度の範囲の地盤に浸透して切羽に粘着性を与える

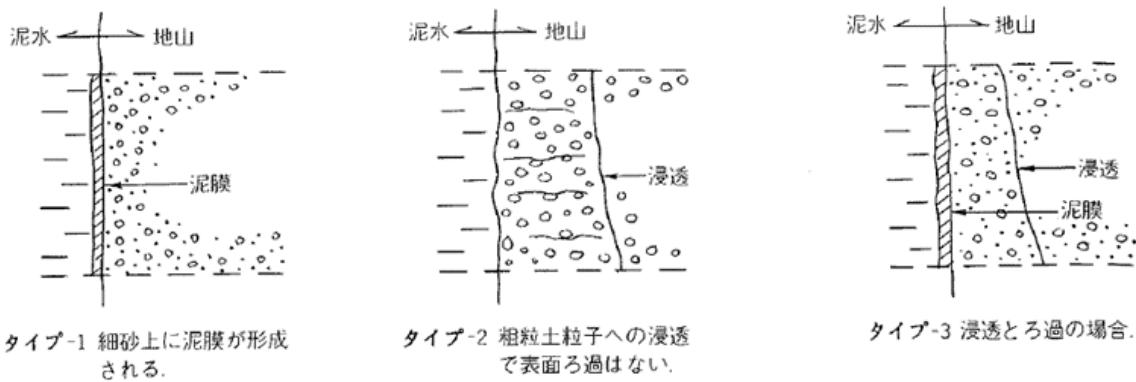
したがって、切羽安定機構には、切羽安定に最も有効な泥水性状（比重、ろ過特性、粘性、砂分含有率等）の調整と切羽の土圧および水圧に対抗した泥水圧の調整保持機能が必要不可欠となる。

2.2 泥膜および泥水浸透域による切羽安定

泥水式シールドでは、チャンバー内の加圧された泥水が地山への浸透に伴い、泥水中の砂分や粘土分が地山の間隙に詰まりし、ろ過されることにより、切羽面に透水係数が非常に小さい泥膜が形成される。この泥膜形成によって、切羽面における圧力損失が軽減されるため、泥水圧が有効に作用し、切羽面の変形および崩壊を防いで安定を確保している。

Müller らは切羽のろ過形態¹⁾を以下の3タイプに分類している。

- ・タイプ1：泥水の浸透がほとんどなく、泥膜のみ形成されるもので、透水係数の小さい粘性土が該当する
- ・タイプ2：地山の間隙が大きく、泥水は浸透するのみで表面ではろ過されず、泥膜の形成がないもので、透水係数の大きな砂礫層が該当する
- ・タイプ3：タイプ1とタイプ2の中間で泥水が浸透しつつ泥膜を形成されるもので、砂質土が該当する
泥水式シールドでは、切羽に泥膜が形成された後にカッターによって連続して切削されて新しい切羽が現れる。泥水式シールドのカッターフェイスは、直径に

図-2 地山壁面における貫入とろ過²⁾

より回転数は変わるが、ビット取付け箇所数から平均すれば、同一箇所を掘削する時間間隔は約10~15秒となる。一方、既往の実験²⁾では、有効な泥膜の形成時間は1~2秒であり、中間状態の場合でも2~4秒後には有効な泥膜が形成されることが確認されており、ある間隔で切羽が切削されても十分に泥膜は形成される。

2.3 泥水性状および切羽圧の管理

泥水式シールド掘進時における地盤挙動を最小化するためには、土質に適合した泥水性状で適正な切羽圧を保持しながら掘進することが重要である。特に、細粒分含有率や均等係数が小さい地盤、透水性が高い地盤では切羽崩落リスクが高いため、泥水性状と切羽圧の管理には注意が必要である。また、シールド掘進時の逸泥や配管閉塞発生時、掘進開始時やセグメント組立てにおけるジャッキ操作時には泥水圧が変動するため、変動を考慮して管理範囲内に収める管理が必要となる。

泥水の品質管理の基本は、地盤種別に応じた泥水の比重（密度）と粘性の管理である。

泥水の粘性管理には、通常ファンネル粘度が用いられている。ファンネル粘度は、イールドバリューに影響を受け、イールドバリューが大きくなるとファンネル粘度も大きくなるが、その程度は含まれるベントナイトや粘土、高分子材料を使用する場合にはその種類によっても異なる。したがって、掘進中の日常管理としてファンネル粘度を用いながら、定期的にイールドバリューも確認することが望ましい。

また、泥水は、繰り返して使用すると、裏込め注入材、地下水、地盤の陽イオン等により劣化して、懸濁・

分散状態から凝集状態へ変化し、マッドケーキが分厚く、軟らかい透水性の高い膜となり、泥水圧を伝達しにくい状態となるため注意が必要である。

3. 工事における切羽管理と地盤挙動

3.1 工事概要

(1) 工事の概要

泥水式シールド工事の事例として、洪積地盤と沖積地盤を長距離掘進した下水管渠新設工事の例を紹介する。工事の主要諸元を表-1に示す。

表-1 工事の主要諸元³⁾

項目	内容												
工事名	大隅～十八条幹線下水管渠築造工事 (その10)												
工事場所	大阪市淀川区十八条1丁目8 ～東淀川区菅原6丁目1												
発注者	大阪市建設局												
施工者	安藤・間・大本組・中林建設・大勝建設 J V												
工期	2015年3月25日～2020年3月31日												
主要工事諸元	<table border="1"> <tr> <td>シールド外径</td><td>Φ6.00m</td></tr> <tr> <td>掘進延長</td><td>L=4079m</td></tr> <tr> <td>土被り</td><td>H=12.7m～25.2m</td></tr> <tr> <td>最大水圧</td><td>0.3MPa</td></tr> <tr> <td>最小曲率</td><td>Rmin.=30m</td></tr> <tr> <td>特殊条件</td><td>旧河道域を掘進</td></tr> </table>	シールド外径	Φ6.00m	掘進延長	L=4079m	土被り	H=12.7m～25.2m	最大水圧	0.3MPa	最小曲率	Rmin.=30m	特殊条件	旧河道域を掘進
シールド外径	Φ6.00m												
掘進延長	L=4079m												
土被り	H=12.7m～25.2m												
最大水圧	0.3MPa												
最小曲率	Rmin.=30m												
特殊条件	旧河道域を掘進												

本工事は、大阪市が淀川の北部地域において建設する「淀の大放水路」のうち、菅原立坑～十八条立坑の約4080mの区間に泥水式シールド工法で仕上がり内径Φ5.25mの下水管渠の新設を行うものである。路線概要図を図-3に示す。

(2) 土質概要

施工箇所では、表層より軟弱な粘土・砂・礫からな

図-3 シールド工事路線図³⁾

る沖積層が分布している。

掘進する地質は、前半部では土被りが大きく、大阪層群～上部洪積層であり、発進付近の大阪層群（Oc, Os, Og）から天満礫層（Tg）を通過し、砂礫を多く含む地質である。後半部では土被りが小さく、比較的深度の浅い沖積層が主体となり、緩い砂、砂礫層（As, Asg）とN値3～7の粘性土層（Ac）からなる地質となっている。図-4に推定土質縦断図を示す。

工事区域は淀川と神崎川に挟まれた河川氾濫原に位置しており、施工中の追加調査により発進立坑より3000～3500m付近は旧河道で緩い砂層を含む複雑な地盤となっていることが確認された。

3.2 シールドおよび切羽安定機構

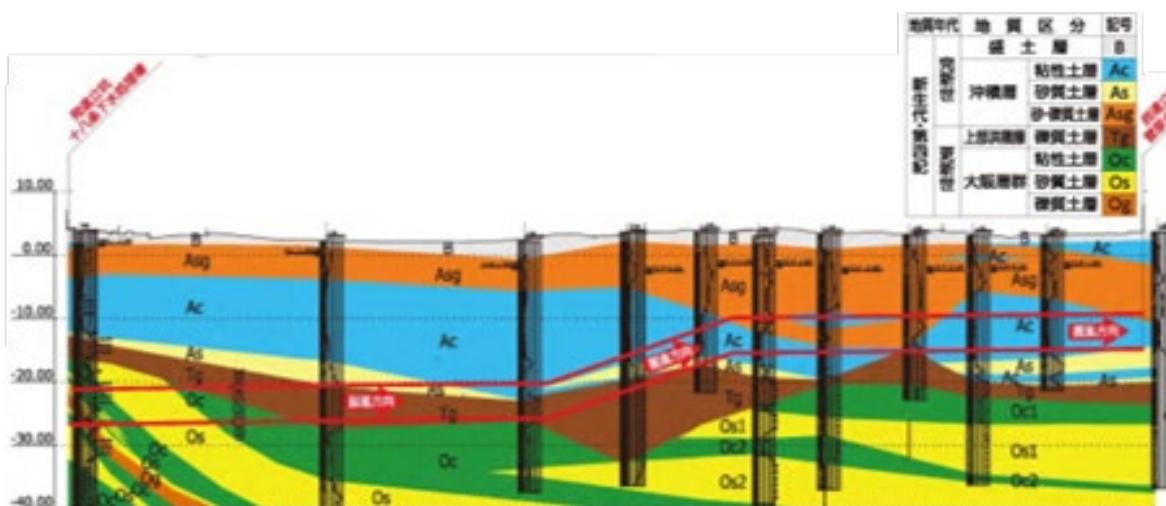
(1) シールドの主要諸元

本工事におけるシールドの概略構造図および主要諸元を図-5および表-2にそれぞれ示す。

(2) 切羽安定機構

シールド隔壁には泥水圧を常時確認する目的で4か所の水圧計を装備し、天端の緩みを早期検知する目的で前胴頂部に天端土圧計を装備した。

また、掘進停止時の切羽圧力保持機構として、自動コントロールバルブによる切羽水圧保持システムを装備し、配管閉塞時の切羽圧の急激な変動を低減する目的で送泥管に緊急圧抜き装置を装備した。

図-4 推定土質縦断図³⁾

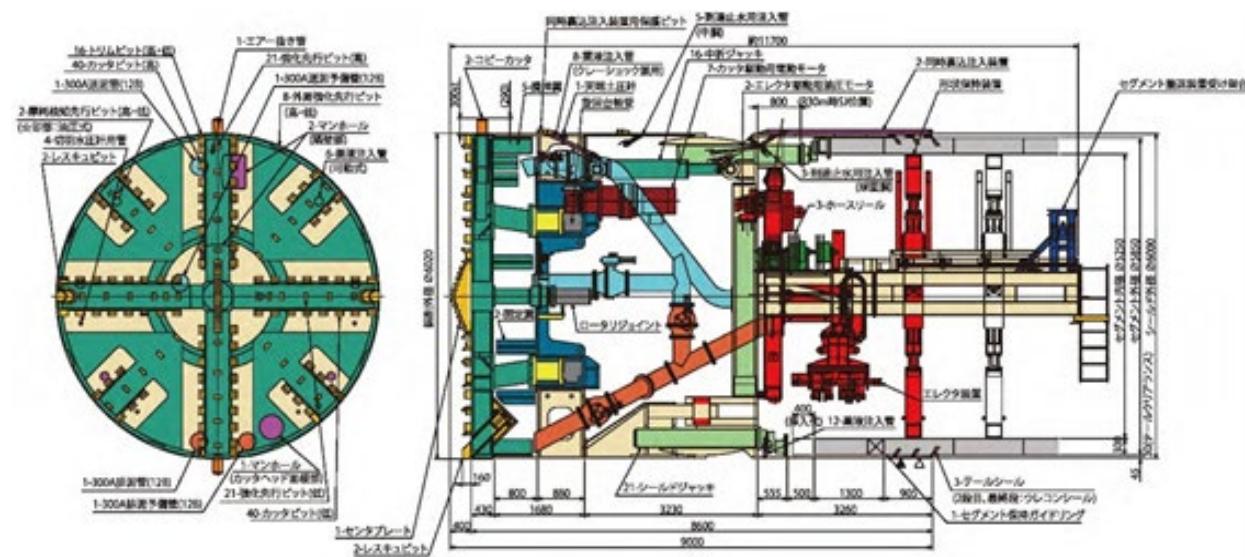


図-5 シールドの概略構造図³⁾

表-2 シールドの主要諸元³⁾

対象構造物	対応策
シールド外径	φ6.0m
カッター支持方式	中間支持方式
カッター開口率	30.8% (ビット投影面積含む)
カッタービット	先行ビット・ツールビット +レスキュービット
装備ジャッキ推力	総推力 42,000kN (2,000kN×21本)
装備カッタートルク	常用 3,307kN·m ($\alpha=15.3$) 瞬時最大 4,960kN·m ($\alpha=22.9$)
中折れ機構	左右: $\pm 12.4^\circ$, 上下 $\pm 0.5^\circ$
裏込め注入方式	同時裏込め注入方式 (注入装置×2 か所)
テールシール仕様	ワイヤープラシ型3段 (2段ウレタン充填)

(3) 送排泥・泥水還流機構

シールド内における配管径は、送泥管・排泥管ともに $\phi 300\text{ mm}$ とし、それぞれ予備管を配置したうえで機内バイパスラインも装備した。

また、シールド後方の坑内にはクラッシャーを装備し、坑内配管径は送泥管 $\phi 250\text{ mm}$ 、排泥管 $\phi 200\text{ mm}$ とした。泥水処理設備および流体輸送設備の構成図を図-6に示す。

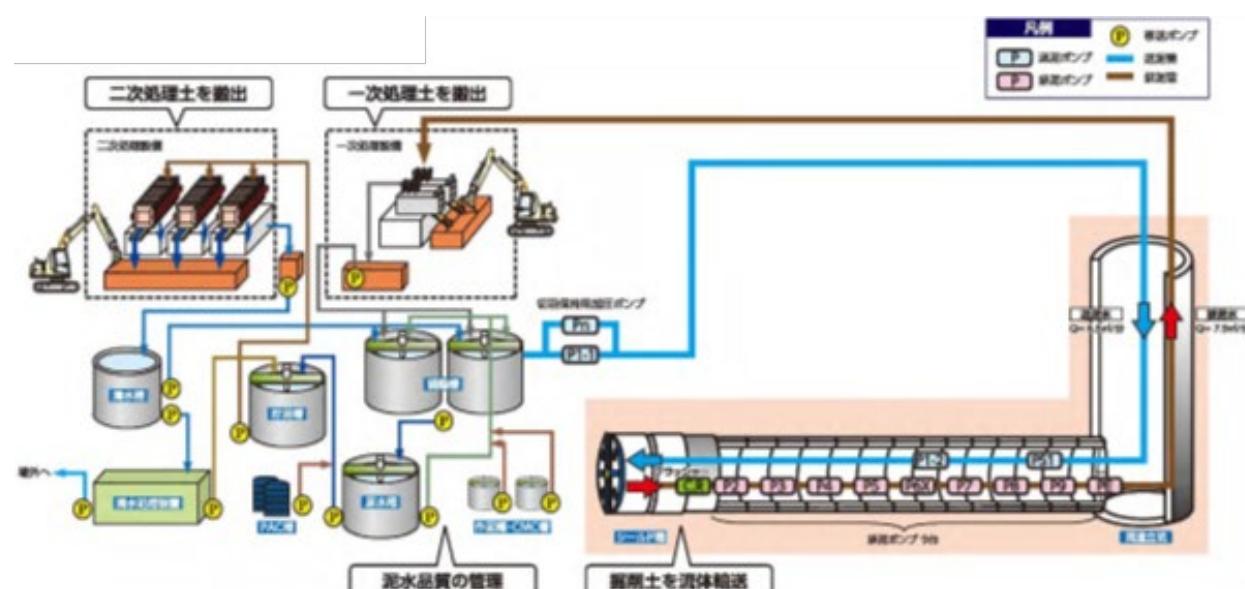


図-6 泥水処理設備・流体輸送設備構成図³⁾

3.3 既設構造物との主な近接掘進の概要

本工事において既設構造物との近接施工となった主要な事例について、近接位置関係、離隔、対応策の概要を表-3に示す。

表-3 主な近接構造物一覧⁵⁾

対象構造物	近接形態	離隔	対応策
下水処理場地下連壁	下越し	1.6m	水平探査
通信とう道 (シールド)	下越し	3.0m	トライアル施工 自動計測
地下鉄軌体・高架橋	側部通過	11.3m	自動計測
鉄道軌道(盛土)	下越し	17.9m	自動計測
新幹線高架橋基礎杭	側部通過	3.1m	自動計測
鉄道軌道(盛土)	下越し	13.0m	防護改良 自動計測
鉄道軌道 (橋台基礎杭)	側部通過	3.2m	自動計測

3.4 施工実績

(1) 泥水性状管理

本工事では、長距離泥水輸送となるため、調整槽と送泥後の切羽で、1リングあたり4回の測定の性状(比重、粘性)の計測を行って平均値で管理した。

また、砂礫層の掘進時には、事前に行った泥水浸透試験結果を踏まえて、泥水材料として粘土系鉱物に加えて増粘剤も添加して、比重1.22、粘性33秒という高比重・高粘性泥水として逸泥防止を図った。

(2) シールド掘進管理

i) 切羽圧管理

ここでは、通信とう道との近接施工に際して実施したトライアル施工の結果、切羽圧力の管理下限として「シールド停止時の平衡泥水圧+変動圧(30kPa)」として掘進管理を行い、地表面への泥水噴出や地盤中の逸泥を生じないよう泥水性状と切羽圧の管理に細心の注意を払った。

ii) 掘削土量管理

本工事では、送排泥流量・密度より算出される掘削偏差量・乾砂量を常時確認できるシステムにより、掘削土量、および逸泥や取込み土量の傾向を確認した。

なお、掘削土量・乾砂量の管理値は、設計想定値に対する乖離(変動率)のほかに、過去(直近)20リング平均値に対する変動率の管理値を設けて管理し、逸泥や過大な取込み土量の変動傾向についても監視した。

iii) 裏込め注入管理

本工事では、裏込め注入工は圧力管理を主体とし、一般部の注入圧は「切羽泥水圧+0.3 MPa」、構造物近接範囲の注入圧は「切羽水圧+0.2 MPa」とした。

また、近接構造物の周辺および旧河道域の掘進時(逸泥発生後)は、掘削テールボイドの早期安定を図る目的で高強度発現型($\sigma_{lh}=0.1 \text{ N/mm}^2$)を使用した。

(3) 地盤挙動の計測管理

i) 重要構造物の近接掘進時における挙動管理

一般部の地盤挙動計測は地表面のレベル計測が主体であったが、ここでは通信とう道との近接施工に際して実施したトライアル施工における挙動計測管理について説明する(図-7参照)。

ii) トライアル計測による掘進管理値の妥当性確認

近接施工に先立ち、とう道と同一深さに設置した層別沈下計の自動計測を実施し、地盤変状を確認した。その結果、最大で許容値の3倍近い沈下が発生し、特にセグメント組立て時、シールド停止中および休工中の沈下が進行していたことが確認された。

そこで、セグメント組立て中を含む掘進停止時の沈下抑制対策(切羽水圧保持システムの装備、セグメント組立て時のジャッキ操作の工夫、近接影響範囲区間の連続施工)を追加し、地盤挙動を確認して管理切羽圧の見直しを実施した。

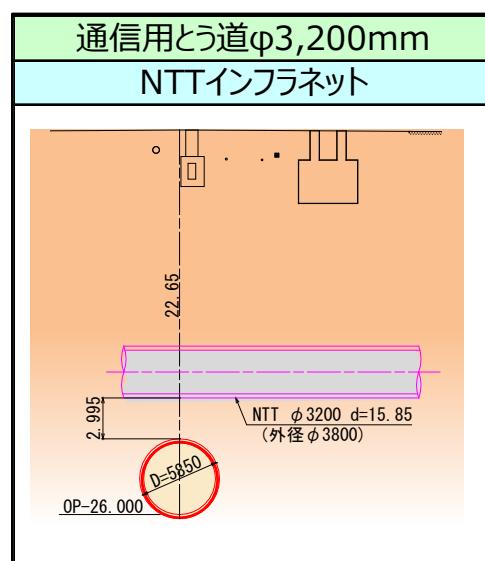


図-7 通信とう道との近接施工概要
(株式会社安藤・間提供)

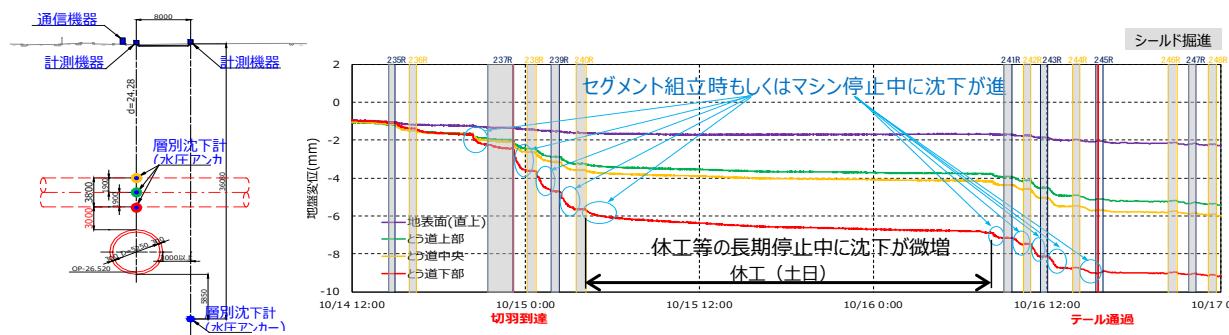


図-8 通信とう道近接部の層別沈下計の計測結果（株式会社安藤・間提供）

iii) 計測管理計画および管理基準値の設定

トライアル施工の結果、掘進停止時の平衡切羽水圧を当該地点の静止土水圧とし、沈下および掘削土の取り込み過ぎを防止するため 0.03 MPa 高めに管理上限値（静止土水圧+0.03 MPa）を設定した。

また、二次元 FEM 影響解析の結果に基づいて、地盤変状の許容値を設定した。

iv) 地盤および近接構造物の挙動計測結果

トライアル施工の結果を受けて追加した掘進停止時の切羽圧保持対策および見直した切羽圧管理値に基づいて通信とう道との近接施工を行った結果、沈下量を許容値の 3/4 に抑制することができた（図-8）。

4. おわりに

ここでは、泥水式シールドにおける掘進管理と地盤挙動について、実工事の事例を示して解説を行った。

シールド掘進時の地盤挙動は、切羽地盤の構成や土

性値、土被りなどの施工条件に応じ、土質力学的挙動を理解したうえで切羽圧、泥水性状を適切に管理することが重要であることを再認識いただけたら幸いである。

参考文献

- 1) Muller-Kirchmbauer : Stability of slurry trench in inhomogeneous subsoil, 第 9 回国際土質基礎会議, session3, 東京, 1977.
- 2) シールドトンネルの新技術研究会：シールドトンネルの新技術, 株式会社土木工学社, 1995.
- 3) 大隅～十八条幹線下水管渠築造工事（その 10）パンフレット
- 4) 輪原克己ら：旧河道の存在する地盤で新幹線などと近接する長距離泥水式シールドの施工, トンネルと地下第 53 巻 4 号, pp.53-64, 2022.
- 5) 鳥山孝治：厳しい施工条件での長距離泥水式シールドの施工実績－沖積砂礫地盤における逸泥対策と泥水管理, 第 64 回「シールド・トンネル工法施工技術講習会」, 日本プロジェクトリサーチ, pp.73-93, 2020..

（原稿受理 2025.5.6）

土圧式シールド工事における切羽安定と地盤挙動

The stability of the face and ground behavior in earth pressure balance shield tunneling

松原 健太 (まつばら けんた)

(株) 大林組 土木本部 生産技術本部 統括部長

e-mail: matsubara.kenta@obayashi.co.jp

キーワード：土圧式シールド，切羽安定，塑性流動管理，切羽圧管理，排土量管理，地盤挙動

1. はじめに

我が国では土圧式シールドは 1974 年に実用化され現在にいたるまで 3000 件を超える施工実績を重ね、さまざまな技術的なノウハウを蓄積してきた。一方、近年の土圧式シールド工事では、大断面化、長距離化、超近接施工の増加といった傾向に伴い切羽の安定に関わる新たな技術的な課題が生じ、土圧式シールドの切羽の安定管理を行ううえで新たなノウハウ（留意事項）も必要になってきた。これらの状況を踏まえて本稿では、土圧式シールドの切羽安定について管理上の留意事項も含めて記載し、切羽の安定管理と地盤挙動の具体事例を示す。

2. 土圧式シールドの切羽安定機構

2.1 土圧式シールドの切羽安定メカニズム

土圧式シールドでは、カッターの回転により切削した掘削土砂に添加材を必要に応じて混合攪拌し塑性流動性と止水性を付与した泥土性状として、カッターチャンバー内に充満、加圧して泥土圧を発生させる。この泥土圧により切羽に作用する土圧および水圧に対抗させて切羽の安定を図る。泥土圧の調整・維持は、シールドジャッキの速度やスクリューコンベアの回転数を調節し、隔壁に設けた土圧計によって測定されるカッターチャンバー内の泥土圧（以下、切羽圧）を制御することによって行う。

2.2 塑性流動性管理による切羽の安定

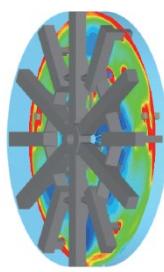
土圧式シールドの切羽の安定は、チャンバー内の掘削土砂の塑性流動性が確保されていることが前提となる。したがって第一に、切羽地盤に応じて適切な添加

材を混合攪拌して適切な泥土性状にすることが重要である。塑性流動性管理はカッタートルク等の施工データ、排土状況、排出土のスランプ値などで評価する方法が用いられてきた。これらの管理にあたっては、経時的に変化を観察し、変化に応じて速やかに添加材注入管理に反映させることが肝要である。変化の察知が遅れると塑性流動性が損なわれ、切羽の安定を維持できない状況に陥る危険が生じるので注意が必要である。

近年の土圧式シールド工事では、大断面化や長距離化に伴い切羽地盤にさまざまな土層が存在する状況や、切羽地盤が掘進とともに刻々と変わる状況が増えていく。このような状況下の掘進においては、チャンバー内の塑性流動状態の変化をこれまで以上に速やかに察知し添加材注入管理に反映させることが必要になる。また、超近接施工にあたっては、切羽の安定がより重要になり塑性流動性管理のさらなる厳格化が求められる。こういった状況から、従来の塑性流動性管理の方法に加えて、新たな技術としてチャンバー内の泥土性状をリアルタイムに評価する技術（図-1、図-2）やチャンバー内から土砂を採取する技術（図-3）などが導入されてきた。

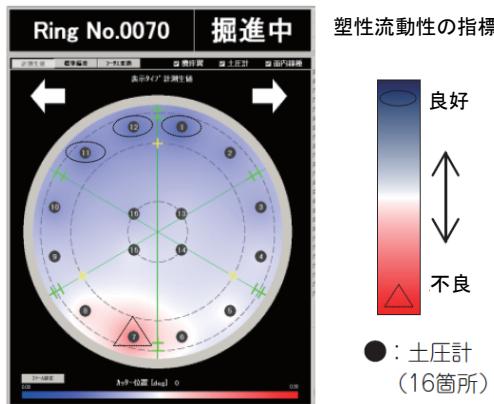
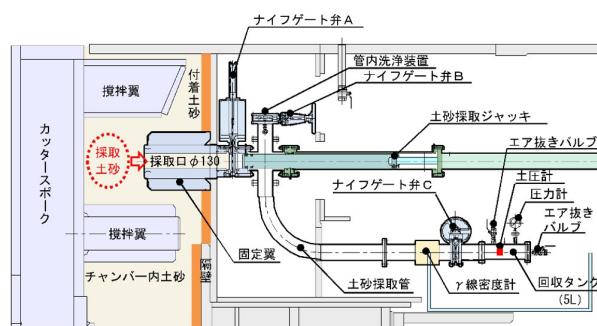


フランパー



土砂ずり速度分布計算例

図-1 土砂流動管理技術¹⁾

図-2 塑性流動可視化システム²⁾図-3 チャンバー内土砂採取装置³⁾

2.3 切羽圧管理および排土量管理による切羽の安定

土圧式シールドにおいて切羽の安定を確保するためには、前述のとおり、チャンバー内の塑性流動性が確保されていることを前提として、切羽圧管理と排土量管理が重要である。切羽圧管理では切羽に作用する土圧、水圧に対抗できる切羽圧を設定することが重要で、切羽に作用する土圧に対しては切羽地盤に応じて静止土圧、主働土圧、緩み土圧などを設定し、水圧に対しては地質調査結果や地下水位の計測結果等に基づき設定する。しかし、切羽地盤の土層構成や各土層の土質定数、地下水位を正確に把握することは難しいため、設定した切羽圧の妥当性を地表面沈下の傾向や後述する排土量の増減傾向などにより検証し、必要に応じて見直しをすることが重要である。特にシールド発進部、近接施工部、土質変化部等では、掘進による周辺地盤への影響を計測・確認するトライアル計測を行い、計測結果に基づき切羽圧の妥当性を検証することが有効である。横浜環状北線シールドトンネル工事（首都高

速道路発注）では、地中変位と間隙水圧を計測して切羽圧管理に反映している⁴⁾。

排土量管理においては掘削土量と排土量のバランスをとることが重要である。しかし、掘削土量については切羽地盤の土層構成や各土層の単位体積重量を正確に把握することができないため正確な掘削土量を算定することが難しい。また、排土量については掘削土砂の坑内運搬方式（連続ベルトコンベア、ズリ鋼車、土砂圧送など）に応じて掘削土砂の体積や重量を計測する方法があるが、いずれの計測方法においても掘削土砂に取り込まれている地下水や添加材の量を正確に把握することができないため、正確な排土量を計測により把握することができない。そのため、排土量管理においては絶対量管理ではなく統計的手法を用いるなど傾向管理を行うことが重要である。また、地表面沈下の傾向、掘削土質の変化、切羽圧等の掘進管理データの状況、複数の方法による排土量計測結果との整合性なども踏まえて排土量を管理することも重要である。

土圧式シールド工事の大断面化や長距離化に伴い切羽地盤にさまざまな土層が存在する状況や、切羽地盤が掘進とともに刻々と変わる状況が増えていることから、チャンバー内の塑性流動状況を常に一様に維持することが難しくなっている。そのため、切羽圧の分布が鉛直方向に一定勾配の直線分布にならず、切羽断面内において切羽圧の過不足が生じる状況もある。特に大断面シールドの場合は、チャンバー中央部の土圧計に着目して切羽圧を管理するとチャンバー上部の切羽圧が管理値よりも低くなる傾向があり、また切羽上部と下部の圧力差が大きいことから、切羽圧の過不足によって周辺地盤に影響を及ぼす可能性が高くなる。こういった状況から、切羽断面内における切羽圧の過不足を管理・調整するために、隔壁に土圧計を上下左右方向に複数個設置するようになってきた。また、大断面シールドでは掘削土砂が膨大になることから、掘削土量算定誤差や排土量計測誤差の度合いによっては、周辺地盤に及ぼす影響が大きくなる。そのため、排土量管理のさらなる精度向上が課題となっている。

3. 土圧式シールド工事における切羽の安定管理と地盤挙動の具体事例

3.1 工事概要

本工事は泥土圧シールド工法にて、仕上がり内径 $\phi 4600\text{ mm}$ (二次覆工省略) の共同溝 (水道・電気収容) を構築するものである。工事概要を表-1に、路線概要を図-4に、地質縦断図を図-5に示す。シールド土被りは $6.1\sim10.3\text{ m}$ ($1.2\sim2.0 D : D$ はシールド外径) と小さく、シールド直上に最小離隔約 3.4 m で並行して送水管 $\phi 1500\text{ mm}$ が存在する (図-6)。また、後半 450 m 区間では地下鉄本線 (2線) ならびに出入庫線 (2線) と並走しており (図-7)，最小離隔は 1.47 m である。

表-1 工事概要⁵⁾

工事名称	国道479号清水共同溝設置工事-4
工事場所	大阪市鶴見区鶴見5丁目～旭区新森7丁目
発注者	大阪市建設局
施工者	前田・南海辰村JV
工期	2013年3月1日～2017年3月31日
掘進延長	1,343 m
掘削工法	泥土圧シールド工法
シールド機外径	$\phi 5.13\text{ m}$
土被り	$6.1\text{ m} \sim 10.3\text{ m}$
セグメント	RCセグメント (外径 $\phi 5,000\text{ mm} \times$ 幅 $1,200\text{ mm} \times$ 衝高 200 mm)

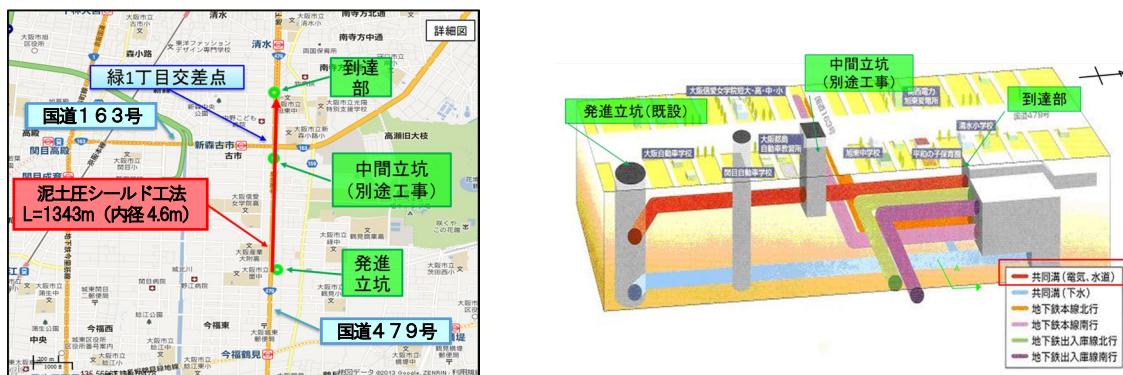
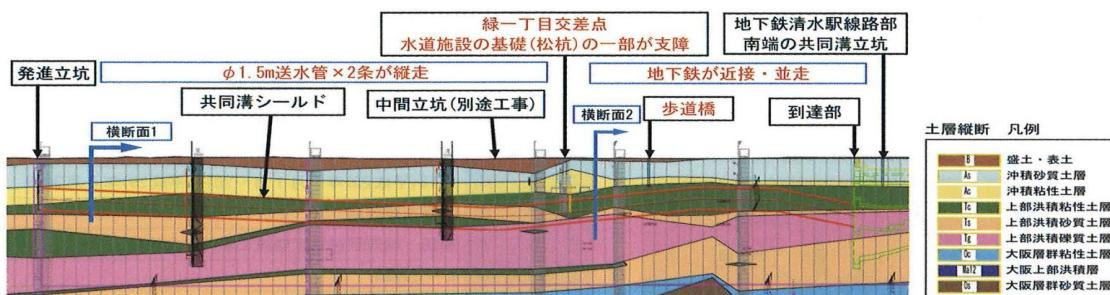
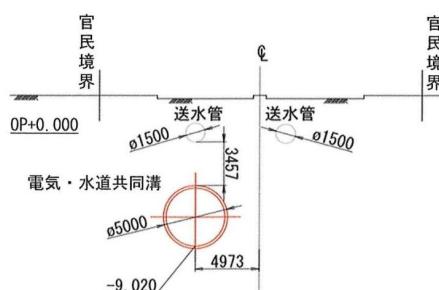
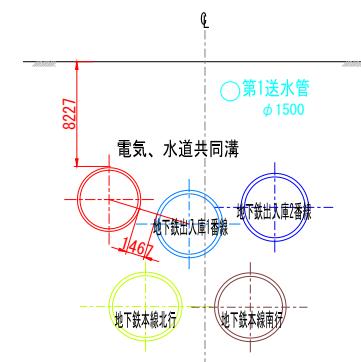
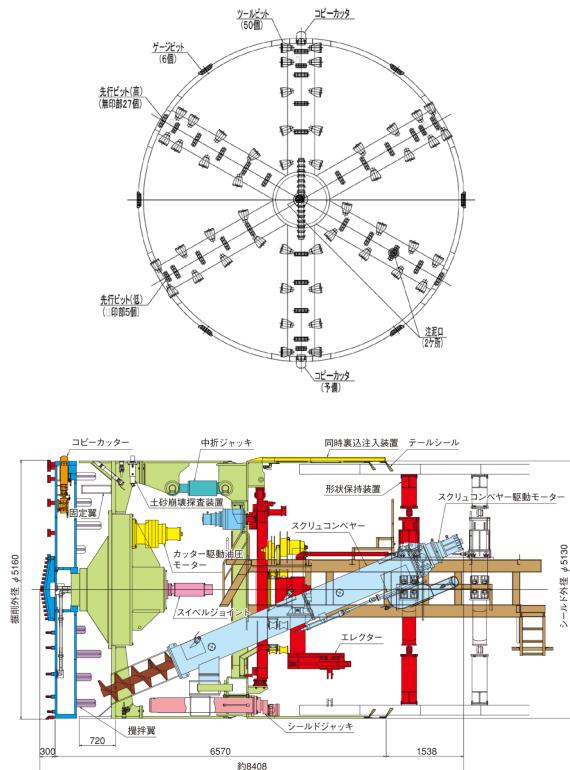
図-4 路線概要⁵⁾図-5 地質縦断図⁶⁾図-6 送水管とシールドの位置関係⁶⁾図-7 地下鉄とシールドの位置関係⁶⁾

表-2 シールド機の主要諸元⁵⁾図-8 シールド機⁵⁾

3.2 シールド機の仕様

シールド機（φ5130 mm）の断面図を図-8に、シールド機の主要諸元を表-2に示す。

3.3 施工実績

(1) 切羽の安定管理

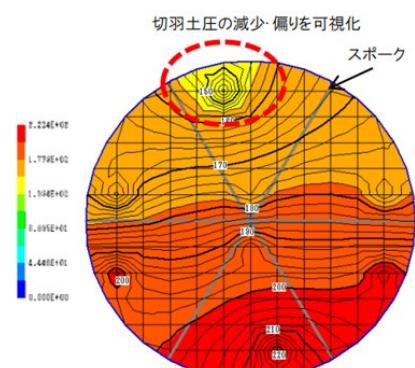
i) 塑性流動性管理

添加材には切羽地盤に応じて気泡、もしくは鉱物系と高分子系材料を使用した。気泡は発泡倍率5~10倍、注入率10~20%程度とし、鉱物系と高分子系材料は注入率を鉱物系15~25%，高分子系5~10%（合計20~30%）とした。隔壁に土圧計を6か所設置し土圧分布可視化システムを導入して、図-9に示すようにチャンバー内の土圧分布をセンターで可視化しチャンバー内の塑性流動状態を把握した。土圧分布に偏りがある場合は添加材注入量や掘進速度を調整し、早期に泥土状態を改善した。また、定期的に掘削土の粒度分布試験を実施し、切羽地盤の変化を把握して添加材配合や注入量に反映することで塑性流動性を確保した。

推進機構	装備推力	1,323 kN/本×16本=21,168 kN
掘削機構	カッターヘッド形式	センターシャフト支持方式
	カッタートルク	常用最大 2,331 kN·m ($\alpha=17.2$)
	カッター回転数	1rpm
	カッター開口率	62% (ピットを含む)
余掘り装置	コピーカッタ 2基 (st100 mm)	
切羽安定機構	土圧計	6箇所 (上段2個、中断2個、下段2個)
	地山崩壊探査装置	前胴頂部に1基 (先端に土圧計設置)
添加材注入機構	注入口 (カッタースポーク)	中央部1箇所、カッタースポーク1箇所
	注入口 (隔壁)	8箇所 (4箇所は首振り式)
	注入系統	独立した2系統
混練機構	攪拌翼	4本
	固定翼	2本
排土機構	スクリューコンベヤー	Φ520×P360 mm, 回転トルク 25.1 kN·m, 回転数 21 rpm, 排土量 83.8 m ³ /h
	排土口緊急遮断装置	蓄圧式アキュムレータ
	二次排土機構	圧送ポンプ
	坑内土砂運搬設備	土砂圧送 (300A)
その他	テールシール	2段 (ワイヤーブラシ式)
	形状保持装置	上下拡張方式
	裏込め注入装置	シールド機からの同時注入 (2箇所)

ii) 切羽圧管理

切羽圧は上限値を静止土圧+水圧+予備圧 (0.02 MPa)、下限値を主働土圧+水圧+予備圧 (0.02 MPa)、管理土圧を上限値と下限値の平均値とし、上下限幅の70%を管理目標範囲とした。掘進では、上段（シールド中心+1 m）の土圧計の値が地表面変位と顕著に連動していたため、上段の土圧計に着目して切羽圧を管理した。また、切羽圧低下による地表面および近接構造物への影響を防止するために土圧保持システムを使用して、掘進中以外においても切羽圧が設定値を下回るとチャンバー内に可塑状充填材を自動注入し切羽圧を常時管理値以内に保持した。

図-9 土圧分布可視化システムによる事例⁷⁾

iii) 排土量管理

土砂圧送配管の流量計の計測値と土砂圧送ポンプのピストン回数により排土量を管理した。

(2) 地盤挙動管理

i) トライアル計測による切羽の安定管理の妥当性確認

トライアル計測は図-10に示す2か所で実施した。トライアル計測ではシールド直上部の地中変位と、近接施工時の地下鉄本線との位置関係と同様の位置（シールド側方1200 mm）の地中変位を計測した（図-11）。トライアル計測①にて掘進管理値の見直しおよび再設定を行った後、トライアル計測②にて施工の影響がないことを確認し、地下鉄近接施工を開始した。

ii) 計測管理計画

送水管は車道直下に位置し、直接計測することが困難であったため、図-12に示す測点を計測した。シールド法線方向の測線ピッチは10m間隔とし、1回／日、切羽前方4側線および切羽後方5側線を計測した（図-13）。また、送水管の制御弁等の地上露出部も併せて計測した。

地下鉄本線に対しては鉛直・水平変位の自動計測と手動計測を行った（図-14）。計測器の設置間隔は近接程度に応じて5~10 m 間隔とした。シールド掘進中は5分間隔で自動計測を実施し、リアルタイムで変位を監視した。また、手動計測は補完的に地下鉄営業時間外

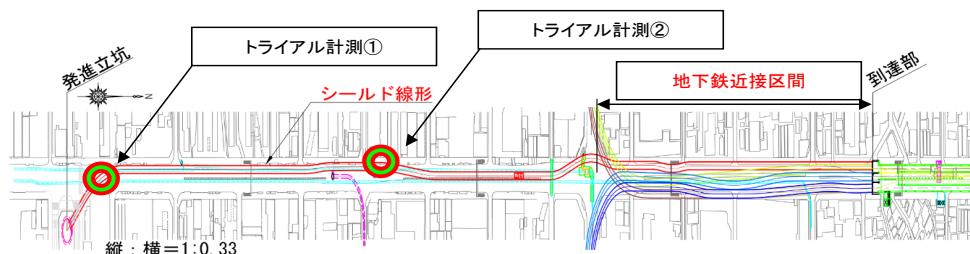


図-10 トライアル計測実施箇所⁵⁾

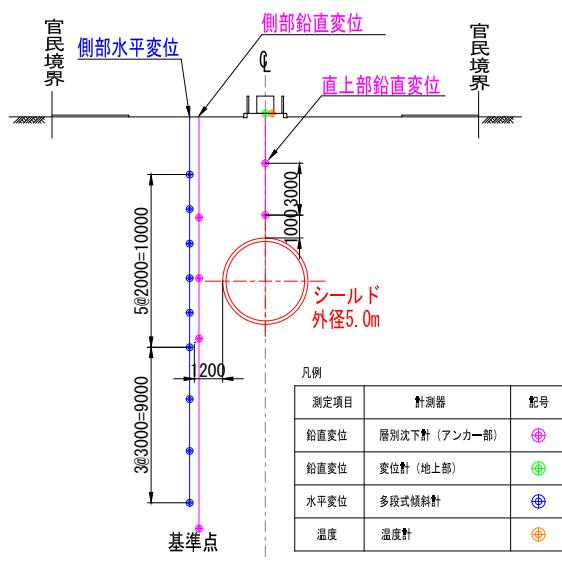


図-11 トライアル計測断面図⁵⁾

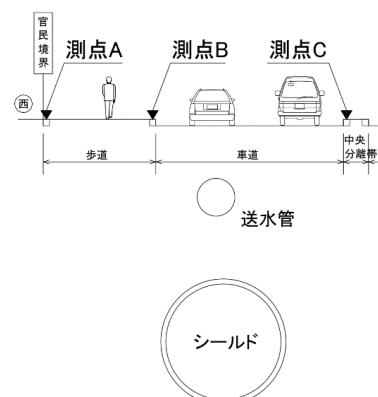


図-12 地表面沈下測点断面図⁵⁾

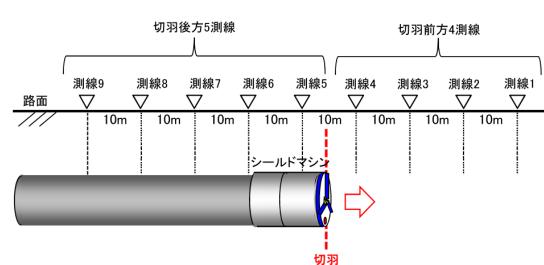
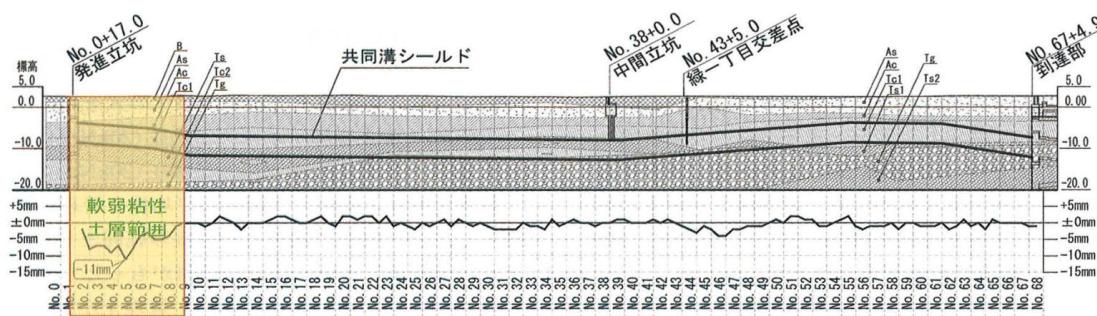


図-13 地表面沈下測点縦断図⁵⁾

図-14 地下鉄構内の計測機器設置状況⁶⁾表-3 地下鉄トンネル（営業線）の管理値⁶⁾

管理段階	鉛直・水平変位量	内容・対応
日 常 管 理	1次管理値(±3mm)未満	工事継続
管理レベルI	1次管理値(±3mm)以上 2次管理値(±4.4mm)未満	要注意体制 対策実施
管理レベルII	2次管理値(±4.4mm)以上 管理限界値(±5.9mm)未満	施工一時中断 目視調査 対策実施
管理レベルIII	管理限界値(±5.9mm)以上	施工中断 目視調査 対応策再検討

図-15 地表面計測結果⁶⁾

に1回／2日実施した。管理限界値は事前影響解析の最大値(5.9mm)とし、その値の50%を1次管理値、75%を2次管理値とした(表-3)。

iii) 地表面および近接構造物の挙動計測結果

地表面沈下計測結果を図-15に示す。最大沈下量はNo.4+10m付近の11mmで、事前影響解析値の26mmよりも小さく管理基準値(15mm)以内に収まった。沈下量はNo.2～8の区間が比較的大きく、これは発進からNo.8付近まではN値=0～2の軟弱な沖積粘性土層が存在していたためと考える。

地下鉄本線の自動計測結果は最大値が1.4mm、手動計測結果は最大値が2.5mmで、いずれも1次管理値(3.0mm)未満であった。変位の発生方向はシールド側に変位する傾向であった。

4. おわりに

今後、土圧式シールド工事の施工条件は益々厳しくなり、切羽の安定管理のさらなる厳格化が求められるを考える。そういった状況になっても、切羽安定メカニズムを理解したうえで3000件を超える実績から得た技術的ノウハウに基づく切羽の安定管理が基本になると考える。新しいノウハウの活用や新技術の導入に

あたっても切羽の安定管理の基本を忘れてはならないと思う。本稿が今後の土圧式シールド工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 松原健太・近藤由也・川田成彦：密集市街地における大断面土圧式シールドトンネルの施工、土木施工、Vol. 53, No. 3, pp. 60, 2012.
- 2) 菊地勇気・星名浩人・小川卓・山本将由：市街地における急勾配・急曲線・小土かぶりの大断面シールドの施工—首都高速横浜北線 馬場出入口ランプー、トンネルと地下、Vol. 51, No. 9, pp. 11, 2020.
- 3) 今井哲也・東野弘幸・近藤由也・内橋修一：チャンバー内土砂採取装置の開発(その1)，令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会, VI-857, 2023.
- 4) 大場新哉・高瀬隼人・西嶋宏介・松原健太・小林晃：大断面シールドの低土被り、高水位地盤における掘進管理、トンネル工学報告集、Vol. 23, pp. 291-298, 2013.
- 5) 大阪市建設局提供。
- 6) 「シールドトンネルの技術変遷と掘進技術」連載講座小委員会：シールドトンネルの技術変遷と掘進技術(20)—近接施工④：近接施工の留意点と将来展望—、トンネルと地下、Vol. 54, No. 2, pp. 87-98, 2023.
- 7) 浅井英明・林太将・織田孝之・鈴木哲太郎・宮澤昌弘・寅岡千丈：清水共同溝設置工事4 重要構造物対策 その(2)，平成27年度土木学会全国大会第70回年次学術講演会, VI-078, 2015.

(原稿受理 2025.4.22)

報告

気泡シールド掘削プロセス管理における土質力学

Soil mechanics-based foam shield driving construction process management

安井 利彰 (やすい としあき)

前田建設工業株式会社 部長

e-mail: yasuit@jcity.maeda.co.jp

赤木 寛一 (あかき ひろかず)

早稲田大学

キーワード：気泡シールド工事，塑性流動性，消泡，分離，含水比

1. はじめに

気泡シールド工事において切羽の安定を保ちながら掘進するためには、チャンバー内の気泡混合土が均一な懸濁状態を維持することが重要となる。ただ、気泡混合土が消泡や分離すると、塑性流動性や遮水性の低下につながる。その結果、チャンバー内圧力が地山に均等に作用せず、掘進中の切羽安定性が損なわれる。

本稿は、気泡シールド工法¹⁾における切羽安定と地中連續壁工法における溝壁安定および気泡混合土の流動性保持の類似性に着目して、シールド機チャンバー内の気泡混合土の消泡特性および分離特性について実験的に検討し、施工時に適用可能な品質管理手法を検討したものである。

2. 気泡混合土の含水比が消泡現象に与える影響

気泡安定液における検討結果²⁾を参考にしながら、気泡シールド工事においてチャンバー内気泡混合土の消泡が生じない含水比を新たに細粒分の消泡含水比 w_{minF} と定義し、実験的に検討を行った。

2.1 気泡混合土の消泡による湿潤密度の変化

気泡シールド工事における掘削対象土が硬質粘性土の場合、硬質粘性土の自然含水比は一般にその液性限界より小さい。この時チャンバー内に掘削により取り込まれた硬質粘性土は、気泡の水分を奪って消泡現象が発生し気泡混合土の流動性が低下する³⁾。本実験では、気泡混合土が消泡すると、気泡混合土の実測湿潤密度が理論湿潤密度よりも大きくなることに着目し

た。ここに、理論湿潤密度とは式(1)に示すように、消泡していない場合の気泡混合土の配合から決定される湿潤密度である。

$$\text{理論湿潤密度} = \frac{\left(\text{試料土湿潤質量} + \text{配合気泡質量}^{\text{注1)} } \right)}{\text{容器体積}} \quad (1)$$

そこで、実験では気泡混合土の混合時の含水比を変化させ、その時の湿潤密度を計測することとした。含水比が小さく実測湿潤密度が理論湿潤密度より大きい場合は消泡が発生しているので、両者が一致する含水比が、消泡が発生する含水比の上限値と考えられる。

試料土とその物性値は表-1に示すとおりである。なお、Ka-Be とはカオリンとベントナイト (Na型) を質量比 3 : 1 で混合させた試料土である。

図-1に消泡含水比実験結果の一例を示す。実測湿潤密度は実線で、理論湿潤密度を破線で示した。これにより、含水比に対応する実測湿潤密度と理論湿潤密度の変化を表す曲線の交点を確認することができる。それらの交点で細粒分の消泡含水比 w_{minF} (実験値) を求めた。交点よりも小さい含水比では、気泡混合土中に消泡が生じており、実測理論密度は、理論湿潤密度よりも大きくなっている。一方、交点よりも含水比が大きい領域で実測湿潤密度が理論湿潤密度を下回っていることが確認できる。これは、試料配合後の攪拌によって、気泡が過発泡したことによるものと考えられる。

注1) 消泡および過発泡していない配合上の気泡質量。

表-1 各試料の液性限界・塑性限界・塑性指数

試料名	試料土	液性限界 $w_L(\%)$	塑性限界 $w_P(\%)$	塑性指数 I_p
A	カオリン	70.53	39.25	31.28
B	木節粘土	42.23	15.81	26.43
C	Ka-Be	164.13	42.51	121.62
D	Ki-c	54.27	35.50	18.77

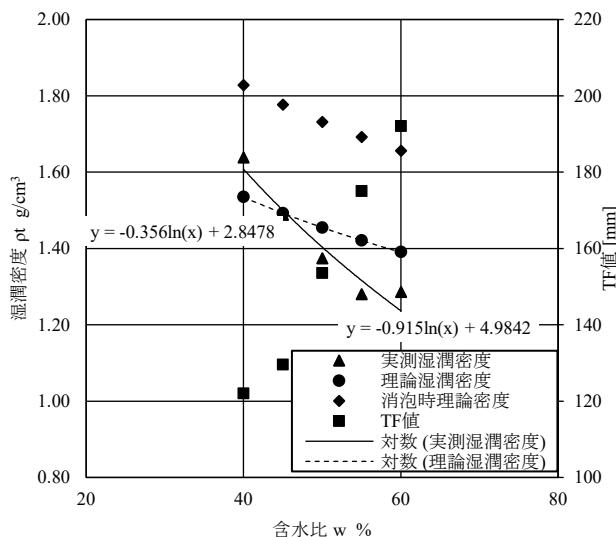


図-1 消泡含水比実験結果（試料B：木節粘土）

2.2 気泡混合土の消泡含水比の決定

次に、求められる塑性流動性を考慮して、気泡混合土の消泡含水比を決定する。東京外環トンネル施工等検討委員会資料では、室内試験時のチャンバー内混合土のテーブルフロー値（以下TF値）⁴⁾の目安を105～160mmとしている⁵⁾。切羽安定に加えてスクリューコンベアなどによる安定的な排土のために過剰な流動を避ける必要があるので、上記のTF値の下限値105mm程度を目標とするのが適切と考えられる。

2.1の実験において、含水比とTF値の関係をもとに推定した各試料のTF=105mmでの含水比 w_c を表-2に示す。また、 w_c はいずれも w_L 以下なので、その場合のコンシステンシー指数 I_c も併記する。

表-2からわかるように、試料Aのカオリンを除いて、 I_c は0.2前後の値となっている。試料Aのカオリンの I_c が0.81となっている要因としては、カオリンの主要粘土鉱物の活性度の影響を考えることができる。

したがって、粘土鉱物の活性度が0.4～0.5のカオリ

表-2 実験値の近似式とTF=105mmでの含水比 w_c とコンシステンシー指数 I_c

試料	近似式	TF値=105mmでの含水比 w_c (%)	左記含水比でのコンシステンシー指数 I_c
A	TF=1.26w+48	45.24	0.81
B	TF=3.71w-31	36.66	0.21
C	TF=0.74w+10	128.38	0.29
D	TF=6.50w-230	51.54	0.15

ン粘土を除けば、コンシステンシー指数 I_c が0.2程度の含水比であれば、気泡混合土はTF=105mmを満足できると考えられる。

この結果に基づいて、コンシステンシー指数 $I_c=0.2$ を満足する含水比を細粒分の最小含水比 w_{minF} と定義することとした。

気泡混合土の消泡含水比 w_{min} は、文献²⁾を参考に、粗粒分・細粒分の影響を分けて導出を行う。それぞれの消泡含水比 w_{minC} 、 w_{minF} を細粒分含有率 F_c で加重平均し、式(2)のように消泡含水比 w_{min} を計算することができる。

$$w_{min} = w_{minC} \times \frac{100 - F_c}{100} + w_{minF} \times \frac{F_c}{100} \quad (2)$$

細粒分の消泡含水比 w_{minF} は、式(3)で定める。

$$w_{minF} = w_L - 0.2I_p \quad (3)$$

粗粒分の消泡含水比 w_{minC} は、表面乾燥状態に相当する含水比（表面乾燥含水比）とし、一般的な粗粒分として豊浦標準砂と珪砂の表面乾燥含水比を用いる。実測値の平均をとり、式(4)で定める²⁾。

$$w_{minC} = 6.97 \% \quad (4)$$

したがって、気泡混合土の消泡含水比 w_{min} は式(5)のように表すことができる。

$$w_{min} = 6.97 \times \frac{100 - F_c}{100} + (w_L - 0.2I_p) \times \frac{F_c}{100} \quad (5)$$

3. 気泡混合土の含水比が分離現象に与える影響

本章では、気泡混合土の分離特性を把握するとともに、分離沈降せず許容できる最大の含水比²⁾（分離含水比 w_{max} とする）について、分離沈降に伴う粒度特性の

変化に着目して実験的に調査した。

3.1 気泡混合土の分離特性の把握

気泡混合土の分離特性を把握するため、分離特性確認実験を行った。実験は近藤らの研究²⁾を参考にした。試料土は東京都内の最大粒径 20 mm の東久留米砂層の粒度分布を混合再現した模擬サンプル(以下、模擬 His)を用いた。試料土の粒度分布を図-2 に示す。実験ケースは含水比 w および気泡添加率 $Q_M\%$ (質量比) / $Q_V\%$ (体積比) を 12 種類の組み合わせケースに設定した。起泡剤は消泡含水比実験と同一の界面活性剤を使用し、水道水で 20 倍希釈、25 倍発泡の条件で統一した。

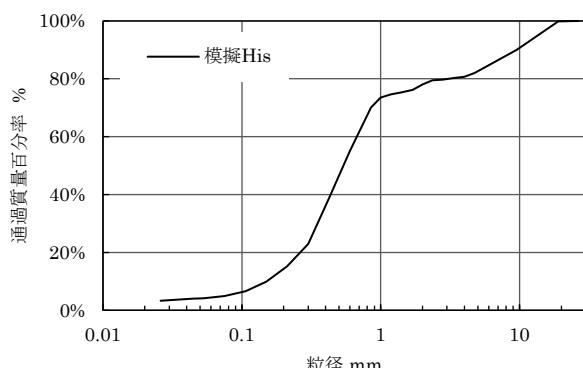


図-2 模擬 His の粒径加積曲線

実験には、図-3 に示すようなプラスチックモールド(内径 90 mm、高さ 100 mm) 2 個を上下に組み合わせた容器を使用した。容器に気泡混合土を満たし、1 時間静置する。1 時間経過後に上部モールドと下部モールドを注意深く分割し、それぞれに満たされている気泡混合土の質量計測後、湿潤密度を算出した。気泡混合土の上下モールド湿潤密度比を式(6)のように定義

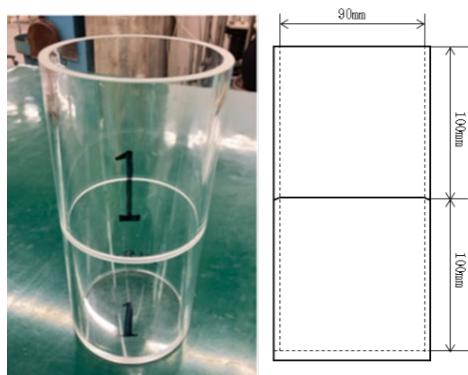


図-3 上下分割モールド (左: 容器写真、右: 容器断面図)

し、分離沈降の進行度合いを示す指標とした。

$$\text{湿潤密度比} = \frac{\text{容器下部の気泡混合土の湿潤密度}}{\text{容器上部の気泡混合土の湿潤密度}} \quad (6)$$

すなわち、湿潤密度比が大きいほど分離が進行していることになる。なお、静置して 1 時間経過以降は密度比がほぼ一定に落ち着くことを事前に確認したので、静置時間を 1 時間とした。

実験結果を図-4 に示す。含水比 w と湿潤密度比の関係をプロットした。全ケースで含水比 w の増加とともに湿潤密度比も増加する。また、同一含水比 w では気泡添加率が大きいほど湿潤密度比も大きい。

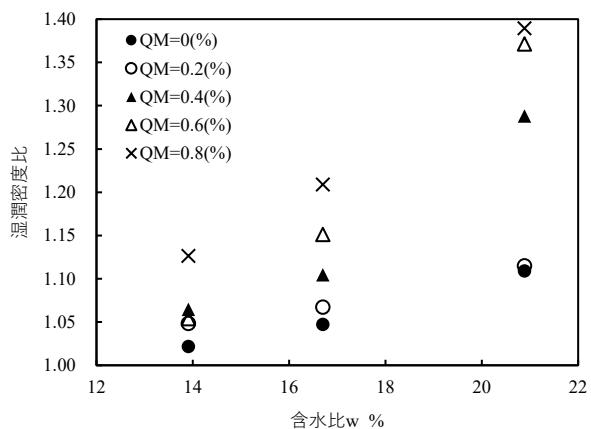


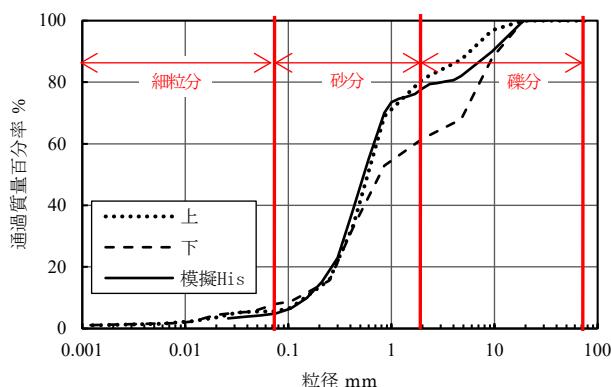
図-4 分離特性確認実験結果 (模擬 His)

3.2 気泡混合土の分離の定義について

湿潤密度比から判断して、分離現象が発生していることはわかる。本節では、粗粒分の分離含水比を決定するにあたって、気泡混合土の分離の定義について検討した。

3.1 の実験結果より、含水比 w と湿潤密度比には相関関係があることがわかった。そこで、分離と判断する湿潤密度比を決定するために、分離現象が生じた際の試料土の粒度特性の変化に着目した。分離の程度が大きい代表ケースの粒度試験結果として、気泡添加率(質量比) $Q_M=0.1\%$ および 0.8% 、含水比 $w=20.9\%$ 、湿潤密度比 1.239 のケースを図-5 に示す。

粒度試験結果より、上下モールド内試料の粒径加積曲線の差異は、細粒分、砂分よりも礫分で顕著である。ただし、湿潤密度比が大きい場合は、砂分の差異も大きくなる傾向がある。

図-5 粒径加積曲線 ($w=20.9\%$, $Q_M=0.8\%$, 湿潤密度比 1.239)

粒径加積曲線の形状変化を統計的に取り扱うために、粒度分布を対数正規分布で近似する方法が提案されている。土屋ら⁶⁾は、粒度分布が対数正規分布で表される場合、その確率密度関数 $f(D)$ は式(7)で表現できることを示している。

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0 D} \exp\left\{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ln D - \lambda}{\sigma_0}\right)^2\right\} \quad (7)$$

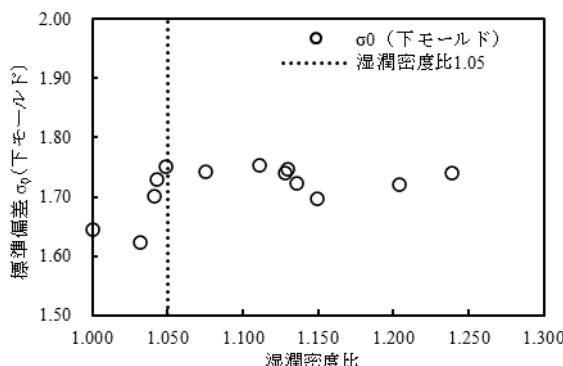
ここに、 D は土粒子の粒径、 $\ln D$ は D の自然対数、 λ は $\ln D$ の平均値、 σ_0 は $\ln D$ の標準偏差である。なお、 λ および σ_0 は、それぞれ以下の式(8), (9)で定義される。

$$\lambda = \ln D_{50} \quad (8)$$

$$\sigma_0 = \ln \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}} \quad (9)$$

上述の式に基づき、分離実験で得られた粒度試験結果を対数正規分布で近似して表示することを試みた。

分離の進行により粒径の大きな粒子から下方に移動していくと考えれば、下部モールドに含まれる試料の粒径のばらつきが大きくなることが予想される。湿潤密度比と下側モールドの標準偏差 σ_0 との関係を図-6

図-6 湿潤密度比と標準偏差 σ_0 との関係

に示す。湿潤密度比 = 1.05 付近までは標準偏差 σ_0 は増加傾向にあるが、それ以降は大きく変化しないことがわかる。そこで、以降の分離含水比の導出では湿潤密度比 = 1.05 を気泡混合土の分離現象の判断基準として検討を進める。

3.3 分離含水比の導出

3.1 での検討結果を踏まえ図-7 に示す試料を用いて分離特性確認実験を実施した。実験結果から、湿潤密度比と含水比の関係について近似曲線が得られる。湿潤密度比 = 1.05 と上記近似曲線との交点を粗粒分の分離含水比 w_{maxC} と設定し、 w_{maxC} を目的変数に、気泡添加率(質量比) Q_M (%), 粗粒分の比表面積 S (m^2/kg) を説明変数として、重回帰分析を実施した。重回帰分析の結果、粗粒分の分離含水比 w_{maxC} を式(10)のように定義する。回帰式の決定係数は、 $R^2=0.709$ である。

$$w_{maxC} = -6.81Q_M + 0.96S + 18.44 \quad (10)$$

気泡混合土の分離含水比 w_{max} は、文献²⁾を参考に、粗粒分・細粒分の影響を分けて導出を行う。それぞれの分離含水比 w_{maxC} , w_{maxF} を細粒分含有率 F_c で加重平均し、式(11)のように消泡含水比 w_{max} を計算する。

$$w_{max} = w_{maxC} \times \frac{100 - F_c}{100} + w_{maxF} \times \frac{F_c}{100} \quad (11)$$

細粒分の分離含水比 w_{maxF} は、近藤らの研究²⁾に準拠し、式(12)で定める。

$$w_{maxF} = w_L \quad (12)$$

一方、粗粒分の分離含水比 w_{maxC} は式(10)に示すように、これまで検討した分離特性確認実験から導出した

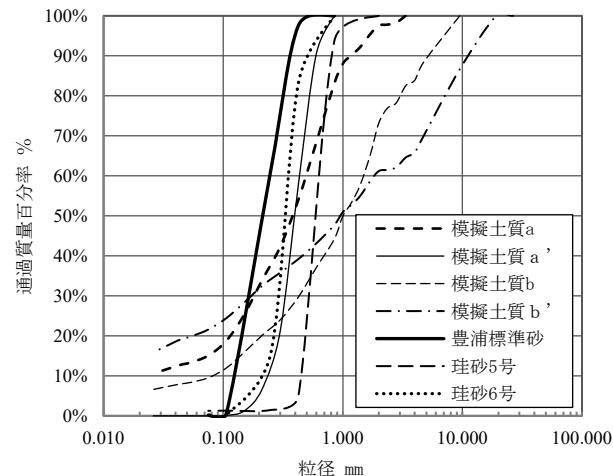


図-7 各試料土の粒度分布

分離含水比推定式を適用する。今回の検討に使用した試料土は最大粒径 20 mm 以下であったため、最大粒径 20 mm 以上の土質については更なる検討が必要である。

4. モデルケースによる品質管理手法の試行

4.1 気泡混合土の分離特性の把握

2, 3 章で提案した気泡混合土の品質管理について、図-8 にフローを示す。以下、モデルケースを設定して試行する。

図-9 に示すシールド掘削断面において、木節粘土が 20.00 %、豊浦標準砂が 80.00 % の土層構成とする。気泡添加率 Q_M (質量比) を 0.50 % と設定し、図-8 の手順に従って検討を進める。最初に掘削対象土の自然含水比 w_n を推定する。土層構成から加重平均し、自然含水比 w_n の推定値は 31.00 % となる。

次に、式(5)、式(11)を用いて、掘削対象土の消泡含水

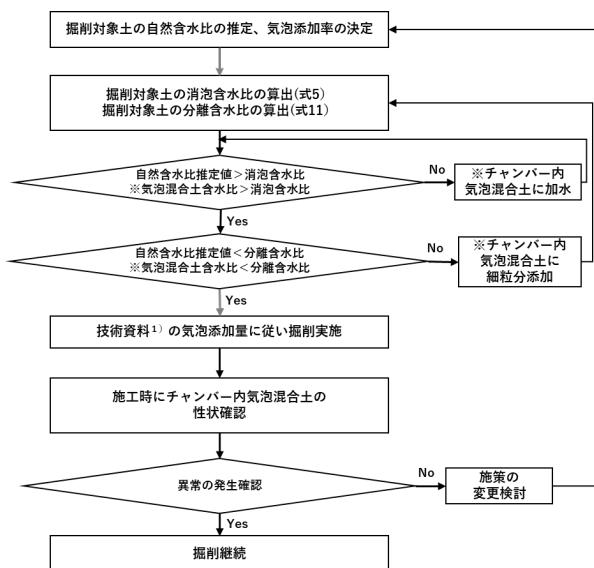


図-8 気泡混合土の品質管理フロー図

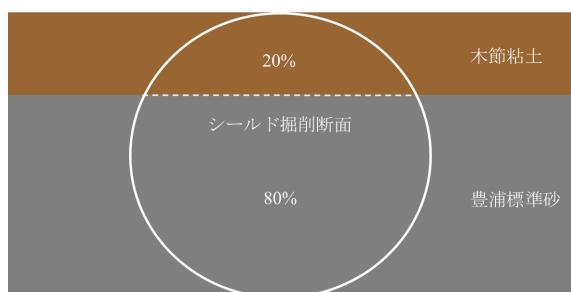


図-9 モデルケースのシールド掘削断面

表-3 推定自然含水比 w_n の算出

掘削対象土	土層構成 (%)	単体での自然含水比 w_n (%)	自然含水比 w_n の推定値 (%)
木節粘土	20.00	35.00	31.00
豊浦標準砂	80.00	30.00	

表-4 自然含水比 w_n の推定値と消泡含水比 w_{min} 、分離含水比 w_{max} との比較

項目	含水比 (%)
自然含水比 w_n の推定値	31.00
消泡含水比 w_{min}	12.98
分離含水比 w_{max}	29.82

比 w_{min} 、分離含水比 w_{max} を算出する。細粒分含有率 F_c は、表-3 より 20.00 % である。式(5)および表-3 の物性値から、消泡含水比 w_{min} は 12.98 % となる。一方、式(11)および表-3 の物性値より、分離含水比 w_{max} は 29.82 % となる。

表-4 に示すように自然含水比 w_n の推定値は消泡含水比 w_{min} よりは大きいが、分離含水比 w_{max} よりも大きくなり、チャンバー内気泡混合土の分離により、塑性流動性の確保が懸念される。

そこで、図-8 のフローに従い気泡混合土に細粒分を添加する。添加する細粒分は表-1 の Ka-Be とし、表-5 に示す土層構成になるように添加した。Ka-Be の含水比は 180.00 % とする。

表-1、表-3 および表-5 から、Ka-Be 添加後における対象土の物性値を加重平均により算出し、表-6

表-5 Ka-Be 添加後の土層構成

対象土	土層構成 (%)
木節粘土	16.66
豊浦標準砂	66.68
Ka-Be	16.66

表-6 Ka-Be 添加後の対象土物性値

自然含水比 w_n の推定値 (%)	液性限界 w_L (%)	塑性限界 w_P (%)	塑性指数 I_p
55.83	103.23	29.16	74.07

表-7 細粒分添加後の自然含水比 w_n の推定値と消泡含水比 w_{min} 、分離含水比 w_{max} との比較

項目	含水比 (%)
自然含水比 w_n の推定値	55.83
消泡含水比 w_{min}	34.12
分離含水比 w_{max}	61.10

に示す。

表-5 より細粒分含有率 F_c は 33.32 % である。式(5)および表-6 の物性値から、消泡含水比 w_{min} は、34.12 % となる。一方、式(11)および表-6 の物性値より、分離含水比 w_{max} は 61.10 % となる。表-7 に示すように、自然含水比 w_n の推定値は消泡含水比 w_{min} より大きく、分離含水比 w_{max} より小さくなり、含水比の管理範囲内に収まった。これにより、気泡混合土の消泡、分離が生じることなく塑性流動性を確保できる。

今回、モデルケースとして、自然含水比 w_n の推定値が分離含水比 w_{max} を上回るケースを試行した。試行では、1 回の調整で自然含水比 w_n の推定値が含水比の管理範囲内に収まったが、実際の現場では細粒分を少しずつ添加しながら図-8 の手順を繰り返し、自然含水比 w_n の推定値が含水比の管理範囲内に収まるように調整する。

5. 結論

(1) 消泡含水比 w_{min}

- ・消泡含水比試験を実施し、TF 値と含水比との関係を導いた。チャンバー内気泡混合土が塑性流動性 (TF = 105 mm) を満足するコンシステンシー指数 I_C を 0.2 と定義し、細粒分の最小含水比 w_{minF} を導出した。
- ・粗粒分の最小含水比 w_{minC} は、既往の研究を参考に表面乾燥含水比と定義した。

(2) 分離含水比 w_{max}

・粗粒分の分離含水比 w_{maxC} は、分離特性確認実験を実施し、気泡添加率（質量比） Q_M (%) と粗粒分の比表面積 S (m²/kg) を説明変数として定義した。気泡添加率（質量比） Q_M (%) が大きくなるほど、また粗粒分の比表面積 S (m²/kg) が小さくなるほど粗粒分の分離含水比 w_{maxC} は小さくなり、分離・沈降が進行しやすくなる。

・細粒分の分離含水比 w_{maxF} は、既往の研究を参考に液性限界 w_L と定義した。

(3) 現場での気泡混合土の品質管理

- ・自然含水比 w_n の推定値が消泡含水比 w_{min} よりも小さい場合は、チャンバー内に加水することにより気泡混合土の含水比 w_{mix} が消泡含水比 w_{min} を超えるように管理して塑性流動性を確保する。
- ・自然含水比 w_n の推定値が、分離含水比 w_{max} よりも大きい場合は、チャンバー内に細粒分を添加することで気泡混合土の含水比 w_{mix} が分離含水比 w_{max} を下回るように管理して、気泡混合土の分離沈降を抑制し、塑性流動性を確保する。

参考文献

- 1) シールド工法技術協会：気泡シールド工法 技術資料, 2011.
- 2) 近藤義正・赤木寛一・仲山貴司：掘削土砂に気泡と水を添加した地盤掘削用安定液の開発と適用、土木学会論文集 C Vol. 64, No. 3, pp.505-518, 2008.
- 3) 徳永光一：pF 土壌水分系による土の物理的・力学的性質に関する二、三の研究、農業土木研究, Vol. 25, No. 1, pp. 18-24, 1957.
- 4) JIS R 5201 : 2015 セメントの物理試験方法。
- 5) 例えは、東京外環トンネル施工等検討委員会：中央 JCT ランプシールド工事の安全・安心確保の取組みについて、第21回委員会資料, 2020.
- 6) 土屋義人・山元淳史：粒度分布を考慮した砂質土における非定常浸透流の基礎方程式とその抵抗則、京都大学防災研究所年報、No. 36, B-2, 1993.

(原稿受理 2025.4.29)

学会の動き

令和6年度地盤工学会の表彰に関する報告

北田 奈緒子（きただ なおこ）

(公社) 地盤工学会 表彰委員会委員長

e-mail: kitada@geor.or.jp

令和6年度の地盤工学会学会賞の表彰、貢献賞の表彰、出版賞の表彰、一般表彰が決定したので、これらについて報告する。また、公益社団法人地盤工学会第67回通常総会（令和7年6月10日）において、名誉会員の推挙に関する議案が承認されたので、あわせて報告する。

1. 地盤工学会賞の選考経過と結果

地盤工学に関する優れた研究業績と技術的実践の奨励と表彰を行うことは、定款5条(3)に定めるとおり、公益社団法人地盤工学会の主要な事業（公【4】表彰関連事業）である。

地盤工学会賞は、技術賞、研究・論文賞の2部門からなる。技術賞部門には、技術業績賞、技術開発賞の二つの賞があり、研究・論文賞部門には研究業績賞、論文賞（英文部門・和文部門）、研究奨励賞の三つの賞がある。

令和6年度は、技術業績賞2件、技術開発賞2件、研究業績賞0件、論文賞（和文部門）8件、論文賞（英文部門）4件、研究奨励賞7件の応募があった。図-1に、令和6年度を含む過去5年間の応募件数推移を示す。同図に見られるとおり、令和6年度の応募総数は23件であり、昨年度とほぼ同じ件数であった。しかし、研究業績賞への応募はなかった。

表彰委員会では、応募業績1件につき、それぞれ4名の審査委員を選出し、専門的な立場から第1次審査を実施した。次に、各審査員からの審査結果に基づいて、第2次審査の対象を絞り込み、表彰委員会20名全員による投票を行った。なお、一連の審査過程において、応募業績に関連の深い方が審査に当たることがないように細心の注意を払っている。

その後、投票結果に基づき表彰委員会にて最終審査を行い、学会賞候補者を選んだうえで授賞理由書を付

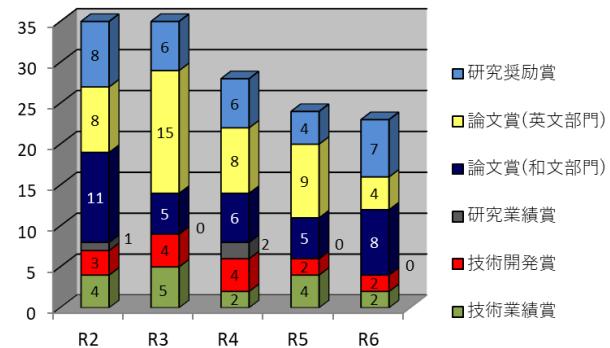


図-1 過去5年間の応募数の推移

して理事会に推薦し、令和7年3月17日開催の理事会における審議を経て最終決定した。これらは、表-1に示すとおり、技術業績賞2件、技術開発賞1件、研究業績賞0件、論文賞（和文部門）3件、論文賞（英文部門）2件、研究奨励賞3件の合計11件である。

なお、昨年度と同様に通常総会後の表彰式は対面とオンラインを併用する形式で開催し、各受賞業績に対する表彰および各受賞者による紹介を行った。さらに各受賞者に技術概要、取組み経緯、受賞の感想等を披露いただく時間を設け、偉業に対して聴講者からは温かい拍手が送られた。

2. 名誉会員の推挙の経緯と結果

名誉会員は、定款6条3および表彰規程18条に「地盤工学とそれに関連した建設事業の発展に特に功労・功績が顕著である者」と定められている。本部・支部の役職や永年にわたる会員継続に配慮するとともに、海外や学会員以外の方にも門戸を開いて選考を行ってきた。令和6年度は、11名の候補者案を委員会で選定し、学会賞審議と同日の理事会で承認された。6月10日の通常総会で11名の新たな名誉会員が推挙された。

3. 地盤工学貢献賞の選考経過と結果

地盤工学貢献賞は、長年にわたる地道な活動・業務、一般市民に対する活動のいずれかを通じて地盤工学の進歩発展あるいは社会的イメージの向上に多大な貢献をした個人または団体に授与する表彰制度である。平成22年度の創設以来、隔年で表彰していたが、平成29年度より毎年表彰することとした。今年度は、表-2に示す関東支部、関西支部の推薦による2件について貢献賞授与を決定し、受賞者の所属支部の総会で表彰を行った。

4. 地盤工学会出版賞の選考経過と結果

地盤工学会出版賞は、平成28年度より始めた表彰制度であり、地盤工学の発展あるいは普及に貢献した出版物を対象とし、その著者を隔年で表彰するものである。令和6年度は4件の応募があった。各審査員からの審査結果に基づき出版賞候補を選び、授賞理由書を付して理事会に推薦した。令和7年3月17日開催の理事会において、推薦内容および授賞理由を審議した結果、表-3に示すとおり、1件の出版物について出版賞を決定し、令和7年6月10日の通常総会で表彰を行った。

5. 特別会員の表彰

地盤工学会は、特別会員の永年にわたる学会支援活動に感謝の意を表し、特別会員の表彰を行っている。令和6年度に表彰基準に該当した特別会員は初回表彰と再表彰をあわせて表-4に示す53機関である。表彰は、特別会員の所属する支部総会で行った。

6. 一般表彰および支部表彰

本部の一般表彰と支部表彰は、下記のとおりである。

- (1) 事業企画賞（会員・支部部）：3件（表-5）
- (2) 「地盤工学会誌」年間最優秀賞（公益出版部）：1件、年間優秀賞：2件（表-6）
- (3) 地盤工学研究発表会優秀論文発表者賞（調査・研究部）：127件の受賞業績および受賞者の詳細はHP (https://www.jiban.or.jp/wp-content/uploads/2024/09/happyou_59.pdf) に掲載した。
- (4) 永年にわたる正会員への感謝状贈呈（会員・支部部）：72件（表-7）
- (5) 支部賞等：92件（表-8）

支部賞は各支部で表彰され、一般表彰の各賞は本部で表彰された。

7. 令和7年度の学会賞応募

令和7年度は、地盤工学会賞「技術賞」、「研究・論文賞」、「地盤工学貢献賞」を募集しており、締切は、令和7年10月1日となっている。応募要領は、学会ホームページを参照されたい。なお、令和3年度の募集より引き続いて、技術開発賞に「新しい情報関連技術」の部を別途、設定している。昨今のICTやAI、IoT、DX、i-Construction、BIM/CIMといった技術の潮流を背景に、これらの技術を活用、もしくは融合した地盤工学の新たな技術を期待しての募集である。地盤工学会賞を通して、地盤工学に関わる研究、技術開発が強く推進され、これが地盤工学の発展、社会の貢献に大きく寄与することを期待する次第である。

表-1 令和6年度学会賞

【技術賞部門】技術業績賞

(順不同敬称略)

受賞業績名／業績発表文献	受賞者名
大規模な自然災害を考慮した防潮堤の設置（女川原子力発電所 防潮堤かさ上げ工事）	東北電力（株） 鹿島建設（株）
●授賞理由：本業績は、原子力発電所の防潮堤かさ上げ工事に関して、新規制基準に準拠した設計と短期間かつ高い精度での施工に取り組んだものである。設計では、2011年東北地方太平洋沖地震以降に得られた最新の知見をもとに設定された強い地震動と高い津波に対して機能を損なわないよう解析や試験を実施し、地盤耐震設計の信頼性向上に貢献した。施工では、厳しい条件を克服するために高圧噴射攪拌工法の合理化や大口径鋼管杭の架台構造などの工夫を実行して工期短縮と施工精度向上を実現した。これらの業績は、原子力発電所の安全と地域の安定電源の確保に大いに寄与するものと考えられる。以上より、技術業績賞としてふさわしいと認められた。	
受入土量の変更に対応した大規模土砂処分場のフレキシブルな埋立技術の開発	国土交通省 九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 一般財団法人沿岸技術研究センター (株) 日建設計
●授賞理由：本業績は、新門司港沖土砂処分場（3工区）を対象として受入れ容量を増大させるためのいくつかの課題について検討・評価したものである。容量拡大のためにPVDを用いた圧密促進を採用し、観測結果に基づき受入れ土量の変化にフレキシブルに対応して埋立を行った。特に、地盤調査と動態観測結果による圧密パラメーターの同定や解析地盤モデルの設定を行うことにより沈下予測精度を高めた。また、傾斜堆積する泥面形状を予測する手法を開発し土砂投入計画に反映させた。本手法は今後の大規模な浚渫土砂処分場の運営に対して貴重な知見を提供するものである。以上より、技術業績賞としてふさわしいと認められた。	

【技術賞部門】技術開発賞

受賞業績名／業績発表文献	受賞者名
頭部固定式二重土留め工法の開発	永谷 英基（鹿島建設（株）技術研究所） 井上 直史（鹿島建設（株）土木設計本部地盤基礎設計部） 坂梨 利男（鹿島建設（株）土木技術部） 渡邊 洋介（鹿島建設（株）土木設計本部地盤基礎設計部） 重松 慶樹（鹿島建設（株）土木設計本部地盤基礎設計部） 那須 郁香（鹿島建設（株）東京土木支店） 西岡 英俊（中央大学） 菊池 喜昭（一般財団法人沿岸技術研究センター）
●授賞理由：本業績は、鋼矢板を二重に設置し、頭部を剛結することでラーメン構造化して高い剛性を得る土留め工法を提案し、地盤工学的アプローチに基づき、技術成立性の確認、性能評価を行い、実用化に至るまでの技術開発の経緯をまとめている。本工法は、狭隘な用地でも施工可能で、支保工の省略・縮減による作業スペースの確保により高い施工性と安全性を実現している。また、汎用材料と汎用機械の使用、多様な地盤への適用が可能なことから高い汎用性を有し、地中残置物や建設汚泥の発生を抑制するなど環境負荷の低減にも貢献した工法である。ゆえに、社会的ニーズの高い技術開発として高く評価できるものである。以上より、技術開発賞としてふさわしいと認められた。	

【研究・論文賞部門】論文賞（和文部門）

受賞業績名／業績発表文献	受 賞 者 名
固相内拡散を考慮した固液間物質移動モデルに関する実験的検討	奈佐原 寅太郎（元京都大学大学院 工学研究科修士課程） 肴倉 宏史（国立研究開発法人国立環境研究所 資源循環領域） 加藤 智大（京都大学大学院 地球環境学堂） 高井 敦史（京都大学大学院 地球環境学堂） 勝見 武（京都大学大学院 地球環境学堂）
●授賞理由：本論文は、掘削工事で発生する低濃度汚染土の有効利用を目的に、地盤内の物質移動を予測する DF—Kd モデルの妥当性を実験的に検討したものである。パラメーター Kd および DF を実験的に取得する手法を確立し、吸着・溶出試験の結果をモデルによる計算値と比較した結果、DF—Kd モデルが化学反応の長期持続性を予測しうること、吸着・脱着の不可逆性を説明できることを示した。本研究は、土壤中の有害物質の固定機能を定量化することで地盤汚染対策への応用が期待されるだけでなく、カーボンニュートラルを視野に入れた建設副産物の活用にも貢献し、地盤工学・環境工学分野に広く示唆を与えるものである。以上より、論文賞（和文部門）としてふさわしいと認められた。	
SCP 工法による締固め改良地盤の微視構造変化に関する X 線 CT 模型実験	江副 哲（(株) 不動テトラ 大阪支店） 梅田 洋彰（(株) 不動テトラ 北関東支店） 原田 健二（(株) 不動テトラ 地盤事業本部） 佐藤 宇紘（元熊本大学 技術部） 大谷 順（熊本大学）
●授賞理由：本論文は、我が国における代表的な液状化対策であるサンドコンパクションパイル（SCP）工法の改良効果の中で設計において現状考慮されてない「微視構造」に着目し、この「微視構造」の変化を非破壊かつ 3 次元で測定可能な X 線 CT 法と SCP の施工プロセスを再現可能な模型実験装置の開発に取り組んでいる。さらに、模型実験により可視化した SCP 施工に伴う「微視構造」の変化を画像処理により定量的に評価可能な手法を提案するとともに、開発装置が実施工における SCP 工法の施工サイクルをおおむね再現できることを明らかにしている。このように SCP 工法の施工、設計の高度化を図るうえで有益となる知見がまとめられており、本論文は論文賞（和文部門）としてふさわしいと認められた。	
風化に対する切土法面の管理優先度の決定方法	永田 政司（中日本高速道路（株）東京支社） 村上 豊和（西日本高速道路（株）関西支社） 佐藤 尚弘（明治コンサルタント（株）技術本部） 菊本 統（横浜国立大学）
●授賞理由：本論文は、全国の高速道路の切土法面 96 箇所を対象として供用後 40～50 年にわたって実施してきた弾性波探査等による風化の追跡調査のデータを取りまとるとともに、風化程度の評価指標として「法面安定度」を提案し、その有効性を検証したものである。弾性波探査をもとにして切土法面における風化帯層厚や斜面安定性を評価するための簡便かつ信頼性の高い手法を提案しており、地盤工学における学術的貢献度が顕著である。さらに、実際に崩壊や崩落の前兆となる変状が生じた法面に対する事例検証を通じて、提案手法の適用範囲や実装上の留意事項についても詳細に論じており、切土法面の合理的な管理保全に資する工学的に有益な知見を提供している。以上より、論文賞（和文部門）としてふさわしいと認められた。	

【研究・論文賞部門】論文賞（英文部門）

受賞業績名／業績発表文献	受賞者名
Linking inherent anisotropy with liquefaction phenomena of granular materials by means of DEM analysis	大坪 正英（国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所） Sanjei Chitravel (ブリティッシュコロンビア大学) 桑野 玲子（東京大学 生産技術研究所） Kevin J. Hanley (エディンバラ大学) 京川 裕之（名古屋工業大学大学院） 古関 潤一（ライト工業（株））
●授賞理由：本論文は、気中落下法や湿潤突固め法などの供試体作製法に起因する初期異方性の特徴を個別要素法を用いて表現し、三軸圧縮・伸張試験や繰返し三軸試験を模擬した数値解析を実施することで、初期異方性および誘導異方性の程度に着目して静的せん断強度および液状化強度を詳細に分析している。本研究成果は、初期異方性を有する自然地盤の液状化強度の高度な解釈と強度発現メカニズム解明に大きく貢献し、さらに実務における液状化判定の高度化にも貢献し得ると期待でき、学術的にも実務的にも価値のある内容と評価できる。以上より、論文賞（英文部門）としてふさわしいと認められた。	
Centrifuge modeling of scale effect on hydraulic gradient of backward erosion piping in uniform aquifer under river levees	岡村 未対（愛媛大学大学院） 露口 祐輔（株）四電技術コンサルタント 泉 典洋（北海道大学工学研究院） 前田 健一（名古屋工業大学）
●授賞理由：本論文は、洪水時に河川堤防に生じるパイピング破壊について、特にその発生・進展時の水位とメカニズム、および堤体寸法の影響に関する研究成果を述べたものである。堤防の縮尺模型に遠心加速度を作用させることにより、パイプ内流れの状態を層流から乱流に変化させる一方、特に透水係数と耐浸食性の土の力学特性は一定とした実験が実施できることを明らかにし、パイピング現象に及ぼす砂の粒径とパイプ内流れの状態のそれぞれの影響を独立に調べている。地盤工学と水工学の境界領域にある複雑なパイピング現象の記述と相似則の解明に必要な無次元数を整理し、スケール効果解明の道筋が明確に示されており、地盤工学に関する学術の進展に顕著な貢献をした。以上より、論文賞（英文部門）としてふさわしいと認められた。	

【研究・論文賞部門】研究奨励賞

受賞業績名／業績発表文献	受賞者名
Multi-physics numerical analyses for predicting the alterations in permeability and reactive transport behavior within single rock fractures depending on temperature, stress, and fluid pH conditions	緒方 奨（大阪大学大学院工学研究科）
●授賞理由：本論文は、高レベル放射性廃棄物の地層処分における核種閉じ込め性能を評価するため、亀裂性岩盤中の透水・物質輸送特性の経時変化を予測可能な新たな解析モデルを提案したものである。従来、温度・拘束圧・pH 条件が複合する環境下での地化学反応が透水特性に及ぼす影響を再現できる数値解析モデルは確立されていなかったが、本論文では、有限要素法と熱力学データベースを活用し、圧力溶解などの影響を考慮したマルチフィジックス反応輸送解析モデルを提案している。さらに、透水試験結果との比較によりモデルの妥当性を検証し、その汎用性と応用可能性を示している。これらの成果は、地盤工学・岩盤工学分野への貢献と今後の発展性の観点から、本業績は研究奨励賞としてふさわしいと認められた。	

受賞業績名／業績発表文献	受賞者名
Suffusion in densely compacted Satozuka pumice sand and its impact on static loading undrained shear strength and dilation behaviour	Rupali Sarmah ((株)技研製作所)
●授賞理由：本論文は、北海道胆振東部地震で液状化により甚大な被害を受けた造成盛土の盛土材である火山灰質砂を対象として、締固め条件の違い、内部侵食の有無を考慮して一連の三軸試験を実施し、これらの因子がせん断特性に与える影響を詳細に検討している。その結果、ダイレイタンシー特性及び非排水せん断強さと締固め条件、骨格微視構造、内部侵食の関係性について体系的に説明している。また、密に締め固めた火山灰質砂の盛土は、内部侵食を受けても強度低下がほとんど生じないことを明らかにしており、火山灰台地が多い地域における盛土造成の実務に役立つ知見が得られている。以上より、研究奨励賞としてふさわしいと認められた。	
Sheet-coating mitigation for membrane penetration in undrained triaxial tests and evaluation of comprehensive liquefaction resistance of crushed gravel	笹岡 里衣 (鹿島建設(株)土木設計本部)
●授賞理由：本業績は、繰返し非排水三軸試験において重要なメンブレンペネトレーション(MP)の影響を除去するための新たな実用的な方法を考案し、粗粒土の非排水せん断挙動を系統的な要素試験により明らかにしたものである。砕石などの粗粒土を用いて造成した人工地盤は、従来の液状化判定基準に該当せず、また、繰返し非排水三軸試験方法の基準化では粗粒土は対象とされていなかった。本研究で得られた粗粒土の非排水三軸試験でのMP除去法、粗粒土の非排水せん断強度特性の知見は、粗粒土の非排水せん断強度の信頼度向上、粗粒土から成る人工地盤の合理的な設計や耐震性評価に貢献できると考えられ、本業績は研究奨励賞としてふさわしいと認められた。	
計 11 件	

(注：敬称略、受賞者の所属は応募当時、掲載は応募順による)

表-2 地盤工学貢献賞

(敬称略)

所属支部	受 賞 者	受 賞 分 野
関西	小山 優史	⑤社会的イメージの向上
	<p>●授賞理由：小山優史氏は、過疎化・高齢化が進む福井市高須町において、独自に設置した気象観測装置により現地局所雨量の計測を長期にわたり継続的に実施し、土砂災害発生危険度を分析してきた。学術的な研究成果を活用し、地域住民、社会科学の専門家と緊密に連携しながら取り組んだ観測体制・情報伝達・早期避難のため仕組みの構築は実践的であり、土砂災害リスクが高い中山間地域への貢献度は高く、地盤工学貢献賞にふさわしいと認められた。</p>	
関東	吉田 信博	⑥その他（地盤の防災減災への貢献）
	<p>●授賞理由：吉田信博氏は、令和3年7月に熱海で発生した土石流被害を契機として制定された盛土規制法に関する、新規盛土等に対するマニュアル、既存盛土等に対するガイドライン、不法・危険盛土等への対処方法ガイドライン等を作成し、同法が施行されるまでの事業を強力に推進した。その過程では、関係者との意見交換を通して、地盤工学の知見を取り入れて頂いたことで、地盤工学の社会貢献につながった。この功績は当該分野の社会的地位の向上に大きく寄与し、地盤工学貢献賞にふさわしいと認められた。</p>	
計 2 件		

表-3 地盤工学会出版賞受賞者

(敬称略)

出版物名	受 賞 者 名	
斜面防災・減災 106 のノウハウ 一技術者に必須の知識と勘所一	奥園 誠之（元 西日本高速道路エンジニアリング中国（株）） 下野 宗彦（西日本高速道路エンジニアリング中国（株））	
	<p>●授賞理由：本出版物は、著者による高速道路の整備・維持管理業務を通じた斜面工学に関する経験を読者にわかりやすく伝えようと試みたものである。斜面の災害対策は極めて複雑な地質・地盤が対象であるため学術的知見に依存してばかりでは解決できないことが多い。それらの経験や知識に基づくノウハウをまとめ、図面を多用した豊富な事例とともに、失敗から学ぶというスタンスで執筆されている本書は、若手のみならずベテランの地盤工学者が実務を行ううえで非常に有用である。さらに、多種多様な経験を有する技術者が減っていく中、本書を通じて多様な事例に触れることができるため地盤技術者教育にも大きく貢献するものである。以上より、出版賞としてふさわしいと認められた。</p>	
	計 1 件	

表-4 特別会員表彰

(順不同敬称略)

所属支部	会 員 名	等 級
北海道	株式会社平田建設	4級再表彰（50年）
〃	株式会社測機社	4級再表彰（35年）
〃	會澤高压コンクリート株式会社	4級再表彰（35年）
〃	株式会社ケイジー技研	4級再表彰（25年）

所属支部	会員名	等級
北 陸	北電技術コンサルタント株式会社	4級再表彰 (50年)
	アルスコンサルタンツ株式会社	4級再表彰 (35年)
	一般社団法人石川県地質調査業協会	4級再表彰 (35年)
	旭調査設計株式会社	4級再表彰 (25年)
	株式会社不動テトラ北陸支店	4級再表彰 (25年)
関 東	ジャパンパイル株式会社	3級再表彰 (60年)
	サンコーコンサルタント株式会社	4級再表彰 (60年)
	株式会社竹中工務店技術研究所	3級再表彰 (50年)
	フジタ道路株式会社	4級再表彰 (50年)
	成和地質株式会社	4級再表彰 (35年)
	ジオテック株式会社	4級再表彰 (35年)
	ジー・エス・アイ株式会社	4級再表彰 (35年)
	株式会社横浜テクノス	4級再表彰 (35年)
	株式会社ダイチ地質研究所	4級再表彰 (25年)
	原子力発電環境整備機構	4級初回 (10年)
	損害保険料率算出機構	4級初回 (10年)
	特定非営利活動法人住宅地盤品質協会	4級初回 (10年)
	株式会社長谷工コーポレーション技術研究所	2級初回 (10年)
中 部	東邦地水株式会社	4級再表彰 (60年)
	中央開発株式会社中部支店	4級再表彰 (60年)
	佐藤工業株式会社名古屋支店	4級再表彰 (35年)
	株式会社アオイテック	4級再表彰 (35年)
	矢作建設工業株式会社	3級再表彰 (35年)
	ジェイ・アール東海コンサルタンツ株式会社	4級再表彰 (35年)
	株式会社吉原化工	4級再表彰 (25年)
	一般財団法人東海技術センター	4級初回 (10年)
関 西	大鉄工業株式会社	2級再表彰 (60年)
	国土交通省近畿地方整備局港湾空港部	3級再表彰 (35年)
	株式会社ソイルテクニカ大阪営業所	4級再表彰 (35年)
	国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所	4級再表彰 (35年)
	一般財団法人阪神高速先進技術研究所	4級再表彰 (35年)
	ハウス技研通商株式会社	4級再表彰 (35年)
	丸泰土木株式会社大阪営業所	4級再表彰 (25年)
	カネカケンテック株式会社	4級初回 (10年)
	大阪公立大学地盤工学研究室	4級初回 (10年)
	株式会社山崎砂利商店	4級初回 (10年)
	キタイ設計株式会社	4級初回 (10年)
	京都大学防災研究所地震災害研究部門耐震基礎研究分野	4級初回 (10年)

所属支部	会員名	等級
中 国 〃	株式会社計測リサーチコンサルタント 中国地質調査業協会島根県支部	4級再表彰 (50年) 4級初回 (10年)
	株式会社不動テトラ四国支店地盤研究室	4級再表彰 (25年)
九 州 〃 〃 〃 〃 〃 〃 〃	株式会社不動テトラ九州支店 中央開発株式会社九州支社 日特建設株式会社九州支店 株式会社中央土木コンサルタント 九州旅客鉄道株式会社 エポコラム協会 西日本鉄道株式会社鉄道事業本部施設部線路課 日本ジタン株式会社	4級再表彰 (60年) 4級再表彰 (60年) 4級再表彰 (60年) 4級再表彰 (35年) 4級再表彰 (35年) 4級再表彰 (25年) 4級再表彰 (25年) 4級再表彰 (25年)
	計 53 会員	

表-5 事業企画賞

(順不同敬称略)

受賞業績名	受賞者名
第58回地盤工学研究発表会でのダイバーシティ関連セッション「多様な人材活躍で学会・業界を盛り上げよう」	会員・支部部 ダイバーシティ委員会
地盤工学のためのデータサイエンス基礎講座	関西支部 行事広報G
スクリューウエイト貫入試験(SWS)による宅地の液状化に対する安全性検討方法(案)	関東支部 地盤情報を活用した首都直下型地震に対する宅地防災検討委員会(委員長:清木隆文)
計 3 件	

表-6 「地盤工学会誌」年間最優秀賞、優秀賞

【「地盤工学会誌」年間最優秀賞】

(順不同敬称略)

受賞業績名／業績発表文献	受賞者名
地盤工学における模型実験 第6回 各論 土構造物／2024年2月号掲載（講座）	渡邊 健治（東京大学）／平川 大貴（中央大学）／上野 勝利（徳島大学）

【「地盤工学会誌」優秀賞】

地盤分野における工学と理学の協働 建設コンサルタントの技術者が考える地盤工学と応用地質学の協働／2024年6月号掲載（論説）	中井 真司（復建調査設計（株））
地盤工学における地形情報の活用～航空レーザ測量データを用いた斜面災害リスク評価を例に～／2024年10月号掲載（論説）	高山 陶子（アジア航測（株））／柳野 博（アジア航測（株））／落合 達也（アジア航測（株））／松田 昌之（アジア航測（株））
計 3 件	

表-7 永年にわたる正会員への感謝状贈呈

(敬称略)

所属支部	会員氏名						
北海道	上野 邦行	高井 紀雄					
東北	熊谷 茂一	橋本 亮	渋谷 昭三	小松 順一	原 勝重	伊藤 昇	
北陸	佐藤 昇	筒井 弘之	小林 久男	畠山 正則			
関東	辻本 勝彦	江原 仁	松尾 亨彦	佐藤 高信	佐藤 博	矢野 悅三	
	石崎 武志	川口 聰	田村 幸彦	関根 悅夫	落合 博貴	山下 賢治	
	柳原 純夫	福井 謙三	渡辺 真一	福元 俊一	鬼沢 茂	狭間 博	
	西田 登	国松 直	中之谷 昇	大橋 正	阿部 知之	相川 淑紀	
	八谷 好高	後藤 政昭	田部井 哲夫	桂 豊	西江 俊作	押田 正昭	
	飯場 正紀	石橋 恵司	田中 英正	服部 圓			
中部	下平 雄二	丸山 和夫	松尾 篤樹	浅野 憲雄	榎 勉輔	田邊 謹也	
	平野 義明	中川 誠	玉腰 幸士				
関西	浜田 貞二	古田 芳彦	植田 康宏	竹田 一夫	綾城 本号		
中国	水野 正行	橋本 光則	二木 正則	向井 雅司	谷本 和範		
四国	大西 勉	富士 達雄	土居 正信				
九州	池田 幸博	八百山 孝	岩本 直樹	溝田 豊実			
計 72 会員							

表-8 支部賞等

【北海道支部】

(順不同敬称略)

賞の区分	受賞業績名	受賞者名
支部賞	廃石膏ボードの地盤材料へのリサイクル方法に関する検討	江本 啓二 (萩原建設工業(株))
	室内における簡易動的コーン貫入試験の原位置試験への適応性及び土質定数との関係	水野 敏裕 (益村測量設計(株) (室蘭工業大学社会人学生))
支部賞 (学生部門)	異なる層厚において初期応力の深度分布の考え方が粘性を考慮した圧密沈下挙動に与える影響	大崎 慶丈 (北海道大学)
	道路盛土で用いた泥岩材料の吸水膨張膨潤特性とその評価	小原 拓己 (室蘭工業大学)
	道内火山灰質土からなる斜面の地震時および降雨時の崩壊挙動に関する模型実験	小松 竜大 (室蘭工業大学)
	斜面浅層における不飽和浸透流への無限長斜面適用条件の体系化	佐藤 泰地 (北海道大学)

【東北支部】

賞の区分	受賞業績名	受賞者名
支部賞 (最優秀賞)	八戸地域におけるしらす盛土の不飽和浸透挙動と予測に関する研究	清原 雄康 (八戸工業高等専門学校)
支部賞	α システムを利用した盛土軋圧施工の効率化事例	佐近 翔 (東北電力(株)) 小山慎一郎 (東北電力(株)) 鈴江 康人 (前田建設工業(株) 東北支店) 津田 啓史 (前田建設工業(株)) 石黒 健 (前田建設工業(株) ICI テクノロジーセンター)
	山形県の 2 つのため池改修工事に伴う調査・解析・設計の事例	坂野 修次 (山形県村山総合支庁) 小山 啓太 (山形県村山総合支庁) 矢矧 渉 (山形県置賜総合支庁) 芳賀 敦子 (山形県置賜総合支庁) 岩田 賢 (中央開発(株) 東北支店)
支部賞 (貢献的 業績部門)	—	清原 雄康 (八戸工業高等専門学校)
	—	森口 周二 (東北大学災害科学国際研究所)
	—	古河 幸雄 (日本大学名誉教授)
	—	峯岸 雄一 (陽光建設(株))
	—	長谷川 浩 ((株) ダイワ技術サービス)

【北陸支部】

賞の区分	受賞業績名	受賞者名
支部賞 (研究・論文部門・論文賞)	Xiong, X., Kobayashi, S., Izumi, H., and Zhang, F. (2024). FEM analysis on isotropic consolidation of unsaturated soils using ceramic disks and microporous membrane filters for suction control. <i>Geotech. Test. J.</i> 47(6): 1275–1297. https://doi.org/10.1520/GTJ20230439	熊 畏
支部賞 (功績部門・功績賞)	2016年～2018年 北陸支部選出理事 2017年～2019年 副支部長	金子 敏哉
"	2010年～2013年 副支部長 2014年～2016年 支部長 2014年～2015年 北陸支部選出理事 2017年～2019年 副支部長	松本 樹典
"	2016年～2019年 副支部長	杉本 利英
"	2008年～2009年 幹事長 2010年～2011年 副支部長	門木 秀一
"	2006年～2008年 北陸支部選出理事	宮島 昌克
"	2008年～2009年 北陸支部選出理事	岩田 英二

【関東支部】

賞の区分	受賞業績名	受賞者名
優秀発表賞	アルミ棒積層体におけるリバウンド現象	矢川 萌衣(中央大学)
	既存杭引抜き時に発生する地盤への影響に関する研究	岩崎 光大(東京都市大学)
	自立式鋼矢板護岸の高強度薬液改良効果の評価に関する遠心場傾斜土槽実験	王シイハン(東京都市大学)
	円形土槽を用いた先端根固め杭の支持力試験	高橋 明日香(東京都市大学)
	ガラス粒子の粒子形状がせん断強度定数に及ぼす影響	吉田 尚生(東京海洋大学)
	差圧の変動に対する低配合ベントナイト・砂混合土の透水係数変化	小山 すず(早稲田大学)
	密詰め・緩詰めの人工軽石の state-boundary surface における差異	真下 康平(東京大学)
	The effect of clogging on the performance of a suspension-type grout formula in permeation grouting	Jemy Chua(東京都市大学)
	軽石の単粒子破碎強度と粒子内間隙比や粒子形状の関係	橋本 拓幸(東京大学)
	2018年北海道胆振東部地震で発生したテフラ層すべりにおける異なる地点で採取したテフラに対する定体積繰返し一面せん断特性	名切 智也(山梨大学)
	グラウンドアンカー補強斜面の振動台実験と安全率の算定	加藤 哲志(防衛大学校)
	太陽光発電設備を設置した斜面における表流水及び地下水位変動の簡易予測モデルに基づく表層崩壊の危険度評価	福島 将太(群馬大学)
	令和6年7月の花月川三郎丸橋の洗掘被害調査	渡邊 真一郎(東京大学)
	バランス断面法の考えを取り入れた弾塑性有限要素法による岩盤斜面の地形変動解析	中野 大輝(群馬大学)
	海底鉱物資源の開発における尾鉱の海底処分に関する一考察 -尾鉱の造粒物の大きさ・密度と海底での掃流の関係の検討-	川島 嶽太(東京海洋大学)
	顆粒状軽量気泡コンクリート(AAC)を混合した透水性舗装ブロックの蒸発性評価	坂井 優太(埼玉大学)
	Fast Suction Measurement on Sand using Membrane Filter	金子 茉由(早稲田大学)
	簡易動的コーン貫入試験装置を活用した電気探査手法の検討	土方 渉太郎(東京大学)
	透明地盤へのSP貫入試験	市井 俊介(東京都市大学)
関東支部 技術賞	地盤工学の知見に基づいた住民対話型処分場運営の在り方について	一般財団法人茨城県環境保全事業団 エコフロンティアかさま環境保全委員会
関東支部賞	関東支部設立20周年特別貢献賞	伊藤 和也(東京都市大学)
	"	川本 健(埼玉大学)
	"	岸田 隆夫(メトリー技術研究所(株))
	"	後藤 聰(山梨大学)

賞の区分	受賞業績名	受賞者名
関東支部賞	関東支部設立 20 周年特別貢献賞	小峯 秀雄(早稲田大学)
	"	西村 友良(足利大学)
	"	早野 公敏(横浜国立大学)
	"	松島 亘志(筑波大学)
	"	峯岸 邦夫(日本大学)
	"	若井 明彦(群馬大学)
	"	若月 洋朗(千葉エンジニアリング(株))

【中部支部】

賞の区分	受賞業績名	受賞者名
研究奨励賞	越流に対する表面被覆型対策工の効果と堤体崩壊メカニズムの検討	夏目 将嗣 (名城大学大学院)
技術賞	供用している高速道路トンネルへの避難連絡坑接続における補強工事の実施	堀川 敬 (中日本高速道路(株))
功績賞	該当なし	該当なし

【関西支部】

賞の区分	受賞業績名	受賞者名
学術賞	鉄鋼スラグで改良した軟弱粘土に含まれる重金属等の溶出挙動の解明	加藤 智大(京都大学大学院地球環境学堂) 高井 敏史(京都大学大学院地球環境学堂) 勝見 武(京都大学大学院地球環境学堂)
地盤技術賞	体積含水率観測データによる検証に基づく雨量情報を用いた高速道路斜面の健全度判定手法の提案	安藤 珠希(大阪大学) 小泉 圭吾(大阪大学) 久田 裕史(西日本高速道路(株)) 櫻谷 慶治(西日本高速道路(株)) 乾 徹(大阪大学)
社会貢献賞	画像処理による金沢城文化財石垣の崩落石材同定手法の開発	原 幸平(関西大学大学院社会安全研究科) 小山 倫史(関西大学社会安全学部) 山中 稔(香川大学創造工学部) 西田 郁乃(石川県金沢城調査研究所) 富田 和気夫(石川県金沢城調査研究所)

【中国支部】

賞の区分	受賞業績名	受賞者名
地盤と建設 論文賞	移動体測量を使ったインフラのメンテナンス作業に関する基礎的研究	長江 健三 ((株) 荒木組) 西山 哲 (岡山大学)
地盤と建設 論文奨励賞	アルミ棒積層体に部分敷設した鋼製帯状補強材の引抜き実験の数値シミュレーションと粒子挙動の可視化	前田 祐美 (山口大学)
地盤工学セミナー最優秀報告賞	地中レーダ探査と SLAM による地上と地下埋設物の 3D モデル作成	小林 紅瑠美 ((株) ウエスコ) 田山 良一 ((株) ウエスコ) 白根 明穂 ((株) ウエスコ)
地盤工学セミナー優秀報告賞	地すべり地のボーリングコアを対象とした帯磁率計の活用事例	佐藤 友香 ((株) ウエスコ) 津村 拓美 ((株) ウエスコ) 浅井 瞳 ((株) ウエスコ) 宮本 広富美 ((株) ウエスコ)
地盤工学セミナーや優秀報告賞	ブロック積みのひび割れを中間土で復元した簡易実験	中本 泰誠 (西日本高速道路エンジニアリング中国(株)) 秦 二朗 (西日本高速道路エンジニアリング中国(株)) 金子 雅博 (西日本高速道路エンジニアリング中国(株))

【四国支部】

賞の区分	受賞業績名	受賞者名
優秀発表者	河川堤防のパイピング実験における進展過程の観察	井澤 良太 (愛媛大学大学院)
	部分排水条件で繰返しせん断された砂の再圧密時体積ひずみ特性	長田 知樹 (愛媛大学大学院)
	まさ土の非排水単調および動的せん断特性に及ぼす過酸化水素の影響	山田 大翔 (香川高等専門学校)
	スラスト力を受ける二条埋設管路の挙動に関する模型実験および個別要素法解析	井上 優佑 (神戸大学大学院)
	施工時荷重が杭の鉛直支持力に与える影響と施工データを用いた支持力推定の適応性の検証	戸田 行紀 ((株) 技研製作所)
四国支部賞	自立電源と静電容量センサー (30m 計) による地すべり地の地下水リアルタイム計測	高田 章徳 ((株) エス・ビー・シー) 木村 充宏 ((株) エス・ビー・シー) 上野 勝利 (徳島大学大学院)

【九州支部】

賞の区分	受賞業績名	受賞者名
技術賞	八代港大築島土砂処分場（中仕切堤）におけるカルシア改質土の冬季施工について	五洋建設（株） 土木部門 環境事業部 国土交通省 九州地方整備局 熊本港湾・空港整備事務所 八代港分室 国土交通省 九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 日本製鉄（株） 九州製鉄所 日本製鉄（株） スラグ事業・資源化推進部
技術賞	地下埋設物が複数存在している中洲層（砂層）における掘削工法の施工	大成建設（株）九州支店
支部学生賞 (優良学生賞)	緩傾斜地における地震時の大規模な流動化破壊に関する研究	FENG CHAOFAN
	地盤材料への適用を目指したCO ₂ 固定再生骨材の物理化学特性変化に関する研究	甲斐 栄吾
	Post-failure analysis of slope with spatial variability on shear strength	YU JUNYAN
	斜面安定度および道路への影響を考慮した落石・岩盤崩壊危険箇所抽出手法の開発	川浦 悠梨乃
	表法面・天端補強による越水に対して粘りを発揮する河川堤防構造の検討	藤井 隼人
	石灰およびセメント改良土の一軸圧縮強さ、変形係数、鋭敏比について	久保山 聰子
	搅拌時間の違いを伴う固化材スラリーが改良土の強度発現特性に及ぼす影響に関する研究	福島 美晴
	Assessment of Rainfall-Induced Landslide Susceptibility Based on Geometric Characteristics of 3D Slopes	Li Xun
	Fluorine Removal Effect of Low-cost Adsorbent Using Organic Wastes	Mostafa Mahmoud Abdelazeem Ahmed
	半石墨タイプの築石構造物の動的挙動と補強材の効果に関する実験的検討	有富 文人
	複数の地下空洞を有する地盤の安定解析に関する基礎的研究	福田 和純
	動的載荷時における阿蘇4火碎流堆積物の軟質化特性に関する研究	嘉数 ことり
	空気圧送試験機による土層性状の把握に向けた基礎的検討	木之下 広憲
	Physics-Informed Neural Networks とベイズ推定を組み合わせた地盤パラメータの推定に関する研究	福永 龍世

賞の区分	受賞業績名	受賞者名
支部学生賞 (優良学生賞)	Erosion Resistance Characteristics of Shirasu by Mixing Bamboo Cellulose Nanofibers	Nanaho Miura
	岩内微生物が凝灰岩の力学的性質に及ぼす影響評価	島袋 天
	好気性微生物によるPFAS分解能に関する研究	桃崎 卓実
	降雨による斜面の安定解析におけるせん断試験の適用性の検討	高田 幹光
	石炭灰及びPS灰を用いたジオポリマー改良土の力学・溶出特性	西 浩太
	豪雨時道路斜面災害を対象とした気候変動適応力向上に関する研究	富重 寛人
	乾湿繰り返し条件が農業用ため池底泥のコンシステンシー特性に及ぼす影響	玉田 康誠

学会の動き

地盤工学会技術業績賞を受賞して

大規模な自然災害を考慮した防潮堤の設置（女川原子力発電所 防潮堤かさ上げ工事）



尾形 芳博 (おがた よしひろ)

尾崎 充弘 (おざき みつひろ)

東北電力 (株) 土木建築部長

東北電力 (株) 土木建築部 部長

e-mail: ozaki.mitsuhiro.ks@tohoku-epco.co.jp

瀬戸 謙一郎 (せと けんいちろう)

鹿島建設 (株) 東北支店 GPI 宮古岩泉風力発電準備室 所長

田村 廣丈 (たむら ひろたけ)

鹿島建設 (株) 東北支店女川原子力発電所土木工事事務所 所長

岡 史浩 (おか ふみひろ)

鹿島建設 (株) 東北支店土木部 土木工事管理部長

戸田 孝史 (とだ たかし)

鹿島建設 (株) 本社土木設計本部原子力土木設計部 部長

岡本 道孝 (おかもと みちたか)

鹿島建設 (株) 本社技術研究所 土質・地盤グループ 上席研究員

キーワード：東日本大震災，原子力，防潮堤，鋼管杭，地盤改良

1. はじめに

このたびは、「大規模な自然災害を考慮した防潮堤の設置（女川原子力発電所 防潮堤かさ上げ工事）」に対しまして地盤工学会より栄誉ある技術業績賞をいただき、誠に光栄に存じます。ここに厚く御礼申し上げます。

本業績は、自然災害に係る最新の科学的知見に基づいて発電所の安全性をさらに向上させたものであり、本稿にて概要をご紹介いたします。

2. 事業概要

東北電力 (株) 女川原子力発電所は、東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)の震源に最も近接した原子力発電所です。震災時は震度 6 弱の地震 (保安確認用地震計の最大加速度 567.5 Gal) と、高さ約 13.0 m (敷地高さは 13.8 m) の津波に見舞われましたが、建設当初から未曾有のリスクに備えて敷地高さを設定するなどの地震・津波への備えにより、深刻な被害は受けずに全 3 号機を冷温停止に導き、被災した地域住民を所内に受け入れて地域とともに困難を乗り越えました。これらのこととは国際原子力機関 (IAEA) や世界原子力發

電事業者協会 (WANO) から高く評価いただきました。

防潮堤かさ上げ工事は、震災直後に緊急安全対策として設置したセメント改良土による海拔 17 m (盛土高さ 3 m) の防潮堤を、海拔 29 m までかさ上げしたものです。狭隘な敷地制約や、海側へのアクセスを考慮し、鋼管式鉛直壁と盛土堤防を組み合わせた構造です。

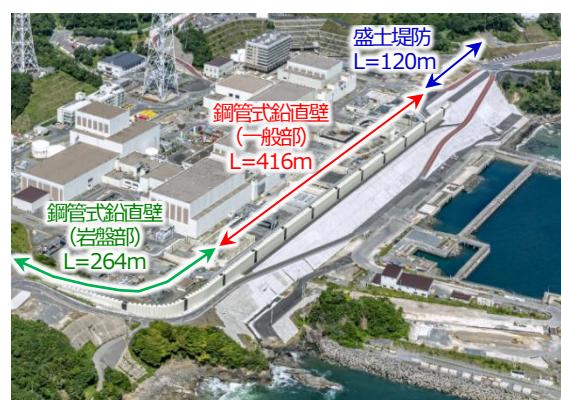


図-1 防潮堤全景

3. 安全性の追求

かさ上げ後の防潮堤は、東日本大震災で得られた最新の知見を考慮し、より過酷な条件下 (最大地震加速度 1000 Gal, 想定津波高さ 23.1 m, その継続時間 0.5

hr.) でも機能を維持できるよう設計されています。想定津波高さにおいては複数の地震（波源域）の運動やすべり量の増大といった最新知見や各種の不確かさを考慮し、防潮堤への液状化の影響評価では東日本大震災で観測された地盤変状に係る再現解析を行い、解析用パラメータを試験下限値から設定するなど、地盤耐震評価の信頼性を高めました。

また、工事着手後に開始された新規制基準に基づく審査における議論を踏まえて、地盤改良や漂流物防護工の追加など、さらなる安全性向上のための構造変更を加えて完成に至っています。

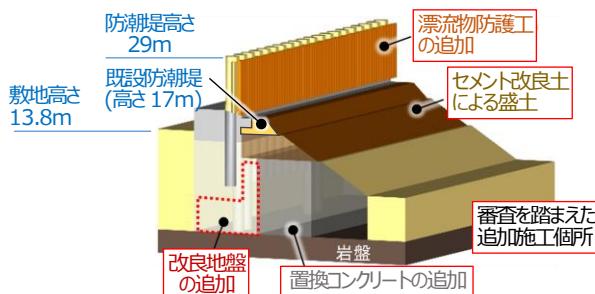


図-2 審査結果を踏まえたさらなる安全性向上

4. 防潮堤の施工に係る特徴

早期の安全確保を目指し、膨大な数量の施工を短期間で、かつ高精度に実施する必要があったことや、工事途中での構造変更を実現するためにさまざまな工夫を実践しています。

4.1 改良地盤造成における工期短縮

狭隘な作業エリアで多様な工事が錯綜する中で、直徑 4.5 m、深さ約 12 m の改良体 331 本を造成する必要がありました。簡易作業台と 2 台の改良機械をユニット化して移動手間を最小化することにより 1.5 か月の工期短縮と安全作業を実現しました。

4.2 大口径鋼管杭の施工精度確保

大口径鋼管杭 ($\phi 2500 \text{ mm}$) の施工にあたり、一般的な許容精度（杭芯ずれ 100 mm、傾斜 1/100）では防潮堤の止水機能が懸念されたことから、掘削用架台と建込用架台をそれぞれ開発し、杭芯ずれ 10 mm、傾斜 1/500～1/1000 という高い施工精度を実現しました。防潮堤や締切堤などの高い止水・遮水性能を求められるインフラへの鋼管杭の適用拡大に期待できます。

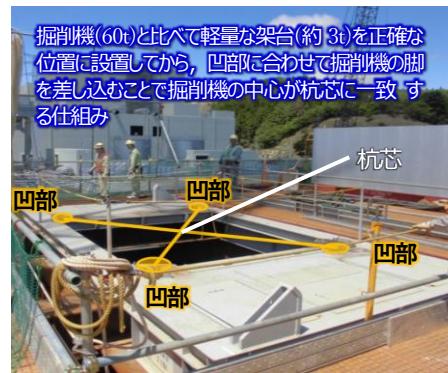


図-3 上：掘削用架台、下：建込用架台および建込状況

4.3 高圧噴射搅拌工の大口径化

安全性向上のための改良地盤の追加造成にあたり、施工済み鋼管杭直下で隙間なく改良するため、改良体の径を 4.5 m から 5.5 m に拡大する必要が生じました。人頭大の巨礫を含む岩碎盛土での施工事例はありませんでしたが、試験施工や事後調査での性能確認により要求性能を満足できることを確認して採用しました。

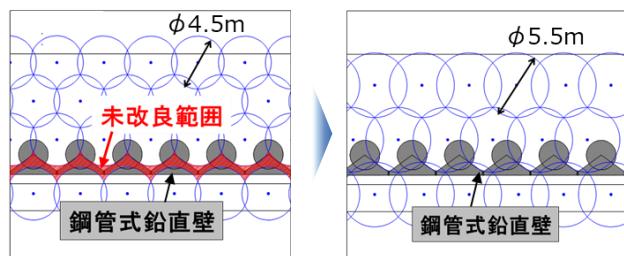


図-4 改良体の大口径化による未改良部発生防止

5. おわりに

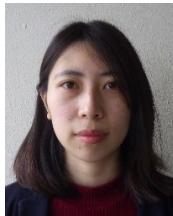
防潮堤かさ上げ工事については約 10 年をかけ 2024 年 3 月に完了し、同年 11 月に女川原子力発電所は再稼働することができました。原子力発電所の安全性向上の取組みにご尽力いただいた関係者の皆様に対して謹んで感謝の意を表します。

(原稿受理 2025.5.22)

学会の動き

地盤工学会技術業績賞を受賞して

受入土量の変更に対応した大規模土砂処分場のフレキシブルな埋立技術の開発



鈴木 賢治 (すずき けんじ)

西ノ園 憲人 (にしのその のりひと)

山口 圭治 (やまぐち けいじ)

梶木 薫 (かじき かおる)

森 晴夫 (もり はるお)

加藤 亮輔 (かとう りょうすけ)

片桐 雅明 (かたぎり まさあき)

国土交通省九州地方整備局北九州港湾・空港整備事務所 所長

国土交通省九州地方整備局北九州港湾・空港整備事務所 課長

国土交通省九州地方整備局北九州港湾・空港整備事務所 評価官

国土交通省九州地方整備局北九州港湾・空港整備事務所 係長

(一財) 沿岸技術研究センター 調査役

(株) 日建設計 都市・社会基盤部門 アソシエイト

e-mail: ryousuke.katou@nikken.jp

(株) 日建設計 都市・社会基盤部門 アソシエイト

キーワード：浚渫粘土、埋立予測解析、圧密促進、動態観測

1. はじめに

このたびは、地盤工学会より名誉ある「技術業績賞」を授与いただき、誠に光栄に存じます。ここに厚く御礼を申し上げます。本稿では、実施してきた業務の課題から解決方法などの概要をご紹介いたします。



図-1 対象エリアの位置

を受け入れるために行う方策の妥当性評価や受入完了時の予測検討を行ったものである。

対象とする土砂処分場は、新門司冲土砂処分場（3工区）（以下、3工区）で、2014年までの浚渫土砂を受け入れる計画のもと、2002年から浚渫土の受入れが始まった。新規の土砂処分場の建設が計画どおりに進まず、いくたびか3工区内に処分する浚渫土量が変更され、それら変更された浚渫土砂を受け入れるための方策が実施してきた¹⁾。それら受入容量拡大方策は、図-2に示すように、堆積している浚渫土を機械脱水して堤体構築に用いること（有効活用）、嵩上げによる容量拡大、PVD打設による圧密促進（堆積土砂の減容化）が行われた。一般的な受入容量拡大方策は、図-2左側に示す山土による嵩上げで、その受入容量よりも今回の方

2. 業務概要と課題の抽出

本業務は、我が国的主要航路である閘門航路を整備する際に発生する浚渫土砂の埋立技術の開発に関わるもので、受入れ浚渫土砂量が変更されていく中、それ

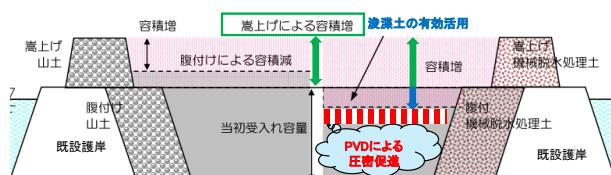


図-2 3工区で用いられた受入容量拡大方策

策はより多くの容積増が期待できる。しかしながら、圧密促進しながら浚渫土が埋め立てられるため予測手法の妥当性に懸念があり、フレキシブルな埋立技術の開発が必要となった。

埋立技術の開発における主な課題は以下であった。

- 1) 埋立てにより上昇する泥面高さの的確な予測
- 2) 一方からの投入により形成される泥面の傾斜
- 3) 投入部の泥面が計画高さに達したとき、傾斜した泥面の過大な残空間（計画高さとの差）
- 4) PVD の有効期間を暫定値としたことによる予測精度

3. 課題に対する対応策と結果

(1) 埋立解析手法の高度化

新北九州空港の埋立事業で実績がある解析 Code²⁾をベースに、地盤特性を加味した複数の地盤モデルを用い、地盤調査結果ならびに泥面高さの経時変化を再現する事後解析を行って圧密定数を同定し、その圧密係数を用いて予測解析を行った。その一例を図-3 に示す。

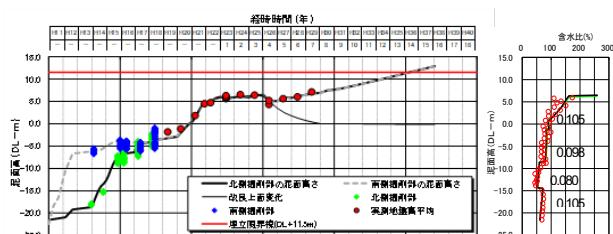


図-3 埋立事後解析結果：泥面高さ変化と含水比分布³⁾

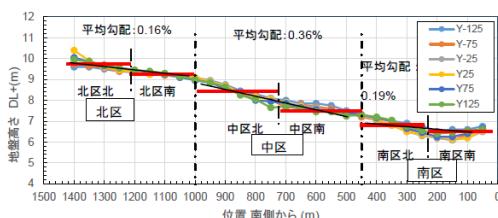


図-4 土砂処分場内の堆積状況と解析上の設定⁴⁾

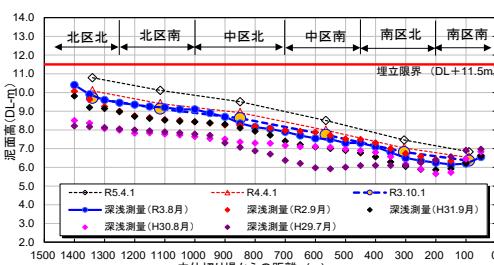


図-5 傾斜堆積状況の事後解析結果⁴⁾

(2) 傾斜堆積する泥面に対する準二次元埋立解析手法

長大土砂処分場の短辺から浚渫土が投入されたため、堆積した泥面は長辺方向に傾斜した。これを図-4 に示すように傾斜に沿って 6 分割して、異なる投入比率を与えた一次元埋立解析の結果を組み合わせて表現する準二次元埋立解析を開発し、図-5 のように表現した⁴⁾。

(3) 予測解析結果の浚渫計画への反映

準二次元埋立解析手法を用い、残空間を残さない配分量を解析的に求め、それをベースに排砂管の出口の移動、濬筋構築などの実施案に反映させた。

(4) PVD の有効期間の照査

設計時に、打設した PVD の有効期間を 4 年とした。図-6 に示すように、動態観測、事後解析から 8 年までは PVD の効果があると結果が得られた³⁾。

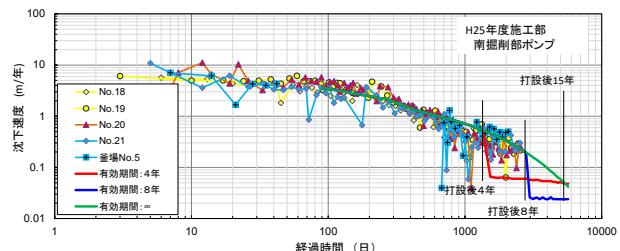


図-6 PVD 打設部の沈下挙動と解析結果の比較³⁾

4. おわりに

受入土量の変更に対応できるフレキシブルな埋立技術が、3 工区の浚渫土受入容量拡大事業を通して、高精度化された。今後、本手法は浚渫土砂処分場の受入容量拡大事業の方針検討や評価方法に活用できる。

謝辞

本事業は、新門司沖土砂処分場（3 工区）技術検討委員会（委員長：善功企九州大学名誉教授）からさまざまな助言をいただきながら進めている。検討会のメンバーその他関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 中道正人・河野正文・梅山崇・山本修司・川原修・片桐雅明・大石幹太・吉福司：新門司沖土砂処分場の受入容量拡大プロジェクト、第 59 回地盤工学シンポジウム、pp. 667-674, 2014.
- 2) 江頭和彦・岩瀬清治・佐藤孝夫・片桐雅明・寺師昌明・吉福司：浚渫粘土による埋立の予測と評価、土木学会論文集、No.715/III-60, pp.147-164, 2002.

- 3) 片桐雅明・山崎誓也・加藤亮輔・森晴夫・井上吉弘・北原政宏・
西野智之・石田道昭：浚渫土砂処分場において PBD が打設さ
れた粘土地盤の浚渫土砂投入中の埋立・圧密挙動と評価, 第
15回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 639-646, 2022.
- 4) 片桐雅明・鈴木美結・加藤亮輔・森晴夫・西倉威弘・北原政宏・

清山貴俊・松尾武：長大土砂処分場の傾斜堆積挙動に対する
事後解析手法の提案, 第59回地盤工学研究発表会, 24-8-3-07,
2024.

(原稿受理 2025.5.22)

地盤工学会技術開発賞を受賞して

頭部固定式二重土留め工法の開発



永谷 英基 (ながたに ひでき)

鹿島建設 (株) 技術研究所 土質・地盤グループ長

e-mail: nagatanh@kajima.com

井上 直史 (いのうえ なおし)

鹿島建設 (株) 土木設計本部 都市グループ長

坂梨 利男 (さかなし としお)

鹿島建設 (株) 技術部 工種技術グループ長

渡邊 洋介 (わたなべ ようすけ)

鹿島建設 (株) 土木設計本部 設計部長

重松 慶樹 (しげまつ けいき)

鹿島建設 (株) 土木設計本部 設計主査

那須 郁香 (なす あやか)

鹿島建設 (株) 東京土木支店 工事主任

西岡 英俊 (にしおか ひでとし)

中央大学理工学部都市環境学科 教授

菊池 喜昭 (きくち よしあき)

(一財) 沿岸技術研究センター 参与

キーワード：土留め、開削、鋼矢板、支保工省略

1. はじめに

このたび、「頭部固定式二重土留め工法」に対しまして地盤工学会より栄誉ある「技術開発賞」をいただき、誠に光栄に存じます。ここに厚く御礼申し上げます。本稿では、開発した技術の概要について説明させていただきます。

2. 本技術開発の背景

開削工法を用いた躯体工事などでは、掘削深さが 3 ~4 m を超える場合、一般的に切梁式支保工が用いられます。切梁やそれを支持する中間杭は、掘削や躯体構築の作業効率低下の要因となります。切梁を省略または削減して施工空間を広く確保できると、掘削や躯体構築の施工性が向上するだけでなく、躯体に巻き込む中間杭の減少による躯体品質の向上や、プレキャスト工法の採用による施工の合理化が期待できます。これらを踏まえ、開削施工の合理化を目的とした「頭部固定式二重土留め工法」を新たに開発しました。

3. 頭部固定式二重土留め工法の概要

本工法は、図-1 に示すように鋼矢板を二重に設置し、頭部を剛結することでラーメン構造化して高い剛性を得る土留め壁であり、鋼矢板、頭部固定構造（鋼材プレス方式または RC 方式）で構成される汎用材料と、圧入機（パイラー）のような汎用機械を用いることで施工が可能です。

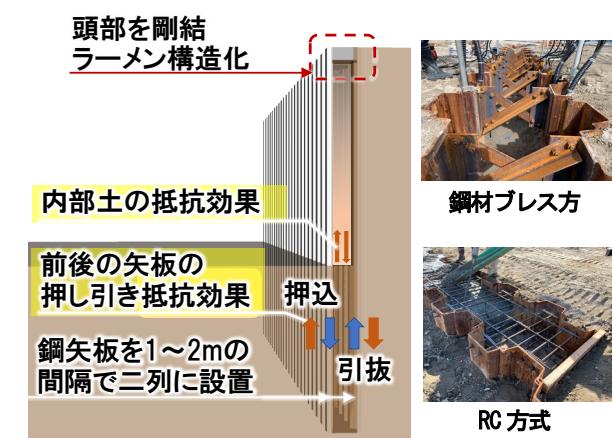


図-1 頭部固定式二重土留め工法の概要

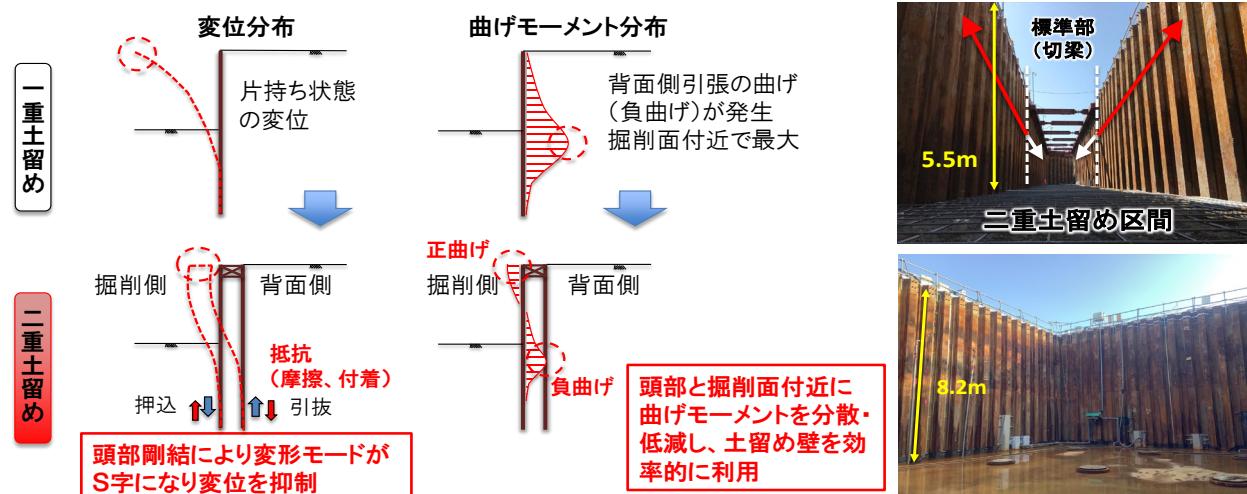


図-2 工法原理

図-3 施工事例

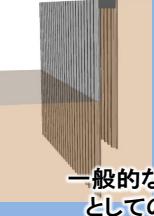
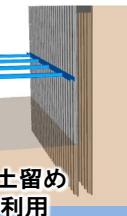
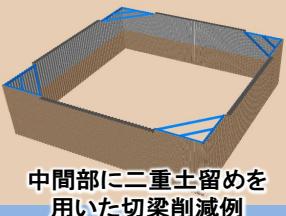
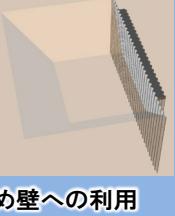
適用例	
一般的な使用方法	    

図-4 適用例

工法原理を図-2に示します。自立壁式土留めは、背面側の曲げモーメントで部材仕様が決定しますが、架構のラーメン化により頭部に掘削側の曲げモーメントが発生するため、壁全体の発生応力が小さくなる特徴（曲げモーメントの分散化・抑制）があります。また、前後2枚の土留め壁を配置することで、土留め間隔が狭くとも前後どちらも水平受働抵抗を受ける控え杭に類似した構造であり、SMW等の高剛性土留めと同程度の変位抑制効果を発揮します。図-3に施工事例、図-4に適用例を示します。

本工法の場合、鋼矢板を二枚使う必要がありますが、以下のような利点を得ることができます。

① 省スペース

狭隘な用地でも施工可能で、在来工法（控え杭式、グラウンドアンカー式）と異なり背面側に広い用地が不要で、圧入機等の小さい施工機械で施工可能です。

② 施工性・安全性・品質の向上

切梁等の支保工の省略・縮減により、広い作業スペースを確保でき、施工性や安全性、躯体品質が向上します。

③ 高い汎用性

鋼矢板と頭部固定構造（鋼材プレス方式またはRC方式）で構成されるシンプルな構造かつ汎用材料で施工可能です。また、地下水位や土質条件による影響が少なく、多様な地盤に適用可能です。

④ 環境負荷低減

SMW工法などと比較して、地中残置物や建設汚泥が発生しません。鋼矢板は引抜き撤去が容易のため、地下水の流動も阻害しません。

4. おわりに

土留め工法は、すでに多種多様な施工技術がありますが、経済性に加えて、安全性や環境負荷低減などのSDGsの観点で持続可能性を追求した建設技術については、まだ取組みの余地があると考えます。こうした領域に対し、地盤工学的なアプローチで技術開発に取り組み、在来工法である土留め開削工事において、新たな可能性を見出しました。更なる技術の発展に寄与することを期待しています。

(原稿受理 2025.6.9)

学会の動き

地盤工学会論文賞（和文部門）を受賞して

固相内拡散を考慮した固液間物質移動モデルに関する実験的検討



奈佐原 寅太郎 (なさはら とらたろう)

元 京都大学大学院工学研究科修士課程

e-mail: nasahara.torataro.t20@kyoto-u.jp

看倉 宏史 (さかなくら ひろふみ)

国立環境研究所 資源循環領域

加藤 智大 (かとう ともひろ)

京都大学大学院 地球環境学堂

高井 敦史 (たかい あつし)

京都大学大学院 地球環境学堂

勝見 武 (かつみ たけし)

京都大学大学院 地球環境学堂

キーワード：分配係数、固相内拡散、溶出、吸脱着、バッヂ試験

1. はじめに

このたびは、論文「固相内拡散を考慮した固液間物質移動モデルに関する実験的検討」に対して、名誉ある論文賞（和文部門）を授与いただき、とても光栄に存じます。本論文は私（奈佐原）が京都大学大学院修士課程にて取り組んだ研究内容をまとめたものです。修士課程修了後の論文執筆まで、長きにわたり多大なるご支援を賜りました多くの方々に御礼申し上げます。

移動の進行性を表現するため、分配係数 K_d に加え、固相内拡散係数 D_F を導入した物質移動モデル ($D_F - K_d$ モデル¹⁾) の妥当性を実験的に評価することを目的としました。

本研究では、ヒ素溶液と土を用いて、1) 接触時間バッヂ試験、2) シリアルバッヂ試験、3) $D_F - K_d$ モデルを用いた数値解析、4) 単一バッヂ試験を実施しました。

1)では、接触時間を複数に変えた吸着試験を実施し、時間と K_d の関係を求め、即時反応とみなす K_{d0} を算出しました。

2. 受賞論文の概要

2.1 研究の目的と手法

昨今の建設工事によって自然由来の重金属等（ヒ素、鉛など）を含む掘削土が大量に生じています。資源循環の観点から鑑みると、土から溶出したり、土に吸着する化学物質の挙動を評価したうえで、これらの低濃度汚染土を有効利用することが求められています。地盤内での化学物質の移動を評価する従前の手法は、液相（隙水）と固相（土粒子）の界面での即時反応を前提に、分配係数 K_d を用いたモデルで記述されており、長期的な実現象を十分に再現していません。

そこで本研究では、固液接触の時間経過に伴う物質

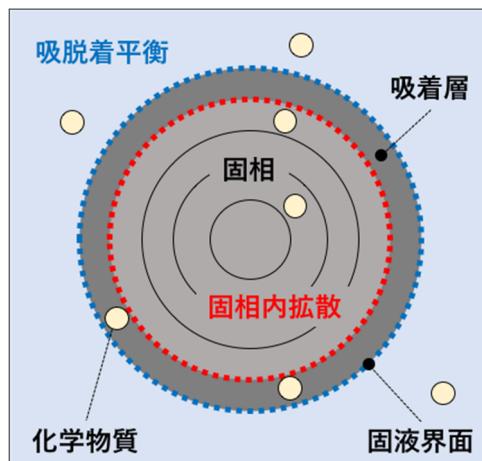


図-1 吸脱着と固相内拡散による物質移動のイメージ

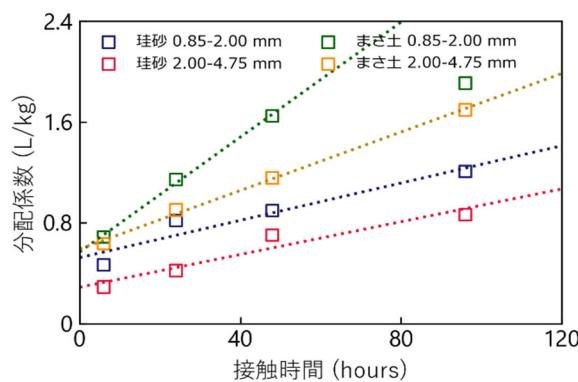


図-2 接触時間と分配係数の関係

2)では、一定時間ごとに一定濃度の溶液に交換する吸着試験を実施し、試験値に一次元拡散モデルを適用して吸着フラックスと D_F を算出しました。

3)では、1), 2)で取得した D_F , K_d を D_F-K_d モデルに入力して数値解析を実施し、固相と液相の接触時間経過に伴うヒ素濃度の計算値を求めました。

4)では、ヒ素溶液に土を浸漬する吸着試験と、吸着試験後の試料を純水に浸漬する溶出試験を実施し、固相と液相の接触時間経過に伴うヒ素濃度の試験値を取得して、3)で求めた計算値と比較検討しました。

2.2 研究の成果

(1) 分配係数の時間依存性

接触時間バッチ試験の結果から、分配係数 K_d の時間依存性を解明しました。 K_d は吸脱着平衡を前提とした係数で、時間をパラメーターに取りませんが、接触バッチ試験の結果では、固液接触時間が増加するほど K_d は増加し、 K_d の時間依存性を確認しました（図-2）。本研究では、この結果を、吸脱着平衡に加えて固相内拡散を考慮することで、「見かけ」の K_d が増加した、と整理しました。数時間程度の固液接触を与える吸着試験から K_d を取得する現行手法では、地盤材料が汚染物質を捕捉する能力を過小評価している可能性が示唆されました。

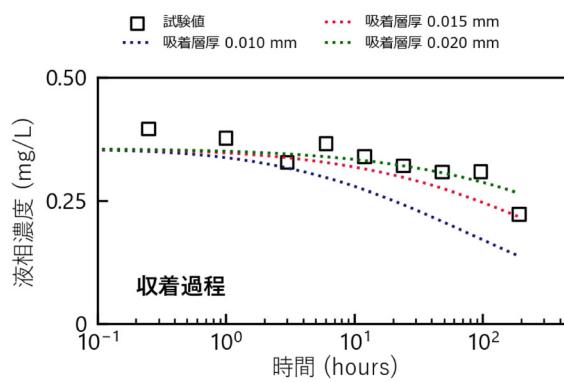


図-3 単一バッチ試験で取得した試験値と計算結果の比較

(2) D_F-K_d モデルの適用性の評価

シリアルバッチ吸着試験と接触バッチ試験から取得した D_F , K_d を D_F-K_d モデルに入力し、数値解析によって求めた計算値は、単一バッチ試験の試験値にて確認された、1) 時間経過に伴う物質濃度変化の傾向、2) 吸着と溶出の不可逆性、を表現しました（図-3）。従前の K_d のみを用いたモデルでは表現できないこれらの現象を、吸着層の概念を導入した D_F-K_d モデルで表現しうることを実験的に示しました。

3. おわりに

本研究を通して、地盤材料の有効活用を見据えた物質移動の長期的な実現象の評価手法として、 D_F-K_d モデルの実用可能性を示唆できたと考えています。本研究が今後の「循環型社会」の構築実現の一助となれば幸甚です。

参考文献

- 1) 着倉宏史・細野賢一・河原裕徳・横山裕之：固相内拡散と吸脱着平衡を接続した物質移動モデルの作成と各パラメーターが有害物質挙動に及ぼす影響の計算、地盤工学ジャーナル、Vol. 17, No. 3, pp. 267-275, 2022.

（原稿受理 2025.5.18）

学会の動き

地盤工学会論文賞（和文部門）を受賞して

SCP 工法による締固め改良地盤の微視構造変化に関する X 線 CT 模型実験



江副 哲 (えぞえ あきら)

(株) 不動テトラ 大阪支店 地盤研究室長

e-mail: akira.ezoe@fudotetra.co.jp

梅田 洋彰 (うめだ ひろあき)

(株) 不動テトラ 北関東支店 地盤研究室

原田 健二 (はらだ けんじ)

(株) 不動テトラ 地盤事業本部 技術部

佐藤 宇紘 (さとう たかひろ)

元熊本大学 技術部

大谷 順 (おおたに じゅん)

熊本大学 理事・副学長

キーワード：サンドコンパクションパイル工法，微視構造，X 線 CT，模型実験，画像解析

1. はじめに

このたびは、地盤工学ジャーナル Vol. 17, No. 4 に掲載いただいた論文「SCP 工法による締固め改良地盤の微視構造変化に関する X 線 CT 模型実験」¹⁾に対して、栄誉ある地盤工学会論文賞（和文部門）をいただき、誠に光栄に存じます。本論文を推薦いただきました地盤工学ジャーナル編集委員会ならびに本論文の審査に関わられた皆様に厚く御礼申し上げます。

本論文は、我が国における液状化対策工法として代表的な SCP 工法の改良地盤特有な効果のうち、繰返せん断履歴による微視構造変化に着目した改良地盤評価の定量化を目的とした研究成果になります。本報にて、論文の概要について紹介させていただきます。

2. 論文の概要

2.1 研究の背景

締固めを原理とする SCP 工法は、1950 年代半ばに開発されてから今日までの半世紀を超えて我が国の地盤改良技術の主力を担っています。SCP 改良地盤は、一般的に N 値増加を密度増加による改良効果として評価

されていますが、それ以外にも複合的な特性が関与することで液状化強度が増加することが確認されています。地盤状態の変化に関わる効果としては、密度増加以外にも、水平有効応力の増加、不飽和化、微視構造の安定化が挙げられます。現位置で直接的に確認することが困難である微視構造以外は、地盤調査や試験等により、これまでに定量的な評価がなされています。

そこで、本研究では、SCP 工法による砂杭造成を模擬した模型実験に、近年、地盤工学分野でも広く用いられている非破壊検査法の一つである X 線 CT²⁾を適用することで砂杭周辺地盤の挙動についての詳細な可視化を行いました。そのうえで、X 線 CT と画像解析を

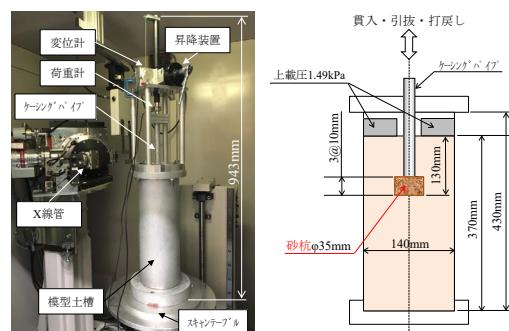


図-1 X 線 CT 専用の模型実験装置

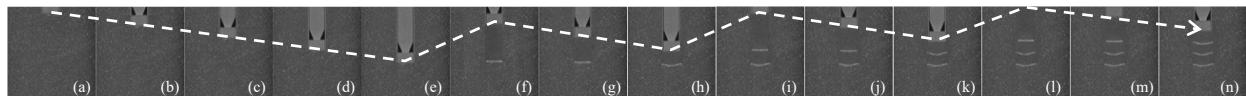


図-2 断面CT画像によるケーシングパイプ先端の軌跡（砂杭造成サイクル）

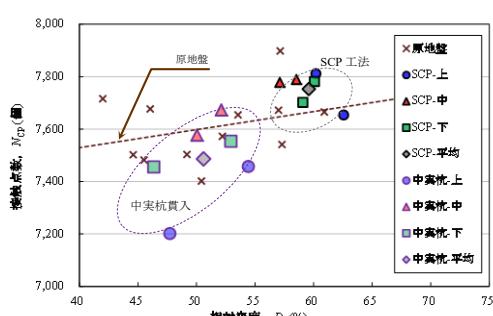


図-3 原地盤とSCP工法および中実杭貫入における相対密度と接触点数の関係

用いることで砂杭造成過程に生じる周辺地盤の微視構造変化に関して、土粒子同士の接触の観点から定量的に改良効果を評価した結果について考察しました。

2.2 SCP 改良地盤の微視構造変化

SCP工法を模擬した砂杭の造成と砂杭造成過程のX線CT撮影をCT室内で実現可能とする模型実験装置

(図-1)を開発し、ケーシングパイプ貫入時の押力を荷重計にて測定し、ケーシングパイプの貫入から引抜きによる砂の排出、打戻しによる拡径までの一連の砂杭造成サイクル(図-2)について、打戻し時に押力が増加することが、実施工におけるSCP工法の施工サイクルの模式と概ね一致することを検証しました。

また、開発したX線CT専用の模型実験装置や実験手法、画像解析を用いた接触点数による評価等を応用することで、SCP工法による砂杭周辺地盤の微視構造変化に関して、これまでが室内実験等による力学的な検証³⁾であったのに対して、今回その変形現象の直接的な可視化と相対密度および接触点数の変化による定量的な評価をしました。砂杭造成に伴って発生するせん断ひずみは拡径された砂杭周辺に集中し、先行して造成された砂杭周囲の体積ひずみが収縮傾向にあることがX線CTと画像解析によって可視化することで明らかとなりました。さらに、砂杭造成に伴って砂杭周辺地盤の相対密度は増加し、接触点数も増加し、それ

らの変動係数は施工が進歩するにつれ小さくなり改良地盤が均一化することもわかりました。

2.3 中実杭の貫入とSCP工法との比較

貫入と造成(引抜きと打戻し)過程で数多くの繰返しせん断履歴を与える施工サイクルを持つSCP工法に対し、それと異なる締固め施工方法として、中詰材の押し込みを伴わない中実杭の貫入のみによる施工(実施工では、締固め杭工法^{例えば4)}に相当する)を模擬し、SCP工法と微視構造の観点で比較を行いました。

SCP工法と中実杭の貫入の比較では、施工方法が異なれば、締固め改良地盤の接触点数に差異が生じ、その接触点数は中実杭の貫入よりSCP工法の方が多いことが明らかとなりました。SCP工法における砂杭周辺地盤の接触点数は、同じ相対密度の原地盤より多いこともわかり、SCP工法による改良地盤の微視構造が安定化すると考えられます(図-3)。

3. おわりに

本研究により、SCP工法による砂質土の締固め改良効果の一つである微視構造の安定化について、土粒子の接触点数と変形挙動の変化に着目して、X線CTと画像解析技術を用いることで詳細な可視化と改良効果の定量的な評価ができることが示されました。

今回、SCP改良地盤に対して新たな試みであったX線CTを適用することで得られた知見をベースとし、微視構造評価の定量化がより一層発展することによる実務への展開とSCP工法の設計法および施工方法のさらなる高度化の一助となれば幸いです。

参考文献

- 1) 江副哲・梅田洋彰・原田健二・佐藤宇紘・大谷順:SCP工法による締固め改良地盤の微視構造変化に関するX線CT模型実験、地盤工学ジャーナル、Vol.17、No.4、pp.523-536、2022.
- 2) 肥後陽介・高野大樹・椋木俊文:X線CTから見る土質力学2.X線CTの概要と研究動向、地盤工学会誌、Vol.65、No.10、pp.41-48、2017.

- 3) 古閑潤一：締固め砂杭の施工が液状化強度特性に及ぼす影響に関する最近の知見, 基礎工, Vol.46, No.11, pp.2-5, 2018.
- 4) 成川匡文・岸野泰章・山内一秀・石川泰・宮崎祐助：先端閉塞治具を用いた鋼管杭の打設による地盤の液状化対策（その 1

工法および現場実験の概要), 第 33 回地盤工学研究発表会,
pp. 915-916, 1998.

(原稿受理 2020.5.22)

地盤工学会論文賞（和文部門）を受賞して

風化に対する切土法面の管理優先度の決定方法



永田 政司 (ながた まさし)

村上 豊和 (むらかみ とよかず)

佐藤 尚弘 (さとう なおひろ)

菊本 統 (きくもと まもる)

中日本高速道路（株）東京支社 東京工事事務所

e-mail: m.nagata.ac@c-nexco.co.jp

西日本高速道路（株）関西支社 建設事業部

明治コンサルタント（株）技術本部

京都大学 学術情報メディアセンター

（元 横浜国立大学 都市イノベーション研究院）

キーワード：切土法面、風化、弾性波探査、法面安定

1. はじめに

このたびは、拙稿「風化に対する切土法面の管理優先度の決定方法」に対して、栄誉ある令和6年度地盤工学会論文賞（和文部門）を賜り、心より御礼申し上げます。本論文の審査に携わってくださった皆様ならびにご推薦をいただいた「地盤工学ジャーナル」編集委員会の関係者の皆様に、厚く御礼申し上げます。

本研究は、高速道路の開通から50年にわたり、代々の研究者が意志を継いで調査してきた記録をもとに実施したものです。研究の遂行にあたり、特に本研究の創始者である（株）高速道路総合技術研究所 研究アドバイザーの奥園誠之氏には、切土法面の風化に関する多くの指導を賜りました。また、同研究所の道路研究部 土工研究室の皆様には、現地調査や土質試験の実施、さらには切土法面の風化に関する議論に多大なるご協力をいただきました。この場をお借りして、本研究にご尽力いただいた方々に改めて深く感謝申し上げます。

2. 受賞論文の紹介

受賞論文は、切土法面完成後から約50年にわたり、全国の高速道路10路線・96か所の切土法面において

過去に実施された現地調査の追跡調査を行い、弾性波探査を用いた切土法面の風化評価方法を提案し、その有効性を検証したものです。

近年、異常降雨に伴う切土法面の崩落が頻発しています。その直接的な原因是降雨ですが、崩落した法面の多くは供用年数が長く、風化が進んでいたことが確認されています。このことから、切土法面の崩落を未然に防ぐには、地盤の風化メカニズムを解明し、その影響を適切に評価したうえで、適格な保全対策を講じることが不可欠です。しかし、法面内部で長期間にわたって進行する風化現象には未解明な点が多く、現在でも経験に基づいた維持管理が中心であり、変状が顕在化してから対処するのが一般的です。こうした課題に対し、著者らの先行研究¹⁾では、単一の切土法面に対して詳細な調査を行い、法面内部の風化程度や力学特性の変化を明らかにしました。とはいっても、高速道路のように延長の長く、多数の法面を有するインフラにおいて、すべての法面に対して同様の調査や対策を講じるのは現実的ではありません。そのため、詳細調査や維持管理を優先的に行うべき法面を、効率的かつ正確に選定する手法の開発が急務となっていました。

これに対して、本論文は全国の高速道路の96か所の

切土法面を対象に 40~50 年にわたって実施した弾性波探査の結果を取りまとめるとともに、風化程度を評価する指標「法面安定度 F 」を開発し、その有効性を実証しました。この研究により、弾性波探査で推定された風化帯の層厚や風化程度が、実際の岩盤の強度低下とよく一致することを明らかにしました。また、提案した法面安定度 F を用いることで、数多くの切土法面の中から崩落のリスクが高い法面を効率的に抽出できることを示しました。さらに、崩壊や変状が発生した法面に対する事例検証を通じて、手法の適用範囲や留意事項を論じました。具体的に本論文が示した特に重要な知見は以下の三点です。

(1) 理論と実用性を両立した法面安定度 F の提案

提案する法面安定度 F は、弾性波探査の結果から得られる風化帯の層厚や弾性波速度および法面勾配のみを用いて簡便に算出できるだけでなく、力学理論に基づいた指標です。ベーンせん断試験で得た強度定数と斜面安定計算により求めた切土法面の安全率 F_s と相関性が高く、予防保全において効率的に法面の安定性を評価できることを実証しました。

(2) 風化進行に伴う経時的な不安定化の評価

風化の進行度合いが異なる二つの法面について事例分析を行い、弾性波探査を繰返し実施して分析することにより風化帯の進展を把握し（図-1）、岩盤の剛性変化を空間的に評価できることを示しました。また、弾性波速度 V_p は簡易動的コーン貫入試験による貫入限界深さと相関性があるため、弾性波速度を用いる提案手法は風化による法面不安定化の評価法として有用であることを実証しました。

(3) 管理優先度の判定法とケーススタディ

96か所の法面を対象としたケーススタディでは、法面安定度 F の閾値を設定して切土法面を抽出することで、崩壊が懸念される法面を効果的に検出できることを示しました（図-2、図-3）。すなわち、法面安定度 F を用いることで、膨大な数の切土法面から管理優先度の高い法面を効果的に抽出できることを実証しました。

本論文では、切土法面の風化評価方法として、弾性波探査による簡便な風化評価手法を提案しました。近年の異常気象によって過去に経験したことのない規模の災害が発生する昨今、災害の未然防止は法面の維持

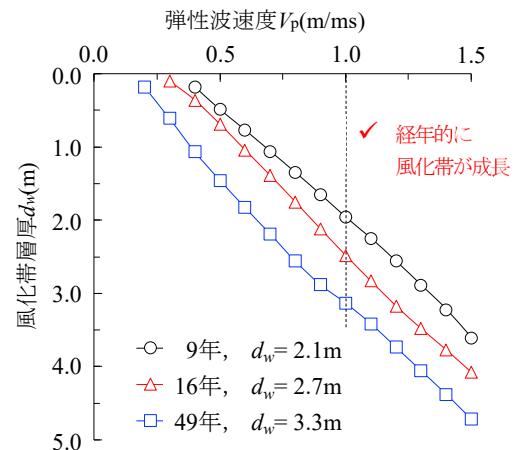


図-1 泥岩切土法面の風化帯層厚の経年変化

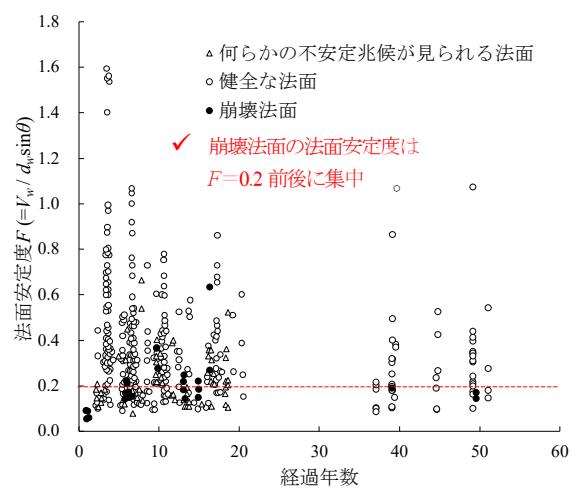


図-2 崩壊法面の法面安定度 F

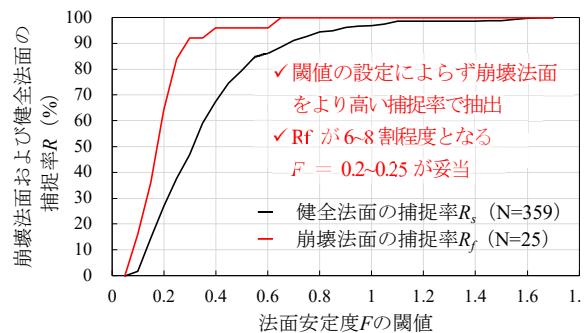


図-3 法面安定度 F の閾値

管理上重要な課題です。本研究が切土法面の保全の合理化の一助となれば幸いです。

参考文献

- 永田政司・Sharmily Bhowmik・菊本統・藤原優・佐藤尚弘：半世紀にわたる泥岩切土法面の風化過程と法面安定への影響、地盤工学ジャーナル, Vol. 17, No. 1, pp.73-89, 2022

（原稿受理 2025.5.26）

学会の動き

地盤工学会論文賞（英文部門）を受賞して

Linking inherent anisotropy with liquefaction phenomena of granular materials by means of DEM analysis

（個別要素法（DEM）解析による粒状材料の液状化現象と固有異方性の関連付け）



大坪 正英（おおつぼ まさひで）

港湾空港技術研究所（元：土木研究所、東京大学）

e-mail: ootsubo-m@p.mpat.go.jp

Sanjee Chitravel（サンジェイ チトラベル）

ブリティッシュ・コロンビア大学（元：東京大学）

桑野 玲子（くわの れいこ）

東京大学生産技術研究所

Kevin Hanley（ケビン ハンリー）

エディンバラ大学

京川 裕之（きょうかわ ひろゆき）

名古屋工業大学（元：東京大学）

古関 潤一（こせき じゅんいち）

ライト工業（株）（元：東京大学）

キーワード：液状化、個別要素法、異方性、三軸試験

1. はじめに

このたびは、国際学術論文誌「Soils and Foundations」に掲載された論文「Linking inherent anisotropy with liquefaction phenomena of granular materials by means of DEM analysis」¹⁾に対して、栄誉ある地盤工学会論文賞（英文部門）をいただき、誠に光栄に存じます。本論文の審査に関わった方々、ご推薦いただいた Soils and Foundations 編集委員会の関係者の方々に心より御礼申し上げます。

本研究は科研費挑戦的研究（開拓）「砂の液状化特性モデル化の抜本的革新を目指した極低拘束下での粒状体せん断挙動の計測」に取り組む中で着想を得た研究内容であり、東京大学で実施した研究の成果となります。共著者のエディンバラ大学 Hanley 氏は本研究に用いた個別要素法（以下、DEM）プログラムの開発者の一人であり、筆頭著者が Imperial College London 博士課程だった頃から研究をサポートしてくれた研究者です。

2. 研究の概要

2.1 本研究の背景と目的

砂地盤は砂粒の集合体であり、粒子間の接觸点を通して骨格構造の安定性を保ちます。地盤の堆積過程に応じて粒子間接觸面の法線方向（以下、接觸方向）には偏りが生じることが知られており、一般に初期異方性、あるいは固有異方性と呼ばれています。初期異方性が力学試験の結果として現れる剛性、強度および液状化強度に影響を与えることは経験的に知られていますが、実験では接觸方向の定量化が容易ではないため、経験的な理解に留まっているのが現状です。そこで本研究では、球形粒子を用いた DEM 解析を実施し、単調および繰返し三軸試験における異方性の発現と変化を定量化した上で力学挙動との関連性を調べました。

本論文では、接觸方向が鉛直に偏る“Ver-供試体”，水平に偏る“Hor-供試体”および等方的な“Iso-供試体”を代表例として液状化挙動について調べました。この

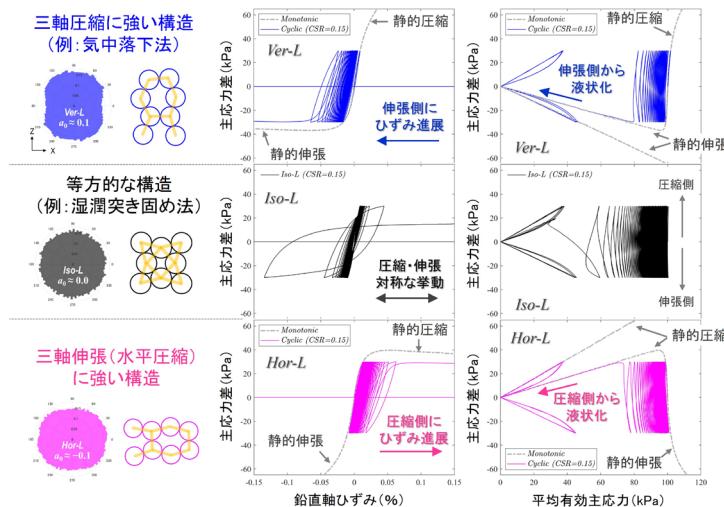


図-1 初期異方性と繰返し三軸挙動の関係

うち *Ver*-供試体は気中落下法、*Iso*-供試体は湿潤突固め法に見られる固有異方性の特徴を捉えたものです。なお、これら供試体の相対密度 ($\approx 30\%$) および粒子間の平均接觸点数は同等になるよう調整しました。

2.2 初期異方性と液状化挙動

上記の緩い3供試体に対して、液状化試験と等価な繰返し三軸試験を定体積条件下で実施した結果を図-1に示します。*Ver*-供試体は鉛直伸張側、*Hor*-供試体は鉛直圧縮側で軸ひずみが急増（つまり、有効応力が急減）して液状化に至っています。このことは、*Ver*-供試体の「鉛直圧縮に強いが水平圧縮には脆弱な骨格構造」ならびに*Hor*-供試体の「鉛直圧縮に脆弱な骨格構造」であることを反映した結果だと考察できます。一方、骨格構造に脆弱となる方向のない*Iso*-供試体の場合、圧縮・伸張側でほぼ対称的な応力経路となり、より大きな液状化強度を示すことがわかります。

統いて同様の異方性を有した供試体を対象に、初期異方性のインデックスと液状化に至るまでの繰返し載荷回数の関係を詳細に調べました（図-2）。両者には強い相関があり、初期異方性の程度が大きくなるほど液状化強度が低下することが明らかとなりました。

このほか、受賞論文¹⁾では繰返し載荷時の誘導異方性と液状化挙動の関係などについても議論しています。

2.3 本研究の成果

本研究では次のような成果を得ることができました。

- 先行研究において経験的に知られていた液状化強度に対する“供試体作製方法の影響”を“初期異

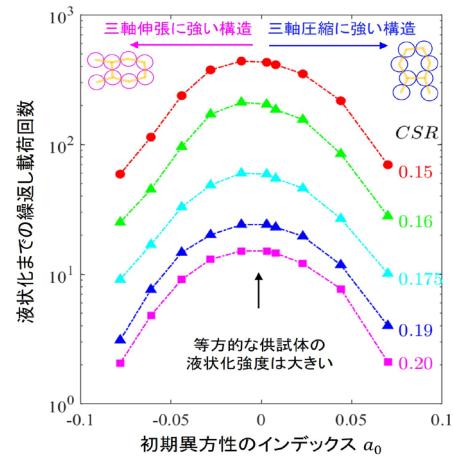


図-2 初期異方性と液状化強度の関係

方性の影響”として解釈できること示しました。

- 初期異方性を考慮した室内試験の高度な解釈、さらには実務での液状化判定法の高度化に資する基礎的なデータを得ることができました。
- “異方性のない”最密状態とすることが、液状化対策としての締固め改良で本来目指すべき状態であることを確認することができました。

3. おわりに

本研究を通して、日々の研究における初期異方性についての意識が高まりました。例えば、気中落下法で作製した供試体に対し、間隙比を調整するために突き固めてしまうと、異方性の状態に影響が及ぶため力学試験結果の解釈が難しくなります。また、液状化試験の結果を考察する時は、気中落下法で作製した供試体は伸張側にひずみが進展しやすい傾向がある、などといった新たな視点を持てるようになりました。

地盤工学分野には複雑で未解明の課題が多くありますが、今回の栄誉ある受賞を糧に、今後も地盤工学の発展に貢献できるよう研究に精進する所存です。

参考文献

- Otsubo, M., Chitravel, S., Kuwano, R., Hanley, K. J., Kyokawa, H. and Koski J.: Linking inherent anisotropy with liquefaction phenomena of granular materials by means of DEM analysis, *Soils and Foundations*, Vol 62, No. 5, 2022, 101202.

<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101202>

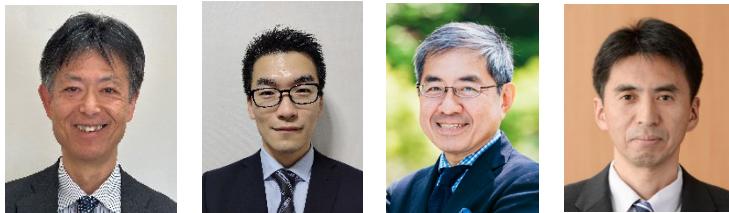
(原稿受理 2025.5.22)

学会の動き

地盤工学会論文賞（英文部門）を受賞して

Centrifuge modeling of scale effect on hydraulic gradient of backward erosion piping in uniform aquifer under river levees

（遠心実験を用いた河川堤防パイピング現象のスケール効果の研究）



岡村 未対 (おかむら みつ)

早稲田大学創造理工学部 教授

e-mail: m.okamura@waseda.jp

露口 祐輔 (つゆぐち ゆうすけ)

四電技術コンサルタント

泉 典洋 (いずみ のりひろ)

北海道大学工学研究院 教授

前田 健一 (まえだ けんいち)

名古屋工業大学 教授

キーワード：パイピング、河川堤防、遠心模型実験、シールズ数

1. はじめに

このたび地盤工学会論文賞（英文部門）受賞の栄を浴し、著者一同身に余る光栄に存じます。受賞業績は、河川堤防の洪水時被災メカニズムの一つであるパイピングを研究対象としたものです。

パイピング現象は 20 世紀初頭にはダムの問題として顕在化し、有名なブライヤー・レーンの経験式 (Lane, 1935) が提案されるなど地盤工学の問題として認識されてきました。しかしながら本格的な堤防パイピング研究が始まったのは 1970 年代からで、当時我が国では堤防管理者側の建設省土木研究所などごく一部の研究機関・研究者による研究があるのみで、地盤工学分野での認知度は低かったものと思われます。その頃の我が国の河川堤防の多くは堤高や堤幅が計画断面に達しておらず、堤体や基礎地盤の質的な評価、特に浸透による堤防被災よりも圧倒的に不足した量的な整備に邁進していたためです。

その間の先達の努力が礎となったのはもちろんですが、状況の転換点となったのは、量的整備率の増加と

2012 年に発生した矢部川堤防のパイピング破堤です。土木学会地盤工学委員会ではその前年から堤防小委員会を立ち上げ組織的に研究を開始したところであり、これを機としその後の国交省の継続的な協力もあり堤防研究が活発になっていきました。その過程において、2017 年の地盤工学研究発表会で展望講演をする機会が第一著者に与えられ、河川堤防についての思いと考え方を述べさせていただいたことは、少なからずその後の研究機運の高まりに影響を与えたものと考えており、この場を借りて感謝申し上げます。

近年の地盤工学研究発表会では堤防に関する多くのセッションが設けられ、河川堤防が地盤工学分野で定着してきた感があります。そのような状況の中で Soils and Foundations に掲載されたパイピングの研究論文が今回高い評価を受けたことは、堤防研究に携わってきた多くの方々のおかげでもあり、関係各位に心より御礼を申し上げます。

2. 受賞論文の概要

本論文は、洪水時に河川堤防に生じるパイピング破

壞について、パイピング進展時の平均動水勾配 H/L (H は堤内外の水位差、 L は浸透路長) とメカニズムに関する、主に実験的研究成果を述べたものです。これまでの研究ではパイピングの発生・進展機構は縮尺模型実験により調べられ、パイプ先端部地盤の浸透力による崩壊とパイプ内の砂粒子のパイプ内流れによる掃流であることが明らかにされ、 H/L の予測法も提案されてきました。しかしながら模型スケール（堤体幅）が増加するとパイピングが低い H/L で発生する、いわゆる寸法効果があり、小型縮尺模型の結果は実物とは異なり、かつ危険側の H/L の評価となることが現在大きな懸念事項となっています。堤体幅の増加と共に生じるパイプの断面も拡大するので、浸透路長が数 10m から 100 m 以上の実大堤防スケールではパイプ内流れが縮尺実験とは異なって乱流となり、それがスケール効果にも影響を及ぼすはずだという仮説に行きついたことがこの研究を始める契機となりました。

通常、遠心模型実験は土の力学特性の応力依存性を考慮して行われますが、本研究では小型縮尺模型のパイプ内流れを層流から乱流に変えるために遠心加速度を利用しました。これによって、パイピング現象の支配的な無次元パラメータであるパイプ内流れのレイノルズ数、限界掃流力に関する粒子レイノルズ数とシールズ数をコントロールした実験を行いました。

実験では図-1 に示すように砂地盤上に堤体を模した透明なアクリルブロックを設置し、堤外側（図の左側）の水位を調整して、遠心加速度場において堤体直下の砂地盤表面にパイプを生じさせました。パイプの

正確な 3D 形状やパイプ内流速分布の計測結果に基づき、パイプ内流れが層流より乱流において低い H/L でパイプが進展することを明らかにしました。また、遠心実験では、加速度が大きいほどパイプ進展時の H/L が低下し、あたかも堤防のスケール効果が再現できたかのような結果が得られるものの、これは異なるメカニズムにより生じることなど、パイピング研究における遠心模型実験の意義も明らかにしました。地盤工学と水工学の境界領域にある複雑なパイピング現象の記述と相似則の解明に必要な無次元数を整理し、スケール効果解明に一定の道筋を示すことができたのは、本研究の重要な成果であると考えています。

パイプ内の砂の掃流現象はパイプ進展を支配するが、パイプの深さは砂粒子径の数倍と小さくパイプ底面粗度はきわめて大きく、パイプは蛇行や分岐を繰返し、さらに先端および底面からの浸透水の流入があるため流れはきわめて複雑です。本研究では掃流を規定する限界シールズ数についても推定を試みたが、その精度には改善が求められるなど、パイピング現象を正確に記述するには至っていません。

3. おわりに

気候変動による降水量増加が予想される中、治水安全度を向上するためには河川堤防の信頼性向上がキーの一つであることに疑う余地はありません。地盤工学の積極的な貢献が求められている現状を受け止め、さらに研究を推進するよう努力する所存です。

参考文献

- Okamura, M., Tsuyuguchi, Y., Izumi, N. and Maeda, K.: Centrifuge modeling of scale effect on hydraulic gradient of backward erosion piping in uniform aquifer under river levees, Soils and Foundations, Vol. 62, Issue 5, 101214, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101214>
- Lane, E.: Security from under seepage masonry dams on earth foundations. Trans. ASCE, Vol. 100, No. 1, 1234-1351, 1935.

(原稿受理 2025.5.9)

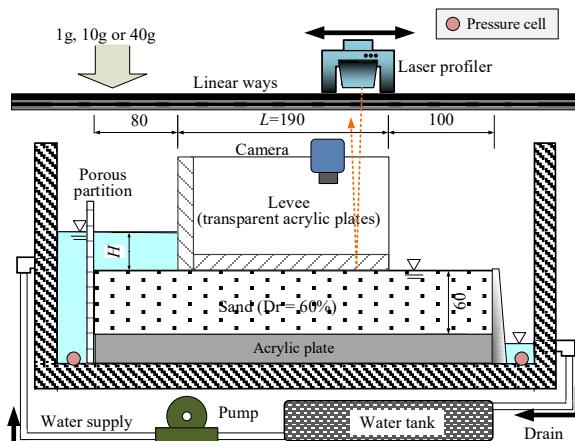


図-1 実験装置の概要

地盤工学会研究奨励賞を受賞して

Multi-physics numerical analyses for predicting the alterations in permeability and reactive transport behavior within single rock fractures depending on temperature, stress, and fluid pH conditions



緒方 燐 (おがた しょう)

大阪大学 大学院工学研究科 准教授

e-mail: ogata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

キーワード：岩石亀裂，透水性，地化学反応，高pH条件

1. はじめに

このたびは、栄誉ある地盤工学会研究奨励賞を賜り、誠に光栄に存じます。ご推薦・ご審査賜りました方々に厚く御礼を申し上げます。受賞対象論文「Multi-physics numerical analyses for predicting the alterations in permeability and reactive transport behavior within single rock fractures depending on temperature, stress, and fluid pH conditions¹⁾」は、温度・拘束圧・pH条件のすべてと連動した、岩石鉱物と水の地化学反応に伴う岩石亀裂の透水・物質輸送特性の経時変化挙動を予測する新たな反応輸送解析モデルの提案・検証を行ったものです。

2. 研究の経緯と概要

高レベル放射性廃棄物地層処分施設の核種閉じ込め性能を評価するうえで、天然バリア（亀裂性岩盤）中に存在する岩石亀裂の透水・物質輸送特性の経時変化を数値解析等により予測することは必須となります。地層処分施設は地下300m以深に建設されるため応力レベルは高く、廃棄体からの発熱により岩盤内温度も上昇も生じます。さらに、処分空洞の支保工や人工バリアに利用されているセメント系材料からのアルカリ成分溶出に伴う地下水pHの上昇等も予想されます。また、このような高温・高圧・高pH（アルカリ）条件

が複合した環境下では、岩石構成鉱物と地下水の間で生じる溶解・沈殿等の地化学反応が活発化し、それらが岩石亀裂の透水・物質輸送特性を長期にわたり経時変化させる可能性が高いことが室内実験等よりこれまでに確認されています。例えば、温度・拘束圧・透過水のpHを制御した条件で実施された花崗岩単一亀裂への室内透水試験²⁾では、透過水が中性に近い条件よりもアルカリ条件（pHが11程度）の場合の方が、高温高圧時の亀裂接触部における鉱物溶解（圧力溶解）の発生に起因した亀裂の経時的な透水性低下度合いがより大きくなる傾向が報告されています。しかし、このような温度・拘束圧に加えpH条件にも依存した地化学反応がもたらす、実際の岩石亀裂における透水・物質輸送特性の経時変化挙動に対して再現性が確認された数値解析モデルはそれまで確立されていませんでした。例えば、透過水が中性に近い条件下で実施された高温高圧環境での単一岩石亀裂透水試験より計測された、亀裂の透水性および透過水中の溶解元素濃度の経時変化等を数値解析により再現できた事例は複数報告されていますが（例えば、Ogata et al. (2018)³⁾、地層処分時の岩盤で想定されるアルカリ環境といったほかのpH条件で計測された実験結果まで再現できた事例はありませんでした。

そこで本研究では、温度・拘束圧に加えpH条件に

も依存した、圧力溶解等の地化学反応およびそれに伴う亀裂の透水・物質輸送特性の経時変化を記述可能なマルチフィジックス反応輸送解析モデルを新たに提案するとともに、そのモデルを有限要素法と熱力学データベースに基づきロバストに求解可能な数値シミュレーション実施機構もあわせて提案しました。

さらに、温度・拘束圧を制御した条件下で超純水（ほぼ中性に近い条件）とNaOH溶液（アルカリ条件）を透過水としてそれぞれ用いて実施された2種類の花崗岩単一亀裂透水試験²⁾に対する再現解析を提案モデルにより行い、実験結果との比較を通じモデルの妥当性を検証しました。その結果、提案モデルは、二つの異なるpH条件における実験結果（岩石亀裂の透水性変化、透過水中の溶解元素濃度変化）を共に時系列で的確に捉えており、モデルの高い妥当性が確認されました。特にpH条件の違いに起因した、温度上昇時の圧力溶解に伴う岩石亀裂の透水性低下速度の差異をよく再現することに成功しました。

3.まとめと今後の展望

以上のように地盤工学・岩盤工学分野においてこれまで再現することができなかつた、温度・拘束圧・pH条件のすべてと連動した地化学反応に伴う岩石亀裂の透水・物質輸送特性の経時変化挙動を予測し得る新たな反応輸送解析モデルを確立している点が、本研究で得られた新規的な成果と言えます。また、本研究で確

立した解析モデルは有限要素法をベースとしているため、多次元化も比較的容易かつより大規模なスケールへの適用性も有しています。したがって、今後はこの解析モデルを高レベル放射性廃棄物の地層処分をはじめとした亀裂性岩盤に関する種々の実問題に適用していきたいと考えています。

謝辞

本研究を進めるにあたり多大なご支援を賜りました、京都大学の岸田潔先生、安原英明先生、愛媛大学の木下尚樹先生、大阪大学の乾徹先生、研究室の卒業生である西羅瑛太氏に心より感謝申し上げます。また、本研究は、JST創発的研究支援事業(JPMJFR216Y), JSPS科研費20K14826, 19H02237の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) Ogata, S., Nishira, E., Yasuhara, H., Kinoshita, N., Inui, T. and Kishida, K.: Soils and Foundations, Vol. 62, Issue 101207, 2022.
- 2) 木下尚樹・安原英明：熱・拘束圧環境下における不連続面を有する花崗岩の透水性評価、Journal of MMJ, Vol. 128, pp.72-78, 2012.
- 3) Ogata, S., Yasuhara, H., Kinoshita, N., Cheon, D. S. and Kishida, K.: Modeling of coupled thermal-hydraulic-chemical processes for predicting the evolution in permeability and reactive transport behavior within single rock fractures, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 107, pp. 271-281, 2018.

(原稿受理 2025.5.22)

地盤工学会研究奨励賞を受賞して

Suffusion in densely compacted Satozuka pumice sand and its impact on static loading undrained shear strength and dilation behaviour



Sarmah Rupali (サルマ ルパリイ)

(株) 技研製作所 圧入技術研究開発センター

e-mail: rupali@giken.com

キーワード：軽石砂，内部侵食，せん断強さ，体積変化

1. はじめに

このたびは地盤工学会研究奨励賞を賜りましたこと、心より御礼申し上げます。本受賞業績¹⁾は、私が北海道大学で取り組んできた研究内容をまとめたものです。

2. 研究概要

札幌市の里塚地区は、約4万年前に支笏火山（現在の支笏湖カルデラ）の噴火による火碎流堆積物で形成された火山性軽石砂層で構成される台地上にある。その土質は、非塑性な細粒分の含有率が高いこと（通常40%以上）が特徴である。札幌市郊外の南東部に位置する里塚地区は、1970年代に住宅地需要の高まりに対応するため、火碎流堆積物でできた丘陵を掘削し、谷部を埋めて開発された。平成30年北海道胆振東部地震後の調査では、土地造成時に設置された地下排水管に内部侵食の痕跡が一部で見られた。内部侵食は、動水勾配の作用下で、細粒分の土粒子が粗粒分の骨格を維持したままその間隙を通って移動するプロセスのことでサフュージョンと称される。この現象は、地盤を構成する土の微視構造を変化させるため、その結果として地盤の力学挙動を変化させる。これまでの研究により、内部侵食は、土の種類、密度、締固め条件、動水勾配などの試験条件に影響されることがわかつている。

札幌市は北海道地方の中心的な拠点都市であり、現

在も成長を続けている。締固めの施工管理は厳しく行われ、今後の建設工事では、高い締固め度（90%以上で、理想的には95%以上）が要求されることになる。しかしながら、破碎性が強く見られる火山灰質砂を高密度に締め固めた場合に、内部侵食がどのように発生し、その結果としてどのように力学的挙動に影響を及ぼすかについては未解明な点も多く、依然として重要な課題として残されている。

本研究の目的は、細粒分含有率が高い火山灰質砂が内部侵食を受けたときに、せん断強さやダイレイテンシーがどんな影響を受けるかを明らかにすることを目的としている。含水比（あるいは飽和度）を種々設定した高密度な締固め条件で供試体を作製した。一連の実験における締固め条件を図-1に示す。準備した供試体に対して、内部侵食特性ならびに、内部侵食がせん断特性に与える影響を評価した。

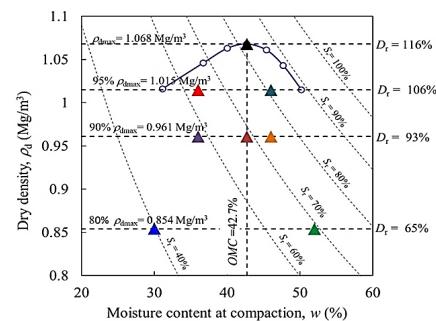


図-1 締固め曲線と供試体の締固め条件

試験では、まず、里塚地区の火山灰質砂の内部侵食ありの高密度供試体と内部侵食なしの高密度供試体に對し、動水勾配を与えて内部侵食特性を評価した。その後、一定の軸ひずみ速度で静的に載荷を行う非排水三軸圧縮試験(CU試験)を実施した。細粒分粒子の移動を許容するために、供試体と接する面に多くの穴を開いた内部侵食試験用のペデスタルとキャップを使用した。これらは、細粒分がトラップされずに中央部の排水経路に流れるように漏斗状にテープー加工された内部構造を有している(図-2)。



図-2 内部侵食試験用に改造したペデスタルとキャップ

その結果、供試体作製時の締固め度が低下するにつれて間隙径が大きくなつて粒子間の接触が弱くなるとともに、マクロポロシティと称される明瞭な間隙ネットワークが形成されるため、内部侵食による細粒分流出量が増加することが示された(図-3)。

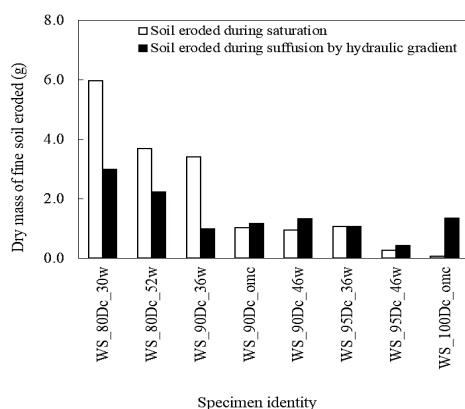


図-3 内部侵食で流出した細粒分粒子の質量

内部侵食は、細粒分の流出により流路の拡大によって透水係数を増加させた。また、内部侵食を受けた供試体は、その後に非排水せん断されると、最大せん断応力(最大偏差応力)も残留せん断強さとともに増加した。この時、せん断時に見られるダイレイターシュ運動において、圧縮傾向から膨張傾向に移行する相変点が小さなひずみの時点で起こり、せん断ひずみが大きくなると負圧の発生により残留強度が大きくなつた

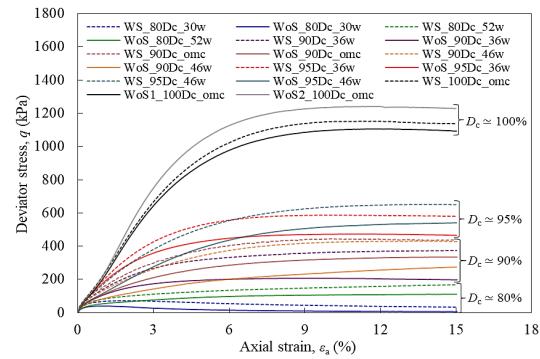


図-4 偏差応力と軸ひずみの関係

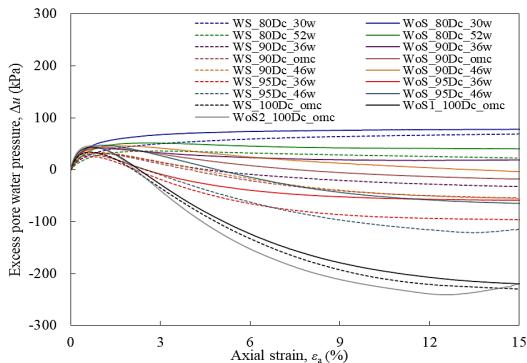


図-5 過剰間隙水圧と軸ひずみの関係

ことがわかる(図-4, 図-5)。

この傾向は、締固め度が80~100%となるように締め固められた火山灰質砂で造成された盛土において、サフェーションによる細粒分の内部侵食が発生しても、非排水せん断強さの減少のような悪影響を及ぼさないことを示している。

謝辞

指導教員の渡部要一教授(北海道大学)には、博士課程在学中、懇切丁寧なご指導を賜りました。また、西村聰教授(北海道大学), 福田文彦助教(北海道大学)には、研究成果をより良いものにするために貴重なご指導をいただきました。また、本論文の編集委員や査読してくださった方々、北海道大学で所属した研究室の学生の皆様に、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Sarmah, R. and Watabe, Y.: Suffusion in densely compacted Satozuka pumice sand and its impact on static loading undrained shear strength and dilation behaviour, Soils and Foundations, Vol. 63, Issue 6, 101397, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101397>

(原稿受理 2025.5.22)

地盤工学会研究奨励賞を受賞して

Sheet-coating mitigation for membrane penetration in undrained triaxial tests and evaluation of comprehensive liquefaction resistance of crushed gravel



笹岡 里衣 (ささおか りえ)

鹿島建設 (株) 設計主任

e-mail: sasaokar@kajima.com

キーワード：液状化，粗粒土，メンブレンペネトレーション

1. はじめに

このたびは、栄誉ある地盤工学会研究奨励賞を頂戴し、誠にありがとうございます。受賞対象論文の「Sheet-coating mitigation for membrane penetration in undrained triaxial tests and evaluation of comprehensive liquefaction resistance of crushed gravel」は、粗粒土の液状化特性の解明を目的として取り組んだ内容をまとめたものです。また、粗粒土の液状化強度比を繰返し非排水三軸試験によって適切に評価するうえで重要なメンブレンペネトレーションの影響を除去するための実用的な方法を考案しました。

2. 研究概要

2.1 目的

東北地方太平洋沖地震（2011年）を契機として、原子力発電施設をはじめとする国内の重要施設の耐震性評価基準の見直しが進められ、これに伴い、図-1に示すような発電所建設時の岩盤掘削で生じた粗粒土を用いて造成された敷地地盤の液状化の考慮が求められています。一方で、粗粒土の液状化強度特性や地震時挙動に関する系統的な研究事例は少ないため、耐震性評価に資する適切な物性値設定が課題となっています。そこで、粗粒土の液状化強度特性や地震時挙動を明らかにすることを目的として、室内要素試験結果から粗



図-1 敷地造成に使用されている粗粒土

粒土の液状化強度比を評価しました。

2.2 成果

当研究では、最大粒径や供試体密度を変化させて繰返し非排水三軸試験を実施し、砂質土の試験結果と比較しました。一連の系統的な試験結果で得られた二つの成果について以下に記します。

(1) メンブレンペネトレーション除去方法の考案

再構成供試体を用いて繰返し非排水せん断試験を行う際、メンブレンが供試体側面の凹部に湾入すること（メンブレンペネトレーション、MP）の影響により、非排水状態を維持することができず、液状化強度比が過大に評価されることが明らかになっています。これに対し、砂質土の液状化試験結果に基づいたMP補正式が提案されていますが、当研究で対象とした粗粒土（最大粒径=4.75 mm, 9.5 mm, 19.0 mm）では、既往

の MP 補正式で補正可能な範囲よりも大きな MP の影響が生じました。

そこで、シート状に成形したカオリン粘土（MP 除去シートと呼称）を供試体側面にコーティングすることで、側面を平滑化し、MP の影響を緩和する方法を考案しました（図-2）。この方法では、供試体径の 2% の厚さの MP 除去シートを用いることで、MP の影響を概ね除去することができました。

（2）粗粒土の液状化特性評価

当研究では、重要構造物基礎を念頭に相対密度 60～120% で試験を行い、豊浦標準砂の液状化強度比（両振幅軸ひずみ 5%，繰返し回数 20 回における非排水せん断強度比）と比較しました。従来、MP の影響を受けた液状化強度比は過大評価されると考えられてきましたが、密に締めた粗粒土の場合は、MP の影響を除去した液状化強度比の方が大きくなる結果となりました（図-3）。

この結果から、繰返し荷重を受けると正のダイレイタンシーが卓越することに起因し、密に締め固められた粗粒土の非排水せん断挙動は、従来認識されてきた緩い砂質土とは異なり、MP 効果の現われ方も大きく異なることが明らかとなりました。

また、粗粒土の液状化強度比は従来の砂質土で知られている相対密度との強い相関に代わり、発生ひずみが大きいほど相対密度よりも間隙比との相関が良くなることを明らかにし、間隙比から液状化強度比を概略推定できる可能性を見出しました（図-4）。

3. おわりに

当研究は、要素レベルでの粗粒土の地震時挙動に着目しましたが、今後は模型実験や数値計算によるシミュレーションに取り組み、実大規模の粗粒土の液状化強度特性や地震時挙動を明らかにすることで、適切な耐震性評価を可能にし、設計の合理化に寄与したいと考えています。

謝辞

本研究に取り組むにあたり、國生剛治氏（中央大学名誉教授）には、研究計画から論文執筆に至るまで親身なご指導を賜りました。岡本道孝氏、朝山勇治氏、鈴木光太氏（以上、鹿島建設（株））には、終始有益な

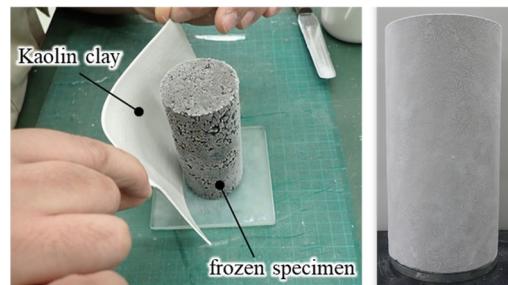


図-2 MP 除去シートによる供試体側面のコーティング

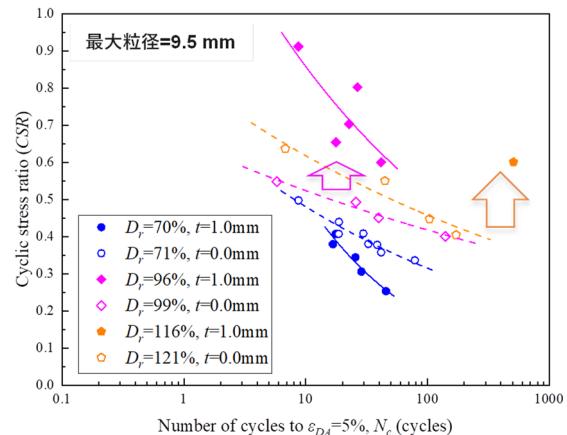


図-3 供試体密度の違いによる液状化強度比の比較

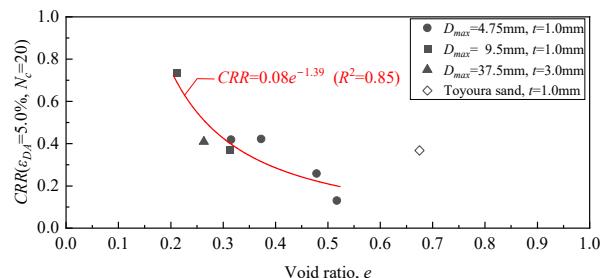


図-4 粗粒土の液状化強度比と間隙比の関係

ご助言を賜りました。また、試験実施にあたり、（株）アースプライム、佐々木朋子氏（現・川崎地質（株））の多大なご協力を賜りました。末筆ではございますが、本論文をご審査いただいた方々、地盤工学会研究奨励賞にご推薦いただいた Soils and Foundations 編集委員会、ならびに本研究に携わっていただいたすべての関係者に心より御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Sasaoka, R., Kokusho T. and Okamoto M.: Sheet-coating mitigation for membrane penetration in undrained triaxial tests and evaluation of comprehensive liquefaction resistance of crushed gravel, *Soils and Foundations*, Vol. 64, Issue 3, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101440>.

（原稿受理 2023.5.1）

国内外の動き

小林正樹博士のご逝去を悼む

元理事、名誉会員、小林ソフト化研究所所長（元運輸省港湾空港技術研究所長）

土田 孝（つちだ たかし）

土田地盤工学研究所 代表、広島大学名誉教授



元運輸省港湾空港技術研究所長で本学会元理事、名誉会員の小林正樹博士におかれましては、病気療養中のところ2025年（令和7年）1月3日にお亡くなりになりました。享年80歳でした。

小林さんは1966年に東京大学工学部土木工学科を卒業され、同年4月に運輸省に入省し、港湾技術研究室土質部土性研究室に配属されました。土性研究室長であった故中瀬明男先生（後に東京工業大学教授、第20代本学会会長）のもと、当時最先端の試験機であったインペリアルカレッジ型の三軸試験を駆使した海成粘土の力学特性に関する研究に従事され、土質力学の発展期における粘土のせん断特性に関する重要な論文を次々と発表されました¹⁾²⁾。小林さんは後にこの時期のことを、「入省当初は行政の仕事を希望していた。しかし、自分が携わっていることが現場と密接に関係し、さらに世界の最先端に位置しているという自負が生まれた」、「研究にどんどんのめり込み、行政に行きたいとは思わなくなった」と語っています³⁾。

その後、小林さんの研究テーマは有限要素解析プログラムの開発とそれを活用した軟弱地盤工学の実務的問題の解決の方向に進んでいきました。当時の小林さんの代表的な研究の一つに「サンドドレン（SD）工法に関するいわゆる『海山論争』の解決」があります⁴⁾⁵⁾。海山論争は、SD工法が粘土地盤の圧密沈下促進について効果ありと主張する港湾事業に従事する技術者と、効果なしと主張する高速道路事業に従事する技術者が、それぞれが豊富な実測データを根拠として主張を闘わせる学術的にもハイレベルな論争でした。小林さんは、FEMを駆使して綿密な事例解析に基

づき、地盤の条件や盛土などの載荷重の条件によって、ドレンが有効に機能している場合でも、時間一沈下関係においてSDによる沈下促進が認められる場合とほとんど認められない場合があることを示しました。すなわち、対立していた双方の主張が、二次元FEMによる綿密な解析によって矛盾なく説明できるということを明らかにしたわけです。これは軟弱地盤工学において数値解析をもともと有効に活用した成果の一つといえると思います。1990年3月には、これらの研究をまとめた「地盤の安定・沈下解析における有限要素法の適用に関する研究」で、東京工業大学より工学博士の学位を授与されています。また、同年に運輸大臣表彰を受賞されました。

小林さんの解析プログラム⁶⁾は運輸省港湾局の技術者の中で「小林FEM」と呼ばれ、港湾・空港事業における地盤工学上の問題の解決に活用されたが、特に関西国際空港の沈下予測において中心的な役割を果たしました。関西国際空港は1977年から本格的な調査を開始したのち1987年に一期工事が始まり、1994年に開港しました。埋立てを開始した直後から設計時の予想を大きく超える洪積粘土層の圧密沈下が観測されたため、沈下予測を見直しながら工事を進める必要がありました。小林さんは関空版の小林FEMを構築し、二期工事の終了以降も含め20年以上、関空の沈下予測問題に中心的に従事されました。この間の経緯は、土木学会論文集の招待論文において詳しく述べられています⁷⁾。

小林さんは、1992年4月に港湾技術研究所土質部長、1996年4月港湾技術研究所次長、1998年4月か

ら 2000 年 3 月まで港湾技術研究所長を歴任されました。2001 年 1 月に国土交通省が発足して研究所名が港湾空港技術研究所となり、2002 年 4 月には国公立研究機関の独立行政法人化という大きな組織改革がありました。小林さんはこれらの直前の時期に所長を務められ、組織改革への準備や対応でたいへんご苦労されたと推察しますが、研究所の管理・運営でのご苦労についてではあまりお話になりませんでした。

小林さんが研究所の管理職として常に大切にしていたのは「自由に研究できる」であったと思います。若手の研究者がいつまでも室長の指示で研究をしているようなときは、若手研究者自身で新しいテーマを開拓して研究し、先輩研究者を乗り越え一本立ちできるよう、気を配られていました。後に土木学会誌で学生編集委員のインタビューを受けたとき、若い学生へのアドバイスとして「不真面目になれ」、「先生の言うことには表面的に従って、自由に自分のできる範囲でできることをやる。結果として先生にとっても役立つ。」という趣旨のことをおっしゃっています³⁾。小林さんが管理職として在職中および退職後において、港湾空港技術研究所の地盤分野の研究者から 8 名の大学教授が誕生していますが、これは小林さんが構築された自由闊達な研究環境が大いに関係していると思います。

小林さんは、2000 年 3 月に港湾空港技術研究所を退職した後、沿岸開発技術研究センターを経て、小林ソフト化研究所を設立され、フリーランスの技術者として活動されました。「小林 FEM」にさまざまな機能を追加して進化させ、港湾・空港事業の実務上の問題解決に貢献する仕事をされました。本学会では、1991 年に土質工学会論文賞を受賞されたほか、1995～1996 年度に理事として学会の運営に携わり、1999 年に地盤工学会功労章を受章、2015 年に名誉会員に推挙されています。

小林さんは、職場での上下関係や業種、年齢の壁を越えて、仲間や後輩、若手の研究者、実務に携わる技術者とお酒を飲みながら、地盤工学を中心とした話題

で懇談するのを何よりも楽しみにされていました。生家が北海道の札幌狸小路商店街の呉服屋さんだったということで、「だから僕は賑やかなアーケード街のそばでないと暮らせないんだよ」と笑っておっしゃっていました。聞き上手だけではなく、若い研究者であればアイディアや失敗談、実務技術者であれば設計や施工時の苦労話を楽しそうに聞いて、適切なコメントやアドバイスをしてくださる方でした。小林さんと話することで、気が付かないうちに考えが整理されて次へのヒントを得る、モチベーションが高まる、ということしばしばでした。小林さんと話すると、いつも研究者になってよかったですと思ったものです。

2020 年にコロナウイルスのパンデミックが発生し、人と人が直接会って話をするという人間にとっても大切なことが長期間できなくなってしまいました。お元気だった小林さんは、この時期に体調を崩され、もう一度楽しくお話をさせていただきたいという願いは、ついにかないませんでした。あのパンデミックが無ければ、と残念なりません。心よりご冥福をお祈りします。

参考文献

- 1) 中瀬明男・小林正樹・勝野克：圧密および膨張による飽和粘土のせん断特性の変化、港湾技術研究所報告, Vol. 8, No. 4, pp. 103-143, 1969.
- 2) 中瀬明男・小林正樹・兼近明男：粘土の非排水せん断強度と変形係数、港湾技術研究所報告, Vol. 11, No. 2, pp. 243-260, 1972.
- 3) 小林正樹：スゴ腕技術者に学ぶ、第 9 回、地盤沈下予測のスペシャリスト編、土木学会誌, Vol. 97, No. 7, pp. 46-47, 2012.
- 4) 小林正樹：サンドドレーンの効果に関する有限要素解析、港湾技術研究所報告, Vol. 30, No. 2, pp. 275-304, 1992.
- 5) 小林正樹：サンドドレーンの効果に関する有限要素解析、第 2 章バーチカルドレーン工法、2.2 変形の予測と実際、2.2.2 多次元圧密解析、pp. 89-104、地盤改良効果の予測と実際、地盤工学会、2000.
- 6) 沿岸開発技術研究センター：地盤解析汎用プログラム (GeoFem) 2021 年版、<https://www.cdit.or.jp/program/geo.html>
- 7) 古土井光昭・小林正樹：関西国際空港建設に関わる地盤工学の問題と対応—沈下の予測と実際—、招待論文、土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 4, pp. 998-1017, 2009.

(原稿受理 2025.5.20)

講座

地盤災害の現地調査

第4回 洪水・地震による河川堤防被災の調査

Survey of river levee damage due to floods and earthquakes

川尻 峻三 (かわじり しゅんぞう)

九州工業大学大学院工学研究院 准教授

e-mail: kawajiri.shunzo644@mail.kyutech.jp

石原 雅規 (いしはら まさのり)

(国研) 土木研究所 上席研究員

新清 晃 (しんせい あきら)

応用地質 (株) 防災・インフラ事業部 副事業部長

キーワード：河川堤防、被災調査、産官学

1. はじめに

近年、気候変動に伴う集中豪雨や台風、さらには大規模地震の頻発により、国内各地で河川堤防の災害が多発している。2015年の平成27年9月関東・東北豪雨（鬼怒川）¹⁾や2019年の令和元年東日本台風（千曲川、阿武隈川等）²⁾、2020年の令和2年7月豪雨（球磨川）³⁾など、過去10年程度を振り返っても、多くの河川堤防が決壊し、甚大な被害が生じている。これらの災害では、堤防の越水や堤体内への浸透による決壊、法面変状など、多様な被害形態が確認されている。また、2011年東北地方太平洋沖地震においては、堤体内で液状化が発生し、堤体が大規模に崩壊・変状した⁴⁾。このような災害後の迅速かつ的確な被害調査の重要性が改めて認識されている。また、今後の防災・減災対策を有効に進めるためには、学術的な分析、広域的かつ体系的なデータ収集、現場に即した実践的知見を相互に連携することが不可欠である。

本稿では、まず河川堤防の被災調査内容として、地盤工学会がアーカイブしている既往の災害報告書等をケーススタディに被災調査時の調査方法に着目してレビューする。次に大学・国の研究所・民間企業の異なる立場での筆者がそれぞれの視点から河川堤防被災の調査事例や位置づけについて紹介する。大学の立場からは現象のメカニズムやその結果を反映した解析を念頭に調査した事例を、国の研究所からは全国規模での災害データベースの構築や政策立案へのフィードバック

クの実践を、民間企業からはケーススタディとして実現場での対応事例を例として迅速な対応力や実務を通じた技術的課題を述べている。最後に、産学官連携による河川堤防被災調査の新たな方向性と今後の発展性について筆者らの考えを述べている。

2. 被災した河川堤防での調査の実施事例

本稿において筆者らが所属する機関からの個別事例を紹介するにあたり、過去の河川堤防の被災調査で実施された調査方法に着目し、地盤工学会のwebページでアーカイブされている2015~2022年の災害報告書や災害報告会の資料からピックアップして、堤防被災時の調査方法の事例として以下に取りまとめた。なお、以下に示す事例は報告書、報告会資料、学会発表の抜粋であり、詳細はそれぞれの参考文献を参照されたい。また、以下に示す災害名は学会webページに記載されている名称としている。

2.1 平成27年9月関東・東北豪雨⁵⁾

2015年9月に接近・上陸した台風17、18号に伴い、9月8日から11日にわたり西日本から北日本の広範囲で記録的な降雨を観測した。栃木県と茨城県を流下し、利根川に合流する鬼怒川では、茨城県常総市において堤防決壊が発生した。

産官学による災害調査の対応としては、9月13日に土木学会による初動調査の結果を受けて「2015年関



図-1 鬼怒川で発生した噴砂と応急対策工の状況⁵⁾

東・東北豪雨災害 土木学会・地盤工学会合同調査団」が結成され、組織的な調査が開始された⁵⁾。越水による堤防決壊に加えて、既往最大水位を観測したことで堤体基礎地盤内の間隙水圧が高まり、被災箇所周辺には噴砂が発生した。図-1は漏水が発生した区間における応急対策工（月の輪工）の実施状況を示している。応急対策として積まれた土のうの内部には、漏水による噴砂が堆積している。このような噴砂が発生した場合の堤体の内部空洞や基礎地盤のゆるみ領域の存在を調べるために電気探査および表面波探査が実施された。図-2は漏水・噴砂発生区間における電気探査から得られた比抵抗および表面波探査から得られたS波速度分布を示している。この結果から、漏水区間の表層1m付近までに比抵抗が高く、S波速度が低下しており、

これは緩い砂層の存在を示唆する結果である。しかし、この結果からは個々の噴砂地点に対応する局所的な緩み領域の存在は確認できない点や、事後調査であるための出水前から高い比抵抗で低いS波速度であったかの判断ができない点が課題であるとしている。

2.2 平成28年北海道豪雨災害⁶⁾

2016年8月17日から8月23日の1週間に三つの台風が北海道に連続で上陸し、北海道東部を中心に記録的な降雨を観測した。地盤工学会としては、8月21日に「平成28年8月北海道豪雨による地盤災害調査団」が結成されて北海道内の各地で組織的に調査が進められた⁶⁾。しかし、調査を進める中で8月29日からは前線と台風の影響で再び大雨となり、8月中旬の3連続台風と併せた一連の大暴雨で河川水位が上昇した箇所では堤防決壊や堤防法面の変状が発生した。本項では堤防開削調査の事例として、釧路川での法面崩壊とその被災調査の結果について紹介する。

釧路川は北海道東部の太平洋側を流下しており、上流部のカルデラ湖である屈斜路湖から流れ出し、下流部に釧路湿原が位置している。

先述した北海道内での記録的な降雨による堤防の法面変状は、釧路川の中流域で発生した。図-3は表法面に発生した堤防の被災状況を示している⁷⁾。法面中腹に

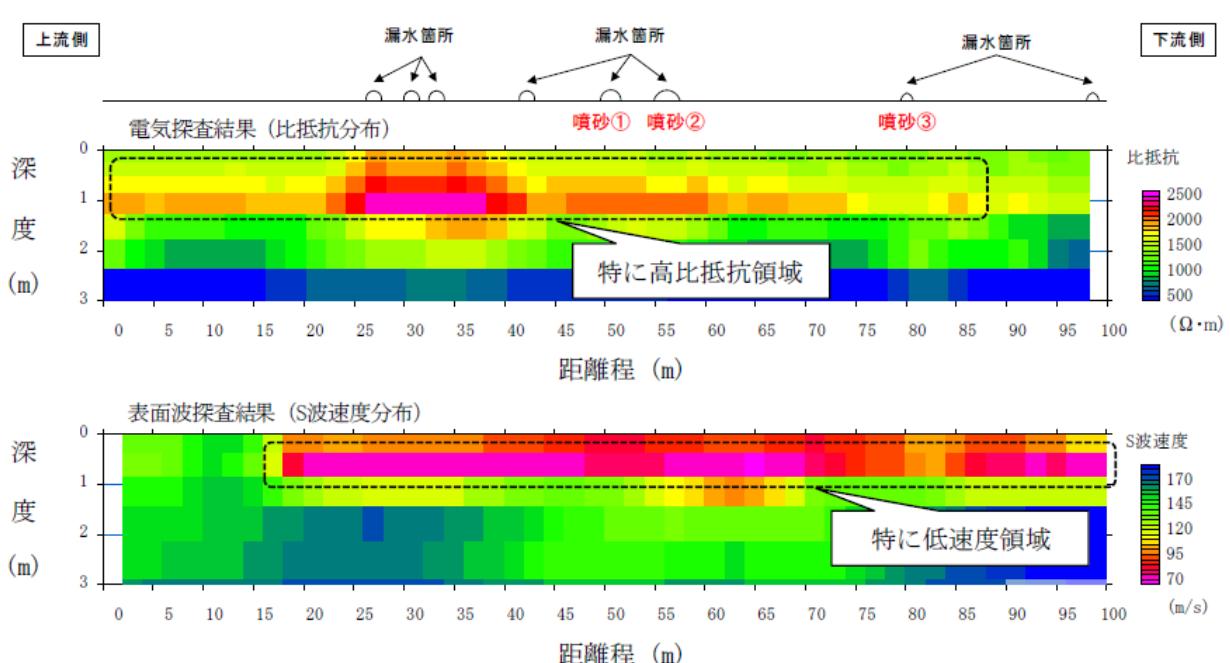


図-2 鬼怒川での調査から得られた漏水および噴砂発生箇所の比抵抗およびS波速度分布⁵⁾

に明瞭な亀裂の発生が確認できる。当該箇所では出水に伴う河川水位の増加は表法尻部付近までに留まり、計画高水位に達するような水位上昇は確認されていない。このため、図-3に示した法面変状は降雨浸透が影響していると推測された⁷⁾。この法面崩壊メカニズムを解明するために堤防縦断方向の地盤構成の違いを大まかに把握することを目的に図-1と同様の表面波探査の実施に加えて、被災断面を開削して地盤構成を直接目視で確認する堤防開削調査が実施された。

図-4に開削調査で撮影した開削断面および土質試験結果から推定された堤体の地盤構成を示している⁸⁾。この結果から、被災した堤防では段切り面が明瞭に確認できるため複数回の築堤履歴があることや、法面崩壊は一部で段切り箇所に及んでいるものの大部分は拡

幅の際に施工した法面表層で発生している等の情報を得ることができた。また、開削調査断面から得られた土試料に対する土質試験結果より、法面崩壊箇所では細粒分含有率が大きく、堤体内部とは地盤構成が異なっていることがわかる。このように被災堤防に対して開削調査を行うことができれば、被災箇所の地盤構成の理解は格段に進むといえる。本事例に示した法面変状のような箇所では、被災箇所とその堤体土質の構成を直接的に比較することが可能となる。堤防の変状程度は異なるが地震後における堤防開削調査の事例⁹⁾では、堤体と基礎地盤の境界部において液状化した砂の存在が確認できたとしている。この結果をもとに堤体下部が基礎地盤に沈下した状態となって閉封飽和域が形成されて、地震時にこの領域が液状化することで大



図-3 釧路川で発生した法面変状の状況⁷⁾

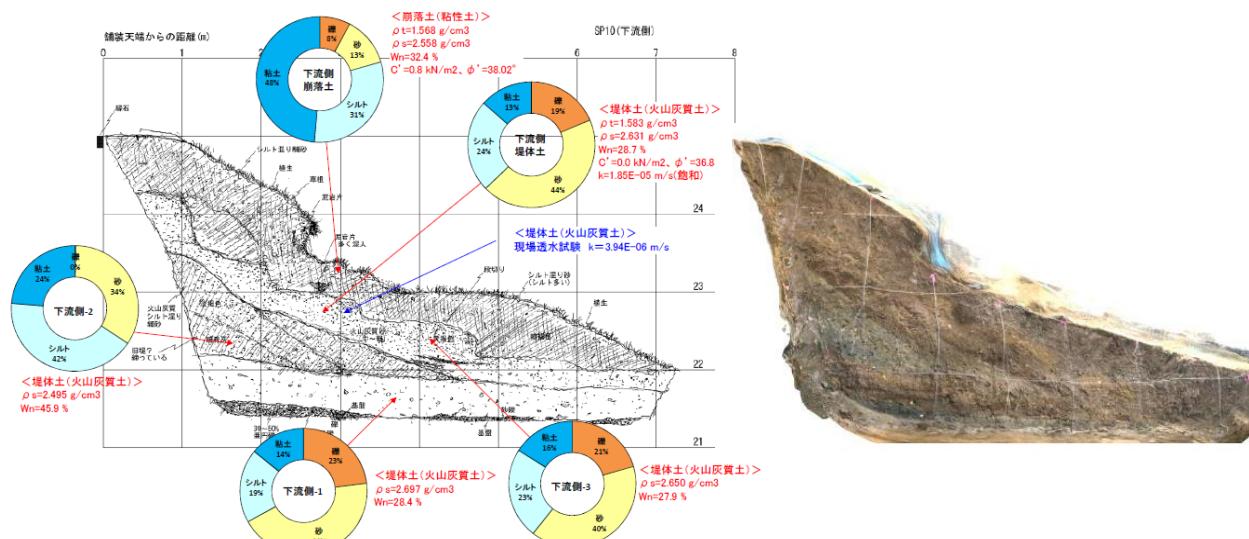


図-4 表法面の開削断面の写真と写真をもとに作成されたスケッチおよび土質試験結果⁸⁾

規模な堤防変状に至ったことが報告されている。このようなことから、開削調査は浸透や地震などの被災外力に依らず、被災した堤防の全体像を把握するための有用な調査手法といえる。

しかし、出水に伴う堤防決壊箇所では堤防決壊の要因になったと推定される初期変状や崩壊が進行した領域の堤体が決壊後には流出しており、被災箇所の堤体の地盤構成を被災後に把握することはできない。このため被災箇所においては、周辺に残存した堤体に対して開削調査が実施されることになり、その際には被災箇所の地盤構成を直接、調査していることにならない点に留意が必要である。つまり、開削調査結果をもとに被災断面ではどのような現象が発生していたのかを推測することが肝要となる。

2.3 令和3年8月高瀬川での事例¹⁰⁾

2021年8月8日～11日にかけて台風9号から変わった低気圧によって青森県では大雨となった。これにより増水した高瀬川では青森県管理区間において堤防決壊が発生した¹⁰⁾。地盤工学会として調査団は結成されていないが、土木学会堤防研究小委員会のメンバーとして筆者らが初動調査を行い、その後、河川管理者と合同で開削調査を行った。

河川堤防に限らず被災調査では、被災した地盤構造物（本稿であれば河川堤防）の被災状況と併せて、周辺の状況から外力条件を推定する調査が実施される。外力条件は、例えば事後解析によって被災メカニズムを解明するうえで極めて重要な情報となることは言うまでもない。地震で被災した場合には、加振外力を直接的に把握することは困難である。一方で、洪水時には痕跡水位を確認できる場合が多い。つまり、洪水による堤防被災時の外力条件は、地震時よりも簡易に把握できる場合がある。しかし、被災後の降雨や応急復旧で痕跡が消えることもしばしばあり、痕跡水位の調査は安全の確保を確実にしたうえで速やかに初動調査を行うべき一つの動機となる。

図-5は高瀬川での痕跡水位調査の一例を示している。この事例では、ポール等の簡易な機材を用いて堤防天端からの痕跡水位の位置を調査している。状況によっては決壊箇所を中心として上下流の複数地点で痕

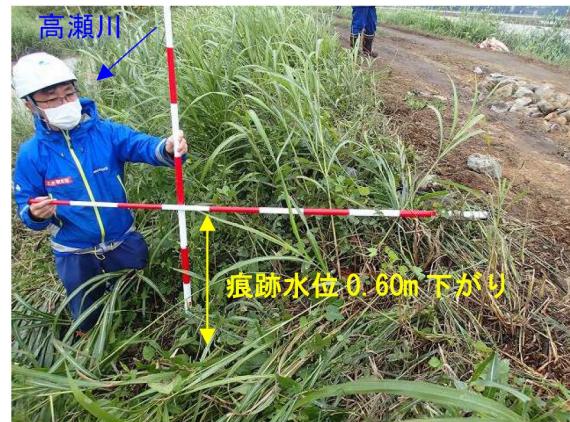


図-5 高瀬川での痕跡水位調査の事例



図-6 表法面に堆積した流下物の状況の例

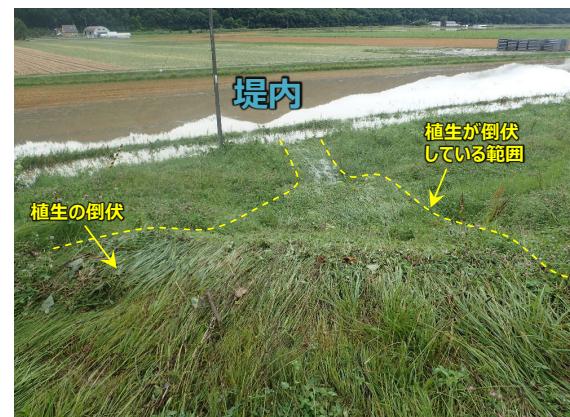


図-7 裏法面・法尻での明瞭な越水跡の事例

跡水位を調査することで、決壊箇所の河川水位を内挿して推定できる可能性もある。なお、河川水位が上昇した箇所では図-5に示したように植生の明瞭な倒伏や植生への泥の付着に加えて、図-6のように枯草等の流下物の堆積が目印となる。一方で、越水が発生した堤防の場合には、流水が作用した箇所では図-7に示すように植生が明らかに裏法面や裏法尻へ向かって倒伏している状況が多く確認されるため、被災調査時のポイントの一つになる。

2.4 その他の被災調査ツールの例

以上に示した事例は限定された調査手法を示しており、網羅的に示すことができていない点をご容赦願いたい。当然、実際の被災箇所ではさらに多くの観点からさまざまな調査が行われている。例えば、簡易動的コーン貫入試験などのサウンディングを面的に展開し、パイピングの発生を理解するために重要な土層となる堤内地盤の礫層分布を調査した結果が報告されている¹²⁾。また、上記の事例では出水して堤防決壊や変状が発生してから比較的時間が経過した後に実施されている調査を示した。出水後に河川水位が低下し、自身の安全性が十分に確保できる場合には、先述した痕跡水位の確認と併せて被災状況の痕跡が消失する前に調査を行えることが望ましい。その際の有力なハード的なツールとして、昨今では UAV (Unmanned Aerial Vehicle) の利用が広く普及している。図-8 は先述した高瀬川での堤防決壊箇所周辺のオルソ画像を示している。この画像から決壊口の幅、決壊に伴い形成された落掘の範囲、氾濫流によって運搬された土砂の範囲などの情報が容易に把握できる。さらに近年では、図-9 に示すような手のひらサイズで調査用リュックサックに入れても 500ml のペットボトルよりもスペースを取らない UAV が販売されており、調査箇所が近距離か遠方にかかわらず被災調査の必需品になりつつある。

河川堤防の被災調査では、ソフト的な災害調査ツールも整備されつつある。これまで地盤工学会では先述した災害報告書や報告会の資料は、web ページ上でアーカイブされた情報を閲覧可能であった。しかし、ICT と DX が急速に進んだ昨今では、デジタルデータとして被災調査データを蓄積し、このデータを将来の地盤工学の実務・教育研究に役立てることが期待される。このような観点から地盤工学会では「[災害調査データの収集と活用委員会](#)」(委員長：早稲田大学 岡村未対 教授) が 2021 年に設立されて、本委員会の取り組みの一環として河川堤防被災状況収集アプリ「つみる(TSUTSU-MIRU)」¹³⁾の開発・運用が進められ、このアプリを使い調査結果をデータとして蓄積すると同時に共有を図っている。このアプリは LINE を使い、調査地点から被災状況を DIAS (Data Integration and Analysis System)¹⁴⁾と呼ばれるデータ統合・解析シス



図-8 UAV のデータから作成したオルソ画像の例（高瀬川）



図-9 飛行性能は高いが手のひらサイズの UAV の例

ム上にアップロードする。この DIAS 上に全国の被災情報を閲覧可能な web ポータルが用意されており、地図形式のトップ画面に被災箇所の位置がプロットされている。このプロットされた被災情報には被災箇所の位置のほか、調査者のコメントが記載できるようにな

っており、「いつ、どこで、だれが、どのような調査をし、何を報告したか」を知ることができる。

以下の章では、さまざまな所属機関に属する読者の相互理解を深め、これから河川堤防の被災調査に臨む読者の一助となることを期待し、上記に示した調査が各機関でどのような位置づけで実施されているかを示す。

3. 大学等の教育研究機関における災害調査の位置づけと事例

大学等の教育研究機関における研究の目的は、これまで未知であった事象や現象を解明し、その結果を利用して社会が直面する具体的な課題を解決することにある(と少なくとも第一著者は考えている)。本章では、このようなスタンスで取り組んだ堤防調査の事例について、調査方法に着目して記載する。

本章で紹介する事例は宮崎県北部の延岡市を流下する北川での噴砂発生についてである。当該河川では、計画高水位を超過する出水があると堤内地盤でたびたび噴砂が発生している。この噴砂の発生メカニズムを解明するために過去3度の開削調査が実施されている。本章では、筆者らが参画した2022年の開削調査^[5-21]を事例として紹介する。

堤内地盤での噴砂の発生は、河川水位が上昇したことで堤体基礎地盤に作用する間隙水圧が大きくなり、基礎地盤の土粒子が動き出して地表面に噴出する、いわゆるパイピングが発生している可能性を示唆している。当該事例では、図-10に示すように噴砂と陥没の

発生がセットになっており、この発生メカニズムを解明することを目的として事前に物理探査(表面波探査)、サウンディング(簡易動的コーン貫入試験)を行い、その後、開削調査が実施された。この開削調査に参加した機関は愛媛大学、名古屋工業大学、九州工業大学、豊田高専、土木研究所、応用地質(株)である。

S波速度分布や N_d 値の面的な分布を把握できてもこれらの精度や解像度に限界があるため、地盤調査結果のもっともらしさを検証するためには実際の土層断面を見て、比較することが最大の答え合わせになる。加えて、できることなら調査対象とした地盤の土を直接見て、触らないと納得できないということは読者にもご理解いただけるように思う。

図-11は開削調査の実施状況を示している。事前調査でUAVを使って撮影した写真から調査対象地盤のオルソ画像を作成し、図-10に示したような噴砂と陥没箇所を横断するような複数の開削断面を設定する。この設定した断面に沿うよう、最初はバックホーでトレーナを作りながら粗く調査断面を形成する。この状態の調査断面はバケットの爪の跡が残り、さらに調査断面の下層には上層からの土砂が堆積しており、この調査断面からは土層の詳細な観察は困難である。そこで図-12に示すような「ねじり鎌」を使い、調査断面の表面を平らに形成して不要な土を排土し、きれいな観察断面を作製する。図-11の事例では観察断面が広いため、人海戦術で観察断面を作製している。観察断面はデコボコが無く平らであることが重要であるため、両隣の作業中の断面に注意を払い、自身の作業範囲を



図-10 北川での噴砂・陥没の発生状況



図-11 人海戦術での観察断面の作製状況

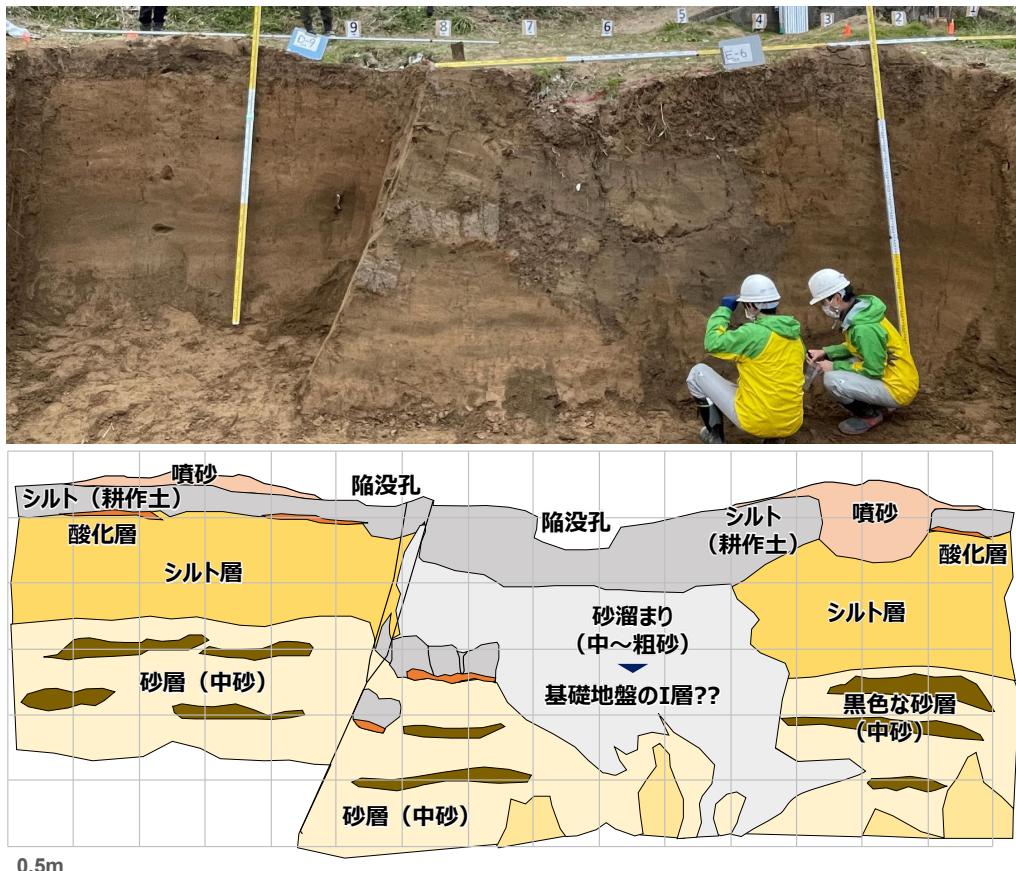


図-13 観測断面と観察から得た情報をもとに作製した土層区分

形成することがコツであろう。また、作業は土層の上から下に向かって進めることで、きれいに形成した断面が不要な土砂で覆われることを避けることができる。さらにこの観察断面の形成過程において、地表にある噴砂へと続く直径数cmの砂脈や空洞が突然現れることがあり、遺跡の発掘作業さながらの緊張感で断面形成の作業が黙々と行われる。なお、ねじり鎌は草刈りや雑草抜きなどの作業を使う道具であり、ホームセンターで容易に手に入る。開削調査のベテランになると自身の専用のねじり鎌を持参しており、このねじり鎌の刃は僅かに湾曲しており、これによって形成断面を傷つけないよう工夫がされている。

図-13は開削調査から得られた土層断面図を示している。この結果から、河川水位の上昇に伴って最下層の砂礫層の間隙水圧の上昇による上向きの流れが生じ、砂礫層内の細砂が上部層へ移動し、砂だまりを形成すると推定された。さらに間隙水圧が上昇すると上層地盤で隆起が発生し、この隆起に伴い形成された亀裂部に砂だまりを起源とした細砂が流入し、最終的には地表面に達して噴出したと推定された。一連の開削



図-12 ねじり鎌の例：ねじり鎌にも種類がある

調査から得た上記の仮説は、その後、実験や解析による再現²²⁾が試みられ、仮説の妥当性が検証されている。

4. 河川管理者・研究機関での災害調査の位置づけ

災害調査として、出水後や地震発生後に実施される調査のことを指すものとして、本章では河川管理者側

の視点からこのような調査について説明する。

災害調査に係る重要な制度に、災害復旧事業がある。堤防等の施設の維持・管理は原則、地方公共団体等の施設管理者が行うべきとされるが、災害において困難であるため、早期復旧を期するため、高率・迅速に国庫負担を行うことができる制度である²³⁾。直轄管理でも類似の制度が存在し、毎年の予算とは別に、復旧等に必要な予算を確保することができる。

災害復旧は原形復旧が基本であるが、再度災害が生じる可能性がある場合には、改良復旧も可能となっている。災害復旧事業に係る手続きに報告や申請、災害査定があり(図-14)，これらのために調査が行われる。改良復旧も申請が可能となったことで、被災原因をできるだけ正確に把握し、復旧に反映させることが重要となる。このため、災害調査の重要度も増すことになったと考えられる。河川堤防には、一連区間の中の最も安全性の低い箇所が一連区間の安全性を規定するという特性がある。このような最も安全性の低い箇所を事前調査により高い精度で予測することは困難であるが、被災箇所は安全性の低い箇所で生じると考えるのが自然である。調査結果に基づいた強化対策の実施は、被災箇所の安全性向上だけにとどまらず、一連区間の

安全性向上に寄与しているということも認識する必要がある。

平成24年7月九州北部豪雨による矢部川の決壊以降、決壊等の重大な被災が生じた場合には、堤防調査委員会が開催されるようになった。堤防調査委員会は、河川工学および地盤工学の学識者、国土技術政策総合研究所および土木研究所、地方整備局の行政関係者から構成され、被災原因や復旧方法が議論され、報告書がとりまとめられる。堤防調査委員会からの指摘を踏まえて、より詳細な調査・検討が実施されるようになった。

災害調査に近いもう一つの枠組みが、巡視、点検である。洪水時を含め、定期的に高頻度(頻度は状況により変化する)に巡視が行われ、変状が見つかれば、報告される。また、点検²⁴⁾には、出水期前と台風期に定期的に実施されるものと、一定規模の出水後に実施されるものがある。見つかった変状は、写真撮影され、位置情報とともに、RiMaDIS(River Management Data Intelligent System)というデータベースに記録される。点検結果は、総合的な評価により4つに区分され、公開されている²⁵⁾。

これまで施設管理に直接係る災害調査を紹介してき

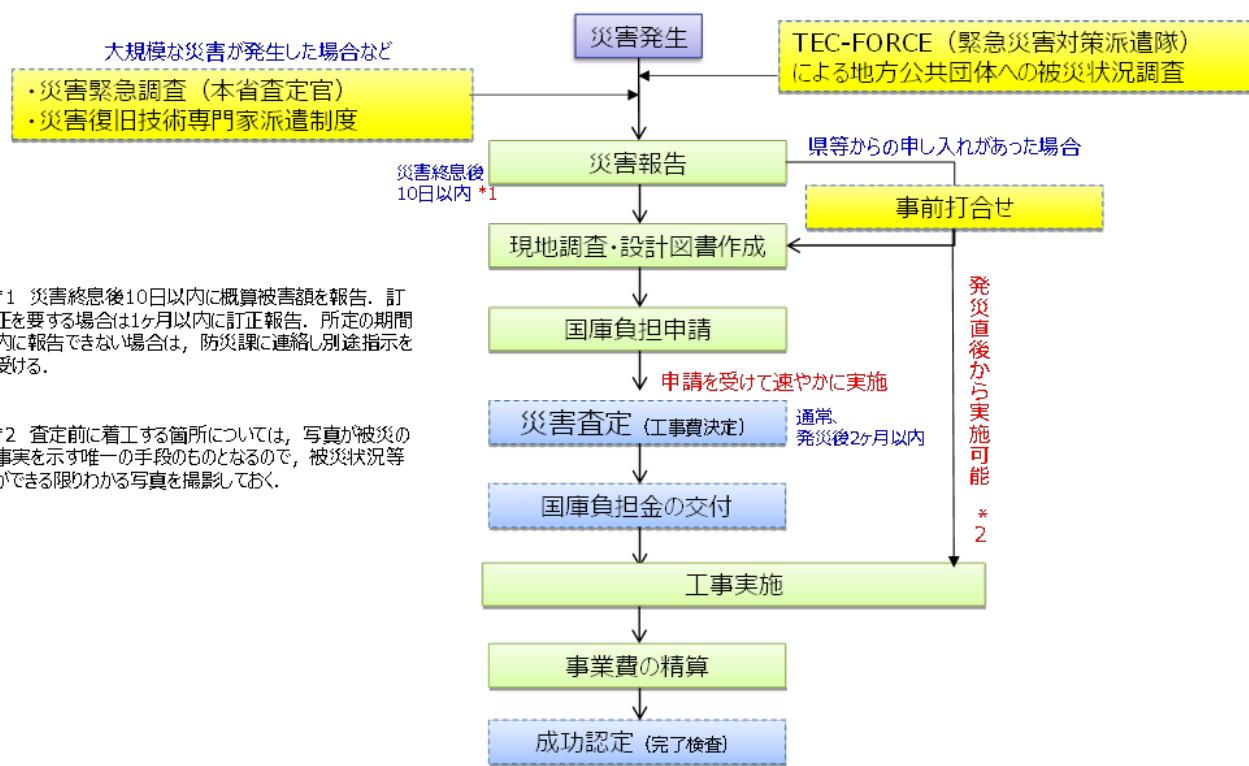


図-14 災害復旧事業のフロー図²³⁾

た。このようにして得られた災害調査結果は、新たな施策や基準作成・改定等にも活用されている。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震による災害調査結果から、堤体自体の液状化が被災原因の一つになっていることが多くの箇所で確認されたことを踏まえ、堤体液状化に対する判定等が河川構造物の耐震性能照査指針等に追加された。また、河川堤防の液状化対策の手引き（以下、手引き）²⁰⁾にも、本地震の災害調査結果が活用されている。レベル1 地震動相当の外力に対する液状化対策が実施済みの区間と未実施の区間とで被災程度や被災率が大きく異なり、設計外力を上回る地震動に対しても効果を発揮することが明らかとなった。このため、手引きでは、レベル1 地震動に対して液状化対策の仕様を決定する手順を残している。

5. 民間企業としての災害調査時の動きと事例紹介

災害調査の内容や緊急度は、災害の種類や規模によって異なるが、ここでは大規模かつ緊急性が高い堤防決壊時の調査事例を紹介する。

表-1 は本事例における調査項目の時系列を示している。対象河川における堤防の決壊は、越水開始から約2時間後に発生した。

発災当日の夕方、対策本部より、（一社）建設コンサルタンツ協会を通じて災害支援要請が入った。さらに、発災翌日の夕方、対策本部より、翌朝より応急復旧工事が入るので、それまでに決壊断面で調査を実施して欲しいとの要請があった。そこで、速やかに災害調査経験者3名からなる調査班を編成し、不十分ながらも最低限の資材を積み込んで現地に向かった。現地までは、決壊直後ということもあり、周辺道路の交通規制

表-1 紹介事例での調査項目の時系列

日時	調査項目・内容
発災	堤防決壊 災害支援要請が入る
1日後	応急復旧の着手（13日後に完了） 夕方～深夜にかけて決壊断面調査を実施
2日後	断面スケッチの完成
3日後	現地調査計画の決定 現地調査の実施（22日後に完了）
18日後	堤防調査委員会の開催（以降3週間で3回開催）

や泥土の堆積等の影響で予想以上の時間を要し、現地に到着したときは20時近くになっていた。

決壊箇所は暗闇で作業が困難であり、準備した照明では決壊断面の全体像が確認できなかったため、決壊箇所の上流側の堤防に車を停め、車のヘッドライトを下流側の決壊断面に当てる、断面の観察および土試料の採取を実施した。決壊現場の周辺は泥状の土が大量に堆積しており、途中で足をとられそうになりながらも安全を確保しつつ徒步で移動した。調査は深夜に終了した。

調査の翌日（発災から2日後）には、実施した調査結果に加え、土木研究所の調査班が決壊当日に撮影した写真をもとに、断面スケッチを完成させた。図-15に決壊した河川とは別の河川になるがスケッチの下書きの例を示した。最終的には図-4と同様に土質情報を追加し、対象とする堤体や基礎地盤の地盤構成の全

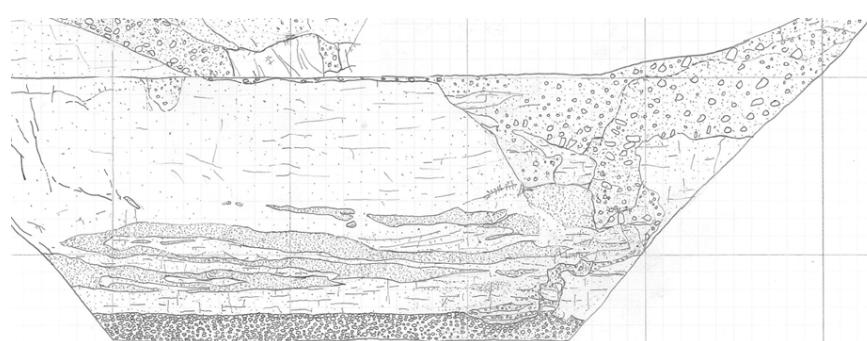


図-15 スケッチの下書きの例：土質試験の情報を追加することで全体像を把握できる

体像を把握することになる。災害復旧に携わる民間企業に従事する者として、図-15のような下書きができるようになれば十分な経験を積んだといえる。

決壊現場では、発災翌日から応急復旧工事が開始され、厳しい条件の中、荒縫切工は発災から7日後に完成し、さらに鋼矢板二重式仮縫切工は発災から13日後に完成した。

決壊箇所の現地調査については、発災から3日後に対策本部と協議を行い、以下の方針で進めることになり、直ちに作業計画書を提出し、調査に着手した。

- ・決壊箇所周辺に形成された洗掘跡の土質特性（物理特性）を面的に確認するため、洗掘部の土試料を採取し、物理試験を実施する。
- ・応急復旧工事の支障の無い位置においてボーリング調査およびサウンディング調査を実施する。
- ・ボーリング調査は、決壊口を含む堤防および高水敷で実施する。各地点とも連続サンプリングを行い、室内土質試験を実施する。
- ・サウンディング(SWS)は、高水敷で縦断方向に実施する。また、堤防決壊口でも実施する。

ボーリング調査は6班搬入し19日間で終了させた。

一方、決壊箇所周辺の堤防の状況について現地踏査を実施したところ、決壊区間の上下流付近の堤防裏法尻付近において噴砂跡が確認されたため、オーガーボーリングを実施し、堤体土および基礎地盤の土質状況を確認した。また、決壊箇所周辺の氾濫堆積物の調査も実施した。

堤防調査委員会は、発災の18日後から3週間の間に3回開催された。その間、調査結果の整理と資料作成、委員会で指摘された事項に対する対応等が続いた。

決壊箇所においては、仮縫切工の後に堤防断面の開削調査を実施し、基礎地盤および堤防の土質構造を詳細に観察した。

決壊原因の解明にあたっては、越水による洗掘のほかに、浸透破壊が生じていた可能性もあったことから浸透流解析を実施した。浸透流解析の実施にあたっては、ボーリング調査結果のほか、開削調査結果も踏まえて地盤構成のモデル化を行った。さらに、堤防縦断方向の被覆土層の連続性や層厚をサウンディング結果や露頭調査で評価したうえで基盤漏水に対する弱部の

評価を行った。

以上、民間企業の災害調査の一例を紹介したが、災害調査では対策本部等の指揮系統のもとで応急復旧や本復旧等の検討に必要な情報を効率的かつ確実に取得し、タイムリーに提供する必要があり、それらに対応できる体制を早期に組織することが重要と考える。また、決壊部や崩壊部の堤防断面、変形状態、漏水や噴砂跡の状況といった災害直後にしか得られない情報を見逃さずに記録する必要があり、そのためには経験者を含む調査班を迅速に立ち上げることが重要と考える。

6. おわりに

近年、気候変動による豪雨や台風、大規模地震が頻発し、全国各地で河川堤防の被災が多発している。特に2015年の鬼怒川や2019年の千曲川、2020年の球磨川などでは越水や浸透破壊による被害が報告され、東日本大震災では液状化による大規模な堤体崩壊も発生している。これらの事例から、迅速で科学的・工学的な災害調査の重要性が高まっており、学術的分析、広域的なデータ収集、現場の実践的知見の相互連携が不可欠となっている。

本稿では具体的な調査手法として、物理探査、開削調査、UAVを用いた空中撮影、痕跡水位の把握などの事例を紹介した。例えば鬼怒川では地盤の緩み領域を電気探査や表面波探査で調査し、北海道の釧路川では法面変状の要因を開削調査で明らかにした。また、高瀬川では堤防決壊時の痕跡水位を迅速に調査することで被災メカニズムの解明に寄与した。近年ではICTやDXを活用し、被災調査データをデジタル化して共有する試みも進んでいる。

河川堤防の分野は産官学の強い連携が特徴であり、研究成果が現場での課題解決に直接的に活かされる可能性が高く、イノベーションが期待される。研究者や実務者は最新技術の習得と実践的応用を積極的に進めることで、河川堤防の安全性・耐久性向上や被害軽減に貢献できる分野ともいえる。また、若手の研究者・実務者にとっては、産官学連携の調査活動が成長の絶好の機会である。近年、地盤工学会では若手の実務者や研究者を対象に河川堤防をテーマにしたシンポジウム等が開催されているので、このようなイベントに積

極的に参加し、意見交換することをお勧めする。

最後に、災害調査では二次災害防止のため安全管理の徹底が最優先事項であることを強調する。現地調査時は安全確認を怠らず、危険箇所への無理な進入を避け、調査チーム内のコミュニケーションを密にし、安全第一で調査に臨んでほしい。

参考文献

- 1) Yasuda, S., Shimizu, Y. and Deguchi, K.: Investigation of the mechanism of the 2015 failure of a dike on Kinu River, *Soils and Foundations*, Vol. 56, No. 4, pp. 566-585, 2021.
- 2) Enomoto, T., Horikoshi, K., Ishikawa, K., Mori, H., Takahashi, A., Unno, T and Watanabe, K.: Levee damage and bridge scour by 2019 typhoon Hagibis in Kanto Region, Japan, *Soils and Foundations*, Vol. 62, No. 2, pp. 581-592, 2016.
- 3) Mukunoki, T., Suetsugu, D., Sako, K., Murakami, S., Fukubayashi, Y., Ishikura, R., Hino, T., Sugimoto, S., Wakinaka, K., Ito, S. and Koyama, A.: Reconnaissance report on geotechnical damage caused by a localized torrential downpour with emergency warning level in Kyushu, Japan, *Soils and Foundations*, Vol. 61, No. 2, pp. 600-620, 2021.
- 4) Sasaki, Y., Towhata, I., Miyamoto, K., Shirato, M., Narita, A., Sasaki, T. and Sako, S.: Reconnaissance report on damage in and around river levees caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Soils and Foundations*, Vol. 52, No. 5, pp. 1016-1032, 2012.
- 5) 2015 年関東・東北豪雨災害 土木学会・地盤工学会 合同調査団関東グループ : 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による関東地方災害調査報告書, 2016.
- 6) 平成 28 年 8 月北海道豪雨による地盤災害調査団 : 平成 28 年 8 月北海道豪雨による地盤災害調査報告書, 2017.
- 7) 鉄路川堤防調査検討会 : 平成 28 年 8 月の大雨により発生した鉄路川の堤防法面被災に係る報告書(案), 2018.
- 8) 劇爽・川口貴之・川尻峻三・川俣さくら・早川博・中村大・新藤和男・川岸秀敏 : 記録的降雨によって発生した鉄路川堤防のり面の表層崩壊に関する地盤調査, 第 52 回地盤工学研究発会講演概要集, pp. 939-940, 2017.
- 9) 加藤政文・梶原保志・杉山洋介 : 東北地方太平洋沖地震により被災した河川堤防の開削調査事例, 全地連「技術フォーラム 2012」新潟, 7, 2012.
- 10) 川尻峻三・石原雅規・上田和也・西村圭右・丸田亮・小山真輝・小笠原明信 : 2021 年 8 月豪雨による高瀬川決壊箇所における調査報告, 第 9 回河川堤防技術シンポジウム論文集, 2022.
- 11) 令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会 : 令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会報告書, 2020.
- 12) 岡村未対・前田健一・西村恆哉・高辻理人・石原雅規・品川俊介・今村衛 : 北川で繰返し発生した陥没を伴う噴砂の詳細メカニズム調査, 河川技術論文集, Vol. 25, pp. 487-492, 2019.
- 13) 川尻峻三・生駒栄司 : 河川堤防被災状況収集アプリ「つつみる (TSUTSU-MIRU)」について, 地盤工学会誌, Vol. 73, pp. 17-21, 2024.
- 14) Ikoma, E. and Kitsuregawa, M.: DIAS—Earth Environment Data Integration and Analysis System, Communications of the ACM, Vol. 66, No. 7, pp. 85-86, 2023.
- 15) 石原雅規・上田和也・岡村未対・陣内尚子・前田健一・川尻峻三 : 2022 年台風 14 号による宮崎県北川の噴砂・陥没状況, 第 58 回地盤工学研究発会発表講演集, 13-2-2-02, 2023.
- 16) 川尻峻三・岡村未対・陣内尚子・小野耕平・前田健一・石原雅規・上田和也・新清晃・小笠原明信 : 2022 年台風 14 号で噴砂および陥没が発生した河川堤防での開削調査, 第 58 回地盤工学研究発会発表講演集, 13-2-2-03, 2023.
- 17) 小笠原明信・川尻峻三・岡村未対・前田健一・石原雅規・新清晃・小野耕平・陣内尚子 : 2022 年台風 14 号で噴砂および陥没が発生した河川堤防堤内地盤の S 波速度分布, 第 58 回地盤工学研究発会発表講演集, 13-2-2-04, 2023.
- 18) 小野耕平・岡村未対・陣内尚子・前田健一・川尻峻三・新清晃 : 2022 年台風 14 号で噴砂および陥没が発生した河川堤防での貫入試験調査, 第 58 回地盤工学研究発会発表講演集, 13-2-2-05, 2023.
- 19) 陣内尚子・小野耕平・岡村未対・前田健一・石原雅規・川尻峻三・新清晃 : 北川洪水により堤内地盤に現れた噴砂・陥没のメカニズム, 第 58 回地盤工学研究発会発表講演集, 13-2-2-06, 2023.
- 20) 前田健一・石原雅規・岡村未対・小野耕平・陣内尚子・川尻峻三・新清晃・小笠原明信・澤村直毅・大桑有美・一瀬守 : 令和 4 年台風 14 号による宮崎県北川の噴砂・陥没下の基盤層の粒度の空間分布, 第 58 回地盤工学研究発会発表講演集, 13-2-2-07, 2023.
- 21) 西村圭右・丸田亮・新清晃・石原雅規・前田健一・岡村未対 : 基盤漏水に伴い形成される砂溜まりの密度変化率と砂溜まり拡大プロセスに係る考察, 第 58 回地盤工学研究発会発表講演集, 13-2-2-08, 2023.
- 22) 大桑有美・前田健一 : 堤内地の漏水・噴砂動態と損傷に及ぼす透水性基礎地盤の層構造の影響, 河川技術論文集, Vol. 30, pp. 215-220, 2024.
- 23) 国土交通省水管管理・国土保全局 : 災害復旧事業(補助)の概要, <https://www.mlit.go.jp/river/bousai/hukkyu/data/saigaihukkyujigyou.pdf> (参照 2025.4.10)
- 24) 国土交通省水管管理・国土保全局 : 堤防等河川管理施設及び河道の点検・評価要領, 2023.
- 25) 国土交通省水管管理・国土保全局 : 点検評価結果について, https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/kasen/tenkenhyouka/r05_tenken/index.html (参照 2025.4.10)
- 26) (国研) 土木研究所 : 河川堤防の液状化対策の手引き, 土木研究所資料第 4449 号, 2024.

(原稿受理 2025.5.6)

会告

地盤工学会活動支援 酒金のお礼

平成26年4月より開始しました「ご寄附のお願い」に対しましては、お陰様をもちまして、毎年大変多くの会員ならびに関係者の皆様よりご酒金を賜り、心より感謝申し上げます。令和6年度にご酒金を賜りました皆様のお名前をここに掲載し顕彰させていただきます。いただきました寄附金は「持続すべき地盤工学会」、「持続できる地盤工学会」を目指した基盤確立のための応援資金として、無駄なく大切に活用させていただきます。

さらなる皆様のご支援とご協力をお願い申し上げます。

寄附者（敬称略：目的別）

一般	北海道支部	東北支部
堀越 研一	(株)吉本組	(株)大林組東北支店
末岡 徹	(株)アクアジオテクノ	鹿島建設(株)東北支店
ほか非公開 1名	五十嵐建設(株) (株)エーティック HR S(株) 岡三リビック(株)北海道支店 小野田ケミコ(株)北海道事業所 (株)開発調査研究所 川崎地質(株)北海道支店 (株)北海道近代設計 五洋建設(株)札幌支店 (株)シーウェイエンジニアリング (株)ジオテック (株)シン技術コンサル (株)J S P札幌営業所 (株)ダイイチプランニング 大起コンサルタント(株) 大地コンサルタント(株) 太平洋総合コンサルタント(株) (株)田中組 大日本ダイヤコンサルタント(株)北海道支社 (株)竹中土木北海道支店 中央開発(株)札幌支店 飛島建設(株)札幌支店 中村建設(株) 日本データーサービス(株) 日本工営(株)札幌支店	清水建設(株)東北支店 大成建設(株)東北支店 東北電力(株) 東亜建設工業(株)東北支店 東日本高速道路(株)東北支社 (株)不動テトラ東北支店 (株)奥村組東北支店 奥山ボーリング(株) (株)竹中土木東北支店 大日本ダイヤコンサルタント(株)東北支社 一般社団法人東北地域づくり協会 パシフィックコンサルタンツ(株)東北支社 (株)復建技術コンサルタント (株)丸本組 山和建設(株) (株)建設技術センター (株)興和 佐藤工業(株) (株)新東京ジオ・システム (株)ダイワ技術サービス (株)東北開発コンサルタント 東北ボーリング(株) 土木地質(株) 日本工営(株)仙台支店 日本基礎技術(株)東北支店

(株)橋本川島コーポレーション 北王コンサルタント(株) 北海道石灰化工(株) 北武コンサルタント(株) (株)北海道技術コンサルタント 北海道土木設計(株) 前田工織(株) 益村測量設計(株) ライト工業(株)北海道統括支店 水元建設(株) 宮坂建設工業(株) 村井建設(株) 大成建設(株)札幌支店 伊藤組土建(株) 岩田地崎建設(株) (株)大林組札幌支店 基礎地盤コンサルタンツ(株)北海道支社 北日本港湾コンサルタント(株) (株)イーエス総合研究所 清水建設(株)北海道支店 (株)構研エンジニアリング (株)ドーコン (株)安藤・間札幌支店 (株)平田建設 (株)不動テトラ北海道支店 北海道土質試験協同組合 ほか非公開3団体	(株)ネクスコ・エンジニアリング東北 (株)ネクスコ・メンテナンス東北 陽光建設(株) ライト工業(株)東北統括支店 熱海建設(株) 岡三リビック(株)東北支店 川崎地質(株)北日本支社 基礎地盤コンサルタンツ(株)東北支社 (株)シビル設計 日本地下水開発(株) 山形県地質土壤調査業協会 日特建設(株)東北支店 (株)地質基礎 (株)エイト日本技術開発東北支社 国土防災技術(株)東北支社 中央開発(株)東北支店 錦城護謨(株)秋田営業所 (株)熊谷組東北支店 ほか非公開2団体
--	---

会告

「令和7年度地盤工学会賞」候補募集要項

公益社団法人 地盤工学会

地盤工学会表彰規程により、下記のとおり令和7年度学会賞候補を募集いたしますので、奮ってご応募ください。学会賞は「技術賞」、「研究・論文賞」の2賞に分けて募集していますので、ご注意ください。

応募の形式：推薦とし、自薦・他薦を問いません。なお、推薦者は本学会の会員に限りません。

なお、推薦にあたり、次の点にご留意ください。

- 1) 推薦書記載の賞区分が適当でないと判断した場合は、推薦者と相談のうえ、賞区分を変更することがあります。
- 2) 審査にあたり、必要な場合には、資料の追加提出を求めることがあります。
- 3) 自薦をする場合には、同一受賞区分に対して1件に限ります。

審査：審査は、表彰委員会内規に則り、表彰委員会で行い、理事会で決定します。

発表：受賞決定の場合には、直接本人に通知します。また、JGS Website および「地盤工学会誌」でも発表します。

授賞：第68回通常総会（令和8年6月予定）において行い、受賞者に賞状を贈ります。

応募締切日：令和7年10月1日（水）

提出先：電子メールやファイル転送サービス等により下記へ提出してください。紙媒体での提出は不要です。（※事務局へ直接持参されても応募の受付をいたしかねます。）

公益社団法人地盤工学会 表彰委員会事務局 宛 E-mail : hyosho@jiban.or.jp

メール件名：令和7年度地盤工学会賞_〇〇賞 応募業績の送付（※〇〇には該当する賞を記載ください。）

◎ 推荐書の用紙：ホームページ (https://www.jiban.or.jp/?page_id=598) からダウンロードしてください。

1. 技術賞

技術賞は、地盤工学、地盤防災、環境地盤等の進展に顕著な貢献をしたと認められる事業や技術で、令和2年10月1日から令和7年9月30日までの5年間以内の業績を対象とします。5年間以内に論文や報文として公表されていても、対象期間より以前に終了した事業等は、特段の事情がないかぎり候補となりません。

技術業績賞	技術開発賞
<p>1) 対象とする業績</p> <p>地盤工学、地盤防災、環境地盤等の分野の進展に顕著な貢献をした技術が活用されたプロジェクトで、同技術が計画立案、調査、設計、施工、維持管理等に活かされた業績。</p> <p>その対象となる技術の活用が、募集公示年の9月末日前5か年以内の業績。また、それ以前の業績が同期間に新たな業績として高く評価された場合を含む。</p> <p>以下のいずれかのカテゴリーを選択して応募すること。</p> <p>(a) 事業 (b) 技術</p>	<p>1) 対象とする業績</p> <p>地盤工学、地盤防災、環境地盤等における新技術開発およびその実用化等で、顕著な貢献をしたと認められる業績。一般的な業績のほかに、地盤工学における新しい情報関連技術についての業績もあわせて募集します。</p> <p>募集公示年の9月末日前5か年以内に実用化されて実績が認められた技術。また、それ以前の業績が同期間に新たに実績として高く評価された場合を含む。</p> <p>以下のいずれかのカテゴリーを選択して応募すること。</p> <p>(a) 一般 (b) 新しい情報関連技術（例えば、ICT、AI、IoT、DX、i-Construction、BIM/CIM、など）</p>
<p>2) 受賞候補者の資格</p> <p>個人あるいは機関、および、それらのグループ。</p>	<p>2) 受賞候補者の資格</p> <p>主として開発を担った、個人あるいは機関、および、それらのグループ。</p>

3) 提出書類	*提出必須	
*①推薦書 1部	Word・PDF の両方	PDF のみ押印要
*②業績を示す資料 1部	PDF	5 点以内で、合計 50 ページ以内（所定の表紙を添付し、1 つの PDF ファイルにまとめる）
③貢献内容を示す資料 1部	PDF	
④同意書	PDF	複数名いる場合は 1 つの PDF ファイルにまとめる
*⑤受賞候補者等情報入力シート 1部	Excel	
4) 備 考		
① 技術賞については、共著またはグループ（機関・個人）の業績を受賞候補とする場合には、その個人の業績全体に対する貢献内容を示す資料を 1 部提出してください。		
② 技術賞については、推薦書に記載の受賞候補機関・個人以外に、候補業績に貢献した機関・個人がある場合は、その同意書を添付してください（業績資料に記載のある受賞候補以外の機関・個人についても同意書が必要です）。		
③ 技術業績賞については、グループ（機関・個人）の業績を受賞候補とする場合には個々の機関が計画、立案、等のどの分野を担当したかを推薦書に記入してください。		
④ 提出された電子ファイルをそのまま用いて審査を行います。低品質の電子ファイルの提出によって、審査結果に影響が出たとしても、すべて応募者の責任となります。電子ファイルの提出の際には十分にご注意下さい。		

2. 研究・論文賞

研究・論文賞は、地盤工学、地盤防災、環境地盤等に関する学術および技術の進展に顕著な貢献をしたと認められる業績で、研究業績賞については全部または一部が、令和 2 年 10 月 1 日から令和 7 年 9 月 30 日までの 5 年間以内に、論文賞・研究奨励賞については全部または一部が、令和 5 年 10 月 1 日から令和 7 年 9 月 30 日までの 2 年間以内に地盤工学会機関誌類（Soils and Foundations は Vol.65 No.4 掲載分まで、地盤工学ジャーナルは 20 卷 3 号掲載分まで）に発表されたものを対象とします。

研究業績賞		
1) 対象とする業績		
地盤工学、地盤防災、環境地盤等に関する一連の研究テーマについて、多くの研究論文・報文により、学術および技術の進展に顕著な貢献をしたと認められる業績。		
2) 受賞候補者の資格		
① 個人。		
② 既に研究業績賞を受賞した人は、受賞候補者になれない。なお、平成 4 年度までに受賞した論文賞は、研究業績賞とみなす。		
3) 提出書類	*提出必須	
*①推薦書 1部	Word・PDF の両方	PDF のみ押印要
*②論文等 1部	PDF	5 点以内で、合計 50 ページ以内（所定の表紙を添付し、1 つの PDF ファイルにまとめる）
③貢献内容を示す資料 1部	PDF	複数名いる場合は 1 つの PDF ファイルにまとめる
④同意書	PDF	
*⑤受賞候補者等情報入力シート 1部	Excel	
4) 備 考		
① 地盤工学会機関誌類とは、次のものです。		
地盤工学会誌、Soils and Foundations、地盤工学ジャーナル、地盤工学会（支部を含む）が主催・共催する会議等における刊行物、その他地盤工学会刊行物、国際地盤工学会（技術委員会を含む）が主催・共催する会議等における刊行物。		
② 共著の論文を受賞候補とする場合には、その個人の業績全体に対する貢献内容を示す資料を 1 部提出してください。また、その中の特定の者を受賞候補者とするときには、共著者の同意書を添付してください。		
③ 研究・論文賞については、同一業績での、各賞への同時推薦はできません。		
④ 提出された電子ファイルをそのまま用いて審査を行います。低品質の電子ファイルの提出によって、審査結果に影響が出たとしても、すべて応募者の責任となります。電子ファイルの提出の際には十分にご注意下さい。		

論文賞（和文部門、英文部門）

1) 対象とする業績

各部門に対して、地盤工学、地盤防災、環境地盤等に関する学術の進展に顕著な貢献をしたと認められる单一の論文。なお、研究奨励賞で受賞した論文は、対象とならない。

2) 受賞候補者の資格

- ① 論文の著者。
- ② 過去に受賞した人も重ねて受賞候補者になる。

3) 提出書類 *提出必須

*①推薦書 1部	Word・PDF の両方	PDF のみ押印要
*②論文 1部	PDF	所定の表紙を添付
*③受賞候補者等情報入力シート 1部	Excel	

4) 備考

- ① 地盤工学会機関誌類とは、次のものです。

地盤工学会誌、Soils and Foundations、地盤工学ジャーナル、地盤工学会（支部を含む）が主催・共催する会議等における刊行物、その他地盤工学会刊行物、国際地盤工学会（技術委員会を含む）が主催・共催する会議等における刊行物。

- ② 研究・論文賞については、同一業績での、各賞への同時推薦はできません。

- ③ 提出された電子ファイルをそのまま用いて審査を行います。破損や低品質の電子ファイルの提出によって、審査結果に影響が出たとしても、すべて応募者の責任となります。電子ファイルの提出の際には十分にご注意下さい。

研究奨励賞

1) 対象とする業績

地盤工学、地盤防災、環境地盤等に関する注目に値する研究を行い、将来学術の進展に貢献が期待できる業績。

2) 受賞候補者の資格

- ① 令和7年4月1日において、満36歳未満の個人。
- ② 既に研究奨励賞を受賞した人は、受賞候補者になれない。
- ③ 同一論文で、既に論文賞を受賞した人は、受賞候補者になれない。
- ④ 個人を対象とする応募の場合は、業績を示す資料、論文等において第一著者を原則とする。第一著者以外を受賞候補者とする場合、候補者の貢献内容を「貢献内容を示す資料」に詳細に記載すること。

3) 提出書類 *提出必須

*①推薦書 1部	Word・PDF の両方	PDF のみ押印要
*②論文等 1部	PDF	5点以内で、合計50ページ以内（所定の表紙を添付し、1つのPDFファイルにまとめる）
③貢献内容を示す資料 1部	PDF	複数名いる場合は1つのPDFファイルにまとめる
④同意書	PDF	
*⑤受賞候補者等情報入力シート 1部	Excel	

4) 備考

- ① 地盤工学会機関誌類とは、次のものです。

地盤工学会誌、Soils and Foundations、地盤工学ジャーナル、地盤工学会（支部を含む）が主催・共催する会議等における刊行物、その他地盤工学会刊行物、国際地盤工学会（技術委員会を含む）が主催・共催する会議等における刊行物。

- ② 共著の論文を受賞候補とする場合には、その個人の業績全体に対する貢献内容を示す資料を1部提出してください。また、その中の特定の者を受賞候補者とするときには、共著者の同意書を添付してください。

- ③ 研究・論文賞については、同一業績での、各賞への同時推薦はできません。

- ④ 提出された電子ファイルをそのまま用いて審査を行います。破損や低品質の電子ファイルの提出によって、審査結果に影響が出たとしても、すべて応募者の責任となります。電子ファイルの提出の際には十分にご注意下さい。

会告

「令和7年度地盤工学貢献賞」候補募集要項

公益社団法人 地盤工学会

候補対象：長年にわたる地道な活動・業務、一般市民に対する活動のいずれかを通じて地盤工学の進歩発展あるいは社会的イメージの向上に多大な貢献をした個人または団体。

受賞候補者：本会会員・非会員を問わない。すでに地盤工学貢献賞を受賞した者は重ねて受賞することはできない。名誉会員および地盤工学会功労章の受章者についても受賞候補者になることはできない。ただし、「一般市民に対する活動」により、名誉会員および地盤工学会功労章の受章者が本賞の受賞候補者となる場合はこの限りではない。

候補の範囲：令和7年9月30日（火）までの活動・業務とする。

推薦の方法：

- 推薦者は会員（正会員、特別会員）、支部、その他一般とする。
- 推荐者は別に定める推薦書を提出する。
- なお、当該活動・業務に関する参考資料を添付することを妨げない。

審査：表彰委員会において行う。

表彰：通常総会または支部総会において行い賞状を贈呈する。

応募締切日：令和7年10月1日（木）

提出先：電子メールやファイル転送サービス等により下記へ提出してください。紙媒体での提出は不要です。（※事務局へ直接持参されても応募の受付をいたしかねます。）

公益社団法人地盤工学会 表彰委員会事務局 宛 E-mail：hyosho@jiban.or.jp

メール件名：令和7年度地盤工学貢献賞 応募業績の送付

提出書類：

- ①推薦書 1部
②業績を示す資料 1部

Word・PDF の両方
PDF

PDFのみ押印要
5点以内で、合計50ページ以内（所定の表紙を添付し、1つのPDFファイルにまとめる）

◎ 推荐書の用紙：ホームページ（https://www.jiban.or.jp/?page_id=68）からダウンロードしてください。

表彰対象分野の具体例：

- (1) 地盤工学に関わる技術者育成
- (2) 地盤工学に関わる実験・試験機器の開発や改良
- (3) 地盤工学に関わる資料・データ収集とその公開
- (4) 地盤工学に関わる調査・計画・設計・管理・施工・検査・防災などの技術支援
- (5) 地盤工学の社会的イメージの向上
- (6) その他 上記趣旨に合致するもの