地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤の特性とその対応技術に関する研究委員会

報　告　書

平成 25 年 3 月

公益社団法人地盤工学会関西支部

目　次

まえがき

研究委員会メンバー　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ i
研究委員会活動記録　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ iv

１．はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-1
1.1　研究の背景　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-1
1.2　トラブル発生に関する地理・地盤および社会的要因　・・・・・・・・・・・・ 1-1
1.3　研究の目的と意義　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-1
1.4　研究の進め方　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-2
1.5　地下建設工事でのトラブルサム地盤の分類とトラブルの種類　・・・・・・・・ 1-2
1.6　本報告書の構成　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-4

２．開削工事におけるトラブルについて　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-1
2.1　はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-1
2.2　トラブルの事例　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-1
2.3　代表的なトラブル事例(パイピング)　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-2
2.4　おわりに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2-5

３．シールド工事におけるトラブルについて　・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-1
3.1　はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-1
3.2　シールド工事のトラブルの現象と特徴　・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-1
3.3　シールド工事のトラブル事例について　・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-1
3.4　おわりに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3-6

４．山岳トンネル(NATM)工事におけるトラブルについて　・・・・・・・・・・・・ 4-1
4.1　はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4-1
4.2　トラブルの現象と特徴　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4-1
4.3　トラブルの事例　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4-2
4.4　考察　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4-5
4.5　おわりに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4-5

５．推進等工事におけるトラブルについて　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5-1
5.1　はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5-1
5.2　トラブルの現象と特徴　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5-1

5.3　推進工事のトラブル事例　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-2
5.4　TBM 工事のトラブル事例　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-5
5.5　おわりに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5-6

６．海外工事におけるトラブルについて　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-1
6.1　はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-1
6.2　代表的なトラブル事例　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-1
6.3　おわりに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6-2

７．トラブルの発生しやすい地盤の特徴や特性について　・・・・・・・・・・・・・　7-1
7.1　はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-1
7.2　トラブルを発生しやすい地盤の特徴　・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-1
7.3　大阪平野の地盤の特徴と堆積物の特徴　・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-3
7.4　トラブル事例と堆積物の特徴　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-8
7.5　トラブルを引き起こす砂の特徴についての考察　・・・・・・・・・・・・・　7-8
7.6　おわりに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7-12

８．トラブルサム地盤に対するリスクマネージメント　・・・・・・・・・・・・・・　8-1
8.1　はじめに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　8-1
8.2　地下鉄建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤特性とその対応技術　・　8-1
8.3　トラブル事例の分類　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　8-2
8.4　トラブルへの対応　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　8-7
8.5　トラブルから得られた教訓　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　8-9
8.6　おわりに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　8-10

９．おわりに　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　9-1
9.1　トラブル要因の社会的傾向とその対応　・・・・・・・・・・・・・・・・・　9-1
9.2　地質調査と地盤リスクへの対応に関する提言　・・・・・・・・・・・・・・　9-2
9.3　トラブル事例収集と事例の取り扱いについての提言　・・・・・・・・・・・　9-2
9.4　本研究委員会成果の技術伝承　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　9-3

まえがき

大阪などの大都市では地下利用が進んでおり，輻輳化した地下の重要構造物を避けながら近接工事を実施したり，大深度の地下工事が増えたりするなど，工事の難易度が高くなってきている．一方，大阪近郊の阪神間，京都，滋賀などでは，上下水道，電力，ガス，通信など縦断延長の長いインフラ構造物の築造時において，大礫卓越地盤で陥没事故が発生するなど，施工時のトラブルがみられる．

このように地下建設工事において近年に見られるトラブル事例は，均等係数の小さい細砂や大礫などの限定された地盤で発生することが多い. このような傾向は, 関西だけではなく，名古屋や東京などのように低平地にできた大都市や，中国上海や台湾の沿岸部の都市，オランダやイギリスなど類似した土質特性を有する都市においても同様に見られる．

日本では，近年建設投資の減少により，大規模工事や難工事の計画，設計，施工をおこなう機会が少なくなっているため，技術力の維持および伝承が課題となっている．また，日本におけるトラブルサム地盤での貴重かつ豊富な経験に基づいて，建設工事が盛んなアジアを始め世界に情報を発信し，技術的な助言や海外プロジェクトへの参画が重要と考えられる．

そこで，公益社団法人地盤工学会関西支部「地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤の特性とその対応技術に関する研究委員会(トラブルサム地盤研究委員会)」を平成 22 年度に設立し，多くのトラブルサム地盤の中でも特に，均等係数の小さい細砂と大礫に着目して，国内外における地下建設工事のトラブル事例を収集し，問題となる地盤の堆積環境や物性などの地質的および土質的アプローチから調査・分析をおこない，これらの因果関係や工事中の減災に有効な対策について 3 年間に亘り，調査・研究を進めてきた．

本委員会は海外特別委員 3 名を加え 59 名の委員により構成され，地盤特性分科会，トラブル事例分科会，リスクマネージメント分科会，海外事例分科会 4 分科会と各分科会の中に合計 8 つのワーキンググループ(WG)に分かれて活動をおこなった．

本報告書は，以上の目的のために，委員会活動結果を各分科会，WG が精力的にまとめたものであり，地下建設工事の減災や今後に建設が増加するとみられる大深度地下対応技術にも寄与する研究テーマとして，これらの基礎研究の一つとなれば幸いである．さらには，日本だけではなく近隣国とのジョイントリサーチを目指していることから, 関西支部 50 周年テーマ「関西からアジアへ　―地盤工学と共に歩む未来―」の一翼にもなるものと考えられる．

平成 25 年 3 月 29 日

「地下建設工事においてトラブルが発生しやすい
地盤の特性とその対応技術に関する研究委員会」
委員長　　橋本　正

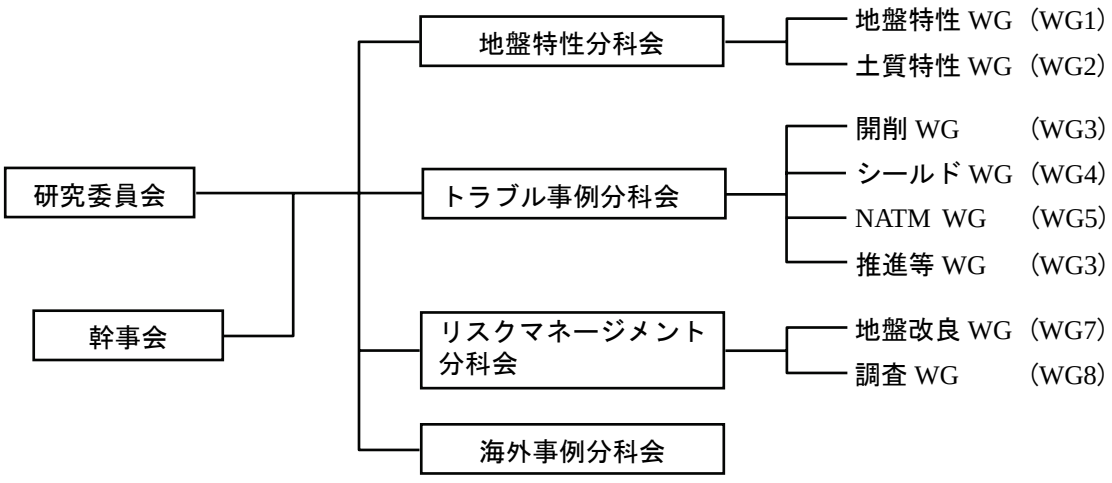
【研究委員会メンバー】

	メンバー	所　属	参加期間
委員長	橋本　　正	(株)地域 地盤 環境 研究所	2010 年 6 月～2013 年 3 月
幹事長 兼 主査 (トラブル事例分科会)	木村　　亮	京都大学	2010 年 6 月～2013 年 3 月
主査(地盤特性分科会) 兼 土質特性 WG_WG2 長	三村　　衛	京都大学	2010 年 6 月～2013 年 3 月
主査(ﾘｽｸﾏﾈｰｼﾞﾒﾝ分科会)	杉山 和久	(株)大林組	2011 年 10 月～2013 年 3 月
兼 地盤改良 WG_WG7 長	北岡 隆司	(株)大林組	2010 年 6 月～2011 年 9 月
主査(海外事例分科会) 兼 幹事	譽田 孝宏	(株)地域 地盤 環境 研究所	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員 兼 地盤特性 WG_WG1 長	竹村 恵二	京都大学	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員 兼 開削 WG_WG3 長	長山 喜則	西日本旅客鉄道(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員 兼 シールド WG_WG4 長	塩谷 智弘	大阪市交通局	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員 兼 NATM WG_WG5 長	市場 一好	(独)鉄道建設･運輸施設整備支援機構	2012 年 6 月～2013 年 3 月
	田山　　聡	西日本高速道路(株)	2010 年 6 月～2012 年 5 月
委員 兼 推進等 WG_WG6 長	奥野 正富	NTT インフラネット(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員 兼 調査 WG_WG8 長	奥野 日出	(株)アスカソイルコーナー	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員 兼 WG1 幹事	北田 奈緒子	(一財)地域 地盤 環境 研究所	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員 兼 WG2 幹事	鈴木 宏尚	大阪ガス(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員 兼 WG3 幹事	川口 英司	(株)大林組	2010 年 8 月～2013 年 3 月
	山本 多成	(株)大林組	2010 年 6 月～2010 年 8 月
	栗山 裕司	鹿島建設(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
	髙橋 祐史	阪神高速道路(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員 兼 WG4 幹事	臼田 利之	大阪市建設局	2010 年 6 月～2013 年 3 月
	上新原 公治	大阪市交通局	2010 年 6 月～2013 年 3 月
	原田 聖司	大阪府	2010 年 6 月～2013 年 3 月

	メンバー	所　属	参加期間
委員 兼 WG5 幹事	水嶋 浩治	(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構	2011 年 5 月～2013 年 3 月
	河村 和信	(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構	2010 年 6 月～2011 年 4 月
委員 兼 WG6 幹事	井上 雅人	NTT インフラネット(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員 兼 WG7 幹事	新田 耕司	中央復建コンサルタンツ(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
	中野 尊之	中央復建コンサルタンツ(株)	2010 年 6 月～2011 年 8 月
委員 兼 WG8 幹事	福井 芳樹	関西電力(株)	2012 年 8 月～2013 年 3 月
	村上 嘉兼	関西電力(株)	2012 年 1 月～2012 年 7 月
	小倉 和巳	関西電力(株)	2010 年 6 月～2011 年 12 月
委員(ﾄﾗﾌﾞﾙ事例分科会，WG9)	赤木 寛一	早稲田大学	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員(ﾄﾗﾌﾞﾙ事例分科会，WG5)	芥川 真一	神戸大学	2011 年 5 月～2013 年 3 月
委員（WG4）	石田 智朗	パシフィックコンサルタンツ(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG7）	上田 保司	(株)精研	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG8）	梅田 祐一	(株)デルタコンサルタント	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG8）	大北 耕三	(株)大北耕商事	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（ﾄﾗﾌﾞﾙ事例分科会）	大志万 和也	阪神高速技研(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG3）	大野 政雄	(株)建設技術研究所	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG3）	勘定　茂	西日本高速道路(株)	2012 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG4）	木下 聖司	大阪ガス(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG4）	木村 博規	西松建設(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（ﾄﾗﾌﾞﾙ事例分科会）	小山 幸則	京都大学	2011 年 9 月～2013 年 3 月
委員（WG4）	近藤 悦吉	関西電力(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG5）	白川 賢志	大成建設(株)	2010 年 9 月～2013 年 3 月
	西山 秀樹	大成建設(株)	2010 年 6 月～2013 年 8 月
委員（WG8）	鈴木 昭夫	(社)近畿建設協会	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG2，WG3）	田中　勉	神戸大学	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG2）	中井 照夫	名古屋工業大学	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG5）	長屋 淳一	(株)地域 地盤 環境 研究所	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（ﾄﾗﾌﾞﾙ事例分科会）	西川　匡	大阪市建設局	2011 年 4 月～2013 年 3 月
	黒山 泰弘	大阪市建設局	2010 年 6 月～2011 年 3 月

	メンバー	所　属	参加期間
委員（WG7，WG9）	橋本 欣也	(株)ニュージェック	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG3，WG7）	服部　晃	(株)日本触媒	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG4）	林　訓裕	阪神高速道路(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG2）	肥後 陽介	京都大学	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（ﾄﾗﾌﾞﾙ事例分科会）	深沢 成年	(独)鉄道建設･運輸施設整備支援機構	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG3）	藤井 康嗣	大阪府	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG3）	堀田　孝	前田建設工業(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員 （WG1，WG 2，WG 8）	前田 健一	名古屋工業大学	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG3）	松尾 秀夫	阪急設計コンサルタント(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG1）	三田村 宗樹	大阪市立大学	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員 （WG1，WG 2，WG 3）	宮田　和	清水建設(株)	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（WG4）	安竹　馨	(株)奥村組	2011 年 4 月～2013 年 3 月
	二宮　功	(株)奥村組	2010 年 6 月～2011 年 3 月
委員（ﾄﾗﾌﾞﾙ事例分科会）	山本　剛	(一財)日本建設情報総合センター（元国土交通省近畿地方整備局）	2010 年 6 月～2013 年 3 月
委員（海外事例分科会）	崔　瑛	名城大学	2011 年 9 月～2013 年 3 月
海外特別委員 （海外事例分科会）	朱　華合	中国 同済大学	2010 年 12 月～2013 年 3 月
海外特別委員 （海外事例分科会）	曽我 健一	イギリス ケンブリッジ大学	2010 年 12 月～2013 年 3 月
海外特別委員 （海外事例分科会）	Hans Brinkman	オランダ Deltares	2010 年 12 月～2013 年 3 月

総勢 59 名（海外特別委員 3 名含む，のべ 69 名）



【研究委員会活動記録】

（2010 年度（平成 22 年度））

委員会	幹事会	その他
第 1 回委員会（2010 年 6 月 7 日） ・分科会＆WG 配属希望調整		
	第 1 回幹事会（2010 年 7 月 8 日） ・分科会＆WG 構成決定 ・研究委員会の進め方議論	
	第 2 回幹事会（2010 年 8 月 17 日） ・研究委員会の進め方決定 ・トラブル事例リスト作成に向けたアンケートの実施を決定	第 1 回トラブル事例紹介講演会 （2010 年 8 月 17 日） ・塩谷委員，木下委員講演
		第 2 回トラブル事例紹介講演会 （2010 年 11 月 2 日） ・近藤委員，前田委員講演
第 2 回委員会（2010 年 12 月 3 日） ・トラブル事例リストの紹介＆今後の整理方法に関する議論		特別講演会 2010 （2010 年 12 月 3 日，別紙参照）
	第 3 回幹事会（2011 年 1 月 17 日） ・トラブル事例を整理するための共通フォーマットの調整他	
		第 3 回トラブル事例紹介講演会 （2011 年 2 月 16 日） ・奥野（正）・井上委員，田中委員講演

第 1 回トラブル事例紹介講演会（2010 年 8 月 17 日）

塩谷委員　：「大阪市地下鉄建設工事におけるトラブル事例」

木下委員　：「大阪ガスパイプライン建設工事におけるトラブル事例」

第 2 回トラブル事例紹介講演会（2010 年 11 月 2 日）

近藤委員　：「関西電力のシールド施工」

前田委員　：「細粒分の移動を考慮した地盤の陥没解析とモニタリングの試み」

第 3 回トラブル事例紹介講演会（2011 年 2 月 16 日）

奥野（正）委員＆井上委員　：「通信用とう道建設工事におけるトラブル事例」

田中委員　：「浸透破壊－事例解析の教えるところ－」

特別講演会 2010

朱 合華　教授（中国 同済大学 土木工程学院長，海外特別委員）

講演題目：「上海の地盤と地下建設技術の現状と課題」

楊 国祥　総工程師（中国 上海隧道工程股份有限公司）

講演題目：「上海の地下工事におけるトラブルサム地盤とその事例」

＊各分科会および各 WG については，随時開催した.

（2011 年度（平成 23 年度））

委員会	幹事会	その他
	第 4 回幹事会（2011 年 5 月 9 日） ・トラブル事例整理状況確認	
第 3 回委員会（2011 年 6 月 13 日） ・トラブル事例整理状況確認 ・特別セッション講演内容調整		第 4 回トラブル事例紹介講演会 （2011 年 6 月 13 日） ・水嶋委員，北田委員講演 第 46 回地盤工学研究発表会 特別セッション （2011 年 7 月 5 日，別紙参照） 第 5 回トラブル事例紹介講演会 （2011 年 9 月 13 日） ・北浜逢阪貯留管築造工事現場見学 ・臼田委員講演
	第 5 回幹事会（2011 年 10 月 7 日） ・トラブル事例収集･整理結果の報告 ・各分科会での研究の進め方に関する議論	
第 4 回委員会（2011 年 11 月 4 日） ・トラブル事例収集･整理結果の報告 ・各分科会での研究の進め方に関する議論		特別講演会 2011 （2011 年 11 月 4 日，別紙参照）
	第 6 回幹事会（2012 年 3 月 13 日） ・各分科会の研究進捗状況確認	

第 4 回トラブル事例紹介講演会（2011 年 6 月 13 日）

水嶋委員　：「鉄道･運輸機構による鉄道トンネル工事におけるトラブル事例」

北田委員　：「トラブルサム地盤の特性」

第 5 回トラブル事例紹介講演会（2011 年 9 月 13 日）

臼田幹事　：「大阪市下水道工事におけるトラブル事例」

特別講演会 2011（2011 年 11 月 4 日）

中井 照夫（名古屋工業大学 都市社会工学科 教授）

講演題目：「トンネル掘削における既設構造物および近接トンネルの影響－モデル実験と数値解析を通しての検討－」

深沢 成年（（独）鉄道建設･運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 課長）

講演題目：「出水事故や陥没事故から得られた注意すべき地盤の性状」

杉本 隆男（（株）日建設計シビル 上席調査役）

講演題目：「都市土木工事に伴う地盤災害のトラブルシューター」

＊各分科会および各 WG については，随時開催した．

（2012 年度（平成 24 年度））

委員会	幹事会	その他
	第 7 回幹事会（2012 年 5 月 10 日） ・各分科会の研究進捗状況確認	
第 5 回委員会（2012 年 5 月 16 日） ・各分科会の研究進捗状況確認 ・曽我海外特別委員講演		
	第 8 回幹事会（2012 年 7 月 25 日） ・各分科会の研究進捗状況確認	第 6 回トラブル事例紹介講演会 （2012 年 7 月 25 日） ・高橋委員，上田委員講演
	第 9 回幹事会（2012 年 11 月 27 日） ・各分科会の研究進捗状況確認	
第 6 回委員会（2013 年 1 月 21 日） ・各分科会および WG での研究成果のまとめ状況報告 ・原田委員，堀田委員講演		
	第 10 回幹事会（2013 年 2 月 15 日） ・各分科会の研究進捗状況確認 ・報告書執筆内容調整	
		座談会（2013 年 3 月 22 日）

第 5 回委員会（2012 年 5 月 16 日）

曽我海外特別委員：「ロンドンクレーでの建設工事に関する最近の地盤工学的関心事項」

第 6 回トラブル事例紹介講演会（2012 年 7 月 25 日）

高橋委員　：「阪神高速道路工事におけるトラブル事例」

上田委員　：「地盤凍結工法の施工現場におけるトラブルとその対策事例」

第 6 回委員会（2013 年 1 月 21 日）

原田委員　：「大阪府の工事におけるトラブル事例」

堀田委員　：「K 地下鉄の事故事例」

＊各分科会および各 WG については，随時開催した．

関西支部「特別講演会」開催報告

公益社団法人地盤工学会関西支部
「地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤の特性と
その対応技術に関する研究委員会」幹事 譽田孝宏（㈱地域 地盤 環境 研究所）

1. はじめに

地盤工学会関西支部の「地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤の特性とその対応技術に関する研究委員会（トラブルサム地盤研究委員会，委員長：橋本正（㈱地域 地盤 環境 研究所））」では，地下建設工事における多くのトラブルサム地盤の中でも主に均等係数の小さい細砂と大礫に着目してトラブル事例を収集し，問題となる地盤の堆積環境や物性などの地質的および土質的アプローチから分析を行い，これらの因果関係や有効的な対策について研究することによって減災を目指しています。本委員会はその実施体制として，地盤特性分科会，トラブル事例分科会，リスクマネージメント分科会の3分科会で構成され，それぞれにおいてWG活動を行っています。また，本委員会には，関西支部だけでなく他支部や海外からの参加や，熟年経験者から若手技術者まで多くの方々のご協力を得ながら，平成22年度～24年度（3年間）の活動を予定しています。

この度，海外委員の一人である中国同済大学の朱合華教授が，2010年12月3日に当委員会に参加のため来日されましたので，急成長を遂げている上海の地盤と最近の地下建設に関して，トラブル事例の紹介も含めて講演していただきました。

2. 特別講演会の概要

最初に，トラブルサム地盤研究委員会の橋本委員長より，本委員会の設立趣意説明および講演者の紹介を行いました。

続いて，朱合華教授（中国同済大学土木工程 学院長）より，「上海の地盤と地下建設技術の現状と課題」と題した講演がありました。なお，通訳は，馬険峰准教授（同済大学）が担当されました。まず，上海の地盤特性と上海の軟弱地盤における地下建設工事の現状について説明がなされた後，上海中心部での地下空間開発において中心となる技術と研究課題が示されました。次に，大断面函体推進技術などに代表される地下建設工事の新技術について紹介がなされ，3次元デジタル地下空間情報技術など，日本の技術よりも先んじている部分も示されました。最後に，上海地域の深部地盤（深さ30 m以上）での地下空間開発において，設計理論や施工技術において残された課題が示され，大変興味深い内容でした。

次に，楊国祥氏（中国上海隧道工程股份有限公司 総工程師）より，「上海の地下工事におけるトラブルサム地盤とその事例」と題した講演がありました。なお，通訳は，林家祥氏（中国上海隧道工程股份有限公司 副総工程師）が担当されました。上海地下鉄駅舎部と線路部のトンネル施工技術について紹介がありましたが，特に，地下鉄4路線が相互乗り入れする中国でも最大規模のターミナル駅の工事の紹介があり，各路線構造物との近接施工や周辺地盤環境に与える影響を抑制した施工例が示されました。また，上海における大断面・長距離シールドトンネル工事の事例，南京において到達立坑付近で発生したシールドトンネル事故とその修復技術に関する事例が紹介され，大変参考になる講演でした。

最後に，トラブルサム地盤研究委員会の木村幹事長（京都大学）より，本講演会の総括および閉会挨拶を行いました。

3. おわりに

本講演会は，地盤工学会関西支部設立50周年記念事業の基本テーマ「関西からアジアへ　地盤工学とともに歩む未来」にも通じる講演会でもあり，大変有意義な講演内容でありました。また，師走の忙しい中，100人余の方々にご参加いただけましたこと，この場をお借りして御礼申し上げます。

なお，本年の第46回地盤工学研究発表会（神戸）では，本委員会が主催する特別セッションを企画しておりますので，皆さまのご参加をお待ちしております。

写真―1　講演者への感謝状の贈呈
（左より楊氏，朱教授，橋本委員長）

（原稿受理　2011.1.11）

地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤の特性とその対応技術

Characteristics of Troublesome Ground and its Management for Underground Construction

橋本　正（はしもと　ただし）
㈱地域 地盤 環境 研究所　所長

木村　亮（きむら　まこと）
京都大学教授　大学院工学研究科

譽田孝宏（こんだ　たかひろ）
㈱地域 地盤 環境 研究所　次長

1. はじめに

地下建設工事において近年に見られるトラブル事例は，均等係数の小さい細砂や大礫などの限定された地盤で発生することが多い。このような傾向は，関西だけではなく，名古屋や東京などの低平地にできた都市や，中国上海や台湾沿岸部などの都市，オランダやイギリスなど類似した土質特性を有する都市においても同様に見られる。

日本では，近年，建設投資の減少により，大規模工事や難工事の計画，設計，施工を行う機会が少なくなっており，技術力の維持および伝承が課題となっている。また，日本におけるトラブルサム地盤での貴重かつ豊富な経験に基づいて，建設工事が盛んなアジアを始め世界に情報を発信し，技術的な助言や海外プロジェクトへの参画が重要と考えられる。

地盤工学会関西支部「地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤の特性とその対応技術に関する研究委員会（委員長：橋本正（地域 地盤 環境 研究所））」は，トラブルサム地盤の中でも主に均等係数の小さい細砂と大礫に着目してトラブル事例を収集し，問題となる地盤の堆積環境や物性などの地質的・土質的アプローチから分析を行い，これらの因果関係や有効的な対策について研究している。今回の特別セッションでは，本委員会における研究成果の一部について，中間報告した。

2. 研究委員会の活動概要

本委員会は，地盤特性分科会，トラブル事例分科会，リスクマネージメント分科会の3分科会で構成され，各分科会にてWG活動を行っている。また，関西支部だけでなく他支部や海外からの参加や，熟年経験者から若手技術者まで多くの方々のご協力を得ながら，平成22年度～24年度（3年間）の活動を予定している。委員は，海外委員3名を含む，総勢57名である。

平成22年12月には，朱合華氏（中国同済大学教授，海外委員）の来日に合わせて特別講演会を開催し[1)]，急成長を遂げている上海の地盤と，最近の地下建設におけるトラブル事例を中心に講演していただいた。本年11月にも特別講演会を開催予定なので，後日ご案内したい。

3. 特別セッションの概要

本セッションは，研究発表会の1日目(7月5日)17：00～18：30において，一般の方も参加できる公開型セッションとして開催した。収容人数100名程度の会場に対して参加者は90名であり，ほぼ満席の状態であった（写真―1参照）。

まず初めに，本委員会の橋本委員長（写真―2参照）が，研究委員会の設立趣意を説明した後，特別セッションの全体概要について紹介した。特に，①本委員会では，主として細砂と大礫を対象にして調査しており，②研究活動は，ベテランと若手がペアとなりトラブル事例の調査等にあたり，技術の伝承にもつなげたいとの意図があること，③現在事例を収集整理している過程であるが，日本で発生したトラブルは，海外における東アジアなどの低平地にも通じる問題であることから，本研究委員会成果を海外にも発信していきたいと，強調された。

写真―1　会場の様子

写真―2　橋本委員長による開会の挨拶

3.1 シールド事例の紹介

塩谷智弘氏（大阪市交通局）より，シールド工事におけるトラブル事例について，その地盤特性に着目した紹介があった。紹介された事例項目を以下に示すが，なかなか公表されていない貴重な内容であった。

① 洪積砂・粘土互層地盤における切羽泥水の逸泥事例
② シールドの異常磨耗
③ 洪積砂層掘進中の胴締め現象
④ 砂層掘進中の排泥管の閉塞
⑤ 洪積砂礫層中の巨礫の出現

3.2 開削事例の紹介

長山喜則氏（西日本旅客鉄道㈱）より，開削工事におけるトラブル事例として，二つのパイピング事例について紹介があった。これらは，連続地中壁の不具合部からの異常出水事例であり，掘削側地盤は粘土層であったにもかかわらず，その下部に堆積していた細砂が地下水と一緒になって掘削構内に流出したものである。このようなトラブルは，地下水位の低下，土留め壁根入れ長の延伸，部分掘削に伴う土留め壁変形の不連続を防ぐこと等により，軽減することが可能であることが述べられた。

3.3 地盤特性から見たトラブル事例の分析

三村衛氏（京都大学）より，主として大阪平野や京都盆地に見られるトラブルサム地盤の堆積環境とその特性について説明がなされた。着目すべき地盤は，高有機質土，海成粘土，微細砂，大礫等の特殊土であり，これらがどのような分布状況にあるのかを把握することが重要であると指摘した。各特殊土の分布は，その堆積環境によってある程度判別ができることから，調査時において対象地域の地質・堆積状況を十分に把握し，必要な調査項目を実施することが必要である。

3.4 トラブルサム地盤へのリスクマネージメント

北岡隆司氏（㈱大林組）より，トラブルサム地盤を対象にした地下建設工事における留意内容について説明があった。主たるポイントを以下に示す。

① 地盤特性とその状態を十分に認識した上で，発生が予想されるトラブルをイメージする。
② 現場に応じた自主管理値を設定し，厳格な施工管理を行う。
③ トラブル発生要因を回避あるいはダメージを最小限に抑制するための対策を行う。

4. 今後の活動に向けてのご意見

研究委員会報告後，フロアーディスカッションを行った。ここでは，今後の委員会活動に対する貴重なご意見をいただいたので，それらを以下に列挙する。

① 日本におけるトラブルサム地盤での貴重かつ豊富な経験を世界に情報発信するため，是非，研究成果を英文発表していただきたい。
② トラブルは避けるべき，なくすべきだという認識が根強いが，そもそもトラブルは避けられない，常に発生するものだと考え方を改め，その上でトラブルをどうやって抑制するか，適切に対応するかに主眼をおくことが重要である。このような考え方を体系的に整理した上で，世界に対して日本の技術力を積極的に発信していただきたい。
③ トラブルサム地盤に対してどのようなトラブルが実際に発生するかをイメージすることは大変重要である。しかし，これはトラブル発生時に居合わせた技術者は身をもって体験できるが，そのような経験のない技術者がこれからますます増加すると考えられる。このような状況下でどのように技術伝承していくのか，委員会として方向性を示すことを希望する。
④ 都市部における開削工事などでは，周辺建物が傾くなどの第三者被害に関するリスクがある。地下建設工事におけるリスクマネージメントとして，施工に伴う不具合だけでなく，不具合に連動して第三者に波及するリスクについても検討していただきたい。
⑤ 現在，建設会社もコンサルタントも過度と思われる価格競争にさらされていることから，工事における安全率が低下していると感じている。つまり，いかに安くするかに着目するあまり，余裕がなくなり，強いてはリスク増加につながっていると懸念している。このような状況も踏まえた上で，リスクマネージメントのあり方を議論することを希望する。
⑥ 地盤調査の重要性はよく理解できるが，現状，調査段階で詳細調査を実施することは，発注者に認めてもらえない場合が多い。十分な詳細調査をどこまで実施すべきなのか，必ず実施すべき調査と補助的に必要な調査を優先順位化して区別するなど，学会として調査の標準化を是非検討していただきたい。

これらのご意見については，本研究委員会にて検討すべき内容と，今後の検討課題として位置づける内容とに区分した上で，議論したいと考えている。なお，すべてのご意見に対応することは難しいが，委員会として提言をまとめるにあたり，これらを参考にする予定である。

5. おわりに

セッションの最後に，本委員会幹事長の木村　亮氏（京都大学）より，セッションの総括および今後の展開について概略説明がなされた。

本セッションでのご意見を参考にしながら，単純なトラブル事例集にとどまることなく，地盤特性に着目した分析と，トラブル対応技術を体系的に整理することにより，研究委員会の提言を取りまとめたいと考えている。

なお本報告は，中野尊之氏と新田耕司氏（中央復建コンサルタンツ㈱）のメモに基づいて作成した。末筆ながら感謝いたします。

参 考 文 献

1) 譽田孝宏：関西支部「特別講演会」開催報告，地盤工学会誌，Vol. 59, No. 3, p. 40, 2010.

（原稿受理　2011.8.8）

関西支部「特別講演会2011」開催報告
—「地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤の特性とその対応技術に関する研究委員会」—

譽田 孝宏（こんだ たかひろ）
（委員会幹事，㈱地域 地盤 環境 研究所）

1. はじめに

地盤工学会関西支部「地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤の特性とその対応技術に関する研究委員会（委員長：橋本 正（地域 地盤 環境 研究所））」は，トラブルサム地盤の中でも主に均等係数の小さい細砂と大礫に着目してトラブル事例を収集し，問題となる地盤の堆積環境や物性などの地質的・土質的アプローチから分析を行い，これらの因果関係や有効的な対策について研究している。

当委員会では，昨年に引き続いて平成23年11月4日に特別講演会を企画し，近接施工に関する最近のモデル実験と数値解析による検討事例，鉄道建設時におけるトラブル事例や東京都における各種トラブル事例について講演をいただいた。

2. 特別講演会2011の概要

最初に，中井照夫教授（名古屋工業大学都市社会工学科）より，「トンネル掘削における既設構造物及び近接トンネルの影響—モデル実験と数値解析を通しての検討—」と題した講演があった。都市部でのトンネル掘削問題は一つの特殊な問題ではなく，同じ思想のもとで取り扱う問題であることと，地盤挙動予測をある時間ある深度での変形や応力が合致するかどうかで議論すべきではなく，全体メカニズムとして捉えるべきであることが指摘された。実務者にとってわかりやすい内容であり，近接施工問題を取り扱う上で，重要なポイントが示された。

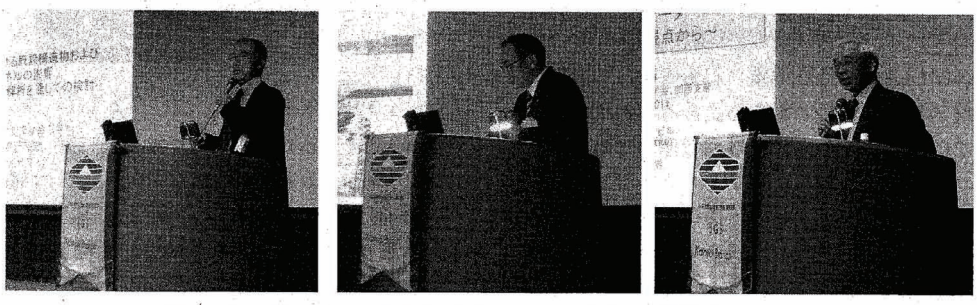
次に，深沢成年氏（㈱鉄道建設・運輸施設整備支援機構鉄道建設本部課長）より，「出水事故や陥没事故から得られた注意すべき地盤の性状」と題した講演があった。開削工事やシールド工事，山岳トンネル工事における異常出水，地表面陥没事例を数多く示され，各トラブルから得られた教訓について丁寧に説明がなされた。「安全とは，先人の失敗や悲しい経験への対応をしてきた努力や工夫の歴史的集積の成果として維持されている特殊な状態であって，その努力が失われあるいは手抜きをするときには，いつでもどこでも危険が吹き出してくることが忘れられている」との先人の教えは，技術者にとって肝に銘じる格言であった。

また，杉本隆男氏（㈱日建設計シビル上席調査役）より，「都市土木工事に伴う地盤災害のトラブルシューター」と題した講演があった。地盤情報データベースを背景に，東京都のインフラ整備のなかで発生した地盤トラブルの原因と対策について検討した経験（トラブル・シューターの経験）について紹介があった。その多くは「雨」が誘因（地盤災害の引き金）となっており，地形・地質・地下水・土質といった素因そのものの性質が大きく係わっていることが示された。トラブルサム地盤に関する体系的な説明であり，有益な内容であった。

3. おわりに

本講演会は，関西エリアだけではなく東京をはじめとする他地域でのトラブル事例に関する情報を入手することができる企画であり，また近接トンネル施工による影響をモデル試験や解析からアプローチする手法について聴講できるなど，大変有意義な講演内容であった。また，80人余の方々にご参加いただけましたこと，この場をお借りして御礼申し上げます。

（原稿受理 2012.1.10）



写真—1 各講演者による講演状況（左より中井教授，深沢氏，杉本氏）

１．はじめに

1.1　研究の背景

関西地域においては，低平地平野部の軟弱地盤や上流部の礫地盤での地下建設工事が難しく，今までに多くのトラブルを経験してきている．このような傾向は，関西だけではなく，名古屋や東京などの低平地にできた大都市や，中国上海や台湾の沿岸部の都市，オランダやイギリスなど類似した土質特性を有する都市においても共通の話題である．

一方，日本では，近年建設投資の減少により，大規模工事や難工事の計画，設計，施工をおこなう機会が少なくなっているため，技術力の維持および伝承が課題となっている．また海外でも，国際地盤工学会や各国で地盤に関しての建設工事のリスクマネージメントに関する委員会や研究の取り組み最近増えてきており，以下に中国とオランダの活動の一端を示す．

(1) 上海土木学会では，2009 年に中国での地下工事の事故事例を収集して出版した．

(2) オランダでは，地盤災害に起因する損失が大きいため，2009 年に Geo Impulse という研究を産官学で立ち上げ，2015 には災害を半減させるべく活動を始めている．

1.2　トラブル発生に関する地理・地盤および社会的要因

大阪などの大都市の多くは，河口の低平地に発達してきた．そのため，地下建設工事に際しては，地盤が軟弱で地下水位が高いことにより，工事の難易度が高い．また都市部では地下利用が進んでおり，近接工事やより大深度の更に難しい条件下での地下工事が増えている．

一方，大阪平野の低平地から離れた近郊の阪神間，京都，滋賀などでは，上下水道，電力，ガス，通信など縦断延長の長いインフラ構造物の築造時においては，岩盤，礫，砂，粘土など地質変化が激しい．特に，シールド工法での施工が難しい大礫地盤が存在する．

このような軟弱地盤を有する類似都市としては，名古屋，東京，上海などの中国や台湾，ベトナムなどアジアの沿岸部の都市，オランダ，ロンドンなどがあり，アジアの都市ではインフラ整備が急激に進められており，難工事が増えてきている．

1.3　研究の目的と意義

日本では，近年建設投資の減少により大規模工事や難工事の計画，設計，施工をする機会が少なくなっているため，地下建設のトラブル対策を含め技術力の維持伝承が課題である．また，この分野の経験豊富な技術者が，定年を迎え急激に退職する時期が来ており，若手技術者への技術伝承が急務である．

またこのような研究は，地下建設工事の減災や今後に建設が増加するとみられる大深度地下対応技術にも寄与する．さらには，トラブルサム地盤での貴重かつ豊富な経験に基づいて，建設工事が盛んなアジアを始め世界に情報を発信して，海外プロジェクトへの参画につながる事が期待される．

以上のことから，トラブル事例を収集・分析し，原因や対策及びトラブルサム地盤自体の研究をおこない，若手技術者に対して経験に基づいた研究成果を技術伝承することは重要である．

1.4 研究の進め方

本委員会では，多くのトラブルサム地盤のなかでも特に均一細砂と大礫地盤に着目し，その堆積環境などの地質的および物性などの土質的アプローチから研究するとともに，トラブル事例を収集して因果関係や有効な対策について研究する．

なお本委員会では，発注者，建設会社，コンサルタント，大学･研究機関などから，また若手から熟年の経験者まで，出来るだけ多く方が委員会に参加頂き，研究をおこなう．

また，トラブル事例を広く収集・分析するため，委員は関西圏以外の東京や名古屋，さらには海外からも参加を募った．

1.5 地下建設工事でのトラブルサム地盤の分類とトラブルの種類

トラブルサム地盤としては，細砂層，大礫，クラッキー粘土，鋭敏粘土，木片など異物混入地盤及び Mixed face 地盤(切羽に硬い地盤と軟らかい地盤が混在する場合を言う)が挙げられる．トラブルサム地盤と開削やシールド等の工種とトラブルの種類との関係を**表 1.1** に示す．

これらのトラブルサム地盤の中でも，均等係数の小さい細砂地盤と大礫地盤では，シールドや開削などの地下工事におけるトラブルが発生しやすい．この種の細砂地盤は，小さい水頭差で流動化しやすいため，開削工事の掘削底盤，遮水性土留め壁の小さい欠損部，またはシールドの排土口からのパイピングを伴う出水トラブルがたまに発生する．また，泥水シールドの切羽やトレンチ壁の不安定性に伴う崩壊や，シールド機やボーリンクマシーンの胴締め現象，山岳トンネルでの切羽崩壊などのトラブルも生じやすい．細砂の中でも特に粒径の小さい微細砂は，透水係数が $k=1\times10^{-4}$cm/sec 程度と小さいため，地下水低下工法や薬液注入工法が効果的でないこともトラブルの発生を加速させている．

大礫地盤では，①土留め壁や杭が品質良く打設出来ない，②高圧噴射攪拌地盤改良(ジェットグラウトパイル)の品質が悪い，③透水係数が大きいため薬液地盤改良の効果が悪い，④礫径が大きいためシールドの排土が困難なことによる出水やシールドカッターなどの破損が大きい，などのトラブルが発生しやすい．

また，透水係数が大きい礫地盤層上部に細砂層が堆積している地盤で異常出水した場合，大量出水と共に上部の細砂が流され，地中に空洞が生じて陥没が発生し，重大事故につながる場合がある．

細砂層が厚く堆積している場合も，トラブルを加速させる場合がある．トンネルなどの地中構造物周辺地盤がパイピングにより液状化すると，上海での事例に示すように構造物の地盤反力が減少して構造物が破壊したり，破損した構造物の比重がボイリングした砂の単位体積重量より大きいため，構造物が沈下したりする場合がある．

表 1.1　トラブルサム地盤と工種とトラブルの種類の関係

		細砂	大礫	クラッキー粘土	鋭敏粘土	異物混入地盤	Mixed face
開削工事		パイピング 孔壁崩壊	地中壁 品質不良	背面地盤の滑り 孔壁崩壊	大変形	壁の止水不良	根入不足
シールド工事		パイピング マシン胴締め 姿勢制御困難	切羽崩壊 カッターの破損	切羽閉塞	地盤撹乱 後続沈下 姿勢制御困難	切羽や排土管 の閉塞	切羽崩壊 磨耗，振動
山岳トンネル工法		切羽崩壊	湧水	切羽崩壊	－		
地盤改良	ジェットグラウト(JGP)	改良不良部から パイピング	改良不良	－		改良不良	改良不良
	薬液注入	浸透注入困難	注入逸散		地盤撹乱		

1.6　本報告書の構成

本報告書は，大きく分けて３つの内容に分かれている．

まず，**第２章～第６章**については，地下建設工事における代表的なトラブル事例を紹介しており，そこから得られた教訓などを整理している．このうち**第２章～第５章**では，トラブル事例分科会で精力的に収集・整理した事例のうち，開削工事，シールド工事，山岳トンネル(NATM)工事，推進等工事にフォーカスして各 WG で取りまとめた結果である．代表的なトラブル事例を本文に示しているが，収集した事例の一覧表を各章末に整理している．また，それらのうち，いくつかの事例について概略を整理表にまとめており，巻末の CD-R に収納している．また**第６章**では，海外事例分科会において同様に整理した事例を本文に，事例一覧表を章末に整理している．一部の事例の概略については，巻末 CD-R に収納している整理表を参照していただきたい．

次に**第７章**では，地下建設工事のトラブルの原因の１つとなっている地盤の堆積環境や物性に着目し，地質的および土質的アプローチから分析をおこない，トラブル発生メカニズムの把握につとめている．

また**第８章**では，典型的なトラブル事例に対してリスクマネージメント状況を集中的に整理し，これらの因果関係や有効的な対策について検討することによって減災を目指した．

最後の**第９章**では，これまでの研究成果を概略表記した上で，将来に向けた提言をおこなっている．

開削工事におけるトラブルについて
—主としてパイピングについて—

トラブル事例分科会 WG3 開削グループ

概　　要

開削工事におけるトラブルを概観し，主としてパイピングの事例をその発生形態から分類した．また，大阪市内で発生した大規模なパイピングの事例を２つ挙げ，その発生機構や地質的な類似性を示した．

キーワード：開削工事，地下水，パイピング

2.1　はじめに

開削工事におけるトラブルには，砂質土におけるボイリングやパイピング，粘性土におけるヒービングを始めとして，土留め壁の変形，被圧地下水圧による盤膨れ，除荷に伴うリバウンドなどがある．また，土留め壁の施工時のトラブルとして，連続地中壁掘削時の溝壁崩壊，柱列式土留め壁の孔曲がり，噴射撹拌混合による地盤改良時の改良不良などもよくあるトラブルである．いずれも計画，設計，施工の各段階で検討し，対処すべき事柄であるが，中には埋没井戸からのパイピングなど，予測が困難なトラブルもある．開削工事におけるトラブルの事例を**表 2.1** に示す．

表 2.1　開削工事におけるトラブルの一般的な事例

現象	トラブルの事例(想定を含む)
ボイリング	・土留め壁の根入れ長不足 ・土留め壁施工時の地盤の緩み ・遮水層の不連続性
パイピング	・ボーリング孔の跡埋め不良 ・古井戸の存在 ・土留め壁施工時の地盤の緩み ・連壁の継手不良 ・シートパイルの継手噛合せ不良 ・土留め壁変形量の不連続性 ・中間杭の止水不良 ・遮水層の不連続性 ・薬液注入の不均一性 ・ソイルセメントの硬化不良 ・噴射撹拌混合体の形成不良 ・凍結工法の凍土形成の不均一性
ヒービング	・土留め壁の根入れ長不足 ・掘削底盤の膨潤による強度低下 ・薄層地盤の評価不足
土留めの変形	・想定を超える変形 ・出隅部分の変形 ・高鋭敏粘土地盤
盤膨れ	・地下水位の低下不足 ・被圧滞水層の遮断不良 ・掘削底盤と土留め壁の付着不足(摩擦力を期待する場合)
リバウンド	・地盤や構造物の想定量を超える隆起 ・地盤の変形係数の想定外れ

2.2　トラブルの事例

本研究会で収集した開削工事におけるトラブルの事例を**表 2.2** に示す．

表 2.2　収集したトラブル事例(開削)

トラブル	内容	CODE
跡埋め不良	矢板の撤去時期を埋戻し後としたため，締固めが不十分で路面が最大 10cm 沈下した．	開削−1
凍結不良	凍結工法で掘削中出水し，橋台が最大 250mm 移動した．	開削−2
強度不足	鋭敏粘土地盤を生石灰で改良したが，施工時の乱れの影響で強度増加は僅かであった．	開削−3
連壁崩壊	立坑連壁の Ma12 層部で潜在クラックにより奥行き 90cm の肌落ちが発生した．	開削−4
リバウンド	立坑で洪積粘土層の応力解放による潜在クラックの目開きとリバウンドにより 101mm 隆起した．	開削−5
リバウンド	地下鉄函体直上を開削したため，リバウンドにより函体が 5.8mm 隆起した．	開削−6
パイピング	地下連続壁による遮水工法で掘削中連壁の継手から水と土砂(550m^3)が流入し国道を最大 1.46m 沈下させた．	開削−7
パイピング	盤膨れ対策で分割掘削中，ブロック境界部の泥水固化壁の継手部から出水し，地盤を最大 25cm 沈下させた．土砂流入量は 30m^3．	開削−8
パイピング	路下の作業床から連壁のガイドウォール施工中パイピングにより側壁が崩壊した．	開削−9
パイピング	土質調査で残置した鋼管を抜こうとして地下水が噴出した	開削−10
パイピング	鋼矢板土留めの掘削底盤を 3m 改良したが，その下部が掘削側に変形した結果改良部と鋼矢板に隙間ができてパイピングが生じた．	開削−11
パイピング	掘削部で土留め壁からの土砂の流出により水道管が損傷し，噴出した水で大量の土砂が吸い出され，歩道が 10m 四方陥没した．	開削−12
パイピング	玉石を除去して柱列杭を打設したが，埋戻し地盤中で杭芯がぶれて遮水機能が得られず流砂や出水が生じた．	開削−13

この表から，今回収集したトラブル事例の多くが「パイピング」と呼べることが分る．ただし，ボイリング以外の出水をパイピングとしていることから，ここではパイピングは出水とほぼ同義である．パイピングはその発生場所から分類すると，①土，②改良体，③土留め壁，④土と物との境界部，に分けられそうである[1)]．①の土中のパイピングの例として埋没井戸やボーリング孔の例を**図 2.1** に，②の改良体のパイピングの例として止水目的で行った底版改良において大礫などにより十分な改良体が造成されなかった例を**図 2.2** に，③の土留め壁に未固結の挟雑物が残ってパイピングを生じた例を**図 2.3** に，④の土留め壁に沿ったパイピングの例を**図 2.4** に示す．なお，地盤そのものに生じた浸透流によりパイピングが生じると，全体的な破壊につながる場合があるが，今回収集した事例にはそのような事例はなかった．

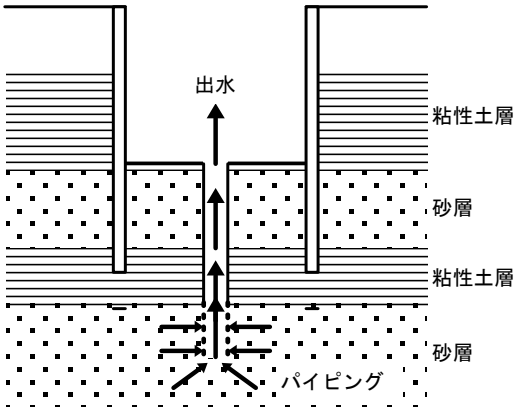
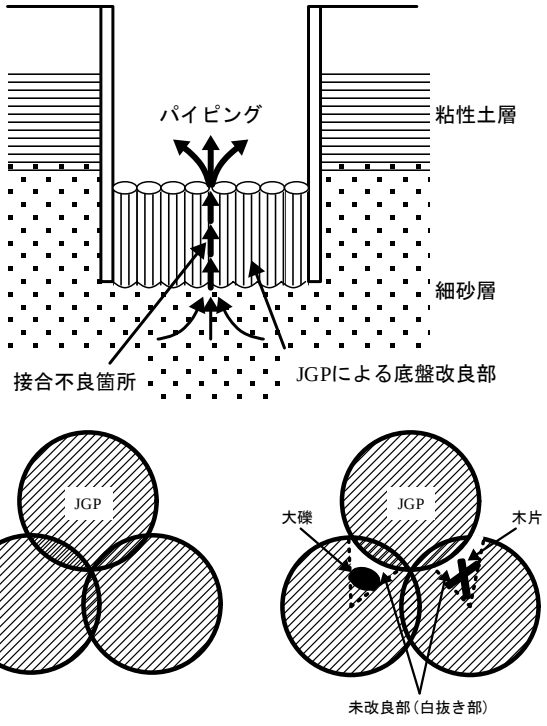


図 2.1　土中のパイピング



(a)正常な場合　　(b)未改良部がある場合

図 2.2　改良体のパイピング

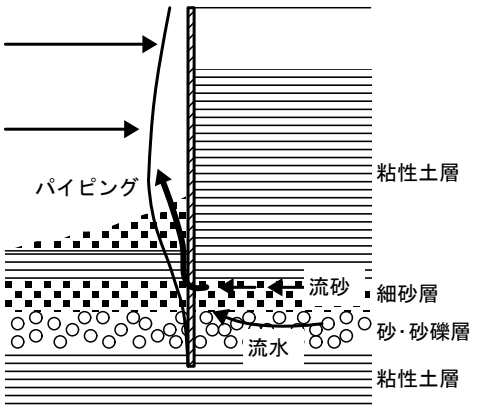


図 2.3　土留め壁のパイピング

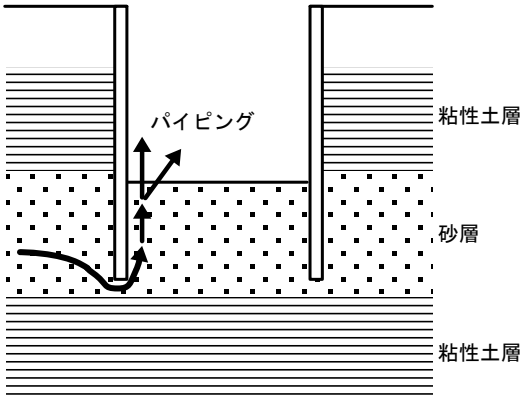


図 2.4　土留め壁に沿ったパイピング

2.3　代表的なトラブル事例(パイピング)

ここでは先に挙げたトラブル事例の中から土留め壁に発生したパイピングの事例を詳しく紹介する．

2.3.1　事例 1：片福連絡線連続土留め壁異常出水事故

1）掘削規模

本工事は，開削延長 365m にわたる駅部開削工事の北端部 80m 区間の工事であり，シールドトンネル工事の発進基地となる，地下 4 層の駅を構築するため，掘削幅は 16.5m～22.5m，掘削床付面は一般部で GL-24.1m，シールド発進用立坑部で GL-26.9m と深くなっている．

2）土留め壁諸元

上部洪積砂礫層を遮水する連続土留め壁として泥水固化壁工法を採用している．本工区では，ベントナイト泥水を安定液(比重約 1.10)として用い，利根式 BW ロングウォールドリルにより，幅 70cm，長さ 1.9m～3.4m のトレンチを GL-38m まで掘削した．掘削完了後，新たに配合した固化用泥水(比重約 1.27)で安定液を置換した後，H 鋼(506mm×201mm, L＝31m)を 48cm ピッチで建て込みエレメントを構築した．また，安定液中に先に H 鋼を建て込み，その後，安定液を固化用泥水で置換して構築したエレメントもある．

3) 地盤構成および地盤特性

GL-50m 付近までの地質層序は，工事着手前の地質調査によれば，**図 2.5** に示すように地表から順に表土，上部沖積砂層（A s1 層），沖積粘土層（A c1 層，A c2 層），下部沖積砂層（A s2 層），上部洪積砂礫層（U g1 層），上部洪積粘土層（U c2 層）および下部洪積砂礫層（U g2 層）であった．表土は層厚 2m 程度であり，上部沖積砂層（A s1 層）は層厚約 6m，N 値が 20 以下の滞水層である．GL-8m 付近から GL-28m 付近の位置にある沖積粘土層は，粘土，シルト質粘土等からなり，N 値は上部（A c1 層）で 0～5 程度と軟弱で，下部（A c2 層）で 5～10 程度と大きくなっている．次の下部沖積砂層（A s2 層）とその上部の沖積粘土層（A c2 層）が，複雑な堆積環境からなる流動性の高い砂を含む被圧滞水層である．その下の上部洪積砂礫層（U g1 層）は GL-28m 付近から GL-36m 付近の位置にあり，N 値は 50 以上とよく締まっているが，0.25N/mm^2 以上の高い被圧地下水を有している．GL-36m 付近から GL-43m 付近の位置にある上部洪積粘土層（U c2 層）は，粘土，砂混じり粘土等からなり，N 値は 10 前後と硬質である．下部洪積砂礫層（Ug2 層）は，GL-43m 付近より以深にあり，N 値は 60 以上とごく締まっているが，この層も 0.4N/mm^2 以上の被圧地下水を有している．

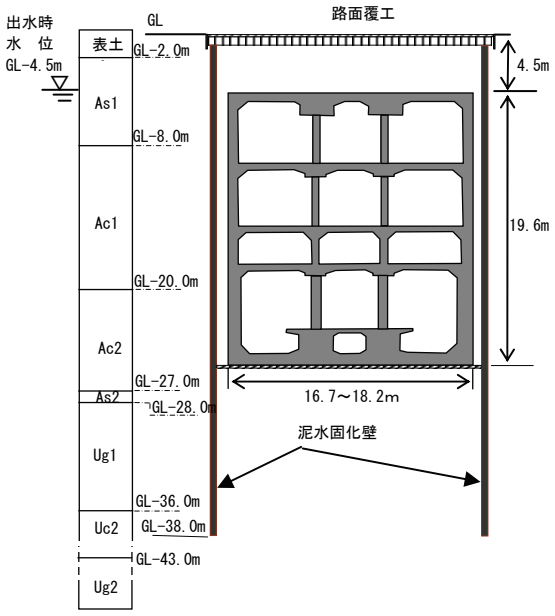


図 2.5　構築断面図

4) 施工状況

本工区の開削工事は，掘削底面が GL-24.1m～-26.9m と深いため，下部洪積砂礫層（Ug2 層）の 0.4N/mm^2 程度の高い被圧地下水圧により，この層の上にある上部洪積粘土層（Uc2 層）の盤膨れ対策として，分割掘削とグラウンドアンカーを組合せた工法を採用している．

この工法では，GL-16.6m までの通常の掘削を行った後，それ以深では，延長 80m の工区を 1 ブロック～4 ブロックに 4 分割し，1 ブロックと 3 ブロックにグランドアンカーを打設後，下部洪積砂礫層（Ug2 層）の被圧地下水圧に抵抗できるだけの残土荷重を 2 ブロックと 4 ブロックに残した状態のまま，1 ブロックと 3 ブロックを掘削底面まで掘削し，構築の一部である下床版を施工した後に，下部洪積砂礫層（Ug2 層）に定着したグラウンドアンカーを緊張してこの下床版に締結する．その後，盤膨れに抵抗する力をグラウンドアンカーで補いながら 2 ブロックと 4 ブロックを掘削底面まで掘り進む．

掘削工事は，上部沖積粘土層（Ac1 層）を生石灰杭により地盤改良した後，GL-16.6m までの掘削を終え，ブロック境界に鋼矢板による仕切土留工を行った後，分割掘削段階に入っていた．1 ブロックと 3 ブロックでは，GL-18.9m までの掘削を完了し，さらに 3 ブロックでは，それ以深の掘削が進められ，GL-21.4m 付近に達し，2 ブロックとの掘削段差は 4.8m となっていた（**図 2.6** 参照）．

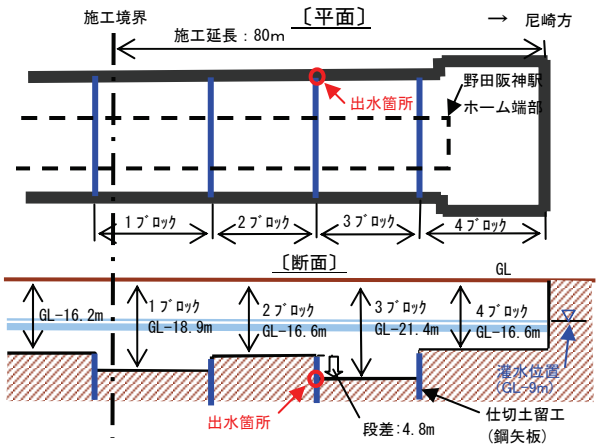


図2.6　トラブル発生時の平面図・縦断図

5) トラブルの状況

・出水の概要と緊急対策措置

3 ブロック内の GL-21.4m 付近を掘削中，南西の 2 ブロックとの境界と土留壁との隅角部下方から黒っぽいヘドロ状の湧水があり，掘削土の埋戻しにより止水を試みたが，次第に出水量が増大し，細砂を含む黄色みがかったものとなって止水できない状態となった．そのため，切梁と腹起しを利用して角型鋼管や単管を用いて出水部分を取り囲み，土のうや袋入りセメントを投入して止水作業が続けられた．

一方地上では，国道 2 号北行き車線西側の歩道およびこれに近接する一部の家屋において地盤沈下による影響が現れた．直ちに交通の安全を確保するとともに，坑外から止水対策作業を行うため，北行き 2 車線の内 1 車線を通行止めのうえ占用し，また歩道を迂回させる措置が取られた．

この作業と並行して，止水と地盤沈下の拡大防止のため薬液注入用設備および生コンクリートを地中に投入するための削孔機械の準備が進められた．

また，坑内外の水位差を減少させ流入する水の勢いを抑えるため，坑外の下部洪積砂礫層（Ug2 層）に設置されている隣接工区の揚水井から坑内へ毎分 5～6m^3 の注水作業が行われた．

・止水対策工

まず歩道部約30mの範囲において，上部沖積粘土層（Ac1層）（GL-12m～-15m付近），下部沖積砂層（As2層）および上部洪積砂礫層（Ug1層）（GL-27m～-30m付近）に水ガラス系注入材による薬液注入が実施された（一次注入）．

引き続き，出水箇所直近の泥水固化壁の背面にオールケーシング削孔機により削孔（直径 65cm）し，上部洪積砂礫層（Ug1層）の上部（約GL-29m）まで生コンクリートが投入された．大口径ボーリングは，3本実施したが1本目の生コン投入により出水量は急激に減少した．また，生コンクリート投入作業と並行して，周辺地盤沈下抑止を目的として歩道部約30mの範囲において，GL-13m付近の上部沖積粘土層（Ac1 層）に斜め削孔による水ガラス系薬液注入が実施された（二次注入）．

さらに，止水に万全を期するため，作業に支障する下水道等の地下埋設管の処理が完了した後，出水箇所を中心に南北約10m，東西約3.7mの範囲で，下部沖積粘土層（Ac2層），下部沖積砂層（As2層）および上部洪積砂礫層（Ug1層）を対象として溶液型の薬液注入が施工された（三次注入）．

坑内への地下水の流入量は出水発生当初1m^3/min程度であったが，最大9m^3/minに及んだものと推定された．出水がほぼ止まるまでの地下水の累計流入量は約20,000 m^{3}で，坑内への注水と合わせて約GL-9mまで湛水した．また，土砂の累計流入量は約350m^{3}に及んだものと推定された．

周辺地盤の沈下は，出水箇所背面の地表近くにある埋設管位置で局部的に最大約25cmであった．

また，周辺建物への影響調査が実施され，出水箇所から西側約80m，南北約100mの範囲の34戸の家屋の応急補修が行われた．

6）トラブルの原因

出水の原因を解明するにあたっては，周辺地盤状態，地下水の状況，固化壁の施工状況を検討するとともに，坑内排水が完了した現地において，出水部と想定された固化壁のエレメントジョイントの状況，坑外から止水のために投入したコンクリートの固化壁への付着状況，坑内に流入した土砂等を確認した結果，出水の原因として次のような事項が抽出された．

・出水箇所

泥水固化壁のNo.11，No.12エレメントのジョイント付近であると判断される（**図2.7**参照）．

・出水経路

出水源となった地層は，被圧地下水を有する下部沖積層（Ac2 層，As2 層）および上部洪積砂礫層（Ug1 層）であり，これらの層の被圧地下水が土留壁の外側に沿って上昇して，下部沖積層にある土留壁の弱点を通り坑内に出水し，土砂を伴って掘削坑内へ噴出したものと推定される．

・出水原因

①周辺の地盤状況

本地域の地盤は，上部洪積砂礫層（Ug1 層）の上盤が低く，下部沖積層（Ac2層，As2層）が周辺部に比べて厚く堆積する旧谷部にあたり，Ac2層下部とAs2層が複雑な堆積環境からなる流動性の高い砂を含む被圧滞水層である．これらの地質条件は，掘削に伴う固化壁の変形を助長し，地下水流が生じるとパイピングを起こしやすいものであった．

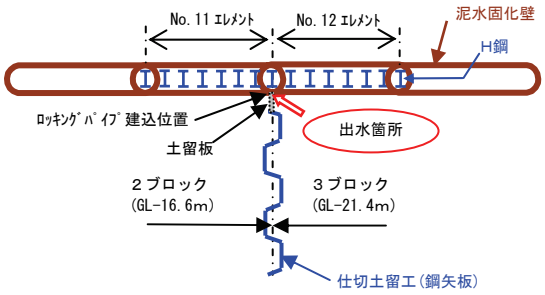


図2.7　出水箇所詳細図

②分割掘削の境界とエレメントジョイントの一致

分割掘削により生じる坑内受働抵抗力の差により，分割掘削のブロック間で土留壁の変形量に差が生じると推定される．この境界部とNo.11，No.12エレメントのジョイントが一致したため，出水の誘因となった可能性がある．

③固化壁の施工状況

No.11, No.12エレメントのジョイントにおけるマッドケーキの除去とスライムの処理が十分でなかったため，弱点が生じたものと推定される．

これらの要因が複合することにより，固化壁ジョイントに生じた弱点が，掘削に伴い生じた坑内外の地下水位差による水圧に抵抗できない状態となり，出水につながったものと推察される．

2.3.2　事例2：掘削による事故例（ビル工事）

1）掘削規模（工事概要と施工状況）

大阪駅前市街地改造事業の一環として計画された駅前第2棟は，最高高さ70m，軒高56m，延床面積10万m^{2}を超える大規模ビル工事である．昭和49年4月，逆打ち工法にて地上と地下とを同時に建設を開始した．その際，基礎工事のため地下連続壁による遮水工法を採用した．具体的には，建物敷地の四辺を厚さ70cmのコンクリート連続土留め壁で囲み，その連続壁は天満砂礫層の下端にある粘土層（地下39m）まで根入れして周囲の水を遮断し，工事範囲内の地下水を汲み上げることとした．

2）トラブルの状況と緊急対策措置

昭和50年9月，地下の掘削は地下4階部分のGL-20～23m付近まで進み，掘削完了（GL-23～25m）まであとわずかのところで，連壁の継手部に接する掘削地盤面から土留め壁内部に漏水が始まった．直ちに止水対策が講じられたが，水とともに土砂が流入し，周辺の地表面が沈下し始めた．沈下の影響範囲は，建物の南側およそ30×40mに及び，これに伴って16棟（29世帯）の家屋に傾斜等の被害が発生した．また，隣接する国道2号の陥没は，最大1.46mに達した．推定によれば，建物内への累計流入水量は約30,000m^3，流入土砂量は約550m^{3}であった．

3) トラブルの原因

土留め壁内に流入した水は，梅田粘土層の下にある透水層の被圧地下水と想定された(**図2.8**参照)．この被圧地下水が連壁の継手欠損箇所から浸透し，一旦水みちができたあとは，100数十kN/m^{2}という水圧によって急速にその水量を増し，水みちがさらに拡大していった．同時に，建物外側の透水層にパイピングを生じ，その結果，大量の出水と土砂の流入をみるに至ったものと推論された．

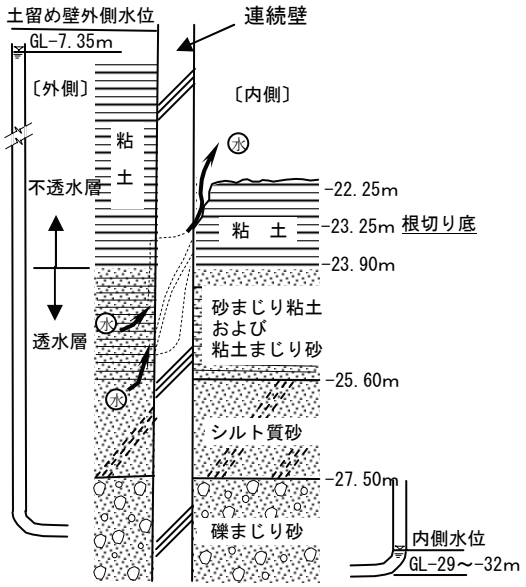


図2.8　連続壁と水みち

事故調査委員会の報告書では，「コンクリート連続」土留め壁の地下23m付近の継手部にスライムがこびりついていたため，コンクリートが付着せず隙間ができており，土留め壁内部の掘削に伴い，地下23.9m以下にある砂礫層内の被圧水が集中噴き出したものであり」「連続土留め壁工法は最新最高の工法であっても，継手部については完全な信頼性の保障は難しく，基礎地盤の掘削時に土留め壁の仕上り状況を可能な限り慎重に点検して不良な箇所の発見に努め，多少でも不安があれば入念に手当てする等，細心の注意を払うべきである」と指摘している．

また，支部創立20周年の座談会においては，①土留め壁の外側で揚水して水圧を下げれば，十分安全に床付け出来たのではないか，②無害な薬剤を注入して連壁の内側と外側に水みちがないか確認してから作業を行うべきではなかったのか，といった反省点が挙がった．

2.4　おわりに

開削のトラブル事例を調査したが，その多くはパイピングにより地表面の沈下や開削部の水没に至ったものであった．詳しく挙げた 2 例は，発生機構も地質的な条件も類似している．またこれまでに出版された図書に紹介されている多くのトラブル事例にも，共通項が多い．**表 2.1** に挙げた開削工事におけるトラブルの事例を類型化して**表 2.3** に示す．

表 2.3　開削工事のトラブルの類型化

	現象	問題の所在	検討方法
Ⅰ	ボイリング ヒービング 盤ぶくれ	安定問題	判定式
Ⅱ	土留めの変形 リバウンド	変形問題	予測式
Ⅲ	パイピング	異物の介在	(個々に対処)

表 2.3 から，安定問題や変形問題はすでに多くの事例や研究によって判定式や予測式が提案されており，事前に十分な検討が可能であることが分る．これに対してパイピングはそもそも地中や土留め壁への異物の介在が主な原因であり，これに対して施工上どのような点に留意するのかが課題であるため，個々に対処されてきた．止水壁の材料には，凍土，薬液注入による改良地盤，コンクリート壁，泥水固化壁，高圧噴射攪拌工法による改良地盤などと多種のものがあり，地中や土留めの異物にも礫，埋もれ木，古井戸，掘削した粘土塊など多くの原因がある．従って止水性の土留め壁の施工に当っては，パイピングのリスクを下げることを常に心がけ，仮にトラブルが発生した場合にはその事例を蓄積してゆく必要がある．

参考文献

1) 橋本正，誉田孝宏：技術の伝承―現場の教訓から学ぶ―地下建設工事のトラブル，地盤工学会誌，Vol.60，No.2，pp.65-66，2012.

【トラブル事例一覧表(開削編　その１)】

CODE No.	発生年月日	発生した現象	発生地域	発生深度および地盤情報	トラブルの概要	キーワード
開削-1	2008年9月	国道の舗装版沈下	京都市伏見区	掘削底＋2m10cm	掘削底から90cmまで埋め戻した時点で鋼矢板を引抜くべきところを，2m10cmまで埋め戻してから引抜いたため，路面の沈下が生じた。	埋戻し
開削-2	1968年9月	凍結工法の事故例	今里大橋下		冷凍機の早期停止に伴う凍土の融解により，西側立坑からの漏水が増加し，河底が陥没，大量の河水が坑道に流入した。	トンネル工法，凍結工法
開削-3	1986年12月	土留め壁の著大変位	大阪市内	OP-2～-12m (沖積粘土)	鋭敏比が非常に高い沖積粘土を開削し，直接基礎構造物を構築する工事に際に，構造物の沈下，土留め壁の過大変形，，トラフィカビリティが問題となると予想された。鋼矢板土留め壁の変位が，3 次，4 次掘削後に計算値を大きく上回る120～150mmの過大な変位が生じた。	土留め壁，変形
開削-4	1993年4月	連続地中壁掘削時に発生した孔壁の崩壊	大阪府守口市 (鶴見緑地公園内)	GL-34～37m，GL-53～60m(洪積粘性土)	連続地中壁の掘削中に潜在クラックを内包する洪積粘性土層で孔壁崩壊が発生した。	土留め壁
開削-5	1996年7月	大深度掘削に伴うリバウンド	大阪市住之江区南港北	GL-45m (洪積粘性土)	発進，到達立坑の掘削完了後にもリバウンドが継続した。底版コンクリートを打設後，リバウンドが収束した。	リバウンド
開削-6	2006年10月～2010年4月	想定以上のリバウンド	神戸市長田区神楽町付近	GL-8m付近	掘削に伴う地盤リバウンドが予測値より大きくなった。	リバウンド
開削-7	1975年9月	地下工事異常出水	大阪市北区梅田1丁目 JR大阪駅前	GL-20～23m付近 (粘土混じり砂層)	連続地中壁(RC連壁：70cm厚)の継手部付近から土砂を伴う漏水が発生し，背面地表面が陥没した。	連続地中壁，継手，細砂
開削-8	1992年4月	連続地中壁異常出水	大阪市福島区海老江	GL-25m付近 (沖積砂～砂礫層)	地下連続壁ジョイント部から土砂を伴う異常出水により，背面地表面が沈下した。	連続地中壁，継手，細砂

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	関連資料
鋼矢板を引抜くタイミングの誤りによる転圧不足。	車線を通行規制し，路盤と舗装の再工事を行った。	ケンプラッツ2008/10/01配信記事
事故を報じた当日の新聞によれば，①凍結パイプの1本が何らかのショックで折れて中の冷却液が流れ出し，冷却機能が停止した，②浸水が始まると凍土が融けだし，トンネル上方の河底に穴があいた。	現場両側に水中コンクリートで隔壁を打設し，河川水の流入箇所にはコンクリートを流し込み，付近の構築周辺には薬液を注入して，止水した。圧気工法により排水，構築を行った。	大阪市交通局：大阪市地下鉄建設五十年史，pp.377-383，1983. 柴田徹：関西における地盤問題の中から，地盤工学会，土と基礎，Vol.36，No.11，Ser.No.370，pp.3-8，1988.
過大変位の原因がはっきりしないが，グラウンドアンカーの施工時に一次注入のセメントペーストが自由長部の鋼線に付着し自由度が低下したことにより，理論上の伸びが生じていなかった。その後，土圧の上昇によりセメントペーストと鋼線との付着が切れ，鋼線の伸びを生じ，土留め壁の変位につながった。受働側地盤のクリープにより，土留め壁の変位につながった。	3次掘削後，土留め壁の変位の進行が止まらなかったため背面の工事用道路を約1.5m すき取り， 3段アンカーを直ちに打設し定着させた。受働側地盤のクリープにより変位は増大したものの，部分掘削により床付けし，直ちに基礎コンクリートを打設した。その後に隣のブロックを掘削し，順次施工していったので，変位は収束した。	清水建設(株)：土木クォータリーNo.81号,pp.37-53,1988.12.
洪積粘性土層は潜在クラックを内包するといわれていた。	応急措置：1)掘削一時中断，2)安定液を比重1.10，粘性25 秒から，比重1.12，粘性30 秒に変更，3)泥水がクラックに浸透するのを防ぐ坑内保護被膜形成剤を添加，4)肌落ち部の安定確認後砂礫層(GL-42m)まで埋め戻し，肌落ち箇所を泥水固化，5)安定液比重1.15，粘性35 秒に変更。その後の対策：1)最終比重は1.18 以上に変更，2)鉄筋籠に張り付けるシートを薄鉄板で補強，コンクリートが後行エレメント側へ漏れないように対策，3)泥水比重対策として泥水のベントナイトが鉄筋に付着するのを避けるため，継手部の洗浄は継手洗浄機を使用。	清水建設(株)：土木クォータリーNo.108号,pp.38-50,1995.9.
ディープウェルからの揚水量の増加はなく，盤ぶくれの兆候は見られないこと，また大深度の円形立坑で十分な連壁根入れがあり，ヒービングの可能性が無いことから，リバウンドと潜在クラックを有する洪積粘土層の応力解放によるものと考えられる。	発進立坑の例を参考にし基礎砕石分も含めて均しコンクリートを打設したことにより落ちつき，短期間で底版構築も行った。	清水建設(株)：土木クォータリーNo.129号,pp.28-55,2001.2.
—	リバウンド対策としては，①施工基盤面の盤下げ②土留め壁締切り内部の地下水位低下を基本方針とした。掘削が進むにつれて，地下鉄函体の隆起量が予測値よりも大きくなったため，地下水位低下量を計画水位より早期に低下させ，地下鉄函体の隆起を抑制した。さらに，追加対策として，③部分掘削・部分構築の実施④上載荷重（大型土嚢，敷鉄板）の部分載荷を行った。	阪神高速道路（株）：神戸山手線（南伸部）建設工事誌，pp.45-51,2013.3.
梅田粘土層の下にある透水層の被圧地下水が連壁の継手欠損箇所から浸透し，一旦水みちができたあとは，百数十kN/㎡という水圧によって急速にその水量を増し，水みちがさらに拡大していった。同時に，建物外側の透水層にパイピングを生じた結果，大量の出水と土砂の流入に至ったものと推論された。コンクリート連続土留め壁の地下23m 付近の継手部にスライムがこびりついていたため，コンクリートが付着せず隙間ができており，土留め壁内部の掘削に伴い，地下23.9m 以下にある砂礫層内の被圧水が集中噴き出した。	土嚢，砂礫等を投入し，ポンプ車により注水した。周辺10箇所に水ガラス系薬液を注入したが止水できず，直径216mmの鋼管で連壁継手沿いに削孔し，コンクリートを投入して止水できた。壁の外側に鋼製ケーシング付きコンクリート柱を７本，半円形に配置してその間に薬液注入して遮水壁とした。	大阪市都市整備局：大阪駅前市街地改造事業誌，pp.159-164，1985. 柴田徹：関西における地盤問題の中から，地盤工学会，土と基礎，Vol.36，No.11，Ser.No.370，pp.3-8，1988.
①周辺の地盤状況（上部洪積砂礫層の上盤が低く，下部沖積層（A c2層，A s2層）が周辺部に比べて厚く堆積する旧谷部にあたり，A c2層下部とA s2層が複雑な堆積環境からなる流動性の高い砂を含む被圧滞水層である。この地質が，掘削に伴う固化壁の変形を助長し，地下水流が生じるとパイピングを起こしやすいものであった。）②分割掘削の境界とエレメントジョイントの一致（分割掘削により分割掘削のブロック間で土留壁の変形量に差が生じ，この境界部とエレメントのジョイントが一致した。）③固化壁の施工状況（エレメントのジョイントにおけるマッドケーキの除去とスライムの処理が十分でなかった。）これらの要因が複合することにより，固化壁ジョイントに生じた弱点が，掘削に伴い生じた坑内外の地下水位差による水圧に抵抗できない状態となり，出水につながったものと推察される。	（１）本格排水を実施するにあたり，固化壁のエレメントジョイントの安全対策として坑外から薬液注入あるいはコラムジェットによる補強工を実施した。坑外からの補強工に併せて坑内地盤の薬液注入による補強並びに切梁等の補強を行った。（２）既掘削以深の掘削にあたっては，本格排水のために実施した固化壁ジョイント部の坑外からの補強を活用するとともに，盤ぶくれ対策として，分割掘削の境界をなくすために地下水低下工法を用いた全断面掘削工法を採用し，切梁の補強等を実施しながら，所定の掘削深さまで施工を行った。	

【トラブル事例一覧表(開削編　その２)】

CODE No.	発生年月日	発生した現象	発生地域	発生深度および地盤情報	トラブルの概要	キーワード
開削-9	1974年3月	立坑路下室から異常出水	大阪市北区同心町	GL-12.0m (砂層～砂礫)	立坑の構築を路下連続壁で計画し，路下室の掘削を完了させ引き続き路下連続壁の前工程であるガイドウォールの掘削途上で大規模な出水に見舞われ，路下作業室を水没させた。	パイピング
開削-10	1982年2月	立坑掘削中ボーリング孔から異常出水	大阪市西淀川区	GL-19.0m (粘土～砂)	土質調査のボーリング孔の未処理のまま立坑の掘削を行ったため，被圧された地下水がボーリング孔から吹き上げ立坑を水没させた。	ボーリング孔未処理
開削-11	1986年5月	立坑シートパイル内側から異常出水	京都市南区	GL-16.0m掘削深度 (砂)	底盤の地盤改良を補助とした，シートパイル土留で床付け付近を掘削していたところ，シートパイルに沿ってパイピング現象が現われ，徐々にその現象が拡大し，最終的には概ね立坑全周からパイピングが発生したため立坑を水没させた。	パイピング，地盤改良範囲
開削-12	2004年6月	陥没	福井県福井市	細砂	細砂地盤でのＣＪＧ(コラムジェットグラウト）工法がうまくいかなかったための陥没。	細砂地盤
開削-13	1973年～ 1975年	土留背面から異常出水	神戸市中央区	GL-6m，玉石混じり砂礫層	柱列杭は複列配置としたが，本体掘削時に流砂現象などが発生した。柱列杭の背面に幅1.5ｍの地盤改良を行ったが，何度も出水した。立坑を水没させ補足注入を行い掘削を続行したが，ボイリングの兆候が現われた。	柱列杭，ボイリング
開削-14	1999年9月	異常出水	東京都品川区東品川2丁目	GL-25m付近(洪積砂礫層(東京礫層))	開削隅角部(SMWとRC連壁の接続部)から土砂を伴う異常出水により背面の地上駐車場が沈下した。	土留め欠損部,止水工

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	関連資料
ガイドウォール掘削途上でパイピングが発生したのは，路下室の掘削底盤より高い位置に地下水が滞水しているためであるが，路下室掘削完了時の水位は，路下室の底盤付近に位置することを確認していたにも関わらず，パイピング現象が発生したのは北東に位置しているガイドウォールであり，その方向（源八橋方向）には大川が流れており，その伏流水(水道)が立坑内に流れ込んでいる可能性があり，その影響であると，判断した。これは，土質柱状図を見ても上部層は砂・砂礫の透水係数の大きな層であることから頷ける事象であったと考える。	① 土留工法を路下地中連続壁工法から路下鋼管柱列杭工法に変更した。② 鋼管杭の打設は，地下水を遮断した状態で施工する必要があることから，鋼管杭を打設する箇所と路下室底盤の地盤を難透水性地盤とするため地盤改良した。その後，路下式の鋼管杭を打設しこれを土留壁として本体掘削を行った。なお，本体掘削時のトラブルは鋼管矢板の閉合部から出水した。この対策は，コーキングによる止水と圧気併用により掘削を行うこととした。また，鋼管矢板の変形を抑制するため本体構造物の構築は，逆巻工法を採用した。	
土質調査のボーリングに使用した鋼管が残置されていた。後始末の不備によるものであった。	間隙水圧とバランスするまで立坑内の水位を上昇させた後，出水箇所を薬液注入で止水し更に，急結ＣＢで鋼管の周囲に充填注入を行い応急復旧を終え本体掘削を再開した。その後，鋼管を溶断しつつ掘削を行った。その過程で少量の漏水があるものの掘削を完了させた。	
底盤改良はシートパイルの内側を盤膨れが防止出来る厚みを改良範囲とし，盤厚3.0ｍとした。この根入部のシートパイルが掘削により変形し地盤改良部とシートパイルとの境界面に隙間が出来，地下水がシートパイルの先端を廻り込みパイピングとして現われたのではないかと当時判断した。	応急措置：立坑の掘削を一時中断し立坑を水没させ，地下水位をバランスさせ湧水を止めた。対応方法：シートパイルのセクションからの漏水は急結セメントでコーキングし止水したが，止水できない漏水については，立坑を水没させ土留背面から応急注入を行った。また，パイピングにより掘削の続行を断念した。パイピング状態での敷コンクリートの打設は，水中コンクリートで打設し，水中養生を行った後，排水し，パイピングを完全に止めた。 トラブル発生後の対応方法：底盤改良を行う場合の改良範囲の決め方は，シートパイルの先端を抱き込むような範囲を改良することに設計統一を図った。なお，改良地盤が地下水の揚圧力で押し抜かれないように土留杭の先端に発生するせん断抵抗力を期待することとした。	
掘削現場からは，福井城の井戸の組み石に使われたとみられる笏谷石や，堀に沈んでいたとみられる流木が多数見つかった。また，崩れやすい粒のそろった砂の地層を含んでいることも分かり，検討委員会は出水の原因を「これらの弊害が複合的に絡み合いＣＪＧ工法がうまくいかなかった」と結論付けた。	出水箇所のほか，土留め壁による地盤強化の出来が不十分と判断された２カ所の計３カ所は鋼矢板を打ち込んで補強する。残る７カ所は，土留め壁に半円形の鋼板を当て，半円内を手作業で順次掘り下げながら壁を鋼板で補強する。	福井新聞：2004年7月1日，2005年1月13日
①ＧＬ-6.0ｍ付近に玉石（400 ㎜～600 ㎜）を混える砂礫層があり，杭打設の障害となり以深の削孔が出来ず，その都度φ800 ㎜程度の井戸を掘り玉石を除去した後，杭の打設を行ったが，埋め戻し地盤が緩い状態となっているためオーガーの芯が固定されず「ぶれ」前に打設した杭に添えきれず不連続で打設された。②柱列杭の背面で行った地盤改良の注入効果が発揮出来なかったことは，建設省の暫定指針により高分子系・尿素系の注入剤が使用出来ないことと注入率が小さかったことが大きな原因であったと考える。	①杭間から発生する流砂を止めるには，掘削と合わせ柱列杭の前杭の芯材を露出させ，それに鋼板を溶接しつつ（鎧戸工法）掘削を行うこととした。この掘削方法で床付付近まで掘り進んだが，ボイリングの兆候が確認されたため，立坑を満水状態にして緊急注入を行ったが状況は改善されず，土留崩壊の危険があると判断し，現床付け面を掘削天端とすることとし，シールド推進位置の変更とともに，中間立坑，到達立坑の掘削天端も合せ変更した。②シールド推進は，仮設状態で発進することとしていたが，柱列杭の遮水性が劣るため突発的な出水の危険を予知し，柱列杭の前面に壁厚30 ㎝の止水コンクリートを地下水位＋50 ㎝まで打設した。トラブル発生後の対応方法：ボイリングの兆候が現われたため掘削を断念して床付け位置を変更し，シールドトンネルの発進土被りの変更を行った。	
①当該出水箇所は近傍は，東京礫層が乱流堆積物状態を呈するマトリックス分の少ない巨礫の存在する箇所にあたる可能性が高いことが予測できなかった。 ②このような地質状況下で設計として採用されたコラムジェットや薬液注入工が期待された十分な補強，止水効果を発揮しえなかった。 ③当該土留め欠損部への鉄板による補強が適切な時期に実施されていなかった。 上記①～③の原因が複合して生じたコラムジェットと薬液注入工による土留め欠損部に対する補強工と止水工の弱点が，掘削の進行に伴って発生した坑内外の水圧差に抵抗しきれず，出水とともに土砂流入も発生した。	地表面の陥没部が首都高速道路の橋脚基礎に近接していることから①遮断工②止水工③追加計測④山留工変化部の止水工を実施した。 ①遮断工：橋脚の防護を目的とし，柱列式連続壁（ＢＨ杭）で橋脚を取囲むように施工 ②止水工：当該山留出水箇所からの再出水を防止するため，外側から取囲む形で鋼管杭連続壁（鋼管Φ1000mm）及び薬液注入（二重管ダブルパッカー）による止水壁を施工 ③追加計測：橋脚周辺の地盤挙動測定を実施（地中水平変位測定，層別沈下測定） ④山留工変化部の止水工：山留工変化部に対して地盤改良工（薬液注入，コラムジェット），杭打設工（ＢＧ場所打ち杭）を施工	鉄道公団・東京臨海高速㈱：臨海副都心線工事誌（東京テレポート～大崎間），資料編　pp.1035-1108，2003.9.

シールド工事におけるトラブルについて
－洪積砂礫地盤におけるトラブル事例に焦点を当てて－

トラブル事例分科会 WG4 シールドグループ

概　　要

シールド工法はトンネル建設における安全な工法であるが，トラブルが発生した場合には大規模な対応が必要となる．トラブル事例分科会 WG4 シールドグループでは，過去のトラブル事例を約 70 例収集した．収集したトラブル事例について特に事例の多い洪積砂礫層でのトラブルについて分析し，発進・到達時，掘進時に分類した上で，その代表的事例について整理を行った．特に砂礫層でのトラブルは出水やカッタービット等の異常摩耗や土砂噴発による掘進停止などの原因となっている．事前に土質状況についてその成立状況から想定されるリスクを抽出し，トラブルが発生した場合に適切な対応を実施できるよう考慮しておくことが重要である．

キーワード：出水，圧送管閉塞，逸泥，異常摩耗，胴締め

3.1　はじめに

シールド工法は特に地下埋設物の多い都市部において採用されている工法である．掘削と並行してセグメントを組み立て，トンネルを構築していくこと，切羽圧力の測定など掘削時の管理が可能であることなどから，非常に安全性の高い工法の一つである．一方で大深度での施工が多いため，ひとたびトラブルが発生した場合にはその対応は容易ではない．

シールド分科会では，約 70 件のトラブル事例を収集した．本稿では特に近年採用の多い泥水式及び泥土圧式シールド工法でのトンネル工事のトラブル事例について，特に砂礫地盤での発進・到達時，掘進中のトラブルに分類し，代表的な事例について整理した．

3.2　シールド工事のトラブルの現象と特徴

シールド工事でのトラブルの特徴としては砂礫層での事例が多いことがあげられる．特に発進・到達時の出水，砂礫層掘進中の圧送管閉塞，それに伴う地盤沈下，砂礫土によるカッタービットや面板の異常摩耗，洪積砂礫層の流動化による胴締め現象などがある(**表 3.1** 参照)．

粘性土層でのトラブルとしては，面板等への粘性土の固着による掘進停止などがある．その他，メタン等の可燃性ガスを多く含む土層での安全管理などもある．施工時のセグメントのせりによるセグメントの破損や急曲線部でのセグメントリング間の目開きなどがある．これら以外にも施工中のトラブルが発生している．

特に砂礫土層地盤での地下水や土砂の流入を伴うなど大規模なトラブルとなることから，本稿では洪積砂礫地盤におけるトラブル事例に焦点を当てた．

3.3　シールド工事のトラブル事例について

3.3.1　発進・到達時のトラブル

シールド工においては，発進時にトラブルが多く発生している．特に鏡切り時に地山から出水が発生する場合がある．発進・到達では，防護工として高圧噴射攪拌工法，薬液注入工法や凍結工法等で地盤改良する場合が多いが，**図 3.1～図 3.2** に示すように，地盤改良の不良箇所の存在やシールド掘進により遮水壁や改良地盤を傷めることで水みちが発生し，細砂を含む出水が生じることがある．対策としては，高水圧対応のエントランスパッキンの採用や厳格な施工管理を行うことはもちろん，二次注入を実施することが挙げられる．

表3.1　シールド工事の主なトラブル現象と件数

施工段階	現象	件数
発進・到達時	出水　等	18
掘進時	圧送管閉塞・土砂噴発 地盤沈下 カッター等異常摩耗 セグメント等破損 胴締め　等	47
その他		1

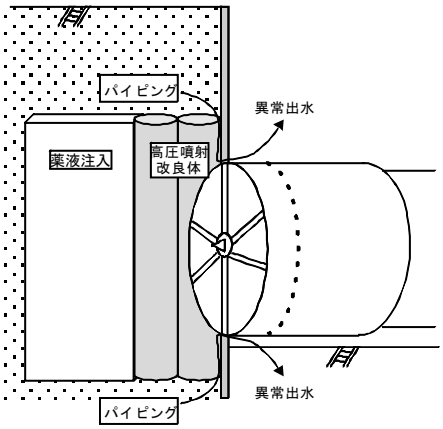


図3.1　シールド発進時の異常出水トラブル

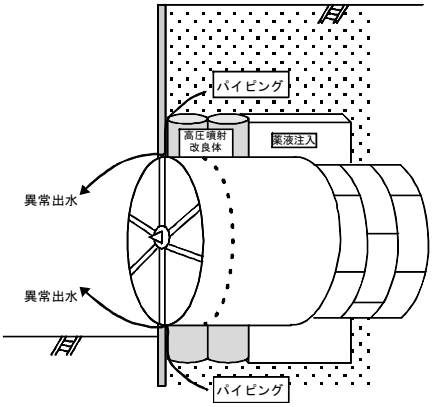


図3.2　シールド到達時の異常出水トラブル

(1) 発進立坑からの出水

事例１：発進準備中の出水事例

泥土圧式シールド工法(シールド外径 5,440mm，土被り 22m)の発進準備中の出水事例である．発進防護工として，高圧噴射撹拌工(二重管工法)，薬液注入工(二重管複相式)をおこなっていた．初期掘進に先立ち，同時注入管保護カバーの破損防止を目的として高圧噴射改良体にコアボーリングを施工したところ，コアボーリング孔より坑内に多量の土砂と地下水が流入した(**図 3.3** 参照)．出水の状況から薬液注入では止水が困難と判断し，地上部より大口径ボーリングマシンにより高圧噴射改良体背面にモルタル打設を行い，その後薬液注入(懸濁型)により止水を完了した．

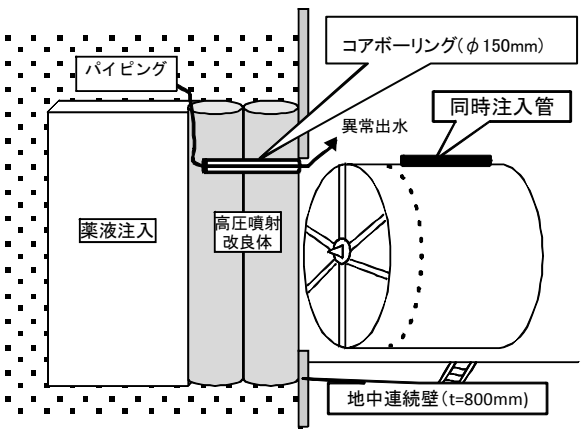


図3.3　発進準備中の出水事例

出水原因は高圧噴射改良体が計画範囲に造成されていなかったものと想定される．改良深度が深い場合にはボーリングの孔曲りによる削孔位置のずれや，造成範囲に礫だまり等が存在し，高圧噴射改良体が所定の範囲に造成されなかった可能性がある．

事例２：初期掘進中の出水事例

泥土圧式シールド工法(シールド外径 5,440mm)の初期掘進中の出水事例である．発進防護工として，高圧噴射撹拌工(三重管工法)，薬液注入工(二重管複相式)を行っていた．シールドの初期掘進時に流体輸送設備のトラブルが発生し，エントランスパッキン上部より出水したものである(**図 3.4** 参照)．止水のため，エントランスバルブ，シールド前胴注入管など構築内部から薬液(溶液型)，モルタル等の注入を実施したが効果がなかった．そのため，地上部より薬液注入(溶液型)，モルタル打設を開始した．シールドの流体輸送設備の試運転直後，エントランスからの水勢が衰え始めた．その後，地上およびエントランスからの薬液注入(溶液型)により止水を完了した．

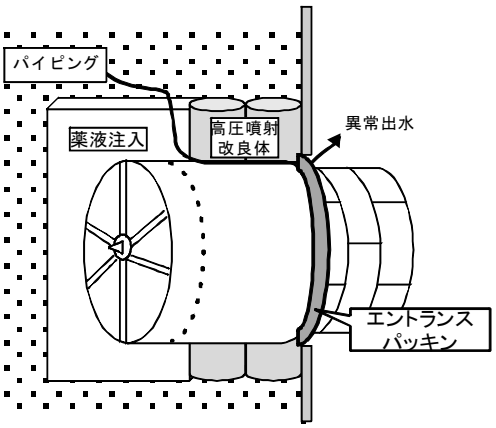


図 3.4　初期掘進中の出水事例

本事例では 2 本の同時注入管保護カバー間の樹脂形成材のかけらがエントランスパッキンとシールドスキンプレート間に挟まっていたこと，施工上の観点からシールド据え付け高さを下げたため，エントランスパッキンとシールド上部のクリアランスが大きくなったこと，勾配部の施工のためシールドのエントランスへの推進角度があったこと等よりエントランスパッキンの効果が若干低下したことが原因としてあげられる．これに泥水式シールド工法での流体輸送設備のトラブルが重なったため，切羽圧力が低下し，滞水砂礫層に通じる水みちが形成されたものと考えられる．また，出水が継続したこと，切羽圧力が変化したことにより，薬液注入による発進防護改良体が崩れ，大きな出水に至ったものと想定される．

出水しても当初の水みちはシールド外径とセグメント外径の差にとどまるため，できるだけ速やかに掘進を続けることが重要であり，エントランスパッキンをセグメントに密着させるとともに適切な裏込め注入を施工する必要がある．出水時にも高圧噴射改良体は健全であると考えられる．高圧噴射改良体と薬液注入部の境界付近に大口径ボ

ーリングマシンによりモルタルを打設することは有効な止水対策であると考えられる．

(2)到達立坑からの出水

事例１：到達時の出水事例

泥水式シールド工法(シールド外径 5,440mm)の到達立坑での出水事例である．到達防護工として，高圧噴射撹拌工(三重管工法)，薬液注入工(二重管複相式)を行い，到達部にはエントランスパッキンを設置していた．

到達立坑内にシールド機を引き出そうした際に坑口より出水が発生した(**図 3.5** 参照)．エントランスパッキンにワイヤ締め付け式を採用していたことから，大量の出水には至らなかったが，シールドクラウン付近では約 0.2MPa と高い地下水圧を有する帯水層のため，薬液注入工法では止水が困難であった．そのため，地上部からモルタル打設により止水を試みたが，水圧によりモルタルがすべて坑内に流出した．そこで，水みちを目詰めするためにモルタルの骨材に砕石を混入させたが，モルタル硬化前に水勢が増し，効果があがらなかった．そこで，モルタルに荒縄を混入させたところ，目詰め効果があらわれ，止水することができた．

出水経路は高圧噴射改良体に生じた面板のオーバーカットによる余掘りでできた隙間に地下水が侵入したもの想定される．地下水の流入が続くうちに高圧噴射改良体の背面の薬液注入ゾーンが崩れ大量の出水に至ったものと考えられる．

止水後の対策として，再発進時の到達防護工の止水性向上のため，薬液注入(LW 及び溶材)を実施した．また，湧水防止のため，シールド坑内からセグメントのグラウトホールを通じて薬液注入(溶液型)を行った．シールドに近い範囲は薬液注入(溶液型)を行っていたが，地盤強化のため，再発進後に薬液注入(懸濁型)を実施した．

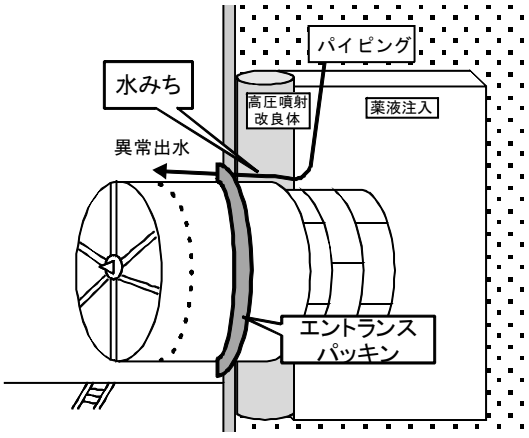


図3.5　到達時の出水事例

高い地下水位を有する帯水層下でのシールド機の引出しにあたって，止水性の高いエントランスパッキンを採用する必要がある．また，同時注入管防護の先行ビットはエントランスパッキンを損傷しないように出し入れ可能な構造とする必要がある．シールドの掘削外径がシールド外径よりも大きいことからスキンプレート周辺は水みちとなりやすい．一旦地下水が動き出すと，高圧噴射改良体の背面側の薬注注入ゾーンは崩れ，止水性が急速に低下する．到達防護工の高圧噴射改良体の範囲を広げ，できるだけ早期に裏込め注入と一体化させることが望ましい．

事例２：到達立坑接続部の出水事例

泥土圧式シールド工法(セグメント外径 6,400mm)の到達立坑での出水事例である．到達防護工として，高圧噴射撹拌工(三重管工法)，薬液注入工(二重管複相式)を行っていた．

到達時にシールド機が到達立坑連続壁に密着するのに支障となるカッターヘッド先端部(フィッシュテール)を挿入するために，予め撤去しておいた到達立坑連続壁中心部の開口(φ1,500mm，t＝12mm)の閉塞鉄板が立坑内部に膨らみ始めるとともに地下水が噴出した．水圧により鉄板下部の固定ボルトナットが引き抜かれ，10～15cm の隙間が生じ，到達立坑内部に地下水と土砂が流入した(**図 3.6** 参照)．

当初は約 3～4 分間隔の断続的な地下水および土砂の流入であった．流入の間隔を利用して隙間の拡大防止および鉄板全体の補強のために鋼材等での押さえ工事を試みたが，その間隔が徐々に短くなり，ほぼ連続的に地下水および土砂が流入するようになった．

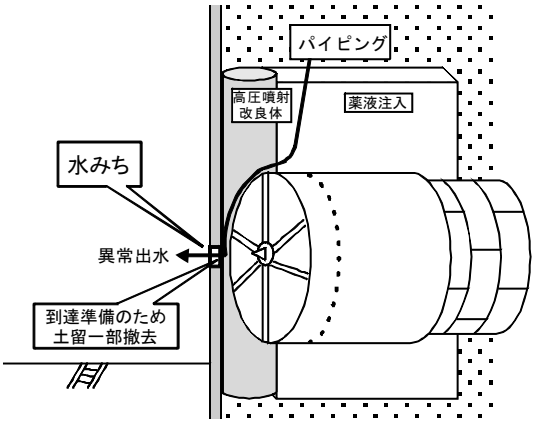


図3.6　到達立坑接続部の出水事例

最悪の事態を防止するために，到達立坑内への注水を行った．最終的に到達立坑への注水高さを立坑内外の平衡水位の約 31m とし，昼夜を徹して注水作業を実施した．注水後にシールド機を地中連続壁まで掘進し，潜水士により調査を実施した．シールド到達後の開口部の閉塞のため，機内チャンバー側の注入孔，フィッシュテール，シールド上部の注入孔より裏込材の注入を行った．また，土砂が流出したと想定されるシールド直上部について，地上部よりボーリングを実施し，状況調査と陥没等防止のために薬液注入を行った．

出水の原因は薬液注入による地盤改良に問題があったものと考えられる．これは，削孔長が 40m と長く，施工

範囲に既設構造物や地下埋設物が多く，施工の大半が斜施工となり，削孔精度が低下し，未改良範囲が生じたためである．また，施工時に地中より鉄筋やガラの存在が確認されており，孔曲がりを助長した可能性がある．

3.3.2　シールド掘進中のトラブル

シールド掘進区間の土層に滞水砂礫層・巨礫・粗石（玉石）を含む場合には，掘削土の取り込み不能やカッターの共回りによる地盤の撹乱，余掘り，沈下，カッタービットの摩耗・破損などのトラブルが発生する場合がある．一般的な粘土，砂，砂礫地盤は，ティースカッターで掘削できるが，大礫地盤に遭遇するとこの種のカッターでは超硬ビットの欠落や破損が発生したり，カッタービットや面板に過度の摩耗が生じて掘進不能に陥ったりすることがある．また，砂礫層では，土砂圧送管の閉塞トラブルが発生することがある．カッタービットや面板の異常摩耗の影響は，スクリューコンベアや排泥管におよぶことも多いので注意を要する．

(1) シールド機の異常摩耗

事例１：フィッシュテールの異常摩耗事例

洪積砂礫層を通過する泥土圧式シールド工法（掘削外径 5,460mm）での異常摩耗の事例である．本事例ではカッタービットの摩耗量は想定の 40%程度であったものの，フィッシュテール部では 9 個のビットの内 7 個が脱落し，母材部分の摩耗が発生している（**図 3.7** 参照）．

掘削土の状況に応じたビット配置を検討することが必要である．対策としては，ディスクカッターやシェルビットなどを装備することや，カッター交換可能のシールド機を導入することが考えられる．

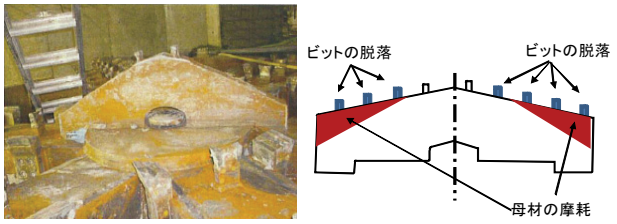


図 3.7　フィッシュテールの異常摩耗

事例２：面板の異常摩耗事例

泥水式シールド工法（掘削外径 5,460mm，施工延長約 1.6km）での面板の異常摩耗事例である．掘削土層はシールド上半が洪積砂礫層，下半が大阪層群の洪積砂質と粘土層の互層地盤であった．異常摩耗の原因は，面板とシールド前胴との隙間部（設計 20mm）から摩耗性の高い掘削土砂の流入が続き，面板外周部の摩耗が促進されたと想定される（**図 3.8** 参照）．

(2) 土砂圧送管の閉塞

事例１：土砂圧送管の閉塞事例

泥土圧式シールド工法（仕上がり内径 2,800mm，延長約 1.8km）で土砂圧送管の閉塞事例である．本シールドトンネルは沖積粘土層と洪積砂礫層の境界付近を掘削するものであった．当該工事区間は土質調査の結果，メタンが観測されており，防爆対策のため，土砂圧送を行う必要があった．初期掘進において，当初の想定以上に砂及び礫が多く，圧送管の閉塞を繰り返した．土砂圧送によるトラブルはのべ 76 回，60 日の工事中止期間が発生した．

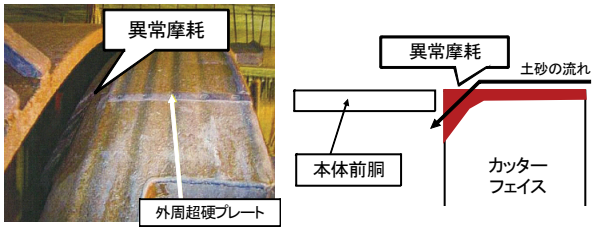


図3.8　面板の異常摩耗

事前に全断面砂礫層の発生による土砂圧送管の閉塞防止策を事前に検討すべきであった．

事例２：土砂圧送管の閉塞事例

泥土圧式シールド工法（セグメント外径 5,300mm，延長約 1.8km）での土砂圧送管の閉塞事例である．洪積砂礫層の掘進中に土砂圧送トラブルが発生した．この層は N 値が 40～60 とよく締まっており，礫含有率は比較的高く，礫が多く存在する礫だまりが点在している．礫の大きさは 10～20cm 程度であった．清掃作業により，管内に大量の粗礫等（玉石 直径 5～10cm）が存在し，撤去に 3 日程度必要であった．土砂圧送管の閉塞は，掘進停止中に圧送管中で細粒分と粗礫等が分離・沈降し，掘進再開時に管内礫だまりが圧送され，管内に集積し閉塞したと想定される．

対策として土砂圧送の改善のため，スムーズな圧送と礫の沈降防止を兼ねた添加材の配合実験や圧送中並びに休工中の管理体制の確立を行った．

ボーリング調査等の地盤調査だけで礫だまりや巨礫の存在は把握できない．過去の地盤形成の経緯等を参考に，クラッシャーを装備あるいはクラッシャーの装備が可能なシールド機としておくことが考えられる．

(3) 地盤への泥水の逸泥や切羽圧力の不均衡による切羽地盤の崩壊

泥水式シールド工法において透水性の大きい礫地盤では，泥水が逸泥して切羽安定に必要な泥水圧が作用させられないため，切羽圧力の不均衡が生じることがある．均等係数の小さな粒径のそろった砂地盤や礫地盤では，逸泥等により泥膜が十分に形成されないおそれある．比重や粘性，降伏値，濾過特性などの泥水品質の管理が重要な判断要素となっている．

一方，泥土圧式シールド工法で細砂地盤を掘削中，チャンバー内土砂の流動性が悪い場合，切羽上部の安定に必要な土圧を作用させることが難しい．そのため，切羽上部で土圧バランスが崩れて小崩壊し，トンネル天端上部の沈下が大きくなる場合がある．

事例：掘進途中の逸泥事例

シールド掘進途中に一部区間において逸泥量が通常の 8 倍に達した事例がある．逸泥が発生した区間の掘削残土より通常の砂に加えて 5cm 程度の粗礫(玉石)が多く混入していたことが判明しており，いわゆる「礫だまり」により，逸泥が生じたものと想定される．

異常逸泥の発生に伴い，切羽圧力の変動監視と地上部での影響確認を実施した．また調整槽に逸泥防止剤を緊急投入して逸泥量減少に努め，泥水配合も粘性が大きくなるものに変更している．一方，排泥ポンプの負荷状況を監視し，流体輸送に影響が出ないようデータ監視を行った．

逸泥対策としては，添加材の注入量を増加させることや，チャンバー内の攪拌機能を整備して掘削土を高流動化させることが有効である．透水性の大きい細砂地盤における泥水式シールド工法では形成泥膜が薄いため，カッターで地盤切削すると容易に泥膜が削り取られ，泥水加圧効果が減少して切羽が不安定になり，大きく沈下する場合がある．対策の一つに，高濃度泥水の使用が挙げられる．

(4) スクリューコンベアからの噴発に伴う切羽地盤の崩壊

均等係数が小さく流動化しやすい細砂地盤を泥土圧式シールド工法で掘進する際，チャンバー内やスクリューコンベアでの混練り状態が悪い場合や異物を取り込んだ場合，**図**に示すように，排土口から流砂を伴って噴発することがある．噴発の激しい場合，切羽周辺地盤がボイリングしてシールド頭部が沈下し(ノーズダウン)，過度な場合にはテールの突き上げに伴い，セグメントが破損して陥没にいたることもある(**図 3.9** 参照)．

透水係数の大きい大礫地盤を泥土圧式シールド工法で掘削する場合，チャンバーやスクリューコンベアに止水プラグを形成させて，土砂の噴発を止める必要がある．止水プラグの形成が不良の場合，噴発現象の多発とともに地盤陥没にいたる場合がある．また，スクリューコンベアに大礫が挟まって閉塞されると，チャンバー内の掘削土は排出されないため，小粒径の土砂と地下水が噴発し，地盤陥没にいたる例もある．切羽下部が大礫層または岩盤で上部が砂層の複合地盤の場合，掘進時間が長時間となり，上部砂層が撹乱されて崩壊に至る場合が多い．

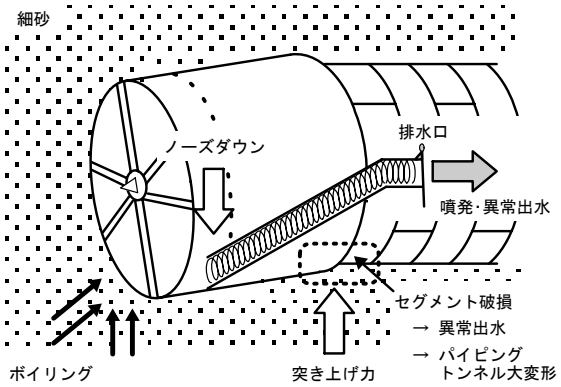


図3.9　排土時の噴発に伴うトラブルとノーズダウンの発生によるトンネル破損の可能性

対策としては，スクリューコンベアへの添加材注入や排泥ポンプ圧送設備の導入，スクリューコンベア径の拡大，カッターやチャンバー出口で大礫を破砕することが挙げられる．泥水式シールド工法での排泥管または面板開口の取り込可能径よりも大きい粒径の大礫が出現した場合には，泥水圧の変動と共に，取り込み過剰による陥没が生じる場合がある．

事例１：滞水砂礫地盤における地下水噴発

泥土圧式シールド工法(シールド外径 1,930mm)での地下水噴発事例である．掘進区間は洪積砂礫層で含水比の高い流動化砂や礫率が 80%と高い砂礫地盤(透水係数 10^{-1}～10^{-2}cm/sec)であった．当該土層には作泥土材(鉱物系添加材)を適用して掘進する計画であった．しかし，地盤と作泥土材が絡まることなく，分離したことから，地下水が噴出した．滞水砂礫層では作泥土材や高分子添加材により地山に不足する細粒分を補うことはできるが，地山に含有する砂分が少ないため，土性改良が難しく，土砂が分離して噴出することとなる．

対策として，作泥土材と高分子凝集剤の併用，作泥土材と気泡の併用，シリカゼリーを添加材として加えることを検討した．シリカゼリーの添加はプラントの設置が不要であり，土砂の流動性及び止水改善効果が高いためこれを採用した．

泥土圧式シールド工法は，シールド機での対策と添加材及び掘進管理による切羽の安定が重要である．このため地盤と添加材の種類・添加率による土性改良効果の把握が重要である．

事例２：道路陥没事例

泥土圧式シールド工法(セグメント外径 2,150mm)での道路陥没事例である．玉石まじり砂礫地盤掘削区間の掘進途中に道路陥没が発生し，タンクローリー，大型貨物自動車等 4 台がパンク等の損傷を受けたものである．幸いにも負傷者はなかったが，道路上では約 0.8m×1.2m，路床部では約 2×3m，最深部では約 1.3m の陥没が発生した．

陥没の原因は，掘進途中で玉石混じり砂礫によりスクリューコンベアの閉塞が多発し，再掘進の際に切羽土圧が低下し過剰取り込みとなったこと，粗礫(玉石)を多く取り込んだため，地盤中に空隙が発生したこと，ゆるく堆積している玉石混じり礫地盤が沈下したことが考えられる．

対策としてスクリューコンベアが閉塞した場合には切羽地山を乱す懸念があるため，シールド内より可塑性の添加材を注入すること，粗礫(玉石)の除去を迅速化したことがあげられる．

(5) 砂礫地盤における胴締め

シールド掘進時に砂礫地盤によるシールドの胴締め現象などのトラブルがよく見られる．この胴締め現象は，**図 3.10** に示すようにカッターで掘削した砂礫地盤が応力解放やせん断を受けて膨張変形し，シールドの胴体部に密着

することによって，シールドと地盤の摩擦抵抗が上昇する現象である．この現象は，均等係数の小さい大阪層群砂層の掘進時によく発生する．

胴締め地盤への対策としては，オーバーカットやシールド機内から胴体部へ減摩材を注入することが有効である．また，余裕のある掘進推力をシールド機に装備し，その推力に応じた施工時反力荷重を考慮したセグメント設計を行う必要がある．

この胴締めにより，掘進推力不足や高推力のために反力となるセグメントの変形や破損が生じる場合がある．この現象は，周辺地盤が均等係数の小さい中～細砂の場合や曲線線形の掘進時に起こりやすい．また，推力は掘進中よりも，掘進を開始した直後が大きい値を示す．これは，動摩擦抵抗より静摩擦抵抗が大きいことに起因しているためであり，シールドジャッキの計画装備推力は一般的に計画総抵抗力の 50～100%増した値とすることが多いが，掘進開始時の推力を考慮する必要があることを示唆している．

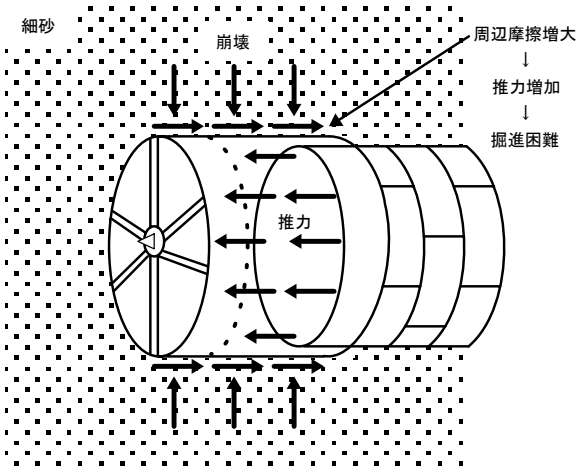


図3.10　シールド掘進時における胴締め現象

事例１：胴締め事例

洪積砂礫層でのシールド掘進において胴締め現象が報告されている．本事例では泥水加圧式シールド工法地中分岐工法を採用しており，シールド外径 7,260mm 延長約 1.1km(分岐前)を施工するものであった．本シールドは大阪層群洪積層を掘進するものであった．

本工事の掘進データによれば，平均掘進力は砂と礫の割合が大きくなると増大する傾向がみられ，シールド外周面と土の摩擦抵抗等の最大値は設計の 6 倍にも達したことが報告されている．

事例２：胴締め事例

泥水式シールド工法(シールド外径 5,420mm)での胴締め事例である．掘進区間の土質は粘性土をはさみ細礫を混入するよく締まった細～中砂の洪積砂層であった．当該区間を掘進中，縦断線形の変化点(下りから上りの勾配変化点)付近から推力が上昇し，シールドの姿勢制御が困難となり鉛直方向の蛇行が発生した．蛇行部分の土質はシールドクラウン部に洪積粘土層があり，その下は洪積砂礫層となっている．シールドクラウン部に粘性土がある場合，上がりにくい現象がみられることが多々あるが，本事例では推力上昇のためシールドの姿勢制御が困難であったことが原因と考えられる．

推力上昇は，カッタトルクの異常上昇やシールド機の異常が見られなかったことから，洪積砂層における周面摩擦の増加であると考えられた．この砂層の排泥土砂の分析結果では均等係数 2.0 前後の細砂であった．

胴締め対策として，シールドジャッキ数の増加，滑材の注入，シールド機によるオーバーカットを行った．

3.4　おわりに

シールド工法でのトラブルは特に砂礫層において多く発生している．発進・到達時には発進防護工として行われる高圧噴射改良体の改良範囲に問題があり，水みちを形成し，大きな出水に至る事例がある．大深度施工では高水圧となり，止水処置も大規模となることから，発進・到達時の安全性には十分留意する必要がある．出水防止対策を事前に検討するとともに，大口径ボーリングマシンの準備など出水時の対応を迅速に行える体制を整えておく必要がある．

掘進中にはカッタービットや面板等の異常摩耗などシールド機のトラブルや土砂圧送の閉塞による掘進停止が発生している．また，逸泥等による切羽圧力の不均衡，道路陥没，胴締めによる掘進停止などが発生している．土質調査結果だけでなく，過去の近接地でのトンネル工事の状況や地盤の成立経過などを把握することで，粗礫等の存在を想定することや，土砂圧送管の閉塞や逸泥に備えて，掘削土の性状にあった添加材及び掘進管理を適宜検討・実施していくことが求められる．

参考文献

1)　橋本正，譽田孝宏：技術の伝承－現場の教訓から学ぶ－地下建設工事のトラブル，地盤工学会誌，Vol.60, No.2, pp.63-70, 2012.
2)　地盤工学会：シールド工法の調査・設計から施工まで，1997.
3)　地盤工学会：トラブル事例に学ぶ大深度地下構造物の設計施工技術，pp.56-95，2001.
4)　井ノ口弘恭，名出麦生，近藤悦吉，廣田雅博，高須賀洋一，山根淳，酒本博，本田市仁，吉田良三，藤塚豊裕：谷町筋と西梅田(大阪都市部)の大深度シールド掘進推力について，第43回地盤工学シンポジウム，pp.109-114，1998.

【トラブル事例一覧表(シールド編　その１)】

CODE No.	トラブル分類	トラブル名	発生地域	発生深度および地盤情報	トラブル概要
ｼｰﾙﾄﾞ-1	出水	シールド工事で地盤沈下，校舎に亀裂	神奈川県川崎市	掘削深度19.5m	シールド立坑の内部に出水し，地盤が沈下するとともに，近接する校舎の壁や床に亀裂が生じた.
ｼｰﾙﾄﾞ-2	出水	導水路異常出水	兵庫県尼崎市	TP-10m付近 (大阪層群砂層)	開放型シールド発進直後において大阪層群砂層(Os層)の流動化現象が発生し，異常出水が発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-3	出水	民家庭先陥没	千葉県船橋市	GL-7m付近 (沖積～洪積砂質土層)	シールドトンネル接合部において，シールド機を解体中に土砂が止水工を突き破って流入し，上部地表面が陥没した.
ｼｰﾙﾄﾞ-4	出水	シールド地盤陥没	東京都千代田区	GL-44m付近	シールド機～坑口間のエントランスパッキン部から地下水が流入し，発進立坑が水没，トンネル上部地盤が陥没した.
ｼｰﾙﾄﾞ-5	出水	斜め到達手前で推進位置探査中に異常出水	兵庫県川西市	GL-11.80m (礫混じり砂～細砂層)	シールド到達(斜め到達)に備え，シールドマシンの挙動(マシン位置)と地盤の状況を確認するため坑口から探査孔(φ300mm奥行き500mm)を施工した．その探査孔で奥行き400mmの位置でマシンを確認し，さらに100mm掘進を進めた時点で探査孔より若干の流砂が発生しだしたため，シールドマシンを停止させ状況を観察することとした．その後，出水が多くなり，最終的には，400ℓ/minの出水と同時に砂を持ち出したため立坑を水没させた.
ｼｰﾙﾄﾞ-6	出水	発進時の出水(ｴﾝﾄﾗﾝｽﾊﾟｯｷﾝ上部からの出水)	大阪府大阪市	GL-14.4m	Ｕターン立坑において，シールドを立坑内に引き出し，方向転換した後再び発進した直後，エントランスパッキン上部から出水した.
ｼｰﾙﾄﾞ-7	出水	Uﾀｰﾝのためのｼｰﾙﾄﾞ引き出し時の出水	大阪府大阪市	GL-21.3m	シールドを立坑内に引き出そうとした時に高圧噴射改良体の損傷などにより止水性が低下し，出水した.
ｼｰﾙﾄﾞ-8	出水	発進時の出水	大阪府大阪市	GL-22m	シールドを再発進する際に，高圧噴射体にあけたｺｱﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ孔から出水した.
ｼｰﾙﾄﾞ-9	出水	ワンタッチ継手間から出水	大阪府大阪市	GL-16.5～17.5m	シールド一次覆工中，295m地点のセグメント上部継ぎ目より異常出水が発生．土砂の流出とセグメントクラックが発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-10	出水	到達立坑接合部より流入土砂	大阪府大阪市	GL-23.4m～GL-12.4m	到達防護工(凍結)完了後に到達立坑接合部より異常出水発生．土砂の流出も発生した.

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	関連資料
－	出水とともに砂が流入しており出水と沈下に関係があると判断．たて坑の周囲にセメント系の薬液注入を開始した．この結果，たて坑内部への出水は同日中に止まった．	日経コンストラクション (ｹﾝﾌﾟﾗｯﾂ土木)
異常出水の直接的な原因はシールド断面下部の大阪層群の砂層からの流動化現象であった．また，切羽地山が流動化現象を起こしやすい場合には，圧気圧を理論圧気圧までに上げる必要があったがその措置をしなかったことなどが原因としてあげられる．	高被圧水に対処するため，できるだけ早く圧気工法を取り入れる方法を採用した．また，仮圧気掘進終了後，本掘進への段取り替えのため断気する必要があるため，その切羽の山留め工法として二重管瞬結工法にて改良を行った．	阪神水道企業団：第5期拡張事業 導･送水路工事記録
シールド機の到達は，用地交渉の難航によって３年以上も遅れたことから，工法の変更を余儀なくされ，これが事故を招く遠因の１つと考えられる．	－	日経コンストラクション編：建設事故
出水の原因は，シールド機と坑口の隙間を止水するエントランスパッキンがシールド機に密着していなかった．さらに，セグメントの組み立て中に切羽にかかる地下水圧が急激に上昇したことが出水を加速して被害を大きくしたとみられている	地盤沈下の再発を防ぐため，地下水位の深さまで立坑に水を張った．	日経コンストラクション編：建設事故
①到達に伴う地盤改良された地盤が，シールド推進時に発生するノッキング(振動)等により局部的に破壊され水道となり切羽に地下水が廻った． ②地盤改良した地盤をカッタービットで切り込みながらの推進となることから，シールドマシンのテール部に水道が形成されるのを防止するためマシンのテールがセグメントを通過した時点で即時裏込め注入で充填しているがテール部に均一な充填がなされたのか疑問である．また，斜め到達となる場合，切羽の抵抗が不均一となるためシールドマシンの方向制御が難しくなり，シールドマシン周辺の地盤改良した地盤	流砂現象の発生と同時に立坑を水没させ，応急注入を行い道路陥没等の危険を回避した．特にシールドマシンが通過したテール部を重点的に応急注入を行った．再掘進は，到達立坑内の一部をモルタルで充填し，その充填したモルタルをカッタービットで切削しつつ到達予定位置まで推進し停止させる計画とした．斜め到達は出来る限り行なわず立坑の形状(円形立坑)を変えることとし，やむなく斜め到達する場合は，到達立坑にケーシングを設置し，ケーシング内には発泡モルタル(モルタルは発現強度が高く推進が難しくなる)を充填し，シールドマシンを出来	地盤工学会収集資料
同時注入管防護カバーを整形した樹脂が偶然外れ，エントランスシールのパッキング効果を低下させたところに泥水シールドの流体設備のトラブルが重なったため，帯水砂礫層に通じる水みちが生じたものと考えられる．また，出水が継続したことと，切羽圧力を変化させたことにより，薬液注入による発進防護改良体が崩れ，大きな出水に至ったものと考えられる．	応急措置として，構築内部及び地上から溶液型注入材，モルタル打設を行った．また，地盤の緩んでいる部分を推測し，溶液型，縣濁型による止水対策を行った．再発進前はシールドに近い範囲は溶液型の注入を行っていたため，再発進後に改めて縣濁型の注入にて地盤の強化を行った．	地盤工学会収集資料
推定出水経路は，高圧噴射改良体に生じた面盤のオーバーカットによる余掘りでできた隙間から地下水が浸入したものと考えられる．地下水の流入が続くうち，高圧噴射改良体の背面に施工した薬液注入ゾーンが崩れ大量の出水につながったものと思われる．	応急措置としてモルタルに荒縄を混入して打設すると，水みちの目詰め効果により一気に止水できた．また，その後の対策として，モルタル打設によって空隙は充填できると考えられたが，再発進時に再度到達防護工の止水性低下が懸念されるため注入(ＬＷ及び溶液)を実施した．また，シールド再掘進時の湧水防止のため，シールド坑内からセグメントのグラウトホールを通じて溶液型の注入を実施した．また，シールドに近い範囲は溶液型の注入を行っていたため，再発進後に改めて縣濁型の注入にて地盤の強化を行った．	地盤工学会収集資料
同時注入管防護カバーの破損防止を目的としたコアボーリングがSJM改良体を貫通し，背面地盤に通じてしまったため，坑内には大量の土砂が流入してしまったと考えられる．	緊急対策として，予め待機させておいた大口径ボーリングマシンを現場搬入し，SJM改良体背面にモルタルを打設時に，鉄筋破片入りのペットボトルを投入し，ケーシング内に詰まったところで，早期に空隙をモルタルで充填した．最後に，薬液注入(縣濁型)を行った．注入圧によって高圧噴射改良体が損傷する恐れがあるため，シールドを鏡面に押しつけたのち，空隙調査を行ったところ，シールド進行方向に空隙が広がっていたため充填注入を行った． 空隙の充填注入を行った後，立坑内においてシールドの再発進準備が整った後，改めて発進防護工を施	地盤工学会収集資料
長期間の停止と細砂の締付力により，シールド機テール部が地山側に逃げられず，それまでより大きな外力がセグメント側に集中荷重として作用したため，リングの変形や目違いが発生し，出水事故発生に至った．	(1)作業方法の改善 1)テールクリアランスの確認 2)Kセグメント挿入スペースの確認 3)Mコーンの取り付け確認 4)セグメントの補強対策 (2)設備の改善 1)Mコーンの嵌合確認 2)Kセグメント固定金具の設置 (3)職員並びに作業員の教育 1)元請と協力会社が，作業状況等について定時打合せを毎日行う． 2)工事再開に当り，元請と協力会社作業員全員に，作業手順並びにセグメントの特性について理解・徹底を図った．	地盤工学会収集資料
1．コーキング及び裏込材が地盤凍結による霜や，硬化中の凍害によって，その役割を十分果た得なかった． 2．連壁のエレメント継手の不良箇所が存在した．	(１)坑内水替及び隔壁の設置 坑内全体の水替を行うことによって，再び土砂や水の流出を招くことが懸念されるため，流出土砂後方に仮壁を設け，仮壁より切羽側の水位を低下させることなく，坑内の水替えを行った． (２)接合部補修工事の実施 接合部補修工事の実施については，圧気工法の併用＋薬液注入工を行った．	地盤工学会収集資料

【トラブル事例一覧表(シールド編　その２)】

CODE No.	トラブル分類	トラブル名	発生地域	発生深度および地盤情報	トラブル概要
ｼｰﾙﾄﾞ-11	出水	到達立坑内部に土砂	大阪府大阪市	GL-31.0m～30.0m	到達用に地中連続壁に設置した鋼板が変位し，到達立坑内に出水とともに土砂が流入した.
ｼｰﾙﾄﾞ-12	出水	シールド工事における到達時の出水	滋賀県東近江市	GL-5m付近	玉石まじり砂礫層において，シールド到達時に立坑内に土砂とともに出水し，水没到達を実施．立坑付近で地盤沈下を生じた.
ｼｰﾙﾄﾞ-13	出水	雨水幹到達立坑への出水	神奈川県川崎市	GL-19.5m付近 (沖積細砂層)	シールド廻り裏込め材に混入した粘土がはがれ水みちとなり，マシン下部砂層から出水，最大8.5cmの沈下．凍結工法で復旧予定.
ｼｰﾙﾄﾞ-14	出水	シールドトンネル出水	大阪府大阪市	GL-24.80m (礫混じり砂～細砂層)	約1800mの推進を終えてシールドマシン斜め到達時に備え到達立坑内にケーシング(茶筒)を設置していたが，到達間際に推力が上昇し，RCセグメントに欠け割れが発生するとともに地盤改良部が推力により破断し，ケーシング及びスクリューコンベアから出水が発生し一時推進を停止させた.
ｼｰﾙﾄﾞ-15	出水	発進時の出水(ｴﾝﾄﾗﾝｽﾊﾟｯｷﾝ上部からの出水)	大阪府大阪市	GL-56～50m	本掘進の段取り替え時にエントランスパッキンより出水．土砂の流出，セグメントにクラックが発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-16	出水	泥水シールド初期掘進中に坑口より出水	大阪府大阪市	-	φ7460mm泥水シールドで初期掘進中に坑口より出水，路面陥没．空洞充填注入. 掘進期間中は，初期掘進直後エントランスパッキンから泥水漏れや当初計画していなかったテールパッキングの交換があった.
ｼｰﾙﾄﾞ-17	出水	シールド工事における急曲線の施工不良	大阪府大阪市	-	φ7750mm泥土圧式シールドの発進時にノーズダウンで坑口出水．坑口全周補強. 発進後，すぐに急曲線があったが，曲がりきれずに外側へずれて掘進した.
ｼｰﾙﾄﾞ-18	出水	泥土圧シールド再発進時における坑口出水及び，発進不可現象	大阪府大阪市	-	φ3130mm泥土圧シールドの再掘進時に，坑口出水と発進不可現象．坑口補強・地盤弛緩再発進. 南行再発進時に坑口出水と発進時不可現象等のトラブル
ｼｰﾙﾄﾞ-19	圧送管閉塞	砂礫層(Tg層)における圧送管閉塞	大阪府大阪市	GL-7m付近	本シールドは，泥土圧シールド工法で掘進するもので，排土はポンプ圧送方式であった．掘削対象地盤に一部Tg層が含まれていたが，この砂礫層を掘進中，礫だまりの影響で圧送管の閉塞が数度にわたり発生し，進捗が低下した.
ｼｰﾙﾄﾞ-20	圧送管閉塞	洪積砂礫中の巨礫による排泥管の閉塞	大阪府大阪市	GL-10.7m～-29.5m	巨礫が出現し，排泥管がたびたび閉塞する事態となった.
ｼｰﾙﾄﾞ-21	圧送管閉塞	土砂の圧送トラブル	大阪府大阪市	GL-23m付近	掘削土層が沖積粘性層と洪積砂礫層との互層であり，ボーリングデータよりも砂礫層が卓越しており，圧送管が閉塞した.
ｼｰﾙﾄﾞ-22	圧送管閉塞	圧送排土詰まりによりシールド推進を一時停止	大阪府大阪市	GL-30.0m (砂層～砂礫～粘土の互層)	発進基地が狭隘であったため，圧送排土方式とし推進したが，途中洪積砂礫層の推進区間で，圧送ポンプが数回に亘り閉塞し，シールド推進を一時中断した.
ｼｰﾙﾄﾞ-23	圧送管閉塞	到達手前で玉石層が出現し推進不能となった	大阪府大阪市	GL-18.0m (砂・粘土の互層)	到達立坑手前で，土質調査では確認されていない，玉石層が切羽に出現し，推進することによりチャンバー内に玉石が堆積するとともにP2ポンプと排泥管に閉塞があり推進不能となった.
ｼｰﾙﾄﾞ-24	圧送管閉塞	シールド工事における大礫による掘進不能	滋賀県犬上郡	GL-7m付近 (洪積砂礫層)	土質調査では確認できなかった約φ1mの大礫により，シールドが掘進不能となり，スポークタイプから礫破砕型面盤タイプにマシンを変更した.

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	関連資料
工期短縮のために，マシン到達に先立ってフィッシュテール部と連続壁が干渉する部分の箱抜きを行い，効果確認の結果より防護工が健全であると判断し，連続壁開口部に漏水防止程度の止水鉄板を設置し，到達掘進時にはシールド及びセグメントの一部はすでに改良区間に入っており切羽部に地下水が作用しないはずであったが，実際には想定外の圧力が鉄板にかかり，鉄板下部がはずれ，立坑内に地下水が流入し，土砂も引き込む結果となった.	鏡切りを行うためにカッターピットが到達立坑連続壁に接するまで掘進を行った．また，マシン側より裏込注入を行うこととした．さらに，裏込材注入による到達開口部周辺への注入を行った．また，土砂流出に対する応急措置として次の薬液注入を実施した. マシン直上部注入(止水，地山状況調査および空隙充填) 流出したと予想されるシールド機上部の土砂の状況を探査するためにボーリング削孔し，緊急に陥没等を防止するためにGL-31.0m～30.0mの範囲で注入した．立坑への流入水がある可能性があるので，注入材料としてコンソリダーＳ	地盤工学会収集資料
－	－	地盤工学会収集資料
シールド周辺に付着した粘土がシールド到達立坑側に高い被圧水によって押し流され水みちができたため.	ただちに注入により止水対策を行った．また，工事再開に向けて，発進・到達防護を高圧噴射撹拌工法から凍結工法に変更した.	川崎市ホームページ 平成22年7月23日公表
－	－	地盤工学会収集資料
ワンタッチ継手を採用しており，セグメントリング間に余裕があった．その余裕分に水圧が作用したことと，止水ゴムの反発力によりセグメントが動き，裏込と地山の付着が切れ，水みちが発生した.	初期掘進のための凍結区間が長く，セグメントリング間に生じた水圧によりセグメントが移動したことが原因であり，初期掘進部には接続力の強いセグメントを採用することや	地盤工学会収集資料
－	－	地盤工学会収集資料
－	－	地盤工学会収集資料
－	－	地盤工学会収集資料
トラブルの原因は小礫で，これらが掘進停止中に管内で細粒分と分離・沈降し，掘進再開時と同時にこの「管内礫だまり」が圧送されて管内に集積し閉塞することがわかった.	スムーズな圧送と礫の沈降防止を兼ねた添加剤の配合実験や圧送中ならびに休み中の管理体制を再度検討し，これを実施することとした.	地盤工学会収集資料
事前の土質調査では，巨礫の出現を予測することができなかったため.	本区間掘進に至る前の掘進区間は，シールド断面上部が沖積粘土層で下部が洪積砂層の掘進区間であったため，沖積粘土層掘進における問題点を克服するために，掘進停止時間短縮を期待して流体輸送設備の排泥ポンプの段取替え(排泥ポンプ増設)を無くすため，ポンプの回転羽根は４枚としていた．しかし，ポンプのインペラー部で礫閉塞があったため，２枚羽根に交換した．その結果，排泥ポンプでの閉塞に対し，一定の効果はあったものの，礫が大きくなるにしたがい効果は薄れた.	地盤工学会収集資料
沖積粘性土層と，洪積砂礫層との互層となっており，ボーリングのデータを元にシールド円形断面積をボーリングのポイント毎に粘性土と砂礫土とに按分して，平均土層として取り扱い，作泥材の量を決定していた．しかし，初期掘進時において，想定以上に砂および礫が多くと，当初の作泥材量では，圧送管が閉塞を起こし，圧送できなくなった．その後も，土層により当初の想定よりも礫量が多く，圧送管の閉塞を繰り返すこととなった.	本現場は，防爆対策が必要な路線であるから，土砂の圧送が不可避であり，ずり台車による土砂搬出は不可能であった．トライアルを繰り返し，その区間ごとに注入量を決定しつつ，試行錯誤しながら掘進した.	地盤工学会収集資料
－	－	地盤工学会収集資料
－	－	地盤工学会収集資料
－	－	地盤工学会収集資料

【トラブル事例一覧表(シールド編　その３)】

CODE No.	トラブル分類	トラブル名	発生地域	発生深度および地盤情報	トラブル概要
ｼｰﾙﾄﾞ-25	土砂噴発等	スクリューコンベアからの地下水の噴発	兵庫県神戸市	GL-11.1m～-26.5m	バインダー量の少ない(74μ以下の粘土の混入率が20%以下)滞水砂層，砂礫層の推進となる区間で，スクリューコンベアから土砂が噴発，土砂の取り込みが過多となり推進不能となった.
ｼｰﾙﾄﾞ-26	土砂噴発等	砂礫層(Tg層)における異常逸泥	大阪府大阪市	GL-20m付近	泥水式シールド工法により掘進するもので，掘削対象地盤は透水性を有するTg層であった．玉石が多く礫だまりの影響により掘進途中で異常逸泥が発生し切羽圧力が低下した.
ｼｰﾙﾄﾞ-27	土砂噴発等	泥土圧シールド初期掘進時における排土管理不手際による道路陥没	大阪府大阪市	-	φ3130mm泥土圧式シールドで初期掘進中排土管理不手際・道路陥没．空洞充填．初期掘進時に削土の取り込み過多により，10Ring掘進時に切羽前面の地上部で陥没が発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-28	土砂噴発等	泥土圧シールド初期掘進時における土砂噴発と切刃崩壊	大阪府大阪市	-	φ6050mm泥土圧式シールドで初期掘進中土砂噴発・切羽崩壊.
ｼｰﾙﾄﾞ-29	土砂噴発等	泥土圧シールド掘進時における土砂噴発による道路陥没	大阪府大阪市	-	φ4440mm泥土圧シールドで450Rを掘進中土砂噴発・道路陥没.
ｼｰﾙﾄﾞ-30	地盤沈下	国道陥没事故	群馬県	掘削深度約7m	シールドで取り込んだ土砂の量が計画値の倍以上であったことなどから，国道の路面が陥没した.
ｼｰﾙﾄﾞ-31	地盤沈下	シールド工事における道路陥没	滋賀県近江市等	GL-10m付近 (沖積砂礫層)	玉石まじり砂礫層において，カッター拘束による土砂取込み過ぎ等により，国道に21カ所の陥没および空洞が発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-32	地盤沈下	共同溝シールド路面陥没	岡山県岡山市	GL-15m付近 (玉石含み洪積砂礫層)	共同溝シールドトンネル建設終了約1年後において，玉石による排泥管詰まりを発端とした切羽圧力の不均衡による緩みによりトンネル直上地表面が陥没した.
ｼｰﾙﾄﾞ-33	地盤沈下	下水道路面陥没	神奈川県藤沢市	-	玉石混じりの地盤で土砂の取り込みが多かったため，長さ5.8m，幅3.1m，深さ1.6mの規模で陥没した．前年9月にも陥没発生している.
ｼｰﾙﾄﾞ-34	地盤沈下	シールド工事における道路陥没	滋賀県犬上郡	GL-7m付近 (洪積砂礫層)	掘進中，大礫周辺の緩んだ土砂の取り込み過多により道路陥没が発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-35	地盤沈下	シールド工事堤防陥没	京都府八幡市	約GL-10m	シールドトンネルを施工中に潜在的な地盤の緩みにより，地上部にあった河川堤防が陥没した.
ｼｰﾙﾄﾞ-36	地盤沈下	下水道路面陥没	兵庫県神戸市	-	泥水式シールド工法でシールド機通過後に直径約4m，深さ5mの陥没
ｼｰﾙﾄﾞ-37	地盤沈下	雨水貯留管道路面陥没	神奈川県川崎市	-	シールド工事により，長さ40m，幅40m，深さ2mの規模で陥没した.
ｼｰﾙﾄﾞ-38	地盤沈下	ガス工事における路面陥没	群馬県高崎市	-	泥土圧式シールド工法により，長さ1.7m，幅0.6m，深さ1mの陥没が発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-39	地盤沈下	路面沈下から道路陥没へ	大阪府大阪市	GL-6.0m (沖積砂層)	到達立坑，15m手前で到達坑口の処理を行うためシールドマシンを3日間停止させ，再掘進を行った時，マシンテール部の直上付近(マシン停止中では切羽直上位置付近)で路面沈下が大きくなり，最終的には約3㎡程度の空洞に拡大し道路陥没を発生させた.
ｼｰﾙﾄﾞ-40	地盤沈下	シールド路面陥没	神奈川県横浜市	土被り13m (沖積砂礫，粘土)	泥土シールド発進防護工(コラムジェット)を抜けた直後に路上が陥没
ｼｰﾙﾄﾞ-41	地盤沈下	シールド法面陥没	愛知県名古屋市	土被り15m (30cm玉石混じり洪積砂礫層)	30cm玉石混じり砂礫層で，直上の盛土法面が陥没した.

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	関連資料
想定以上に土質が変化し，通常の粘性付与材だけではチャンバー内の土をその土質に適合した状態(適正な止水性と流動性)を確保できなかった.	多種の粘性付与材をチャンバー内へ投入したが大きな効果が得られず，発泡裏込め材用起泡剤を発泡器を介して細かい気泡にし，マシンフィッシュテール先端よりチャンバー内へ注入した．気泡の水密性並びにベアリング効果により掘削土の取り込みが可能となった	地盤工学会収集資料
逸泥が発生した区間の掘削残土をみると，通常の砂に加えて5cm 程度の玉石が多く混入していた．このため，いわゆる「礫だまり」がこの区間に存在し，逸泥が生じたと考えられる.	調整槽に逸泥防止剤を緊急投入して逸泥量減少に努め，泥水配合も粘性が大きくなるものに変更した．一方で，排泥ポンプの負荷状況を監視し，流体輸送に影響が出ないようデータ監視を行った.	地盤工学会収集資料
-	-	地盤工学会収集資料
-	空洞充填注入.	地盤工学会収集資料
-	空洞充填注入.	地盤工学会収集資料
シールド機による土砂の取り込み量が，陥没箇所付近で計画値の倍以上になっていたこと，取り込み量が過多になった直後の措置が適切でなかったこと，取り込み量が計画値を超えた場合の体制の不備.	３日後に裏込め注入を行った.	日経コンストラクション (ｹﾝﾌﾟﾗｯｼｭ土木)
スクリューコンベアの閉塞が多発し，掘進停止後の再掘進時の切羽土圧低下による土砂の過剰取り込み，玉石の取り込みによる空隙の発生，掘進時の振動による緩い砂礫地盤の沈下などの要因が複雑に絡み合って発生した.	地表面からのCB注入による地盤改良を行った. 未施工箇所は，掘進管理体制の強化，路面監視，トライアル計測により問題なく施工した.	地盤工学会収集資料
シールドと陥没との因果関係はあると認められるものの，施工ミスではなく特異な地質が陥没の原因であると推定される.	-	日経コンストラクション編：建設事故
-	-	建設ニュースウォッチ 2010.3
-	-	地盤工学会収集資料
地表付近に潜在的な緩みもしくは空洞が存在したことが推察される.	緩み範囲を特定し，堤体の安全性確保のため，緩み部分を良質土に置き換えを行った. 堤体基礎部に薬液注入(LW-1水ガラス系88)を行った.	地盤工学会収集資料
-	-	日経コンストラクション2002.8.9号
-	-	日経コンストラクション2008.4
-	-	日経コンストラクション2009.4
-	-	地盤工学会収集資料
-	-	鉄道･運輸機構：みなとみらい21線工事誌
-	-	鉄道公団他：上飯田連絡線瀬古Ｔ(シールド)施工報告書

【トラブル事例一覧表(シールド編　その４)】

CODE No.	トラブル分類	トラブル名	発生地域	発生深度および地盤情報	トラブル概要
ｼｰﾙﾄﾞ-42	地盤沈下	泥土圧シールド掘進中にマシン後方で道路陥没発生	大阪府大阪市	-	φ7750mm泥土圧シールドで785Rを掘進中工法770R道路陥没．空洞充填注入．シールド掘進中，直上で陥没が発生，大型トラックが転落した．幸い負傷者はなかったが，大通が一時通行止めになった．
ｼｰﾙﾄﾞ-43	異常摩耗	推力不足でシールドジャッキを取り替え推進したシールド工事	兵庫県神戸市	GL-13.4m～-25.9m	カッタービット，外周ビットの磨耗が著しくビットが切羽を滑っている状態となり，推進スピードが低下しジャッキ推力の上昇によりセグメントの変形等が発生し推進不能に陥った．
ｼｰﾙﾄﾞ-44	異常摩耗	シールドの異常磨耗（１）	大阪府大阪市	GL-11.4m～-21.2m	ビット，フィッシュテール及びスクリューコンベアに異常磨耗が生じた．
ｼｰﾙﾄﾞ-45	異常摩耗	シールドの異常磨耗（２）	大阪府大阪市	GL-15.1m～-36.3m	カッターフェイスに異常磨耗が発生した．
ｼｰﾙﾄﾞ-46	異常摩耗	泥土圧シールド掘進中に止水シール不良によるマシン停止	大阪府大阪市	-	φ7750mm泥土圧式シールドで1km掘進中に土砂シール摩耗・破損．地中解体交換シールドマシンが約900m掘進したのちトルク超過により停止した．
ｼｰﾙﾄﾞ-47	セグメント破損等	セグメントにかけた過大荷重で破損，浸水	東京都中野区	土被り約54m	ジャッキがセグメントの所定の位置にうまくかからない状態でシールドを掘進したため，セグメントが破損して浸水した．
ｼｰﾙﾄﾞ-48	セグメント破損等	セグメントボルト破断(1)	大阪府大阪市当	GL-15.0m (砂混じりシルト)	本推進の段取り替えのためシールドマシンの推進を一時中断し，段取り替えを行った．その後，再掘進のためにシールドマシンを稼働したのと同時にシールドマシンの先端が落ち込み，テールから離脱した直後のセグメントボルトが破断し，セグメントが変形するとともに，目開きが発生した．
ｼｰﾙﾄﾞ-49	セグメント破損等	セグメントボルト破断(2)	大阪府大阪市	GL-20.0m (砂・砂礫)	311Ring推進中，309Ring上部右側から裏込め材が噴出，その後309RingのKセグメントが脱落し土砂と水が噴出．トンネル坑内の一部を水没させた．
ｼｰﾙﾄﾞ-50	セグメント破損等	セグメント目開き発生	大阪府大阪市	GL-10.0m (砂混じりシルト)	急曲線推進による，シールドシャッキ片押しによるリング間ボルトに目開きが発生．類似トラブル多数有り．
ｼｰﾙﾄﾞ-51	セグメント破損等	RCセグメントの破損	大阪府大阪市	GL-15.0m (シルト質粘土)	シールドマシンのテール部で組み立てたセグメントがシールドマシンと「セリ」の状態で推進したため，セグメントに欠け亀裂が発生し推進不能となった．類似トラブル多数有り．
ｼｰﾙﾄﾞ-52	セグメント破損等	テールシール清掃作業中に出水しトンネル完全水没	大阪府大阪市	GL-27.3m (粘土混じりシルト層(Dc-3))	シールドマシンのノーズダウンを解消するため，推進を中断し，圧気工法を補助とし，テールシールの清掃する計画を立てた．その施工過程において，突然マシンテール部より多量の湧水が発生(湧水量は，11.0m3/min)し，急遽圧気を開始したが，圧気隔壁に亀裂が生じ坑内の圧力上昇が困難となり湧水を防ぎきれずトンネル坑内が水没するに至った．
ｼｰﾙﾄﾞ-53	胴締め	曲線掘進における地山の崩壊	大阪府吹田市	GL-16m～-18m付近	泥水式シールドでの曲線掘進において，余掘り部で地山が崩壊し，胴締め現象が発生し掘進困難となった．

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	関連資料
原因は断層による破砕帯での地盤の不安定状態と考えられる.	シールド工事沿道の磁気探査を実施し，空洞がない事を確認した上で再発進が認められた.	地盤工学会収集資料
地盤中の石英分が多く混在し，ビットの磨耗が想定以上であったと当時は判断した.	対応策として，セグメントを補強(推力リブを添設)し，16本の100ｔシールドジャッキの内，上部のジャッキを除き10本のシールドジャッキを150ｔジャッキに取替えるとともに，片押し推進となるため片押し側の推力リブを補強し到達地点まで，強行推進し，計画位置に到達させた．途中の曲線推進区間でセグメントの片押しにより内円側のリング間ボルトに緩みが生じ，増し締めを繰返し行った.	地盤工学会収集資料
－	施工後のためなし	地盤工学会収集資料
立坑に引き出した時に判明したものであり，カッターフェイスの外周部の根元(シールド前胴側)が大きく摩耗し，隙間が大きくなっていた．これは，カッターフェイスとシールド前胴との隙間部(設計20㎜)から摩耗性の高い掘削土砂の流入が続いたため，カッターフェイス外周部の摩耗が進んだものと考えられる.	施工後のためなし	地盤工学会収集資料
止水シールの不良による土砂の流入であった.	ビット交換の際，面板を引き出して清掃，整備後再度組み立てて発進した．約2,000m掘進後同様に停止した事から，2,700m掘進予定を2,000mに変更し，別工区マシンで迎えに行く事とした. 原因はマシンの構造的な問題も考えられるが，詳細は不明. マシンは周辺支持方式でスラストローラによる姿勢保持をしていたが，この方式はセンターシャフト方式に比べてシールの延長が長くなる事から，シールの耐久性に課題があるとの見解もある.	地盤工学会収集資料
鋼製セグメントに変形が生じたままコンクリート製セグメントを組み立て，ジャッキがセグメントの所定の位置にうまくかからない状態でシールド機を掘進したためと思われる.	応急措置として二次災害の防止のため，トンネル内部を水で満たした.	日経コンストラクション (ｹﾝﾌﾟﾗｯﾂ土木)
仮推進を曲線区間(Ｒ＝200m)の途中でシールドマシン停止させ余掘りを掛けた状態で本推進に向けた段取り替え行った．このことが大きく関わっていると判断した. ① 推進地盤は沖積粘土層で地耐力は著しく小さい. ② 曲線推進の途中で余掘をしている状態でマシン周辺は更に地耐力が低下している. ③ 仮推進区間の推進は，マシン制御が不安定でセグメントがマシンと競った状態で停止している. この状態で再掘進を掛けた時，マシンは前のめり状態となり，マシンのテール部でセグメントを押し付けセグメントボルトが破断したものと推定し	①セグメント間の隙間から地下水の流入を裏込め注入を行い止水した. ②破断したボルトのセグメントを補強するため，セグメント内側にH-150×150のリングビームを3リング分組み立て再推進を行い本推進に切り替えた. ③変形したセグメントの安全性を確認するため，内空変形を定期的に計測した.	地盤工学会収集資料
当該セグメントの分割数は5分割でＫセグメントとＢセグメントの継手角度が17度で継手面に発生する軸力による剪断力は微小な組み立て誤差(ボルト穴はボルト径に対し3㎜の余裕がある)によってもピース間ボルトに掛かる剪断力は大きくなる．その状態で裏込め注入圧がＫセグメントに局部的に作用した場合は更に大きな剪断力が掛かることになる．原因は特定することは出来ないが複合的な原因によりボルトの破断が発生したものと推定する. なお，施工時荷重によるピース間ボルトの安全性確認はなされていなかった.	セグメントを仮補強した状態で裏込め材を連続注入し裏込め材で止水した. ①稼働しているシールドトンネルのピース間ボルトの安全性について施工時荷重から確認した. ②全てのピース間ボルトを高張力ボルトに変更した. ③ボルト締め付け管理を充実させた. ④裏込め注入圧が設定した以上に上昇すると	地盤工学会収集資料
コピーカッタによる余掘りが大きくマシンが直線になるまで裏込めができず，セグメントが振られ目開きが多く発生したと思われる.	①修正用テーパーセグメントを用いてテーパーロスを補った. ②セグメントの目開き防止に主桁を内側から溶接したがテールを抜けた時点で破断し効果が無く，目開き防止金具を作成した.	地盤工学会収集資料
シールドマシンのテール部で組み立てたセグメントがシールドマシンと「セリ」の状態で推進したため，セグメントに欠け亀裂が発生し推進不能となった．類似トラブル多数有り.	推進30cmごとにジャッキを緩め，マシンとセグメントの「セリ」を無くし，偏圧が掛からないようにする．また，セグメントの組立時にピース間ボルトの締め付け確認を，トルクレンチ等を用いて強化し，裏込め注入は即時に実施して地山とセグメントを一体化させ，推力等により発生する偏応力の発生を低減する	地盤工学会収集資料
隔壁ロックの設置位置を発進立坑から400m程度とし，鉄骨コンクリートとしたためコンクリートの品質管理に問題があり，コンクリートが発現強度に達していない部分がある状態で圧気を掛けなければならなくなったことが原因である．直接的には，全て準備が整っていない状態でシールドマシンのテール部のセグメントを移動させシール材の清掃を行ったためである.	切羽の地山を動かさなければ，道路・埋設物は現状維持が可能であると判断し坑内に滞留した地下水の排水は圧気圧による差圧排水を行なうこととした．この差圧排水するには，①発進立坑に縦ロックを設置し差圧排水を行いその後，横ロックに設置換えし排水を続行した．②排水スピードは遅くても早くても切羽を動かすことになるため，出水時に計測した水位変化グラフの逆のスピードで，圧気圧をコントロール(アキチューエーターバルブによる圧気圧制御)し排水した．排水完了後，マシンのカッタを回転させるため，インチング操作を繰返し回転させた.	地盤工学会収集資料
粒径加積曲線は流動化現象に注意すべきゾーンに含まれており，余掘り部で地山が崩壊し，シールド機の胴締め現象が発生したため.	掘削部周辺の地山に薬液注入を行うことにより，地山に粘着力を与え自立を図ることにより対応し解決した.	阪神水道企業団：第5期拡張事業 導･送水路工事記録

【トラブル事例一覧表(シールド編　その５)】

CODE No.	トラブル分類	トラブル名	発生地域	発生深度および地盤情報	トラブル概要
ｼｰﾙﾄﾞ-54	胴締め	胴締め現象の頻繁１	大阪府大阪市北区～淀川区	常に発生	Ma12～Ma11層の掘進全期間において常に発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-55	胴締め	胴締め現象の頻繁２	大阪府大阪市	常に発生	Ma12～Ma6層(掘進中)の洪積層掘進全期間において常に発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-56	胴締め	胴締め現象の頻繁３	大阪府吹田市～豊中市	常に発生	MaO, 下部の淡水成粘土FwcAQ～Fwcc層の洪積層掘進全期間において常に発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-57	胴締め	胴締め現象の頻繁４	大阪府箕面市～吹田市	常に発生	Ma3～Ma1層の洪積層掘進全期間において常に発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-58	胴締め	胴締め現象の頻繁５	大阪府大阪市	常に発生	Ma12～Ma11の洪積層掘進全期間において常に発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-59	胴締め	上下近接シールド掘進時のトンネルの挙動	大阪府大阪市	常に発生	Ma12～Ma6層(掘進中)の洪積層掘進全期間において常に発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-60	胴締め	大深度シールドでの胴締め現象の頻繁１	大阪府大阪市	常に発生	Ma7～Ma5層の洪積層掘進全期間において常に発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-61	胴締め	大深度シールドでの胴締め現象の頻繁２	大阪府大阪市	常に発生	Ma7～Ma5層の洪積層掘進全期間において常に発生した.
ｼｰﾙﾄﾞ-62	施工等	洪積砂層掘進中の胴締め現象(推力上昇, 蛇行)	大阪府大阪市	GL-10.7m～-29.5m	下りから上りの勾配変化点付近から推力が上昇し, マシン姿勢制御ができず縦方向に蛇行した.
ｼｰﾙﾄﾞ-63	施工等	シールド地中接続工事における地盤改良の造成不良	大阪府大阪市	-	地中接続工事で, ＣＪＧによる防護工事を行った後, 接続工事を実施したが, 造成不良が判明し, 止水凍結を併用して施工した.
ｼｰﾙﾄﾞ-64	施工等	送水路異常出水	兵庫県西宮市	土被り約9m	圧気併用手堀シールドで立坑から約80m掘進した時点で地下水位変動により出水した.
ｼｰﾙﾄﾞ-65	施工等	トンネル土砂噴発	東京都台東区	GL-14m付近 (透気性の高い埋め戻し砂)	シールドにおいて, 不透気土層があったことや薬液注入不良により, 切羽から圧縮空気が漏出し, 土砂を地表まで押し上げ, 地表面が陥没した.
ｼｰﾙﾄﾞ-66	その他	20年前の下水道管の亀裂による地盤沈下	岡山県岡山市	土被り約10m	20年前にシールド工法により敷設した下水道管に亀裂が入り, 深さ30cm, 直径約30mにわたり地盤沈下した

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	関連資料
-	滑材の利用や中折れ機構の活用，ジャッキ能力の増強	(35thJGS研究発表会)学園豊崎間(大阪都市部)1,2工区の大深度シールド掘進推力について(その1～3),2000.6,pp2115-2120
-	滑材の利用や中折れ機構の活用，ジャッキ能力の増強	(35thJGS研究発表会)学園豊崎間(大阪都市部)1,2工区の大深度シールド掘進推力について(その1～3),2000.6,pp2115-2120
-	滑材の利用や中折れ機構の活用，ジャッキ能力の増強	(36thJGS研究発表会)学園豊崎間(大阪都市部)3工区の大深度シールド掘進推力について,2001.6，pp1955-1956
-	滑材の利用や中折れ機構の活用，ジャッキ能力の増強	(36thJGS研究発表会)学園豊崎間(大阪都市部)4工区の大深度シールド掘進推力について,2001.6，pp1957-1958
-	滑材の利用や中折れ機構の活用，ジャッキ能力の増強	43th地盤工学シンポジウム,谷町筋と西梅田(大阪都市部)の大深度シールド掘進推力について,2001.6，pp109-114
-	滑材の利用や中折れ機構の活用，ジャッキ能力の増強	(35thJGS研究発表会)学園豊崎間(大阪都市部)1,2工区における上下近接シールド掘進時のトンネル挙動について,2000.6，pp2119-2120
-	滑材の利用や中折れ機構の活用，ジャッキ能力の増強	(34thJGS研究発表会)谷町筋と本町通(大阪都市部)の大深度シールド掘進推力について(その1～2),1999.7，pp1685-1688
-	滑材の利用や中折れ機構の活用，ジャッキ能力の増強	(34thJGS研究発表会)谷町筋と本町通(大阪都市部)の大深度シールド掘進推力について(その1～2),1999.7，pp1685-1688
推力上昇のためマシン姿勢制御が難しくなったのが大きな原因と考えられた．推力の上昇は，カッタートルクの異常上昇やシールドマシンの異常はないことから，洪積砂層における周面摩擦の増加であると考えられ，この砂層は，排泥土砂の分析結果では均等係数2.0前後の細砂であった．周面摩擦の増加原因は，胴締め現象であると推測される．	シールドマシンの姿勢制御をするため，以下の対策を講じたものの，推力の低減はあったもののマシンを上向きに姿勢制御するまでには至らなかった． ① マシン装備のけん引ジャッキ30ｔによるけん引，② 滑材の注入，③ シールドマシンのオーバーカット．そのため，次対策として60ｔけん引ジャッキ２本を増設し，総けん引力150ｔとした．その結果，対策を開始して22リングで計画の線形を回復することができ，最大蛇行量44mmとなった．	地盤工学会収集資料
土被りが大きかったこと(約20m)，地盤がよかった事(洪積砂礫層)が考えられる．	-	地盤工学会収集資料
地盤改良範囲の天端付近の盛土層との層境には逸水ゾーンがあり注入液が逃げた，また，付近には旧池があるため，潜在的な「水みち」が存在し，集中降雨による地下水が一気に流下し坑内に流入したことなどによる．	異常出水に伴い切羽付近の地山が乱されていると考えられたので，地盤補強の薬液注入を十分行い，シールド掘進については坑内圧気を行って再発進した．	阪神水道企業団：第5期拡張事業 導･送水路工事記録
地下連続壁の存在があり，流出経路となった連壁の周囲の地盤は，様々な要因から透気性の高い状態になっていた．また，障害となった連壁の施工終了後には，その上部に透気性の高い砂を埋め戻していた．加えて，薬液注入工事に不正があり，設計量の半分程度しか薬液が注入されていなかった．	-	日経コンストラクション編：建設事故
鋼製セグメントの下水道管の亀裂の一部から地下水が流入し，この亀裂から土砂が管内に流れ込み，周辺の地盤を沈下させたものとみられる．	応急措置としてグラウト材を下水道管の周囲の土中に注入．亀裂がふさがり，止水できたのをカメラと目視でそれぞれ確認した．	日経コンストラクション (ｹﾝﾌﾟﾗｯﾂ土木)

山岳トンネル(NATM)工事におけるトラブルについて
－発生事例からのトラブルの内容と地盤の特徴－

トラブル事例分科会 WG5 NATM グループ

概　　要

山岳トンネル(NATM)工事における，過去のトラブル発生の 12 事例から，トラブル発生の原因について地盤の特性とトラブルの内容に照準をあて整理した．それらを分析したところ，NATM 工事で遭遇するトラブルの多くは，脆弱で垂直に近い地層と高水頭の地下水が存在する現場であり，トンネル掘削(切羽位置)に伴い，その地下水が流入した場合に発生しているケースが多いことが判明した．ここではそのうち 4 例について具体的に紹介する．

キーワード：出水，切羽崩落，地表陥没

4.1　はじめに

12 の事例のトラブルの内容について整理するため，キーワードのトンネル内での現象，地上での現象等がどのように含まれているかを整理し，関係する地盤がどのようであったかを整理した．

今回整理した NATM 工事でのトラブルの発生した事例は，道路トンネル，鉄道トンネルであり，施工場所は全国的に位置している．

4.2　トラブルの現象と特徴

4.2.1　トラブルの現象

トラブルの現象について，出水，切羽崩壊と地表面陥没との関係を整理するため，**表 4.1** にトラブル時の切羽の現象と地表面への影響の有無および，土被りと地質の情報を整理した．

4.2.2　特徴

12 事例は，いずれも切羽でのトラブルであり(事例 4 は下半切羽)，この内の 9 事例は出水が伴っている．また，8 事例は地表面の陥没にいたっているが，必ずしも切羽付近で出水が発生していたわけではなく，9 事例中 7 事例は出水による切羽崩壊により地表面にまで影響がおよぶ結果となっている．

地表面陥没にいたった地質，地盤については，断層帯や風化岩等の脆弱な地層があり(一部膨張性の地山がある)，地下水が切羽へ流出したことによる切羽部の崩壊，土砂の流出が地表面陥没の原因となっている．

よって，NATM 工事のトラブル事例から言える特徴は，トラブルには切羽崩落が発生しており，そのメカニズムは切羽部付近やその上部の脆弱な地質や垂直に近い地層と地下水位が関係しており，地下水が切羽へ流入してきた場合には，地下水が脆弱な地質を伴って泥水化していること，流入量が増大して切羽崩落が拡大し，ついには土砂がトンネル内に流れ込み，地表面の陥没にいたっているというパターンが多い．

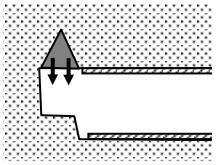
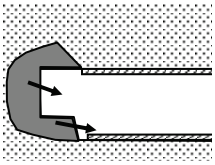
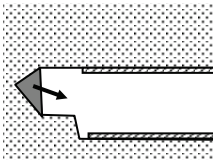
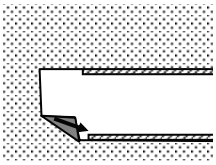
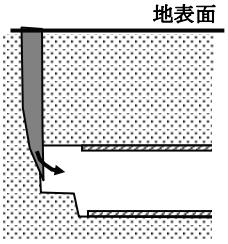
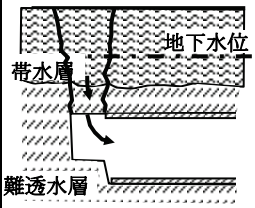
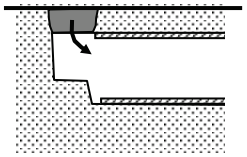
表4. 1　トラブルの現象

CDDE No.	出水	切羽崩壊	地表面陥没	土被り	地質等
NATM-1	○	○	○	80m	断層破砕帯
NATM-2	○	○	○	80m	陸上溶岩と火砕岩の互層
NATM-3	○	○	○	8m	粘性土層と軽石混じりの砂質土層
NATM-4		○※			シラス (※は下半切羽)
NATM-5	○	○	○	37m	陸上溶岩と火砕岩の互層
NATM-6	○	○	○	190m	灰爪層(砂岩･礫岩･泥岩)が垂直にあり，薄い断層を介在
NATM-7		○			神戸層群から六甲花崗岩の移行区間
NATM-8	○	○			六甲花崗岩：硬質花崗岩と強風化花崗岩の境界部
NATM-9	○	○			丹波層群
NATM-10		○	○	29m	(情報なし)
NATM-11	○	○	○	18m	上部：水田(盛土)，その下：砂層，砂岩と泥岩の互層
NATM-12	○	○	○	130m	膨張性泥岩

4.2.3　陥没・崩壊の現象

NATM 工事での地表面の陥没や崩壊は，いろいろな要因が複雑に絡み合った結果として発生するため，要因の特定は困難である．しかし，トンネルの崩壊現象についてこれまでのトラブル事例および既往の文献(HSE[1])により，**表 4.2** により整理される．

表 4.2　トンネル崩壊現象の概念[1)を編集]

崩壊要因	切羽周辺の不良地山 鏡面などの弱層で囲まれたブロック	
模式図	天端崩落 	全断面切羽崩壊 
	上半切羽崩壊 	ベンチ崩壊 
崩壊要因	天端部の弱層 (鉛直に近い傾斜を持った亀裂，井戸など人口構造物)	帯水層下位にある難透水性薄層
模式図	地表面 	地表面 地下水位 帯水層 難透水層 
崩壊要因	小土被り	
模式図	地表面 	

4.3　トラブルの事例

4.3.1　事例 1 (NATM-2)

国道 142 号線の湖北トンネルにおいて平成 11 年 2 月に発生したトラブルである[2)].

1) 掘削工法：全断面掘削工法

2) 土被り　：80m

3) トラブルの状況：

平成 11 年 2 月 14 日から 15 日にかけて切羽の隅に開いた穴から，地下水とともに 14,000m^3 の土砂が坑内にあふれ出し，切羽付近は完全に土砂で埋まった．**図 4.1** 推定縦断図で示すように，この土砂の流出により切羽の真上にあたる山の地表面を流れる竹の沢のすぐ脇に直径約 25m，深さ約 30mの大きな陥没地ができた．

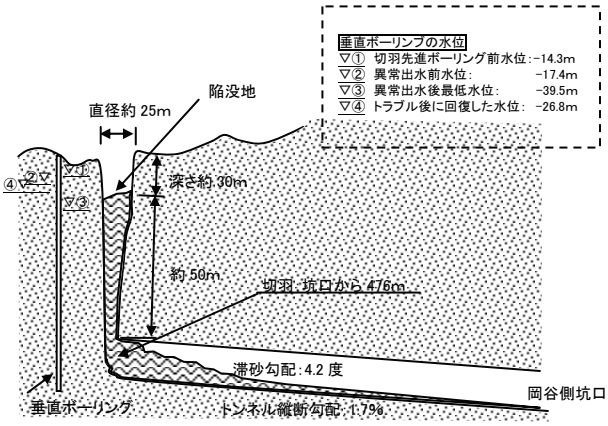


図4.1　切羽付近推定縦断図

泥水は坑外にまで流出したが，坑口近くに調整池があったため，住宅地へ泥水が流れ込むのを防ぐことができた．

4) トラブルの原因：

砂礫質地盤の中をある程度の速度で水が流れ，水に引きずられるように砂が動き出したと考えられる(クイックサンド現象)．この現象は，この付近の地質構造に大きく係わっている．この地域は，中央構造線と糸魚川－静岡構造線が交差している位置にあり,中央構造線が粘土化を伴う破砕帯を形成し地山を砂礫質にしていたと推定されている．それに対して，糸魚川－静岡構造線は粘土化が卓越しており遮水帯が形成していたと考えられる．破砕されて透水性が高くなっている地山中に遮水帯がありトンネル掘削によって地下水位が下がりにくくなっていたことが，クイックサンド現象の要因の 1 つと考えられる．

5) トラブル発生後の対応方法：

事故発生時に大量の地下水が流出したため，切羽前方の地下水位は一時的に低下した．その後，地表から陥没地に向けて斜めに調査ボーリングを行ったところ，地下水位は再びトンネル上端から 60m 程度の位置に戻った．平成 11 年 3 月末までに坑口から 365m，切羽の手前 111m まで土砂を撤去したが，これ以上撤去すると，堆積した土砂と水圧のバランスが崩れ，再び土砂が流出する恐れがあったため，水平ボーリングによって切羽前方から水を抜き，地下水位を下げた．そして，掘削の再開に先立って地盤を固めるためにセメント系の凝結剤を注入し掘削を再開した．

4.3.2　事例 2 (NATM-5)

東北新幹線の八甲田トンネルにおいて平成 12 年 12 月に発生したトラブルである[3)].

1) 掘削工法：補助ベンチ付き全断面掘削工法(ショートベンチカット工法から変更)

2) 土被り　：37m

3) トラブルの状況：

八甲田トンネルは，約 26.5km のトンネルであり，起点方坑口から約 1km 進んだ地点で平成 12 年 12 月

14 日，切羽が大崩落した．大崩落が発生するまでは，下記のような切羽の状況であった．

大崩落 2 日前；

鏡面の岩石が剥がれ落ちる肌落ちが，切羽の上端左側から始まった．コンクリートを吹き付けたが，肌落ちは止まらなかったので，応急措置として金網を 2 枚張り付けた．その後も水を含んだ砂が切羽から坑内へ断続的に流入し，切羽上部の空洞が大きくなっていった．空洞を埋める作業の足場を確保するため，切羽へ斜路を取り付ける作業を進めていた．

大崩落 1 日前；

切羽で最初の小崩落が発生した．

大崩落当日；

12 月 14 日午後 8 時 50 分頃切羽が大崩落した．水を多く含んだ土砂（砂岩層）が，坑口側に向かって約 70m，総量にして約 3,800m^3 流出した．崩落発生箇所の地上部の状況は，土被り約 35m に当たる山林の地表面に直径約 20m の陥没が見つかった（**図 4.2**，**図 4.3** 参照）．

4）トラブルの原因：

切羽の左上部に強度の低い砂岩層が分布しており，中でも流動化しやすい砂岩が，レンズ状に垂直に立った状態でごく局部的に（透水性の悪い凝灰岩にほぼ垂直に挟まれた地層として）存在していた．その端部にトンネルの天端が当たり，地下水圧が高くなっていた砂岩層に逃げ道ができたため，砂岩層が不安定になり，初期段階の流動が生じた．さらに，天端に湧水が集中したことで空洞が拡大したため，切羽周辺の強度の低い砂岩が自重を支持できなくなり，一気に多量の地下水と土砂が坑内に流入し地表が陥没した．

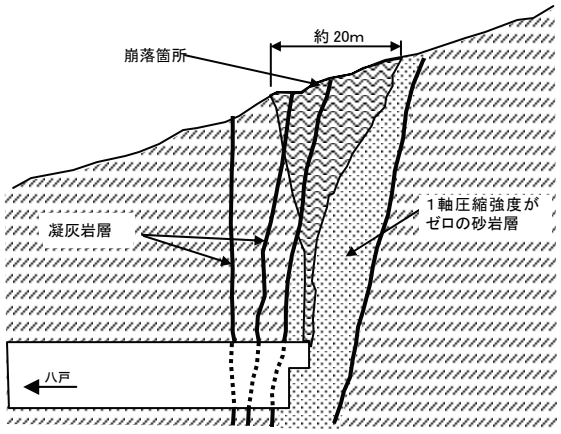


図4.2　切羽付近推定縦断図

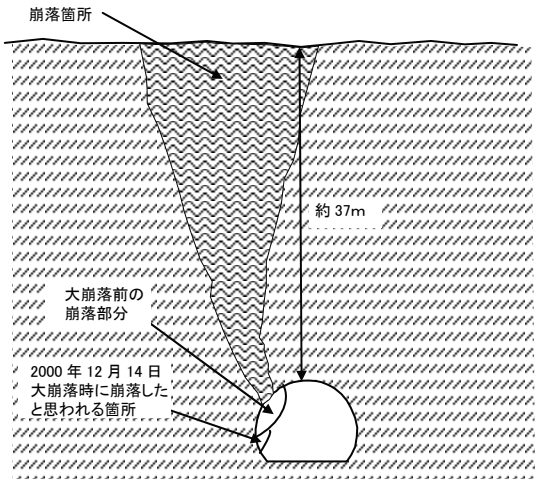


図4.3　切羽付近推定横断図

5）トラブル発生後の対応方法：

地表の陥没部周辺で垂直及び斜めボーリング（7 本）を実施し，工事再開に向けての対策工の設計の資料を得ることとした．

4.3.3　事例３（NATM-11）

首都圏中央連絡道路の笠森トンネルにおいて平成 22 年 2 月に発生したトラブルである[4]．

1）掘削工法：全断面掘削工法（補助工法：AGF 先受け工法，水抜きボーリング）

2）土被り　：18 m

3）トラブルの状況：

NATM 工法で掘削中のトンネル切羽で 300ℓ／分前後で推移していた湧水量が，同日午前 4 時頃 2,000ℓ／分まで増加した．その後一時減少したものの，午前 10 時頃に再び増加して最大 8,000ℓ／分になり，濁水と土砂が坑内に急激に流入した．

4）トラブルの原因：

地形・地質については，地表面の工作地は旧地形の沢部に挟まれた山体を山砂採取して出来た平坦地であり（地形図，航空写真から判明），旧地形の沢部はトンネル切羽右前方に接近しており，この沢部を反映した「水みち」が存在した可能性がある（調査ボーリング，表面波探査より推定）．

これに加え，多量の降雨が影響したと考えられる（技術検討委員会の見解）．5 月から 8 月までの 4 カ月間の降雨量は月平均約 80mm だったのに対し，9 月と 10 月は約 350 mm と 4 倍以上の降雨があり，この影響で地下水位が上がり，切羽が水みちに近づいた時，万田野層の下部にある流砂化しやすい砂が，地下水とともに坑内に流入したと考えられる．水みちから地下水が継続して供給されたので，流砂の通り道となった箇所で周囲の土砂が浸食され土砂に緩みが発生．緩みが地上にまでおよび，陥没にいたったと推測した（**図 4.4** 参照）．

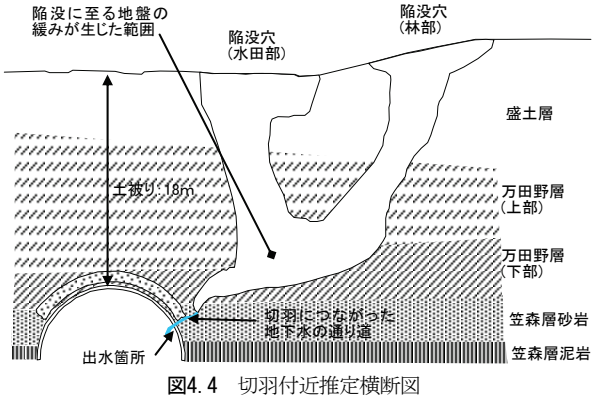


図4.4　切羽付近推定横断図

5)　トラブル発生後の対応方法：

・崩落直後の対策

崩落直後には切羽の崩落と陥没の進行を抑えるために，坑内において堆積土砂を 1t 土のうで抑え，水抜きの排水管を設置して吹付けコンクリートで固めた（**図 4.5** 参照）.

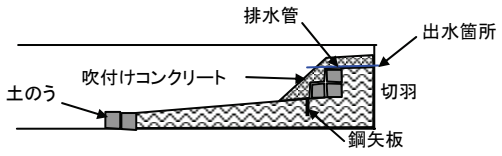


図4.5　切羽付近応急対策断面図（崩落直後）

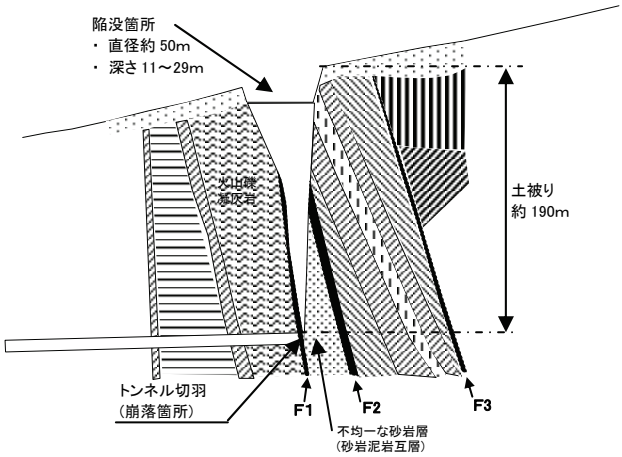


図4.6　切羽付近縦断図

・トンネル掘削再開の対策

トンネル掘削の再開に当たっては，陥没箇所およびその周囲の地盤改良を行った．先ず陥没部の外周部に瞬結タイプの改良材を笠森層まで注入し，その内側は緩結タイプの改良材で強化した．切羽付近で湧水が発生した部分も瞬結タイプの改良材で補強した.

4.3.4　事例 4（NATM-6）

北陸新幹線の飯山トンネル（上倉工区）において平成 15 年 9 月に発生したトラブルである[5), 6)].

1）掘削工法：補助ベンチ付き全断面掘削工法（ベンチ長 3～5 m）

2）土被り　：190m

3）トラブルの状況：

約 22 km のトンネルの起点方から約 4km の施工区間において，坑口付近に斜坑を設置して本坑掘削を行った．約 4 km の施工区間のうち，切羽が約 2.8km（高崎起点 151km087m 付近）であり，薄くて垂直な断層（F1）が現れた．この断層（F1）と次の断層（F2）の間には，地下水が被圧された状態の未固結で粒度の粗い砂からなっている砂岩層が垂直に存在していたため，平成 15 年 9 月 11 日 AM 3：00 頃，掘削（補助ベンチ付き全断面掘削：ベンチ長 3～5m）がこの断層位置に達した時，トンネル上半左肩より約 1.5m^3/分程度の湧水とともに最初の崩落が発生した.

その後，第 2～4 回目にわたる崩落で土砂が切羽後方 1,234m 付近まで達し，設置してあったツインヘッダーなど機械類も流出土砂とともに切羽から 550m まで押し流された. **図 4.6** に示すように地上部は土被り 190m の地表面が直径約 50m，深さが約 11～29m も陥没する大事故となった.

坑内への流入土砂は地上陥没の状況と坑内流出状況から約 30,000m^3 に達すると推定された.

4)　トラブルの原因：

トンネル崩壊の原因は，**図 4.6** に示す F1･F2 断層沿いの泥岩などにより遮蔽された高水頭の地下水が，トンネル掘削により薄くなった断層を最初に崩壊し，二つの断層に挟まれた極めて狭い区間の未固結で粒度の粗い砂からなっている砂岩層が，泥岩および F1 断層を地下水とともに突き破り崩壊したと推定される.

5)　トラブル発生後の対応方法：

地上の陥没した個所は，積雪による上載荷重の増加，春先の融雪による陥没部への集水および安全管理上の観点から，陥没部にふたをかけるようにエアミルク（比重 0.6 程度）を流し込んだ．坑内はセントルの解体や掘削機械類の撤去後，陥没部と坑内流出土砂の土圧バランスを計算し，下半は崩壊個所から 190m まで，上半は 50m 付近まで坑内土砂の撤去を行うとともに，バルクヘッドとして厚さ 1m の土のうと 2.5～4.0m 厚のコンクリート壁を構築することとした.

崩落部の復旧計画は，次の①～⑥とした.

① 上倉工区は崩落個所から 50m までの区間に崩落部周辺の地山注入のリーク止めとしてプラグ注入.

② 崩落部周辺への 1 次注入.

③ 上倉および隣接工区の富倉工区から水抜きボーリングで水位を低下.

④ その後，富倉工区から崩落部周辺への地山注入.

⑤ その後，富倉工区より崩落個所近傍の地山への注入状況を確認しながら掘削（崩落部を通過）.

⑥ 上倉工区は富倉工区が到達後，バルクヘッドから崩落個所までのプラグ注入区間の土砂撤去（復旧完了）.

4.4　考察

これらの NATM 工事のトラブルでは，特徴に記したように脆弱で垂直に近い地層と地下水位の存在が大きな要因となっている．事例 1 は 2 本の断層が存在し，切羽付近の断層が難透水層，次の断層が帯水層であった．事例 2 は，難透水層の固い凝灰質砂岩の背後上部に含水未固結砂層が存在した．事例 4 は，難透水の泥岩の背後に断層で脆弱化した不均質な砂岩層が存在した．事例 3 以外のトラブルは，地質構造こそそれぞれ異なるが，切羽崩壊にいたった

原因は同じといえる．すなわち，難透水の固い岩の上部または背後に高い水頭を持った未固結層が存在し，難透水の固い岩が，トンネル掘削によって厚さを減ずることにより，水圧に耐えられなくなり，一気に崩壊したものと推定されるということである．

そこで，このような事例からの教訓として，直接的には，

- 難透水層の背後にある高水頭の未固結または脆弱化した不均質な帯水層に注意．
- 存在が確認されたら水抜きにより水圧を減じる．

ということになるが，さらに，

- 立った地層には十分注意．
- 先方や上方に帯水層があるかの確認．
- 谷地形の末端部及びリニヤメント付近に注意．
- 湧水量に目を奪われがちだが水圧に注意．
- 水圧が高いのに水が止まれば要注意＝遮水壁の存在により一時的に湧水量が減少したのかも．

ということがいえる．

また，道路トンネルにて 1 期線が約 100m 離れで共用しており，施工の際の情報も得ていた．さらに地表からの垂直ボーリング，切羽からの水平ボーリングを行うなど地質調査は十分に行われていたと考えられるにかかわらず，トラブルが発生したという他の事例もある．

このことは，トラブルから得られた教訓を前述したが，実際には，いかに必要な地質の情報を得ることが難しいかを示している．したがって，複雑な地質のトンネルを掘削する場合（事前の地質調査が十分でない場合）は，当然のことではあるが，常に前方の地質や帯水層（必要により水圧）を確認しながら掘削することが重要である．とかく掘削前に作成した地質縦断図は信用しきって掘削が進められがちだが，その地質縦断図は事前調査（十分な調査ができていない場合が多い）からの単なる推定でしかないことを肝に銘じなければならない．

4.5　おわりに

事前の調査ボーリングや掘削に伴う水位観測，水抜きボーリングを併用しながらの施工でもトラブルが発生している．このことは，脆弱で薄くかつ垂直になっているためその存在が予測しがたいこと，よって地質の性状が把握しにくいことと，高水圧の地下水の存在が複雑に関係しためと考えられる．また，切羽からの調査ボーリングは掘削進行を止めるため実施されることが少ない．しかしながら，複雑な地質構造や脆弱な地層や地下水の存在が考えられる場合には，事前調査での地質縦断図を鵜呑みにせず，切羽前方の地質確認と被圧水の水抜きを実施し，トラブルの回避につなげることが重要である．

参考文献

1） Safety of New Austrian Tunneling Method（NATM）Tunnels, Health and Safety Executive, Suffolk, pp.20-21, 1996.

2） 日経コンストラクション　建設事故-重大災害 70 例に学ぶ再発防止対策，湖北トンネル土砂埋没，pp.73-75，2000.

3） 日経コンストラクション　建設事故Ⅱ-身近に潜む現場の事故 72 例, 八甲田トンネル市ノ渡工区工事, pp.80-83, 2007.

4） 藤本克郎，栁森豊，斎藤庸，小川渉，竹内辰典：笠森トンネルにおける大量出水および地表陥没の発生原因とその後の対策について，土木学会トンネル工学報告集，Vol.21，pp.65-70，2011.

5） 都築保勇，黒岩清貴，福入博文，杉本憲一：高水頭未固結砂岩層の大崩落とその克服－北陸新幹線　飯山トンネル（上倉工区・富倉工区），トンネルと地下，Vol.39，No.8，pp.7-14，2008.

6） 日経コンストラクション　建設事故Ⅱ-身近に潜む現場の事故 72 例，飯山トンネル上倉工区工事，pp.84-87, 2007.

【トラブル事例一覧表(NATM 編　その１)】

CODE No.	発生年月日	工事名	発生地域	位置情報	発生深度および地盤情報	トラブルの概要
NATM-1	1985年3月	生駒トンネル	東大阪市	近鉄けいはんな線生駒トンネル導坑切羽	西坑口（新石切駅側）から745mの切羽	大阪府東大阪市生駒山中の生駒トンネル掘削工事現場で異常出水が発生し，坑内土砂崩壊，地表地盤陥没が発生した.
NATM-2	1999年2月	湖北トンネル	長野県岡谷市	国道142号線：諏訪湖の北岸	土被り80m （第四紀更新世塩嶺累層砂礫質地盤）	湖北トンネル坑内の断続的な出水に伴って大量土砂が流入し，切羽付近は土砂で埋まり，地表面で大規模陥没が発生した.
NATM-3	2005年5月	牛鍵トンネル	青森県十和田市	東北新幹線：八戸・新青森間	土被り8m（第四紀更新世段丘堆積層粘性土・砂の互層）	切羽後方480mのインバート掘削をしていた箇所の近傍で，上部の水田に張った水が側壁の背面に回りこみ大きな圧力が作用してトンネルが崩壊し，地上の畑がトンネル縦断方向に60mにわたり陥没した.
NATM-4	2000年4月	薩摩田上トンネル	鹿児島市	九州新幹線：川内・鹿児島中央間	シラス、坑口から380ｍの切羽	地下水位はトンネルよりも低い均質なシラス地盤を掘削する中、下半の切羽を2分程度の勾配で掘削中，突然切羽が崩落し作業員２名が負傷した.
NATM-5	2000年12月	八甲田トンネル(市ノ渡工区)	青森県天間林村	東北新幹線：八戸・新青森間	砂岩層が凝灰岩に垂直に挟まれた地層。土被り約37m	切羽で、最初の小崩落が発生、1日後 切り羽が大崩落し、水を多く含んだ土砂（砂岩層）が坑口側に向かって約70m、総量にして約3,800m3流出した。上部土被り約37mの山林の地表面が直径約20m陥没した。
NATM-6	2003年9月	飯山トンネル(上倉工区)	長野県飯山市	北陸新幹線：長野・上越間	土被り190m，複雑な地層（灰爪層が垂直に近い状態で存在し、薄い断層が介在）東側坑口から600m付近の切羽	切羽前方で，水を通しにくい2つの層の間にあり　水を含む非常に軟弱な砂岩層が掘削により崩壊し手前の層を突き破って坑内に土砂3万m3が流入した．地上部の山林が直径50m近く陥没した.
NATM-7	1993年10月～1998年3月施工	新唐櫃トンネル①	神戸市北区有野町唐櫃付近	阪神高速７号線北神線	神戸層群から六甲花崗岩の移行区間	断面崩壊及び内空変位（STA.244+43～53.0付近）Ｈ鋼支保工施工後に支保工天端から掘削断面下端にわたる亀裂が入り、内側に押されて変形した。
NATM-8	1993年10月～1998年3月施工	新唐櫃トンネル②	神戸市北区有野町唐櫃付近	阪神高速７号線北神線	西側坑口から600m付近の切羽（六甲花崗岩）	切羽の崩落（STA.236+24.0～44.0付近）一次覆工後に長さ10mにわたって断面内側に20cm程度の変状が発生

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	キーワード	関連資料
幅400～500mに達する断層破砕帯が存在し，複雑な地下ダムのような形状で地下水が貯留されていた。坑内の水平ボーリングにより、この破砕帯の表面を覆っていた粘土層が破れ，地下水とともに土砂が流出した。		出水 切羽崩壊 地表陥没	柴田徹：関西における地盤問題の中から，土質工学会土と基礎，Vol.36, No.11，pp.3-8，1988.
破砕されて透水性が高くなっている地山中に遮水帯があり、トンネル掘削によっても地下水位が下がりにくくなっていたため、クイックサンド現象が発生し、坑内への出水、土砂流出となった。	事後の対応：事故発生後地下水位は再びトンネル上端から60m程度の位置に戻ったため、水平ボーリングによって切羽前方から水を抜き，地下水位を下げ、掘削の再開に先立って地盤を固めるためにセメント系の凝結剤を注入し掘削を再開した。	出水 切羽崩壊 地表陥没	日経ｺﾝｽﾄﾗｸｼｮﾝ〔単行本〕：建設事故-重大災害70例に学ぶ再発防止対策，pp.73-75，2004.
トンネル上部は、土被りは8m程度と薄く、水田であった。トンネル上方付近には粘性土層があり、トンネルの掘削工事の影響で粘性土層に亀裂が生じていた。水田に張った水によって粘性土層より上の砂質土層の地下水位が上昇していた。トンネルの掘削により、トンネル天端の粘土層と砂質土の層境から　掘削により緩んだ箇所を水みちとしてトンネルの側壁の背面に地下水が回り込んだ。このことにより、トンネル周辺の土に水圧を加えることとなり、支保工の足元が緩み、天端が崩落した。	事後の対応：インバート施工方法の改善：12mの掘削長を6mに改めた。崩落箇所の施工：開削トンネルで施工。	低土被り 地下水位上昇 トンネル崩壊 地表陥没	日経ｺﾝｽﾄﾗｸｼｮﾝ〔単行本〕：建設事故Ⅱ-身近に潜む現場の事故72例 東北新幹線トンネルの設計施工の研究牛鍵トンネルWG報告書(H18年-3月：日本トンネル技術協会)
切羽（シラス）の状態は均一で、ドライな状態であったことから、下半の切羽の勾配が1：0.2で自立していたが、ロックボルト及び吹付けコンクリートを施工していなかったため、自立するバランスが崩れ一瞬にして崩落することになった。	事後の対応：下半切羽の勾配を２分から４分に変更、長さ4mのファイバーボルト10本を下半切羽の打設、下半切羽面、下面に吹付けコンクリートを施工。	切羽崩落 シラス	日経ｺﾝｽﾄﾗｸｼｮﾝ〔単行本〕：建設事故Ⅱ-身近に潜む現場の事故72例 鉄道公団　九州局　「業務研究会」資料
強度の低い砂岩層が分布し（中でも流動化しやすい砂岩がレンズ状に垂直に立った状態でごく局部的存在していた）、地下水圧が高くなっていた砂岩層の端部にトンネルの天端が当たったため、天端に湧水が集中し、多量の地下水と土砂が坑内に流入し、地表が陥没した。		低土被り 出水 切羽崩壊 地表陥没	日経ｺﾝｽﾄﾗｸｼｮﾝ〔単行本〕：建設事故Ⅱ-身近に潜む現場の事故72例，pp.80-83，2007. 八甲田ﾄﾝﾈﾙ(市の渡工区)635Km247m付近崩落箇所の地質評価(鉄道総合技術研究所)
F1,F2断層沿いの泥岩などにより遮蔽された高水頭の地下水が、トンネル掘削により薄くなった断層を最初に崩壊した。二つの断層に挟まれた極めて狭い区間の未固結で粒度の荒い砂からなっている砂岩層が、泥岩およびF1断層を地下水とともに突き破り崩壊したと推定される。	事後の対応：地上の陥没した個所は、エアミルクを充填。坑内は、崩落部周辺の地山注入を行い、水抜きボーリングで十分に水位を低下させ、更に、崩落部周辺の地山注入を行なった。注入状況を確認しながら掘削を実施。	出水 切羽崩壊 地表陥没	都築保勇，黒岩清貴，福入博文，杉本憲一：高水頭未固結砂岩層の大崩落とその克服－北陸新幹線飯山トンネル(上倉工区・富倉工区)，トンネルと地下，Vol.39，No.8，pp.7-14，2008. 日経ｺﾝｽﾄﾗｸｼｮﾝ〔単行本〕：建設事故Ⅱ-身近に潜む現場の事故72例，pp.84-87，2007.
上半先進ベンチカットで掘削中、神戸層群から六甲花崗岩へ移行する地質付近で、神戸層群が水分を含み泥濘化したことにより崩落した。また、六甲花崗岩には粘土を噛んでいるため小崩落が続いた。	事後の対応：崩壊部に5㎥の発砲モルタルを充填し、ウレタン注入ボルト、天端へのフォアパイリング、鏡へのウレタン注入。小崩落箇所には、モルタルによる上半の仮併合、6mの増しロックボルトを施工。	切羽崩壊 断層	第22回日本道路会議論文集，pp.166-167，1997. 阪神高速道路北神戸線工事誌，pp.226-228，2004.
切羽付近の地質が、硬質な花崗岩と強風化花崗岩の境に入った付近で、湧水が発生し、切羽付近の脆弱な地質に亀裂が生じ、崩落した。	事後の対応：崩壊部、切羽鏡に吹付けコンクリート、6mの増しロックボルト、及び上半の仮インバートを実施。ロックボルトは自穿孔タイプのウレタン注入に変更、フアパイリングを実施。	出水 切羽崩壊	第22回日本道路会議論文集 阪神高速道路北神戸線工事誌

【トラブル事例一覧表(NATM 編　その２)】

CODE No.	発生年月日	工事名	発生地域	位置情報	発生深度および地盤情報	トラブルの概要
NATM-9	1996年12月～2003年3月施工	稲荷山トンネル	京都市伏見区～山科区付近	阪神高速８号線	東側坑口から1000m付近の切羽（丹波層群）	切羽付近から突発湧水（10ℓ/分）があり、脆弱化した天端が1㎥ほど抜け落ちたあと、湧水量が急増（100ℓ/分）し切羽が崩落した。
NATM-10	2011年12月	圏央道　山口トンネル	千葉県木更津市	首都圏中央連絡道路	土被り29m、東側坑口より52m。	トンネルの切羽付近の天端が崩落（土砂の量は約200㎥、目立った湧水は報告されていない）し、堆積した土砂にコンクリート吹付けを実施し、観察をしていたところ、2日後に地表の山林で陥没が見つかった。
NATM-11	2011年10月	圏央道　笠森トンネル	千葉県長南町～市原市	首都圏中央連絡道路	土被り約18m。	切羽で300ℓ／分前後で推移していた湧水量が、2000ℓ／分まで増加した。その後、一時減少したが再び8000ℓ／分まで増加し、濁水と土砂が坑内に急激に流入した。上部の水田部の陥没は直径15m、深さ8mに、林の陥没は直径13m、深さ10m以上になった。
NATM-12	1999年12月	日暮山（ニックレヤマ）トンネル	群馬県甘楽郡下仁田	上信越道（日暮山トンネルⅡ期線）	土被り130m，膨張性泥岩。東坑口から900mの切羽。	東坑口から約900mまで到達した地点で、最初の天端崩落（約250㎥）、鏡吹付けにクラック、天端付近より湧水（0.05ℓ／分→0.4ℓ／分）となった。翌日、鏡の押し出し、鏡の吹付けを繰り返し（切羽の押し出し量約11m）、湧水が天端付近から突発的に発生、“ドーン”という音とともに大崩落が発生、濁流が坑口方向へ流出した。上部の地表部陥没は直径30m、深さ9～18m、周囲で地割れも発見した。

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	キーワード	関連資料
水抜きボーリングを実施しながら掘削を実施してきたにも関わらず突発湧水に見回れたことから、かなり多層に断層帯があったことと思われる。	事後の対応：有孔プレスト管（Φ150mm）にて導水しながら、鏡と湧水箇所に吹付けコンクリートを実施し、崩落箇所を閉塞させた。また、AGF鋼管を用いて水抜きボーリング（切羽左、右）を実施。	出水 切羽崩壊	阪神高速道路京都高速道路建設誌，pp.2-77～2-78，2010.
		切羽崩壊 地表陥没	日経コンストラクション〔単行本〕：建設事故Ⅱ-身近に潜む現場の事故72例
5月から8月までの4カ月間の降雨量は月平均約80mmだったのに対し、9月と10月は約350mmと4倍以上の降雨があり、この影響で地下水位が上がり、切羽が水みちに近づいた時、万田野層の下部にある流砂化し易い砂が地下水とともに坑内に流入した。さらに、流砂の通り道となった箇所で周囲の土砂が浸食され土砂に緩みが発生し、緩みが地上にまでおよび、陥没に至った。	直後の対策：坑内において、堆積土砂を1ｔ土嚢で抑え、水抜きの排水管を設置して、吹付けコンクリートで固めた。 掘削再開のための対策：陥没箇所及びその周囲の地盤改良（陥没部の外周部に瞬結タイプの改良材を笠森層まで注入し、その内側は緩結タイプの改良材で強化）し、切羽付近で湧水が発生した部分も瞬結タイプの改良材で補強した。	低土被り 地下水位上昇 切羽崩壊 地表陥没	日経ｺﾝｽﾄﾗｸｼｮﾝ〔単行本〕：建設事故Ⅱ-身近に潜む現場の事故72例
崩落箇所は、土被り130mあるものの、トンネル上部の泥岩層厚は25mまで減少しており、泥岩上部の崖錐堆積物と地下水が荷重として泥岩層に作用し、層厚が減少した泥岩層が上載荷重に耐えられなくなり、崩落に至ったと考えられる。	事後対策： 陥没箇所は、エアミルクによる充填を実施、坑内からは、 水抜きボーリング（東側から7本、西側から13本施工し、最大排水量は1.4t／分）を行い、掘削に先立ち注入を実施した。	出水 切羽崩壊 地表陥没	藤田芳邦，谷井敬春，高橋浩，菊池祐一：土かぶり130mの地表面陥没に至った大崩落，トンネルと地下，Vol.34，No.1，pp.7-14，2003.

推進等工事におけるトラブルについて
－地盤特性ごとの発生トラブル現象の傾向－

トラブル事例分科会 WG6 推進等グループ

概　　要

推進工事および TBM 工事における過去のトラブル事例を収集し，トラブル現象ごとに整理した結果，発生するトラブル現象は，地盤特性ごとに特徴的なものが多いことがわかった．ここでは，推進工事での代表的なトラブル現象と TBM 工事でのマシン拘束現象について，具体例を挙げて紹介する．

キーワード：出水，土砂流出，精度不良，抵抗力増加，マシン拘束

5.1　はじめに

非開削工法のひとつである推進工法は，シールド工法同様に地下埋設物の多い都心部を中心に，主に下水道工事等で採用されている．施工方法は，発進立坑の背面地盤に推進反力をとって掘進機を前進させ，立坑内で推進管を継ぎ足して地盤内に空間を構築するもので，推進管径は概ねφ3,000mm 程度までであるが，その多くはφ800mm 以下の小口径管である．一方，TBM 工法は，山岳部の比較的良好な地山において，機体内のメイングリッパで周辺岩盤に直接推進反力をとって前進する工法で，トラブルなく掘進すれば高速施工が可能となる特徴を活かし，大断面トンネルにおける先進導坑や水路トンネルとして採用されることが多い．

本稿では，これら推進工事および TBM 工事における地盤に起因して発生した過去のトラブル事例を収集し，そのトラブル現象と代表事例について紹介する．

5.2　トラブルの現象と特徴

推進工事における代表的なトラブルは，推進地盤ごとに大別すると，砂質地盤では，発進・到達時の坑口部における出水・土砂流出およびそれに起因する路面陥没などが挙げられ，粘性地盤では，軟弱地盤での推進精度不良や粘性土の面板付着で面板閉塞を起こした際の推進抵抗力増加などがある．また，礫地盤では，推進地盤の不均質による推進精度不良や滑材逸走による推進抵抗力増加などが挙げられる．一方，TBM 工事では，断層，破砕帯，膨張性地山など不良地山に遭遇した際の切羽崩落，マシン拘束などとともに，湧水地山での異常出水によるトラブルなどが挙げられる．

表 5.1 に収集したトラブル事例を示す．収集したトラブル事例は，推進工事が 20 件，TBM 工事は 1 件だけであったが，トラブルの内容は前述した代表的なトラブルに類似するものが中心であった．

以下，推進工事でのトラブル現象とその代表事例を紹介し，最後に TBM 工事でのマシン拘束によるトラブル事例を紹介する．

表 5.1　収集したトラブル事例(推進工事・TBM 工事)

CODE No.	トラブル現象	土質	発生時期
推進-1	推進精度不良	互層(砂礫/粘土)	推進中
推進-2	推進精度不良	シルト質土(軟弱)	推進中
推進-3	推進精度不良	巨石混じり砂礫	推進中
推進-4	推進精度不良	巨石混じり砂礫	初期推進時
推進-5	推進精度不良	互層(砂礫/岩盤)	推進中
推進-6	出水	細砂	初期推進時
推進-7	出水	巨石混じり砂礫	初期推進時
推進-8	出水・土砂流出	礫混じり火山灰細砂	到達時
推進-9	出水・土砂流出	粘土	到達後
推進-10	出水・土砂流出	砂礫	到達時
推進-11	出水・土砂流出	砂層	到達時
推進-12	出水･土砂流出･陥没	砂質土	到達時
推進-13	出水･土砂流出･陥没	礫混じり砂	推進中
推進-14	推進抵抗力増加	泥岩	推進中
推進-15	推進抵抗力増加	シルト混じり砂	推進中
推進-16	推進抵抗力増加	巨石混じり砂礫	推進中
推進-17	地盤変位	粘土	推進中
推進-18	陥没	砂礫	推進中
推進-19	掘進機破損	粗石混じり砂礫	初期推進時
推進-20	管体沈下	鋭敏粘土	到達後
推進-21	マシン拘束(TBM)	緑色岩(破砕帯)	掘進中

5.3　推進工事のトラブル事例

5.3.1　推進精度不良によるトラブル

互層地盤などで硬さに差がある地層の境界に掘進機が遭遇すると，軟らかい地盤へ接する面で地盤反力が取れなくなり，掘進機は軟らかい地盤の方へ変位し推進精度不良を起こすことがある．また，礫，粗石等に遭遇した場合にも，掘進機が振られて蛇行することがある．これら土質の不均一により推進精度不良が発生した場合には，掘進機の適切な方向制御や速度管理により方向修正を試みるが，それでも制御ができない場合は，薬液注入工法等の地盤改良により軟らかい地盤の強度を上げて，推進部の土質の均一化を図る必要がある．

(1) 事例１

図 5.1 は互層地盤を推進中にノーズダウンを起こした事例の概要である．推進線形の上部に粗石混じり砂礫，下部に N 値 2 程度の粘土層からなる互層境界面を推進中に掘進機下部の地盤反力がとれなくなりノーズダウンを起こした．対応策として，掘進機を引き戻し，空洞充填(L=6.0m)および推進位置底版部(L=10.0m)を懸濁型薬液注入により地盤改良し再推進したが，再度ノーズダウンを起こした．そのため，再度掘進機を引き戻した後，底版部の改良をセメント系薬液でおこない再々掘進したものである．

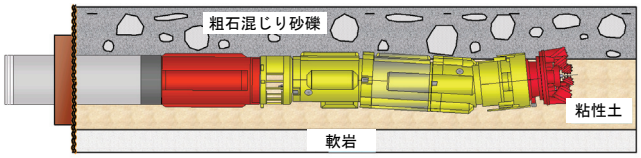


図 5.1　互層地盤でのトラブル概要

(2) 事例２

図 5.2 は巨石混じり砂礫層の初期推進時に線形離脱を起こした事例である．初期推進時に急激にピッチングが+48‰まで上昇し線形離脱を起こしたため，掘進機の引き戻しを実施した．引き戻したあとの空洞内を確認したところ，空洞下側に巨石群が堆積しており，この巨石に掘進機が乗り上げてピッチングの上昇を招いたものと判明した．推進箇所は坑口付近に擁壁基礎があり十分な地盤改良ができておらず，推進地盤も上部が礫混じり粘土層，下部が巨石混じり砂礫層となっており上部反力もとれず，加えて地盤の透水係数が高く地下水も豊富であったため，土圧が全く保持できず巨石が崩壊したことがトラブルの要因と考えられた．対応策として，空洞部をエアーモルタルで充填した後，元押装置を約 500mm 嵩上げし，推進位置を地盤の安定した粘土層に変更して再推進をおこなった．

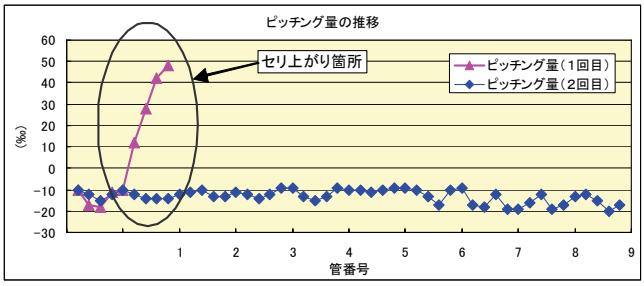


図 5.2　巨石混じり砂礫層での推進精度不良

(3) 事例３

推進地盤が軟弱な場合にも，必要な地盤反力が得られないために方向制御ジャッキを使用しても掘進機の方向が制御できず，ノーズダウンを起こすことがある．図 5.3 は，シルト質地盤でノーズダウンを起こした事例での推進線形(垂直精度)を示したものである．線形が大きく乱れた地点では N 値 0～1 程度と地盤が極端に軟弱となった区間を推進しており，掘進機底面の地盤支持力が不足しノーズダウンに至ったものである．対応策として，掘進機および推進管を約 12m引き戻して空洞部をセメントベントナイトで充填して再推進した．また，中間立坑到達後に掘進機の仕様変更をおこない，その後の推進を完了した．具体的には，①スポークヘッド外径をφ400mm からφ370mm に縮径して圧入効果を高め，②掘進機底面のフード下に鉄板を巻きつけるなどの仕様変更おこなった．

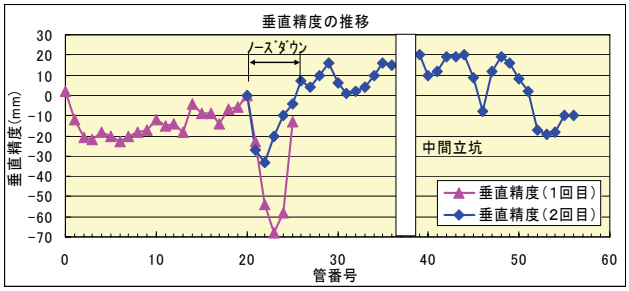


図 5.3　軟弱地盤での推進精度不良

また，均等係数が小さい粒径のそろった砂地盤や透水性が高い礫地盤でも，切羽の保持が困難となり切羽崩落を生じることがある．泥水式推進工法において，透水係数が $k=1\times10^{-2}$cm/s より大きい地盤では，逸泥により切羽の土水圧とチャンバ内泥水圧との間に不均衡が発生して切羽の崩壊を招くことがある．上部の地盤反力がなくなると掘進機は反力をとれず上向きに変位し制御不能となる．

5.3.2　出水・土砂流出によるトラブル

推進工事の発進時および到達時に立坑周辺の地盤改良効果が不十分な場合，鏡部から立坑内へ地下水が流出することがある．ひどい場合には地盤内の土砂を引込み，さらにその範囲が拡大すれば路面陥没を引き起こし，その結果，社会的に大きな影響を与えることになる．立坑周辺は立坑構築時に止水を目的とした地盤改良がなされていることが多いが，改良範囲が適切でなかったり，あるいは改良効果の確認がなされていなかったりした場合，出水のリスクは大きくなる．推進時の地盤改良の必要性についても，事前に十分検討されなければならない．

(1) 事例１

図 5.4 は地下水の豊富な細砂層の初期推進時に大量の出水とともに排土不良を起こした事例の概要である．初期推進開始直後に，エントランスパッキンと掘進機の隙間か

ら大量の地下水が出水し，それに伴い細砂が排土通路部を塞いで排土不良を起こし推進不能となった．推進地盤は地下水が多い細砂層であったが，地盤改良は立坑築造時の出水対策としてケーシング縁から約 1.0m の範囲にしか実施されておらず，推進時の出水対策を目的とした地盤改良は実施されていなかった．そのため，初期推進開始直後に出水，吐出した添加剤も多量の水に希釈され，砂質分が排土通路部で沈殿，堆積して排土不良も引き起こした．対応策として，補足薬液注入実施後，掘進機を引き戻し，その後坑口部を閉塞して路上から再薬液注入を実施した．改良範囲は**図 5.5** のように推進延長方向に 4.5m とし，薬液は止水性を重視して溶液型を使用した．施工計画時には，薬液注入による改良範囲，薬液種類等の妥当性の確認とともに，鏡切り前に注入効果の確認をおこなうことが重要である．また，施工時においても出水の兆候が見られた場合には，①添加剤の粘性を高め，注入率も高める，②出水箇所の止水処理などを迅速に実施する，などの措置が必要となる．

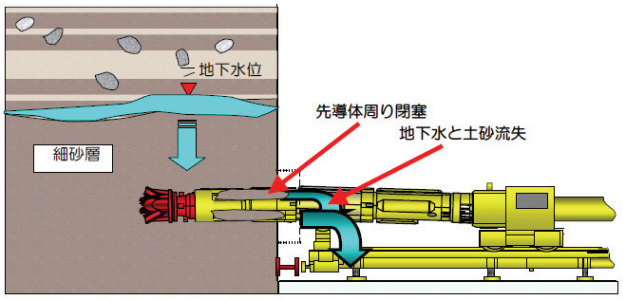


図 5.4　細砂層初期推進時の出水トラブル概要

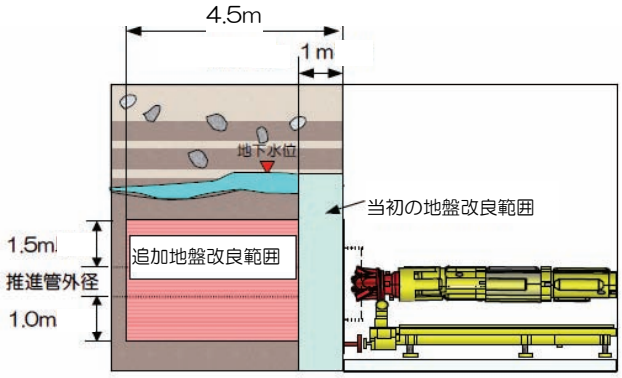


図 5.5　追加地盤改良範囲の設定

(2) 事例２

図 5.6 は微細砂層での推進到達時に地下水とともに土砂を引き込んだ事例の概要である．地下水の豊富な微細砂層で，推進到達時に探り削孔をおこなったところ，地下水とともに土砂が立坑内に流出した．鏡切断をした時にも地下水と土砂を引き込んだため，そのまま掘進機回収をすると，さらに大量の地下水とともに土砂が立坑内に流出することが懸念されたため作業を一時中断した．本現場から 500m 離れた場所でも同様の現象がみられ，過去に道路陥没を引き起こしていた．対応策として，到達立坑内への土砂流出を防止するために，**図 5.7**，**写真 5.1**～**5.2** のように回収する掘進機を抱き込むことができる「止水鋼管」を到達立坑内に取り付け，その止水鋼管の中に掘進機を押し込んで分割回収をおこなった．掘進機を押し込むことで止水鋼管内に土砂が流入した際には補足注入で止水し，止水鋼管内の土砂を取り除きながら掘進機の分割回収をおこなった．本事例での到達立坑周辺の地盤改良実施状況は不明であるが，推進到達部の施工では，地盤状況を確認して出水等の危険性を検討し，必要な対策を講ずることが重要である．

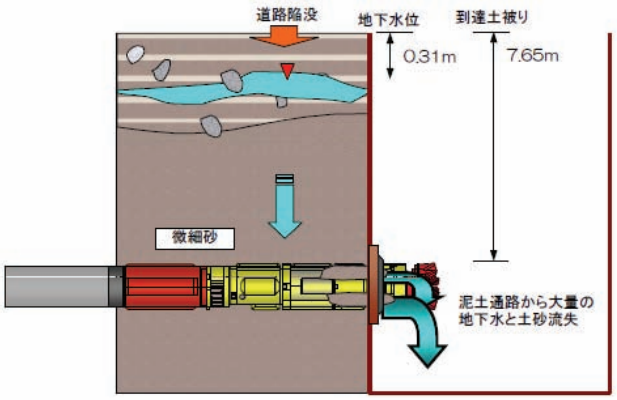


図 5.6　微細砂層での推進到達時のトラブル概要

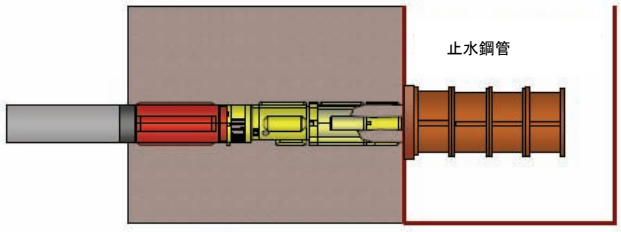


図 5.7　止水鋼管設置図

写真 5.1　止水鋼管設置状況

写真 5.2　止水鋼管撤去状況

(3) 事例３

図 5.8，**写真 5.3** は刃口推進中に切羽から地下水と土砂が流入し道路陥没を引き起こした事例である．本事例では，事前の土質調査結果から推進土質を厚い粘土層と想定し，経済性を考慮して全断面地盤改良併用の刃口推進工法を採用していた．しかし，想定土質に対し実際の土質が急変し，透水係数の高い砂質地盤へ変わったことから，当初計画の地盤改良では強度が不十分となり，地下水および土砂が推進管内に流出し道路陥没に至った．対応策として，陥没箇所をセメント混合クラッシャランで充填後，緩みの生じている推進管周囲を薬液注入により地盤改良した．再推進開始時には，高透水性の砂質土層に対応可能な高圧噴射

攪拌工法(改良径φ2,600mm×3 列)を残り全区間で実施した．地下水が豊富な砂質土層での推進工では，切羽の安定性が高い密閉式の工法を採用すべきであり，全面開放の刃口推進工を採用する場合には，綿密な土質調査の実施と確実な地盤改良工法の選定をおこなうことが重要である．

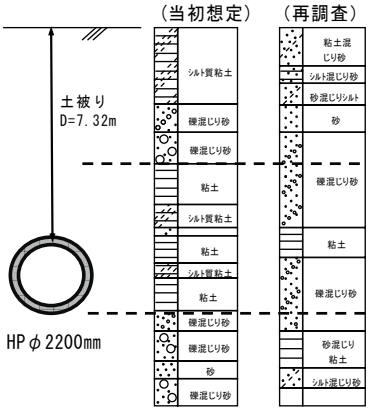


図 5.8　想定土質と実際との相違

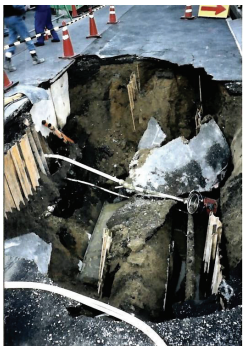


写真 5.3　陥没状況

5.3.3　推進抵抗力増加によるトラブル

粘性地盤内を推進する場合，掘削土がカッタ面板に付着して開口部が閉塞し，掘削土の取り込み不足から先端抵抗力が増加することがある．また，推進管周辺の土と管の付着力増加により，推進抵抗力も増加する．砂礫地盤では，滑材が地下水に希釈されたり，地盤中に逸散したりするなどして十分な滑材効果が得られず，推進抵抗力を増加させることがある．また，粗石・巨石地盤では，掘進機の外周切削ビットの異常磨耗により急激な推進抵抗力の増加を招くことがある．

(1) 事例 1

図 5.9，写真 5.4 は泥岩層の推進時にカッタヘッド部で閉塞を起こし，推進不能となった事例の概要である．推進土質が砂礫層から泥岩層に変化したところで，カッタートルクとともに元押し推力が 200kN から 400kN へ上昇し，土圧計も 0.2MPa から動かなくなった．その後，排土量が減少してカッタートルクも上昇し続け，ほとんど推進できない状況に陥った．この掘進機に装填していたカッタヘッドは礫・玉石対応のローダヘッドで開口率が小さく，また添加剤が礫質土用の高粘性のものであったため，カッタヘッド部の泥土付着を増長させ，結果的に閉塞を招いたものである．対応策として，掘進機引き戻し後，写真 5.5 のようにカッタヘッドを開口率の高いものへ改良し，添加剤の噴出口を増やすなど掘進機の改良をおこなうとともに，添加剤につても，ベントナイト系からポリマー系に変更して再推進をおこなった．

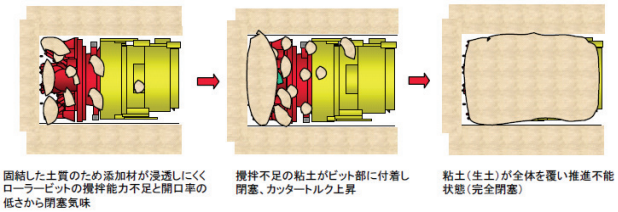


図 5.9　泥岩層での閉塞によるトラブル概要

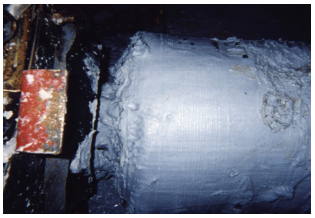


写真 5.4　ヘッド周り閉塞状況

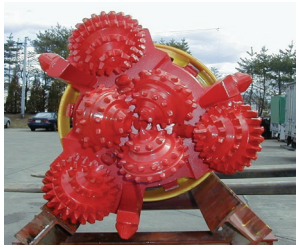


写真 5.5　改良型ヘッド

(2) 事例 2

図 5.10 はシルト混じり砂層を推進中に高透水性の地盤に遭遇し，滑材の逸泥により推力オーバーを起こした事例の概要である．図 5.11 のように，推進延長 98m(No.38 管)付近までは元押推力は設計推力を下回っていたが，その後元押推力が急激に上昇し始めて設計推力をオーバーし，推進長が増えるに従い推力が上昇し，推進延長 150m(No.59 管)を過ぎたあたりで 1400kN をオーバーして推進不能になった．原因は泥土が地下水により希釈されて滑材効果を失い，地山と推進管との摩擦力が増大(ジャーミング)したためと考えられた．当該現場は推進延長上に埋設物が多く，埋設物の埋戻し土から泥土が噴発することを警戒して土圧を低く設定していたことから，滑材効果を発揮する泥土の充填が不十分な状態であったことも希釈を早める要因となった．対応策として，滑材効果機能を回復させるために添加剤注入率を上げ，推進管にも滑材注入箇所を設けて滑材注入をおこなった．また，推進補助ジャッキ(100t)を取り付けて推力の増強を図ったが，結果的に 2000kN の推力をかけても掘進機が動かない状況に陥ったため，このまま推進することを断念して掘進機部を掘削し，中間立坑を構築してそこから残りの推進をおこなった．

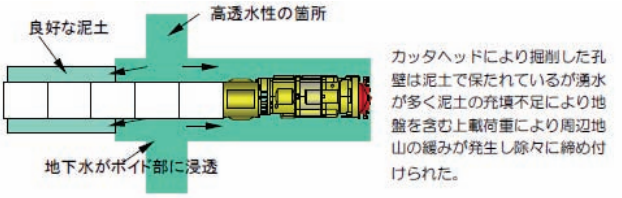


図 5.10　逸泥による推力上昇トラブル概要

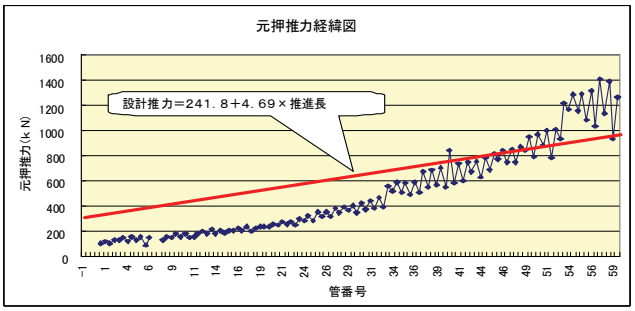


図 5.11　元押し推力の推移

(3) 事例３

図 5.12 は砂礫層を推進中に排土不良を起こし，急激な推力の上昇とともに推進不能となった事例である．設計時の想定土質は礫混じり砂層であったが，実際は予想されたよりも礫率が多く，また礫よりも大きい巨石（最大礫径300mm）が推進層に出現した．そのため，スポークヘッドでは石を割り切れず，掘進機周辺に礫だまりを生じ，推力上昇の原因となった．推力は No.17 管推進時に 140t まで上昇し推進不能となった．対応策として，掘進機前方 30cm の位置にφ1500mm のケーシングを下ろし，これを中間立坑として，カッタヘッドをスポーク型(**写真 5.6**)からローラ型(**写真 5.7**)へ変更し推進を再開した．地盤状況の把握不足が招いたトラブルといえる．

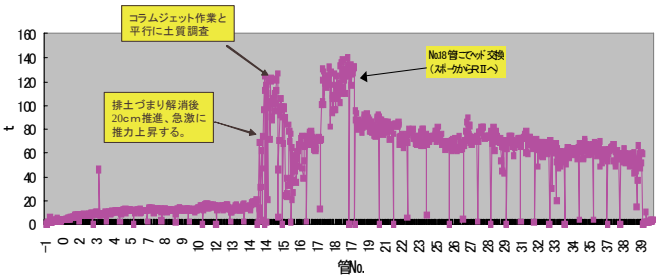


図 5.12　地山変化による推力上昇の推移

写真 5.6　取替前ｶｯﾀﾍｯﾄﾞ（ｽﾎﾟｰｸ型）

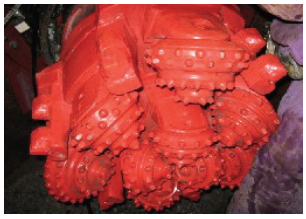


写真 5.7　取替後ｶｯﾀﾍｯﾄﾞ（ﾛｰﾗ型）

5.3.4　地盤変位よるトラブル

地盤の変位は周囲に及ぼす影響が大きいため，十分な監視のもと避けなければならないトラブルである．地盤変位の発生現象としては，先行隆起，先行沈下，後続隆起，後続沈下が挙げられるが，その原因としては，推進管理土圧，添加剤注入量，掘削土砂取り込み量，滑材注入量などが適切でないことが挙げられる．

(1) 事例１

図 5.13 は粘性地盤を推進中に路面隆起を起こした事例の概要である．掘進機がマンホール下を通過した時に，埋め戻し砂の排土がでてきたため，ベントナイト系作泥材を使用した．しばらくすると排土量が減少したが，土圧が 0.1MPa 以下であったため，空洞等による逸泥と判断し推進を継続したところ，掘進機後方で約 50cm の路面隆起が発生した．トラブル発生時，掘進機は埋め戻し区間を抜けて地山区間（粘土層）に変わっていたにもかかわらず，作泥材を変更しておらず，泥土が高粘性のものとなり排土通路が閉塞して路面隆起を引き起こした．対応策として，坑口部からハイウォッシャーで排土通路の閉塞土を除去し，作泥材を変更した．地盤条件に応じ，添加剤の変更を遅滞なく適切におこなっていれば避けられたトラブルである．

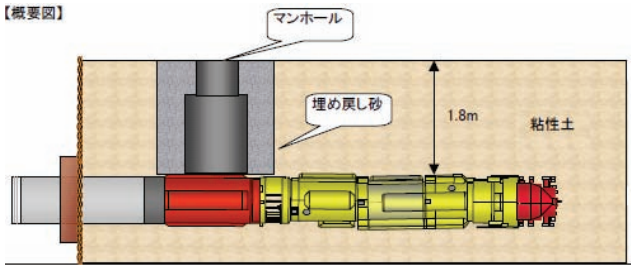


図 5.13　路面隆起によるトラブル概要

5.3.5　掘進機破損よるトラブル

想定強度を上回る地盤に遭遇した場合，選定した掘進機やカッタヘッドで対応しきれず，カッタや掘進機の破損を招くことがある．また，礫，粗石，巨石地盤でも，土質調査結果よりも大きな粒径の礫，粗石，巨石が出現し，掘進機やカッタヘッドが対応できなくなり，推進不能に陥ることがある．推進地盤状態を詳細に把握し，掘進可能な工法，掘進機，カッタヘッド形式を選定することが重要である．

(1) 事例１

図 5.14 は巨石混じり礫地盤での初期推進時に掘進機がローリングを起こし，配線ケーブルが破損した事例の概要である．初期推進時から巨石によるローリングが激しかったが，No.1 管推進中に急激にローリングが発生し掘進機が 90 度回転した．掘進機が回転したことで管内配線ケーブルが引っ張られて断線し推進不能となった．推進地盤には粗石，巨石（300～700mm）が点在し，その石をカッタビットにより掘削し推進させていたが，一時的にカッタ回転力が上昇して，掘進機と管との接続部や排土管の回転抵抗をオーバーし掘進機が 90 度回転した．対応策として，掘進機引き戻し後空洞部をセメントベントナイトで充填し，配線ケーブルを取り替えて再推進を開始した．このような初期推進時のローリング防止対策としては，掘進機の振れ止め防止装置やローリングストッパの設置など機械的な対策とともに，ローリングの兆候が現れた時の慎重なオペレーションが重要である．

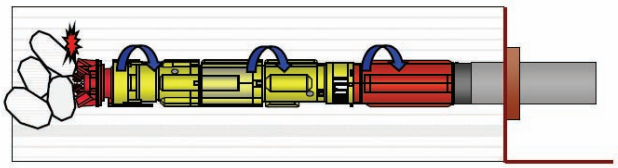
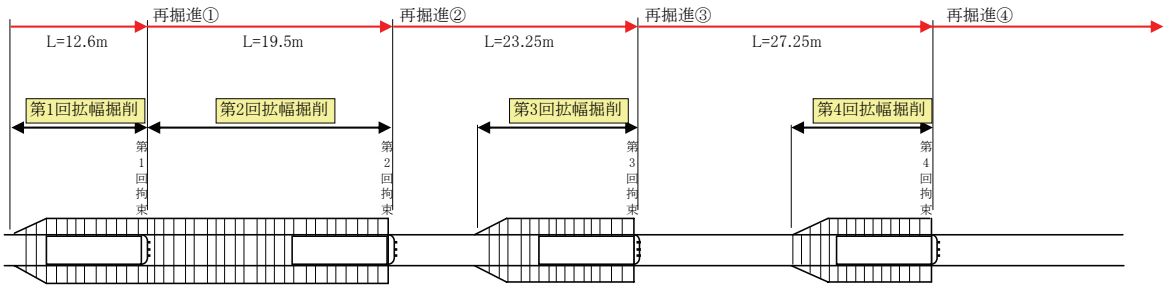


図 5.14　ローリングによる掘進機破損トラブル概要

5.4　TBM 工事のトラブル事例

TBM 工法における掘進中のトラブルは，施工延長が長いうえ，わが国特有の複雑な地質の中を施工するため，断層，破砕帯，膨張性地山や高圧，多量の湧水がある地山等の不良地山において発生することが多く，肌落ち，崩落，地山の押出し，湧水および地耐力不足がトラブルの要因となっている．



平面図

TBM掘削条件		第1回拘束	第2回拘束(再掘進①)	第3回拘束(再掘進②)	第4回拘束(再掘進③)	未拘束(再掘進④)
オーバーカット		+20mm	+20mm	+20mm	+70mm	+70mm
滑材		無	固結型滑材	固結型滑材	高分子系滑材	粘土系滑材
主な地山状況		砂状細片化 鏡肌	砂状に細片化、鏡肌	砂状に細片化、鏡肌	砂状に細片化、鏡肌	砂状に細片化、鏡肌～健全
マシン掘削状況	掘進速度	70mm/分	30～40mm/分	30～60mm/分	40mm/分	40mm/分
	カッタ回転速度	10回転/分	4.5回転/分	推力に応じて調整	8.5回転/分	8回転/分
	マシン停止状況	・推力上昇とともに掘削停止 ・周辺地山による締付拘束	・掘削延長12m施工後、掘削ごとに推力上昇、最大360tで停止 ・掘削停止時に切羽での崩落発生	・掘削延長13m施工後、掘削ごとに推力上昇、以降高推力(250から350t)ながら掘削を継続するが、切羽で地山が崩壊しカッタロック後マシン停止となる	・比較的低推力(150t前後)で掘削(地山は非常に脆いがある程度崩落した領域で自立) ・破砕した地山の悪化とともに切羽で地山が大きく崩落し、カッタロック後、前胴が拘束され掘削停止	・破砕した地山であるが、ある程度の領域で自立している ・幾度かの推力上昇があるが停止に至らず、破砕帯を突破する

図 5.15　TBM のマシン拘束によるトラブル概要

(1) 事例 1

図 5.15 はTBMにより緑色岩層を掘進中に度重なるマシン拘束にみまわれた事例の概要である．全長 7,507m(掘削径 φ2,300mm)を TBM により掘削中，坑口から 3,800～3,900m までの約 100m 間で緑色岩破砕帯に遭遇し，TBM が 4 度にわたって地山の拘束を受けて停止し，切り拡げ掘削を余儀なくされたものである．

拘束された箇所の地山は緑色岩が破砕され容易に細片化される状態で，地山強度比が 0.6～1.7 と小さく，トンネル掘削により周辺地山に緩みが発生し，TBM の拘束に至ったものと考えられた．拘束からの脱出方法として，TBM を拘束している土圧を除去するために，上半部分の拡幅掘削を人力でおこなった．再掘進時の対策としては，拘束された地山がその後も続くことが確認されたため，オーバーカットと滑材注入を実施した．オーバーカットは，マシンスクレーパを加工し，通常断面＋20mm～＋70mm としたが，地山に拘束される時間を遅らせることはできたものの，地山が非常に脆いため，時間の経過とともに崩落が発生し，推力の上昇とともにカッタが拘束され掘進不能となった．滑材はマシンの摩擦抵抗を低減する目的で前胴天端 2 箇所から注入を実施した．滑材は 3 タイプ(固結型滑材，高分子系滑材，粘土系滑材)を使用したが，マシン周辺地山への付着性が良く推力の低下が図れた粘土系滑材が効果的であった．最終的に合計 4 回マシン拘束と拡幅掘削を繰り返し，破砕帯区間を突破した．

5.5　おわりに

推進工事でのトラブルの発生傾向を推進地盤ごとに整理すると，①砂層では，出水・土砂流出，推進抵抗力増加，②礫・粗石・巨石地盤では，推進精度不良，推進抵抗力増加，掘進機破損，③粘性地盤では，推進精度不良，推進抵抗力増加(面板閉塞)，地盤変位，④互層地盤では，推進精度不良，などに分類され，推進地盤ごとに発生しやすいトラブルはある程度推測できる．収集した事例の多くもこのようなトラブルを事前に想定していたが，結果的に地盤状態の把握不足がトラブル発生の要因となっていた．リスク回避のためには，推進地盤状態をどれだけ詳細に把握し，適切な対策をおこなうかが重要となる．

TBM 工事の場合，トラブルなく掘進しているときは高速掘進が可能であるが，地山崩落や大量湧水などのトラブルが一度発生すると工事の進捗に大きな影響をおよぼし，結果的に高速掘進の実現が困難になる場合がある．そのため，切羽前方の地盤状態を各種の探査技術を用いていち早く把握し，早目の対策を立てていくことが，安全で合理的な施工を実施するうえで重要となる．

参考文献

1)　日本推進技術協会：推進工法体系 II (計画設計・施工管理・基礎知識編)，pp.212-232，2010.
2)　アイレック技建：小口径管推進工法 エースモール工法 泥土圧方式一工程式【圧送排土】施工マニュアル(第7版)，2011.
3)　木下聖司，村瀬賢，杉本伊佐夫，堀直：長距離・小断面 TBM によるガス導管トンネル工事の施工実績―大阪ガス三重・滋賀ライン山岳トンネル工事―，第68回(山岳)施工体験発表会，pp. 50-57，2011.

【トラブル事例一覧表(推進等編　その１)】

CODE No.	発生年月日	発生した現象	発生地域	発生深度および地盤情報	トラブルの概要	キーワード
推進-1	2001年8月	互層地盤でのノーズダウン	宮城県宮城郡利府町	GL-12.0m 互層（粗石混じり砂礫/粘土） N値＝2	推進土質が互層(推進位置上部に粗石混じり砂礫，下部に粘性土)で地盤反力が取れなくなり，ノーズダウンを起こした.	ノーズダウン, 互層地盤
推進-2	2003年1月	軟弱地盤でのノーズダウン	福島県いわき市	GL-4.8～6.0m シルト質土 N値＝0～1	シルト質土推進中，軟弱層に入り反力が支持できずノーズダウンを起こした.	ノーズダウン, 軟弱地盤
推進-3	2003年11月	初期推進時のセリ上がりと推力上昇	長野県	巨石混じり砂礫 （Max360mm） 一軸圧縮強度64MPa	巨石混じり砂礫地盤の初期推進において，先導体が折られせり上がりが発生した．また，先導体及びリアパイプが地山とせり，推力が上昇した.	セリ上がり, 推力上昇
推進-4	不明	初期推進時のせり上がり（巨石混じり地盤）	神奈川県	巨石混じり砂礫（最大礫径不明）	巨石混じり砂礫層での初期推進時に，透水係数が高いため泥土圧を立てることができず，先導体の胴体が巨石に乗りあがってしまった.	セリ上がり 巨石
推進-5	2004年3月	初期推進時の線形離脱（硬土質地盤）	北海道函館市	GL-7.4～8.5m 互層（砂礫/岩盤）	岩盤層で先導体分割発進時に先導体が振られて線形離脱した.	互層地盤, 線形離脱
推進-6	2003年12月	初期推進時の排土不良（地下水の豊富な崩壊性地盤）	群馬県伊勢崎市	GL-6.4～6.6m 細砂	初期推進中に多量の水が立坑内へ流出し，それに伴い細砂が泥土路部をふさいで排土不良を起こした.	細砂, 排土不良, 土砂流出
推進-7	2009年11月	初期推進時の出水と排土不良	兵庫県姫路市	GL-6.6m 巨石混じり砂礫 (Max400mm) N値＝60以上	初期推進時，地下水の流出とともに先導体泥土通路が閉塞し排土不良を起こした.	排土不良, 出水
推進-8	2004年2月	地下水の豊富な崩壊性地盤での先導体回収	静岡県沼津市	GL-7.7m 礫混じり火山灰質細砂 N値＝19	湧水の豊富な細砂層での先導体分割回収作業時，地下水と共に土砂を引く兆候がみられたため，止水鋼管を使用して回収した.	土砂流出, 道路陥没
推進-9	2008年3月	接合部からの土砂流入による路面陥没	東京都足立区	GL-17.8m 粘土層 N値＝1～3	工事中のシールドトンネル（φ2800mm）内より延長542ｍの推進をおこない，既設貯留管渠（φ3250mm）へ地中接合した．接合部は補助工法として凍結工法を採用していたが，既設貯留管渠へ雨水を貯めたところ，接合部より土砂が流入して路面の陥没を誘発した.	土砂流出, 路面陥没, 地中接合, 凍結工法
推進-10	2009年3月	推進立坑到達時における出水及び土砂流出(1)	大阪府	GL-18.7m 砂礫層	掘進機のカッタヘッド部を立坑内に押し出したとき，掘進機外周の余掘り部を通じて，大量の出水と土砂流入が発生した.	出水, 土砂流出
推進-11	2009年10月	推進立坑到達時における出水及び土砂流出(2)	大阪府	GL-16.6～17.9m 砂層	掘進機のカッタヘッド部を立坑内に押し出したとき，掘進機外周の余掘り部を通じて，大量の出水と土砂流入が発生した.	出水, 土砂流出
推進-12	2009年5月	到達鏡切り時における出水および土砂流出	大阪府	GL-11.5～13.6m 砂礫 N値=42	到達立坑のSMW壁を鏡切りした時，背面地山から立坑内に地下水と土砂を引き込んだ．流出土砂は50㎥におよび，地表面に5.5m×5.9m 深さ2.3mの陥没が発生した.	出水, 土砂流出 陥没
推進-13	2002年12月	想定土層の急変による刃口推進工での土砂流出	大阪府	GL-7.2～7.4m 礫混じり砂 N値＝31	推進中に土質が粘性土から砂質土に急変したため，切羽から地下水とともに土砂が流入，結果的に道路面に5.0m×3.5m 深さ2.5mの陥没を発生させた.	出水, 土砂流出 陥没
推進-14	2001年11月	泥岩層での排土閉塞	北海道函館市	泥岩 一軸圧縮強度75.8MPa	推進土質が砂礫層から粘着力の高い泥岩層に変化したため，カッターヘッド部で閉塞をおこして推進不能となった.	泥岩, 排土不良

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	関連資料
推進位置上側に硬い粗石混じり砂礫層が存在し押さえつけられ，粘土層で支持することができなかった．また，その後懸濁型薬液注入を行っても支持力が不足していた．	先導体を引き戻し，空洞および推進位置の底版改良としてセメント系薬液(LW)を注入した	「小口径管推進工法 エースモール工法 泥土圧方式一工程式【圧送排土】施工マニュアル（第7版）」 2011.6，アイレック技建
ノーズダウン時点の土質が極端に軟弱(N値0～1 程度と想定される)で先導体支持力がなかった．無排土による圧密推進でも効果が薄く線形維持が困難となった．	先導体を引き戻して空洞部CB 充填をおこない，硬化後に再推進した．中間立坑到達時にノーズダウン対策として下記の先導体仕様の変更をおこなった． (1)ｽﾎﾟｰｸﾍｯﾄﾞの掘削外径をφ400mm からφ370 mmに縮径し圧入効果を高めた (2)フード下部に厚さ10mmの鉄板を巻き付けて接地面積を上げた (3)先導体真下の泥土通路に反力板を装着し，泥土の流れを絞ることにより圧入効果を向上した	「小口径管推進工法 エースモール工法 泥土圧方式一工程式【圧送排土】施工マニュアル（第7版）」 2011.6，アイレック技建
巨石混じり砂礫地盤で先導体が振られて地山を乱してセリ上がりが生じ，姿勢不良を招いてしまった．また，先導体が振られることによりマシンは蛇行し，地山とのセリが生じ推力が上昇した．	先導体を引き戻した後，反力板と地山との設置面積を小さくして推力低減効果を図るために掘削外径を大きくしたカッタヘッド（φ588→φ596）へ変更した．また，掘削外径アップに伴うローリング防止対策として，上，左，右の反力板へフラットバーを設置した（フラットバー部外径φ597）．推進中はオーバーカットの多用および推力上昇時の引き戻しを実施した．	「小口径管推進工法 エースモール工法 泥土圧方式一工程式【圧送排土】施工マニュアル（第7版）」 2011.6，アイレック技建
先導体を引き戻して空洞内を確認したところ，下側に巨石群が堆積しており，この巨石に先導体が乗り上げたもので，原因は下記のものと考えられた． ①発進立坑直前に擁壁があり十分な地盤改良区間がとれなかった ②発進土層が粘土，巨石混じり砂礫の互層で反力がとれなかった ③透水係数が高く地下水も豊富で，添加剤が逸走して土圧が全く保持できず巨石が崩壊した	先導体，リアパイプを引き戻して，空洞部はエントランスを鉄板で塞ぎ，エアーモルタルを充填したのち，推進位置を土質の安定した粘土層に変更（元押装置を約500mm嵩上げ）して再推進した．	「小口径管推進工法 エースモール工法 泥土圧方式一工程式【圧送排土】施工マニュアル（第7版）」 2011.6，アイレック技建
岩盤と砂礫の互層であったため，先導体が左側に流された．また先掘りを人力で実施したため，孔壁が先導体より大きくなっており，推進時に先導体を拘束するものがなく大きく振られた．	先導体を全て引き戻し，空洞部にコンクリートを充填した．また，先導体再発進時には振れ止め防止対策としてフード部および反力板部をおのおの角材と鋼材により拘束した．	「小口径管推進工法 エースモール工法 泥土圧方式一工程式【圧送排土】施工マニュアル（第7版）」 2011.6，アイレック技建
湧水が多い砂層であったが，地盤改良の目的が発進立坑築造用であり（ケーシング縁から約1.0mの改良範囲），推進用の地盤改良は実施されていなかった．そのため，初期推進開始直後に出水，吐出した添加剤も多量の水に希釈され，砂質分が泥土通路部で沈殿，堆積して排土不良を起こした．	補足薬液注入を実施し先導体の引き戻しをおこなった．引き戻し完了後，坑口に蓋をして路上から再度薬液注入を実施した．改良範囲は4.5mとし，薬液は止水性を重視して溶液型を使用した．	「小口径管推進工法 エースモール工法 泥土圧方式一工程式【圧送排土】施工マニュアル（第7版）」 2011.6，アイレック技建
薬液注入の効果不足により地下水が流出した．また，出水に伴って吐出した添加剤が多量の水に希釈され，こぶし大の石を運ぶことができず，泥土通路部で沈殿，堆積して閉塞を起こした．土圧が立たず石が割れなかったことも閉塞を助長した．	補足薬液注入を実施し，先導体の引き戻しをおこなった．引き戻し完了後，坑口に蓋をして路上から再度薬液注入を実施した．改良範囲は4.5mとし，薬液は止水性を重視して溶液型を使用した．	
当該現場で採用している推進工法は先導体ヘッド部で土砂を掘削しているため，十分地盤改良された到達立坑であっても，先導体周辺の泥土通路部は流動性のある泥土に置換されている．このため，止水パッキンゴム部に泥土通路がかかると，その隙間から水と土砂が流失してしまう．補足注入で水を止めても，先導体を押し出すために動き出すと，また水の流失が発生する．	到達立坑内への土砂の流失を防止するため，回収する先導体を抱きこむことができる「止水鋼管」を止水器に取り付け，その「止水鋼管」の中に先導体を押し込んで分割回収した．先導体を押し込むことで土砂が流失した場合には，補足注入で止水し，「止水鋼管」内の土砂を取り除いて所定の長さまで押し出し，先導体を分割回収した．	「小口径管推進工法 エースモール工法 泥土圧方式一工程式【圧送排土】施工マニュアル（第7版）」 2011.6，アイレック技建
推進管と到達部の既設貯留管との接合箇所では，補助工法として凍結工法を採用していたが，凍結による土の膨張が原因で接合部のゴム製パッキンの上部が変形し，接合部に隙間が生じていた．そこへ貯留管に水を貯めため凍結地盤の解凍が促進され，さらに降雨の影響により地下水位が上昇して土砂の流入圧力が増加したため，隙間が拡大して土砂が貯留管内に流入した．その結果，路面の陥没を引き起こした．	路面陥没が広がりつつあったため，直ちに陥没箇所の埋め戻しをおこない，その後地盤改良を実施した．（その後，詳細不明）	日経コンストラクション 2008/8号
到達立坑周辺には高圧噴射撹拌工法による地盤改良を行っていたものの，掘進機周りのクリアランスが水みちとなり立坑背面地山の砂分が大量の地下水とともに立坑内に流入した．	到達立坑に地下水位レベルまで注水し，土砂が抜けたと想定された箇所に地上から薬液中入（懸濁型水ガラス溶液）を実施し，空洞・空隙充填を行った．しかし，再掘進するたびに新たな水みちが発生し，地盤改良と推進を繰り返し，最終的には潜水作業による水中到達をおこなった．	
到達立坑周辺には高圧噴射撹拌工法による地盤改良を行っていたものの，鏡切り前のチェックボーリング時に掘進機周りのクリアランスが水みちとなり立坑背面地山の砂分が大量の地下水とともに立坑内に流入した．	到達立坑に地下水位レベルまで注水し，掘進機外周の水みちを地上から薬液中入（懸濁型水ガラス溶液）を実施し，空洞・空隙充填を行った．しかし，再掘進するたびに新たな水みちが発生し，地盤改良と推進を繰り返し，最終的には潜水作業による水中到達をおこなった．	
到達立坑背面には到達防護用の薬液注入工（二重管ダブルパッカー注入工法）を実施したが，SMW壁の杭外面の凹凸に対し未改良な部分があたことから，ここが水みちとなって地下水が流入し，同時に背面土砂を引き込んだ．	応急措置として到達立坑坑口に土嚢や堰板を設置した．その後，土砂が抜けたと思われる部分に地上から水みち閉塞を目的とした薬液注入工（懸濁型水ガラス溶液）を実施した（約40㎥）．	
設計時の調査結果から推進土層を粘土層と想定して刃口推進工を実施していたが，トラブル発生位置で土質が砂質土に急変したため，切羽から地下水と土砂が流入した．	陥没部をクラッシャランにセメントを混合した材料で充填し，陥没箇所の推進管の周囲に薬液注入をおこなった．また，再掘進に際し推進線上を高圧噴射撹拌工法（RJP工法）により改良した．	
砂礫層から粘着力が高い泥岩層に入り，カッタヘッド部およびフード，泥土通路の一部が泥土の付着により閉塞した．装填していたカッタヘッドが礫・玉石対応のローラヘッドで開口率が小さく閉塞を助長した．また添加剤が礫質土用の高粘性であったため閉塞を加速させた．	(1)カッタヘッドの変更 先導体を引き戻しカッタヘッドを改良し開口率を上げた．また，添加剤噴出口を４箇所に増やし，ヘッド部の泥土閉塞を防止した． (2)添加剤の変更 添加剤をベントナイト系からポリマー系に変更し，張り付き防止対策として浸透材を添加させて再推進を実施した．	「小口径管推進工法 エースモール工法 泥土圧方式一工程式【圧送排土】施工マニュアル（第7版）」 2011.6，アイレック技建

【トラブル事例一覧表(推進等編　その２)】

CODE No.	発生年月日	発生した現象	発生地域	発生深度および地盤情報	トラブルの概要	キーワード
推進-15	不明	推力オーバー	埼玉県	シルト混じり砂	高透水性の地盤に遭遇し，推進管のボイド部の逸泥によって滑材効果がなくなり，推力オーバーになった.	推力上昇，逸泥，高透水層
推進-16	2009年3月	地山変化による急激な推力上昇	兵庫県南あわじ市	GL-6.6m 巨石混じり砂礫 (Max300mm)	No14管推進時に排土不良を起こし，推力が急激に上がった．その後，一旦推進を再開したが，再度急激な推力上昇により推進不能になった.	推力上昇，排土不良，巨石
推進-17	2003年9月	排土詰まりによる路面隆起（粘性土地盤）	千葉県鎌ヶ谷市	GL-1.8m 粘土層（関東ローム） N値＝4	粘性土を推進中に排土が出なくなった．逸泥していると判断し排土がないまま推進を続行したところ，50cmの路面隆起が発生した.	排土不良，路面隆起
推進-18	2003年7月	軟岩層上部に堆積した砂礫層が推進中に陥没	大阪府	GL-2.9～4.0m 砂礫（軟弱）	地下水位の高い軟弱地盤中を掘進中に，道路面が幅約3m，延長約30m，深さ1mにわたり陥没した.	陥没
推進-19	2003年2月	初期推進時のローリング（硬土質地盤）	群馬県高崎市	GL-2.7～6.8m 粗石混じり砂礫 N値＝50　一軸圧縮強度150MPa	初期推進中，粗石によるローリングの発生のため，先導体が回転し，バルクヘッド後方のケーブルが断線した.	ローリング
推進-20	不明	鋭敏沖積粘土層における管きょの沈下	大阪府	鋭敏粘土 N値=0～2	大阪平野東部の大東市，東大阪市域には，GL-6m程度までの位置にN値0～2程度の鋭敏粘土層が広く分布している．ここで設計通りの勾配で推進工を実施したところ，工事完成時に管自重による沈下が発生した.	鋭敏粘土，管体沈下
推進-21	2008年11月	TBM掘進時のマシン拘束	滋賀県犬上郡多賀町	GL-330m 緑色岩破砕帯 Vp＝2.2km/s	土被り約300mの緑色岩掘削中に地山拘束を受け，TBMが掘進不能となる．拡幅掘削，滑材注入等により拘束地帯を抜けた.	TBM，拘束，滑材注入，オーバーカット

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	関連資料
ボイド部の泥土が地下水で洗い流され，滑材効果を失って摩擦力が増大（ジャーミング）した．加えて，埋設物が多く埋戻し土から泥土が奮発することを警戒して土圧を低めに設定しており，推進管ボイド部が滑材効果機能を果たす泥土の充填が不十分な状態となり，泥土の希釈を早めた．	滑材効果機能を回復させるため，添加剤の注入率を上げて泥土中の添加剤成分を多くし，加えて推進管へ滑材管を設置した．また推力補助ジャッキ（100t）を取り付け，推力の増加を図った． 結果的に補助ジャッキを設置し，推進継続を狙ったが，2000kN以上かけても動かず，推進を断念し，先導体部を掘削，中間立坑構築後（ここを発進立坑として）残り59mの推進をおこなった．	「小口径管推進工法 エースモール工法 泥土圧方式ー工程式【圧送排土】施工マニュアル（第7版）」 2011.6，アイレック技建
設計時の想定地盤は礫混じり砂層であったが，実際は予想されたよりも礫率が多く，また礫よりも大きい石が推進層に出現した．そのためスポークヘッドでは石を割り切れず，先導体周辺に礫だまりを生じ，推力上昇の原因となった．	(1)１回目 路上より削孔しコラムジェット（水圧250kg/cm2）で石を散らして推力が40ｔまで下がった．また，並行して残りの推進区間の土質調査（チェックボーリング）をおこない，推進層に砂礫層があることを確認した． (2)２回目 先導体前面30cmの位置にφ1500のケーシングを下ろし，再度先導体周辺をコラムジェットにて石を散らしながら中間立坑まで推進させた．そこでカッターヘッドをスポーク型からローラ型へ取り替えて推進を再開した．	
埋戻し砂区間を推進した時に添加剤をベントナイト系に変更をしたが，粘土層に変わってからもそのままベントナイト系作泥材で推進したため，泥土が高粘着力を有したものになった．土被りが浅く土圧が小さい状況では，泥土が流れることができず，泥土通路を閉塞させてしまった．その結果，路面の隆起を引き起こした．	土被りが浅く，推進線形の上部にマンホールがあるため，先導体を発進立坑まで引き戻すことができなかった．そのため，リアパイプまで引き戻して，坑口からハイウォッシャーで先導体の泥土通路を清掃した．	「小口径管推進工法 エースモール工法 泥土圧方式ー工程式【圧送排土】施工マニュアル（第7版）」 2011.6，アイレック技建
推進地盤は，岩盤上に形成された軟弱地盤層で，その上部に非常に緩い盛土（礫混じり砂質粘土（N＝1～2）がされていた．岩盤面の降雨等による地下水の流れで「水みち」が形成され，軟弱土や道路路盤の細粒土が洗い流されて空隙が広がり耐力低下した地盤を掘進したことにより，地中の圧力変化が生じて陥没現象につながったと推測された．	陥没箇所を土砂により埋め戻した後，地盤が緩いと判断された幅3.3m，延長45m，高さ3.2mの範囲に空洞，空隙充填を目的とした薬液注入（溶液型水ガラス溶液）を実施した（約176㎥）	
推進土層に粗石，巨石（300～700mm）が点在し，その石をカッタビットにより掘削し推進させたが，石の位置や形状とカッタビットの押し付け力等により一時的にカッタ回転力が上昇した．先導体反力板による地盤反力，先導体と管との接続部や排土管の回転抵抗をオーバーし，先導体が90度回転した．	先導体を引き戻して空洞部をＣＢで充填した．引き戻した先導体は，バルクヘッドに取り付いている短尺ケーブルの点検を実施し，動作確認後再推進を実施した．	「小口径管推進工法 エースモール工法 泥土圧方式ー工程式【圧送排土】施工マニュアル（第7版）」 2011.6，アイレック技建
鋭敏粘土層を掘進した場合，掘進部周辺地盤をカッタヘッドの回転や推進ジャッキの推力により粘土の組成を乱してしまい，みかけの地盤強度が低下することが原因とみられる．	施工当初より推進作業後の管体の沈下を見越して，施工時の縦断勾配を区間の概ね2/3の延長の位置で到達するように設定し，残りの区間をほぼレベルに施工した．ほとんど経験的な対応であるが，工事完成時には概ね工事の施工管理基準内の範囲に収まっている．	
拘束地山は地山強度比が1前後と地山の強度が非常に乏しい．これはトンネル周辺の地山強度がトンネル掘削によって作用する応力より弱く，地山が塑性変形して，TBMが拘束に至ったと考えられる．	(1)滑材注入 TBMマシン注入孔(前胴天端2ケ所)より，マシンの周辺摩擦の低減を目的に3種類の滑材を使用し掘削を行った． (2)オーバーカット 外周部のスクレーパーを 70mm大きいものに改造し，地山をオーバーカットすることによりマシン拘束時の締め付け低減を図った．	第68回（山岳）施工体験発表会テキスト， pp. 50-57，2011.(社）日本トンネル技術協会

海外工事におけるトラブルについて
－オランダと中国でのトラブルを例として－

海外事例分科会 WG9

概　　要

地下建設工事における種々のトラブルは，日本だけにとどまらず地盤環境が類似した各国においてもよく似たトラブルに見舞われている．ここでは，それらのトラブル事例のうち，オランダと中国で発生した代表的な事例について紹介する．

キーワード：海外，異常出水，地表陥没

6.1　はじめに

都市部の地下建設工事において近年に見られるトラブル事例は，均等係数の小さい細砂や大礫などの限定された地盤で発生することが多い．このような傾向は，大阪・東京・名古屋などのように大阪平野・関東平野・濃尾平野などの低平地に形成された都市に多く見られ，前章までそれらの事例について説明をおこなってきた．ただし，このような傾向は日本だけにとどまらず，中国上海や台湾の沿岸部などの都市，オランダやイギリスなど類似した土質特性を有する都市においても同様に見られる．

ここでは，オランダでの開削工事で発生した異常出水陥没事例と，中国でのシールド工事で発生したボイリングを伴う大陥没事例について紹介するものである．

6.2　代表的なトラブル事例

6.2.1　海外開削事例 1（海外-10）

オランダのデン・ハーグ市における路面電車地下化および地下駐車場設置工事で発生した出水陥没事例[1)]を**図 6.1** に示す．

当該現場は，長さ 28m の鋼矢板土留め壁で囲まれた部分に対して開削工法を用いて掘削し，2 層構造の地下駐車場とその下部に地下化した路面電車用の線路部を構築する工事である．掘削底面以深には，止水目的のために逆アーチ状のジェットグラウト（JGP，直径 1.8m）で止水固化改良した後，地下 13.5m の開削工事を実施した．地盤は，均等係数 U_c＝2～5 の細砂層が主体となっており，地下水頭が地表面近くにあることから，パイピングが発生しやすい状態にあった．

掘削の途中段階において，JGP 接合部からパイピングを伴う異常出水が発生し，それに連動して土留め背面地盤が陥没し，掘削構内は水没した．JGP 接合不良箇所からのパイピング概念図を**図 6.2** に示すが，これがトラブル原因の 1 つとして考えられる．

復旧対策には薬液注入による地盤改良だけでなく，中床版を反力に取った圧気工法を併用し，地下水位を下げて開削を完了させた．

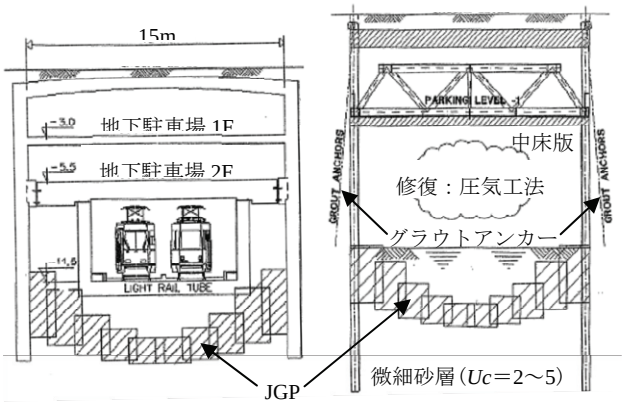


図6.1　オランダのデン・ハーグ市での異常出水陥没事例[1),2)]

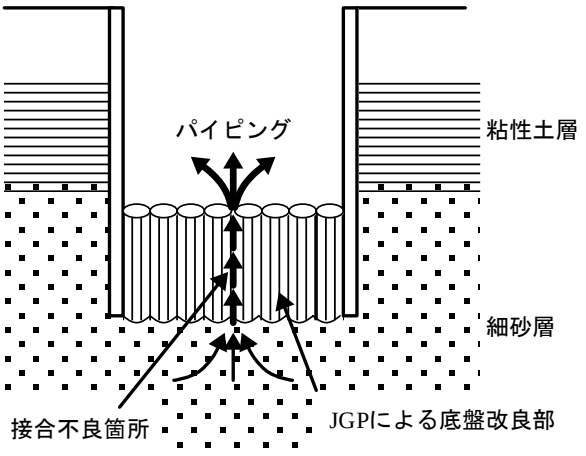


図6.2　JGP 接合不良箇所からのパイピング概念図[2)]

6.2.2　海外シールド事例 1（海外-9）

上海地下鉄 4 号線や高雄地下鉄東西線のように，完成した 2 本のトンネル間に連絡横坑を建設する際に地盤改良不良部から出水し，トンネル周辺地盤をボイリングさせることにより，トンネル本体を破壊に至らせる大陥没が生じるケース[3),4)]がある．

上海軌道交通 4 号線浦東南駅～南浦大橋駅工区は，黄浦江の横断区間 440m を含む全長 2000m の単線並列シールドトンネル工区であった．2003 年 7 月 1 日に西岸の中間立坑下部の連絡通路施工時においてトンネル陥没事故が発生し，トンネル付近の土砂流失により地上建築物の倒壊等が発生した（**写真 6.1** 参照）．

応急対策として，トンネル内外圧力をバランスさせるため，トンネル内に注水，陥没地盤への薬液注入等を実施し，沈下が大きい 5 棟の地上建築物は撤去した．また，詳細検討の結果，主に大深度開削工法による原位置修復案を採用し，修復工事は 2004 年 8 月に開始し 2007 年 6 月に完成させた．

当該地は，河川に近いため地下水は高く，地盤は約 GL-35m まで軟弱な沖積砂質粘性土層であり，その下部は均等係数の小さい細砂が数十 m 以上堆積している（**図 6.3** 参照）．トンネルは，土被り厚約 30m，直径約 7m，離隔約 7m の単線並列トンネルであり，泥水式シールド工法により施工が完了した状態であった．その後，地表からトンネル間に中間立坑を施工し，凍結工法により連絡通路を掘削中に凍結の不具合から湧水が発生した．それが拡大してトンネル周辺土砂が大量にトンネル内へ流入したことにより，大規模陥没に至った．これにより，トンネルは約 200m 間にわたり崩壊し，周辺地盤がボイリングしたことによって，壊れたトンネル覆工（RC セグメント）は元の深さより最大で 5m 以上沈降した．

これらの事例より，パイピングが発生しやすい細砂層での掘削では，小さな隙間からでも湧水が生じやすく，また，それが拡大すると大量出水となり，大規模陥没を起こすリスクが大きいので，確実な止水や止水確認の実施が重要である．また，地下水対策が重要視される駅部などの構築に際しては，遠隔操作型圧気工法や大断面シールド工法を採用することも考慮に値する．

写真 6.1　上海地下鉄 4 号線トンネル陥没に伴う地上建築物の倒壊状況

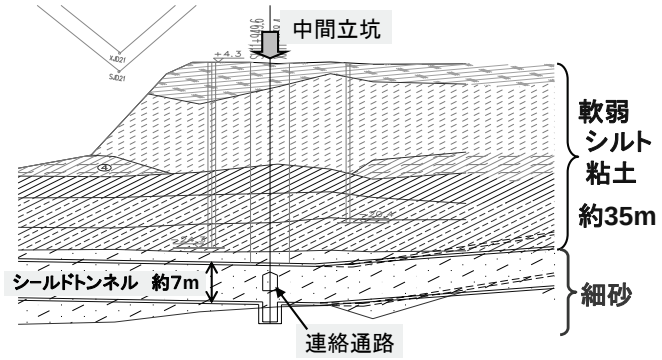


図 6.3　大陥没事故発生付近の地盤状況

6.3　おわりに

トラブルの傾向と対策などをこれらの事例から再度学ぶことにより，経験豊富なシニアエンジニアと若手技術者が共に実践し，学会などの集団としてノウハウを集積することも含めて，技術伝承するための具体的な行動が必要である．また，現在インフラ整備が旺盛で，軟弱地盤を有するアジアの国々へ発信するべきである．これらの知識と技術力に基づいてアジアの国々で技術支援をすると共に，競争力を持って当地の建設プロジェクトに参画することが期待される．具体的には，地盤が軟弱で，将来的にも地下建設が盛んな地域として，台北，高雄，上海，広州，天津，杭州，シンガポール，ハノイ，ホーチミン，バンコク，ジャカルタなどの多くの都市が挙げられる．

参考文献

1）D.R. Mastbergen, W.G.M. van Kesteren & A.F. van Tol: Souterrain The Hague: scouring in case of sand boils through a jet-grout layer, *Tunnelling; A Decade of Progress, GeoDelft 1995-2005*, pp.241-246, 2006.

2）橋本正，譽田孝宏：技術の伝承―現場の教訓から学ぶ―地下建設工事のトラブル，地盤工学会誌，Vol.60，No.2，pp.65-66，2012.

3）YU Xuanping and ZHU Weijie: Overview of the restoration work of Shanghai Metro Line 4, *Underground Construction and Risk Prevention, Proceedings of the 3rd International Symposium on Tunnelling, Shanghai 2007*, pp.21-30, 2007.

4）Wei F. Lee and K. Ishihara: Piping Failure of a Metro Tunnel Construction, *International Symposium on Backward Problems in Geotechnical Engineering*, TC302-Osaka 2011, pp.73-82, 2011.

【トラブル事例一覧表(海外編 その１)】

CODE No.	発生年月日	工事名	発生地域	位置情報	発生深度および地盤情報	トラブルの概要
海外-1		地下鉄駅舎開削トンネルの地中連続壁からの浸水　および漏水(事例１)	中国		掘削深度 ：GL-24.72m 地盤 ：砂質シルトとヘドロ質粘土，シルト質粘土の互層	片側線路部において下床版コンクリートが所定強度に達した後，支保工とし切梁の盛替え工に着手する予定であった．切梁盛替区間における東側コンクリート打設の完了後，西側立坑部の掘削を開始した際に，立坑西南隅角部の土留め壁から異常出水した．
海外-2	2004年3月	地下鉄駅舎開削トンネルの地中連続壁からの浸水　および漏水(事例２)	中国		掘削深度 ：約GL-17.5m 地盤 ：砂質シルト被圧帯水層	立坑底部まで掘削した際，立坑南側に位置する地中連続壁の継手部から突発的な漏水が発生した．
海外-3	2007年1月	地下鉄駅舎開削トンネルの地中連続壁からの浸水　および漏水(事例３) 上海地下鉄 某駅	中国 上海		最終掘削段階	西側立坑で底版部の掘削を開始し，その2日後にはほぼ完了していた．当日夕方，西側立坑の西南端部の地中連続壁の壁面において，突発的な漏水が発生し，その量はφ15mm水道管2本分の流量に相当した．漏水は濁っており，砂を含んでいた．
海外-4		場所打ちコンクリート土留め杭(アースドリル杭)　からの浸水と漏水(事例１)	中国 上海		最終掘削段階	立坑を所定の標高まで掘削した際，道路側の土留め杭の間から浸水が多箇所から発生し，徐々に土粒子も含んだ異常出水に進展した．土のうを用いた止水工を実施したが，あまり効果がなかった．立坑背面地表面にひび割れが発生した．隣接する仮設商店の壁にひび割れが発生し，柱が沈下するなどの被害が発生した．
海外-5		鎮江市の幹線道路北側に位置する地下広場の立坑工事	中国 江蘇省鎮江市	鎮江市の幹線道路北側	掘削深度 ：6.8～7.8m 地盤 ：GL-5～-8m付近は シルト質砂層 それよりも深部は 粘土と砂層の互層	GL-7.2m掘削時において，北側と西側に掘削面から40～50cm上部の土留め杭の間から多数の漏水を発見した．漏水量は徐々に増加し，細砂も流出した．土留め壁から1.5～2.0m離れた掘削底面において多数のボイリングを確認し，約10cm／日の砂が湧き出した．西側5階建住宅において壁と地面で多数のひび割れが発生し，建物東側で不等沈下が発生した(29mmと45mm)． 1～2日後に住宅ビル東側地面が局所的に陥没し，住宅ビルと立坑の間でも局所的な陥没が見られ，陥没深さ約4～5m，直径約1.5mであった．さらに，北側路地にある臨時塀が立坑の内側に傾き，路地の路面にもひび割れが見られた．浸水とボイリングにより，立坑背面地表面が沈下した(主として北側と西側)．
海外-6	2006年8月	地下鉄駅舎出入口工事におけるSMW土留め杭間からの浸水と漏水	中国			地下鉄駅の換気口立坑の水平変位量に異常が見られた．3日間で水平変位量7mm／日に達し，警報値である3mm／日を超過した．警報発生時，換気口立坑では捨てコンクリート打設は完了していたが，底床版コンクリート打設が未着工であった．換気口立坑の北西端部からの漏水を確認した．

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	キーワード	関連資料
・砂質シルトとヘドロ質粘土，シルト質粘土の互層が存在し，連続壁施工中に孔壁崩壊が発生しやすい状態にあった． ・連続地中壁に弱部がある可能性が高い． ・帯水層が被圧していることから，ボイリング発生しやすい．	・立坑内部からセメント注入工を実施して漏水を抑制した． ・漏水箇所を特定し，ポリウレタン注入工を実施して遮水を図った．	異常出水 砂質シルト ヘドロ質粘土 連続地中壁 ボイリング	上海市土木工程学会編:地下及隧道工程事故和风险控制技术资料汇编;pp.18-19,2009
・地中連続壁の継手部に不具合があった．施工品質に問題があると思われる． ・⑤2層は砂質シルト層であり，被圧帯水層でもある．	以下に示す応急材料を用いて湧砂口を塞いだ． (a)鋼管材　：約1t (b)急結セメント　：約12t (c)コンクリート　：約30m3	異常出水 砂質シルト 連続地中壁 ボイリング	上海市土木工程学会編:地下及隧道工程事故和风险控制技术资料汇编;pp.19,2009
地中連続壁の打継部から漏水と湧砂が発生したことから，この部分に弱部があると思われる．	・漏水量が多かったため，遮水専門会社による簡易的な遮水工を実施した． ・地中連続壁から土が流入した箇所に対して，鉄筋付き鉄板を地中連続壁の主配筋と溶接した．その後，土留め壁背面からポリウレタン注入遮水工を実施した． ・事故発生から約18時間かけて，異常出水は止まった． ・再漏水を避けるため，速やかに掘削作業を実施し，連続壁は800mm幅から1000mmに補強した．構造部の施工も促し，下床版を速やかに打設した．	漏水 湧砂 連続地中壁 打継部	上海市土木工程学会編:地下及隧道工程事故和风险控制技术资料汇编;pp.20,2009
杭間漏水の主な原因として，薬液注入による遮水効果が不足していたことが考えられる．これは，①注入圧が不足しており(0.5MPa)，造成径が小さいことと，②ボーリングの鉛直度を十分に確保できなかったことが原因として挙げられる．	・土粒子流出によって生じた隙間に対してセメント注入工を実施して充填した． ・北東端部(仮設商店側)に支保工として切梁を増設した．	浸水 漏水 現場打設杭 薬液注入圧	上海市土木工程学会編:地下及隧道工程事故和风险控制技术资料汇编;pp.21,2009
土留め背面の深層混合杭止水壁が局所的に施工不良な状態にあり，予定の遮水効果が得られなかったことが考えられる．立坑掘削完了時において，立坑背面の地下水位は掘削面より5m高く，土留め杭近傍の地下水は止水壁の施工不良部から漏水し，細砂が含まれていた．土留め杭から少し離れた掘削底面からは，掘削面以深の止水不良部から地下水が回り込み，細砂とともにボイリングした．	・立坑内の土留め杭近接部にコンクリート遮水壁を構築した．浸水位置より30cm高く，下端は掘削底面より30cmまで根入れした．高さは100cm，壁厚は40cmで，コンクリート強度はC20を使用した． ・土留め杭間で漏水が激しかった箇所に対しては，水ガラス速硬材を混ぜたモルタルとレンガで遮水壁を構築した． ・ウェルポイント工法を用いて地下水位を低下させた． ・薬液注入による止水効果は良好であり，立坑掘削面上の湧水とボイリングは完全に解消された． ・緊急対策が遅れれば，さらに土粒子を含む漏水が増大し，さらに大被害を招いた可能性が考えられる．	浸水 漏水 シルト質砂 粘土 ボイリング 現場打設杭	上海市土木工程学会編:地下及隧道工程事故和风险控制技术资料汇编;pp.21-22,2009
漏水箇所は，地中連続壁とSMWの接続部にあり，構造の不連続性によって均等に荷重が伝達できず，土留め構造としての効果が十分に発揮できていなかったことが考えられる．偏圧的に土水圧が接続部に作用したことから隙間が生じ，漏水が発生した．そのため，土留め背面土圧が大きく変動したことによって土留め壁が大きく変形した．	・直ちに漏水箇所付近に2本鋼管を打ち込み，セメントと水ガラスを別々に注入することによって止水した． ・坑内の出水部に土のうを設置し，地下水の浸透経路を分散させ，動水圧の低減を図った． ・坑内の溜まった水を速やかに排出し，早急に底版コンクリートの打設を実施した．	出水 SMW杭 地中連続壁 水平変位	上海市土木工程学会編:地下及隧道工程事故和风险控制技术资料汇编;pp.22-23,2009

【トラブル事例一覧表(海外編 その２)】

CODE No.	発生年月日	工事名	発生地域	位置情報	発生深度および地盤情報	トラブルの概要
海外−7	2007年11月	南京地下鉄シールド到達時に発生した湧砂を伴う異常出水事故	中国 江蘇省南京市	長江の沖積平野部	地盤 ：(上部)ヘドロ質粘土～シルト質粘土，自由水あり (下部)シルトおよびシルト質細砂，被圧水あり	シールド切羽が到達立坑背面に達したことを確認した後，手動で地中連続地中壁の鉄筋を切断するため，切羽を回転しようとした際，切羽下部の地盤改良体が破壊し，湧砂を伴う異常出水が発生した．この異常出水は瞬間的に増大し，瞬間最大量約260m3/hに達した．10分間後，シールドテール部においてトンネル周辺地盤が大崩壊し，セグメント隅角部やリング継手部およびセグメント継手部(ボルト結合)にひび割れが発生した．異常出水発生1時間も立たないうちに，到達立坑背面において地表面沈下が発生し，沈下が拡大傾向にあることを確認した．
海外−8	2004年9月	広州地下鉄３号線の河川直下横断シールド工事で発生した大陥没事故	中国 広東省広州市		シールド土被り厚 ：7.4m～8.6m(浅い) 満潮時水深6.5m 干潮時水深4.7m 地盤 ：(上半)軟弱ヘドロ質粘土 (下半)硬質中度風化岩盤	シールド切羽が河川堤防と河床の境界面付近直下を下越し掘進した際に崩落事故が発生した．崩落範囲は8m×8m程度であり，堤防も陥没した．緊急対応後に掘進を再開したが，約1週間後に2回目の崩落事故が発生した．崩落範囲は11m×5m程度であった．
海外−9	2003年7月	上海地下鉄4号線シールド工事のうち黄浦江横断時に発生した大陥没事故	中国 上海		シールド土被り厚 ：約30m 地盤 ：約GL-35mまで 軟弱沖積砂質粘性土層 それ以深 均等係数の小さい細砂 数十m以上堆積 地下水位高い(河川隣接)	黄浦江西岸中間立坑下部の連絡通路施工時においてトンネル陥没事故が発生し，トンネル付近の土砂流失により地上建築物の倒壊等が発生した． トンネルは，土被り厚約30m，直径約7m，離隔約7mの単線並列トンネルであり，泥水式シールド工法により施工が完了した状態であった． トンネルは約200m間にわたり崩壊し，周辺地盤がボイリングしたことによって，壊れたトンネル覆工（RCセグメント）は元の深さより最大で5m以上沈降した．
海外−10		オランダ デン・ハーグ 路面電車地下化および地下駐車場設置工事	オランダ デン･ハーグ		深度 ：GL-13.5m 地盤 ：均等係数Uc＝2～5の細砂層が主体	・長さ28mの鋼矢板土留め壁で囲まれた部分に対して開削工法を用いて掘削し，2層構造の地下駐車場とその下部に地下化した路面電車用の線路部を構築する工事 ・掘削底面以深には，止水目的のために逆アーチ状のジェットグラウト(JGP，直径1.8m)で止水固化改良した後，地下13.5mの開削工事を実施 ・地下水頭が地表面近くにあることから，パイピングが発生しやすい状態にあった． ・掘削の途中段階において，JGP接合部からパイピングを伴う異常出水が発生し，それに連動して土留め背面地盤が陥没し，掘削構内は水没した．
海外−11	1994年 10月22日	イギリス ヒースロー空港トンネル工事	イギリス ヒースロー		深度 ：土被り厚 約20m 地盤 ：硬質なLondon clay	・ヒースロー空港のCTA(Central Terminal Area)駅につなぐHeathrow Express用のトンネルをNATM工法で築造中に発生した． ・最初の地表面陥没は10/21 15時頃，2回目の地表面陥没は10/22に，3回目の地表面陥没は10/23に発生し，200mm以上の地表面沈下がCTA上部の広い範囲に広がった． ・NATM工法を用いて工事中であったトンネルでは，切羽面の崩壊ならびに広範囲におよぶトンネル覆工の崩壊が発生した． ・隣接したビルが傾斜するなどの被害があった．建物内の人々およびトンネル構内作業員は全員避難でき，死者はいなかった．

トラブルの原因	トラブルに対する対応策	キーワード	関連資料
・粘土と砂の互層であり，被圧帯水層がある． ・到達立坑の背面地盤改良部における破壊が主原因である．	異常出水状況が大規模であることと，収束せず拡大傾向にあったことから，異常出水により冠水した地下水を構外へ排水しながら，両立坑とシールドトンネルの接続部を遮断する方法を採択した．	異常出水 ヘドロ質粘土 シルト質細砂 改良体崩壊 陥没	上海市土木工程学会編:地下及隧道工程事故和风险控制技术资料汇编;pp.50-51,2009
シールド掘進時において排泥管の閉塞が頻繁に発生しており，シールド掘進を中断して排泥管内を繰り返し洗浄した．これに伴い，チャンバー内の圧力変動が大きく，掘削上半の軟弱ヘドロ質粘土が撹乱して泥水チャンバー内に流入し，それに連動して堤防の支持していた投げ石が落ち込み，崩落事故を招いたと考えられる．	・崩落区間に対してコンクリート(C20)を打設した． ・堤防が陥没した箇所に対しては，土のうを埋め込んだ後，鋼製支保工を設置した． ・上下行線の中心線距離は16mであるため，トンネル覆工内空変位観測を実施しながら下り線トンネル構内から上り線側へ補助注入を実施した．24時間体制で周辺地表面沈下を重点監視した． ・2回目の崩落事故発生後，崩落区間に対して累計150m3の粘土を投入した．排泥管内を繰り返し洗浄する作業を中止し，排泥管内の圧力変動を極力さけるため，逆流タイプの洗浄方法に切り替えた．	河川下横断 上半：軟弱ヘドロ質粘土 下半：硬質中度風化岩盤 陥没 チャンバー圧変動	
地表からトンネル間に中間立坑を施工し，凍結工法により連絡通路を掘削中に凍結の不具合から湧水が発生した．それが拡大してトンネル周辺土砂が大量にトンネル内へ流入したことにより，大規模陥没に至った．	・トンネル内外圧力をバランスさせるため，トンネル内に注水，陥没地盤への薬液注入等を実施した． ・沈下が大きい5棟の地上建築物は撤去した． ・詳細検討の結果，主に大深度開削工法による原位置修復案を採用した．	河川下横断 細砂 陥没 凍結不具合 大深度開削工法	YU Xuanping and ZHU Weijie: Overview of the restoration work of Shanghai Metro Line 4, Underground Construction and Risk Prevention, Proceedings of the 3rd International Symposium on Tunnelling, Shanghai 2007, pp.21-30, 2007.
JGPによる地盤未改良部からのパイピングが原因として考えられる．	薬液注入による地盤改良だけでなく，中床版を反力に取った圧気工法を併用し，地下水位を下げて開削を完了させた．	パイピング 細砂 JGP地盤改良不良 圧気工法	D.R. Mastbergen, W.G.M. van Kesteren & A.F. van Tol: Souterrain The Hague: scouring in case of sand boils through a jet-grout layer, Tunnelling; A Decade of Progress, GeoDelft 1995-2005, pp.241-246, 2006.
・トンネル掘削に伴う応力解放により，London clayがリバウンドして偏荷重が作用した． ・最初の仮設覆工(ショットコンクリート，発注者設計)に作用する荷重を無視して，本設覆工(場所打ちコンクリート，コンサルタント会社設計)の設計をおこなったことから，耐力に問題があった． ・近接構造物に与える影響を抑制するために実施した補助工法(Compensation Grouting)による影響を計測管理するシステムと，設計検証用のトンネル計測管理システムが連携しておらず，陥没につながる兆候を事前に検知できなかった． ・トンネル覆工ガーダー部およびトンネル覆工と中柱の接続部において，一部不具合があった．	・連鎖事故防止のため，コンクリート片をトンネル構内に詰めた． ・トンネル損傷箇所に対して，コンクリートを用いた補修した． ・地表面陥没箇所に対しては，埋め戻しをおこなった． ・健康安全機関(HSE, Health and Safty Executive)は，工事の作業および安全に対する基準を強化するとともに，関係機関ごとの責任の明確化，リスク管理の徹底について指導をおこなった．	陥没 リバウンド London clay (硬質粘土) リスク管理	Great Britain, Health and Safety Executive : The collapse of NATM tunnels at Heathrow Airport, a report on the investigation by the Health and Safety Executive into the collapse of New Austrian Tunnelling Method (NATM) tunnels at the Central Terminal Area of Heathrow Airport on 20/21 October 1994, Sudbury, HSE Books, 2000.

トラブルの発生しやすい地盤の特徴や特性について

地盤特性分科会 WG1 および WG2

概　　要

都市部における地下利用は盛んであり，そのために難工事も多い．地下工事中に発生するトラブルは，本委員会における事例収集とそれらの特徴を解析すると，「被圧水」「微細砂」「玉石」「鋭敏粘土」などが主な要因となることが挙げられた．これらの地盤が特徴的に存在する可能性について，各項目とその分布状況などについてとりまとめるとともに，堆積環境場として，問題地域の特異性の有無について検討し，地盤特性として留意する必要のある箇所や特徴について抽出を試みた．

キーワード：微細砂，玉石，鋭敏粘土，堆積環境，地質

7.1　はじめに

大都市圏で進む地下利用の頻度は増し，それと比例するように工事の難易度も高くなっている．地下工事中のトラブルとしては，均等係数の小さい砂層におけるパイピングやボイリング現象などによる出水，土砂の吸い出し，陥没，軟弱粘土地盤における盤ぶくれなどがあげられるが，こうしたトラブルと地盤条件との関係，施工時の留意点などは十分に解明されているとは言いがたい．

大都市が展開する沖積デルタ地帯には，大河川を中心とした三角州状の平野が発達し，上部には緩い砂地盤が分布するという構造的な特徴が見られる．特に河川流や河口部の沿岸流によって選別され，均等係数の高い砂が地表近くに分布する上，地下水位も GL-1～2m と比較的浅く，パイピングやボイリング現象が起こりやすい地盤となっている．

本研究では，都市地下土木工事においてトラブル事例を集積し，低平地デルタに堆積する均等係数の高い砂地盤，変形性に富んだ軟弱粘土地盤など，問題となる地盤条件との関連について系統的に整理した．しかし，トラブル発生にはヒューマンエラーなど，地盤条件だけが，要因となるばかりでないため，トラブル事例のみではなく，施工時に厄介な地盤として認識されている情報や事象についても聞き取り調査などを行い，その問題地盤の抽出を試みた．

その結果，NATM 工事においては，硬軟の差が顕著な岩盤と堆積層や風化岩などの境界，断層破砕部，地層が直立し，硬軟など地盤特性の変化が激しい部分において工事が難航し，時にトラブルが発生することが明らかになった．また，そのほかのシールド工事や推進等工事，開削工事においても同様の傾向に加え，被圧地下水の管理，制御の問題から発生する異常出水問題や微細砂，玉石，鋭敏粘土による工事の難航が挙げられた．

これらの問題は都市化が進む平野部での地盤問題であり，より近く深くまで開発が進む場合，被圧地下水の制御も含めて，工事の難易度を上げる地盤がどの地域にどのような成因で分布しているかを事前に把握することができれば，十分にトラブルを回避することが可能である．

関西地域では地盤情報データベースが最も先進的，かつ広域的に整備されており，これを有効に活用することにより，堆積環境の変遷や特徴が理解されつつある．よって，問題となる地盤がどのように分布しているのかを事前に知ることができれば，今後の計画や施工に役立つはずである．よって，まずはトラブルが発生しやすい要因となる地盤の特徴などについて述べ，さらに，大阪平野を事例として，工事を難航させる要因となる地盤がどのような要因で，どのような地域に堆積しているかを検討する．

7.2　トラブルを発生しやすい地盤の特徴

各トラブル事例の収集を担当した WG からの報告や相互の意見交換によって，特に注意を要する地盤は以下のものであることが明らかになった．

- 微細砂
- 玉石
- 鋭敏粘土

これらの地盤は必ずしも，ランダムに存在するわけではなく，一定の堆積環境場において堆積するものであると考えられる．また，土粒子に関しても特徴があると考えられる．

図 7.1 に示すように，土粒子の区分は理学的区分と工学的区分によってやや区分する粒径が異なる．

この中で，砂の区分は理学的区分では，工学的区分よりもより細かく区分している傾向がある．砂層は理学区分で

は，極細粒砂，細粒砂，中粒砂，粗粒砂，極粗粒砂の 5 段階に 0.063～2mm 粒径を区分し，工学的区分では，細砂，中砂，粗砂の 3 段階に 0.075～2mm を区分している．施工時に特に注意が必要な「微細砂」というのは，工学で用いられる細砂のうち，特に細粒なものを示していると考えられ，これは，理学区分でいう極細粒砂の粒子（0.063～0.125mm）であると考えられる．また，玉石という定義は粒径区分ではなく，形態によるものであり，土粒子区分には含まれない．

以下に各用語を簡単に説明する．

7.2.1 微細砂（びさいしゃ）

細粒な細砂のことであり，前述にあるように，理学区分でいう極細粒砂（0.063～0.125mm）程度の砂を指す．粒径が揃っており，粒径加積曲線でみると非常に立った，均等係数が小さい砂というイメージが強いことがわかった．施工時に薬液注入をしてもほとんど効力が上がらない砂で，推進で掘削時などは飽和した状態で外乱を受けると容易に流動化することが特徴である．施工時に問題の多い微細砂のことを「コス」と呼ぶ場合もあるようである．大林組土木本部において昭和 45 年に作成された「工事現場用語集」（京都大学大学院工学研究科木村亮教授より提供）には「こす（小砂）」という用語が掲載されている．これには，「粉状の砂に腐食土が混入した軟弱土，大阪の地盤に多く見られる」とある．おそらく，細粒砂→細かく小さい砂→小さい砂→小砂（こす）と変化したと思われる．ここで定義された「コス」には粘性土や有機物も含むとしており，やや粘土等の細粒分も含まれる細砂というイメージもある．

いずれにしても粒径の揃った砂層が大部分を構成するような地層が飽和した状態で外乱を受けると容易に流動化することが問題であると考えられる．

7.2.2 玉石（たまいし）

分野によって定義が大きく異なるが，基本的に，礫の一種で丸みを帯びた石である．河川水によって運搬されるに当たり，角が取れて丸くなっているものを一般に指している．概ね粗石（75mm）以上あるいは大礫（64mm）以上のものを定義しているが，粒径というよりも，工事を難航させる厄介な礫という意味で「玉石」と呼ぶ傾向がある．

本委員会内において議論したところ，トラブルの原因になりやすい玉石とは，1）平野地下の砂礫層の中に点在するやや大きな円礫のこと，2）東神戸～播磨灘沿岸の平野部や琵琶湖東岸に見られる，河川近傍の河原を起源とする円礫層を指している．

ボーリング調査時には 10cm 以下の玉石がサンプリング時にビットを摩耗させたり，地盤が撹乱するなどの原因となり，シールド掘進の際には，15cm 以上の粒径で排泥管に詰まったり，20～30cm でスリットに目詰まりを起こしたり，刃先を摩耗させたりして工事が難航する．大阪平野部では，従来の淀川河川（古大阪川とも呼ぶ）流域の天満砂礫中にこぶしサイズの玉石が，伊丹丘陵付近に分布する伊丹礫中には人頭サイズの礫が混入する．また，神戸地域や滋賀湖東地域では，山地末端部付近にて河床を起源とする礫層が分布し，工事の妨げとなる．「玉石」という言葉が粒径区分に明記されていないことから，トンネル標準示方書（2006）[2] では，粗石と明記している．

7.2.3 鋭敏粘土（えいびんねんど）

高塑性かつ高含水比で，液性指数および鋭敏比の高い粘土のことであり，大阪平野では上町台地より東側の河内平野で多く見られる．N 値が 0 以下の沖積粘土層が分布する地域がこれに該当すると考えられている．開削時に大変形が生じたり，シールドなどの工事では，後続沈下などが発

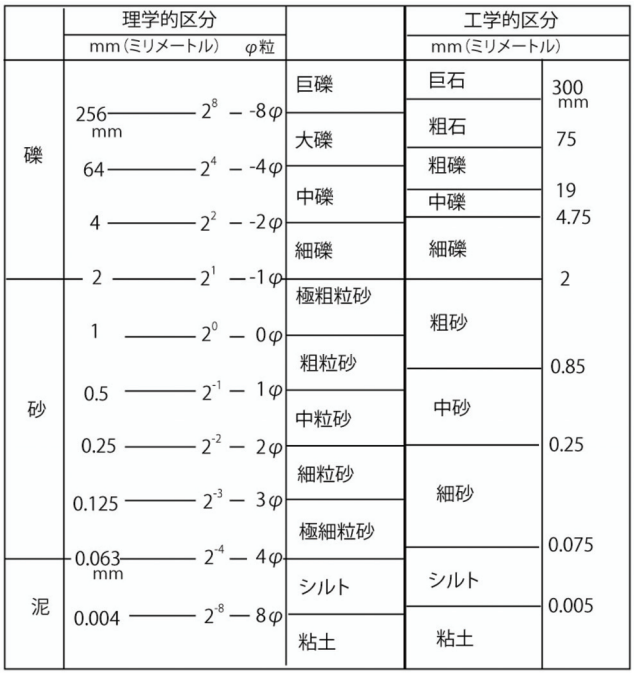


図 7.1 粒度区分表（左が理学的区分，右が工学的区分）[1]

生したりするなどの問題がある．

以上のような問題の多い地盤がどのような堆積環境で分布しているかを次に大阪平野の事例で検討する．

7.3　大阪平野の地盤の特徴と堆積物の特徴

大阪平野は，周囲を六甲山地，生駒山地，金剛山地，和泉山脈など標高 500～1,000m 程度の山地や，西側を淡路島によって区切られた盆地形状の中にある低平地である．その環境は盆地形状の一部が海に没した大阪湾を含んでおり，全体の環境としては太平洋の外海よりも一つ内側になる瀬戸内海の一部に属し，大きな波浪などから遮られ，穏やかな環境下にある．この盆地に流れ込み堆積する土粒子のほとんどは，現在は淀川と呼ばれる河川（大阪川）から供給されている．この河川には江戸時代以前，河内平野を北に流れる大和川も合流していた．河川には広く京都盆地や奈良盆地周辺の山地の土砂などが河川に流れ込み大阪平野に堆積している．そのため，この地域に分布する古生代の泥岩・砂岩やチャート，中生代の花崗岩類が主成分である．河川起源の粗粒物に対して，代表的な堆積物は海成粘土である．これは新生代に入ってから気候変動が顕著になり，氷期と間氷期が交互に繰り返されるようになった約 150 万年前以降にみられる堆積物である．温暖期に海水面が上昇し，海域になった地域を中心に海成の粘土層が形成された．大阪平野内にはこの粘土堆積物が少なくとも 15 枚確認されている．その最上部が沖積粘土であり，その一つ下の海成粘土が上部洪積粘土と呼ばれるものである．大阪平野部では，大部分の地域において沖積粘土が堆積し，その堆積環境は海成の時期を含んでいる．**図 7.2** に大阪平野部の表層地質図を示す．

薄い水色で示す範囲は基本的に沖積層分布域であり，その大部分の地下に海成粘土が分布する．平野部の東西断面を**図 7.3** に示す．水色で示される部分は沖積粘土層（Ma13 層とよぶ）であり，さらに下部の黄緑色の部分は，上部洪積粘土層（Ma12 層とよぶ）である．さらに下に分布する粘土層も一部黄緑色で示している．これらの粘土層の間に分布する層が砂層あるいは砂礫層であり，Dg 層と呼ばれるものである．図中では，オレンジや赤で示している．上町台地には沖積粘土層（Ma13 層）は分布せず，平野部の低平地に広く分布する．

このような粘土の形成と海水準変動を合わせて検討すると**図 7.4** のような堆積様式が考えられる．

沖積粘土に注目すると，海成粘土（Ma13）の下面に分布する赤い線は海水面の線を示し，新島では，約 1 万年前，これに対して北津守コアでは約 9000 年前である．これは，緩やかに海水面が上昇し，これにより海が拡大したことを示している．海の端部（海岸線付近）は RS-TS 間にみられるような干潟の堆積物が分布している．もっとも海水面が高かった時期（約 5000 年前）には海岸線は上町台地まで達し，その西側では粘土よりも砂層が卓越する．この部分は

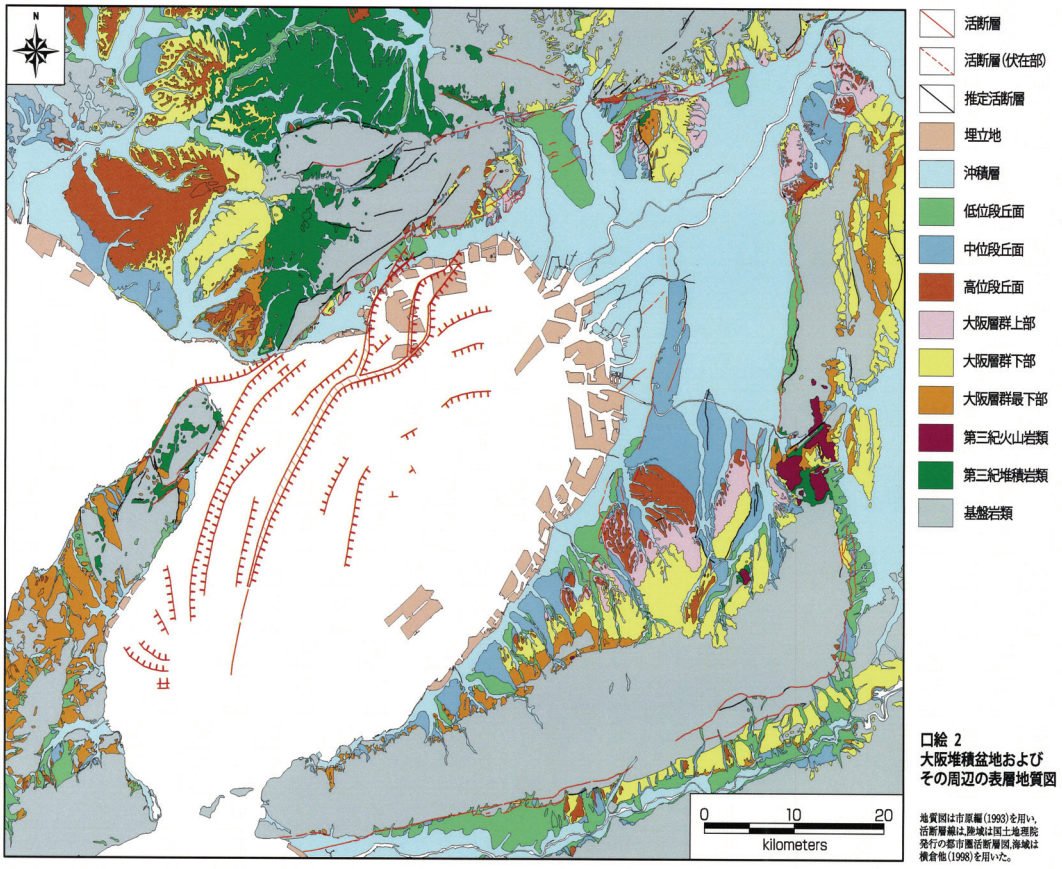


図 7.2　大阪平野部の表層地質図 [3)]

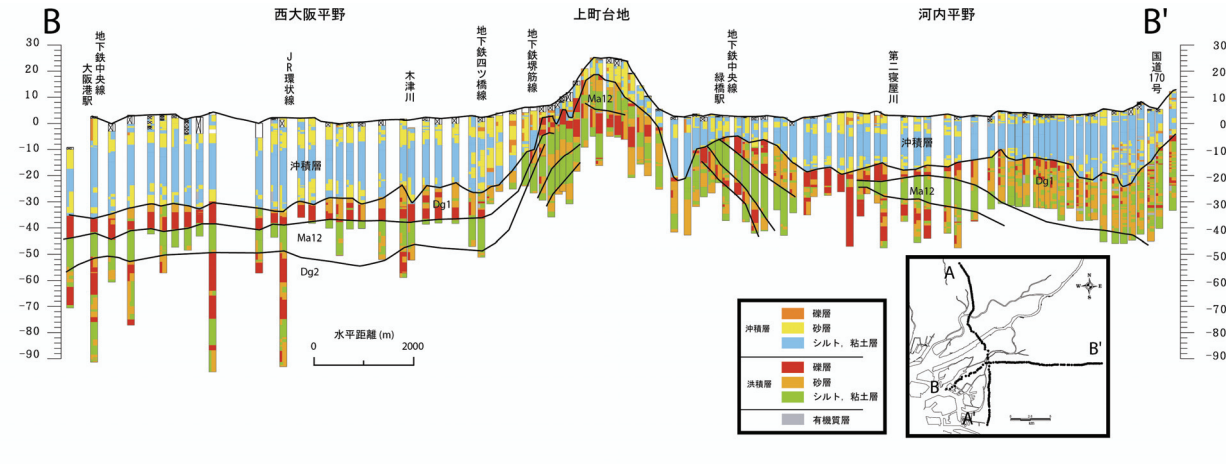


図 7.3　大阪平野部の東西断面(咲洲～中央大通りに沿って)[4)]

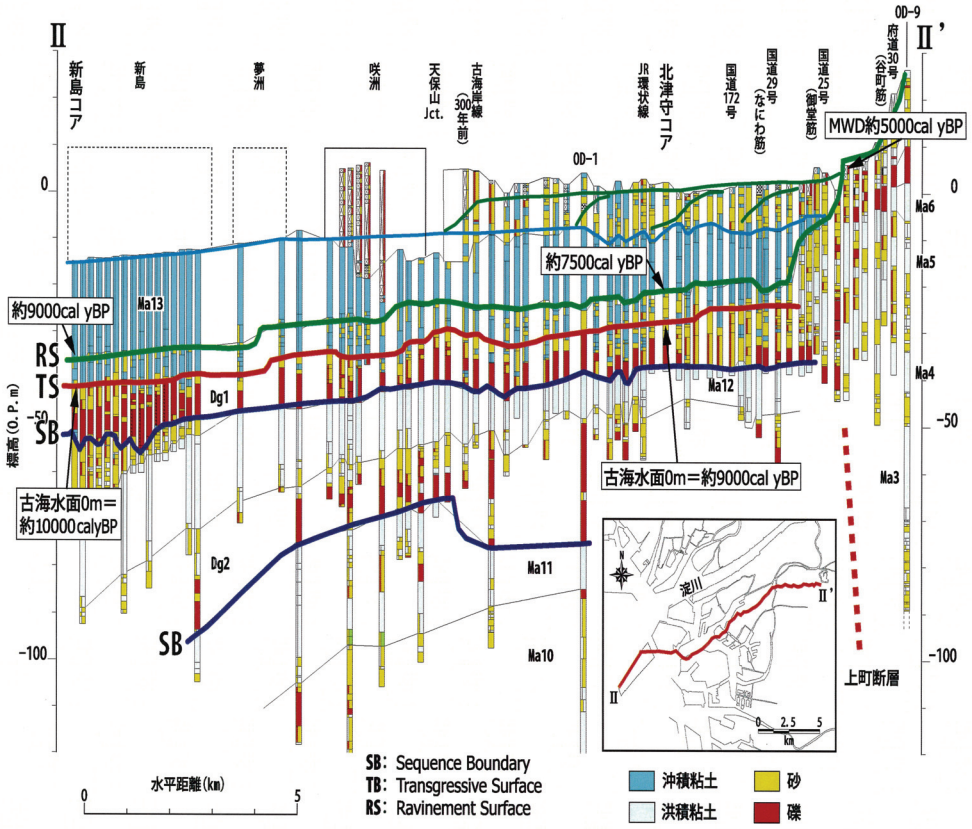


図7.4　海水準変動を考慮した検討結果[4)]

海岸砂州(砂浜)が形成されていたと考えられる．その後，海水準が現在の海岸線まで後退する期間には，海成粘土の上面に河川から供給される砂質堆積物(河川堆積物)が分布する．海水準の変化の途中で，水深が浅い場合は，粘土層が堆積するよりもシルト～極細粒砂(微細砂)が分布しがちになる．**図 7.3** で沖積粘土の上下に見られる黄色で示した砂の部分がこれに該当する．一般に土質特性として液塑性などを検討すると，このような海水準変動によって堆積する海成粘土層の上下層にシルト～極細粒砂が分布する．下位水準の変動や緩やかでその後，大きな河川による砕屑物の流入がある大阪平野の中央部(淀川河川などの分布する地域)では，顕著に見られる．このようなシルト～極細粒砂層の分布する部分は海成粘土層の上下に分布すると認識すれば，発見の目安になると考えられる．場所によっては，緩やかな河川の流れ近傍では，粒径の揃った細砂層であると考えられるし，池や沼状になった周辺であれ

ば，少し流れが停滞し，粘土あるいは有機物を含有する細砂層になると予想される．このような堆積物は，ちょうど**図 7.5** に示すように，縄文海進の末期の地形復元図に示される湖沼や河川の周辺に分布すると考えられる．

このようなシルト～細粒砂層の特徴は，あまり明確な地層境界を持たず，粘土層から連続して漸移する場合が多い．**図 7.6** に示すように連続して液塑性や細粒分含有量分布を見れば，沖積の海成粘土層の上下層がシルト質に変化していることがわかる．

また，粘土層の分布は**図 7.7** に示すように，平野の低地部に一様に分布していることがわかるが，特に鋭敏粘土が分布する地域をN値＝0の粘土層の分布地域として検討すると，**図 7.8** に示すように上町台地よりも東側を中心に分布していることがわかる．以上のように，粘性土や細粒砂層の分布は，堆積環境や堆積当時の地形に大きく影響を受けていることがわかる．

堆積学的に考えれば，一般の平野堆積物の中でみられる砂質堆積物は，前述の河川堆積物が一般的である．いわゆる洪水堆積物である．静穏な時期においては河川の蛇行部などでは，一定の流速に対して粒径の揃った堆積物が砂洲状に堆積するが，それは，かなり局所的な堆積物になる．洪水時に堆積する砂礫層は，流速の変化も激しく，いわゆる淘汰の悪い(均等係数が大きい)堆積物から構成されるため，その分布範囲や特徴は場所によって異なる場合が多い．そのほかに堆積学的には淘汰が良く，細粒な砂質堆積物が分布する地域の一つとして，海岸砂州がこれに該当すると考えられる．特に沖積層中にみられる海岸砂州は**図 7.12** に示すような地域に分布している．

図 7.5　縄文時期の最大海進時期以降，海退期の復元図 [4]
河口付近や湖沼部のみでなく，図中赤丸で示した，浅瀬の海底でも粒径の揃った砂が堆積しやすい．

一方，玉石の分布については，河川に沿って概ねその分布域を検討することが可能である．前述にもあるとおり，旧淀川河川沿いにはコブシ大の玉石が，伊丹丘陵においては，人頭大の玉石が分布するということが，先人の経験として残されている．ボーリングデータからは，礫層として入力されたデータであり，玉石という情報は存在しないため，玉石の分布する地域をデータベースから抽出することは難しい．**図 7.9** には第 1 洪積砂礫層の層厚と構成粒子を円グラフで示した．礫の割合の多い地域は基本的に大阪市内から北の部分である．これは，淀川水系および伊丹丘陵を主体とする北摂山地から由来する礫であると考えられる．河川の上流から供給されたと考えると，これらの玉石の多くは生駒山系や六甲山系からの花崗岩，花崗閃緑岩に由来するものか，北摂山系からのチャート，頁岩，砂岩に由来するものと考えられる．データ数は少ないが，**図 7.10** には第 2 洪積砂礫層の分布も示す．

7.4　トラブル事例と堆積物の特徴

トラブル発生についてのデータを収集するに当たり，大阪平野を中心にデータ提供を各施工会社や行政関係者にお願いして収集を行った．

収集データでは，トラブル発生箇所を平面図にプロットすることができたが，発生した深度とその地層を正確に把握することは難しかった．しかし，それらのうち，前述で可能性を検討した，沖積砂層や Dg1 層に関係のありそうな事例をピックアップし，ボーリングデータから推測したトラブルが多く発生しそうな地域と実際に収集したトラブル事例との関係について検討した．

収集したデータのうち，砂層におけるトラブルで比較的，発生深度が浅いと考えられる事例は，沖積層中の砂や礫に関係があると考えられることから，10 事例を沖積砂層分布図にプロットした(**図 7.11 参照**)．図中黒星が砂層で土

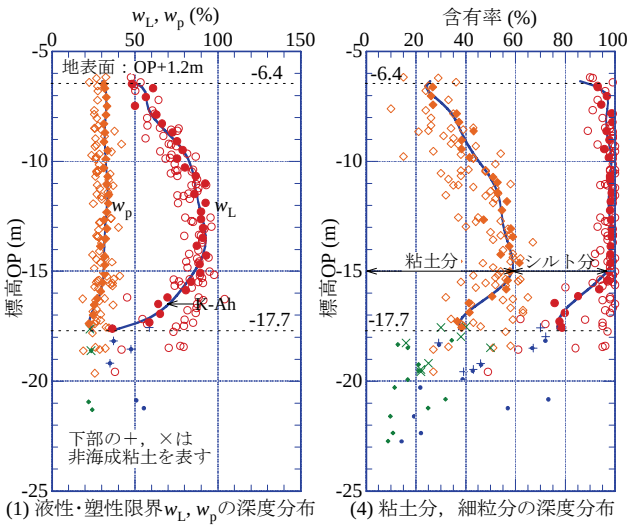


図 7.6　大阪福島地域の沖積粘土層の土質特性と深度分布 [3]
左：液性限界および塑性限界の深度分布
右：粘土分，細粒分の深度分布

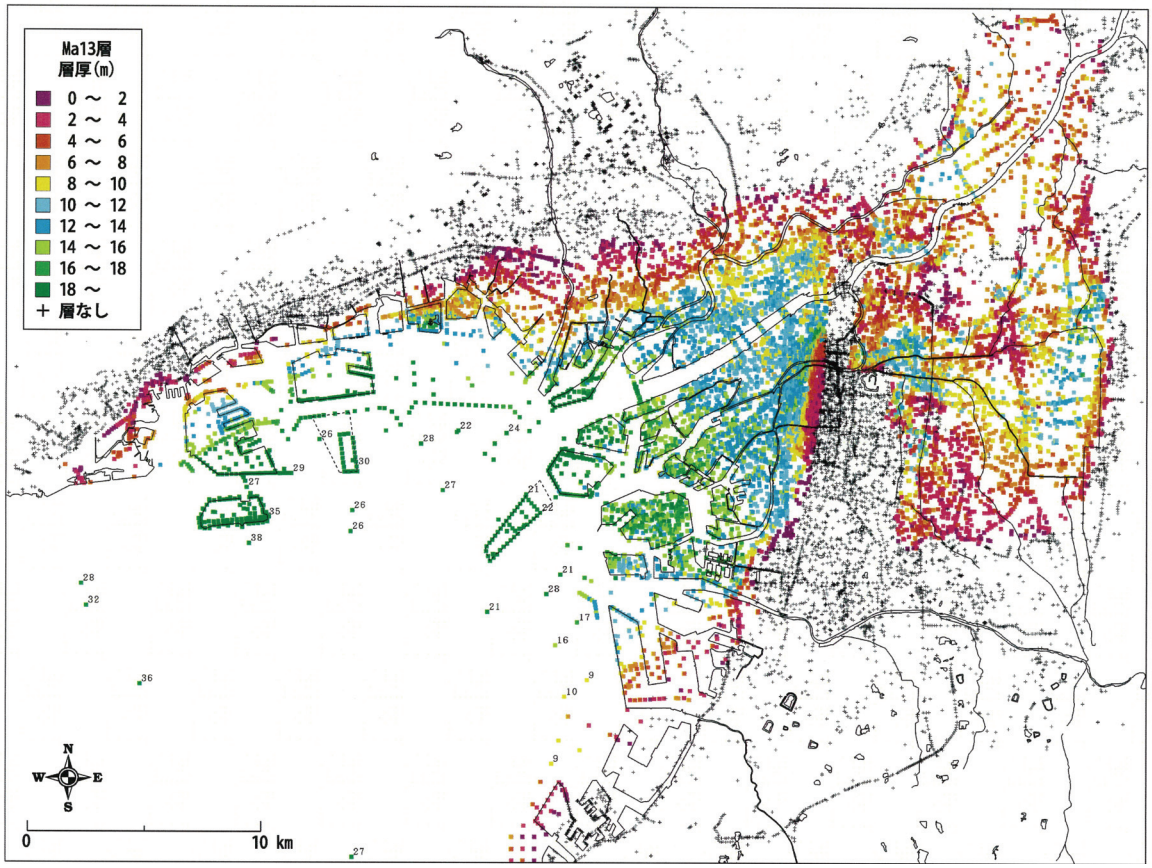


図 7.7　Ma13 層の層厚分布図 [3)]

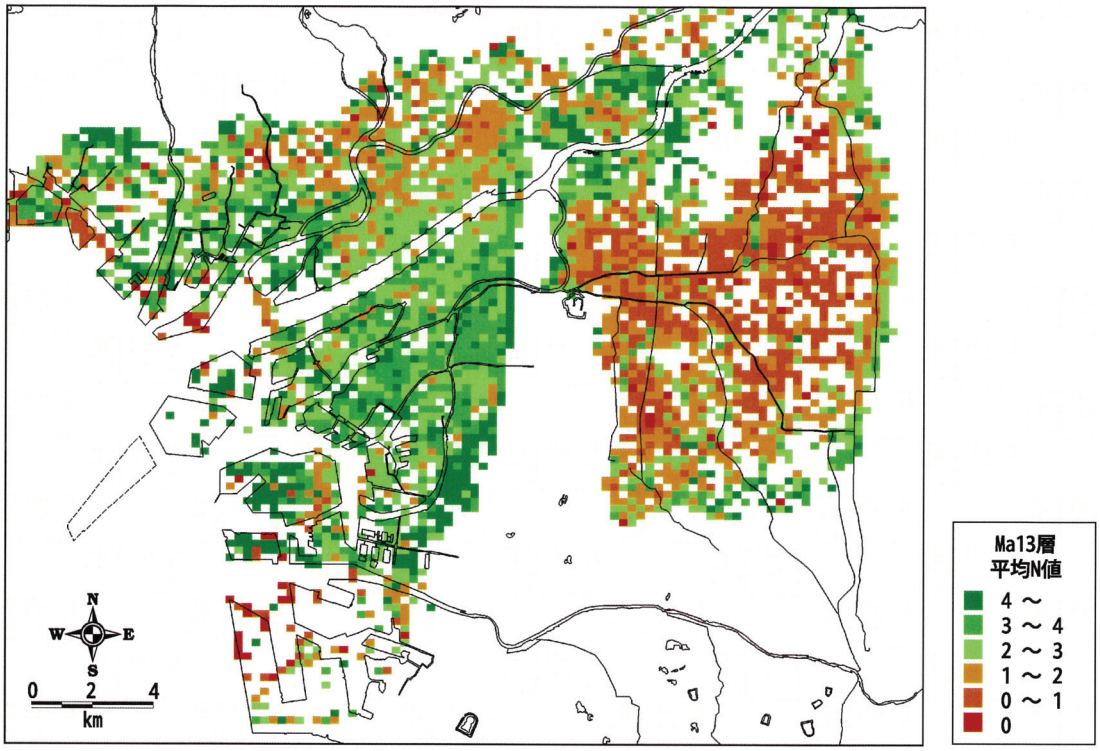


図 7.8　沖積粘土層の各孔内における平均 N 値分布 [3)]

オレンジで示した部分が N 値＝0 あるいは 0 に近い値を示しており，鋭敏粘土が分布する地域である．

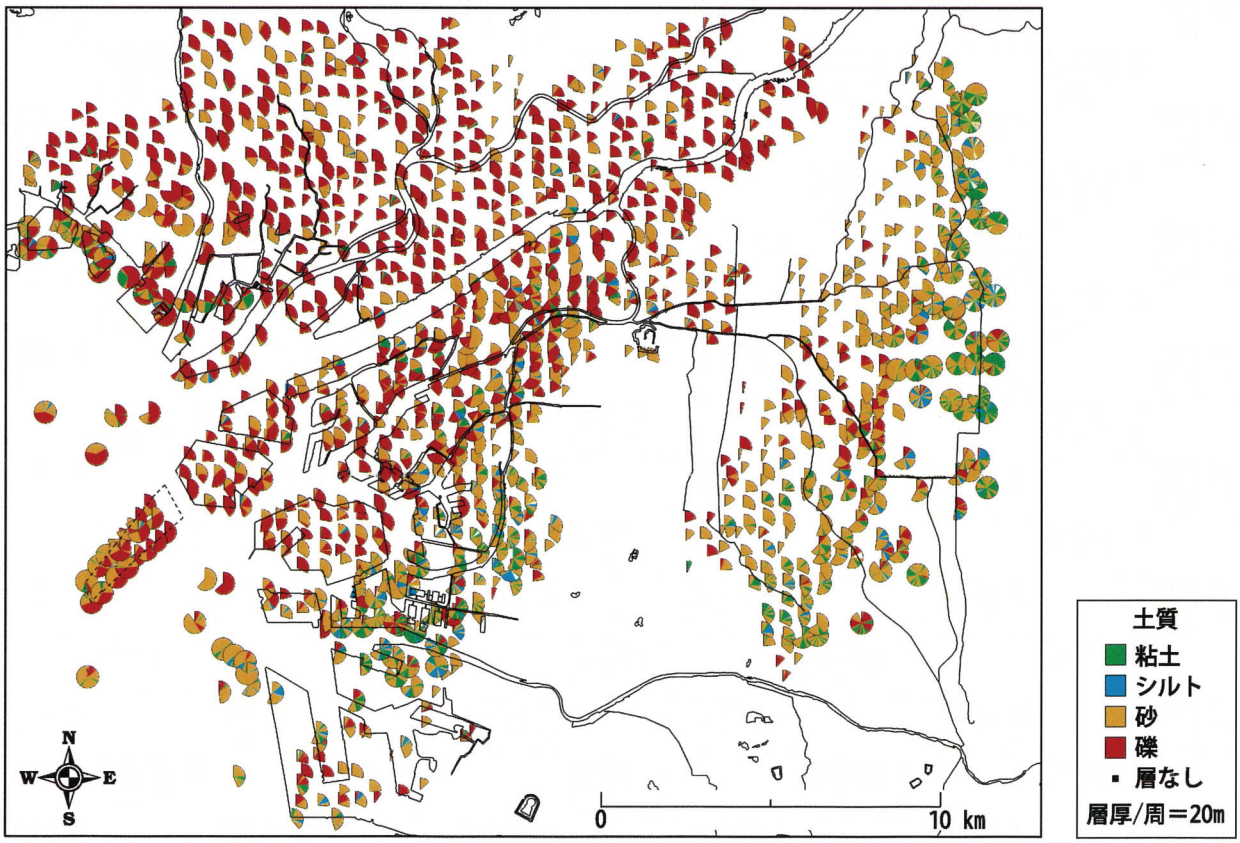


図 7.9　第１洪積砂礫層の土質分布図 [3)]

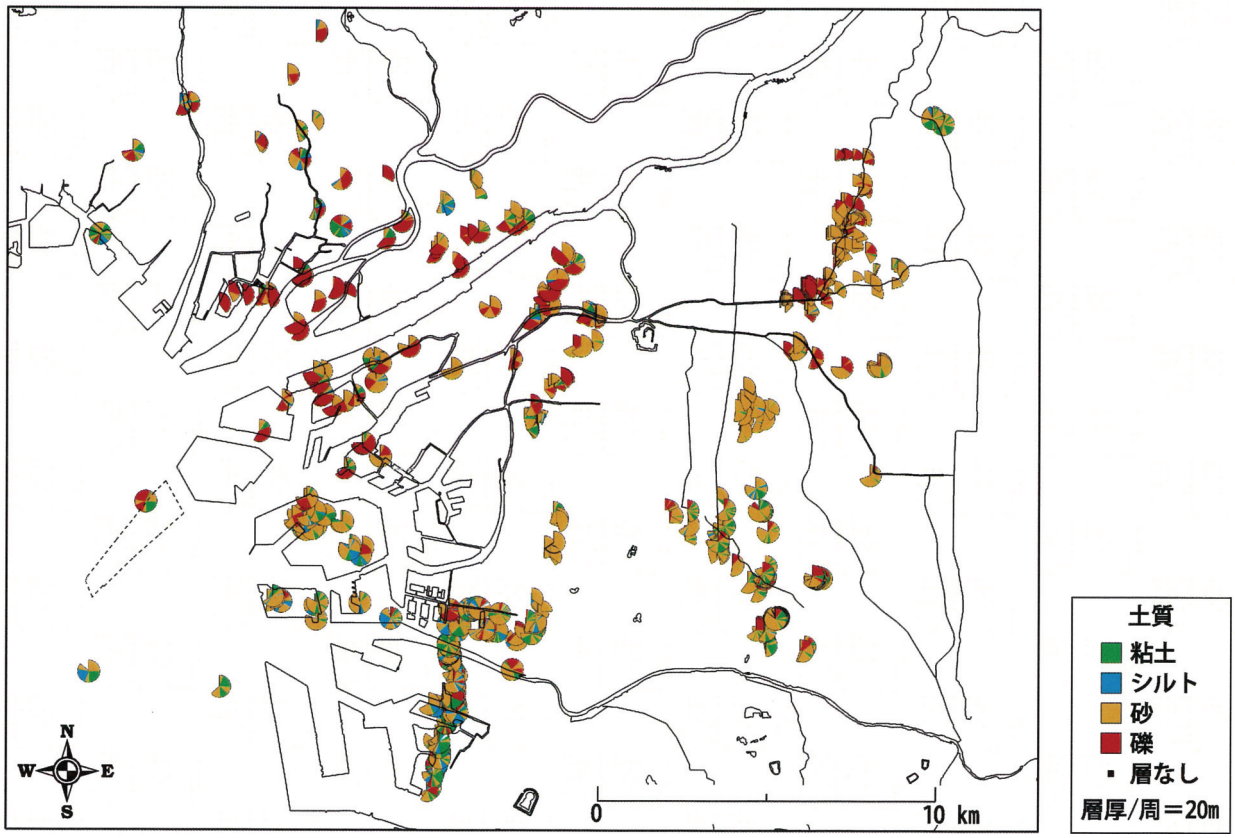


図 7.10　第２洪積砂礫層の土質分布図 [3)]

留め掘削時の出水等のトラブルの発生したもので，赤色星印は Dg1 層であると考えられる．トラブル箇所のすべてが沖積砂層の分布範囲にみられるという共通点以外には特に特徴的な点が見当たらない．大阪平野では**図 7.12** に見られるように，上町台地西部に沿って広がる砂州が特に層厚が厚く，比較的沿岸流によって淘汰されるため，粒径が揃うと考えられる．この砂洲に沿って２事例のトラブルが発生しているが，この部分にトラブルが集中しているというわけでもない．

河川沿いにトラブルが多発する可能性について検討するため，旧河道のデータと合わせて考えた．**図 7.13** や**図 7.14** に示すようにやや河川に沿ったデータや淀川沿いのデータなどがこれに該当する．

図 7.13 では，京街道に沿った小河川に沿ってトラブル発生個所が分布するが，小河川でそれほど淘汰のよい(均等係数が小さい)砂が分布するとは考えにくい．**図 7.14** では，旧淀川河川との関係を見れば，西南側のトラブル箇所は河川の近くであり，淘汰の良い砂が分布する可能性の高い位置に属する．

次にこれらのトラブルが沖積砂層よりももう一つ下位の砂層，すなわち Dg1 で起こっていた場合についての考察を行う．**図 7.15** に Dg1 層とトラブル発生個所の関係図を示す．**図 7.15** では，Dg1 層について，層厚を円弧で示し，層内の粒度特性を色で示した．旧淀川水系～北部においては，礫質に富み，河川の流れから離れた住之江区付近においては，やや細粒の粘土や砂がみられる(**３章**参照)．河内平野においては，生駒山に向かうほど層厚が増すが，全体に細粒の傾向がみられる．**図 7.15** において赤色星印で示した 2 事例は，シールドのビット，フィッシュテール，スクリューコンベアの異常摩耗が見られた地域である．シールド通過部の事前検討による断面図では，沖積の砂層あるいは礫層を通過すると推定されている．**図 7.15** から見れば，Dg1 層(沖積礫層や砂層を含む)には礫質なものが多く，淀川旧河道を横断する本シールドの計画部には，特に河床の大礫が多く含まれると考えられる．これにより，シールドの異常摩耗が発生した可能性が高い．しかしながら，シールド掘進位置は全てが礫層内のみを掘進するわけでは無く，上部砂層部にも一部，掘進を妨げる程度の礫が含まれていた可能性も考えられる．

堆積環境の推定には，原位置における，事故前と事故後のコア試料を比較するなどの詳細な検討を行わない限り，はっきりとした原因の因果関係は特定できない．今回の検討では，このようなコア試料が存在しないため，詳細な検討は行えなかった．また，トラブル発生位置に対し，発生した深度や該当する地層に関する情報は，位置(緯度経度)情報はあっても，トラブルに直結した地層が不明な場合が多く，これ以上の検討は難しい．

以上の結果を合わせても，100%トラブルの発生個所が淘汰の良い(均等係数が小さい)砂が原因として発生していることを明確に示唆する結果とはならない．ただし，沖積層部におけるトラブルのみを抽出すれば，旧河道や海浜砂州の分布との関係は必ずしも皆無ではない．しかし，その要因をはっきりさせるためには，もっと事例を増やして検討する必要がある．礫層，おそらく玉石とシールド異常摩耗地域は関係があると考えられるし，砂層が分布する地域も Dg1 あるいは，この上面に見られる粘土層の上端域や下端域に分布するものであり，注意をする必要がある．

7.5　トラブルを引き起こす砂の特徴についての考察

一般にトラブル時に出水と共に観察される砂が「微細砂」と呼ばれる，極細粒砂であるという証言をもとに，その原因について考察を行う．砂の区分は一般的に地盤工学と地質学では少し異なる．**図 7.1** には粒度区分について，両学問での区分の方法と違いを示したが，基本的に今回のトラブル時に見られる「微細砂」と呼ばれるものは，この区分から言えば，理学的区分では極細粒砂，工学的区分では細砂の特に細かい部分を指すと考えられる．このような砂の挙動はどのようになるか，一般に堆積学で研究された流速と運搬の図を用いて考える．

図 7.16 は流速と運搬の図を示したものである．曲線 I と II で区分される領域は，それぞれ土粒子が堆積する領域，運搬される領域，浸食運搬される領域に区分される．特に曲線 I では，再び浸食運搬が始まる領域が下に凸の曲線となっており，この凸の部分が砂の，特に極細粒砂～細粒砂ところに対応していることがポイントである．すなわち，急激な流速の増加では，砂粒子(極細粒砂～細粒砂)の土粒子がもっとも初期に移動を開始することになる．出水などで地下水が急激に移動を始めた場合，地下水中において，急激な流速の増加が起こることになり，土粒子中の間隙を地下水が勢いよく流れるばかりではなく，**図 7.16** のような関係で細粒な砂が間隙を縫って，他の粒子と差別的に移動し，出水と共に出てくるのではないかと考えられる．つまり，微細砂から構成される地層が分布しなくても，微細砂を含む砂層があれば，選択的に細粒の砂のみがトラブルの発生時に出水と共に移動して観測される可能性が高い．

7.5.1　微細砂についての考察

これまでのトラブルの要因になりやすい地層として，3 つの要因を示した．その中で微細砂がどのような砂であるのかということについて，検討を行う．

細粒砂による工事が難航する場所を委員内において情報を収集したところ，大東市北部の寝屋川流域付近の GL-4m 付近に，これに該当する砂があるとの情報を得た．該当する砂層は工事中においてもすぐに流出し，移動するため，空洞化するなどの問題を発生させ，下水管などの埋設時には非常に工事が難航したとの証言がある．報告書を用いて情報をたどると，この細粒砂が分布する，大東市～門真市付近のデータベースから寝屋川西部に該当すると考えられる砂層が確認できた．両者とも，砂といっても大部分がシルトを含んでいる．しかしながら，粘土分の含有

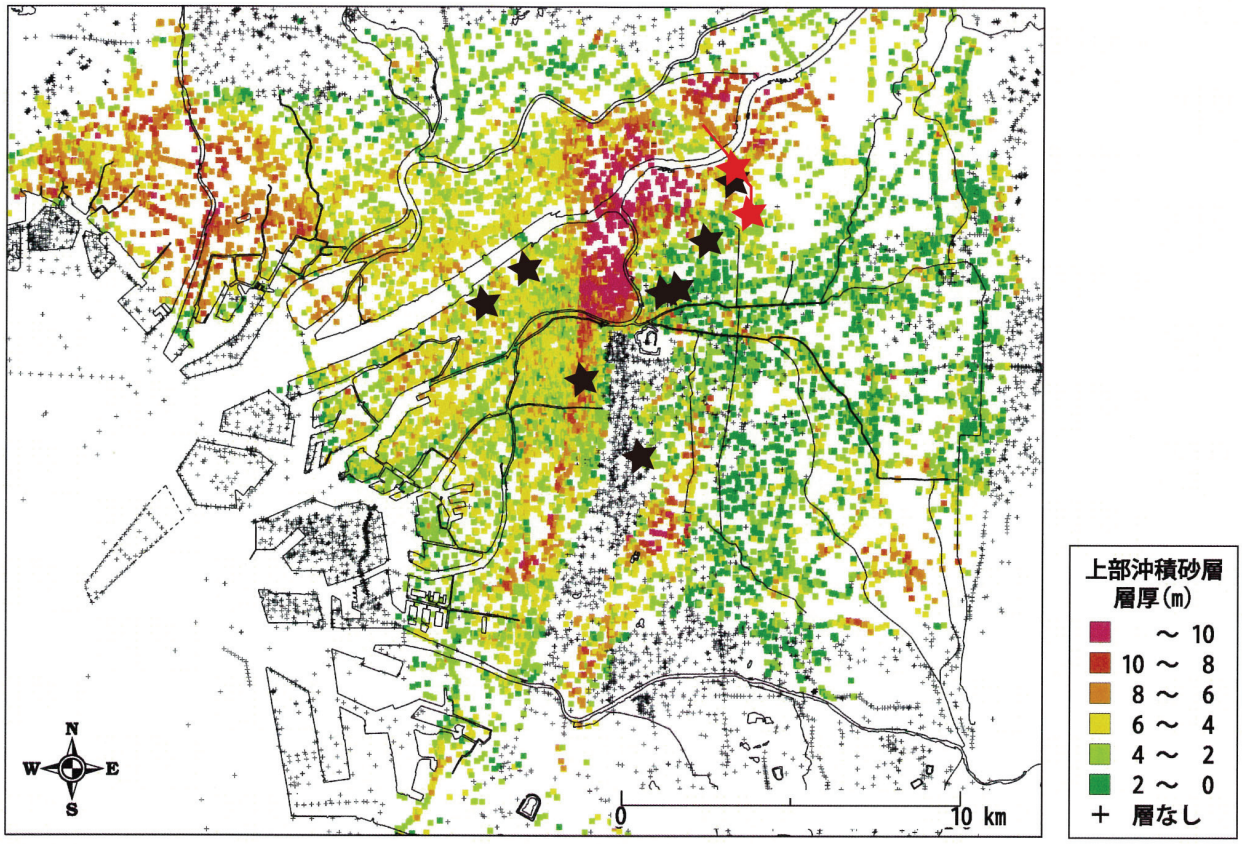


図 7.11　上部沖積砂層の層厚分布図[3]にトラブル発生箇所を重ねた

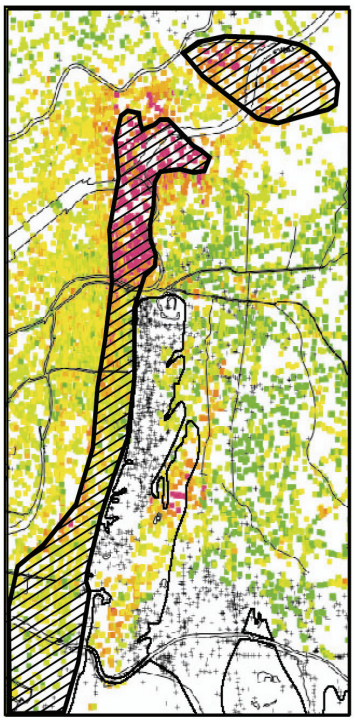


図 7.12　沿岸流による砂洲の発達する地域の分布[4]
(図中斜線部)

図 7.13　旧地形図にプロットしたトラブル発生個所
：東大阪(国土地理院　昭和 4 年　1/2.5 万)[5]

図 7.14　旧地形図にプロットしたトラブル発生個所
：西大阪（国土地理院　昭和 4 年　1/2.5 万）[5)]

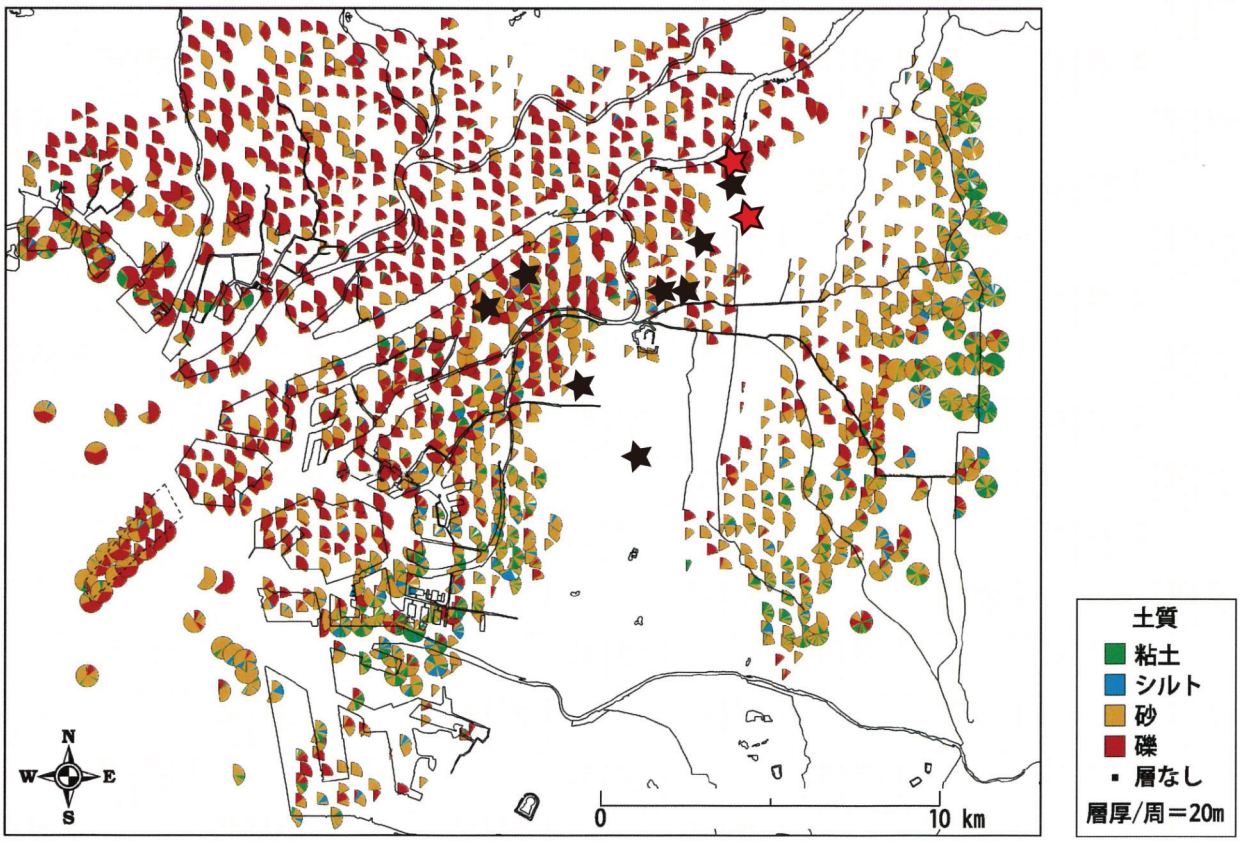


図 7.15　Dg1 層の地層分布図 [3)]にトラブル発生箇所を重ねた図
黒★は沖積砂層中で発生したと考えられたもの，赤★は Dg1 層中で発生したもの

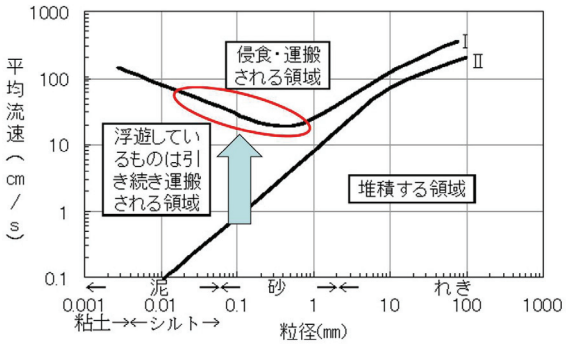


図 7.16　流速と粒度の関係

はほとんどなく，さらさらした極細粒砂~シルトであると考えられる．大阪平野に広く分布する沖積粘土(Ma13 層)のほぼ直上に分布する上部沖積砂層に該当する部分のものである．ボーリングデータベースで該当地周辺のボーリングデータと N 値を示す(図 7.17 参照)．図中の粘土層上部に赤枠で示した部分が「微細砂」に該当すると考えられる．細粒砂であり，N 値が小さく，腐食層(図中黒色部)が同じ深度に卓越する．図中の右側では，砂層が厚くなり，N 値も大きくなる傾向があるが，この東側には寝屋川があり，自然堤防に近接していることに起因する．コスに該当すると考えられる．箇所においてサンプリングされたコア試料や土質試験結果資料を大阪東部土木事務所より提供を受け，検討したところ，図 7.18 に示すような粒径加積曲線からなる砂であり，極細粒砂～シルトに該当する．これは図 7.16 において最も移動しやすい砂に該当する．また，ボーリングデータを見れば，前後の地層中に多数の腐食物や有機物が確認されていることから，従来の「微細砂」の定義に該当する砂層であると考える．また，幾人かの証言では，泉南の海岸付近や南河内大和川付近にも分布するなどの情報があり，非常に興味深い．

7.5.2　「微細砂」の堆積環境と分布について

今回の情報収集でわかったことは，「微細砂」が細粒砂で構成されるばかりでなく，腐食土なども前後に含むこと，沖積粘土層の上部に分布すること，などである．また，今回の情報から分布域が特定された，北河内地域の堆積環境の特徴も合わせて考えると，縄文海進後に海水面が低下する際に一部の地域で「微細砂」が堆積したと考えられること，その分布域は，海退時に沼や湖など排水不良で一部水域が停滞した地域に分布する(腐植土の生成から)ということが考えられる．このような腐植土堆積可能地域に近接して，河川があれば，短期的に細粒な砂が流入し，「微細砂」が形成される可能性が高い．

大阪平野部では，図 7.19 に示すように縄文海進時の最大海進期には大阪平野のほとんどが海に没し，その後，海退時に河内平野を中心に池や沼など排水不良地が構成されている(図 7.20 参照)．このような時期に「微細砂」が形成されたとしたら，同様の堆積環境条件にあった場所においても「微細砂」が形成される可能性が高い．図 7.20 図中に同様の堆積環境と考えられる地域に丸印を示した．このような地域についても今後検討する必要がある．また，その可能性は沖積粘土層上部ばかりではなく，洪積粘土上部の海退期の堆積環境であっても同種の堆積物が堆積しうると考えられる．ただし，その場合は対象のコスがより深部に分布することになり，上載圧や圧密の影響で土質特性が変化する可能性もあるので，本来の「微細砂」の特性があるかどうかはわからない．施工時に粒径の揃った細砂が出現した場合は，応力の解放や地下水位によって，同様のように移動しやすくなり，流出する可能性がある．

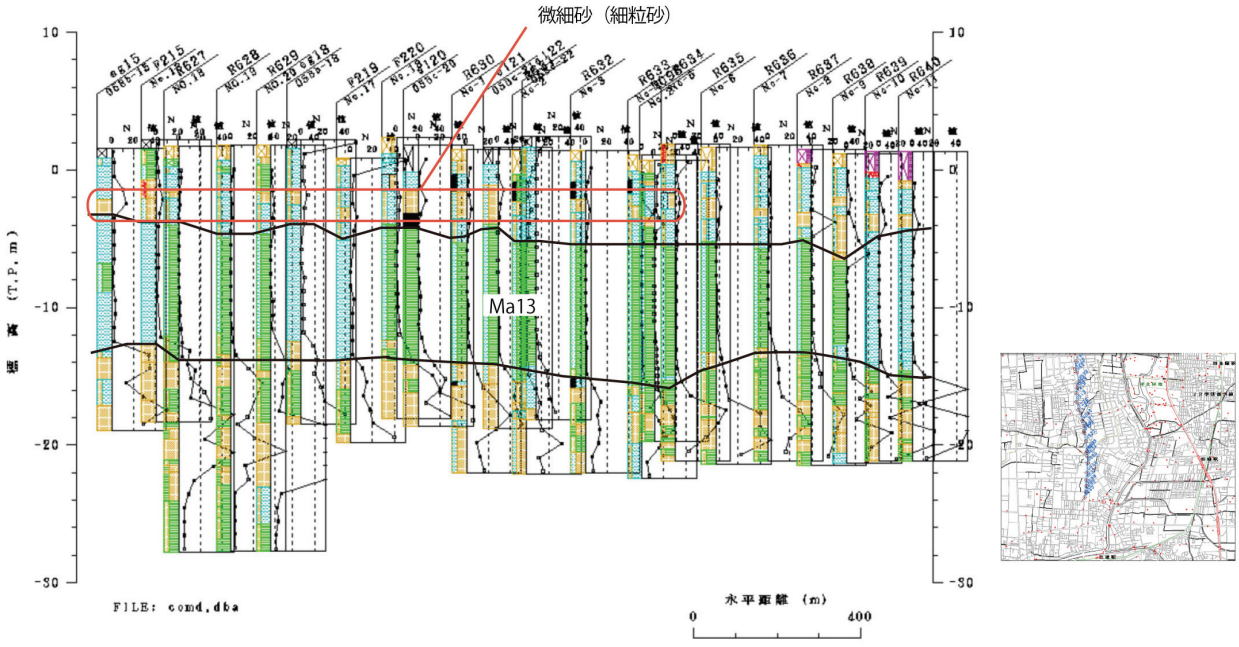


図 7.17　微細砂情報のあった地域のボーリング断面図

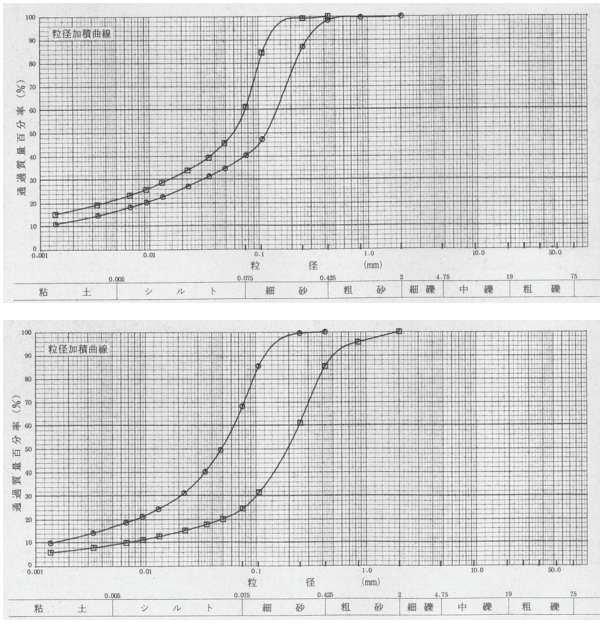


図 7.18　調査地にて微細砂に該当する砂層の粒径加積曲線 [6]

図 7.19　縄文時期の最大海進時期の復元図 [4]

図 7.20　縄文時期の最大海進時期以降，海退期の復元図 [4]

7.6　おわりに

施工時に留意が必要となるような，特殊土の分布などについては，トラブルの箇所を集積して抽出することは難しい．それは，個々のトラブルの理由が異なることやヒューマンエラーなどが加わっているためである．このような場合，基本的な姿勢としては，十分な事前調査を行い，問題点を明確にすること，これらを熟知した上での設計，施工計画を立てることに尽きる．しかしながら一連の研究調査により，施工時に留意するべき地層が実在し，その中で，大阪平野に特徴的な「微細砂」の分布については，沖積粘土上部に分布する細粒砂層であり，腐植土を含むなどの特徴が明らかになった．このような「微細砂」の分布は，縄文海進期後の海退時に水域が停滞した地域でかつ河川近くで，一時的に細粒な砂が洪水によって流入するような環境の場所に分布する可能性が高い．このような堆積環境場を抽出するためには，より，詳細な縄文時の古環境の復元が必要であるが，少なくとも旧河道の分布する地域を中心に留意することが必要であると考えられる．

今後の課題として，このような旧河道の正確な抽出とその周辺の地盤の構成について，データベースあるいはボーリング調査を用いて把握し，「微細砂」およびこれに該当すると考えられる特徴のある地層を特定し，抽出することが挙げられる．これにより，施工時のトラブルを回避するために，地盤の堆積構造という側面から貢献できると考えられる．また，そのほかにもトラブルの原因となる粘土層や礫層などの地層があると考えられるので，今後も引き続いて，施工時に問題のあった事例，あるいは，工事現場にて作業従事される技術者からの聞き取りなどで，問題となる地盤が存在しないかなどを調べ，取りまとめておくことが重要であると考える．

今回の検討において，留意すべき地層は概ね 3 つ存在する．それは，1)微細砂，2)玉石，　3)鋭敏粘土である．これらの問題点や分布状況は前述したが，簡潔にまとめると以下のとおりである．

1)微細砂

シルト～細粒砂までの領域の砂．粒径加積曲線では立ち上がりの大きな，粒径の揃った砂である．出水事故などの際には，地層中からこれらの径の粒子が選択的に移動して流出すると考えられる．また，大阪平野では，海成粘土が堆積する前後の時期にシルト，細砂が堆積する傾向が見られることが多いため，海成粘土層の上下に留意が必要である．これらのトラブルの場合，地下水位も重要な要素である．

2)玉石

河川に沿って流れてきた礫．平野地下では，円磨されて丸いので，玉石と呼ぶ．形はこぶし大～人頭大まである．シールドやボーリングなど調査・施工方法により弊害になる礫径は異なる．大阪平野では淀川流域周辺から北摂山地，伊丹丘陵などに分布する．山地が迫っている神戸や湖東地域などでも河川礫として分布する．

3)鋭敏粘土

高塑性かつ高含水比で，液性指数および鋭敏比の高い粘土のことであり，自然含水比が液性限界より大きい粘土である．大阪の河内平野(東部)や新大阪の周辺などに多く分布する．N 値＝0 を示す高塑性かつ高含水比の粘土の分布を参照し，工事の際には留意が必要である．

参考文献

1) 地学団体研究会編：地学事典，平凡社，p1443，1996.
2) トンネル標準示方書シールド工法・同解説，土木学会，2006.
3) KG-NET・関西圏地盤研究会：新関西地盤－大阪平野から大阪湾－，pp.296+66，2007.
4) 趙哲済・松田順一郎：「河内平野の古地理図」『日本第四紀学会「大阪100万年の自然とくらし」普及講演会資料集』口絵，2003.
5) 国土地理院発行：2万5千分の1地形図，大阪東北部
6) 大阪府東部流域下水道事務所：寝屋川流域下水道大東(二)増補幹線土質調査委託報告書，2000.

トラブルサム地盤に対するリスクマネージメント
ー事例にみるトラブル要因と想定されるリスクー

リスクマネージメント分科会 WG7 および WG8

概　　要

開削，シールド，NATM，推進等の各事例収集 WG により収集・整理されたトラブル事例から，地盤特性にある程度共通点があると考えられる関西地盤でのシールド・開削工事事例を抽出し，工法や土質，事前対策や事後対策の内容，またトラブルの大きさといった 9 つのキーワードによりトラブル要因の再整理を行った．それらキーワードを切り口としてトラブルの特性や大きさを関連づけ，工事特性ごとに考慮すべき事前調査や対策工を特定し，リスクマネージメントを行う際の考え方を整理した．

キーワード：リスクマネージメント，トラブル要因，対策工法，事前調査

8.1　はじめに

収集した開削トンネル，シールドトンネル，NATM，推進等工事のトラブル事例より，地盤特性に比較的共通点があると考えられる関西地盤での工事を抽出し，各事例に対してリスクマネージメントの観点から，事前調査の有無や，事前事後の対策工の実施内容等について再整理を行った．その上で(1)工法，(2)土質，(3)地下水，(4)トラブルの現象，(5)トラブルが発生した部分の構造，(6)トラブルが発生した深度(土被り)，(7)事前対策の内容，(8)事後対策の内容，(9)トラブルの大きさ(工程遅延の程度)という 9 つのキーワードによる分類を実施することでトラブル特性の抽出を行ない，そこから想定するリスクとその対応策について整理した．また，各事例の整理に先立ち，これまで大阪地域での地下工事の際にトラブルが多く発生した当該地区の砂地盤を例にとって，その地盤特性と対応策についての一考察を行った．

8.2　地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤特性とその対応技術～砂地盤を例として～

8.2.1　なぜ砂地盤は難しいのか

地下工事を行う際，一般的に砂地盤と粘土地盤とどちらが難しいかという問いに対しては，各自の経験，すなわちどちらで痛い目にあってきたかで答えは二分する．もちろん締まった砂地盤だから安全だとか軟弱な粘土地盤だから注意を要するなどの一般的な感覚はある．しかし実施工に際しては，いかにして地盤特性を正確にとらえ，かつその特性に合った設計・施工方法を採用するかということが重要である．ただし，残念なことにこの当たり前のことができていないため，地盤特性に起因するトラブルが多く発生している．ここでは，関西地盤の砂地盤(砂礫地盤)を例にとりトラブルとその対処方法について整理した．

まず，トラブルが起こる砂地盤の一般的な特徴を整理すると以下の通りとなる．

1) 地下水に起因し底版の安定性を失いやすい
2) 玉石などが土留めや杭の施工の障害となる
3) 地下水を通しやすい

これら特徴から開削工事での代表的なトラブルにはボイリング現象があるが(**図 8.1**，**写真 8.1** 参照)，他に大阪の低地で特徴的な土留め壁の欠損部からの細砂(泥水)の流出現象やシールドや土留め，基礎杭施工時に発生する玉石が原因となる施工困難や精度不良の発生等がある．

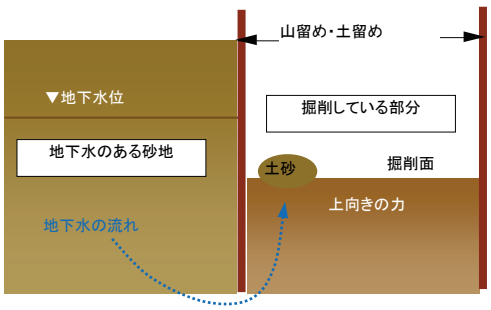


図 8.1　ボイリング模式図

写真 8.1　ボイリング状況

8.2.2　地盤調査方法や危険度の定量化の試み

掘削工事において砂地盤を設計する際には，通常 N 値と最大粒径および均等係数と透水係数によりその層の特性を判断している．粘性土に対しては，種々の室内試験によりその特性を同定する場合が多いことに比べ，砂地盤の調査は簡易な印象が残る．また，締まった巨礫の混入のない砂地盤は安定した(安心な)地盤として扱うことも多い．

一方，安定したと見なせない場合でも，サンプリングが大がかりで難易度も高いことから，その特性を施工前に正しく把握するケースは決して多くはない．事前把握の場合の砂質土のサンプリングは，不撹乱資料採取を目的とした場合，ロータリー式三重管サンプラーや凍結サンプリングによるが，他に凍結よりは簡易に同程度の資料を採取できる GP サンプリングや，目的と用途を絞って不撹乱にとらわれずサンプリングが行うマイクロサンプリングによる方法等も有効な手段となる(**図 8.2** 参照)．

砂地盤の特性を把握するための指標として，前述した各指標のほか，泥水式シールド工法の場合には，切羽での泥膜保持が生命線となることから，**図 8.3** に示すように危険度の定量化が行われている．

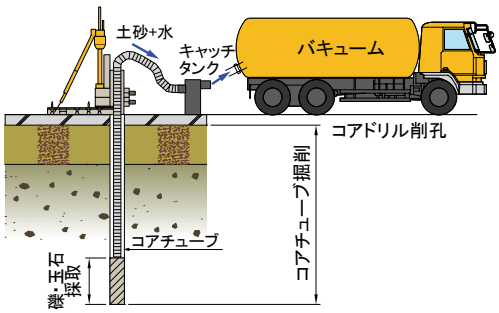


図 8.2　マイクロサンプリング

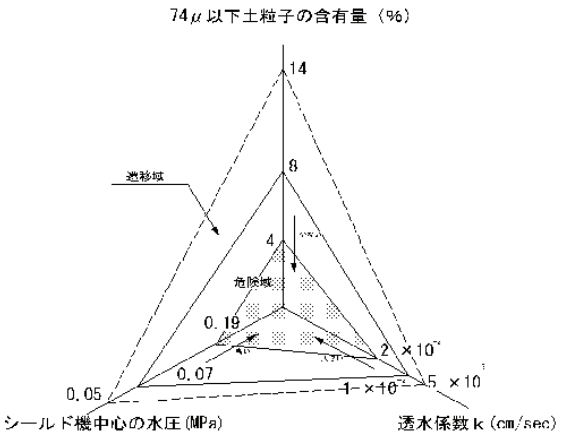


図 8.3　泥水シールドにおける滞水砂礫層のグラフ

8.2.3　リスク回避のポイント

リスク回避において，まずはどれだけ当該地盤の特性を把握できるかという点が重要である．具体的には

1)適切な地盤調査の実施と整理
2)近隣工区での施工実績(発注者側)
3)同種地盤(同工種)での施工実績によるノウハウ(施工者側)

といった情報を入手し，それらに基づきリスク回避のポイントを整理・実施することであり，その際の留意点には以下のようなものがある．

・ポイントを定めたのち，それを管理するための自主管理値の設定(仕様書等に記載のものに限らず，各現場特有値)
・発注者，施工者双方でのポイントや管理値の設定理由の共有
・地盤条件に適合した工法の設定

どうしても経験に頼らざるを得ない印象をぬぐえないが，経験をどのように整理し，次につなげられるかが重要であり，その視点のもと次節以降でトラブル事例の整理を行った．

8.3　トラブル事例の分類

8.3.1　対象地域

開削，シールド，NATM，推進等の各事例収集 WG で整理した事例の中から，主として関西地盤での開削工事とシールド工事のトラブル事例 33 件を抽出してトラブル要因となった項目をキーワード別に分析した．**図 8.4** にトラブル箇所地域の個数を示すように，地下鉄，上下水道などの大規模地下建工事は大阪府大阪市やその近隣都市がメインであり，工事トラブルの対策工事期間が 3 ヶ月以上に及ぶ事例もあったが，トラブル防止のための事前事後対策により対策工期の短縮事例もあった．ここではシールドトンネル・開削の工法工種，土質，地下水，トラブル現象とその発生深度，補助工法などについて，トラブルの大きさ(大：工程遅延 3 ヶ月以上，中：3 ヶ月未満，小：ほぼ遅延なし)と工事対象地域別にトラブル要因を分析して想定されるリスクについてまとめた．

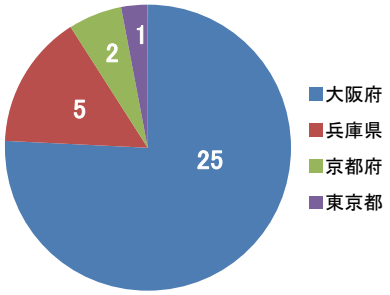


図 8.4　トラブル箇所の地域

8.3.2　キーワードによる分類

(1)工法

抽出した 33 件のトラブル事例は，工種別では開削・シールド(立坑)，シールドの 2 工種に分類し，工法的には更に以下の分類をおこなった(**図 8.5**，**図 8.6** 参照)．

1)　開削(14 事例)シールド立坑 4 事例含む
　　開削(8 事例)
　　地中連続壁(6 事例)

2) シールド(19 事例)

シールド・開放(1 事例)
シールド・圧気(2 事例)
シールド・土圧(12 事例)
シールド・泥水(4 事例)

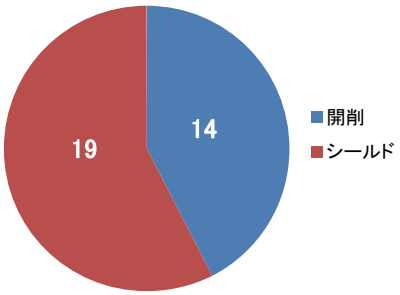


図 8.5　工種分類

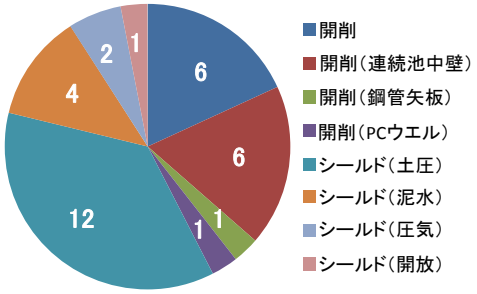


図 8.6　工法分類

(2) 土質

トラブルが発生した箇所での土質の種別を図 8.7 に示すが，トラブルは沖洪積地盤様々の土質で発生しており，特定される土質は見あたらない．しかし，事故発生後の対策工事期間が 3 ケ月以上要したトラブル規模が大きかった地盤は洪積層の粘性土と砂礫であった(図 8.8 参照)．

洪積地盤は地下深部に分布することから土質に起因するトラブルかどうかは定かでないが，土質的特徴としては地質構造に起因した断層・亀裂を有する粘性土では事前調査でのサンプル強度が設計強度に反映できなかったことやシールド切刃の崩壊や立坑底部の盤ぶくれなどは異常湧水・被圧地下水によってトラブルが発生した．

対策に要した期間の短い，もしくは応急対策で解決できたトラブル小中規模では，特定される土質はなかった(図 8.9，図 8.10 参照)．

トラブル防止のための土質特性の事前把握としては，沖積粘性土は地盤強度以外に鋭敏性や流動化特性，洪積粘性土は断層・亀裂などの不連続面を考慮した設計強度，砂は粒度特性(均等・曲率係数)，礫は強度と礫径などを特に留意しておくべきである．

(3) 地下水

地下建設工事の地下水トラブルには，立坑底部の盤ぶくれ，土留め壁の変形，シールド切羽からの土砂流入，異常湧水，セグメント継手部からの出水などがあった．トラブルが発生したところの地下水の全体の割合は，図 8.11 に示すとおり，被圧地下水が自由地下水よりも若干多い．

トラブル規模が大きく事故発生後の対策工事期間が 3 ケ月以上要した事例は被圧地下水のみであり，中規模なトラブル事例も被圧地下水の止水対策の期間を要した事例が多く見られた(図 8.12，図 8.13 参照)．

対策に要した期間の短い，もしくは応急対策で解決できた小規模なトラブルには，自由地下水が多い(図 8.14 参照)．

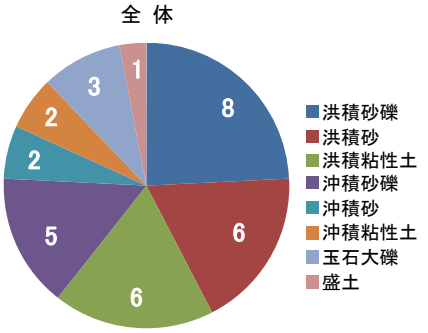


図 8.7　トラブル箇所の土質全体

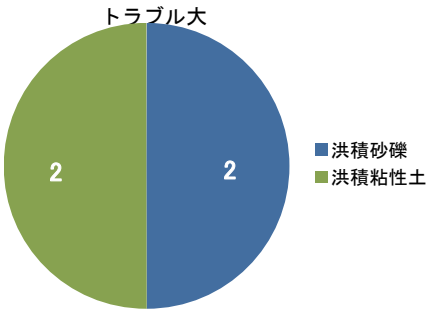


図 8.8　トラブル大規模の土質

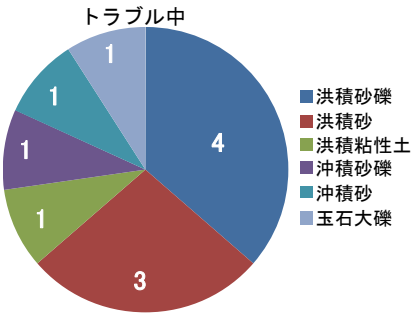


図 8.9　トラブル中規模の土質

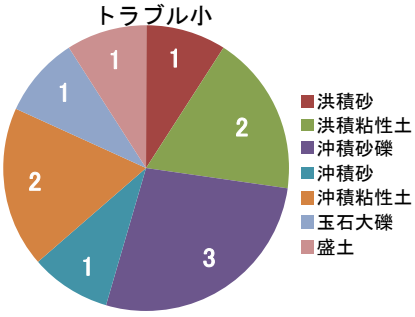


図 8.10　トラブル小規模の土質

(3) 地下水

地下建設工事の地下水トラブルには，立坑底部の盤ぶくれ，土留め壁の変形，シールド切羽からの土砂流入，異常湧水，セグメント継手部からの出水などがあった．トラブルが発生したところの地下水の全体の割合は，**図 8.11** に示すとおり，被圧地下水が自由地下水よりも若干多い．

トラブル規模が大きく事故発生後の対策工事期間が 3 ケ月以上要した事例は被圧地下水のみであり，中規模なトラブル事例も被圧地下水の止水対策の期間を要した事例が多く見られた(**図 8.12**，**図 8.13** 参照)．

対策に要した期間の短い，または応急対策で解決できた小規模なトラブルには，自由地下水が多い(**図 8.14** 参照)．

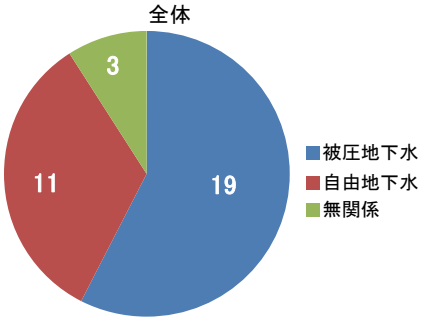


図 8.11　トラブル箇所の地下水

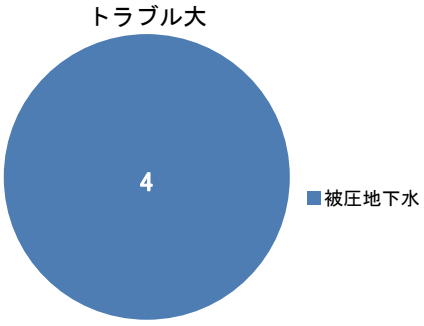


図 8.12　トラブル大規模の地下水

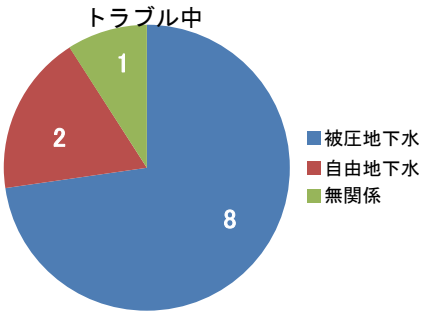


図 8.13　トラブル中規模の地下水

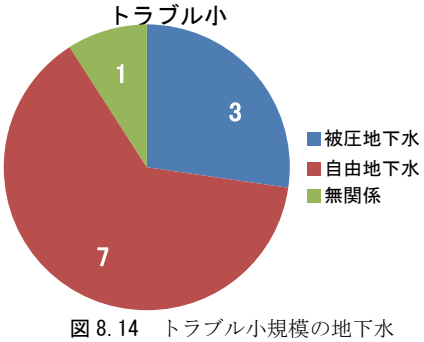


図 8.14　トラブル小規模の地下水

以上より，被圧地下水に起因するトラブルは事後対策に時間とコストを要することから，事前調査では被圧地下水の透水性や水頭を精度良く把握しておくべきで，施工位置の地域水理特性も予め捉えて詳細な調査・設計計画が望まれる．

(4) トラブルの現象

1) 開削工事におけるトラブルの現象は，**図 8.15** に示すとおり 14 事例であり，トラブルの現象で多いのは出水であり(5 事例)，その内訳は矢板の継ぎ目からが(2 事例)，連壁からが(2 事例)，土質調査孔からが(1 事例)である．次いでパイピング(3 事例)，土留め壁の変位(2 事例)，その他(4 事例)(地盤沈下，連壁の肌落ち，リバウンド，盤ぶくれ回避策各 1 事例)の順である．

2) シールドにおけるトラブルの現象は，**図 8.16** に示すとおり 19 事例である．

トラブルの現象で多いのはトンネル内の異常出水とセグメント部の異常(出水，欠け落ち)である(各 5 事例)．

次いで逸泥，排泥管閉塞が 3 事例，その後にビットの異常磨耗，土砂噴発，エントランスパッキン他からの出水の各 2 事例の順である．

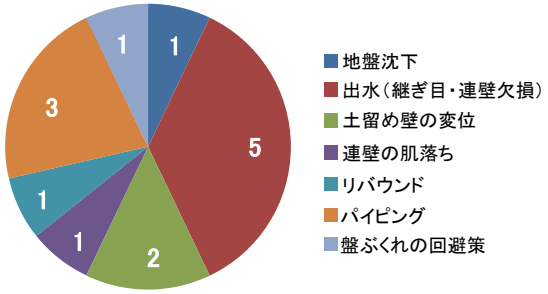


図 8.15　開削のトラブル現象

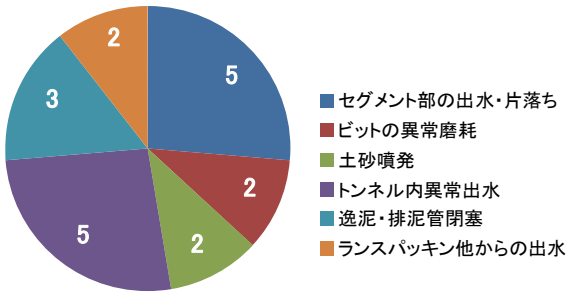


図 8.16　シールドのトラブル現象

(5) トラブルが発生した部分の構造

1) 開削とシールド立坑　14 事例

開削工事におけるトラブルは，**図 8.17** に示すように底版土留め壁沿いの地盤に関わるトラブルが目立つが，連壁の場合は，壁継手部の不具合や地盤特性と掘削安定液の不適合に起因するものが見られる．設計上の安全率に関わるが，大深度立坑においては，十分な根入れ確保や底版改良の重要性を示唆している．

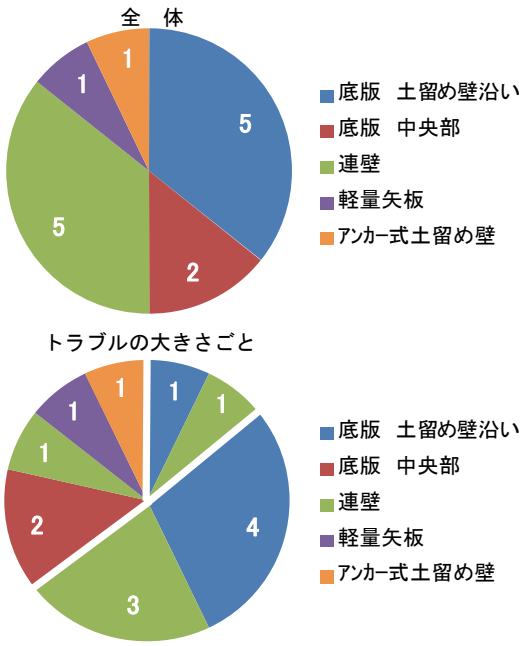


図 8.17　トラブル発生箇所の構造(開削とシールド立坑)

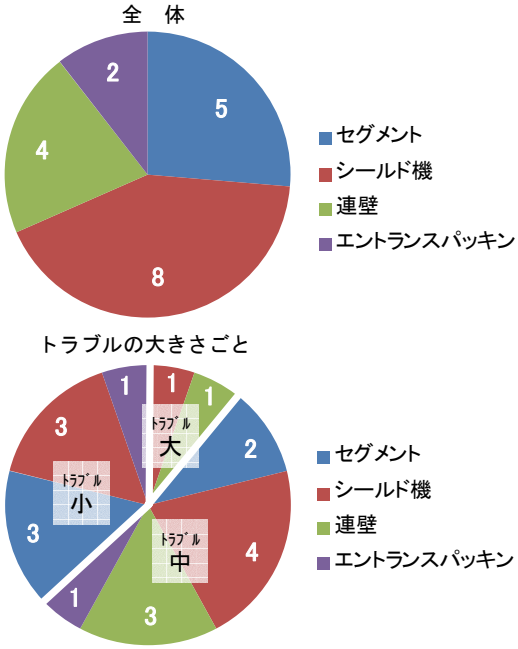


図 8.18　トラブル発生箇所の構造(シールド)

2) シールド　19 事例

シールド工事におけるトラブルは，**図 8.18** に示すようにセグメントとシールド機に関わるトラブル事例が多い．地盤特性の影響でマシン挙動が不安定となり結果としてテール部やセグメントの目開きによる土砂の噴発や湧水に至る場合がありトラブル規模も大きくなる傾向が見られる．特に地盤特性の異なる地層境界に沿ってシールドが掘進する場合にシールド機の挙動不安定が原因と推定される事例がある．そのため地盤の強度・物理特性や介在する砂層の間隙水圧などの事前把握が欠かせない．また，礫層を掘進する場合は，圧送管の閉塞やカッタービットの摩耗対策なども想定し，把握した地盤特性を勘案したシールド工法の選定と補助工法の準備が肝要となる．一方，到達立坑の連壁においては，鏡部背面地盤とエントランス部が出水の弱点となる可能性を示唆している．地盤改良方法とエントランスパッキンの選定に配慮が必要である．

(6) 深度

1) 開削とシールド立坑　14 事例

深度別の開削工事のトラブル事例は，**図 8.19** に示すように深度が深い場合にトラブル規模が大きい出水や壁変位が見られるが，大深度であっても床版補強など十分な事前対処によってリバウンドを低減出来た事例もあり，必ずしも深度がトラブル規模に影響するとは言えない．

2) シールド　19 事例

深度別のシールド工事のトラブル事例は，**図 8.20** に示すように比較的施工頻度が高い 10～30m での掘削トラブルの事例が多いが，トラブル事例から深度がトラブル規模に影響するかの評価は，困難である．

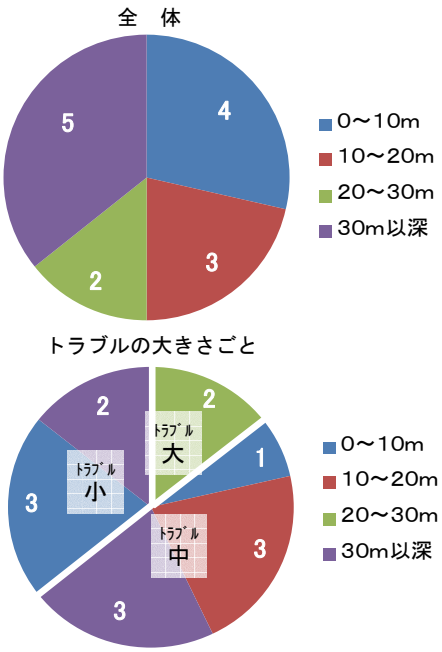


図 8.19　トラブル発生箇所の深度(開削とシールド立坑)

(7) 事前対策の内容

1) 開削　14 事例

開削工事におけるトラブル発生箇所の事前対策の内容は，**図 8.21** に示すように地下水位低下工法や底版改良など，概ね一般的なものである．中～大規模なトラブル発生箇所は，事前から何らかの対策を考慮しており，それが不十分であった場合が多い．

2) シールド　19 事例

シールド工事におけるトラブル発生箇所の事前対策の内容は，**図 8.22** に示すようにトラブル発生箇所の事前対策として，「圧気・注入」が最も多く，次いで「到達部地盤改良」，「配合管理」などが行われている．中～大規模な

トラブル発生箇所は，近年ではあまり用いられなくなってきている「圧気シールド」のほか，立坑取り合い部における「到達部地盤改良」，「凍結工法」で多くなっている．凍結工法のトラブル事例は少ないが，本工法は特別な悪条件の施工で用いられることが多いため，万一トラブルが発生した場合の影響は大きくなりやすいものと考えられる．一方，密閉型シールドの「配合管理」程度で調整可能な事案については，トラブル発生後も問題が大きくなっていないようである．シールドの掘削一般部では，事前対策を考慮していない区間で，砂礫や互層など不良な地盤に遭遇して中規模のトラブルに発展しているケースも認められる．

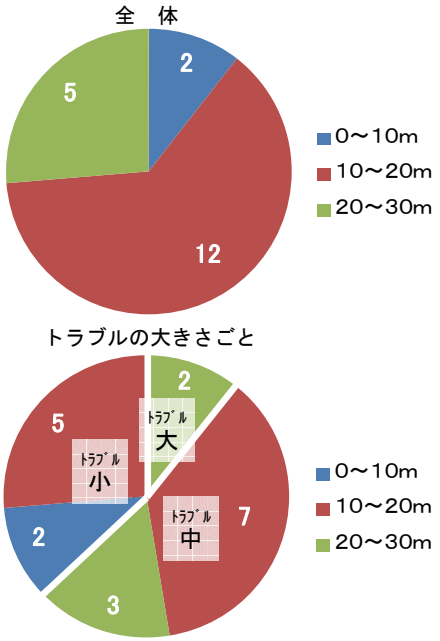


図 8.20　トラブル発生箇所の深度(シールド)

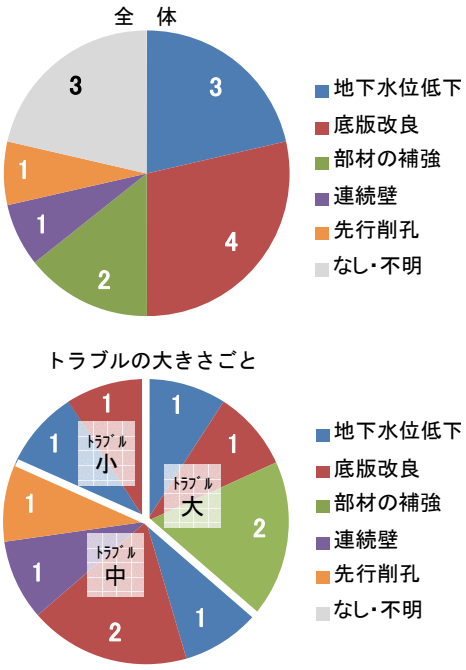


図 8.21　トラブル発生箇所の事前対策(開削)

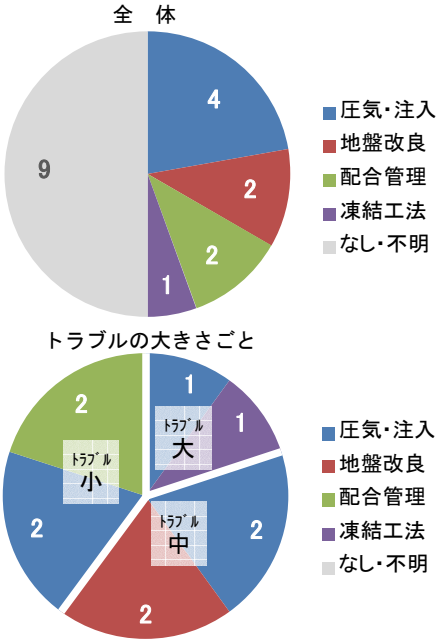


図 8.22　トラブル発生箇所の事前対策(シールド)

(8) 事後対策の内容

1) 開削　14 事例

開削工事におけるトラブル事後対策は，トラブルの大小にかかわらず図 8.23 に示すように「注入」を行っているケースが最も多い．この他，トラブルの大きな事案で RC スラブによる底盤補強を行っているケースも認められる．

2) シールド　19 事例

シールド工事におけるトラブル事後対策は，図 8.24 に示すように「注入」を行っているケースが最も多く，大～小規模のトラブルまで幅広く用いられている．セグメント等の材料変更を行うケースも多い．軽微なトラブルに対しては，添加剤の追加･変更による対応も有効となっている．

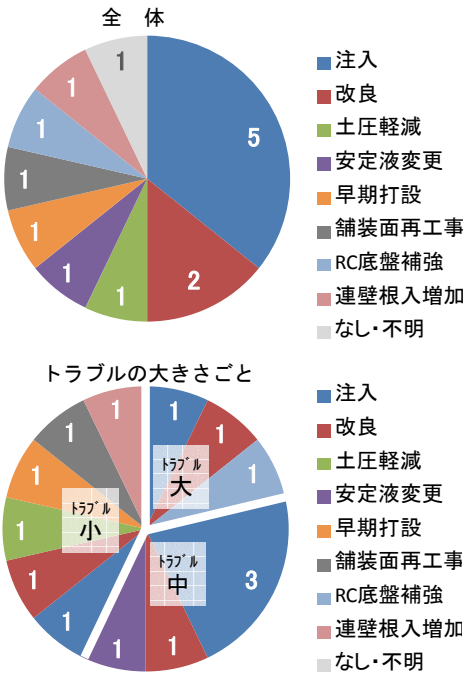


図 8.23　トラブル発生箇所の事後対策(開削)

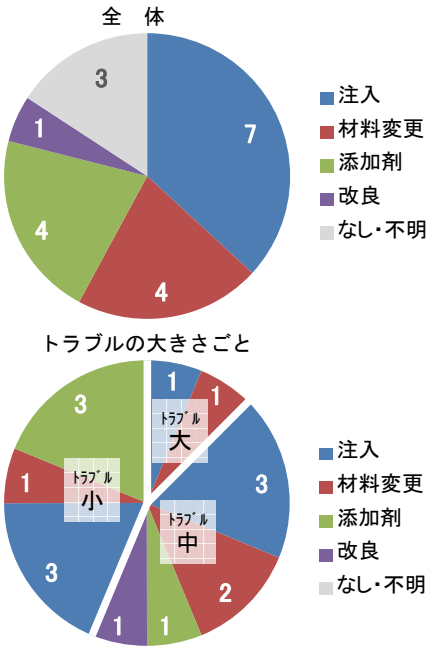


図 8.24　トラブル発生箇所の事後対策(シールド)

8.4　トラブルへの対応

8.4.1　事前対策工の内容とその効果等

(1)土質調査から想定されるリスク

収集したトラブル事例のうち，土質調査項目，および地盤構成が示された事例は 25 件，不明である事例は 8 件の合計 33 件であり，土質調査より想定されるリスクについて分析を実施した．この中で不明である事例については，トラブルの原因が地質によるものではなくシールド，鋼矢板等構造に起因するものが含まれている．

まず土質調査については，ボーリング調査(標準貫入試験)以外については事例収集結果から得られた情報はごく僅かであった．そこで地盤構成に着目して想定されるリスクについて分析した．

対象地盤は前項で示したとおり沖積粘性土層・砂質土層から洪積砂礫層(玉石混じり)，地盤改良(薬液注入)と多岐にわたることから，図 8.25 に示すように粘性土，砂質土，礫質土に区分した．

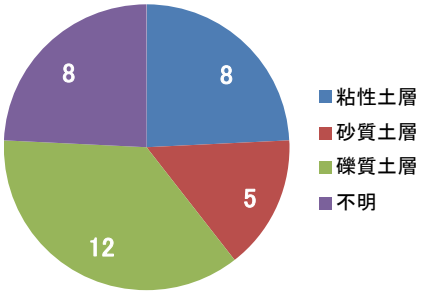


図 8.25　トラブル事例の地盤特性の割合

1)粘性土(8 件)

粘性土層については被圧地下水に起因するトラブルが多く，盤ぶくれ，水みちの変化，孔壁崩壊のリスクが挙げられる(図 8.26，図 8.27 参照)．

その他ヒービングや柱状改良杭を打設する場合に鋭敏比の高い粘土では，周辺地盤強度の低下や液性限界の低い低塑性粘土では流動化や強度低下のリスクが挙げられる．

2)砂質土(5 件)

砂質土層については，付近に河川が位置するなど豊富な地下水を有する箇所ではパイピングや異常出水，均等係数が小さい細砂では流動化現象が挙げられる(図 8.28 参照)．

3)礫質土(12 件)

礫質土層については，図 8.29 に示すように豊富な地下水を有する箇所では透水性が高いことが起因してボイリングや逸泥・逸水が挙げられる．

そのほか礫質土層の特徴として，機材に直接影響を与える，カッタービットの異常摩耗，圧送管閉塞のトラブルが多いことが特徴である．

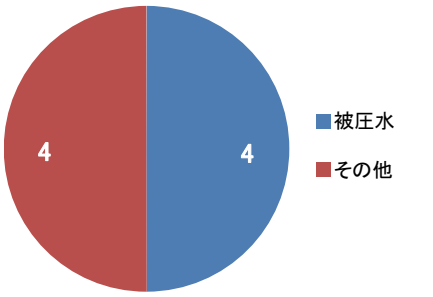


図 8.26　被圧地下水が起因する割合

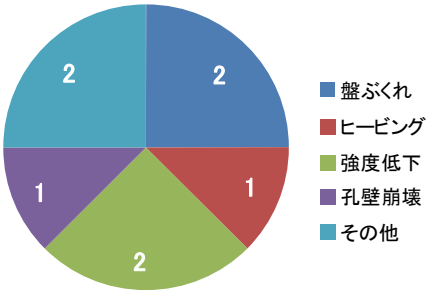


図 8.27　粘性土におけるリスク

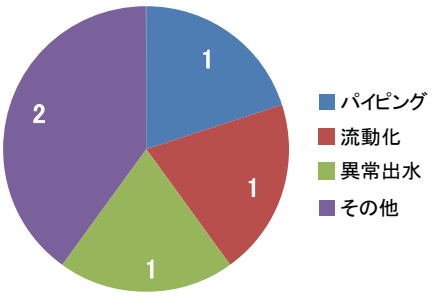


図 8.28　砂質土におけるリスク

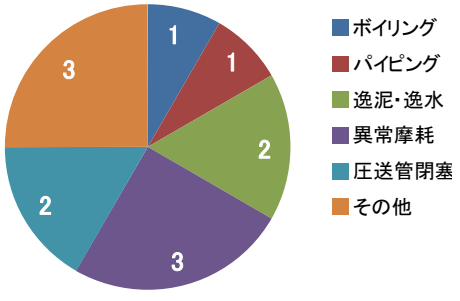


図 8.29　礫質土におけるリスク

収集したトラブル事例からは，ボイリング，ヒービング，そして盤ぶくれ等，ごく一般的な現象については想定され，対策を実施されていたことが見受けられた．

しかし，事前対策が講じられていたにも関わらずトラブルが発生している事実については，地盤の特異性により事前の調査が十分ではないことが要因のひとつではないかと考えられる．

そこで，今回の事例を参考として十分な調査を実施することで，予め数多くリスクを想定し，事前対策を実施しておくことが望まれる．

(2) 事前対策工の内容とその効果

収集されたトラブル事例における事前対策工の内容と効果を分析した．対象とした対策工は，**図 8.30** に示すように合計 34 件で，事前対策を行なわなかったか実施が不明な事例，1 つの工事で複数の対策工が行われた事例もあるため，トラブル事例の数とは一致しない．

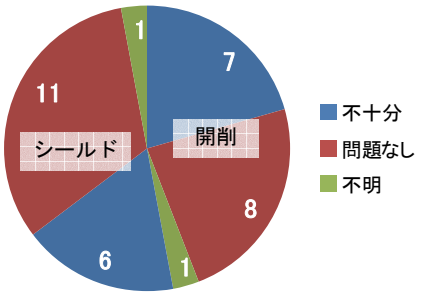


図 8.30　事前対策工の効果(工種別)

まず，事前対策工の効果を開削工事とシールド工事とに区別して分析した．なお，シールド事例のうちの立坑に関連するものは開削工事とした．開削工事における事前対策工の 44%は効果不十分であり，シールド工事における 33%を上回っている．

結局，全体としては約 4 割のケースで効果不十分となっている．事前対策が十分であればトラブルを回避できたと見られる事例が多く，また，十分な事前調査がなされていれば適切な範囲・数量の事前対策工を実施できたと考えられるケースも少なくないことから，トラブルを回避するには，調査と対策を含めた発注者，施工者双方の事前のリスク管理が重要であることが改めて認識される．

次に，トラブルの規模別に事前対策工の効果を**図 8.31** に示すように整理した．工程遅延がほとんどないトラブル小の場合と比べて，トラブル中やトラブル大では対策効果の不十分な割合が大きい．事前対策が不十分であるとトラブルの規模を大きくしかねないことが確認される．

さらに，**図 8.32** に示すように揚水・注入・地盤改良など直接地盤に施す対策工と，圧気・鋼材補強・配合管理などその他の方法による対策工とに分類して，効果を分析した．効果不十分の割合について両者の間に有為な差はなく，対策工の種類によるリスクの相違は見受けられない．

最後に，事前対策工の効果が不十分に陥った原因を分析すると，約 46%のケースにおいて地盤の特異性に起因することがわかった(**図 8.33** 参照)．その内容を頻度の高い順に列挙すると，被圧水，玉石，鋭敏粘土，地盤中のクラック，土質の変化が大，石英の含有，となり，こうした地盤を対象として事前対策工を行なう場合，特に十分な事前調査と綿密な計画が必要と考えられる．

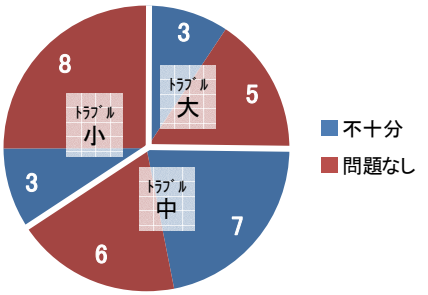


図 8.31　事前対策工の効果(トラブルの規模別)

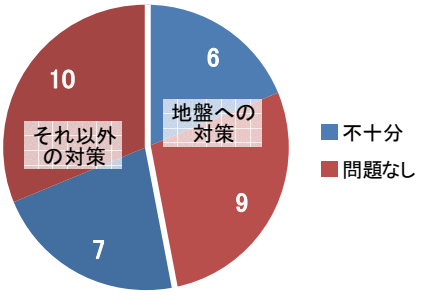


図 8.32　事前対策工の効果(対策方法別)

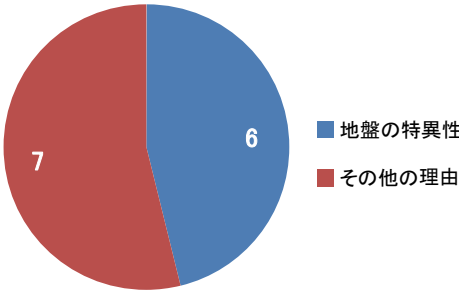


図 8.33　事前対策工が効果不十分となった原因

8.4.2　事後対策

(1) 事後対策工の内容とその成果

収集されたトラブル事例の事後対策工を分析した．対象とした対策工は，開削工事 10 件とシールド工事 22 件の計 32 件について整理した．

開削工事，シールド工事とも事後対策工として主に地盤改良工が選定されている(**図 8.34**，**図 8.35** 参照)．地盤強化を目的にトラブルが発生した地盤を改良し，トラブルを収束させる事例が多い．

地盤改良工法では，**図 8.36** に示すように薬液注入工の採用が多い．本工法は，施工機械が小型で広い施工スペースを使用しない上，汎用性が非常に高く，トラブル発生後速やかに対応できるメリットがある．また，懸濁型溶液を用いる場合や，瞬結材・緩結材での浸透改良等が可能であるため，トラブル発生地盤を多様に強化することができる．

比較的長期にわたるトラブルが発生した場合には，高圧

噴射攪伴工法を用いるケースもある．

トラブルの発生から回避・収束により，大半の事例では元設計通りの構造物を構築しているが，開削工事とシールド工事で各 1 件，パイピングによる床付地盤の隆起により床付深さを浅く，設計自体を変更した事例があった．

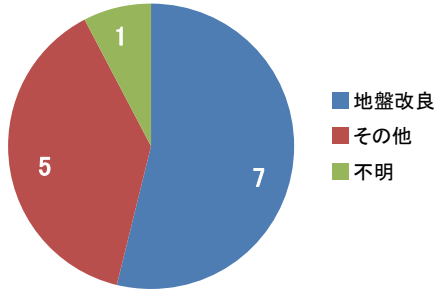


図 8.34　事後対策の内容(開削・立坑工事)

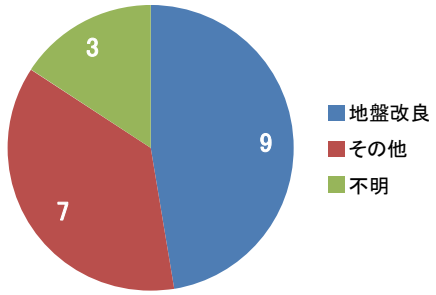


図 8.35　事後対策の内容(シールド工事)

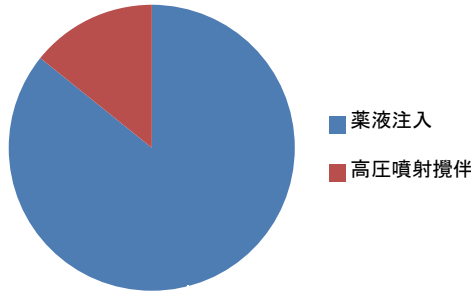


図 8.36　地盤改良工法の内容

(2)現時点における対策工(事前・事後)の妥当性

事前検討や計画・設計段階において，いかなる土質も，各仕様書の定める基準で「粘土」「砂」「砂礫」程度に大別される．トラブルが発生しがちな掘削底面の安定検討や土留壁の設計は，土質物性を粘着力，内部摩擦角，変形係数，単位体積重量，地下水位等でのみ評価する．これは，土木工学の歴史から実験的・経験的に土質をモデル化することで，複雑な土質が「簡易に」「誰でも」評価できる利点がある．このように考えることは，事前対策工の必要性の有無を容易に判別できるため妥当といえる．

しかしながら，トラブルの多い地盤に対して採用を見送るべき工法，必要な補助工法等，経験的に熟知されている事柄についての水平展開がよくされているとは言い難い．

事後対策工の選定，妥当性としては，注入工しかないというのが現状である．トラブルが発生した部分の構造物を早期に補強して回避につながる場合もあるのだろうが，発生後に早期収束するためには(傷口を広げない，など)，注入工が今後も主工法となるであろう．

8.5　トラブルから得られた教訓

本分科会では，主に関西地盤における地下構造物築造工事(以下地下工事)に伴うトラブル事例を対象に，(1)工法，(2)土質，(3)地下水，(4)トラブルの現象，(5)トラブルが発生した部分の構造，(6)深度，(7)事前対策の内容，(8)事後対策の内容，(9)トラブルの大きさの 9 つのキーワードによる分類を試み，想定されるリスクとその対応策について整理をおこなった．

また，地盤は，地下水などで掘削底盤の安定性を損ねやすい，巨礫や玉石などが土留や杭の施工に支障をきたす可能性がある，地下水を通し易い，などの特性を有する砂地盤を主に対象とした．砂地盤を対象とした地下工事は，N 値以外に最大粒径，均等係数，透水係数などの物性値により補助工法を含んだ工法を選定して施工に臨むことが一般的である．

しかし，本分科会での整理の結果，事前の調査や対策工が不十分なことにより，トラブルが発生した事例が多いことが分かった．

以下にトラブル事例の整理結果のまとめと事例から得られた教訓について述べる．

8.5.1　トラブル事例の整理結果

開削工事においては，底盤以深の地盤に関わるトラブルが大半を占め，次いで連壁のトラブルが多い．これらのトラブルは，深度が大きく被圧地下水の場合にトラブル規模が大きくなる傾向が見られ，収集事例では 20～30m の深度の洪積粘性土層や洪積砂礫層でのトラブルが多い．また，事前の地盤改良工事の不十分なことがトラブルにつながっていることもある．なお，開削工事の事前対策工は，「地下水位低下工法」や「底版地盤改良」が多い．

シールド工事においては，掘進装置に関わるトラブルが多く見られ，地盤特性の影響によりマシン挙動が不安定になり，セグメントに不具合が生じ，土砂流入や湧水に至る事象が多い．トラブルの大半を占める掘削深度は，シールド工事の一般的な深度の 10～30m であり，開削工事と同様に被圧地下水下での工事である．事前対策工は，「圧気・注入」が最も多く，次いで「到達部の地盤改良」「配合管理」などがおこなわれている．また，事前対策が施されていない場合に，砂礫や互層などの不良な地盤に遭遇して中規模のトラブルになった事例が見られた．

事後対策においては，開削工事，シールド工事ともに薬液注入による地盤改良工が最も多く採用され，トラブルを収束させている．また，シールド工事では排泥などのトラブルに対して「添加剤の追加・変更」が採用されている場合も見られる．

なお，応急措置などで解決された小規模なトラブルは，自由地下水で生じた事例が多い．

8.5.2　得られた教訓

想定される主なリスクを地盤別に区分すると，粘性土では被圧地下水に起因する「盤ぶくれ」「水みちの変化」「孔壁崩壊」「ヒービング」，砂質土では豊富な地下水に起因する「パイピング」「異常出水」のほか細砂による「流動化現象」，礫質土では豊富な地下水に起因する「ボイリング」「逸泥・逸水」のほかシールド工事の「カッタービットの異常摩耗」「圧送管閉塞」が挙げられる．

上記のリスクは，事前調査が十分に成されていれば適切な事前対策が施され，トラブルの回避や軽減が可能になったものと考えられる．

本成果では，約半数のトラブル事例が「被圧水」「玉石」「鋭敏粘土」「地盤中の亀裂」「土質の大きな変化」「石英の含有」などの地盤の特性に起因することが分かった．また，地盤情報が標準貫入試験結果のみの場合が多く，リスクを想定することまで至っていないことも分かった．

今後は，上記の地盤特性を念頭に，十分な事前調査を実施することは言うまでもなく，以下に示すリスク軽減技術も視野に入れたうえで施工に臨むことが望ましい．

最後にトラブル回避例として，現在用いられているリスク軽減技術について，開削工事とシールド工事の一部を紹介する．開削工事については，主に土留工法によるものであり，土留変位抑制や土留壁からの出水抑制などが期待できるものである．また，シールド工事については，砂礫地盤をシールド掘進する場合に発生するシールドビットの長寿命化技術とシールド到達時のリスク回避が期待できるものである．

(1) 開削工事のリスク軽減技術

・UD-HOMET 工法
・TRD 工法
・CRM 工法
・ECO-MW 工法
・ECW-Ⅱ型工法

(2) シールド工事のリスク軽減技術

1) シールドビット長寿命化技術
・二重ビット
・ロングライフビット
・長寿命カッタービット
・リレービット工法　等

2) 到達工法
・到達部止水壁設置工法
・水中到達工法
・URUP 工法(地上到達)等

8.6　おわりに

本分科会では，トラブル事例分科会の成果に基づき，事前調査や事前対策工の実施状況，想定されるリスク，トラブル対応の内容とその効果について考察を加え，前述の 9 つのキーワードによる分類をおこなった．

分類・整理の結果，多くのトラブルは地盤特性に起因することが分かり，事前の地盤調査が十分に成されていればトラブル回避や軽減が可能であったことも分かった．

ただし，地域や深度の区分が明確にできるほどのサンプル数が無いことや最近では適用しない工法も含まれることなどを考えると，所期の目的を達成したとは言い難い．

したがって，今後は，さらに多くのサンプルを分類・整理するとともに，新技術の実績も調査し，リスクを回避・軽減できる技術を継承していく必要があるものと考える．

本分科会資料が今後のリスクマネジメントの一助となれば幸いである．

９．おわりに

本研究委員会は，地下建設工事においてトラブルが発生しやすい地盤の内でも，特に均等係数の小さい細砂と大礫に着目し，まずは国内外におけるトラブル事例を収集し(**第２章～第６章**)，問題となる地盤の堆積環境やその特性について検討をおこない(**第７章**)，これらの因果関係やトラブルサム地盤に対する対応について整理をおこなった(**第８章**)．

各分科会および WG での取り組み内容やその成果については，各章末にまとめているが，事例収集に手間取ったことにより，トラブル事例の整理・分析は十分にまとめ切れているとは言い難い．

委員会の目的の大きな柱として，この分野の経験豊富な技術者が，定年を迎え急激に退職する時期が来ており，若手技術者への技術伝承が急務であるとしている．委員会では，ベテラン技術者の委員からの事例報告や議論を通じて，若手技術者の委員がトラブル事例やその対応およびトラブルサム地盤とは何かを学ぶことで，少なくとも委員会内での技術伝承はなされたと信じている．

本委員会でやり残したトラブル事例のより詳細な整理・分析とそれに基づく対応のまとめなどと共に，それらの結果のデータベース化や対外発表などに関して，更に研究することが必要と思われ，今後若手技術者を中心に新委員会などの研究組織の立ち上げを期待する．

ここでは最終委員会後の座談会等で頂いた意見や感想を基に，本委員会で掲げたテーマに取り組むべき方向性についての展望を以下に示す．

9.1　トラブル要因の社会的傾向とその対応

近年，建設会社やコンサルタントおよび地質調査会社が過度の価格競争にさらされており，工事における安全性や品質が低下しているように思われる．つまり，いかに工事費を安くするかに注目するあまり，安全性に対する余裕がなくなり，各種リスクの増加につながっているのが最近の傾向である．

地下建設工事においても，定年や工事量の減少に伴う経験豊富なベテラン技術者が減少し，トラブルサム地盤を始めリスクの早期発見やその回避能力が低下している．今後数年の間にこの傾向は，急速に増える可能性があるので，ベテラン技術者による経験や事例のまとめなど若手技術者への技術伝承が急務である．

よく「失敗事例に学ぶ」という言葉があるが，これらは『勝ちパターン』でなく『負けパターン』を知り，致命的な落とし穴を避けるということである．また，トラブル対応として，「トラブルは避けるべき，なくすべきだ！」という認識が根強いが，そもそも「トラブルは避けられない，常に発生する可能性がある！」と考え方を改め，その上でトラブルをどうやって抑制するか，適切に対応するかに主眼をおくことが重要と思われる．

従って，いかに多くのトラブル事例を地盤とともに学ぶことが大きな事故を防ぐために役立つことになる．

9.2　地質調査と地盤リスクへの対応に関する提言

自然地盤の不均一性や複雑さ，および地質調査情報の少なさ等に起因しての精度の高い地盤状況予測の難しさ，いわゆる地質リスクの問題がある．

山岳トンネルの事例にも示すが，事前の地質調査を十分に実施したつもりでいてもトラブルが発生した場合もあり，現実には，必要かつ十分な地盤情報を得ることが如何に難しいかを考えさせられる．とかく工事前に作成した地質断面図を信用しきって掘削が進められがちだが，その地質断面図は十分とは言えない事前調査からの単なる推定でしかないことを肝に銘じておく必要がある．従って，予測できない程複雑な地盤内をトンネル掘削する場合は，実施工時において，現場計測の利用と共に，常に地盤や地下水状況を把握しながら掘削することの重要性が挙げられる．

今回の研究を通じて地質調査の重要性を再確認できたが，トラブル回避のため事前に詳細地質調査を実施することは，発注機関としても現状では計画し難い場合が多く，十分な詳細調査を「どの程度」「どの範囲」実施すべきなのかとか，必ず実施すべき調査と補助的に必要な調査の区分けや優先順位化や地盤リスクに関する対応方法が確立できていないのが実状である．この件に関しては，今後の検討を必要とするが，トラブル事例やトラブルサム地盤の特性や生成環境や出現分布を本委員会報告書または既存の文献や資料などから把握しておくことにより，効率的な地質調査やリスクの低減又は回避が出来ると思われる．

9.3　トラブル事例収集と事例の取り扱いについての提言

本報告書の**第８章**において，トラブルサム地盤に対するリスクマネージメントを記述しているが，収集した事例のうち，ある限られた内容に対しての整理にとどまっている．本研究委員会において貴重なトラブル事例が数多く収集できたので，今後これらの整理や分析を更に深化させ，地盤リスクに対する対応を体系的に整理した上で，その対応技術の標準化を目指す必要がある．

建設工事は経験工学であるとよく言われるように，事故などのトラブルの記録を残し，将来に実施する同様の工事において活用することが非常に重要である．本研究委員会において各機関でのトラブル事例収集を試みたが，資料が残っていないことが多く，個々の関係者が保有または記憶している程度で，体系的に整理されていることは稀であった．

想像するに，後日トラブルの資料が表面化したときに，「恥をさらす」，「将来，責任を問われる」などを危惧したことも一因となって本日に至ったのではないかとも思われるが，このような事例の資料は，建設技術の観点からすると，貴重な共有の財産である．

トラブル事例から学んで体得するリスク予知能力は，建設技術者には不可欠なスキルであるが，トラブル事例が表面化せずに後進の技術者に学習する機会が与えられなければ，後年に同様のトラブルを繰り返し発生させる原因の１つとなるに違いない．

今後，トラブル発生抑制のために，発生したトラブル事例を記録に残す意義を明確化し，ルール化することを建設業界全体に定着させる必要があると考える．各機関単独での対応が難しい場合には，第３者的な位置づけで例えば地盤工学会が中心となってトラブル事例の記録を後世に残すルール作りとデータベース化およびその運営をすることが望まれる．

9.4　本研究委員会成果の技術伝承

建設技術者にとってトラブルサム地盤に対してどのようなトラブルが実際に発生するかをイメージすることは大変重要である．しかし，これはトラブル発生時に関係した技術者は身をもって体験できるが，このような種々のトラブル経験者は稀であり，また，トラブル経験のない技術者が今後益々増加すると考えられる．そこで本委員会では，経験豊富なベテラン技術者と，今後の建設業界を背負っていくべき若手技術者がペアとなって，技術伝承を念頭においた委員会活動をおこなってきた．

ベテラン技術者からの様々なトラブル事例の収集・整理に基づく多岐にわたる経験や委員会での議論を拝聴することによって，基準書や書籍には書かれていない貴重な知識と経験を得ることができたという若手技術者委員の意見があった．

いざ，これからの地下建設工事において難題に直面した際，解決策を模索する中で本報告書が一つの参考になるとの見方が多かった．

本委員会のような研究活動を一過性のものでは，本当の技術伝承にはつながりにくいので，近い将来に発展的，継続的な研究活動や対外発表及び地盤リスクマネージメントの重要性の啓蒙活動をおこなうシステムを再構築するべきとの要望が多かった，

そのためには，今回収集した多くの事例を再整理し，詳細分析すると共に，新規の事例収集や分析などをおこなうための研究委員会が発足されることが望まれる．新規委員会において，発注機関，学術研究機関，建設会社，地質調査会社またはコンサルタント等の様々な立場の技術者が会する場を設け，活発な議論をおこなうことで「知識の融合」という新たな成果を得る機会を創ることができれば有益であろう．

「地下建設工事においてトラブルが発生しやすい
地盤の特性とその対応技術に関する研究委員会」
委員長　　橋本　正
幹事長　　木村　亮