

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

橋本 正 (はしもと ただし)
㈱地域地盤環境研究所 所長

譽田 孝宏 (こんだ たかひろ)
㈱地域地盤環境研究所地盤解析部 次長

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、大阪平野・関東平野・濃尾平野などの低平地に形成された都市や、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。

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いるため、技術力の維持及び伝承が課題となっている。そこで、日本における地下建設においてトラブルを起こしやすい地盤（以下、トラブルサム地盤と称す）での貴重かつ豊富な施工経験に基づいて、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は、2009年に“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）”を発足させた。本研究委員会では、多くのトラブルサム地盤における地下建設工事のトラブル事例を収集整理し、問題となる地盤の堆積環境や物性などの地質的及び土質的アプローチの可能性をさぐり、これらの因果関係や有効的な対策（リスクマネージメント）についての研究をスタートした。また、技術伝承や海外への展開をにらみ、産官学の熟年経験者から若手技術者まで、また同様のトラブルサム地盤を有する他支部や海外からも参加をいただ

ている。

この講座では、上記委員会の成果の一部を用い、特に都市部における地下建設工事でのトラブルサム地盤とそのトラブル事例や対策技術について紹介する。

2. 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一に示す。

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、又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グマシンの胴締め現象、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 $k=1 \times 10^{-4}$ 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、

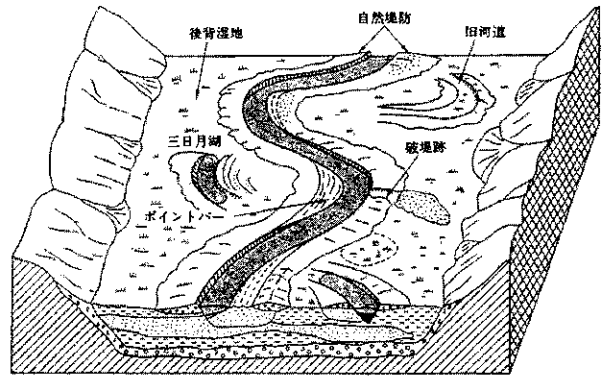
表一 トラブルサム地盤と工種とトラブルの種類の関係

	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	地盤攪乱 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	地盤攪乱		

以下 JGP と称す) の品質が悪い, ③透水系数が大きい
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, 等のトラブルが発生し
やすい。

また, 透水系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, 4. に示すように大量
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化化すると, 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。



● 旧河床砂礫
■ 河道堆積物(ポイントバー堆積物を含む)
○ 自然堤防堆積物
□ 後背湿地堆積物
■ 河道跡堆積物(三日月湖堆積物を含む)
● 破堤堆積物
■ 礫堆積物・斜面堆積物

図-1 (a) 氾濫原地帯の模式図¹⁾

3. トラブルサム地盤の堆積環境と物性

砂, 礫, 粘土などの河川による堆積物は, 図-1 (a),
(b) に示すように, 堆積時の表層地形に依存して河川流
速などの諸条件に伴って堆積場所が決まる²⁾。例えば,
大阪平野の場合は, 図-2 に示すように深い所で千数百
m の厚さを持つ大阪層群と呼ばれる砂, 礫, 粘土層が,
気温変動に伴う海進や海退により互層状に繰り返して堆
積している³⁾。したがって, 粘土は海中で堆積したもの
が多く, これらは海成粘土と呼ばれ, 流れの緩い河口な
どで堆積する砂は, 粘土層の上下に見られる場合が多い。
礫は, 流れの速い河川上流付近に堆積する場合が多い。
以上より, ここで問題とする細砂や大礫は, 堆積場所や
深度がある程度特定される。細砂の堆積環境に関しては,
大河川の河口に位置する大阪平野や関東平野だけでなく,
多くの河川の低平地に共通するものであり, 世界的に上
海, 天津, オランダなども類似している。一方, 大礫の
堆積環境は, 堆積時に流れの速い上流付近や山麓部の扇
状地に堆積するので, 関西地域では, 山が近い阪神間の
地域や京都盆地, 滋賀などの平野部に多く見られる。

クラッキー粘土は, 撓曲部の大阪層群粘土層などで
見られ, 鏡肌を持つ場合があり, 掘削面の安定性が損な
われやすい。一方, 軟弱鋭敏粘土は, 上町台地東側の東
大阪低地において, この付近が潟の時代に堆積した沖積
粘土層に見られ, 液性指数が $I_L=1$ 前後と非常に鋭敏で,
工事などの攪乱による強度低下が大きく, 場合によっては
流動化する性質を持っている。

大阪平野に見られる細砂の代表的な粒度分布⁴⁾を 図-
3 に示すが, トラブルを起こしやすい細砂は 74μ 以下
の細粒分含有率が 10% 以下, 均等係数 U_c が 5 以下, 透
水系数 k が 10^{-3} cm/sec 以下のものが多い。また, これ
らの細砂は, 細粒分含有率が小さく, 摩擦性材料である
ため, 限界動水勾配が $i_c=1$ 程度の地下水流により容易
に流動化しやすい特性を有する。

4. 開削工事でのトラブル事例

開削工事に伴う出水事例を以下に示す。これらの出水
に伴って, 砂地盤ではパイピング現象が発生し, 土砂流

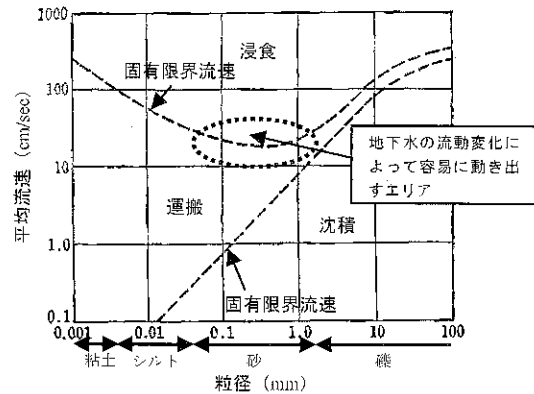


図-1 (b) 堆積粒子の浸食, 運搬及び沈積の関係を表す
“Hjulstrom ダイアグラム”²⁾に加重

地質時代	層区分	模式柱状図	地層名(色・記号)	堆積環境	化石の産出	花粉化石	火山灰層	推定年代	
更新世	沖積層	[沖積層]	沖積層	海成	N1	P1	d, c, b, a	6,000	
			沖積層(礫波累層)	汽水~淡水成					
	低位段丘堆積層	[低位段丘堆積層]	低位段丘堆積層	海成					10,000
			低位段丘堆積層(富田累層)	汽水成		P2		24,000	
			中位段丘堆積層上部	汽水~汽水成			b		56,000
			中位段丘堆積層中部(Ma12層)	海成	N2	P3	d, c, b, a		
	中位段丘堆積層	[中位段丘堆積層]	中位段丘堆積層下部	汽水~淡水成			a		
			Ma11(3)層	海成		P4			
	中期	[中期]	Ma11(2)層	海成		N3	P5, P7	b, c, b	
			Ma11(1)層	海成			P9	a	
Ma10層			海成			P10	b, a		
Ma9層			海成		N5	P11	c, b	270,000	
更新世	[更新世]	Ma8層	海成		N6	P13	d, c, b		
		Ma8層	海成 汽水成 海成			P15	d, c, b, a		
		Ma7層(?)	海成			P17	c, b, a		
		Ma6層(?)	海成		N8	P19	b, a	440,000	

図-2 大阪湾東岸部地下における総合柱状図³⁾より抜粋

入を伴う場合が多い。

- ① 土留め壁継手部の不良箇所や欠損部等の弱部を通っての出水
- ② 土留め壁根入れ下部からの浸透流による出水
- ③ 旧ボーリング孔跡や古井戸などからの出水
- ④ JGP 等による地盤改良の不良部からの出水

①に関する特徴的な出水原因とその現象を図-4に示す。図-4(a)は、土留め壁の継手不良箇所が上部粘土層とその下の砂層付近にあった場合を示しているが、掘削深度がまだ下の砂層に達していない時点においても出水する可能性があり、図-4(b)にはその出水経路例を示している。原因としては、土留め壁は背面地盤の土・水圧により変形するが、下部の粘土層がその強度の大きさから自立する場合、土留め壁と背面地盤の間に隙間ができ、水みちになることが挙げられる。細砂層下部に透水性の大きい礫層がある場合には、地下水と共に細砂が流砂し、次第に洗掘されて空洞が広がり、大量の細砂を含む出水にいたることが多い。

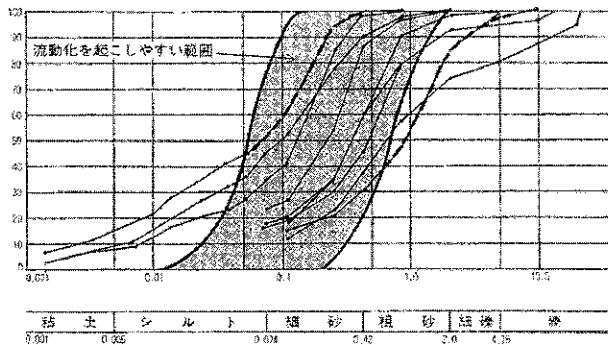


図-3 大阪平野に見られる代表的な細砂の粒度分布⁴⁾

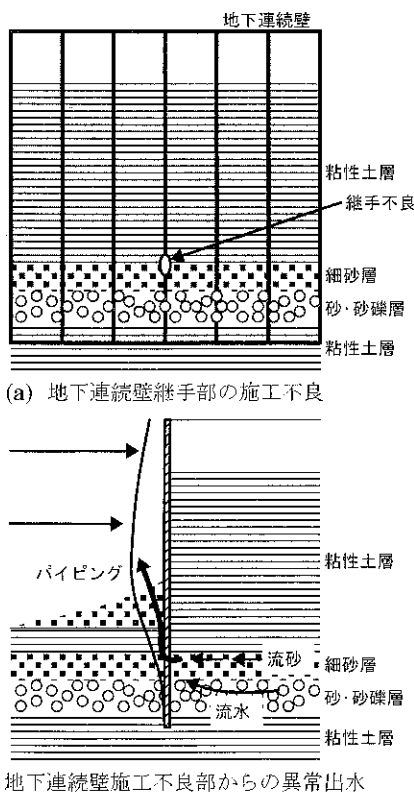


図-4 地下連続壁の施工不良部からの異常出水

②に関しては、図-5に示すように、地盤情報不足(粘土層上面の削り込み状態や地層の傾斜等)に起因した遮水壁根入れ不足に伴って出水やパイピングが発生する場合がある。地盤の変化が大きいと予測される箇所では、地層の連続性などに着目した事前地質調査と、事前揚水試験を利用した遮水効果確認試験が必要である。

③のボーリング孔跡や古井戸からの出水例は多い。現象は図-6に示すように単純であるが、写真-1のように土砂を含む出水により掘削構内が水没するようなトラブル⁶⁾に発展する場合があるので、可能な限り事前の情報収集と対策を講じる必要がある。また、調査ボーリングや井戸の撤去時には、掘削孔を止水材で埋め戻すなどの処置を義務付けて徹底して実施する必要がある。

④のJGPは、土留め壁の欠損部処理や削削底盤の膨れ対策に多く使われるが、改良されたコラム間の接合不良部(隙間)や改良不足による不具合部から出水してトラブルが生じることも珍しくない。図-7は、地下鉄駅舎建設時に既存埋設管下部の欠損をJGP工法の一つであるCJGによって改良したが、改良不良箇所からの出水が生じた事例⁵⁾である。JGPの造成は、図-8(a)

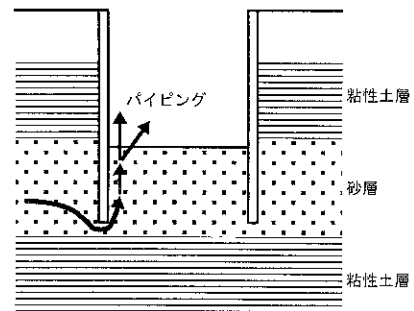


図-5 遮水壁根入れ不足に伴う掘削底盤からの異常出水

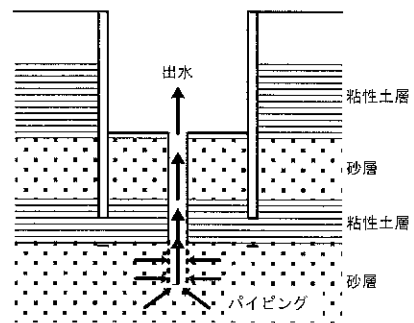


図-6 井戸のボーリング跡からの異常出水

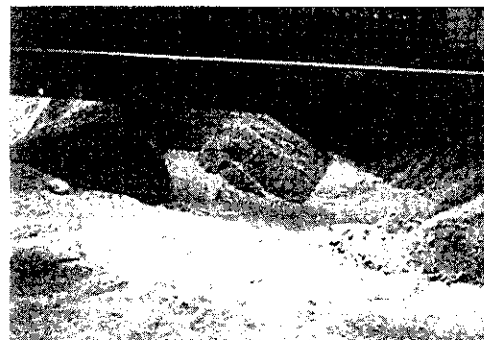


写真-1 井戸のボーリング跡からの異常出水事例⁵⁾

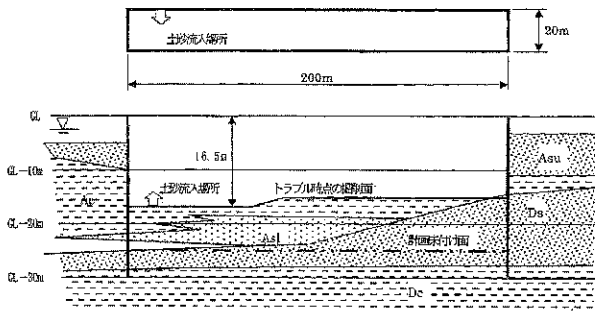


図-7 JGPによる改良体の不良箇所からの出水事例⁶⁾

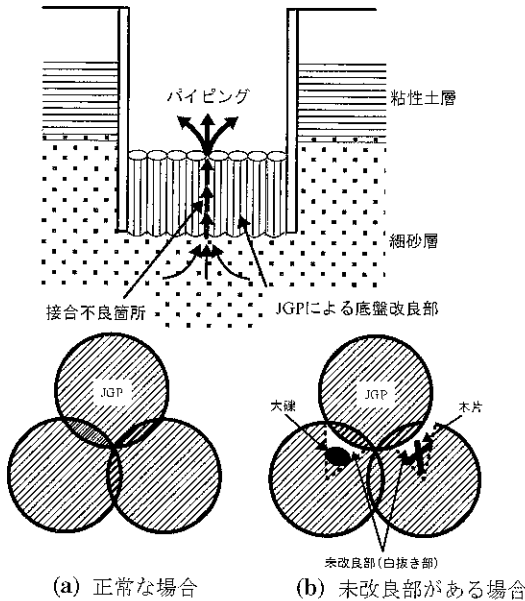


図-8 JGPによる地盤の未改良部

に示すように正常な場合、接合部は3本のJGPで包含されて未改良部や改良不良は生じない。しかし、硬質粘土や大礫地盤では、ジェットでの切削が遠くまで届かないため、所定の改良径が得られない。また、礫や木片などの異物が存在する場合は、図-8(b)のようにその背面は噴射が届かないため未改良となる。また、図-9の模式図に示すように砂層と硬質粘土の互層地盤においては、硬質粘土部分では小さな改良径しか造成できず、コラムの接合部が未改良となり、水みちになりやすい。

図-10に示すオランダのデン・ハーグ市の出水陥没事例⁷⁾も、JGPによる地盤改良を過信したために発生したと考えられる。路面電車の地下化と地下駐車場設置のため、長さ28mの土留め壁で囲み、底盤を直径1.8mのJGPで止水固化改良した後、地下13.5mの開削工を実施した。地盤は均等係数 $U_c=2\sim5$ の細砂で地下水頭が地表面近くにあり、パイピングしやすい条件にあった。掘削途中でJGP接合部からパイピングを伴う出水と陥没が発生し、掘削構内は水没した。復旧対策には薬液注入による地盤改良だけでなく、中床版を反力にとった圧気工法を併用し、地下水位を下げて開削を完了。

台湾の高雄地下鉄東西線工事で上下シールドトンネル間連絡坑用の排水ピット掘削時に生じた細砂層のパイピングとそれに伴う出水陥没事例⁸⁾もJGP接合部の不具合が起因するものである。

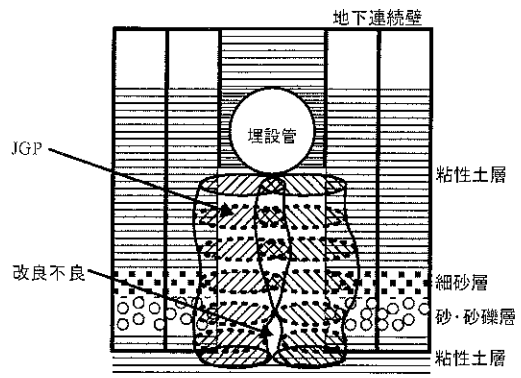


図-9 地下連続壁欠損部の改良不良

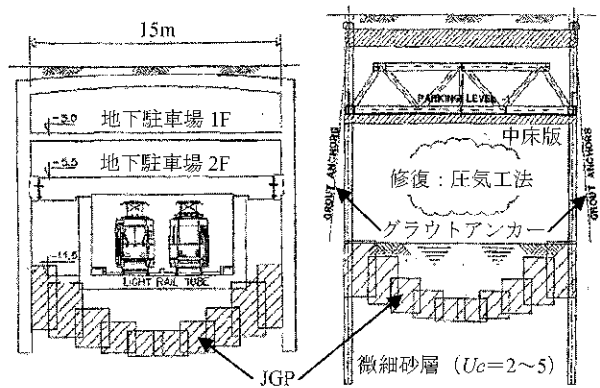


図-10 オランダのハーグ市の出水陥没事例⁷⁾に加筆

このようなJGPの改良不良に伴うトラブルを防ぐためには、JGPの施工品質を向上させることはもちろん、設計改良長の増大やより高性能なJGP工法の採用、薬液注入による捕足改良や遮水効果確認試験の実施が望まれる。

4.1 大阪駅前第2棟建設時の異常出水⁹⁾

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、高さ70m、延床面積10万 m^2 を超える大規模ビルであり、逆打ち工法によって地上と地下から同時に建設を開始した。その際、基礎工事のために地下連続壁による遮水工法を採用した。具体的には、建設敷地の四周を厚さ70cmのコンクリート連続壁で囲んで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た。

1975年9月、地下掘削は地下4階部分のGL-20~-23mまで進み、掘削完了まであとわずかのところ(GL-23~-25m)で連壁継手部に接する掘削底面から建物内部に漏水が始まった。直ちに止水対策を講じたが、水と一緒に土砂が流入し、周辺地盤が沈下し始めた。沈下の影響は建物南側(約30×40m)におよび、16棟(29世帯)の家屋が傾く等の被害が発生し、隣接する国道2号線の沈下量は最大1.46mに達した。建物内への累計流入地下水量は約30,000 m^3 、流入土砂量は約550 m^3 と推定された。

建物内に流入した水は、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-11参照)。この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

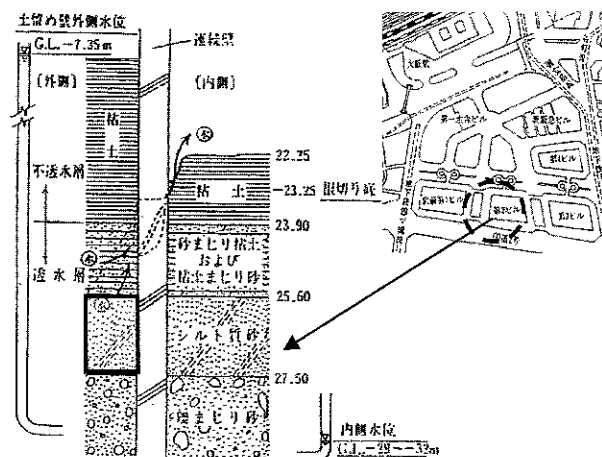


図-11 大阪駅前第2棟建設時の出水時の想定水みち⁹⁾に加重

後は百数十kPa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た。同時に建物外側の帯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。

4.2 片福連絡線福島地区での異常出水¹⁰⁾

1992年4月に大阪市福島区海老江の国道2号地下の片福連絡線建設工事現場で地下21m掘削作業中、大量の地下水が突然噴出した。出水直後に工事を中止したが、地上のアスファルト歩道部分が幅2.5m、長さ30mにわたって最大30cm陥没し、付近の民家などに被害が発生した。事故原因等については、「異常出水対策技術委員会」(委員長:柴田徹 京都大学教授(当時))によって審議され、その結果は、同年6月17日の毎日新聞に報道されている。地盤問題に関する要点を以下に示す。

- ① 出水した地下水は天満砂礫層とその上部にある沖積層からのものである。
- ② この付近の天満砂礫層の水頭はGL-2～-3mと高い。
- ③ 沖積層下部に、粒径が均質で流動化しやすい砂質土層が存在する。

地下水や地盤条件の中で、土留め壁の継目から、天満砂礫層などに含まれている被圧地下水が出水した可能性が高いと結論づけている(図-12参照)。

以上2事例を紹介したが、土留め壁の背面と前面の水頭差が大きい場合には動水勾配が大きくなり、何らかの欠損部よりパイピングする可能性が高い。ここでも土留め壁の継目が欠損部となり、砂層や砂礫層でのパイピングによる地盤侵食が進行し、流砂を伴う大量の出水により、局所的な地盤沈下が発生したと考えられる。これらに共通する素因として、高い地下水位(又は大きな水頭差)と、大きな透水係数を有する砂礫層上部に流動化しやすい均等粒径の細砂が堆積した地盤環境にあったことが挙げられる。また応急対策としては、土留め壁背面の流入箇所付近から生コンクリートを流し込んで流量を低減させた後、薬液注入により止水及び地盤改良する方法が出水流量の多い場合に有効であった。

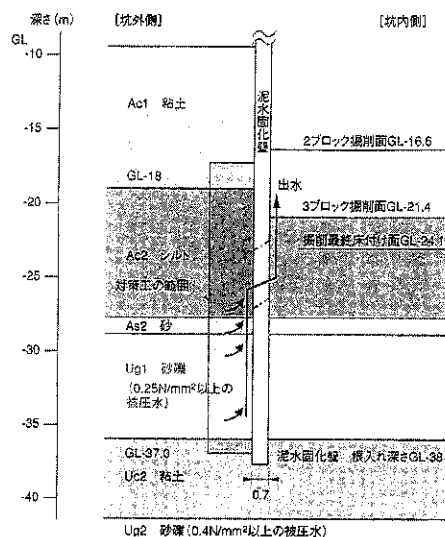


図-12 片福連絡線福島地区の出水時における想定水みち¹⁰⁾

5. シールド工事でのトラブル事例

細砂や大礫地盤でのシールドトンネルによるトラブルとしては、以下の場合が挙げられる。

- ① スクリューコンベアーなどからの噴発に伴う切羽地盤の崩壊
- ② 地盤への泥水逸泥や切羽土圧バランスの不均衡による切羽地盤の崩壊
- ③ 発進・到達時の立坑への出水
- ④ 連絡坑や中間立坑築造時の止水不良箇所からの出水
- ⑤ シールドの胴締めによる掘削困難
- ⑥ 大礫地盤でのシールドカッターの破損

5.1 スクリューコンベアー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シールドで掘進する際、チャンパー内やスクリューコンベアーでの混練り状態が悪い場合や異物を取り込んだ場合、図-13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マシン頭部が沈下し(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。

透水係数の大きい大礫地盤を泥土圧シールドで掘削する場合、チャンパーやスクリューコンベアー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ーに大礫が挟まって閉塞されると、チャンパ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。切羽下部が大礫層又は岩盤で上部が砂層のMixed Face地盤の場合、掘進時間が長時間となり、上部砂層が攪乱されて崩壊にいたる場合が多い。対策としては、スクリューコンベアーへの加泥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ー径の拡大、カッターやチャンパー出口で大礫をクラ

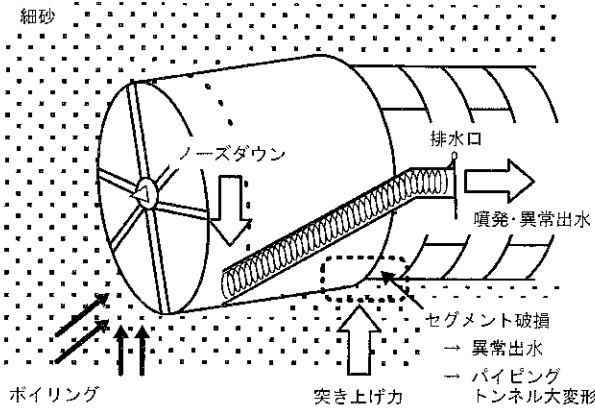


図-13 排土時の噴発に伴うトラブル及びその際のノーズダウン及びトンネル破損の可能性

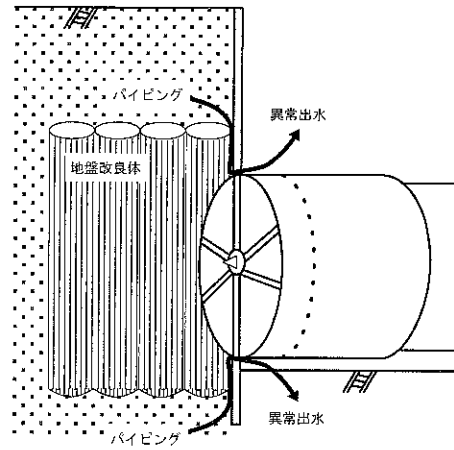


図-14(a) シールド発進時の異常出水トラブル

ッシュすることが挙げられる。泥水シールドでの排泥管又は面盤開口の取込み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、取込み過剰による陥没が生じる場合がある。

5.2 地盤への泥水の逸泥や切羽圧の不均衡による切羽地盤の崩壊

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、切羽圧の不均衡が生じることがある。一方、泥土圧シールド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。

対策としては、加泥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。透水性の小さい細砂地盤における泥水シールド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。

5.3 発進・到達時の立坑への出水

発進・到達では、ジェットグラウト、薬液注入工法や凍結工法等で地盤改良をする場合が多いが、図-14(a)、(b)に示すように、地盤改良の不良箇所の存在やシールドマシンによる遮水壁や改良地盤を傷めることにより水みちが発生し、細砂を含む出水が生じることがある。対策としては、観測井を設けて厳格な施工管理を行うことはもちろん、追い注入を実施することが挙げられる。

5.4 連絡坑や中間立坑築造時の止水不良箇所からの出水¹¹⁾

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パイピ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¹¹⁾もある。

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

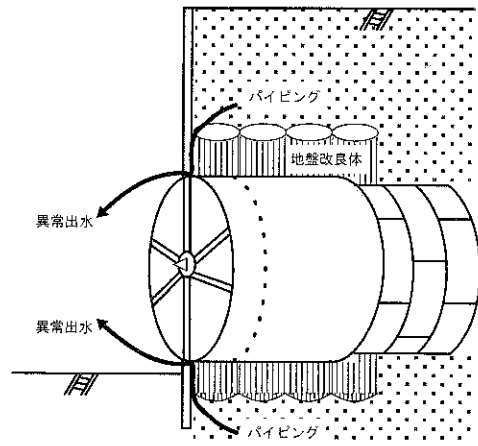


図-14(b) シールド到達時の異常出水トラブル

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-2参照)。

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。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、周辺地盤がパイピ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、



写真一 上海地下鉄4号線トンネル陥没事例(11)

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。

5.5 シールドの胴締めによる掘進困難

シールド掘進時に砂地盤によるマシン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、図一15に示すようにカッターで掘削した砂地盤が応力解放やせん断を受けて膨張変形し、シールド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～細砂の場合に、またカーブ線形を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。この現象は、均等係数の小さい大阪層群砂層を掘進時によく見られ、大阪地下鉄シールド工事¹²⁾や関西電力高圧送電トンネル工事¹³⁾では、度々この現象に悩まされた。

対策としては、オーバーカットやシールド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マシンに装備し、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。

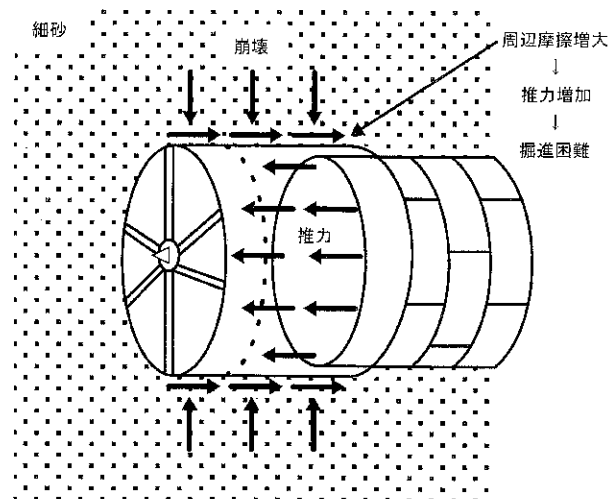
5.6 大礫層でのシールドカッターの破損

一般的な粘土、砂、砂礫地盤は、ティースカッターで掘削出来るが、大礫地盤に遭遇するとこの種のカッターでは欠落や破損したり、過度の磨耗が生じて掘進不能に陥ったりすることがある。

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、カッター交換可能なマシンを導入することが必要である。また磨耗の影響は、スクリーコンベアーや排泥管におよぶことも多いので注意を要する。

5.7 トラブルサム地盤の地盤調査法

都市部の地下建設工事における地盤調査で重要なのは、地盤物性調査だけでなく、三次元的な地盤のプロファイルと地下水に関する詳細情報を把握することである。地



図一15 シールド掘進時における胴締め現象

盤の三次元分布調査のために、まず地盤の形成過程を地形や地質的な観点から調べ、地盤のデータベースを用いて広域的な地盤状態を把握しておくことが重要である。

原位置調査方法として、ボーリング調査や貫入試験が一般的であるが、これらは点または線の情報しか得られないため、複雑な地盤では、調査本数を増やすか、音波や振動波を用いたジオトモグラフィーなどの物理探査を併用することが推奨される。

地下工事のためのボーリング調査では、パック法やレイモンドサンプラーによる連続コアサンプリングを基本とし、コア観察を重視する必要がある。例えば、1 mピッチの標準貫入試験だけでは、厚さ50 cm以下の細砂層の存在などは調べることができないため、50 cmピッチに標準貫入試験を実施することが望まれる。堆積地盤では、砂、砂礫、シルト、粘土などの成層状態、透水性、硬さや密度及び粘土の鋭敏性や潜在クラック状態等を観察して把握するとともに、必要に応じて土の物理試験と力学試験を実施して物性値を把握する必要がある。

大礫地盤では、小口径ボーリングで粒径や大礫の混入度合いを把握できないので、場合によってはベント掘削などの大口径ボーリングでサンプリングすべきである。

透水係数、影響半径や水圧などの帯水層の水理特性を調べるには、簡易なボーリング孔を利用した単孔式透水試験だけでなく、正確度が格段に高い揚水井を用いた多孔式揚水試験を実施すべきであり、地下水位は出来るだけ経時変化が分かる長期間計測が望まれる。

施工中においても、地盤の変化が予想よりも激しい場合や、地下水の遮水効果を確認する場合には、適宜に地盤調査を実施し、安全性を高めることが重要である。

5.8 トラブルサム地盤の傾向と対策

大都市における最近の地下工事では、1970年代の揚水規制に伴う地下水位上昇と、大深度地下空間利用に伴う掘削深度の増大と、地下構造物の輻輳化に起因して掘削面からの出水トラブルが増えている。2000年以前は、地下水低下工法が地下水対策としてよく用いられたが、地下水位低下による地盤沈下や利用井戸の枯渇等の環境

問題上の制約により、その採用が難しくなっている。

したがって、開削工事では、土留め壁の根入れを深くするか、JGPや薬液注入により掘削底面付近を地盤改良し、止水壁を造成するケースが多く見られる。このような中で、土留め壁や地盤改良部の止水不良部からの出水が近年数多く発生しているのが実状である。

これらの対策としては、近年開発改良されている高性能土留め壁や地盤改良の新技術の採用が挙げられる。例えば、鉛直に設置したチェーンソーで連続的に地盤を掘削してセメントで攪拌固化壁を造成するTRD工法¹⁴⁾や、掘削の鉛直性を制御できる土留め壁工法¹⁵⁾がある。また、周辺地盤で復水工法を併用する方法や深井戸で真空排水工法を活用するSWP工法¹⁶⁾等を用いることで、地下水位低下の影響を少なくする方法が有効である。また、無人化した遠隔操作型圧気ケーソン工法¹⁷⁾も特に大深度掘削に有効であり、最近その実績が増えている。

一方、都市部におけるトンネル工法は、そのほとんどで密閉式シールド工法を採用するようになっており、特殊な場面以外は、陥没や大きな地盤沈下は発生しなくなった。特殊地盤としては、大礫地盤や均等係数の小さい細砂及び鋭敏粘土等があり、特に、大礫地盤ではスクリーンの閉塞に伴う噴発、細砂では土圧の不均衡による切羽の不安定化、鋭敏粘土では地盤の攪乱による後続沈下が見られる。また、通常のシールド掘削工事においては、出水や陥没のトラブルはほとんど発生しないほど減少したが、立坑からの発進到達時やトンネル間の連絡通路や切広げ工事の際に、出水トラブルがいまだに多い。

この対策としては、主にJGP工法、セメント深層攪拌工法、薬液注入方法や凍結工法による地盤改良の品質向上と止水効果の確認や管理精度を上げることが重要である。また、対策には施工方法だけでなく、事前の十分な地質調査や地中障害物調査、施工中の地質調査と現場計測管理方法の活用が重要である。

6. おわりに

近年、日本では地下鉄等の大型工事が減少しており、若手の技術者が大規模地下工事や難工事に従事する機会が少なくなっている。また、戦中・戦後生まれの技術者が一線を退く時代と重なっており、過去数十年間に培ってきた日本が得意とするシールドを始めとする地下工事などの都市土木技術の若手技術者への伝承が、十分はかられていないのが現状である。

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。トラブルサマ地盤研究委員会でも得られた成果は、興味を持つ多くの会員に情報発信するだけでなく、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) 大矢雅彦編：防災と環境保全のための応用地理学，古今書院，p. 339, 1994.
- 2) Hjulstrom, F.: Transportation of detritus by running water, Recent marine sediments, *Am. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa, Okla.* (A general treatment of the laws governing transportation of clastic sediments).
- 3) 古谷正和・坂上俊彦・松本雅治・中村忠春・中林正司・幸左賢二：湾岸線南伸部の地質構造、関西地盤の地質構造と土質に関する最近の知見シンポジウム発表論文集，土質工学会関西支部，pp. 79～84, 1992.
- 4) 阪神水道企業団：第5期拡張事業 導・送水路工事記録，p. 57, 1992.
- 5) 金田 宏：建設工事に伴う地下水の挙動，ワークショップ“地下水と地盤環境”に関する論文報告集，pp. 92～101, 1994.
- 6) 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. 114～115, 2001.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 大阪市都市整備局：大阪駅前市街地改造事業誌，pp. 159～166, 1985.
- 10) 日経コンストラクション：建設事故 重大災害70例に学ぶ再発防止策，pp. 78～81, 2000.
- 11) 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.
- 12) 大阪市交通局：多層地盤における泥水加圧式シールド工事の施工と地中障害物撤去，pp. 453～456, 1990.
- 13) 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.
- 14) 地盤工学会：地中連続壁工法，地盤工学・実務シリーズ 20, pp. 289～336, 2004.
- 15) 田中信幸・橋本 正・田村 保・児玉一夫：リアルタイム削孔制御 高精度柱列式地下連続壁工法の開発（その1），土木学会第58回年次学術講演会概要集，Ⅴ-231, pp. 461～462, 2003.
- 16) 古村哲史・合田弘司・高橋茂吉・尾崎哲二：防潮堤水門基礎工事における地下水位低下工法，土木学会第65回年次学術講演会概要集，Ⅴ-272, pp. 543～544, 2010.
- 17) 日本圧気技術協会：最新のニューマチックケーソン工法，http://www.pneumatic.gr.jp/2005/01/post_cd0b.html