

# 特集 下水道トンネル施工の課題解決に向けて

## 地下工事現場で克服すべき

### 課題、教訓

#### —トラブルサム地盤を考える—

(株)地域地盤環境研究所 代表取締役会長  
(公益社団法人 地盤工学会 元関西支部長)

橋本 正



#### 1 はじめに

近年、東京、大阪等の都市部では、上下水道、地下鉄、電力、ガス、通信等のライフラインだけでなく、ビルの地階や地下街、地下道路等の地下空間利用が高度に進んでいるため、輻輳化した地下構造物を避けながらの地下工事や大深度の地下工事などの複雑な地下建設工事が増加してきている。また、地下建設工事の環境条件、特に周辺住民に与える環境負荷を最小化した環境条件化で工事を進めることが求められている。

一方で、近年のシールドや推進工法などの建設技術が発展しているなかにおいても、未だに多くの事故やトラブルが発生しているのが現状である。このようなトラブルの発生は、地盤条件に大きく影響され、特に細砂や大礫層などの限定された地盤で発生することが多く、大阪・東京・名古屋などの低平地、東アジアや東南アジアの沿岸部あるいはオランダのデルタ地帯などの都市部において見られる。

そこで、(公社)地盤工学会関西支部では2013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(トラブルサム地盤研究委員会、委員長:橋本正)」を立ち上げ、海外も含め産官学よりなる59名の委員の協力により100件を超す事例を収集し、地

盤特性や施工技術とトラブルの関係を分析し、その原因および教訓を整理して今後のトラブル回避に向けての対応策に関する研究を行った<sup>1)</sup>。

トラブルは立坑などの開削工事、山岳トンネルまたはケーソン工事においても多く見られるが、ここでは、主にシールドトンネルと推進工法に着目してまとめた。

#### 2 地下建設工事における トラブルと地盤

トラブルサム地盤としては、細砂層、大礫層、クラッキー粘土、鋭敏粘土、木片など異物混入地盤、および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。

トラブルサム地盤における開削やシールド等の地下建設工法と、トラブルの種類との関係を表-1に示す<sup>2)</sup>。このなかでも、均等係数の小さい細砂は粘着力のない摩擦性地盤であるため容易に流動化しやすく、開削工事における土留め壁の隙間や土圧シールドの排土口からの噴発、泥水シールドの切羽やトレーニング壁の不安定さに起因する地盤崩壊、シールド機、削孔機の胴締め現象、山岳トンネルの切羽崩壊などのトラブルが生じやすい。また、細砂は透水係数が小さいため、地下水低下工法や薬液注入工法などの補助工法の効果が低いこともトラブルの発生を増加させる要因となっている。

一方、大礫地盤では次に示すように、トラブル

表-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	地中壁の品質不良	掘削斜面の不安定、孔壁崩壊	大変形	地中壁の止水不良	根入不足
シールド工事 推進工事	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	地盤搅乱、後続沈下、姿勢制御困難	カッター部や排土管の閉塞	切羽崩壊、摩耗、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		地盤搅乱	

要因となるものが多い。

- ① 品質のよい土留め壁や杭打設が困難である
- ② 高圧噴射搅拌地盤改良（以下、JGPと称す）の品質が低い
- ③ 透水係数が大きいため薬液注入による地盤改良効果が低く、シールドの泥水、加泥材や裏込め注入材の逸泥が発生しやすい
- ④ 磨耗が大きいため、シールド掘削土の排土不良やカッターなどシールド機の摩耗や破損が大きい

平野部における砂、礫、粘土などの堆積物は、堆積時の表層地形に依存して河川流速などの諸条件によって堆積場所が決まり、気温変動に伴う海進や海退の繰り返しにより互層状に繰り返して堆積している場合が多い。したがって、粘土は堆積時の湖や河口または海底に堆積、砂は粘土層の上下に見られる場合が多く、大礫は流れの速い上流付近や山麓部の扇状地において堆積したものであるなど、トラブルサム地盤の分布は、時代ごとの堆積環境を把握することにより、ある程度の推定が可能である。

### 3 シールド工事および推進工事のトラブルと課題およびその対策

最近の推進工法は、推進管先端にシールド機を取り付けて掘削しながらジャッキ推進する方法が主流であることから、トラブルもシールド工法と類似したものが多いた。

写真-1は、シールド工事における事故例として、

写真-1 上海地下鉄4号線トンネル陥没事例<sup>3)</sup>



2003年に発生した上海地下鉄4号線連絡横坑構築時の大量出水に伴う大陥没の状況を示す<sup>3)</sup>。

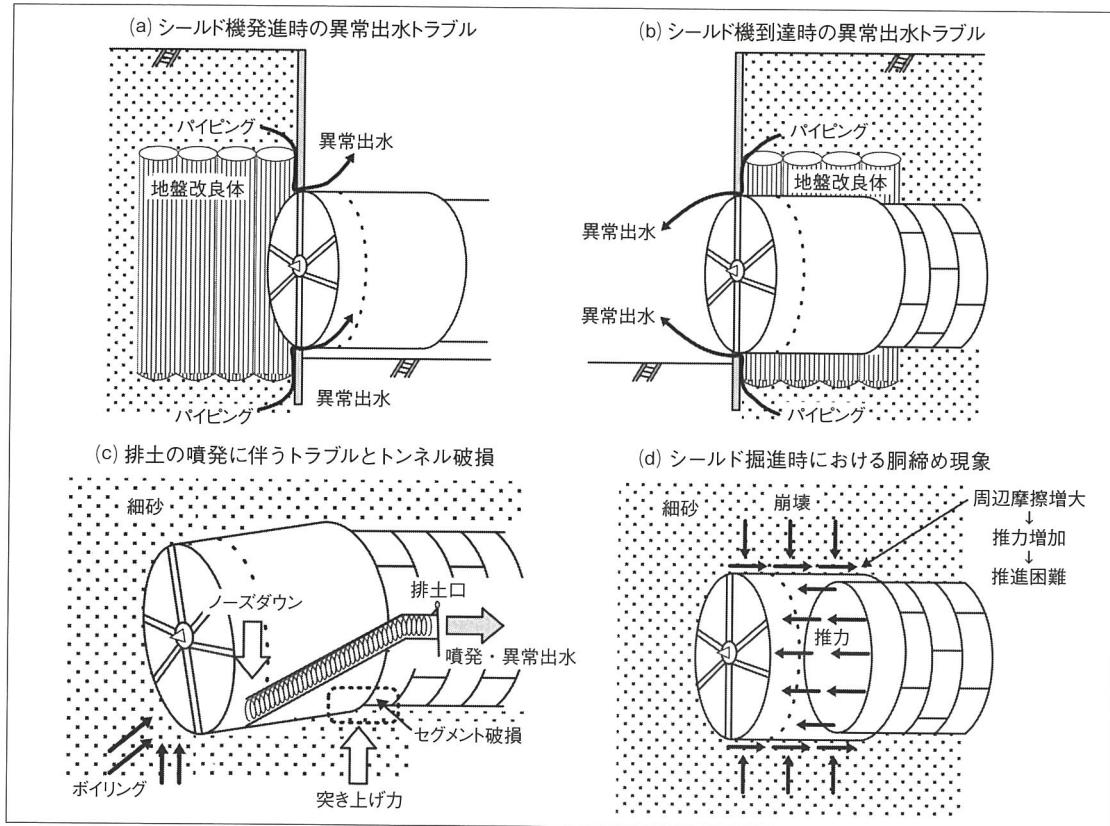
幸いにも人身事故には至らなかったが、トンネルの崩壊と地上建築物の倒壊等が発生し、修復工事は、大深度開削工法により4年の歳月と莫大な費用を費やして完成させた。

委員会における事例研究をもとに、主に細砂と大礫地盤でのシールドや推進工事に伴うトラブルを整理すると、現象的に以下のように分類される。

また、これらのトラブル発生現象のイメージを、図-1のようにイラストで示した<sup>2)</sup>。

- ① 泥水の逸泥や切羽圧の不均衡による地盤沈下や崩壊
- ② 土圧シールドの排土口やテール部からの噴發に伴う地盤沈下や崩壊
- ③ 発進、到達時や連絡坑の築造時の立坑などへの異常出水
- ④ シールドの胴締め現象による掘進困難

図-1 シールドまたは推進工事におけるトラブルのイメージ図



- ⑤ カッターなどの摩耗や破損
- ⑥ 掘進機のローリングや掘進精度不良など

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ことがあり、切羽圧の不均衡が生じる。同様に、細砂地盤や軟弱粘土では、僅かな切羽圧の不均衡や取り込み過多によって、地盤の崩壊やそれに伴う沈下が発生する。対策としては、適正な加泥材の注入や高濃度・高比重泥水の使用、および慎重な切羽圧管理をすることが有効である。

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に、チャンバー内の掘削土の混練り攪拌が不十分な場合や、異物を取り込んだ場合に排土口から噴発することがある。また、テールの止水が不十分な場合に、トンネル内に湧水が発生することもある。また、切羽下部が大礫層または岩盤

で上部が砂層などの Mixed Face 地盤の場合は、上部砂層が攪乱されて崩壊、陥没に至る場合が多くみられる。泥水シールドでも大礫を取り込んだ場合には、管内閉塞により泥水圧の変動が生じ、取込み過剰による陥没が生じる場合がある。これらの対策として、適正な加泥材注入や排土方法の採用などが考えられる。

発進、到達部などには、JGP、薬液注入や凍結工法等で地盤改良をするのが一般的であるが、地盤改良不良やシールドによって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、厳密な施工管理とともに十分な止水確認を行い、必要に応じた追加地盤改良の実施が有効である。

以上のように、細砂や礫地盤において地下水の湧水を伴うトラブルが発生すると、それが拡大して大量出水となり、大規模陥没を起こすリスクが

大きいので、確実な止水とその確認の実施が重要である。

一方、均等係数の小さい砂地盤中をシールド掘進するときに、砂が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胴締め現象による掘進トラブルがよく見られる。対策としては、余裕のある掘進推力をマシンに装備するとともに、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、大礫地盤に遭遇する場合、土砂用のティースカッターでは欠落や破損または過度の摩耗が生じて掘進不能に陥ることがある。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し、必要に応じてカッター交換をすることが必要である。

## 4 トラブル事例からの教訓とその回避に向けて

トラブル事例からの教訓として、概して事前の地盤調査が少ないことがある。地下工事における地盤調査では、自然地盤の不均一性や複雑さを考慮して、三次元的な地盤のプロファイルを把握することが重要であり、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することが必要である。

調査方法として、一般的なボーリング調査だけでなく、連続サンプリングによるコア観察、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。また、地盤調査だけでなく、地中障害物調査、メタンガスなどの可燃性ガスや地下水の水質調査、地下水保全のための環境調査なども必要である。同様に、施工中においても、地盤リスクを減らすために、適宜、追加地盤調査と現場計測工法により工事の安全性を高めることが重要である。

一方、工事関係者の技術不足や余裕のないギリギリの設計、施工計画が原因で発生するトラブルも増加している。特に、地下工事は地盤を対象とするため、想定地盤と実地盤の相違、トラブルの大きさや湧水の怖さの認識、あるいはどの施工法が地盤に適した方法であるかを把握するには十分

な経験と技術の蓄積が必要となる。

また、地下工事では複雑な地盤に対し、JGP工法、機械攪拌工法、薬液注入または凍結工法による地盤改良を行うことが多いが、トラブルを回避するためには、各々の地盤改良工法が対象地盤や施工条件に十分な適応性があるかの認識と地盤改良効果を常に確認することが非常に重要となる。

## 5 おわりに

日本では、この約20年の間に建設工事が減少しており、若手技術者が大規模地下工事や複雑な工事に従事する機会が減少してきた。同時に、戦中・戦後生まれの経験豊富な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都市土木技術の現場技術者への伝承が十分されているとは言えず、発注者、建設会社およびコンサルタントの工事に対する安全性や品質に関する技術が低下しているように思われる。

したがって、地下工事のトラブルリスクを減らすためには、無人掘削機などのAIを含めた新技術の開発も必要であるが、技術者がトラブル事例を再度学び知識化するなどの技術の研修を図ることが重要と考える。また、トラブル事例からの教訓などの得られた知識を自分のものとすることは、今後もインフラ整備が旺盛なシンガポール、ベトナム、インドネシアなどの軟弱地盤が多いアジアの国々へ発信し、現地の建設プロジェクトに参画するのに良い機会であると考える。

### 〈参考文献〉

- 1) (公社)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委員会報告書、2013年3月
- 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 (649)、pp.63-70、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.