研　究

流動化しやすい砂地盤をシールド掘進する際の諸問題と留意事項

―微細砂地盤を対象とした地下鉄工事を例にして―

大阪市高速電気軌道(株)交通事業本部工務部工務課長
南　川　真　介
大阪市高速電気軌道(株)交通事業本部工務部土木課係長
中　西　　平
(株)地域地盤環境研究所技術統括室室長
譽　田　孝　宏

1　は　じ　め　に

近年，都市部のシールド工事において，細粒分が少量で均等係数が小さく，小さい水頭差でも流動化しやすい細砂などの地盤(以下，「微細砂地盤」)でトラブルの発生するケースが増えている．このような砂層は，杭基礎の支持地盤として安定しているよく締まった土層でありながら，シールド掘進に伴う応力変化によって周辺地盤が容易に崩壊し，場合によっては陥没事故に至ることがある．大阪地盤では，更新世(約300万～30万年前)の堆積層である大阪層群砂層やその上部にある洪積砂層が微細砂地盤に相当し，この層をシールド掘進した地下鉄工事においていくつかの重大なトラブルが生じ，掘進が困難になる事例が発生している[1),2)]．

後述するようにこのような砂層は，堆積地盤に立地する国内各地で見受けられることから，地下鉄工事を例にして，トラブルが発生しやすい砂層の特性と，シールド掘進時のトラブル事例やその対応について整理し，国内の類似地盤でシールド掘進する際の参考になるよう，留意事項を示す．

2　微細砂地盤の堆積特性

砂，礫，粘土などの河川による堆積物は，**図-1，2**に示すように堆積時の表層地形に依存して河川

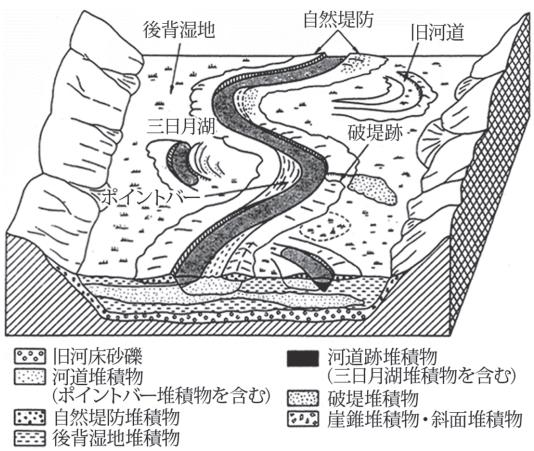


図-1　氾濫原地帯の模式図[3)]

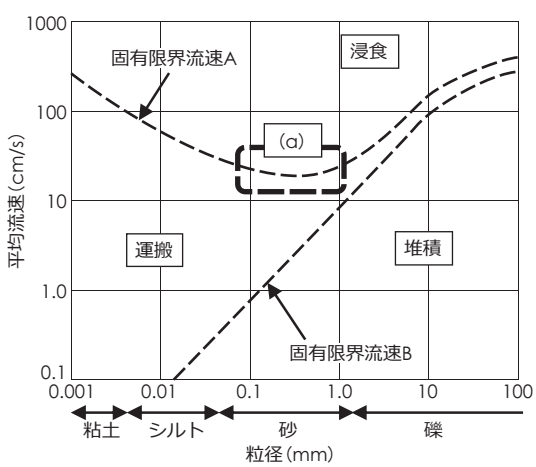


図-2　堆積粒子の浸食，運搬，堆積の関係を現すユールストロームダイアグラム[4)]に加筆

流速などの諸条件によって堆積環境が決まる．例えば，図-2の固有限界流速Aよりも上部の領域は，堆積していたものが運搬や浸食される領域であり，図中の領域(a)は，水の流速が速くなることによって，砂粒子が粘土やシルト，礫よりも早く，最初に動き出す領域を示している．その後，流速が遅くなると，流動化していた砂粒子は運搬され，やがて堆積する．

大阪平野の場合，**表-1**に示すように深い所で千数百mの厚さを有する大阪層群と呼ばれる砂，礫，粘土層が，気温変動に伴う海退(氷河期)や海進(間氷期)により互層状にくり返して堆積している．このうち粘土層は，海底で堆積したものは海成粘土，河川により堆積したものは非海成粘土と呼ばれる．一方，流れの緩い河口などで堆積する砂は，これらの粘土層の上下に見られる場合が多く，長周期の水流変化から浸食，運搬，堆積をくり返して形成され(図-2参照)，粒径がそろっていることが特徴的である．

表-1　大阪平野の層序総括表[5]

時代			層序区分		テフラ	×10⁴y.B.P 放射年代	海水面変化	気候変化	地形発達史
第四紀	完新世		沖積層	上部層		0.2	海進(縄文海進)	温暖	沖積低地の形成
	更新世	後期		中部粘土層	横大路火山灰層(アカホヤT.)	0.7			
				下部層	港火山灰層	1.0			
			上部洪積層	天満層	鬼怒川火山灰層	2.0	海退	寒冷	埋積地形面(低位段丘の形成)
				Ma12層	平安神宮火山灰層(アイラT.)		海進	温暖	中位段丘の形成
				砂・礫・粘土層		10	海退		
		中期		Ma11層			海進		(?)高位段丘の形成
				砂・礫・粘土層					
			大阪層群	Ma10層	八田火山灰層				
				Ma9層	和田火山灰層	34			
				Ma8層					
				Ma7層	カスリ火山灰層				
				Ma6層			海退と海進のくりかえし		
				Ma5層	八町池火山灰層				
				Ma4層	狭山火山灰層	77			丘陵地を形成する地層
				Ma3層	アズキ火山灰層				
				Ma2層	ピンク火山灰層				
				Ma1層	イエロー火山灰層				
		前期		Ma0層		106			
				Ma-1層					

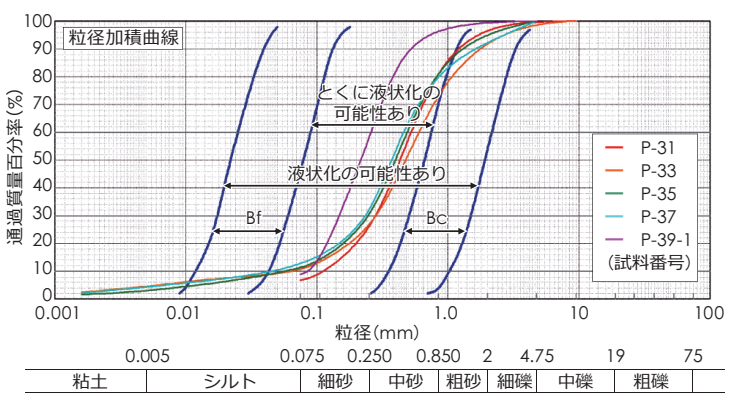


図-3　流動化しやすい砂層の範囲を示した粒径加積曲線例[7]に加筆

大阪層群砂層は，一般的にはよく締まった砂層であり，構造物基礎の支持力が期待できる層である．しかし，トラブルを起こしやすい砂層は，細粒分含有率F_c≦10%，均等係数U_c≦5，透水係数k≧1×10^{-5}m/sのものが多く，限界動水勾配がi_c=1程度の地下水流によって容易に流動化する地盤であることが知られている[例えば6)]．

例として，地下鉄今里筋線(第8号線)鴫野シールド(蒲生四丁目停留場～鴫野停留場，2004(平成16)年4月～2005(平成17)年4月施工)での粒度試験結果と「液状化の可能性のある土の粒度分布[7)]」を重ね合わせた粒径加積曲線を**図-3**に示す．大阪層群砂層における粒度試験結果は，細砂区分で急激に粒度分布が立ち上がる特徴を有しており，「とくに液状化の可能性あり」の範囲内に位置している．よって，このような砂層は，応力変化に伴って流動化して崩壊しやすい土層，つまり微細砂地盤であることがわかる．

3　微細砂地盤でのシールド工事におけるトラブルの概要[8]

3-1　スクリューコンベヤからの噴発に伴う切羽地盤の崩壊

均等係数が小さい砂地盤を泥土圧シールドで掘進する際に掘削土の塑性流動性が悪い場合，カッタチャンバ内に掘削土が充満および加圧されてい

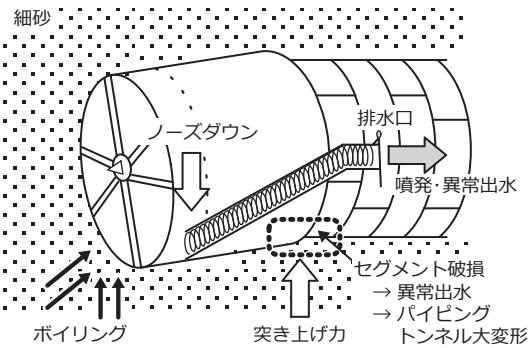


図-4　排土時の噴発に伴うトラブル例[8)]

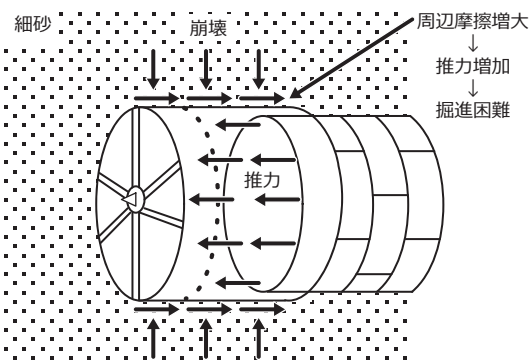


図-5　シールド掘進時における胴締め現象[8)]

ても連続的な掘削土の排出ができないため，スクリューコンベヤを回転して排土しようとしてもスクリューコンベヤの入口でアーチアクションが働いて土砂に空隙が生じ，ここに地下水が浸入して排土口から流砂を伴って噴発することがある(**図-4**参照)．噴発が激しい場合，切羽前面の地盤が大きな浸透圧を受けて流動化(文献8)ではこれを「ボイリング」と称している)することによりノーズダウンが発生し，過度な場合にはテールの突き上げに伴ってセグメントが破損し，土砂が流入してトンネル直上地盤が陥没する場合もある．

3-2　胴締め現象による掘進困難

砂地盤をシールド掘進時にシールドの胴締め現象などのトラブルがよく見られる．胴締め現象とは，シールド掘進中の振動やせん断変形，高水圧などによってシールド周辺の砂粒子が再配列されることにより，シールドと周辺地盤間の摩擦抵抗が上昇し，掘進困難となる現象である(**図-5**参照)．場合によって，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．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おり，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．

4　過去のトラブルとその対応事例

4-1　京橋シールド[9)]の事例

地下鉄長堀鶴見緑地線(第７号線)京橋シールド(京橋停留場～蒲生四丁目停留場，1987(昭和62)年12月～1989(平成元)年３月施工)の土質縦断図を**図-6**に示す．

本工事は，シールド外径5,430mmの単線並列トンネルであり，泥水式シールド工法を採用し，裏込め注入は同時裏込め注入方式であった．

シールド掘進延長約1,530mのうち，京橋停留場から発進後の区間中央部付近において，上部洪積砂質土層(DLs-3層)を掘進した．この層は，細砂～中砂を主体とする層厚２～７mの洪積砂層(一部に粘土層や砂礫層を挟む)であり，N値が50以上の非常によく締まった状態で透水性が良く，細粒分含有率F_cは８～10%，均等係数U_cは9.3～26である．また，トンネル深さでの水頭は200kPaであった．

後行シールドがDLs-3層を掘進中に，推力やカッタトルクが上昇し，掘進停止が発生した．コピーカッタを用いた余掘りによって対応したが，縦断線形が下り勾配から上り勾配に変化する箇所から推力が上昇し始めてシールド姿勢制御が困難になり，計画縦断線形になるまで上向きに上げられなくなった．

カッタトルクの異常上昇がないことから，不具合の原因は，シールドと周辺地盤(DLs-3層)の間の周面摩擦が大きいことに起因して，推力が上昇したためと考えられた．実際に排泥された土砂を分析すると，均等係数U_cが２前後の細砂であったことから，シールド掘進中の振動やせん断変形および高水圧などにより，砂粒子が再配列され，胴締め現象が発生したと推測された．

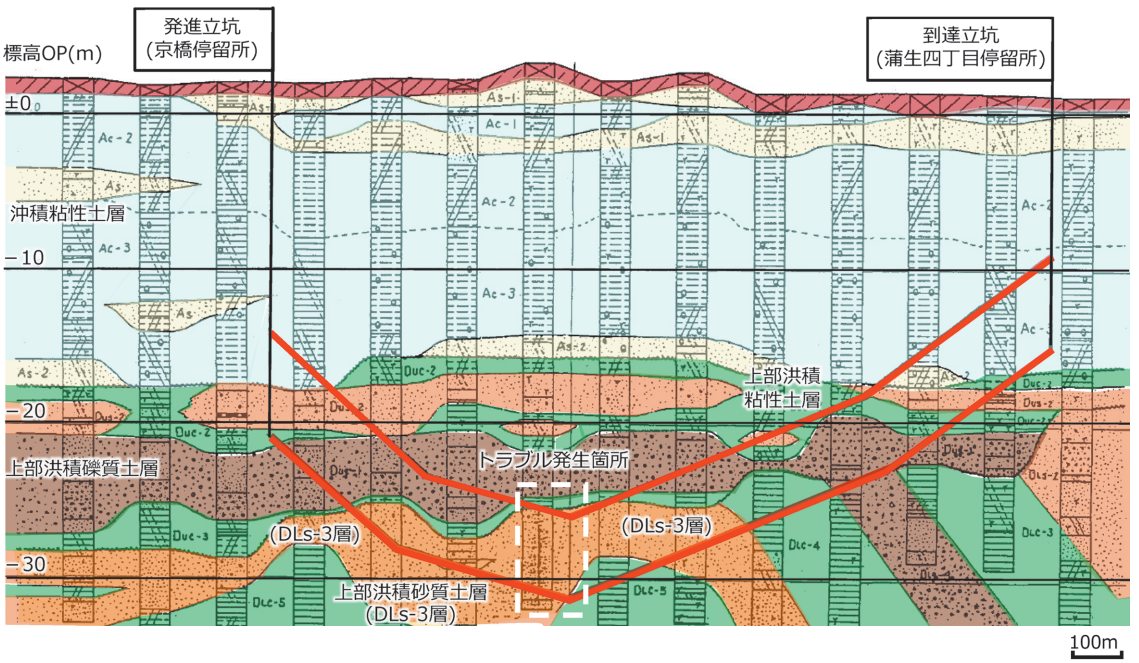


図-6　京橋シールドの土質縦断図[9]

蛇行修正を行うため，シールドジャッキに加えてシールド装備のけん引ジャッキ(30t)と増設したジャッキ(60t×2本)によって，シールドの上向き修正を実施した．その結果，対策後22リングで計画縦断線形に回復することができた．

4-2　上町シールド[10]の事例

地下鉄長堀鶴見緑地線上町シールド(谷町六丁目停留場～玉造停留場，1995(平成7)年1～10月施工)の平面図および土質縦断図を**図-7**に示す．

本工事は，単線並列トンネルであり，シールド外径5,440mmの泥土圧シールド工法を採用しており，裏込め注入は同時裏込め注入方式，掘削土砂の搬出はずりトロ方式であった．

掘進延長約980mのうち，谷町六丁目停留場から発進後，約450m区間はほぼ全断面が大阪層群砂層(Os8層)であった．本層は，細砂や粗砂を主体とする層厚8～10mの砂層であり，N値は60以上を示す非常に締まった状態にあった．なお，細粒分含有率F_cは7～27%(平均14%)，均等係数U_cは6.2～117(平均24.1)，地下水位はシールドクラウン付近にあり，低水位であった．

シールドが発進して間もない箇所において層別沈下計を中心とした地盤変状計測(以下，「トライアル計測」)を2断面で実施した結果，計測断面1では，切羽圧＝88kPa(緩み土圧相当)で掘進したが，切羽前沈下や通過時沈下はほとんどなく，テール通過時にトンネル直上1m地点で約3mmの沈下が発生する程度であった．そこで計測断面2では，シールド掘進効率を考慮して，切羽圧＝39kPa(水圧相当)まで低下させて掘進したところ，切羽到達付近まで微小な沈下であったが，切羽通過後，約1リングの間にシールド直上1m地点で約50mmの沈下，テール通過後にさらに約30mm程度の沈下が発生し，合計80mmに達した．

シールド直上3m地点および地表面での沈下量は微小であったこと，計測断面での裏込め注入率は169%とやや過大であったこと，後行シールド通過時の沈下はほとんどなかったことを踏まえると，切羽付近において局部的な地山崩壊が発生したと考えられる．

トライアル計測の結果を踏まえ，その後の掘進時の切羽圧は，周辺地盤への影響を極力抑える緩み土圧相当の切羽圧(88kPa)と水圧相当の切羽圧(39kPa)の中間値(64kPa)に設定した．また，裏

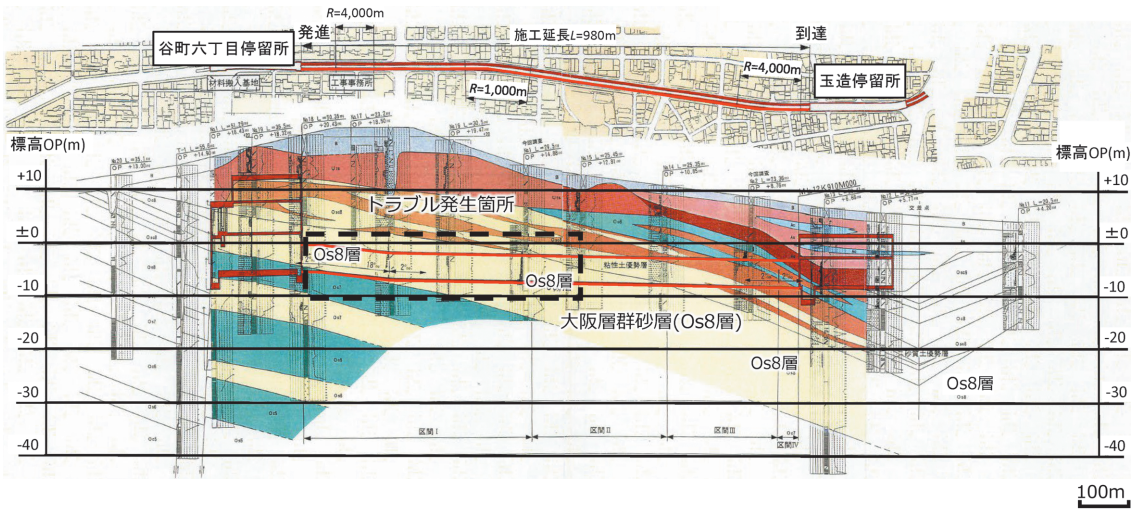


図-7　上町シールドの平面図および土質縦断図[10)]

込め注入率が130～150%の場合には地盤変形が抑制できていることを踏まえ，裏込め注入圧の管理だけではなく，裏込め注入率の変動も確認しながら掘進した結果，地盤沈下もなく掘進できた．

5 微細砂地盤を掘進する際の課題と対応

地下鉄長堀鶴見緑地線シールド工事で発生したトラブル事例を踏まえて，**図-8**にその発生概要を整理した．

泥土圧シールド工法は，必要に応じて添加材を注入しながらカッタヘッドによって地山を掘削し，塑性流動化(泥土化)した土砂をカッタチャンバ内に充満させて所定の圧力を加えることによって切羽の安定を図るとともに，同じく塑性流動化した土砂で充満したスクリューコンベヤを用いた排土量管理によってシールドの掘進に見合う土量を連続排土する工法である[11)]．よって，掘削に際しては，切羽と隔壁間に充満した掘削土砂を切羽の安定に必要な状態に加圧し(塑性流動化の管理)，切羽圧(カッタチャンバ内の泥土圧)や排土量の計測を実施し(泥土圧の管理，排土量の管理)，スクリューコンベヤの回転数や掘進速度を制御しながら(掘進速度などの管理)，カッタトルク，推力などを把握して，適正な掘進管理を実施しなければならない[12)]．

【微細砂地盤をシールド掘進した際のトラブル事例】
①カッタチャンバ内や土砂圧送管の閉塞に見られる排土障害
②砂層の流動化や小崩落に伴う限定的な地盤変形
③胴締め現象
④カッタビットやスクリューコンベヤの摩耗

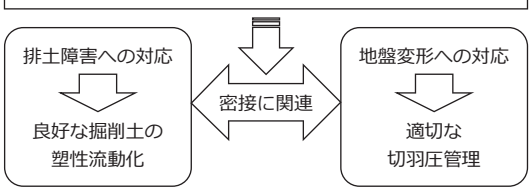


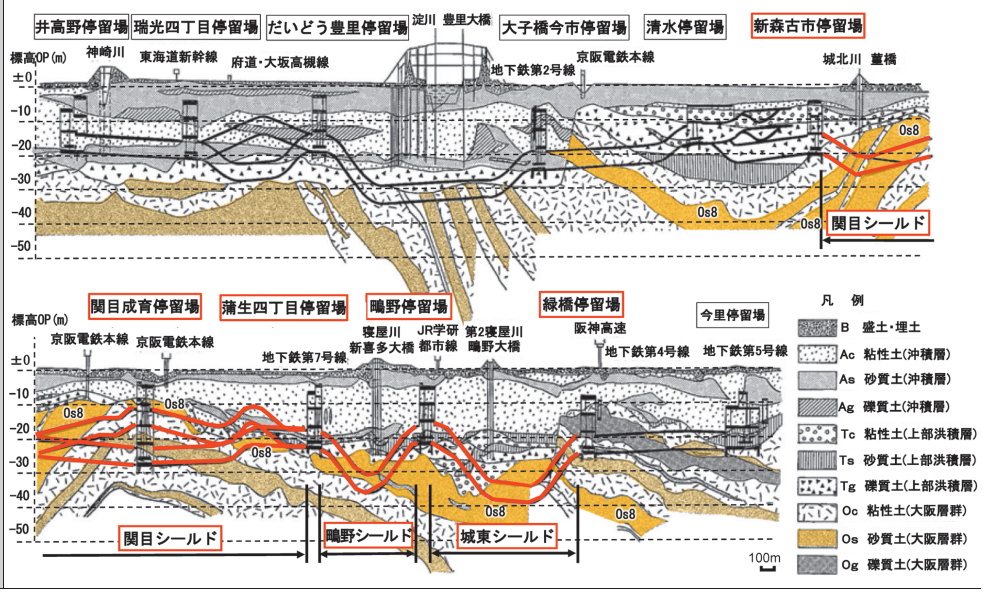
図-8　微細砂地盤をシールド掘進した際のトラブル発生概要

過去に砂層中を掘進する際によく見られたが，カッタトルクや推力が増加してそれらの上限値を超過した場合，掘進速度は上昇せず遅くなり，スムーズな裏込め注入ができなくなったり所定の掘削線形の確保が難しくなったりする．よって泥土圧シールドの場合，文献12)の切羽安定管理フローにもとづいて，切羽圧と添加材の選定を見直す方法が合理的である．ただし，微細砂地盤では，一般的な切羽安定管理フローでは解決しきれない問題があることを念頭において，「掘削土の塑性流動化」と「切羽圧(泥土圧)の管理」を重要課題として対処する必要がある．

長堀鶴見緑地線のあとに建設した今里筋線シールド工事では，大阪層群砂層やその上部の洪積砂層における過去の施工実績やトラブル事例を踏ま

Research

表-2　各シールド諸元と大阪層群砂層との位置関係

トンネル名	鴫野シールド*1	城東シールド*2	関目シールド*3
工　　法	泥土圧シールド工法		
シールド外径	φ5,330mm		φ5,440mm
シールド機長	7,010mm（中折れ１段）	7,018mm	7,350mm（中折れ１段）
掘削土砂搬送	密閉式土砂圧送方式		
土質縦断図			

＊1　鴫野シールド：蒲生四丁目停留場～鴫野停留場，2004(平成16)年４月～2005(平成17)年４月施工.
＊2　城東シールド：鴫野停留場～緑橋停留場，2004(平成16)年７年～2005(平成17)年７月施工.
＊3　関目シールド：新森古市停留場～関目成育停留場～蒲生四丁目停留場，2003(平成15)年12月～2005(平成17)年３月施工.

え，各現場で発生した事象に対してそれぞれ対応した結果，大きなトラブルは発生しなかった．

ここでは，**表-2**に示す「鴫野（しぎの）シールド」「城東シールド」「関目シールド」における掘進事例について示す．

5-1　掘削土の塑性流動化対策

対象とした３現場では，土砂圧送ポンプの圧力上昇のため圧送不能に陥るケースが見られた．これは，砂分が分離して排泥管内の隅角部によく締固まった細砂が残留することによる排泥管内の閉塞が原因であった．

いずれのシールド工区においても，掘進当初は多くの実績がある高分子系添加材のみを用いていたが，結果として掘削土の塑性流動化が不十分となり，排泥管内で閉塞を引き起こしている．そこで，添加材を再検討した結果，大阪層群砂層の中でも，とくにOs8層のような微細砂地盤では，ベントナイト系添加材を主体にした方が，ブリーディングの発生(砂分の分離)が抑制され，より適した状態となることが確認された．

ただし，ベントナイト系添加材は，掘削残土(おおむね産業廃棄物)の処理が困難になり，大きなプラント設備が必要になるなどの問題点がある．よって，掘進状況を監視しながら，ベントナイト系添加材だけではなく，他の添加材を追加配合するなどの柔軟な対応が可能となる計画や施工が望まれる．そのためには，ボーリング調査によって事前に掘進対象地盤の特性を把握するとともに，採取した土を用いた配合試験を実施し，適正な添加材を選定することを推奨する．

5-2　切羽の安定確保

文献12)では，「切羽圧が不足すると，切羽での湧水や崩壊が生じる危険性が大きくなり，過大になるとカッタトルクや推力の増大，掘進速度の低

下，あるいは地表面の隆起などの弊害が懸念される.」と記載されている．つまり，カッタトルクや推力の増大を避けるためには，切羽圧を下げる方法も有効な手段の一つとして考えられる．

切羽圧は，基本的に「土圧＋水圧＋変動圧」で構成され，まず，この中の「変動圧」を抑えることが効果的である．これには，前節で示したカッタチャンバ内において掘削土の塑性流動化を図ることが重要である．切羽圧の基本的な考え方は，以下のとおりに設定した．

・上限値：「静止土圧＋水圧＋変動圧」
・下限値：「主働土圧＋水圧＋変動圧」

地盤変形を抑制することを最優先に考えるのであれば，切羽圧を静止側圧相当(上記の上限値相当)にすることが理想的である．また，下限値に主働土圧ではなく緩み土圧で設定することも考えられるが，ここでは，緩み土圧よりも大きい切羽圧として主働土圧とした．

砂質地盤の場合，切羽圧を下限値に設定するケースが多いが，微細砂地盤内を掘進する場合にはそれでもカッタトルクや推力が異常に上昇し，掘進困難になる場合がある．

そこで，今里筋線シールドの一部では，主働土圧算定時において，地盤の強度パラメータを適切かつ慎重に評価したうえで，主働土圧を設定してシールド掘進した．

主働土圧は，一般的に(1)式に示すRankine土圧より求めることが多く，土の内部摩擦角ϕと粘着力cにより算定できる．

$$p_A = \sigma'_v K_A - 2c\sqrt{K_A} \quad (1)$$

ここで，

p_A ：主働土圧(kPa)
σ'_v ：着目点での有効上載荷重(kPa)
c ：土の粘着力(kPa)
K_A：主働土圧係数

$$K_A = \tan^2(45° - \phi/2) \quad (2)$$

(1)式に示す主働土圧の算定式を踏まえ，良好な掘進を確保することを目的に切羽圧を再設定したが，そこで用いた内部摩擦角ϕと粘着力cの考え方を以下に示す．

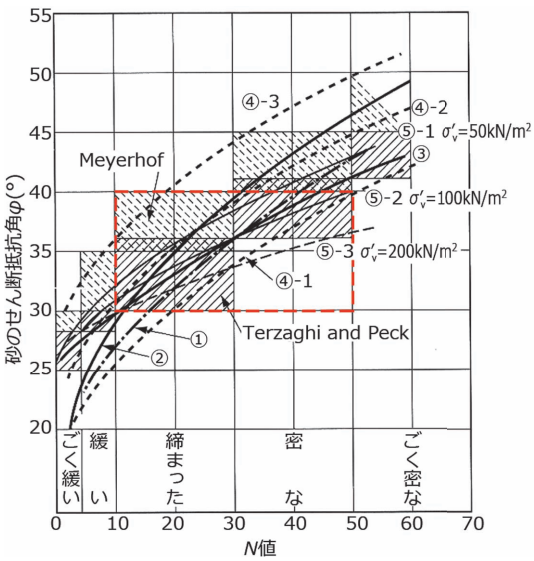


図-9　砂の内部摩擦角φとN値の関係[13)]

5-2-1　Os8層の内部摩擦角の設定

Os8層は微細砂地盤であることから，崩れやすいことを考慮してϕを小さく設定する場合がある．一方，**図-9**に砂の内部摩擦角ϕとN値の関係を示しているが，締まった砂～密な砂はおおよそϕ=30～40°の範囲(図-9の赤色破線領域)にあると考えると，(2)式よりK_A=0.33～0.22が得られることから，設定可能な主働土圧はある程度幅を有していることがわかる．

よって，切羽圧の変動を極力抑制し，切羽の安定を図ることを条件に，よく締まった砂の内部摩擦角ϕを適切に評価して切羽圧を低く見積もることは，設定する切羽圧の低減に向けた一つの方策であると言える．

5-2-2　Os8層の粘着力の設定

洪積砂層や洪積砂礫層の場合，一般的によく締まって固結していたり，細粒分を少量含んでいたりすると，少しだけ粘着力が期待できる場合がある．例えば，長堀鶴見緑地線の森ノ宮停留場の土留め掘削構内からOs8層の砂を凍結ブロックサンプリングし，三軸圧縮試験(CD条件)をした結果，粘着力c=23kPaを確認している(同試料の細粒分含有率F_c=17.8%)．

よって，切羽圧の変動を極力抑制し，切羽の安

定を図ることを条件に，細粒分を少量含む砂の粘着力cを(1)式の第2項で考慮することは，設定する切羽圧の低減に向けた一つの方策であると言える．

以上を踏まえ，対象とした3現場において実施した切羽の安定を確保した例を**表-3**に示す．

何度も強調するが，切羽通過時までに周辺地山を極力緩ませないことがもっとも重要であり，必要以上に切羽圧を下げることは切羽の安定性を図るうえでは大変危険である．また，胴締め現象が発生した場合に過度な余掘りをすることは，かえって状況を悪くしてしまう危険性があることから，これらの方策を検討する場合には十分な注意が必要である．

5-3 胴締め現象の防止

4章で示したような砂層でのシールド掘進において，シールドが周辺地盤に締め付けられたことによって胴締め現象が発生していることを踏まえて，今里筋線シールド工事では，以下に示す対応により胴締め現象の回避に努めた．

5-3-1 過度な余掘りの防止

一般的にシールドは，掘削外径がシールド外径よりも2～4 cm程度大きく計画されるため，1～2 cm程度余掘りされたような恰好になるが，テール部で裏込め注入されるまでこの余掘り部は放置されることになる．Os8層のような地盤を切羽通過までに緩ませてしまうと小崩落を誘発してしまい，1～2 cm程度のはずのスキンプレート周辺の余掘り部分に流動化した細砂が回りこみ，再び締め固まって胴締め現象が発生する．よって，このような地盤で掘進をする場合には，過度な余掘りにならないように掘削外径を計画することが重要である．

5-3-2 外周充填材の有効利用

スキンプレート部と周辺地盤の摩擦を低減する対策として，シールド前胴周囲に装備した注入孔

表-3 大阪層群砂層(Os8層)掘進時のトラブル例および切羽の安定確保例

シールド名	大阪層群砂層(Os8層)掘進時の状況
鴫野シールド	① Os8層掘進時において推力やカッタトルクが上昇し，掘進速度が徐々に低下したことから，添加材の配合濃度を高めたが，土砂圧送ポンプ付近で掘削土が固まって残留し，閉塞気味となった．添加材濃度を高めたにもかかわらず，塑性流動性は不十分であった． ② この際の切羽圧の管理値は，「主働土圧＋水圧＋変動圧(20kPa)」であった．掘進停止中の切羽圧保持を停止して切羽の均衡状態を確認したところ，変動圧程度を減じた土圧であったため，一時的に切羽圧を変動圧(20kPa)程度減じて「主働土圧＋水圧＋変動圧(0 kPa)」に変更して掘進を再開したところ，閉塞気味の状態は免れた．なお，この切羽圧の低下量は，主働土圧係数算定時における内部摩擦角ϕや粘着力cの大きさに換算すると，当初「ϕ=35°，c=0 kPa」の想定が，「ϕ=43.6°，c=20kPa」に変更する程度であった． ③ 切羽圧を若干下げて掘進した結果，カッタチャンバ内の土砂の塑性流動性が改善して安定した掘進管理が行えたことから，Os8層用に添加材を変更することなく，適宜切羽圧を変更した． ④ この間の沈下量は，通過1D後(D：シールド掘削外径)における直上1 mで2～6 mm，地表面で約2 mm程度であり，安全に施工することができた．
城東シールド	① Os8層が出現し始めたころからカッタトルクが上昇し，掘進困難な状況になり，最終的には排泥管の閉塞のため掘進不能になった．圧力が上昇したポンプの後方配管を解体したところ，圧縮・脱水された細砂によって排泥管が閉塞していた． ② この際の切羽圧の管理値は，「主働土圧＋水圧＋変動圧(10kPa)」であった．閉塞解除後，切羽圧は変更せずに添加材を変更してカッタチャンバ内の塑性流動化を図って掘進を再開した． ③ その結果，この間の沈下量は，通過1D後における直上1 mで5～7 mm，地表面で約1 mm程度であり，安全に施工することができた． ④ その後，Os8層掘進区間において再度掘進が困難となったことから，管理する切羽圧の下限値を見直した．つまり，主働土圧係数算定時における内部摩擦角ϕや粘着力cについて，当初「ϕ=35°，c=0 kPa」の想定を「ϕ=42°，c=20kPa」に変更した切羽圧を下限値とした土圧管理を適宜，採用した．その結果，安定して掘進することができた．
関目シールド	① Os8層が主体となる付近から排土の流動性が徐々に低下し(シルトミキサーで目視監視)，カッタトルクが徐々に上昇した． ② 添加材を変更することによって改善傾向も一時的に見られたが，突然，圧送ポンプの油圧が上限まで上昇し，圧送不可能となった． ③ 閉塞した土砂を取り出し，添加材の適合試験を実施し，適宜，添加材を変更した結果，安全に施工することができた．

より充填材(高粘性添加材)を外周部分に充填する方法がある．この方法は，掘削外径とシールド外径の差に起因するシールド通過時における沈下を抑制する対策としても期待できる．鳴野シールドでは，外周充填材を掘削外径とシールド外径の差から算出した体積に対して100%の注入率で積極的に注入した結果，胴締め現象が発生せず，総推力の低下効果があったと考えられる．

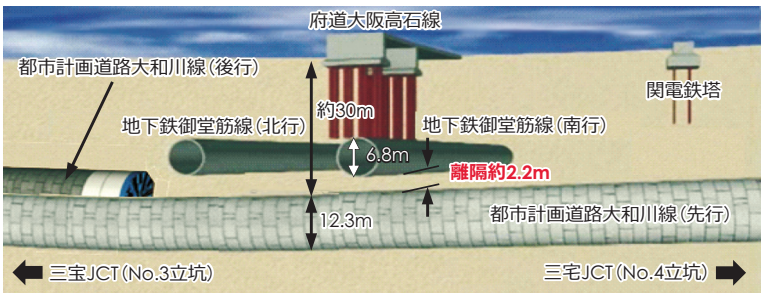


図-10　御堂筋線交差部付近の縦断面図

6　地下鉄営業線直下における大断面シールドの超近接施工時の対応例[14)]

ここでは，過去の地下鉄シールド工事の実績を踏まえ，類似した洪積砂層内を大断面シールドで掘進する際の掘進管理計画を策定し，安全確実にトンネルを構築した事例について示す．

6-1　大和川線シールドの工事概要

大阪都市再生環状道路の一環となる都市計画道路大和川線のうち，地下鉄御堂筋線(以下，「御堂筋線」)との交差部において，営業線直下を近接して大断面泥土圧シールド(以下，「大和川線シールド」，2015(平成27)年1～3月先行シールド施工，2016(平成28)年5～6月後行シールド施工)が下越しUターン施工する計画であり，影響する区間の施工を大阪市交通局((現)大阪市高速電気軌道(株))が，事業主体である堺市より受託した．その位置関係を**図-10**に示す．

本工事の特徴を以下に示す．

① 大断面(シールド外径ϕ12,540mm)かつ，併設する新設トンネル間の離隔が約1.3～2.2mという近接施工となる．

② 単線並列の地下鉄営業線トンネル(セグメント外径6,800mm)直下を，離隔約2.2m(0.17D)で大和川線シールドがUターンして下越し通過する．

③ 御堂筋線の建設時(1987(昭和62)年開業)と今回も確認された微細砂地盤がシールド上半部に存在する．

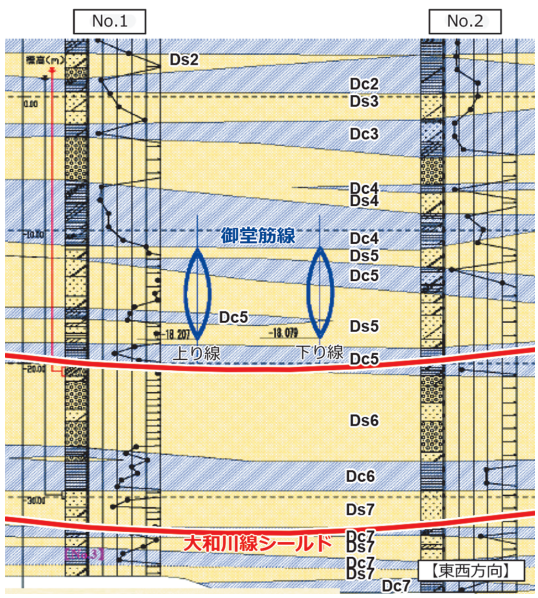


図-11　御堂筋線交差部付近の土質縦断図

6-2　大和川線シールド掘削対象土層の概要

御堂筋線交差部付近の土質縦断図を**図-11**に示す．地表付近から洪積砂層と洪積粘土層が互層状態に堆積しており，御堂筋線下端部と大和川線シールド上端部の間には，上部より洪積砂層(Ds5層)，洪積粘土層(Dc5層)，洪積砂層(Ds6層)が堆積している．

このうち，Ds5層とDs6層は，N値が60以上のよく締まった砂・砂礫層であるが，大和川線シールドの上半に存在するDs6層は，均等係数が小さく(最小U_c=8.2)，微細砂やシルトが薄く挟在している．

また，透水係数は$k=1\times10^{-4}$～10^{-5}m/s程度で地下水は豊富であり，過去には近傍で泥水式シールド工事による逸泥により，地上まで影響が及んだ

事例もある崩壊性の高い砂層である．

6-3　シールド掘進管理計画

シールド掘進による御堂筋線への影響を最小限に抑制する必要があるため，大断面切羽の安定，シールド通過時の沈下防止，同時裏込め注入の適正管理などを掘進管理計画時において重点的に考慮した．なお，掘削土砂の搬出は連続ベルコンであった．

6-3-1　切羽管理

御堂筋線との近接施工であったことから，切羽圧の管理値は下限値を「静止土圧＋水圧＋変動圧」に，上限値を土かぶり圧に設定した．なお，大断面トンネルであることからトンネル上下間の圧力差が100kPa以上あるため，チャンバ内に10か所設置した土圧計を活用し，上部の土圧計を正，中央部の土圧計を副として切羽圧を管理した．

6-3-2　シールド通過時の対策

隣接工区の施工実績やトライアル計測における沈下量のうち，シールド通過時における沈下の割合が大きかった．また，推力は，掘進初期から装備推力144,000kNに対して70～90％で推移し，一時は100％近くに達するなど，胴締め現象が見られた．これらシールド通過時の沈下抑制と胴締め現象の対策（シールド周面摩擦の低減）のため，シールド前胴の切羽から3.0mと4.5mに位置する外周部に設置した注入孔を用いて，最大8か所からシールド外周部に対して充填材（高粘性添加材）を積極的に注入した．

6-3-3　同時裏込め注入管理

大断面シールドであるためテールボイドも120mmと大きく，また，余掘りもあるため，確実にテールボイドを充填し，セグメントと地山を早期に固定する必要があった．よって裏込め注入材は，早期に強度発現する2液型瞬結性のエアー入り（A液におけるエアー比率15％）を使用した．事前に実施した配合試験の結果，45分養生での一軸圧縮強度は，加圧養生した場合，大気圧下で養生した場合の約2倍（0.3N/mm^2）となり，十分な強度が発現することを確認した．また，裏込め注入圧は「切羽圧＋（100～200kPa）」で管理した．

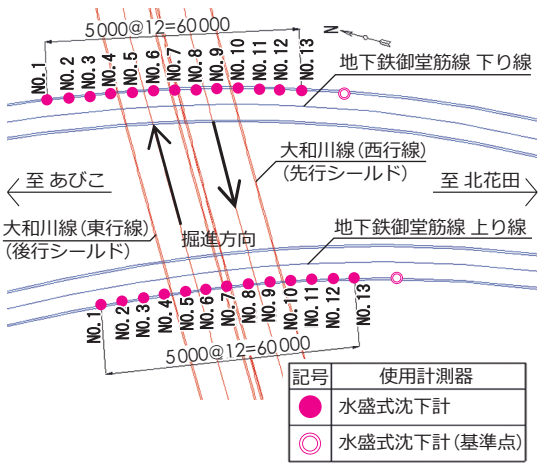


図-12　水盛式沈下計配置図

6-4　計測管理と施工結果

御堂筋線トンネル内には水盛式沈下計を設置し，自動計測を行った（**図-12**参照）．影響範囲における切羽圧と御堂筋線トンネルの鉛直変位量の推移を**図-13**に示す．

6-4-1　先行シールド

計測データを確認しながら切羽圧を細かく制御して掘進した結果，御堂筋線トンネルは隆起挙動を示し，そのピークは下り線の計測NO.8とNO.9で2.1mm，上り線の計測NO.9で1.7mmとなった．上下線とも，鉛直変位量の大半は先行隆起が残留したものであり，顕著な通過時沈下やテールボイド沈下は見られなかったことから，シールド外周充填および裏込め注入の効果が発揮できたと考えられる．

6-4-2　後行シールド

後行掘進では，さらに切羽圧をリアルタイムに微調整しながら掘進した結果，御堂筋線トンネルの変位量は掘進するシールドにもっとも近い上り線の計測NO.6で0.7mmの隆起，下り線の計測NO.5とNO.6で0.7mmの隆起であり，先行と比較してもさらに小さく抑制できた．

7　おわりに

大阪層群砂層やその上部にある洪積砂層は，よく締まって堅固ではあるが，細粒分が少なく粒径がそろった均等係数の小さい細砂層が部分的に挟

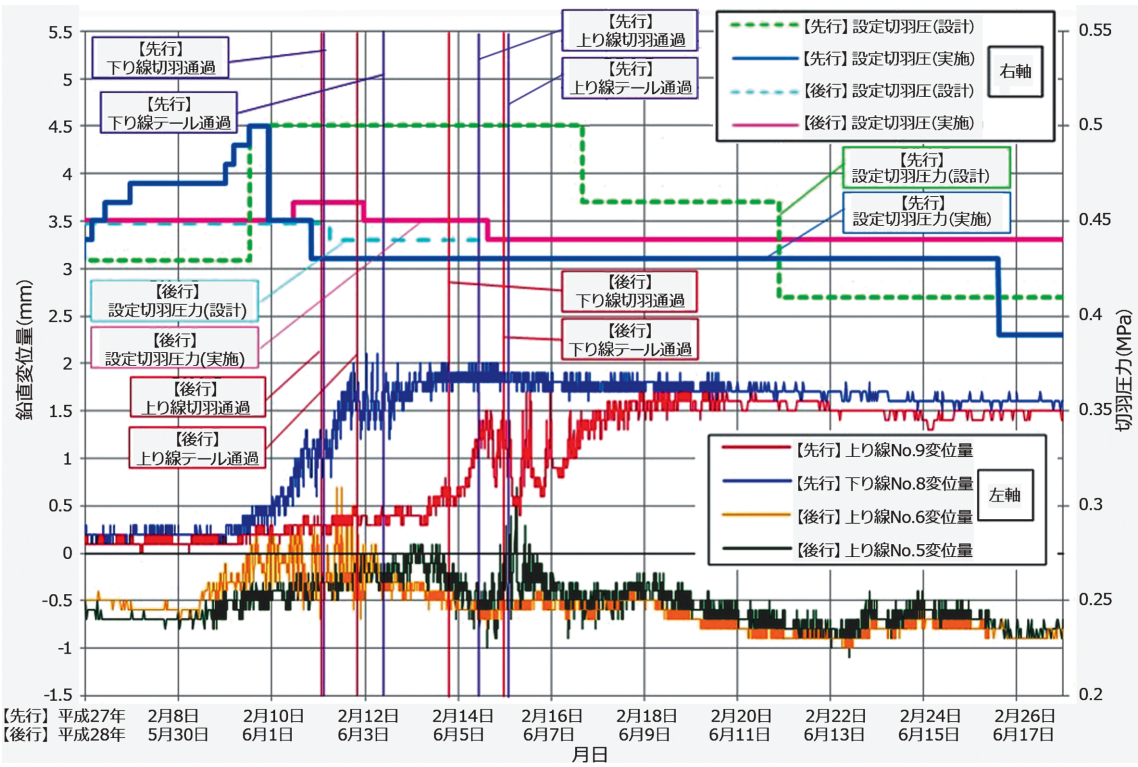


図-13　大和川線シールド切羽圧と御堂筋線トンネルの鉛直変位量の推移

在していることが多い．このような微細砂地盤は，シールド掘削時に緩ませるなどの応力変化によって流動化しやすく，崩壊性が高いという特徴を有している．

このような微細砂地盤をシールド掘進した際に以下のようなトラブル事例が発生した．

① カッタチャンバ内や土砂圧送管の閉塞に見られる排土障害．
② 砂層の流動化や小崩壊に伴う限定的な地盤変形．
③ 胴締め現象．
④ カッタビットやスクリューコンベヤの摩耗．

これらに対して，添加材の見直しや，理論的な裏付け範囲内における切羽圧の低減対策が効果的であった．また，大和川線シールドでの大阪層群砂層の掘進においては，胴締め現象防止のためのシールド外周部への充填材（高粘性添加材）の注入が有効であった．

これらの工事では，適切な対応をそれぞれ行った結果，幸い過去の事例に見られるような大きなトラブルにならなかった．今後，大阪平野をはじめ各地域において類似の地盤でシールド工事を行うにあたっては，これらの知見を有効に活用されることが望まれる．

参　考　文　献

1）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報告書，2013.
2）塩谷智弘・上新原公治：2. シールド工事におけるトラブル事例とその対応，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対応技術，地盤工学会誌，Vol.62，No.4，pp.54-61，2014.4.
3）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.
4）廣木義久：ユールストロームダイアグラム，流水による砕屑物からなる地層の形成の理解，地学教育，Vol.71，No.3，pp.97-107，2019.
5）藤田和夫・笠間太郎：大阪北西部地域の地質，地域地質研究報告（5万分の1図幅），地質調査所，p.112，1982.
6）土木学会：トンネル標準示方書［山岳工法編］・同解

説，pp.40–54，2016.
7）日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp.408–417，2018.
8）橋本正・譽田孝宏：地下建設工事のトラブル，技術の伝承，現場の教訓から学ぶ，地盤工学会誌，Vol.60，No.2，pp.63–70，2012.2.
9）大阪市交通局蒲生建設事務所・熊谷・青木・鉄建建設工事共同企業体：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，高速電気軌道第７号線京橋停留場一部および地下線路工事（２工区）他関連工事工事報告，1990.
10）西松・清水・森本特定建設工事共同企業体：高速電気軌道第７号線地下線路工事（13工区）シールド工事（土圧式シールド工法）工事記録，1995.
11）小山幸則・加島豊・須賀武・高田正治・木村宏：土圧式シールド工法　その理論と応用，鹿島出版会，pp.1–28，2009.
12）土木学会：トンネル標準示方書［シールド工法編］・同解説，pp.204–207，2016.
13）地盤工学会：地盤調査法，pp.200–202，1995.
14）南川真介・高科浩之：地下鉄営業線を超近接で下越しする大断面シールドトンネルの掘進管理，地下鉄御堂筋線近接に伴う大和川線シールドトンネル受託工事，土木施工，Vol.61，No.4，pp.151–152，2020.4.

シールド工法技術の必読書　好評の一冊

シールドトンネルの新技術

シールドトンネルの新技術研究会 編
B5判　285頁　定価5,126円（本体4,660円＋税10%）

シールド工法の誕生から技術の変遷と技術開発の方向性をまとめたうえで，調査から施工まで，その理論と実際について記載するとともに，豊富な設計・施工例により的確な解説を加えている．

〔主要目次〕

第１章　概説
1. シールド工法の変遷と将来の技術開発の方向性
2. わが国におけるシールド工法の歴史
3. 今後の技術開発の方向性

第２章　調査・計画編
1. シールド工法の調査技術
2. 断面および線形計画
3. シールド機種の種類と選定
4. 新しいシールド工法

第３章　設計・施工編
1. 覆工
2. 立坑の設計と施工設備
3. 掘進と施工設備
4. 近接施工と環境対策
5. 切羽の安定と地盤変状防止
6. 地盤変位の理論と実際

付録
1. セグメントの設計例
2. 地盤変位予測解析手法の例
3. シールド工事の施工計画