

地下空間

特集

シールドトンネル技術の現状と課題

真下英人

シールド工法は、山岳工法や開削工法に比べて周辺環境に及ぼす影響が小さく、また、施工時の安全性、工期の点でも有利となるため、過密化した都市部の厳しい条件の下でトンネルを構築するための基幹となる工法である。シールドトンネルの技術に関しては、これまでに多様な技術が開発、改良され、既に高いレベルに達しているが、建設コスト縮減、施工の効率化の点ではまだ改善の余地が残されている。本報文では、シールドトンネルの技術のうち、主として建設コスト縮減、施工の効率化を図るうえで必要となる技術の現状と今後の課題について紹介する。

キーワード：シールドトンネル、コスト縮減、長距離施工、高速施工

1. はじめに

過密化した都市部においては用地取得の難しさや環境に対する配慮の必要性などから道路、鉄道、電力、通信、ガスなどの社会資本の整備を行うために地下空間が使用される機会が増える傾向にある。

さらに、2000年5月に公共の利益となる事業の円滑な遂行と大深度地下の適正かつ合理的な利用を推進することを目的とした「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が制定されたことを受けて、今後、大深度地下を使用した社会資本整備が進むことが予想される。

地下に社会資本を構成する各種施設を収容するためのトンネルを構築する工法は、大きくは、

- ・シールド工法、
- ・山岳工法、
- ・開削工法

に大別されるが、都市部においてはトンネル周辺に様々な既設構造物が存在する、地下水位が高いなどの厳しい条件への対応が必要となるため、地下水低下や地盤変状といった周辺環境に及ぼす影響が小さく、また、施工時の安全性、工期の点でも有利となるシールド工法が採用される機会が多くなっている。

シールドトンネルの技術に関しては、これまでに多様な技術が開発、改良され、既に高いレベルに達しており、現状技術によって大深度地下への対応も十分可能と考えられるが、建設コスト縮減、施工の効率化の点ではまだ改善の余地が残されている。

本報文では、都市部においてトンネルを構築するうえで基幹となるシールドトンネルの技術のうち、主として建設コスト縮減、施工の効率化を図るうえで必要となる技術の現状と今後の課題について幾つか紹介することとする。

2. セグメント構造の合理化

セグメント製作費がシールドトンネルの工事費に占める割合は大きく、セグメント構造の合理化による建設コストの縮減効果は大きいものと考えられる。

セグメント構造の合理化の方法としては、

- ・セグメント厚さの薄肉化、
- ・継ぎ手構造の簡略化、
- ・セグメント幅の拡大、
- ・分割数の低減、

などが考えられる。

セグメント厚さの薄肉化、継ぎ手構造の簡略化にはセグメントの設計法の合理化を図ることが必要となるが、設計に用いる土圧・水圧などの作用荷重については、土被りが比較的浅い軟質な地盤が対象となる場合はその設定法はほぼ確立されていると言える。しかし、対象が土被りが深い硬質な地盤となる場合には、土圧の占める割合が小さく、水圧が支配的になることや大きな地盤反力が期待できることなどがこれまでの現場計測などから明らかになりつつあるものの、その設定法はいまだ確立されておらず、今後の課題となっている。

また、これまでの現場計測結果から自重によって生

じる断面力は比較的小さいことが明らかとなってきたため、自重による変形に対する地盤反力の設計上の取扱い方法に関しても、特に断面が大きくなる場合はコスト削減を図るうえで大きな課題となる。なお、セグメント厚さの薄肉化を図る場合は、これまであまりその影響が顕在化しなかった施工時荷重の影響が大きくなるため、よりの確な施工時荷重の評価方法の確立も課題となってくる。また、継ぎ手構造の簡略化は後述する高速施工を図るうえでも重要となることから、施工法に応じた適切な構造の選定が必要となる。

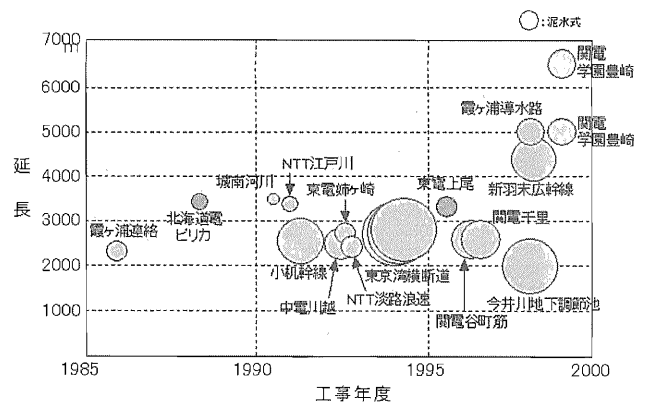
セグメント幅の拡大は、製作費の削減以外に施工時間の短縮にも大きな効果を及ぼすが、セグメント幅の拡大に伴って作用荷重や自重が大きくなるため、本体や継ぎ手部の耐力の確保、セグメント端部における応力の集中、さらには曲線部におけるテールクリアランスの確保、セグメント製作のための設備や運搬の制約、トンネル坑内におけるハンドリング、組立て施工上の精度の確保などが採用に際しての課題となる。

3. 長距離施工技術

都市部でシールドトンネルを建設する場合は、工事の基点としての立坑が必要になるが、立坑の構築速度はシールドの掘進速度に比較すると著しく遅く、工期に及ぼす影響が大きい。

特に大深度のように立坑深さが大きくなると、立坑の構築が工期全体に及ぼす影響が大きくなるため、立坑ができるだけ少なくなるような工事計画が必要となり、シールドトンネルの長距離化技術が重要となる。また、立坑が少なくなることは、コスト削減、立坑工事が周辺環境に及ぼす影響を軽減するということにもつながる。

図一1は、シールドトンネルの長距離化に関するこれまでの実績を示したものであり、中口径(φ4.8m)



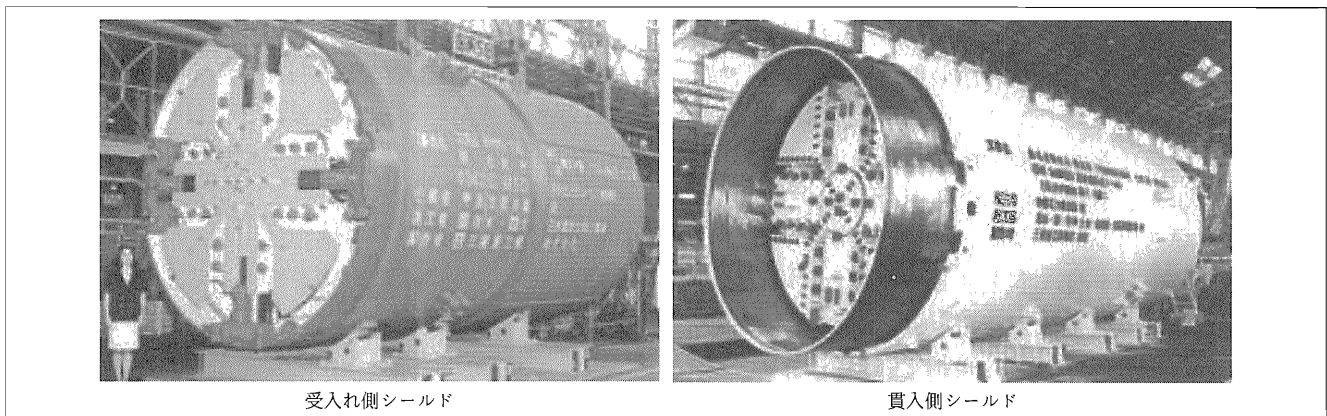
(社)日本トンネル技術協会資料より

図一1 長距離施工の実績

のトンネルでは6.8 kmまで、比較的大口径(φ9.5 m)のトンネルでも4.4 kmまでの施工実績があることがわかる。複数のシールド機を用いて施工する場合は、地中接合技術(図一2)により長距離化に対応することが既に行われているが、1台のシールド機の掘削延長を更に伸ばすにはシールド機の耐久性を向上させる必要がある。

シールド機の耐久性向上を図るうえで、最も大きな課題となるのはビットの損耗に対する対策である。対策としてはビットに使用する材料の長寿命化やビットの配置を工夫する方法が既に採用されているが、対応できる距離に限界があるため、一定の距離以上になるとビットの交換が必要となる。従来は、立坑内や地盤改良によりシールド機の前面に出て交換する方法が採用されてきたが、最近ではシールド機内部から機械的に交換する方法が開発され、

- カッタスポークの背面部に予備ビットを装備しておき、スポークを回転させることにより予備ビットを切羽側に移動させる方法、
- カッタヘッドスポーク内部を耐圧構造とすることで作業員がスポーク内に入り、交換する方法、
- 球体を利用してカッタ全体を回転させ、カッタ面



図一2 地中接合技術の例 (MSD 工法)

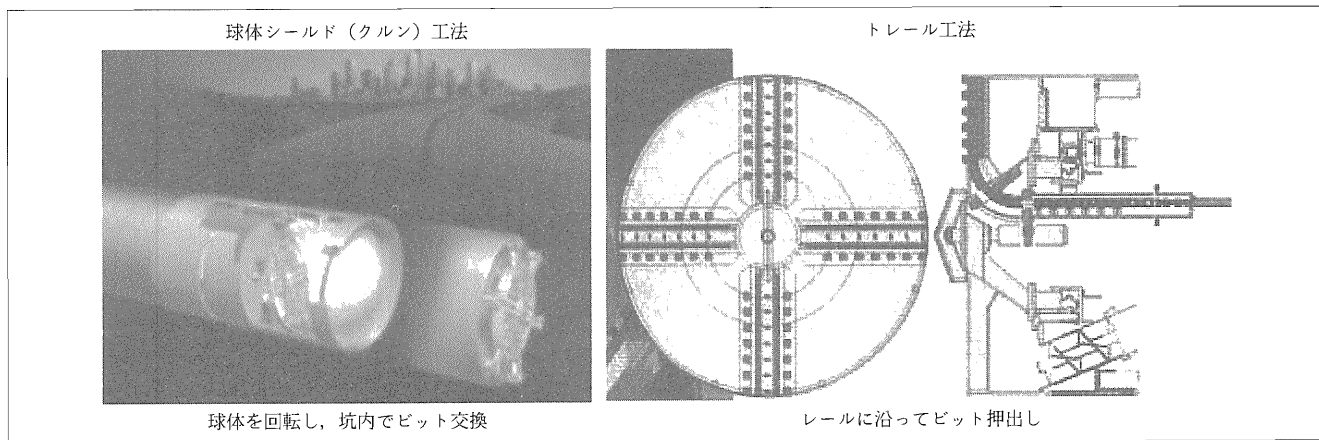


図-3 ビット交換工法の例

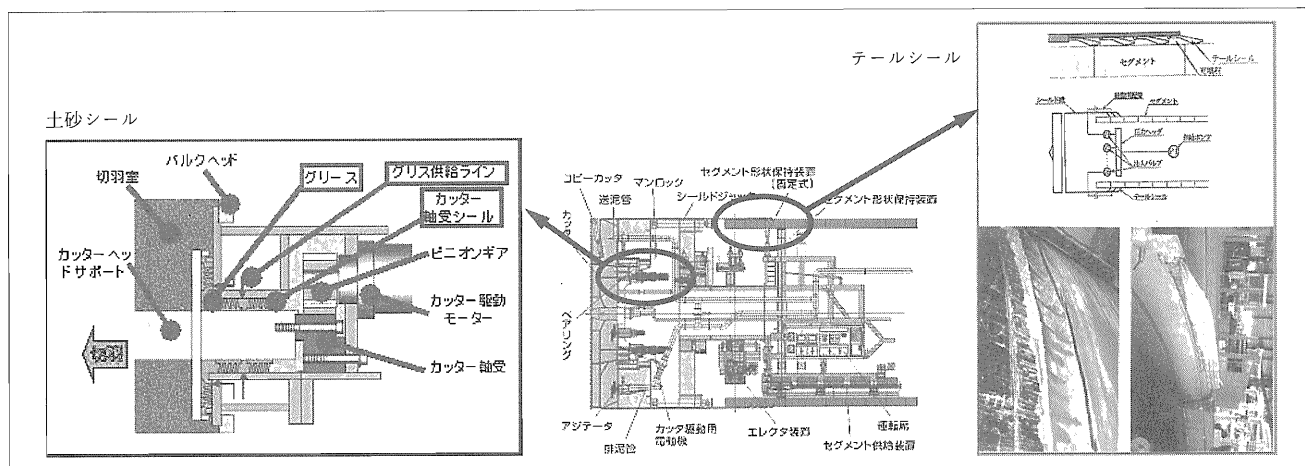


図-4 土砂シールド、テールシールド

全面をシールド機内に現して作業員が交換する方法、

- カッタスポークにガイドレールを設置し、スポークに沿ってガイドレールに納められたビットホルダーを引抜くことによりビットをシールド機内に取込み、作業員が交換する方法、
- などが実用化されている(図-3)。

また、図-4に示すようなテールシールド、土砂シールド(カッター軸受けシールド)の耐久性向上もシールド機械の耐久性向上に欠かせない技術である。テールシールドの耐久性を向上させる方法としては、使用材料やシールド用のグリスを改善する方法の他、標準装備段数に加えてバックアップとしてテールシールドを多段に装備する方法、緊急止水装置の設置や特殊なセグメントの使用などにより止水を行い、交換を行う方法、などが開発されている。

土砂シールドの耐久性を向上させる方法としては、材質や潤滑方法を改善する方法があるが、

- 土砂シールドを内周側と外周側で同心円状に二重に装備し、損耗すると摺動面の固定部を変更する方法、

- 土砂シールドをトンネル軸方向で前後に装備し、軸方向に移動させて変更する方法、

なども検討されている。

シールドトンネルの掘進距離の長距離化を図ろうとする場合には、切羽へのセグメントを始めとする資機材の運搬や残土の排出に要する時間の短縮化も課題となってくる。特に、中小口径トンネルの場合は坑内でのバッテリー機関車のすれ違いや途中休憩所の設置が困難な場合が多いことから、資機材の運搬に要する時間が作業効率や作業者の安全衛生面に及ぼす影響が大きくなる。

また、裏込め注入材を切羽まで送る場合、配管の中に裏込め注入材料が残留することになり、トラブルなどでシールド掘進が停止する場合には、配管路の閉塞の原因となる。この対応として、材料を台車で運ぶことも考えられるが、この場合は上記のバッテリー機関車の運行にさらに大きな影響を与えることとなる。このため、既存のシステムを改良し、より安全で高効率の坑内長距離搬送システムの開発が必要となる。

また、長距離化により送電線の延長が長くなると、電圧降下の影響を考慮して送電圧を高めたり、現場で

のハンドリングがしにくい大断面の送電ケーブルの使用が必要となるため、電力消費の少ないシールド施工機械の開発や現場でのハンドリングが容易な送電ケーブルおよびその設置方法の開発も課題となる。

4. 高速施工技術

シールド工法の施工に高速施工技術を導入することにより、工期短縮が図られ、工事が周辺地域の環境に及ぼす期間の短縮が可能となるとともに、前述したシールドの長距離化に伴う工事期間の長期化への対応が可能となる。

シールドトンネルの施工速度は、トンネル径や地盤条件によって影響を受けるが、これまでの施工実績は表一1に示すように中小口径トンネルで月進200m程度まで、大口径トンネルで月進150m程度までとなっている。

表一1 高速施工の実績

セグメント内径 (m)		4.20	6.90	10.90
セグメント外径 (m)		4.65	7.60	11.90
セグメント幅 (m)		1.2	1.2	1.5
硬質土	土 丹	210	185	160
	砂質土	200	175	154
洪積層	粘性土	210	185	160
	砂質土	210	185	160
	砂 礫	190	165	145
沖積層	粘性土	210	185	160
	砂質土	210	185	160

月進量：m/月

注：一日2交代昼夜間施工、23日稼働/月で換算

大深度地下利用技術調査小委員会報告書（社）日本トンネル技術協会）をもとに作成

施工速度を上げる方法として、シールドの掘進速度を上げる方法とセグメント組立て時間を短縮する方法

が考えられるが、1日の作業サイクルに占める各作業の割合は、セグメント組立てが最も大きいため、セグメント組立て時間を短縮することが効果的である。

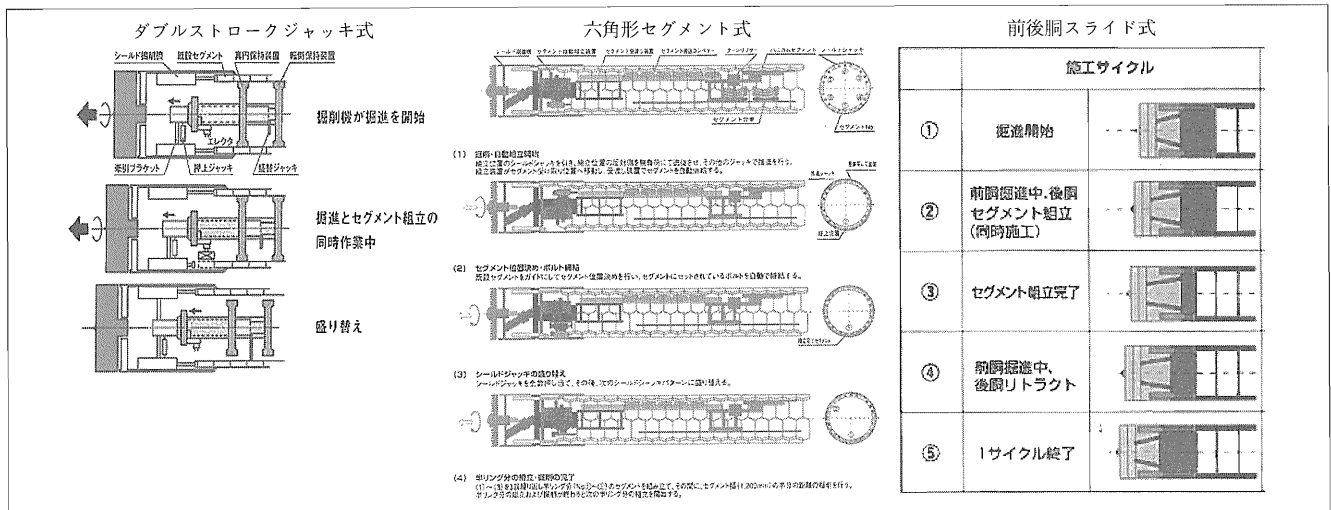
セグメントの組立て時間を短縮する方法としては、セグメント幅を拡大する方法や分割数を少なくする方法、継ぎ手構造を簡略化する方法、組立てロボットを用いた自動化、などが採用されている。

また、最近では、掘進とセグメント組立て作業を同時に施工し、掘進作業を停止する時間帯を無くす方法を採用した施工事例も見られるようになってきている（図一5）。しかし、施工速度を上げるためには、大量に発生する掘削土砂の搬出および再利用方法、増加するセグメントや資材などの搬送方法などの課題についても同時に取組まなければならない。また、施工機械の高速化、高出力化に伴う作業の安全性向上および新しい管理システムの構築も課題となってくる。

5. 自動化、無人化技術

シールド工事における自動化、無人化技術は土木工事の中でも進んでいる部類に属し、シールド機の姿勢および位置の制御まではジャイロ、レーザを用いた自動制御が可能となっている。また、セグメントの搬送については無人化による操作が可能となっているが、セグメントの組立てに関しては、径が5mのトンネルから実績があるものの、自動化のコストが高いため、位置決め、ボルト締結と言った一部のプロセスを手動とした半自動の採用例が多くなっている（図一6）。

このようにシールド工事においては、シールド機の姿勢および位置の制御、セグメントの組立て、セグメント搬送と言った個別の主要作業の自動化は達成されている状況にあるが、今後、少子・高齢化に伴って労



図一5 掘進組立て同時施工技術の例

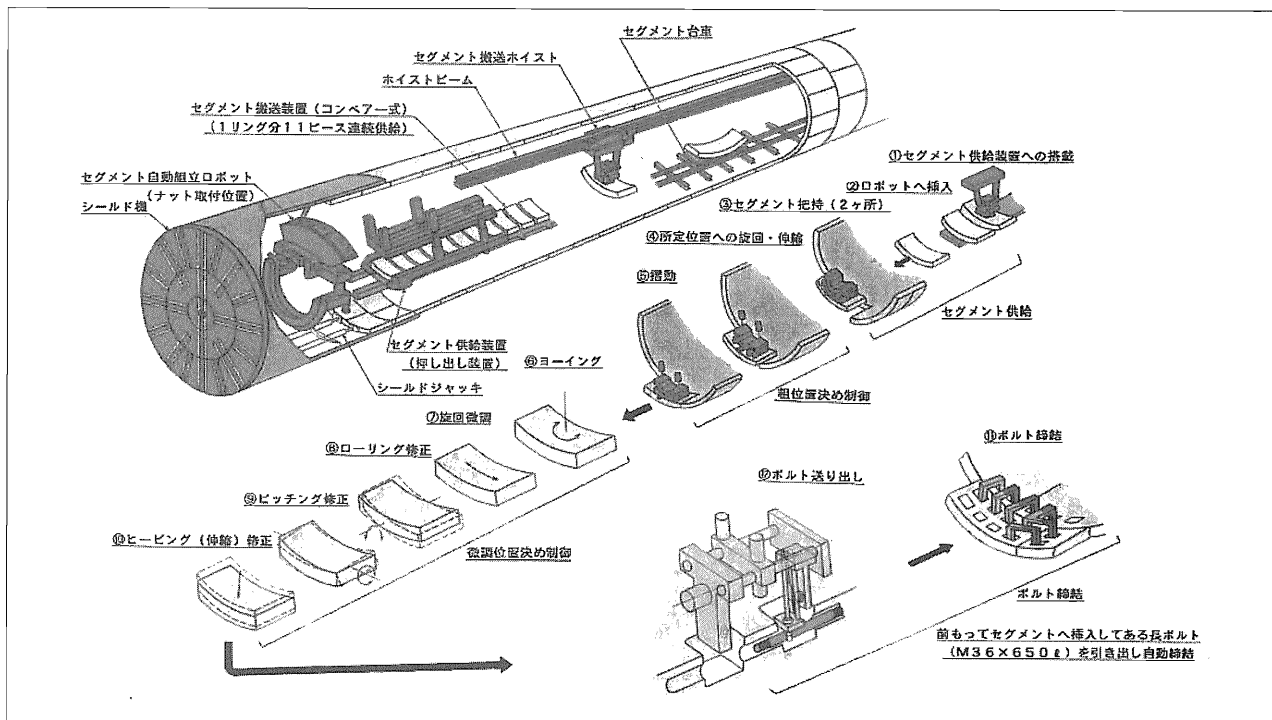


図-6 セグメント組立ての自動化の例

動力や熟練者が不足することへの対応、トンネルが掘削される深度が大きくなることによる高水圧下での作業環境の対応、さらには長距離化に伴う地表へのアクセス時間の増大に対する作業時の防災上の対応などが必要になってくることから、人力による作業はできる限り自動化、無人化を図ることが望まれる。

このため、今後は、コスト面に配慮しつつ、コンピュータ等を用いたより迅速かつ適切な情報収集・処理によって現状の個別の自動化システムを統合し、効率の良いシールド自動化システムを構築することが課題となる。

6. おわりに

シールドトンネルの技術は、これまでも多様な新

技術、新工法が開発され、実用化されてきており、高いレベルに達していると言える。しかし、今後の都市部における地下利用の展開を考えると、シールド工法の建設コストの縮減、施工効率の向上などはさらなる取組みが必要とされる重要課題であり、課題解決に向けた研究開発に官民学が一体となって総合的、集中的に取り組むことが必要である。

JICMA

【筆者紹介】

真下 英人 (ましも ひでと)
独立行政法人土木研究所
基礎道路技術研究グループ
上席研究員

