

2021 年度（2021M-032）

ポストコロナの環境変化を考慮した地下インフラ再構築の調査研究

報 告 書

【本編 第Ⅳ部】

社会と環境の変化を踏まえた地下インフラ再構築
技術に関する調査研究（第4部会担当）

2022 年 3 月

一般財団法人エンジニアリング協会
地下開発利用研究センター



競輪の補助事業

この報告書は、競輪の補助により作成しました。

<https://jka-cycle.jp>

この報告書は「本編第Ⅳ部」です。
本編全体を要約した「概要版」および「本編第Ⅰ部～第Ⅲ部」はエンジニアリング協会ホームページよりダウンロードできます。

以下のアドレスまたは QR コードから、当協会の JKA 補助事業調査研究報告書のページにアクセスして、2021 年度補助事業をクリックして下さい。

<https://www.ena.or.jp/information/jka-subsidy-business>



社会と環境の変化を踏まえた地下インフラ再構築技術に関する調査研究
(第4部会)

委員名簿

部会長	安藤 拓	清水建設(株)	土木技術本部 地下空間統括部 トンネル設計グループ長
副部長	田島 新一	鹿島建設(株)	土木設計本部 地盤基礎設計部 部長
委員	本多 伸弘	(株)アサノ大成基礎エンジニアリング	事業推進本部 担当部長
委員	田中 義浩	応用地質(株)	エネルギー事業部 事業企画部 主任
委員	浜田 元	(株)奥村組	技術研究所 土木研究グループ 上席課員
委員	村下 富雄	(株)鴻池組	土木事業総轄本部 技術本部 土木技術部 技術2課 課長
委員	田中 孝	戸田建設(株)	技術開発統括部 技術研究所 社会基盤構築部 部長
委員	久慈 雅栄	前田建設工業(株)	土木事業本部 土木技術部 上級技師長
事務局	斎藤 俊哉	(一財)エンジニアリング協会	地下開発利用研究センター 技術開発部 担当部長

活動内容

第4部会では、第1部会～第3部会で調査研究した各サブテーマの内容を実現するための具体的な地下インフラの再構築技術について調査研究を行った。

下表に部会の活動状況（会議開催の概要）を示す。

第4部会活動状況（会議開催の概要）

回	開催日	主要議事
第1回	2021年6月8日	・部会長、副部会長の選任 ・2021年度の活動テーマについての討議
第2回	2021年7月28日	・現地調査先、ヒアリング候補の検討 ・2021年度の報告書作成内容についての討議
第3回	2021年9月1日	・各委員による検討項目の提示と意見交換 ・講演会のテーマ検討
第4回	2021年10月7日	・報告書項目内容及び目次（案）の検討 ・各項目の執筆担当決定
第5回	2021年11月9日	・前田建設工業 ICI 総合センター見学会実施 ・技術情報の収集状況・検討経過報告
第6回	2021年12月16日	・技術情報の収集取りまとめ ・報告書記載事例の内容確認
第7回	2022年1月20日	・各委員執筆内容報告と原稿全体の内容調整
第8回	2022年2月15日	・報告書及び概要版原稿の最終確認、校正

ポストコロナの環境変化を考慮した地下インフラ再構築の調査研究 報告書

【本編 第Ⅳ部】

社会と環境の変化を踏まえた地下インフラ再構築技術に関する調査研究

目 次

2021 年度地下利用推進部会 第 4 部会委員名簿

活動内容

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	想定される地下空間の新たな使い方（用途）	2
2.1	地下空間利用のメリット	2
2.1.1	限られた土地の有効活用	2
2.1.2	地下地震力の特性利用	2
2.1.3	安定した地中温度の利用	3
2.1.4	低い騒音伝搬特性の利用	4
2.1.5	大気中への CO ₂ 排出制御	4
2.1.6	災害時への備え	4
2.1.7	地上景観保全	4
2.2	地下と地上の有利な使い分け	4
2.3	新たな地下空間利用の可能性がある用途	5
2.3.1	移動手段	5
2.3.2	電力などエネルギー	6
2.3.3	上下水道	6
2.3.4	通信	6
2.3.5	物流・輸送	6
2.3.6	人流	7
2.3.7	その他（防災シェルター、パンデミック時隔離施設など）	7
第 3 章	それぞれの用途に対する共通の課題と特有の課題	8
3.1	共通の課題	8
3.1.1	地盤状況	8
3.1.2	地下埋設物	8
3.2	各用途における特有の課題	9
3.2.1	移動手段を地下空間利用とする場合の課題	9
3.2.2	電力などエネルギー施設を地下空間利用とする場合の課題	9
3.2.3	上下水道を地下空間利用とする場合の課題	9
3.2.4	通信施設を地下空間利用とする場合の課題	9
3.2.5	物流・輸送施設を地下空間利用とする場合の課題	10

3.2.6 人流施設を地下空間利用とする場合の課題	10
3.2.7 その他（防災シェルター、パンデミック時隔離施設等）を地下空間利用と する場合の課題	10
第4章 地下インフラを再構築するための地下空間の建設技術	12
4.1 地下空間の拡幅施工	12
4.1.1 設計上の課題	12
4.1.2 施工上の課題	12
4.1.3 地下空間の拡幅事例	12
4.2 地下空間の接続施工	18
4.2.1 設計上の課題	18
4.2.2 施工上の課題	18
4.2.3 地下空間の接続工法	18
4.3 既存施設との近接施工	21
4.3.1 設計・施工上の課題	21
4.3.2 地下空間の近接施工技術・事例	22
4.4 小土被り条件下に対する施工	27
4.4.1 設計・施工上の課題	27
4.4.2 地下空間の小土被り条件下に対する施工技術・事例	28
4.5 大断面施工	36
4.5.1 大口径円形シールド工法	36
4.5.2 外殻先行工法	38
4.5.3 断面分割工法	39
4.6 特殊断面施工	42
4.6.1 複円形シールド工法	42
4.6.2 矩形シールド工法	44
4.7 急曲線施工	46
4.7.1 急曲線シールド工法	47
4.7.2 急曲線における管更生工法	58
4.8 急速施工技術	62
4.8.1 アンダーパス急速施工技術	62
4.8.2 シールド急速（高速）施工技術	63
4.8.3 開削工法急速施工技術	69
4.8.4 立坑急速施工技術	71
4.9 その他の技術	73
4.9.1 大深度施工	73
4.9.2 無人施工・自動施工	76
4.9.3 新素材	77
第5章 まとめ	80

第 1 章 はじめに

第 4 部会では「ポストコロナ時代の環境変化を考慮した地下インフラ再構築」というテーマに対し、実際に地下インフラを再構築する際に用いられる具体的な技術の調査研究を行った。

地下インフラの再構築は、地下インフラの維持、管理のみならず、インフラに新たな機能・価値を付与し、利活用することを目的として行われる。よって「再構築」とは狭義には既存のインフラを補修、増改築することと考えられるが、本報告ではこれを幅広く地下インフラの機能を維持、増進する手法であると考え、

- ・ 既存地下インフラの維持、活用
- ・ 新規地下インフラの構築

の 2 つを共に対象とした。

既存地下インフラの維持・活用としては、インフラ規模の拡大、機能の維持・強化・追加、複数の地下インフラの結合などが挙げられる。特に維持管理については高度成長期に整備された社会インフラが建設されて 50 年以上が経過化し、老朽化が進んで一斉に更新が必要な時期を迎えており、リニューアルに関する技術が今まで以上に必要とされている。

新規地下インフラとしては、設計段階から新たな機能・価値を付与することを前提としたもの等が挙げられる。また阪神淡路大震災や東日本大震災等を契機とした地下インフラの防災性能への関心の高まり、**with** コロナ時代における換気やソーシャルディスタンスの確保等の新たな要件定義など、これまではあまり考慮されることの無かった要素に対する検討、技術が必要となっている。

本報告では地下インフラについて、第 2 章において今後想定される新たな用途について述べ、第 3 章では既存のものを含む各用途に対する課題について整理する。第 4 章では再構築に関する具体的な建設技術について施工技術という面から分類した。第 5 章でまとめると共に今後の課題を挙げた。

第2章 想定される地下空間の新たな使い方（用途）

2.1 地下空間利用のメリット

2020 年から続く新型コロナウイルス感染の影響により世界中でパンデミックの混乱が継続しているが、ワクチンや経口薬の開発も進んで徐々にポストコロナへ向けて変化しつつある。ポストコロナ時代におけるニューノーマルへの対応や、ユーザーの考え方の変化に対して地下空間がどのようにあるべきで、どのような役割を果たせるのか、またどのような課題があるのか等について、DX（デジタルトランスフォーメーション）、SDGs も絡めて議論すべき事項は多くなってきている。

対面接触を減らすような新しい生活様式に対し、近年の自然災害リスクや環境問題にも配慮しつつ、パブリックスペースの有効な使い方や特に都市部における土地有効利用の最大化など、空間利用の見直しに対するニーズが高まっている。甚大化が激しさを増している災害時に備えた地下空間利用の問題点や役割、SDGs に基づいた地下空間利用、大きな国際イベント開催時の地下空間利用時における対策、地下空間をより快適に利用するための DX を基軸とした新たな価値など、新たな議論が必要な時期に来ている。このような環境変化の中、ここで、地下空間のメリットとその利用について改めて整理してみたい。

まず、地下空間には他の空間とくらべて多くのメリットがある。それらの代表的なものを挙げると以下のようなものがある。

- ① 限られた土地を有効活用できる
- ② 地下は地震力が小さい
- ③ 地下は温度が安定している
- ④ 地下は騒音が伝搬しにくい
- ⑤ 大気中に直接的に CO₂ を排出させずに制御しながら排出することが可能
- ⑥ 災害時に使える空間の確保や貯蔵ができる
- ⑦ 地上の景観保全が図れる

その反面、

- ・工事費が高くなる
- ・暗くて狭い印象がある

といったデメリットもある。ここでは、地下空間のそれぞれのメリットについて説明する。

2.1.1 限られた土地の有効活用

特に都市部において、地上には既にものがあって錯綜しており、空いているスペースは限られ、新たなものは元あったものを解体するなどしてスペースを確保して新規に構築するような形をとっている。これに対して地下空間は地上のスペースを再編することなく新たに構築できるスペースであり、魅力ある空間である。

2.1.2 地下地震力の特性利用

図 2.1-1 に示す通り、深くなるほど地震力が小さくなる傾向があり、構造物や施設内の設備に作用する慣性力が小さくなる。その反面、沖積層など浅いところで同じよ

うな地盤であれば、地盤から作用する側圧については、深くなるほど大きくなる。一方、岩盤など自立性の高い地山においては、深さに比例して大きくなるようなことはなくなる。

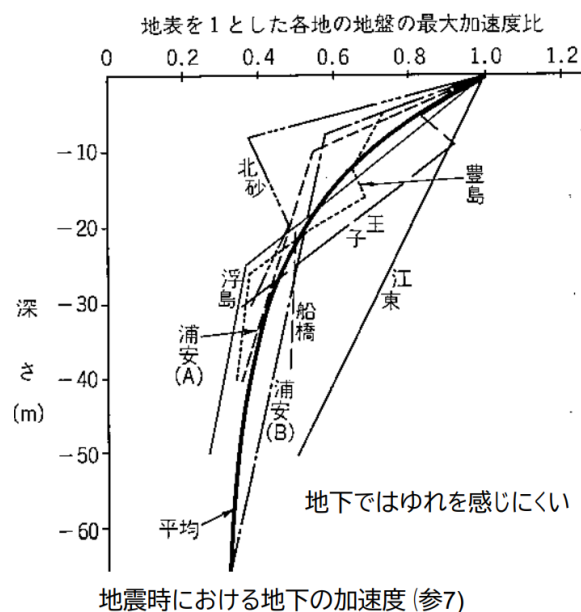


図 2.1-1 地中の地震力

(出典；「地下都市は可能か」平井堯編著、鹿島出版会(1991))¹⁾

2.1.3 安定した地中温度の利用

図 2.1-2 の通り、地下は一年中を通して 10~15℃程度で温度変化が少なく、地上に比べ夏は涼しく、冬はあたたかい傾向にある。これを空調に利用する例がある(図 2.1-3)。全国各地でヒートポンプを利用して空調による CO₂ 排出減を達成しており、地球温暖化対策(気温上昇対策)となるとともに、熱中症対策にもなっている。

また、恒温性・恒湿性は、図書・芸術品・文化財などの保存にとって有利である。さらに、パイプの水が凍らないというメリットもある。

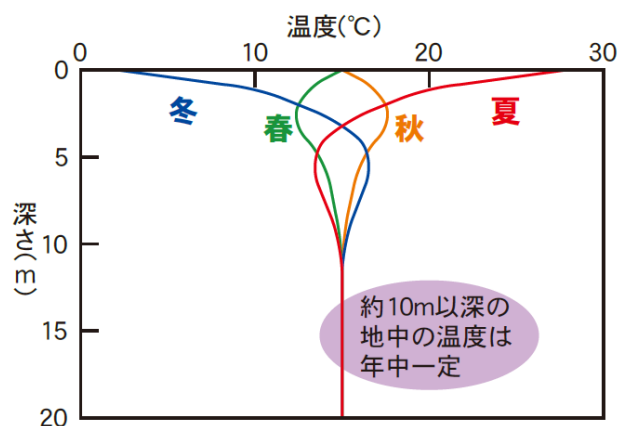
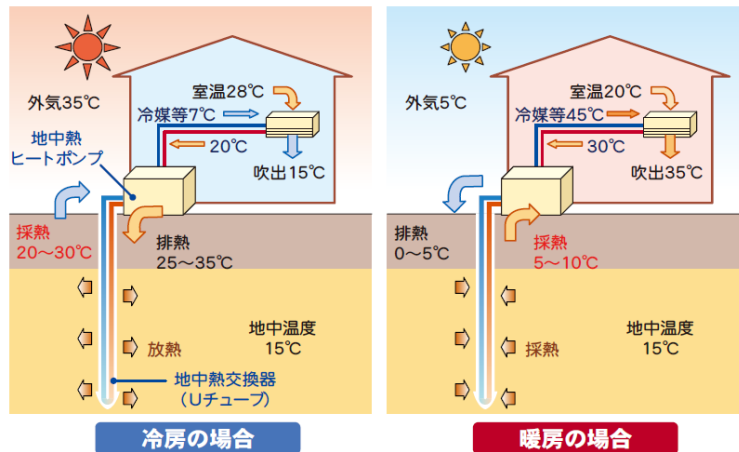


図 2.1-2 季節による地中温度の変化イメージ

(出典；環境省 地中熱利用システムパンフレット 2021 年度版)²⁾



安定した地中温度を利用するメリット

図 2.1-3 地熱利用イメージ図

(出典；環境省 地中熱利用システムパンフレット 2021 年度版)²⁾

2.1.4 低い騒音伝搬特性の利用

地上で事業を実施する場合と比較して、地中の場合は騒音拡散が減少し、地上の都市環境保全に寄与する³⁾。道路、鉄道などの交通騒音が発生するもの、機械音が発生するもの、その他音響が発生するものを地下空間に配置することにより、地上の快適性を向上できるメリットがある。

2.1.5 大気中への CO₂ 排出制御

地下空間は地上との連絡が限定された閉塞空間であり、地下空間で排出された CO₂を一気に大気中に放出することなく、排気口で制御して放出することが可能である。これはすなわち、CO₂を化学的に処理して別の形にして大気中に放出することが可能ということである。

2.1.6 災害時への備え

コミュニティタンク（多機能型蓄熱槽）を地下に設置すれば、災害時の水の確保にも役立てることができる。また、地下への入り口の構造さえ工夫すれば、地球温暖化による海面上昇の影響を受けにくい空間を確保できる。さらに、地下空間は温暖化で高温となった地上から日射を直接受けることが無いので、紫外線照射リスクを低減できる。

2.1.7 地上景観保全

地上に建設すべき構造物を地下に潜らせることにより、地上のスペースを確保できるようになり、緑地、公園の確保など景観に配慮した再開発が可能となる。交通渋滞も地上から排除でき、歩行安全性も確保することが可能となり、憩いの空間を確保できる。

2.2 地下と地上の有利な使い分け

既に飽和状態となっている都市部において、新たに建設する地下空間と地上空間をある程度分離することは、機能上でのメリットが大きい。現状において地上で用いている公共

性の高いものは、行き先が決まっていて大量輸送するものが多い。このような意味では、地下空間を用いても同じような効果を期待できる。また、地下空間は地上に比べて建設コストが高く、特定の人や業界にメリットが偏るのではなく幅広く社会的効果が高いものに使う方が望ましい。さらに、地下空間は地上に比べて限られた空間内での話であり、安全性や移動時間に関して管理、コントロールがしやすく、BCP（事業継続計画）上で有利である。公共であれば使用する車両を限定しやすく、合理的な断面を設定できてコストダウンにつなげやすくなるとともに、地下空間での換気面で有利な状況をつくりやすい。このような状況を鑑みると、地下空間を公共施設として活用するという基本原則が合理的である。

一方、地上に関しては、自由な空間であり、多種多様な使い道がある。道路建設も地下に比べて安価で自由度があり、多様な用途に適している。また、カーボンニュートラル実現の絡みでも地上の開発は極力おさえてオープンスペースをつくり（公共広場含む）緑地を確保するなど、憩いの場や景観のために有効利用すると良い。地上のオープンスペースでの憩いの場であれば、ソーシャルディスタンスも確保しやすい状態となる。また、緊急性の高いものは優先順位が非常に高く、緊急時に専用の空間を確保できないと目的の達成が難しい。地下鉄など公共性が高く正確な時間で大容量移動を目指して運用しているものが多い地下空間に、緊急性の高いものも加えて通行できるようにするには、別の専用スペースが必要になってコスト高となってしまうため、緊急性の高いものは地上に配置することが合理的である。

なお、駅付近や地下通路脇ビル付近など地上と地下の接合部付近は地下に人流を入れた方がスムーズな流れになる場合もあり、こういったところでは人流など自由に動きが不規則なものも地下に入れる方が合理的なケースもある。

2.3 新たな地下空間利用の可能性がある用途

独立した地下空間を構築するのには、従来の技術を用いれば、特別な問題が発生するケースは少ないが、連続して繋がっていないと機能を損なうような長い地下空間を構築するには、条件に応じて特殊な施工技術を要するケースが多くなる。

2.3.1 移動手段

地下交通としては、都市部の地下鉄道が1930年頃から使われている⁴⁾が、路線が増えるにつれて交差部においてどんどん大深度化が進んでおり、東京では深いもので地下約50mまで至っている⁵⁾。鉄道関係においては、新交通システムなどで無人施工のものも出てきている。

次に多い地下交通施設は都市部の高速自動車道路である。地下建設費が高いこともあり、一般自動車道路は地上がほとんどで、一部アンダーパスで交差する部分は一般自動車道路も地下とすることがある。自動車は様々なサイズが存在し、速度も制限範囲の中で自由なところもあって幅員にある程度の余裕が必要となるが、自動運転化することによってその余裕代を少なくすることができ、トンネル断面縮小が可能となってコストダウンを図ることが可能となる。最近では、東京の外環自動車道は地下部分が非常に長くなっている。

2.3.2 電力などエネルギー

SDGs やカーボンニュートラルの観点から考えると、自然エネルギーの割合の増加が望まれるところであり、地下空間を利用する発電形式もある。

昭和時代から岩盤の中に広大な地下空間を構築した地下発電所が建設されており、葛野川発電所は有名で、水力を利用したものである。

最近では、地熱を利用した発電所もあり、八丁原発が国内最大である。カーボンニュートラル実現に向けた自然エネルギーの一種であり、CO₂や有害ガスを発生することがない、季節や天候の変化による影響を受けにくい、枯渇の心配がない、輸入資源に頼らなくて良いなどのメリットがある。一方、コスト高、地下水くみ上げによる周辺への影響、建設時の掘削に伴い有害物質が出る場合がある、温泉地などの観光地が多く景観に与える影響があるなどのデメリットもある。地熱の利用は、省エネタイプの効率的な空調設備にも用いられている。地下熱は1年中を通じて概ね一定であり、これを利用することによりCO₂排出量を大幅に削減することが可能となる。

2.3.3 上下水道

上下水道は、歴史的にほとんどが地下埋設となっている。上水道は圧力管で、下水道は自然流下となっている。

地球温暖化の影響による異常気象で、ここ最近もゲリラ豪雨が増えており、東京都神田川・環状七号線地下調節池が完成した 2007 年頃から都市部の洪水対策として地下調整池が造られている⁶⁾。神田川調整池が有名で、総貯水量 143 万 m³ という国内最大級の地下調節池である。このような調整池は、通常は満水状態ではないため、この空間を利用する新たなカナート構想も提案されている⁷⁾。

2.3.4 通信

コロナ禍においてテレワークや WEB 会議が増加した。ポストコロナ時代においてもある程度こうした状況を引き継ぐものと考えられ、さらなる通信容量拡大や通信速度の高速化が望まれるところである。

従来の通信ケーブルには固定電話線などがあり、電柱に沿わせていたが、景観の関係から地下空間を這わせるケースが増えており、現在は通信速度の関係から幹線は光ケーブルが多くなっている。電波を用いる通信網は地上空間、空中空間、宇宙空間を用い、地下空間で用いられる通信網は有線ケーブルを用いたものである。光ケーブル専用で地下空間を構築するというのはコスト的にメリットが小さく、共同溝など別の目的で構築した地下空間を間借りしてケーブルを敷設するケースが多い。

2.3.5 物流・輸送

コロナ禍において、対面接触を避けるためにネット販売の利用が多くなった。ポストコロナ時代においても物流・輸送の能力増強が望まれるところである。

物流・輸送でネックになるのは、渋滞による時間ロスである。地上の限られた空間を移動させる場合、避けては通れない問題である。これに対して専用空間として使用できる地

下空間においてはそれを避けることが可能となり、物流面において魅力ある空間である。また、地上は天候や自然現象の影響も大きく受け、ゲリラ豪雨や地震などによる影響を大きく受ける。これに対して地下空間は、周りを囲われていて防護されており、これらの天候の影響を受けることは無く、予定通りのスケジュールで物を移動させることができる。

2.3.6 人流

人流のための地下空間としては、地下街、地下通路、地下広場などが挙げられる。人流のための地下空間の最大のメリットは、雪や風雨等の気象条件による影響や自動車交通等に対する危険が少ないことであり、ショッピングや歩行において快適に安心してできる空間であることである。鉄道駅やビルから直結していて、利便性が非常に高いことが特徴としてあげられる。信号も無く、店舗が密集していることもあり、一つの限られた範囲で全ての欲求が満たされる可能性が高いというメリットを持っている。

後から既設の施設と接続することが多く、接続部に新たにつくる開口の補強と接続部の止水が技術的な課題となる。また、最大のデメリットとしては、常に照明と換気が必要で電力が必要不可欠ということである。

2.3.7 その他（防災シェルター、パンデミック時隔離施設など）

地下は地上と隔離することが可能であり、戦争やテロ、災害時のシェルターとしての役割を果たすことができる。一定期間に耐えうる備蓄をしておくことによって人々を安全にかくまうことができるような空間を創出できる。

備蓄という意味では、水を池として蓄えておくことにより、災害時の飲料水やトイレ、風呂、食器洗いなどの生活用水にも使え、火災時の消火用にも用いるための水の備蓄用に用いることができる。

逆に、パンデミック時に感染者を一時的に隔離する施設にも用いることができる。地上の空間と隔離して排気を清浄するなどコントロールすることにより、完全な隔離空間を創出することができる。

【参考文献】

- 1) 「地下都市は可能か」平井堯編著、鹿島出版会(1991)
- 2) 環境省地中熱利用システムパンフレット：2021年度版 p.3、p.5
- 3) 国土交通省パンフレット：新たな価値を生む空間 大深度地下 p.11(参照 2022.1)
<https://www.mlit.go.jp/common/000108805.pdf>
- 4) Wikipedia 日本の地下鉄 「歴史 東京地下鉄道による初の地下鉄」(参照 2022.1)
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%97%A5%E6%9C%AC%E3%81%AE%E5%9C%B0%E4%B8%8B%E9%89%84>
- 5) 国土交通省パンフレット：新たな都市づくり空間 大深度地下 p.3 (参照 2022.1)
https://www.mlit.go.jp/crd/daisindo/panhu_1.pdf
- 6) 東京都 HP 東京都の調整池・分水路 整備済の調整池一覧 (参照 2022.1)
https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/jigyos/river/chusho_seibi/ike.html
- 7) 吉川猛ほか：「国土強靱化に資する地下空間利用に関する調査（その2）」
第71回土木学会年次学術講演会 CS4-002 pp.3-4

第3章 それぞれの用途に対する共通の課題と特有の課題

3.1 共通の課題

地下インフラは土地利用の効率化などの観点から都市域に構築されることが多い。よってその施工においては既存構造物との近接、騒音・振動などの環境問題、従来インフラの機能を止めることなく改築などを行う活線施工などに関する技術が必要となる。

さらに近年は福岡市地下鉄七隈線延伸工事における博多駅前陥没事故、東京外郭環状道路工事における調布市道の陥没事故などNATM、シールド、基礎工事等に起因する事故が社会的な注目を集めており、安全に地下空間を構築する技術も必要とされている。

また電気・通信等のライフラインに関連する設備、物流基地や地下鉄・道路等の交通設備などについては、都市域以外にも構築される。よって本報告においては、都市域以外において活用される技術についても記述する。

3.1.1 地盤状況

都市域の地下工事においては軟弱な地盤や地下水が問題となることが多い。地盤情報については、国土地盤情報検索サイト（KuniJiban）¹⁾や東京都地盤情報システム²⁾、関西圏地盤情報データベース³⁾などボーリング柱状図や土質試験結果等を収集、公開するシステムが複数開設されており、公共工事においては自由な利活用が認められている。また環境省は地盤沈下の状況や地下水の利用状況等に関する情報を「全国地盤環境情報ディレクトリ⁴⁾」としてホームページにて公表・更新している。よってこれらの情報の存在を前提とし、地下インフラ構築工事が周辺環境（地盤沈下、井戸の枯渇など）にどのような影響を及ぼすかを予測する技術が求められている。設計段階においては、これらの地盤情報と構造物の物性を一体化した解析を行い、地盤の安定性と構造物の安全性を併せて評価する手法も開発が進められている。また軟弱地盤においては、高い精度で所定の地盤改良体の造成を可能とする技術が、地下水においては地下インフラに漏水として損傷を与えるおそれもあるため、止水・防水に関する技術も課題となる。

3.1.2 地下埋設物

地下インフラ工事においては、既存の地下埋設物の正確な位置の把握が必要である。地下埋設物を工事中に損傷する事故件数は2000年までは減少傾向にあったが、近年は横這い状態が続いている⁵⁾。特に社会的な影響の大きい通信ケーブルの損傷に対しては、事故を起こした施工者が発注者から指名停止を受けるケースも続出している。上下水道、電気、ガス、通信などの埋設情報は、基本的に事業者（地方公共団体、電気・ガス・通信事業者等）毎に保有する台帳に記録されており、必要に応じて共有されているのが現状である。しかし台帳に記載されている情報が不正確であったり、地下埋設物に対する照会を怠るなどを原因とする事故が多発したこともあり、東京23区および札幌、名古屋、大阪、福岡などの11の政令市では、道路及び占用物件に関する各種情報をGIS（地理情報システム）を活用して総合的に管理し、道路管理者および専用事業者を提供する道路管理システム（ROADIS）が、（一財）道路管理センターにより運営されている。このようにライフライン関連の地下

埋設物については情報の整備が進められているが、地下インフラ工事では過去の別工事において施工された杭や埋設物など予期せぬ障害物に直面することもある。よって特に再開発工事においては、過去の工事情報へのアクセスや障害物の探査技術、また障害物の撤去に関する技術が必要となることもある。

3.2 各用途における特有の課題

3.2.1 移動手段を地下空間利用とする場合の課題

都市域においては地下鉄が効率的な移動手段として大きな役割を果たしており、路線の延伸や新線の建設計画が現在も進められている。また道路についてもバイパスとして渋滞を解消することを目的とした東京外かく環状道路の整備が進められるなど、新たなトンネルの建設が行われている。これらのトンネルは主にシールド、開削工法で施工されているが、既存の地下鉄、道路との分岐合流、インターチェンジ区間における変形断面を構築する方法が大きな課題となる。また駅部等においてはシールド機が地下構造物へ直接到達できるような技術も求められている。

3.2.2 電力などエネルギー施設を地下空間利用とする場合の課題

国土交通省は近年頻発する災害や高齢化等に対応することを目的とした無電柱化推進計画を策定しており、そのポイントのひとつとして徹底したコスト縮減の推進を挙げている。具体的な地下インフラとしては電線共同溝や小型ボックス活用埋設などがあり、比較的浅層における工事を効率的に進める技術が求められている。

一方、エネルギー供給源としての地下インフラとしては、地下発電所やガス地下貯蔵施設等がある。これらの施設においては地下に大空間を構築することが必要となり、支保構造や掘削工法、施工機械など設計から施工、維持管理に至る各段階においてコスト低減と信頼性の確保が課題となる。

3.2.3 上下水道を地下空間利用とする場合の課題

下水道は普及が進み、管路延長は約47万kmに達する一方、施設の老朽化も進行しており、敷設後50年を超える古い管路が今後加速度的に増加する見通しである。そのため効率的な点検調査技術、改築更新技術の開発が求められており、具体的には遠隔操作式のテレビカメラによる調査技術や、管渠を開削せずに更生する技術などの普及・促進が支援されている。

また水道管の老朽化が進む大阪市において水道管交換事業をコンセッション方式で民間移譲する計画が採算面から頓挫するなど、水道の維持・補修の効率化は急務であり、上下水道ともにコスト面が最も大きな課題となっている。

3.2.4 通信施設を地下空間利用とする場合の課題

地下に設けられる洞道などの通信設備に関しては、保安上の問題からその情報はほとんど公開されていない。NTT東日本は通信ケーブル用トンネルを東京都内だけで約290km敷設しているが、これは他の下水道や共同溝とは接続されていない独立したものであり、そ

の位置情報も一般には公開されていない。また法律により洞道を通信ケーブルの収容以外に使用することは認められていないため、インフラとしての利活用においては、インフラ機能と機密性の保持を両立するための基本的なルールを構築することが課題となる。

3.2.5 物流・輸送施設を地下空間利用とする場合の課題

都市圏における物流手段として、トヨタ自動車未来創生センター・大林組他による「ダイバーストリート」など、地下空間を利用した物流トンネル・新輸送システムが構想されている。これは通常の自動車や通行者とは隔離された物流インフラとして構築されるものであり、浅層では開削、深層ではシールド・山岳トンネル工法による施工が想定されている。よって施工技術的には従来の地下空間構築技術の延長線上にあるが、電気自動車・電車の使用を前提とした換気設備、トンネルの法的な位置付けとそれに伴う照明・非常施設等の設備基準などについて検討する必要がある。

3.2.6 人流施設を地下空間利用とする場合の課題

日本の地下街の多くは昭和30～40年代に建設されており、全体の8割以上が開設から30年以上が経過している。そのため経年劣化により構造物に有害なひび割れ、漏水、鉄筋の露出、天井版等の不具合が発生していないか点検を行う等、その維持管理に多くの労力が払われている。

また地下街は耐震性に優れていると言われているが、阪神淡路大震災では三宮地下街における吊り天井の脱落、東日本大震災では仙台駅地下通路での漏水など大規模な震災では被害が発生している事例もあり、近年の耐震基準についての配慮も必要である。

大規模地震等の自然災害発生時において、地下街が有する都市機能を継続的に確保するために必要な耐震診断、補強の方法や、避難計画検討の方法などについては、国土交通省「地下街の安心避難対策ガイド（改訂版）」としてまとめられており、このなかで地震、浸水対策として躯体の補強、長寿命化が求められている。

また広場などの人流空間は、地上部や近隣ビルの地下階、地下鉄駅など他の構造物との接続部を多数有していることから、これら接続部をどのように施工するかも課題となっている。

3.2.7 その他（防災シェルター、パンデミック時隔離施設等）を地下空間利用とする場合の課題

防災シェルター等の設備は、個人宅の地下設備として販売されているものもあるが、公共インフラとして構築された事例は見受けられない。ノルウェー、フィンランド、スイスなど核シェルターとして地下インフラが構築されている国もあるが、日本においてはまずそれにどのような機能が必要なのか、それを実現するにはどのような地下インフラ設備を構築するのかという点から議論を行う必要がある。

パンデミック時隔離施設については、気流をコントロールする必要性から構造物に気密性が求められる場合も想定される。

またこれらのインフラの運用形態など、インフラ設備そのものの以外の法律的な課題についても検討しなければならない。

【参考文献】

- 1) 国土交通省：国土地盤情報検索サイト（参照2022.1）
<https://www.kunijiban.pwri.go.jp/>
- 2) 東京都建設局：東京の地盤（GIS版）（参照2022.1）
<https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/jigyo/tech/start/03-jyouhou/geo-web/00-index.html>
- 3) KG-NET：関西圏地盤ネットワーク（参照2022.1）
<https://www.kg-net2005.jp/index/index.html>
- 4) 環境省：全国地盤環境ディレクトリ（参照2022.1）
<http://www.env.go.jp/water/jiban/directory/index.html>
- 5) (一社)日本建設業連合会、2020年中における建設工事に伴う地下埋設物・架空線事故の発生状況、p.4、2021

第4章 地下インフラを再構築するための地下空間の建設技術

4.1 地下空間の拡幅施工

地下空間の拡幅施工は、既設地下構造物の側壁の一部を撤去して開口を設置し、開削工法や非開削工法を用いて構築した新たな躯体を接続し、地下空間を拡幅する。その拡幅範囲はポンプ室や換気ダクトのようなスポット的な事例から地下鉄の駅など連続的で広範囲な拡幅事例までである。

また、近年は周辺の諸条件から非開削での施工が求められることが多く、山岳工法やパイプルーフ工法等の各種非開削工法を融合した技術やシールドトンネル工法との組み合わせによる新しい技術が求められている。ここでは都市部の地下空間の拡幅施工を対象とし、山岳トンネルでの断面拡幅は対象外とする。

4.1.1 設計上の課題

既設地下構造物の側壁の一部を撤去する場合、開口となる周辺の部材には撤去された側壁がこれまで負担していた荷重が再配分され、部材の断面力が大きく変化する。このため、多くの場合で部材の補強が必要となる。

補強方法として、①負担が増える部材を直接補強する、②開口部を補強して開口の影響を軽減する、③作用する荷重を減らす、④開口部付近を再構築する、等があり、現地への適応性や工期、経済性を考慮して補強方法を選定する必要がある。②開口部を補強して開口の影響を軽減するには補強桁の設置が考えられるが、内空断面に制限等がある場合には影響が少ない鋼板や炭素繊維による壁内部からの補強、あるいは内空断面に影響を与えない壁外部からの補強などの補強方法を選定する必要がある。

大断面の地下空間拡幅にあたっては、その施工時に荷重系および構造系が逐次複雑に変化するため、完成時の性能評価に加えて施工時の各ステップにおける性能を適切に評価することが必要となる。

4.1.2 施工上の課題

地下空間の拡幅に際し、既設地下構造物や周辺の構造物に影響を与えない施工方法の採用が必要となる。地盤条件や地下水の条件によっては、遮水や土圧の低減、地盤の補強等を目的とした地盤改良工法や地盤凍結工法、出水リスクの低減や仮設の構造安定性の確保のための地下水位低下工法などの補助工法の検討が必要となる。

また、既設構造物と新たに拡幅した構造物の接続箇所では構造が複雑となるため止水対策が課題となる。非開削工法による施工の場合は完全な外防水の施工は難しく、導水工により漏水を処理することも考慮する必要がある。

4.1.3 地下空間の拡幅事例

大規模な地下空間の拡幅事例として、地下鉄道の2本のトンネル間を切抜けて駅ホームを構築する工事や、地下道路のトンネルを切抜けて出入口部やジャンクション部を施工する工事がある。

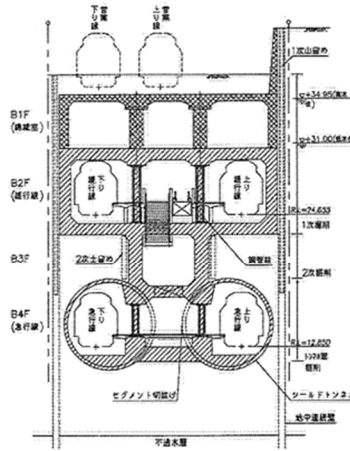
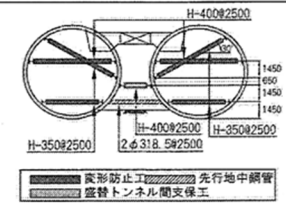
「シールドトンネルにおける切掘げ技術、土木学会、トンネルライブラリー第 28 号」では、鉄道工事、道路工事、共同溝および下水道工事におけるシールドトンネルの切掘げ事例を 35 事例調査し、その施工事例の工事概要、構造概要、施工概要、設計概要等について掲載している。また、事例のうち 12 事例について設計方法および施工方法の詳細を記載している。表 4.1.3-1 に調査した切掘げ施工事例の一覧（35 事例）を、表 4.1.3-2 に記載してある施工事例の概要の一例を示す。また、表 4.1.3-3 に設計方法および施工方法の詳細を記載した 12 事例の一覧を示す。

表 4.1.3-1 調査した切掘げ施工事例の一覧（35 事例）

工 事 名 称	切掘げ方法	工 事 期 間						
		1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020
鉄 道 工 事	1 東京メトロ千代田線新御茶ノ水駅	非開削	1966.11～1969.07					
	2 東京メトロ千代田線国会議事堂前駅	非開削	1969.02～1972.11					
	3 東京メトロ有楽町線永田町駅	非開削	1971.02～1974.06					
	4 東京メトロ半蔵門線永田町駅	非開削	1975.08～1978.12					
	5 東京メトロ半蔵門線三越前駅	非開削	1985.08～1990.04					
	6 東京メトロ南北線永田町駅	非開削	1990.03～1995.11					
	7 東京メトロ副都心線西早稲田駅	非開削					2004.01～2009.01	
	8 東京メトロ副都心線池袋駅	非開削					2007.03～2007.10	
	9 東京メトロ上野中央通り地下歩道	部分非開削					2006.07～2009.03	
	10 大阪市営地下鉄谷町線阿倍野駅	非開削	1974.03～1979.10					
	11 JR東日本京葉線八丁堀駅	開削	1985.03～1990.03					
	12 都営地下鉄大江戸線新宿駅	開削	1990.08～1998.02					
	13 東京臨海高速鉄道りんかい線大井町駅	部分非開削				1997.03～2003.10		
	14 小田急電鉄小田原線下北沢駅	非開削				2011.03～2012.10		
道 路 工 事	1 首都高速中央環状線上下線連絡坑	非開削					2002.03～2005.02	
	2 首都高速中央環状線上下線換気所トンネル接続部	開削					2001.08～2005.03	
	3 首都高速中央環状線中環換気所トンネル接続部	開削					2003.12～2006.11	
	4 首都高速中央環状線神山町換気所トンネル接続部	部分非開削					2005.01～2007.08	
	5 首都高速中央環状線西池袋出入口トンネル接続部	開削					2002.03～2007.11	
	6 首都高速中央環状線代々木換気所トンネル接続部	開削					2001.03～2008.03	
	7 首都高速中央環状線初台南出入口トンネル接続部	開削					2002.03～2008.03	
	8 首都高速中央環状線西新宿JCT北連絡路(開削切掘げ区間)	開削					2002.03～2008.03	
	9 首都高速中央環状線西新宿JCT北連絡路(非開削切掘げ区間)	非開削					2002.10～2008.03	
	10 首都高速中央環状線西池袋出入口分岐合流部	開削					2002.03～2008.05	
	11 首都高速中央環状線富ヶ谷出入口(開削切掘げ区間)	開削					2002.03～2009.04	
	12 首都高速中央環状線初台南出入口分岐合流部	開削					2002.03～2009.06	
	13 首都高速中央環状線富ヶ谷出入口(非開削切掘げ区間)	非開削					2003.08～2009.09	
	14 首都高速中央環状線西新宿JCT南連絡路	開削					2002.03～2009.12	
	15 首都高速中央環状線緊急車両用Uターン路	非開削				2011.02～2012.06		
	16 首都高速中央環状線大橋JCT E匝道連絡路	開削				2009.09～2014.03		
	17 首都高速中央環状線大橋JCT南連絡路	非開削				2007.05～2014.11		
	18 首都高速中央環状線五反田出入口(非開削切掘げ区間)	非開削				2007.02～2015.03		
	19 首都高速中央環状線大橋JCT北連絡路	部分非開削				2008.08～2015.03		
共同溝	仙台東部共同溝	非開削					2006.05～2006.12	
下水道	港区赤坂一丁目、六本木二丁目付近再構築工事	非開削					2001.05～2003.03	

出典：シールドトンネルにおける切掘げ技術¹⁾

表 4.1.3-2 鉄道の施工事例(14)：小田急電鉄小田原線下北沢駅

工事概要	工事名称	小田急電鉄小田原線代々木上原駅梅ヶ丘駅間線増連続立体交差工事	
	切上げ用途	・連続立体交差および複々線（2線2層構造）の駅部	
	切上げ方法	開削	
	工事期間	2011年3月～2012年10月	
構造概要	切上げ構造	切上げ高(m)	約8.00
		切上げ幅(m)	約18.00～19.00
		切上げ延長(m)	約180.00
		本体壁	あり
		中柱(間隔)	なし
		土被り厚(m)※	約13.00～20.00
		地下水位(m)※	約12.00～16.00
	セグメント	種別	鋼製
		外径(m)	8.10
		桁高(m)	0.30
		幅(m)	1.25
		離隔(m)	2.39
			
施工概要	施工環境	切上げ採用理由	・当該施工箇所は、地上に営業線および既存の駅舎が存在し、かつ他路線と近接していることから、作業スペースに制約があり、全線に開削工法を採用することが困難であったため、下層の構築にあたってはシールド工法を用いた。 ・上下層の駅舎を接続しなければならなかったため、その構築にあたっては開削切上げ工法を採用した。
		代表的な土質(平均N値)	上総層(N≧50)
	計測	計測目的	・接合ピースを用いたRC躯体-鋼製セグメント接合構造の安全性を確認するため
		計測項目	・鋼製セグメント主桁切断時における増分曲げモーメント
	補助工法	トンネル補強	内部支保工
		地山補強	トンネル間支保工
		止水対策	薬液注入工法
設計概要	設計条件	切上げ躯体	鉄筋コンクリート
		セグメント接合部	剛結合
		荷重モデル	・側方土圧：主働土圧（仮設時）、静止土圧（完成時、側方土圧係数0.45） ・地盤反力係数：90MN/m²（トンネル半径方向の地盤反力係数×トンネル半径）
	構造解析	状態	完成時（単独）
		解析手法	二次元FEM解析
		モデル化範囲	セグメント+躯体
		セグメント	梁要素
		切上げ躯体	平面ひずみ要素
		地盤	地盤ばね
		仮設部材	梁要素
	主な出典		
		1) 小川司, 中込芳雄, 田口龍二, 日高直俊: 営業線下を施工する小田急小田原線双設シールドトンネル工事, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.14, pp.213-220, 2009. 2) 岩田基成, 佐藤賢一郎, 本多清暢, 福田隆正, 小田隆志: 小田急小田原線複々線化事業における施工手順を考慮したセグメントの設計—その1: 工事概要および設計方針・その2: 駅部切上げ部—, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.62, pp.159-162, 2007. 3) 中込芳雄, 梶原誠, 田口龍二, 福田隆正, 高橋 健吾: 小田急小田原線複々線化事業におけるセグメント継手部実物大模型実験—その1: 実験概要・その2: 実験結果—, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.63, pp.25-28, 2008. 4) 長崎浩, 富岡和隆, 清野隆太郎, 関根啓介, 尾関孝人: 双設シールドトンネル間の小口径推進工の計画と施工, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.66, pp.105-106, 2011.	

※ 土被り厚および地下水位は、セグメント天端からの距離

出典：シールドトンネルにおける切上げ技術¹⁾

表 4.1.3-3 設計方法および施工方法の詳細を記載した事例一覧

	施 工 事 例	着 目 点
鉄 道	東京メトロ副都心線 雑司が谷～西早稲田間中間ポンプ室	・曲線パイプルーフを用いた中間ポンプ室の非開削切上げ工法の事例
	東京メトロ上野中央通り地下歩道	・非円形シールドセグメントの地下歩行者道の部分非開削切上げ工法の事例
	小田急電鉄小田原線下北沢駅	・施工過程を考慮した設計による駅部の開削切上げ工法の事例
	都営大江戸線新宿駅	・商業ビル等が密集した地域における駅部の開削切上げ工法の事例
	東京メトロ千代田線新御茶ノ水駅	・かんざし桁を用いた駅部の非開削切上げ工法の事例
道 路	首都高中央環状線富ヶ谷出入口（開削切上げ区間）	・施工過程を考慮した設計による道路分岐合流部の開削切上げ工法の事例
	首都高中央環状線富ヶ谷出入口（非開削切上げ区間）	・施工過程を考慮した設計による道路分岐合流部の非開削切上げ工法の事例
	首都高中央環状線初台南出入口	・耐震設計の対象となる土層に位置する道路分岐合流部の開削切上げ工法の事例
	首都高中央環状線大橋 JCT 北連結路	・道路を供用しながら接続を実施した道路分岐合流部の部分非開削切上げ工法の事例
	首都高中央環状線大橋 JCT 南連結路	・都市 NATM を併用した道路分岐合流部の非開削切上げ工法の事例

出典：シールドトンネルにおける切上げ技術¹⁾

「東京外かく環状道路（関越～東名）」における本線シールドトンネルとランプシールドトンネルをつなぐ地中拡幅部（東名 JCT 部、中央 JCT（南）部、中央 JCT（北）部、青梅街道 IC 部の 4 箇所）では、市街化された地域の地下部における前例のない非開削による大規模な切上げ工事となるため、国土交通省が地中拡幅部における技術開発業務を発注した。技術開発成果として公表された地中拡幅工法と工法概要および受注者の一覧を表 4.1.3-4 に示す。

表 4.1.3-4 地中拡幅技術開発業務の工法一覧（その 1）

工法名	工法概要	受注者
円周シールド連結工法	本線シールド下部や横に構築した発進基地から円周シールド機でリング状の構造物を順次構築し、それらを連結して、本線トンネルを包括した大断面トンネルを構築する	大林組
ビック K アーチ工法	トンネル上部に多数の鋼製のパイプを地中に挿入することでアーチ上部の地盤を支える「曲線パイプルーフ支保構造」又は「注入式長尺鋼管先受け工」と、極めて強度の高い鋼製のアーチで構築する「高剛性ビッグアーチ支保構造」の二重の支保構造を設置し、トンネル部を掘削し、本設覆工構造を構築する	鹿島建設

表 4.1.3-4 地中拡幅技術開発業務の工法一覧（その 2）

工法名	工法概要	受注者
まがるーふ工法	4 本の導坑トンネルから曲線函体推進により、地山に鋼製の外殻を連続的に構築後、函体内部にコンクリートを充填し、本体覆工構造を構築する	熊谷組
K パイプリング工法	導坑シールドから地中に向かって多数の曲線の鋼製パイプを推進（曲線パイプルーフ工法）させ、導坑内で接続して円環状のパイプの壁を構築して地盤の安定性を確保しながら、周辺の土を凍らせる「凍結工法」にて止水を行い、本体覆工構造を構築する	鹿島建設
CS-SC 工法 (Circular Shell structure system with Shield tunnels by Cuttable segments)	ランプシールド側部から円周シールドで発進基地を構築し、その後発進基地から先行シールド（φ4.05m×18 本、切削セグメント＋鋼製セグメント）及び先行シールドを切削しながら掘進する後行シールド（φ4.05m×18 本、鋼製セグメント）を施工し、それらを組み合わせて、大断面の外殻部を構築する	前田建設工業
SR-JP 工法 (Shield Roof Pre-supporting System for Junction as Permanent Structure)	構築する空間を包むように複数の小口径シールド（外殻シールド）を掘進し、この間を凍結工法等の地盤防護によって切り開いて外周の本設覆工構造を構築する	清水建設
WJ(Wing Joint segment)セグメント＋シールドルーフ工法	ランプシールドトンネルを延伸させ、小口径シールド（シールドルーフ）を先受けとして拡幅部を掘削し、本線・ランプシールドのセグメントを拡幅セグメント（WJ セグメント）と接続することで、断面の一部として利用し、大断面を構築する	安藤・間
地下水対応型継手による覆工の外殻先行構築工法	ランプシールド側部から構築した発進基地より、継手により相互に連結された角型鋼管を推進工法にて縦断方向に施工（全 28 エレメント）することで地中拡幅断面を構築する	戸田建設
円周シールドと大口径密閉型パイプルーフを組合わせた地中拡幅工法	円周シールドにより構築された発進基地から、仮設支保工として大口径パイプルーフを施工し、内部を掘削しながら、本設覆工構造である SRC 覆工を構築する	奥村組
3C（Cut and Connect in a Circle）先行覆工地中拡幅工法	本線シールドトンネルより構築した発進基地より、小口径シールドを先行と後行の 2 段階に分けてラップ施工し、シールド内部を鉄筋コンクリートにより連結することで、円形の大口径先行覆工を構築する	西松建設・日本シビックコンサルタント

出典：国土交通省関東地方整備局記者発表資料²⁾

【参考文献】

- 1) (公社)土木学会：シールドトンネルにおける切掘り技術，トンネルライブラリー第28号，2015年10月
- 2) 国土交通省関東地方整備局：記者発表 『東京外環トンネル地中掘削部における技術開発業務』，2015年12月22日（参照2021.12）
https://www.ktr.mlit.go.jp/gaikan/pdf/press_pdf/2015/h27_1222_press.pdf

4.2 地下空間の接続施工

新たな地下構造物と既設地下構造物との接続では、既設構造物の側壁の一部を撤去する開口はスポット的となる場合が多く、一般的には拡幅施工に比較すると開口面積は小さくなる。施工方法は地下空間の拡幅施工と同様に非開削での施工が求められる場合が増えてきており、山岳工法やパイプルーフ工法等の各種非開削工法を融合した技術やシールドトンネル工法との組み合わせによる新しい技術が求められている。

4.2.1 設計上の課題

既設構造物への開口による影響により、地下空間の拡幅施工と同様に部材の補強等を検討する必要がある。また、接続のための新たな構造物は既設構造物と地震時の変形挙動が異なる事が多く、変形挙動の相違を考慮した接続方法の検討が必要となる。

4.2.2 施工上の課題

地下空間の接続施工に際しても拡幅施工と同様に、既設地下構造物や周辺の構造物、人や車の流れに影響を与えない施工方法の採用が必要となる。土被りが小さい場合は工事費および工期の比較から開削工法が採用されることが多いが、地下埋設物が多い場合や夜間でも地上交通量が多い場合、土被りが大きい場合には非開削工法が採用される。非開削工法ではパイプルーフ工法などの補助工法を併用した山岳工法や推進工法、シールドトンネル工法を用いて施工することが多く、接続構造物の延長や断面の形状・大きさ、地盤条件等に応じて施工方法を決定する必要がある。

地盤条件や地下水の条件によっては、遮水や土圧の低減、地盤の補強等を目的とした地盤改良工法や地盤凍結工法、出水リスクの低減や仮設の構造安定性の確保のための地下水位低下工法などの補助工法の検討が必要となる。

4.2.3 地下空間の接続工法

地下空間の接続施工事例として地下街と周辺ビルとを接続する地下通路工事や下水道などの雨水管路や共同溝の分岐・接続部の施工があげられる。新設する地下通路工事では利用者の利便性を考慮して土被りの小さい浅い位置に計画されることが多く、大手ゼネコン各社では非開削の施工方法として少ない土被りで施工可能な矩形推進工法や矩形シールド工法を開発している。矩形シールド工法例として、地下鉄銀座駅と商業施設「GINZA SIX」を接続する地下通路工事で採用された、EX-MAC 工法を図 4.2.3-1 に示す。

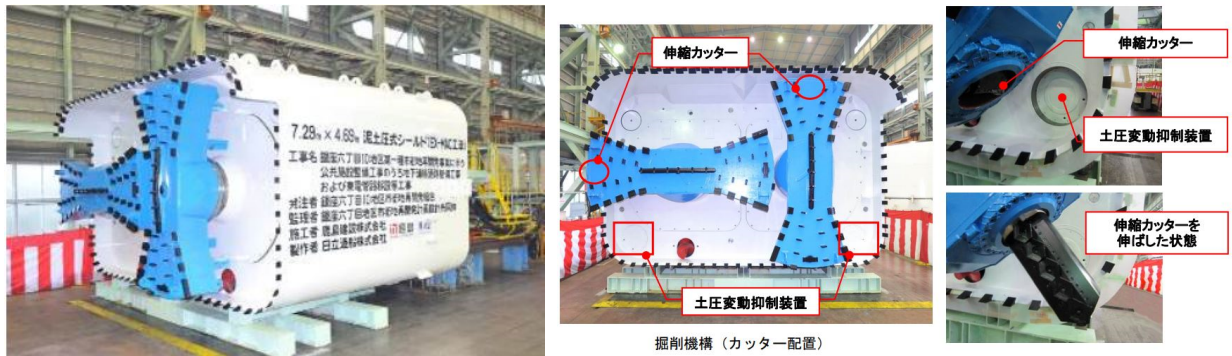
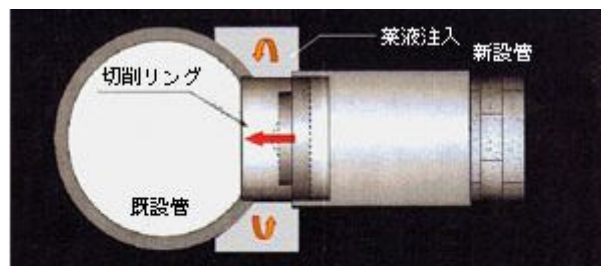


図 4.2.3-1 密閉型矩形シールド「EX-MAC 工法」

出典：鹿島建設 HP¹⁾

一方、下水道シールドトンネルにおいて流入管などの地中接合を行う場合、一般的に大深度での施工となり、トンネル坑内から凍結工法や大規模な地盤改良を実施して施工していることが多い。

最近では安全面やコスト面からシールド機で直接接合する工法も開発され実用化されている。シールド機で直接接合する工法の例として、シールド機に格納装備した切削ビット付きの鋼製リング（切削リング）を回転させ、既設管を直接切削・貫入し、新設トンネルをT字形に機械接合する、地中接合法機械式T字接合シールド工法（T-BOSS 工法）を図 4.2.3-2 に示す。



工法の概要図



掘削時

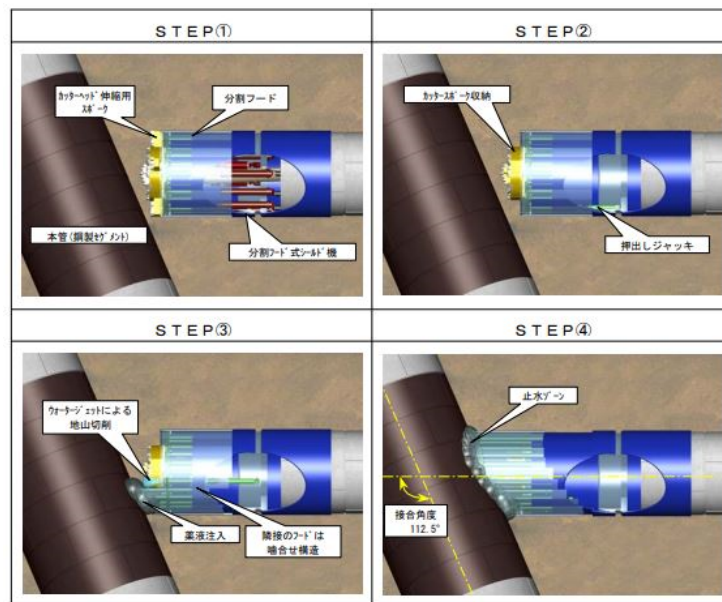


接合時

図 4.2.3-2 地中接合法機械式T字接合シールド工法

出典：東京都下水道サービス HP²⁾

前述のシールド機で直接接合する工法は直角接合が基本であり、斜め方向からの接合や非管芯接合では大規模な地盤改良などの補助工法を併用する必要がある。新たな斜め地中接合を可能とする工法として、分割フード式シールド接合法を図 4.2.3-3 に示す。



施工手順

ステップ①：所定の位置まで掘進

ステップ②：カッターヘッド伸縮用スプークを収納してシールドジャッキ等を解体し、分割フードにロータリシリンダおよび押し出しジャッキを設置

ステップ③：本管との離隔の小さい箇所の分割フードからウォータージェット併用で本管セグメントまで圧入し、分割フード先端部より薬液注入を行い、本管との接続部の止水を行う。隣接する分割フードの圧入を順次行う

ステップ④：全分割フードについて圧入を繰り返す

図 4.2.3-3 分割フード式シールド接合法

出典：奥村組 HP³⁾

【参考文献】

- 1) 鹿島建設(株)HP、プレスリリース、矩形シールド「EX-MAC」で歩行者専用の地下連絡通路を構築（参照2021.12）
<https://www.kajima.co.jp/news/press/201712/21c1-j.htm?mode=pc>
- 2) 東京都下水道サービス(株)HP、事業内容、機械式T字接合シールド工法（T-BOSS工法）（参照2021.12）
<https://www.tgs-sw.co.jp/business/technical/c01/c07/>
- 3) (株)奥村組HP、奥村組の技術、分割フード式シールド接合法（参照2021.12）
<https://www.okumuragumi.co.jp/technology/engineering/pdf/s06.pdf>

4.3 既存施設との近接施工

川合（2019）¹⁾は推進工事における近接施工について以下の通り概説している。近接施工とは、既設構造物の機能に対し重大な影響を与える場所や施工であり、施工機械による損傷などの直接的な損傷ではなく、地盤の変位や変形による影響を対象とした施工としている。近接度合いの可否判定は、既設構造物の所有者により定められており、新設構造物の形式や施工法と地盤条件から、影響が及ばない範囲、まれに影響が発生する範囲、および影響があり対策が必要となる範囲などに区分されているのが一般的である。また、離隔距離は施工方法、掘削断面、土質条件などから管理者と協議を行い、十分安全な距離としなければならないとされている。

都市部では、既設構造物をかわして新設構造物を建設する際に、その上下左右で近接施工が生じる。このため、本項では、都市部における開削工法や非開削工法での近接施工に限定する。

4.3.1 設計・施工上の課題

佐々木・石井（2007）²⁾は、近接施工となる場合には、近接する既設構造物の許容値・管理値を定め、施工中の管理を行う必要があるとし、近接施工における課題を以下の通り述べている。

（1）許容値と管理値

鉄道をはじめとする管理者側の各企業体で、近接施工における許容値・管理値を定めているが、本来は管理側・施工側の技術者が協議し、条件に応じて定めるべきものである。許容値・管理値が安全側に画一的に定めることは、厳しすぎる許容値・管理値を強いることにつながる。許容値・管理値を変位で規定する場合、多くは相対変位が問題になるにもかかわらず、絶対変位で管理する事例が大多数であり、これも厳しすぎる許容値・管理値の一因となっている。

また、複数の工事が同時に進行する場合、あるいは地下水位の季節変動など工事以外の自然現象の影響を受ける場合の許容値・管理値の設定法、さらには、指針類を持たない既設構造物の取扱い方法などが、今後の課題として挙げられる。

（2）予測解析技術

近接施工では、近接構造物へ及ぼす影響を適切に評価する技術が求められている。近年では有限要素法を用いた解析も広く用いられているが、以下のような課題が残されている。特に、対象構造物の許容値・管理値が極めて小さい場合には、解析結果に対する過大な期待は禁物であり、得られた数値をそのまま施工管理に用いることについては十分な配慮が必要である。地盤物性のばらつきの評価に関しては、信頼性理論の導入も一つの解決手法となろう。

- ① 地盤物性の評価（ばらつき・非線形性など）
- ② 二次元モデルへの簡略化
- ③ 施工方法・手順のモデル化
- ④ 解析手法（逐次解析法・強制変位法、土・水連成解析法）の使い分け

通常の予測解析では強制変位法を用いる場合が多い。この場合、別途計算により山留め挙動を適切に予測しておく必要があるが、近接構造物がある場合の山留め壁に作用する側圧に関しても、必ずしも明確にされているとはいえない。また、山留め壁の変形を抑えた計画では、リバウンドの影響が卓越することがあるが、近接構造物がある場合のリバウンドの検討方法も明確にされているとはいえない。

地盤変位による既設構造物への影響は、構造特性、老朽度などにより異なる。特に局所的な劣化が認められる場合、その構造物の剛性や耐力を評価することは容易なことではない。今後、評価法を確立していく必要がある。

(3) 計測管理技術

近接施工に伴う計測管理では、周辺構造物の許容値・管理値が厳しいため、通常の計測管理では問題とならない計測値のばらつき・誤差（測定精度・温度変化、ドリフトなど）が問題となる。一般的な変位計測では、1～2mm程度が、長期にわたって信頼できる測定精度と考えられ、要求される許容値・管理値との間に精度に対する認識の乖離が認められる。

また、測定値から工事以外の影響を除外するためには、可能な限り早期の事前計測が必要となるが、諸般の事情から初期値の計測は工事直前に設定されることも多い。

既設構造物の安定性を計測結果に基づいて管理するためには、既設構造物の簡便な応力測定技術の確立が望まれる。

(4) 施工管理技術

既設構造物への影響は、施工の方法、手順、巧拙によっても大きく異なる。切梁（きりばり）にゆるみがあれば当然山留め壁の変位は大きくなり、また、特に軟弱地盤では、切梁の架設時期に遅れが生じると、山留め壁は計画時に想定した以上の変位が生じることが知られている。したがって、施工に際しては、当初の計画を遵守するのみならず、山留め壁の変位（周辺への影響）を極力小さくする工夫が必要となる。そのための、施工上のノウハウを蓄積していくことが必要となる。

一方、計画段階で周辺への影響が大きいと予測された場合には、対策工を計画する必要があるが、対策工の施工による周辺への影響に関して、未だ未解明な部分も多いのが現状である。

4.3.2 地下空間の近接施工技術・事例

(1) 代表的な周辺地盤の地盤改良や耐震補強工法

近接施工時の影響軽減策としては地盤改良や周辺地盤を補強する耐震補強工法が考えられる。周辺地盤を補強する耐震補強工法には、周辺地盤を高剛性化することで地中構造物に作用する地震時土圧を低減する工法と周辺地盤の液状化を防止する工法がある。既設構造物への影響が少ない代表的な耐震補強工法は以下の通りである。

表 4.3.2-1 代表的な周辺地盤を補強する耐震補強工法

原 理	代表的な工法	構造物への適用性		備 考
		高剛性化	液状化	
密度増大	サントコンパクションパイル工法(静的)	×	△	大型機械で広い用地必要
置 換	置換工法	△	△	対象が浅い場合に適用
固 結	深層混合処理工法(機械攪拌)	△	△	大型機械で広い用地必要
	深層混合処理工法(噴射攪拌)	○	○	
	薬液注入工法	×	○	
遮 断	遮断壁工法	×	○	液状化砂の回り込みを防ぐ
地下水低下	ディープウェル工法	×	○	継続稼働が必要
排水促進	グラベルドレーン工法	×	△	大型機械で広い用地必要

○：適用可能、△：条件が合えば適用可能、×：適用不可

出典：ENAA(2021)³⁾

(2) アンダーピニング工法

既設構造物に影響を与えないで地下鉄や道路などを構築する工法をアンダーピニング工法という。鹿島建設(株)HPより、地下鉄銀座線の直下に地下歩道と駐車場を建設する、上野地下歩行者専用道及び上野広小路駐車場建設一工区土木工事の事例⁴⁾を紹介する。

東京都台東区の上野地区では、道路地下空間の有効利用のために、中央通りの直下では、地下歩道と地下駐車場を整備する事業がある。計画した施設は、地下2、3階が地下駐車場、地下2階の一部と地下1階が歩行者専用道路で、地下1階の一部に東京地下鉄銀座線を抱え込むような構造となっている。延長105mのうち、本土木工事では南50mの建設を担当した。銀座線を支えるためのアンダーピニング工法として、銀座線の鉄道函体の真下に鉄骨桁44本を1.1m間隔に設置。順番に鉄骨桁上に載せ替えていった。

東京地下鉄銀座線の上野駅～上野広小路駅間は1930年に営業を開始した区間である。およそ築76年が経過し、現在も運転間隔2～3分の運行を実施している。この鉄道函体を補強・防護も行い、地下鉄運行の安全を確保している。

駐車場・歩行者専用道(B-B断面)

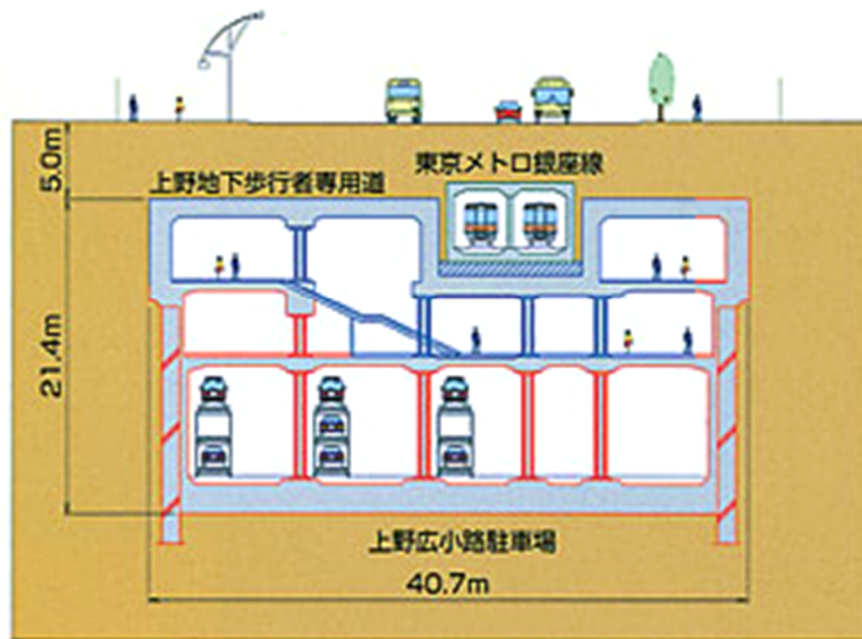


図 4.3.2-1 断面図

出典：鹿島建設 HP⁴⁾



図 4.3.2-2 施工位置図

出典：鹿島建設 HP⁴⁾

(3) 三次元常時微動トモグラフィ

近接施工や小土被り条件下に対する施工における地質リスクを三次元で可視化し、信頼性の高い BIM/CIM 地質モデルを構築することは、建設プロセスの生産性向上に寄与できると考えられる。このような技術として三次元常時微動トモグラフィ⁵⁾が有効である。三次元常時微動トモグラフィ⁵⁾とは交通や経済活動によって生じる微弱な振動を測定し、地盤内部の伝播特性から地質構造を推定する物理探査手法である。応用地質グループ⁵⁾で開発したケーブルレス/GPS 機能付きの収録器を地表に多数配置することで、三次元での地質構造把握が可能になる。国道事業における当該技術の適用事例(図 4.3.2-4)では、現地の地形状況から埋没谷などの複雑な埋没地形が推定されたため、ボーリング調査に加えて三次元常時微動トモグラフィを実施。限られた本数のボーリング調査のみでは把握が困難な沖積層の複雑な分布や深度を可視化するとともに、ここから信頼性の高い BIM/CIM 地質モデルを構築することで、地盤改良工事のコスト低減にも貢献した。実測値に基づく三次元地質モデルは、地質リスクの抽出や最適な地質調査地点の選定に活用が可能なほか、BIM/CIM に統合することでその後の施工プロセスにおけるリスクコミュニケーションの円滑化や地域住民への説明資料としても有効なツールとなる。

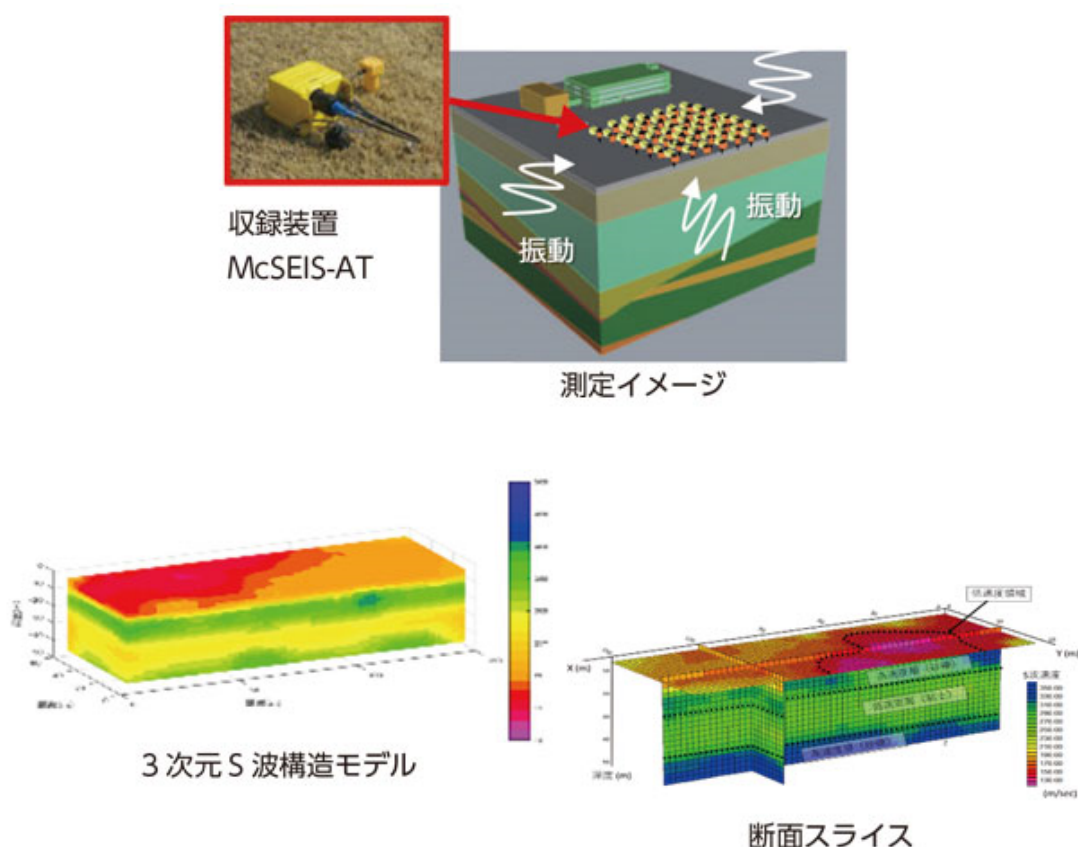


図 4.3.2-3 三次元常時微動トモグラフィ

出典：応用地質 HP⁵⁾

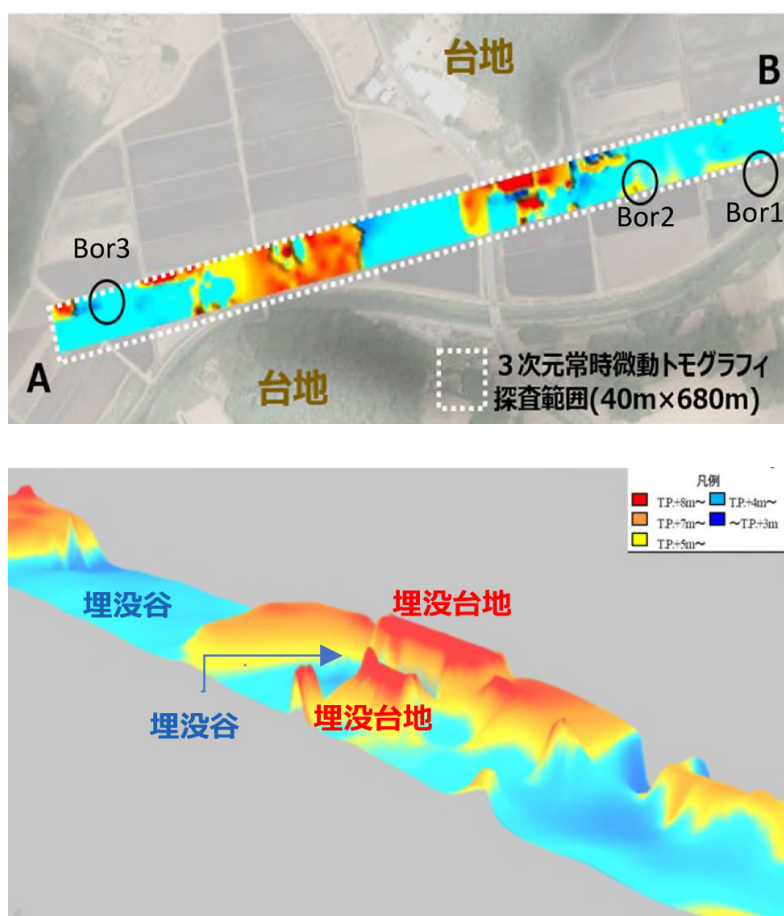


図 4.3.2-4 三次元常時微動トモグラフィの探査結果事例。上図が沖積層下端面の標高コンタを、下図が探査結果の鳥瞰図（沖積層下端面を表したもの）を示す

出典：応用地質 HP⁵⁾

【参考文献】

- 1) 川合 孝：特集「小土被りと近接施工」 総論「小土被りと近接施工」掘削による影響評価，月刊推進技術，Vol.33, No.3 (2019)
- 2) 佐々木俊平・石井雄輔：近接工事の調査・設計・施工技術 2.近接施工の現状と課題，土と基礎，Vol. 55, No.4(2007)
- 3) (一財)エンジニアリング協会：(2020M-035)2020 年度 都市域地下空間の立体的利用に関する調査研究 報告書(2021 年 3 月)
- 4) 鹿島建設(株)HP column 都市部の地下構造物建設で活躍する・・・アンダーピニング工法 (参照 2021.12)
https://www.kajima.co.jp/news/digest/may_2007/tokushu/toku04.html
- 4) 応用地質(株)HP 建設事業における地質リスクを可視化
 ～3次元常時微動 トモグラフィ～ (参照 2021.12)
<https://www.oyo.co.jp/services/infrastructure-maintenance/3d-tremor-tomography/>

4.4 小土被り条件下に対する施工

川合（2019）¹⁾は推進工事における小土被り条件下に対する施工について以下の通り概説している。推進工法における最小土被りは、想定される土の緩み高さを考慮して一般的に $1.0 \sim 1.5D$ (D : 管外径) 程度とされている。また、これよりも土被りの少ない場合には、地表面の陥没あるいは地盤沈下、または逸泥、噴発等が発生する危険性が高くなるため、土質条件、補助工法および防護工法等について十分配慮しなければならないとしている。小土被りは、道路や地上構造物に対しての近接施工ともいえ、両者とも掘削に伴う地盤変位による影響についての評価・対策が求められている。また、推進工法では管きよ築造以外に、立坑築造時においても対象となる既設構造物がある場合には近接施工について考えなくてはならない。

本項では、小土被りの定義を $1.0 \sim 1.5D$ (D : 掘進機外径) 以下とし、小土被り条件下の非開削工法による施工に限定する。

4.4.1 設計・施工上の課題

(公社)土木学会（1983）²⁾によると、土かぶりの浅い地山では、掘削による応力解放、地下水の排除、掘削による緩みなどにより地表が沈下し施工の困難さが増すばかりではなく地表や地中の他の構造物へも影響する可能性がある。このような地点では、切羽が到達する前から、他の構造物も含めて計測を実施する必要がある。事前に十分な調査を行い、適切な対策をとり、十分な注意を払って施工すれば地表沈下はかなり減少させることができるものと思われる。

このため、小土被り条件下のトンネル設計・施工上の課題として地表沈下対策が考えられる。(公社)土木学会（1983）²⁾は、このような地表沈下対策として地表沈下の要因、地表沈下対策の基本及びその観点に基づく地表沈下対策の分類を以下の通り示している。

(1) 地表沈下の要因

要因 1：掘削に伴う切羽前方の緩み

掘削による応力解放に伴う変形

要因 2：支保工（矢板）背面の空隙

要因 3：支保工の変形・沈下

要因 4：緩みの時間的増大

要因 5：その他、圧密、塑性流動、湧水

(2) 地表沈下対策の基本

上記の要因に基づけば、地表沈下対策の基本は、「トンネル掘削に伴う地山の緩みをできる限り防止する」ことを主目的とし、またこの緩みは掘削に伴って切羽前方に発生し、切羽通過後時間の経過とともに増大して行っていくものであるから、「できる限り早い時期に緩みの増大を防止するための対策を施工する」ことである。

(3) 地表沈下対策の分類

1) 緩みの防止

- ① 掘削に伴う切羽前方の緩みを防止する。
- ② 掘削後の緩みの原因となる支保工（矢板）背面の空隙をなくする。
- ③ 支保工の変形・沈下を防止する。
- ④ 緩みは時間とともに増大するもので、できる限り早い時期にこれを拘束する。

2) その他

- ① 圧密沈下の防止、沈下による構造物への被害を防止するために行う沈下の伝達を防止する縁切り工。

4.4.2 地下空間の小土被り条件下に対する施工技術・事例

(公社)土木学会（1983）²⁾によると、地表沈下防止対策は、それぞれの要因に対応して種々の工法があり、それらの工法は施工場所に関しては、「地表から行うものと坑内から行うもの」、施工時期に関しては、「掘削に先立って行うもの、掘削時・支保工時に切羽で行うもの、および掘削・支保工建込み後に行うもの」に分類される（表 4.4.2-1）。これら対策工法は単一の要因に対してのみ効果を発揮するものでなく、その効果は種々の要因にまたがって機能する場合が多く、また各施工時期に対応した対策工法をうまく組み合わせれば地表沈下を防止するうえできわめて効果があげられるものと思われる。なお、本件に関連する調査技術は、前述の 4.3.2 項(3)目に示した。

表 4.4.2-1 主要沈下要因と施工時期別沈下防止対策工法

施工時期	対応する要因	対策の内容	対策工法
Ⅰ 掘削に先立って（主として地表から施工）	要因 1	地山強度の増大 切羽前方の緩み防止	地山注入，地上からの縦ボルト打設 パイプルーフ
	5	圧密沈下・湧水による地山流失の防止 縁切り工	地山注入 種々の柱列杭，注入による地中壁
Ⅱ 掘削時または支保工時	1	地山強度の増大 切羽前方の緩み防止	切羽からの注入，ロックボルト，吹付けコンクリート フォアールボルティング，メッセル工法，プレカッ ティング工法，鏡止め
	2	掘削後の緩み防止	吹付けコンクリート，ロックボルト，仮巻きコンク リート，裏込めバック填充，プレカッティング工法
	3	支保工の変形・沈下の防止	底板，皿板，支持地盤への注入，仮巻きコンクリート
	4	早期の支保工・覆工	吹付けコンクリート，仮巻きコンクリート
	5	塑性流動に伴う緩み増大の防止	Ⅱ-1 と同じ
Ⅲ 掘削後（支保工建込後）	2	掘削後の緩み防止	支保工ジャッキアップ，裏込め注入
	3	支保工の変形・沈下の防止	根固めコンクリート，ウォールプレート，仮巻きコ ンクリート，吹付けコンクリート
	4	早期覆工	仮巻きコンクリート
	5	沈下を収束させ，完成後の沈下をなくす	裏込め注入

出典：JTA（1981）³⁾

小土被り条件下に対する代表的な推進工法として、泥土加圧シールド工法が挙げられる。シールド工法技術協会 HP⁴⁾を引用し、泥土加圧シールド工法の概要・仕組み・実績を以下に示す。

【泥土加圧シールド工法の概要】

- ① 広範囲の土質に適応性がある：砂層、砂礫層、シルト粘土層、シラス層およびこれらの互層に対しても作泥土材を用いることにより、塑性流動性と不透水性を有する泥土に変換できるので多種多様な土質に広く適用できる。
- ② 沈下を最小限に抑えられる：切羽は泥土によって保持するため地山の変化はほとんどなく、地表面の沈下を最小限に抑えることができる。
- ③ 同時裏込注入が可能である：シールド外周部および作泥土室内は泥土で止水されているため裏込注入材の切羽への回り込みがなく、確実な同時裏込注入が可能である。
- ④ 大深度・高水圧下にも適応できる：最大水圧 7kgf/cm^2 を作用させた掘進実験により、高水圧下での掘進性能を確認しており、深度 50m 以上の大深度地下にも適応できる。

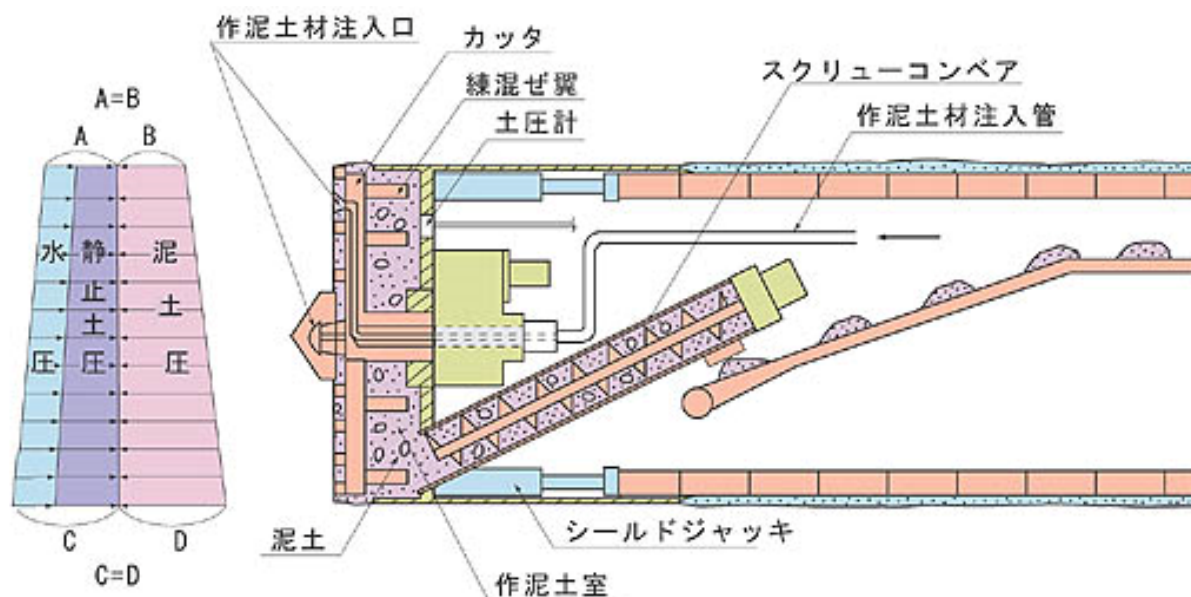


図 4.4.2-1 泥土加圧シールド工法の原理図

出典：シールド工法技術協会 HP⁴⁾

【泥土加圧シールド工法の仕組み】

泥土加圧シールド工法は、地山の変化を最小限に抑えるために、以下の 3 要素に基づいて泥土圧を管理して掘進する。

- ① 土に変換する：カッタで切削した土砂に作泥土材を注入し、それを練り混ぜ翼で強力で練り混ぜて、塑性流動性と不透水性を持つ泥土に変換する。
- ② 泥土により切羽の安定を図る：泥土を作泥土室とスクリーコンベア内に充満さ

せ、シールドジャッキの推力により泥土圧を発生させ、この圧力で地下水圧と土圧に対抗し切羽の安定を図る。

- ③ 泥土圧により掘進管理する：隔壁に取り付けた土圧計により泥土圧を常時測定し、圧力が「泥土圧＝土圧（静止土圧）＋水圧」となるように掘進速度とスクリーコンベアの回転速度を制御することにより、掘進を管理する。

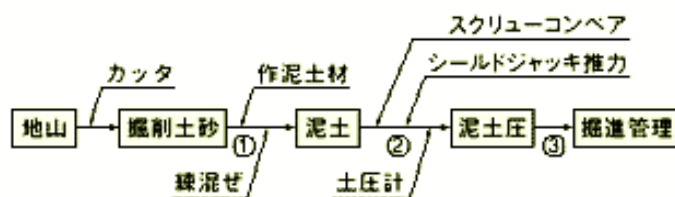


図 4.4.2-2 泥土加压シールド工法の仕組み

出典：シールド工法技術協会 HP⁴⁾

表 4.4.2-2 小土被り（1.0D 以下）の泥土加压シールド工法の主な施工実績

No.	工事名称	発注者	施工場所	工期	土被り H(m)	シールド 外径D(m)	H/D	備考
1	中央環状品川線大井地区トンネル工事	東京都	東京都品川区	2008.06 ～ 2011.06	0.00	13.60	0.00	・地上発進地上到達
2	357号東京港トンネル工事	国土交通省関東地方整備局	東京都品川区	2010.12 ～ 2014.03	3.00	12.20	0.25	・海底横断
3	田原第2幹線三河湾横断シールド工事	中部ガス（株）	愛知県豊橋市	2010.04 ～ 2011.09	0.80	2.13	0.38	・地上発進地上到達 ・海底横断
4	常新、常磐道T他	日本鉄道建設公団	茨城県筑波郡	2000.10 ～ 2003.06	3.60	7.45	0.48	・高速道路盛土直下横断
5	相鉄・JR直通線西谷トンネル他 工事	鉄道・運輸機構	神奈川県横浜市	2010.02 ～ 2014.09	5.00	10.50	0.48	・SENS工法
6	習志野市菊田川12号幹線管渠建設工事その3、その12	日本下水道事業団	千葉県習志野市	1990.11 ～ 1994.02	2.20	4.45×7.65	0.49	・DOT工法

出典：シールド工法技術協会 HP⁴⁾

以下、小土被り条件下の泥土加压シールド工法の施工事例を下記(1)、(2)に示す。前述の 4.4.1 項(3)目によると、これらの工法は主に緩み防止の地表沈下対策である。一方、その他の地表沈下対策であり、沈下による構造物への被害を防止するために行う、沈下の伝達を防止する縁切り工としてアール・アンド・シー（R&C）工法⁷⁾の施工事例を下記(3)に示す。

(1) 泥土加圧シールド工法による海底下・小土被り・軟弱地盤のシールド施工事例

一般国道 357 号東京港トンネルは、東京都品川区東八潮(台場側)から八潮 2 丁目(大井側)を結ぶ首都高湾岸線東京港トンネルに並行した第 3 種 1 級の一般国道であり、357 号東京港トンネル工事は羽田方面行きのトンネル整備事業である。本工事の工事延長は 1,880m で、そのうち海底下を含む 1,470m を泥土加圧シールド工法にてトンネルを構築した。ここでは、松澤他(2014)⁵⁾を引用し、海底下・小土被り・軟弱地盤でのシールド施工事例を紹介する。

本工事の土層縦断面図を図 4.4.2-3 に示す。シールドトンネルの平面線形は、ほぼ直線であり縦断面線形は両立坑から 4%勾配で下り海底部は 0.3%勾配となっている。海底部の土被りは、6~9m であり、シールド機(図 4.4.2-4)の外径 $D_o12.2m$ に対して $0.5 \sim 0.75D_o$ と小土被り条件となっている。また、通過土層は N 値 0 の軟弱粘性土(有楽町層)であり、セグメントの浮上りと共にマシンの姿勢制御等が課題となっていた。

本工事では、海底下・小土被り・軟弱地盤という厳しい施工条件の大断面シールド工法であったが、計画時に追加地質調査を行い、土質条件を十分に把握した上で、考えられるさまざまな問題に対して、大口径リボン式スクリュウ 2 段配置やセグメント浮上り防止重量付加部材設置といった対策を講じたことで通常のシールド工法と同様に安全な掘進管理を進めることができた。

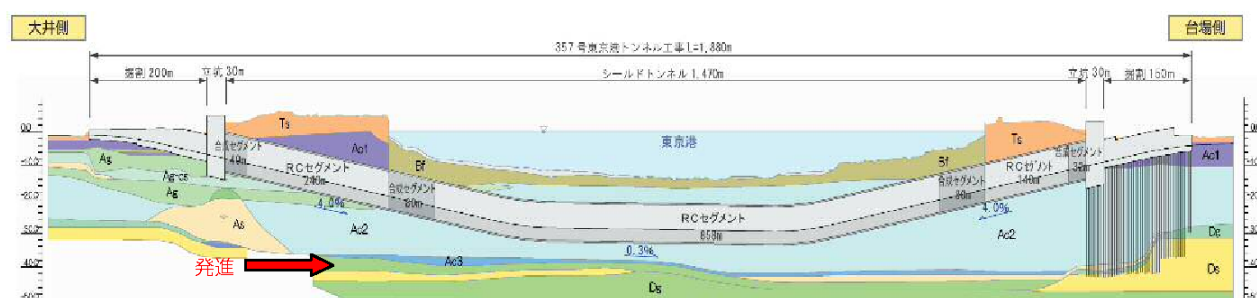


図 4.4.2-3 土層縦断面図

出典：松澤他(2014)⁵⁾



図 4.4.2-4 シールド機

出典：松澤他(2014)⁵⁾

(2) 大断面シールド地上発進・地上到達の施工事例

前述の 357 号東京港トンネル工事のうち、ここでは吉田他（2014）⁶⁾を引用し、シールド工法の地上発進・地上到達の施工事例を紹介する。

シールドの発進および到達立坑の位置については、①道路トンネルの非常駐車帯配置、②立坑構築の省力化、③シールドトンネルの安定性を考慮した結果、両立坑ともシールドトンネルの土被りが 3m 確保できる箇所に決定した。

シールド機の地上発進に関しては、「切羽圧管理」「線形管理」「裏込め充填管理」を考慮して施工を行った。発進側と同様に到達側もシールド機の地上到達を実施した。道路シールドトンネルでは、発進立坑～到達立坑間をシールド工法で構築後、アプローチ部を開削工法で施工する方法が一般的だが、本工事のようにアプローチ部を利用した地上発進～地上到達を行うことで、大幅な工期短縮の可能性があることが確認された。



図 4.4.2-5 地上発進状況（左写真）と地上到達状況（右写真）

出典：吉田他(2014)⁶⁾

(3) アール・アンド・シー（R&C）工法

以下、(株)奥村組(2014)⁷⁾を引用し、アール・アンド・シー（R&C）工法を紹介する。

(株)奥村組で実績を重ねたスライディングカルバート（SC）工法と、植村技研工業(株)の箱形ルーフ工法が 1996 年に統合し、アール・アンド・シー（R&C）工法と改称された。本工法は、供用中の鉄道や道路の路線下に、列車や車の流れを阻害することなくボックスカルバート構造物を非開削で築造するアンダーパス技術である。矩形断面のパイプルーフ(箱形ルーフ)で軌道荷重や道路荷重を受けた後、敷設するボックスカルバートの上面を箱形ルーフの上面に一致させ、箱形ルーフを押し抜きながらボックスカルバートを推進(又は牽引)する。箱形ルーフの上面にはフリクションカット用の鋼板(FC プレート)を載置しておき、ボックスカルバート推進時には、これを地中に残置することによって地山との縁を切り、上部地盤の変状を防止する。この箱形ルーフと FC プレートの効果によって、低土被りでボックスカルバートを築造することができる。

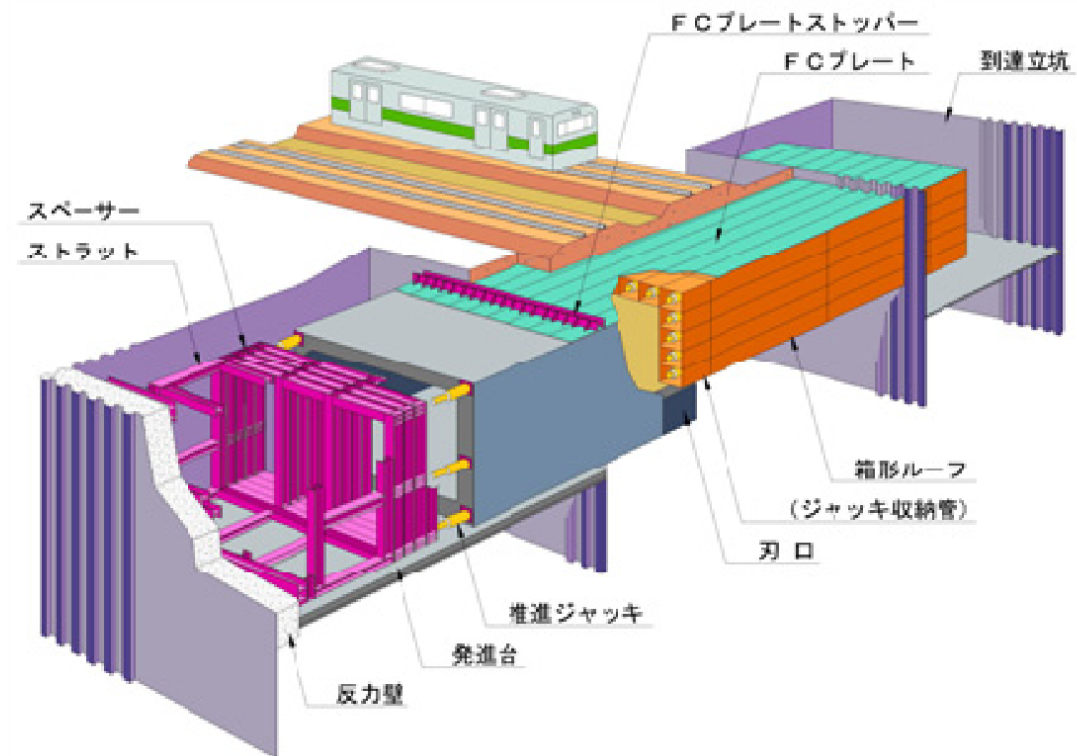


図 4.4.2-6 アール・アンド・シー工法概要図

出典：奥村組(2014)⁷⁾



図 4.4.2-7 設置された箱形ルーフ（左写真）と土被り浅く設置された函体（右写真）

出典：奥村組(2014)⁷⁾

【参考文献】

- 1) 川合 孝：特集「小土被りと近接施工」 総論「小土被りと近接施工」掘削による影響評価，月刊推進技術，Vol.33, No.3 (2019)
- 2) (公社)土木学会：トンネルの地質調査と岩盤計測(1983)
- 3) (一社)日本トンネル技術協会：山岳トンネルの地表沈下防止および不良地盤対策に関する調査研究（その2）報告書（1981.3）
- 4) シールド工法技術協会 HP 工法概要：泥土加圧シールド工法(参照 2021.12)
http://shield-method.gr.jp/construction-method/cm_ol_dk/
- 5) 松澤尚利・畦地拓也・吉田英信・佐藤卓哉・植松正美・中津留寛介・安部剛史・串田慎二・岩端一也：海底下・小土被り・軟弱地盤のシールド施工実績，土木学会第 69 回年次学術講演会(平成 26 年 9 月)，VI-602 (2014)
- 6) 吉田英信・佐藤卓哉・植松正美・中津留寛介・安部剛史・串田慎二・岩端一也：大断面シールド地上発進・地上到達の施工実績，土木学会第 69 回年次学術講演会(平成 26 年 9 月)，VI-603 (2014)
- 7) (株)奥村組：アール・アンド・シー（R&C）工法～鉄道・道路の立体交差工法～(2014)

4.5 大断面施工

都市域の地下空間構築において、大断面化は、社会環境の変化、経済性などの観点からその必要性が生じており、その主な理由は以下のとおりである¹⁾。

〔都市の過密化〕

- ・都市の過密化により、地上に設けていた河川、道路などの大型施設を地下に設ける必要が生じ、施設の使用目的から大断面化の必要性が高まったため

〔経済性〕

- ・施設の大断面化は、小断面トンネルの複数設置に比べ、占用面積の縮小による用地費の節減ができるなど、全体工事費を安くできる利点があるため

都市域において、地下空間を構築する際には、立地や地形・地質などの制約条件から、シールド工法や推進工法などの掘進機を用いた非開削工法、ならびに開削工法を採用する機会が多い。本節では、昨今、採用機会の増加とともに著しい技術進展がみられるシールド工法や推進工法などの掘進機を用いた非開削工法に着目し、大断面の地下空間を構築する建設技術について紹介する。なお、建設技術の紹介にあたっては、「大口径円形シールド工法」、「断面分割工法」、「外殻先行工法」による大断面地下空間の構築技術を取り上げ、それぞれに施工例を示し概要について述べる。

4.5.1 大口径円形シールド工法

シールド工法による施工断面は、従来、外径 8～10m 程度までであったが、昨今の掘進技術の発展とともに、地下貯留管施設や道路トンネルなどとして、次第に大型化した。図 4.5.1-1 から、大口径円形シールドの主な施工実績をみると、1990 年代の神田川地下調整池では外径 13.94m、その後の東京湾横断道路では 14.14m、2020 年頃の東京外環道路（東京外かく環状道路）では外径 16.1m のシールドマシンが採用されている。

ここでは、大口径円形シールド工法による大断面地下空間の構築技術について、東京外かく環状道路（関越～東名）のうち、「東京外かく環状道路本線トンネル（北行）東名北工事^{3),4)}」を取り上げ紹介する。

本線トンネル（北行）東名北工事では、図 4.5.1-2 に示す外径 16.1m のシールドマシンを採用しており、カッターヘッドが外周部と内周部でそれ

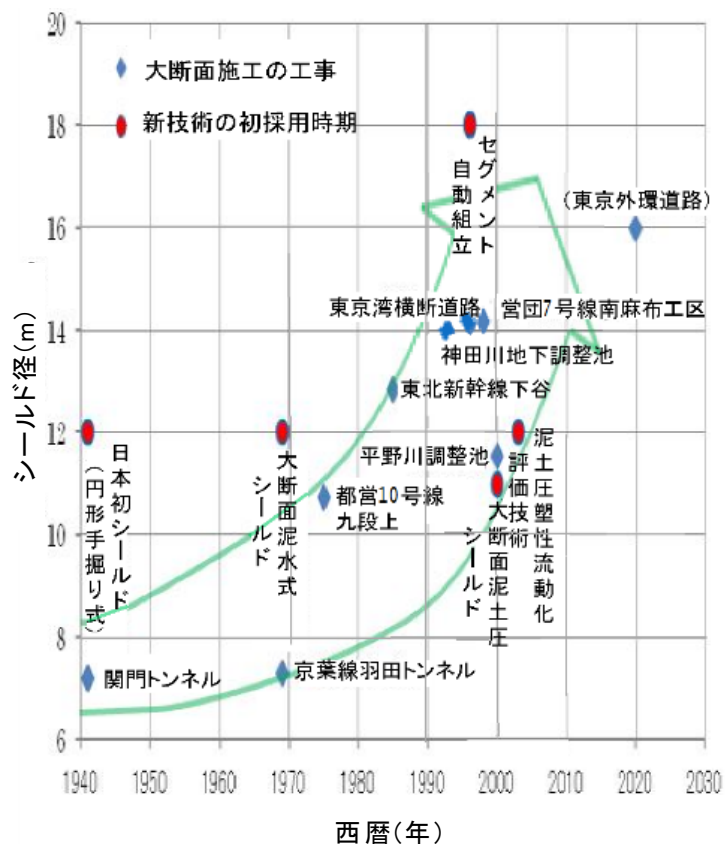


図 4.5.1-1 シールド施工の大断面化

出典：日本建設業連合会²⁾

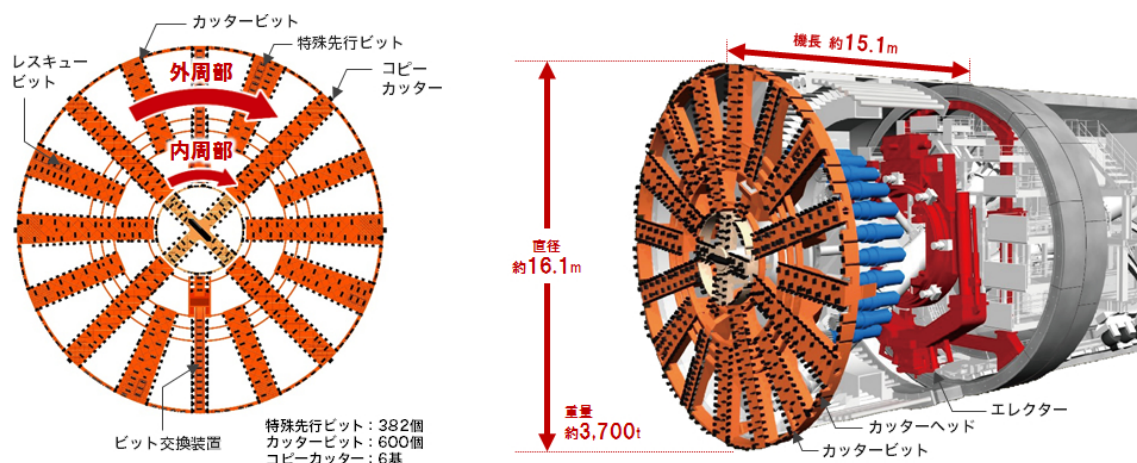


図 4.5.1-2 大口径円形シールドマシン（二重カッター方式）

出典：東京外環プロジェクト³⁾

ぞれ独立して稼働する二重カッター方式となっている。二重カッター方式とすることにより、それぞれ最適な回転速度を保つことで、消費電力量を 30% 程度低減し、掘進速度を 25% 程度向上する。

カッターヘッドに取り付ける多数のビットには工夫が施されている（図 4.5.1-3）。一つのビットは複数の刃で構成されている。強い衝撃がかかる両端の刃にはじん性が高いタイプ、掘削量の多い中心部には摩耗に強いタイプの超硬合金チップが使われている。これにより、長距離掘進に耐える長寿命なビットとなっている。また、長短を付けたビットを段差配置している。これにより、長いビットが摩耗した際には短いビットがその役目を担い、交換を不要とする。

他にも、シールド掘進とセグメント（図 4.5.1-4）組立の同時施工を可能とする機能、添加剤を自動的に注入して掘削土砂の流動性を高め抵抗力を低減して安定的な掘進を可能とするシステム、様々な計測データを統合することで異常発生時の対処方法を自動でガイダンスするモニタリングシステムが搭載されている。

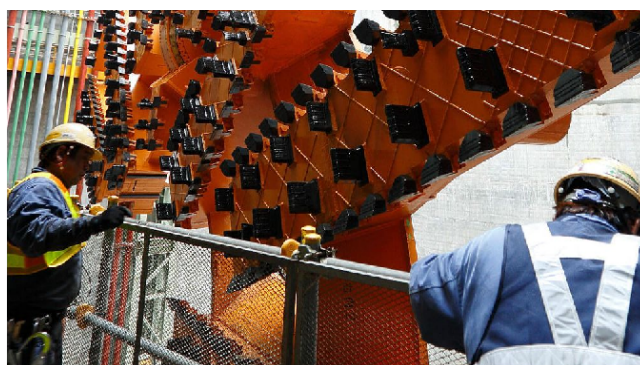


図 4.5.1-3 カッターヘッドに配置された多数のビット

出典：大林組⁴⁾



図 4.5.1-4

シールド機で取り付けるセグメント

出典：大林組⁴⁾

4.5.2 外殻先行工法

外殻先行工法では、地下空間の外殻部を推進工法やシールド工法により小口径のトンネルを並列して先行構築し、内部を後から一括して掘削することで非円形の大断面地下空間を構築する。外殻先行工法による地下空間構築技術について、具体的な工法を挙げると、URT 工法、PCR 工法、URUP 工法、MMST 工法など数多くの工法があり⁵⁾、既存施設のアンバーパスへの適用のみならず、地中拡幅施工（リボルバー工法⁶⁾など）への適用拡大がみられる。

外殻先行工法による地下空間構築技術について、ここでは、

「首都高速道路 高速神奈川 6 号川崎線トンネル工事⁷⁾」から、

MMST 工法を取り上げ紹介する。MMST 工法の施工手順を図

4.5.2-1 に示す。MMST 工法では、まず、トンネル外殻部を複数

の小断面シールドマシンにより先行掘削し、単体トンネルを鋼

殻で構築する。単体トンネルの施工完了後、鋼殻の一部を撤去し、

単体トンネル間の土砂掘削、配筋およびコンクリートの打込みを行い、

単体トンネル同士を相互に接続する。この作業を順

次繰り返し外殻部躯体を構築した後、立坑より内部断面を掘削し、大断面トンネルを構築

する。MMST 工法で使用するシールドマシンを図 4.5.2-2 に、単体シールド施工時の留意点を表 4.5.2-1 に示す。

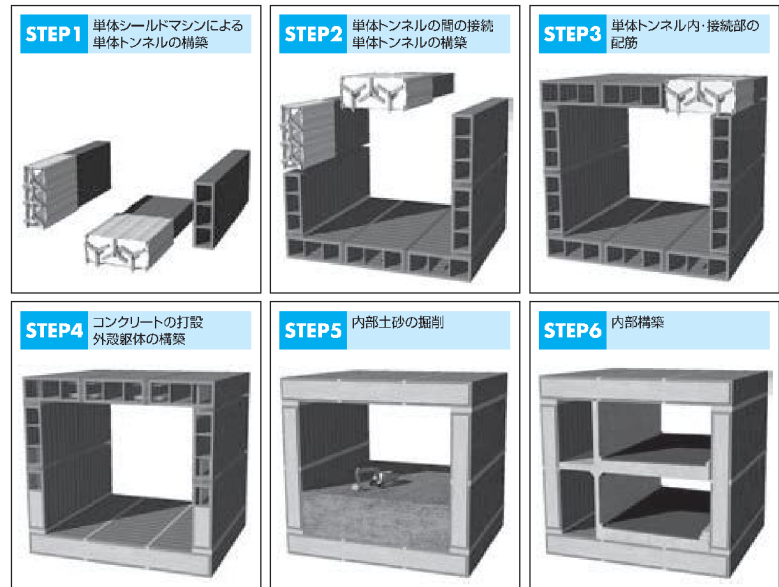
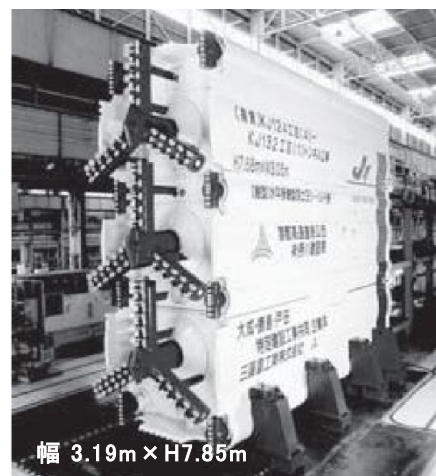


図 4.5.2-1 MMST 工法の施工手順

出典：水野克彦⁷⁾



幅 8.80m × 高さ H9.90m



幅 3.19m × H7.85m

図 4.5.2-2 単体シールドマシン（横型、縦型）

出典：土木学会⁵⁾

表 4.5.2-1 単体シールド施工時の留意点

シールドマシン	横型と縦側に分かれており、コストと工程のバランスを考慮して複数台で複数ずつの単体トンネルを施工するのが望ましい。
掘削機構	泥土圧シールドを採用することで、土被りの小さい掘削に対応しやすい。
裏込め注入	掘削時に発生する地山と鋼殻（一般的にはセグメント）の間のテールボイドが円形シールドに比べて大きく、注入作業時には圧力に加え注入量の管理が重要である。
姿勢制御	特にローリングの姿勢制御が困難なため、シールドマシンの前胴ブロックを縦型は上下 2 分割、横型は左右 3 分割として姿勢制御機能の充実を図るなどの工夫が必要である。
シールド掘進	土被りが大きく地山が安定している底版のシールドから施工を行い、側壁～頂版の順で施工を行うのがよい。

出典：土木学会⁵⁾

4.5.3 断面分割工法

断面分割工法では、アンダーパスなどの大断面トンネルを小断面に等分割し、小型の矩形掘削機を用いて隣接する鋼殻同士を接触させた状態で掘削し、内部に躯体を構築することで小断面トンネルを一体化して大断面の地下空間を構築する。具体的な技術としてハーモニカ工法が挙げられる。

ハーモニカ工法は、従来のパイプルーフ工法や外殻先行型の非開削工法では難しい曲線施工に対応し、従来の非開削工法が不得意な 100m を超える距離の掘削を行う。また、大口径シールド工法の課題（多大な機械設備費や土被り制限）を解決する 1 つの工法として位置付けられる。ハーモニカ工法の施工順序図を図 4.5.3-1 に示す。施工 STEP は以下のとおりである。

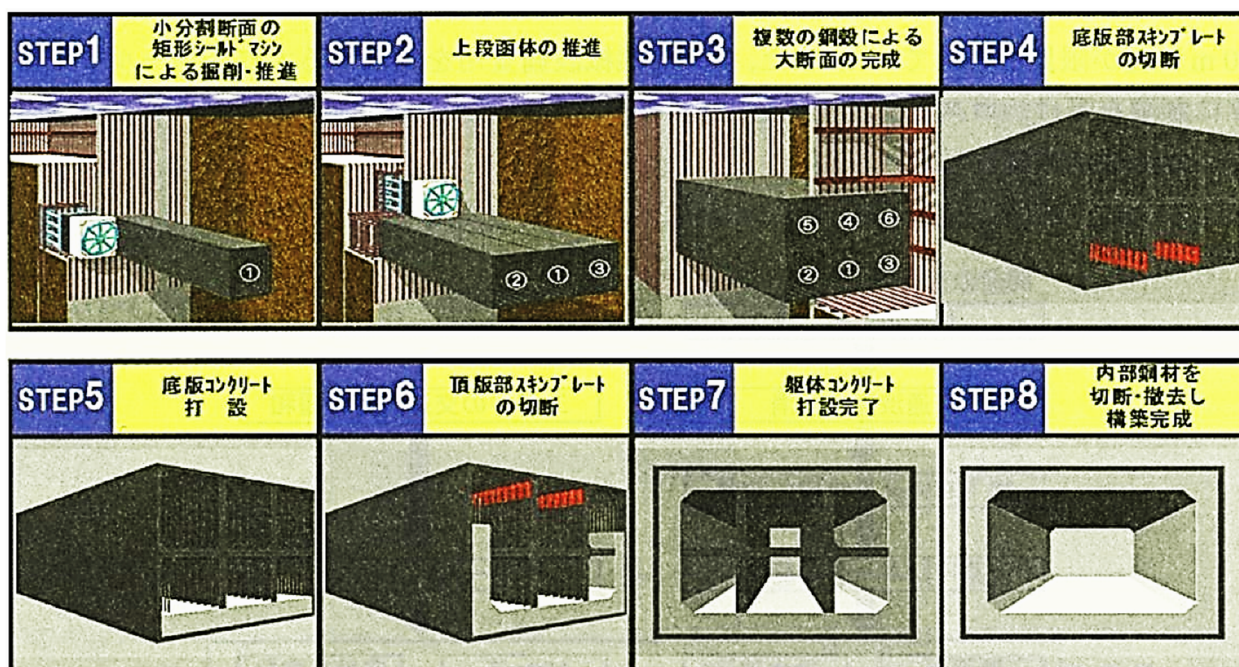


図 4.5.3-1 ハーモニカ工法の施工順序図

出典：土木学会⁵⁾

[STEP1]

- ・基準となるトンネル①を掘削する。

[STEP2]

- ・基準トンネルに隣接するトンネル②～③を掘削する。

[STEP3]

- ・上段トンネル④～⑥を順次掘削する（複数の函体により大断面が完成する）。

[STEP4～STEP7]

- ・トンネル間の止水処理を行った後、鋼殻の一部（スキンプレート、縦リブ）を部分的に撤去しながら鉄筋を組み立て、コンクリートを打ち込み、大断面のトンネルを構築する。

[STEP8]

- ・コンクリートの養生後、内部の鋼殻（主桁・縦リブおよびスキンプレート）を切断・撤去し、仕上げを行う。

ハーモニカ工法の主な施工実績を表 4.5.3-1 に、同表中の「国道 1 号線原宿交差点立体工事⁸⁾」で採用した掘削機の外観を図 4.5.3-2 に示す。近年では、ハーモニカ工法の需要も増加し、一般的なハーモニカ工法のみならず、上床版、下床版あるいは側面のみ施工に部分的に使用する事例、また、単体トンネルの覆工体である鋼殻の本体構造物としての利用や 2m×2m の小型矩形掘進機を縦・横に組み合わせ連結して利用することで工程短縮ならびにコスト縮減を図った事例（図 4.5.3-3、圏央道桶川北本地区函渠その 1 工事⁹⁾）がある。

表 4.5.3-1 ハーモニカ工法の施工実績

施工事例	用途	施工条件	線形	函体数	延長	躯体寸法 mm (函体寸法 mm)
(仮称) 外苑東通り地下通路 ③整備工事	地下通路	道路下	H : 直線 V : R=190 m	4 函体	30 m	5500×4000
(仮称) 外苑東通り地下通路 ①整備工事	地下通路	道路下	H : 直線 V : 直線	6 函体	40 m	7450×5300
西大阪延伸線建設工事土木工 事 (第 3 工区)	鉄道	道路下	H : 直線 V : 直線	4 函体	21 m	9800×7350
国道 1 号線原宿交差点立体工 事	道路	道路下	H : R=320 m V : R=1000 m	10 函体	73 m	18600×7250
第 2 ターミナル駅増築工事 (北側)	鉄道	道路下	H : 直線 V : 直線	4 函体	38 m	6500×7050
府中 3・4・7 号線と京王線と の立体交差工事	道路	鉄道下	H : 直線 V : R=1800 m	5 函体	67 m	(15990×3120)
圏央道桶川北本地区函渠その 1 工事	道路	道路下	H : 直線 V : 直線	9 函体	44 m	27870×10020
外環自動車道田尻工区	道路	道路下	H : R=62 m V : 直線	5 函体	65 m	(18400×3980)

※ () はハーモニカ工法を部分的に使用したためハーモニカ工法の函体全断面寸法を記載

出典：土木学会⁵⁾

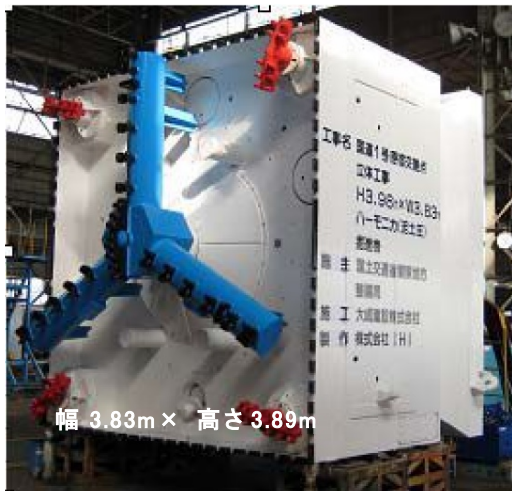


図 4.5.3-2 ハーモニカ掘削機
出典：大成建設⁸⁾

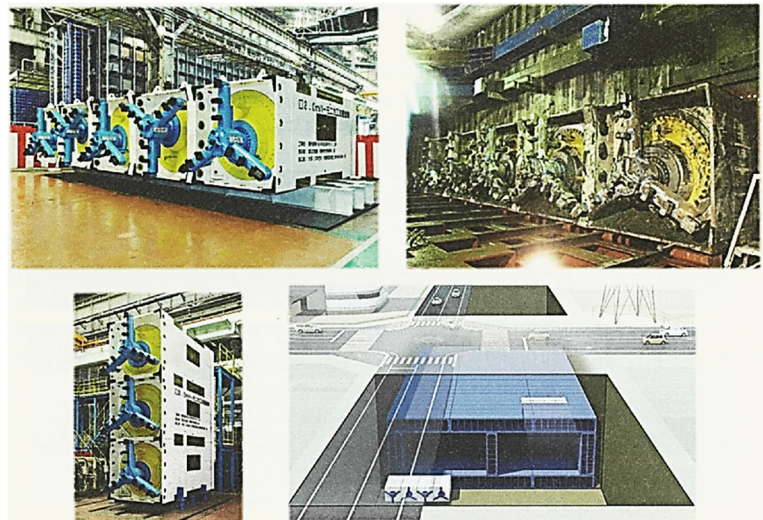


図 4.5.3-3 □-2m×2m 小型掘進機連結使用例
出典：土木学会⁵⁾

【参考文献】

- 1) 最新のシールドトンネル技術編集委員会：最新のシールドトンネル技術，(株)技術書院，1990.11
- 2) (一社)日本建設業連合会：建設イノベーション～建設現場における省力化・省人化～，2015.4，
<https://www.nikkenren.com/sougou/10thaniv/pdf/06-05-01.pdf>
- 3) 東京外環プロジェクト：本線トンネル（北行）東名北工事（参照 2021.11），
<http://tokyo-gaikan-project.com/construction/c04.php>
- 4) (株)大林組：首都圏を地下でつなぐ日本最大のシールド工事が動き出す（参照 2021.11），
<https://www.obayashi.co.jp/thinking/detail/project41.html>
- 5) (公社)土木学会：特殊トンネル工法，pp.Ⅱ-53～Ⅱ-62，丸善，2019.1.20
- 6) (一財)国土技術研究センター：建設技術審査証明事業（一般土木工法）リボルバー工法〔概要書〕，2015.9
- 7) 水野克彦：首都高速川崎縦貫線の MMST 工法，DOBOKU 技士会東京，第 46 号，pp.8-17，2010.4
- 8) 宮地孝ほか：ハーモニカ工法によるアンダーパス施工，土木学会第 66 回年次学術講演会，VI-027，pp.53-54，2011
- 9) 山田亮ほか：ハーモニカ工法マルチタイプの施工実績，土木学会第 71 回年次学術講演会，VI-363，pp.725-726，2016

4.6 特殊断面施工

都市域の地下空間構築において、断面の多様化は、断面の最適化、開削工法の省略などの観点から、その必要性が生じている¹⁾。

[断面の最適化]

- ・鉄道複線トンネルは直径約 10m の断面を必要とするが、複円形シールドを採用することにより、断面を約 10% 縮小することが可能となるなど、施設の使用目的によっては、円形以外の断面が合理的になるため

[開削工法の省略]

- ・電力および通信管路ではケーブルの接続や分岐が必要となり、従来は人孔を設けて対応していたが、管路の深層化に伴い人孔の設置が割高となるため、地中において一部区間の断面を拡大することが必要になったため
- ・鉄道施設では、地中切掘り工法により、単線並列トンネルを結びプラットフォームを設けるなど、開削トンネルを省略することができるため

都市域において、地下空間を構築する際には、立地や地形・地質などの制約条件から、シールド工法や推進工法などの掘進機を用いた非開削工法、ならびに開削工法を採用する機会が多い。本節では、昨今、採用機会の増加とともに著しい技術進展がみられるシールド工法に着目し、断面の最適化の観点から、特殊断面シールド²⁾により特殊断面の地下空間を構築する建設技術について紹介する。建設技術の紹介にあたっては、**図 4.6-1** に示す特殊断面シールドの分類から、「複円形シールド」、「矩形シールド」による特殊断面の地下空間構築技術を取り上げ、それぞれに施工例を示し概要を述べる。

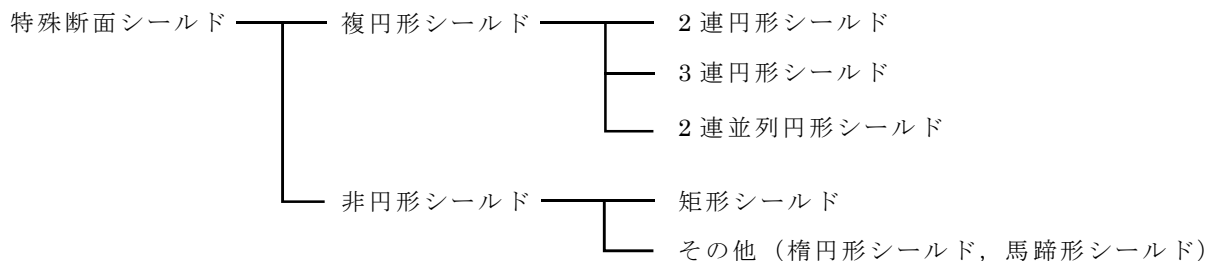


図 4.6-1 特殊断面シールド工法の分類

出典：土木学会²⁾

4.6.1 複円形シールド工法

複円形シールド工法は、二つ以上の円を組み合わせた形状のシールドマシンを用いて掘削する工法である。複円形シールド工法では、構築物に適した形状に近い断面のトンネルを構築できるため、合理性や経済性の面で、大断面の円形シールド工法に比べ有利である。一方で、補強のための中柱が必要であったり、円形シールド工法に比べ掘進時のローリングに対し厳しい管理が必要となる。

複円形シールド工法のうち、代表的な工法を挙げると、MF シールド工法（**図 4.6.1-1**）、DOT 工法（**図 4.6.1-2**）などがあり、これらの工法は主に掘削機構の相違によって分類される。複円形シールド工法の主な実績を表 4.6.1-1 に示す。

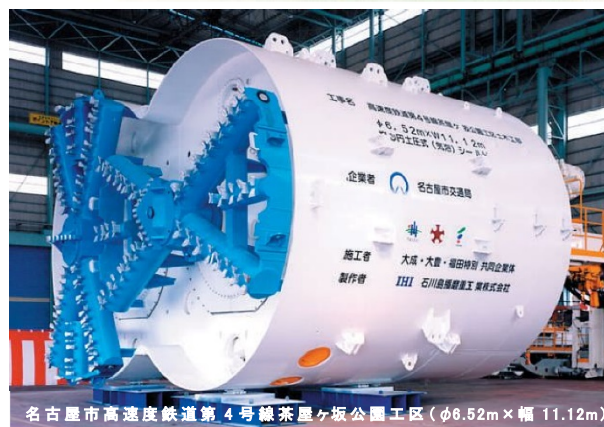
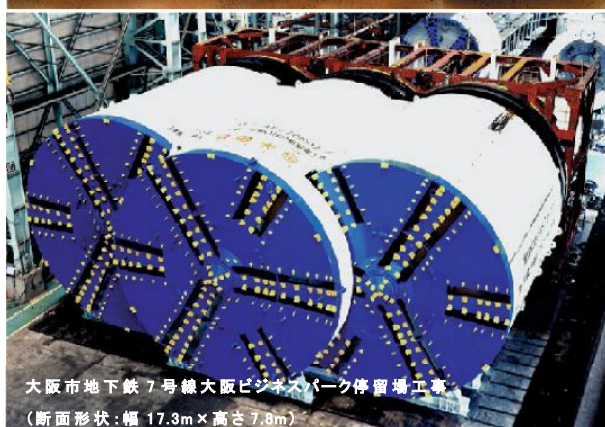
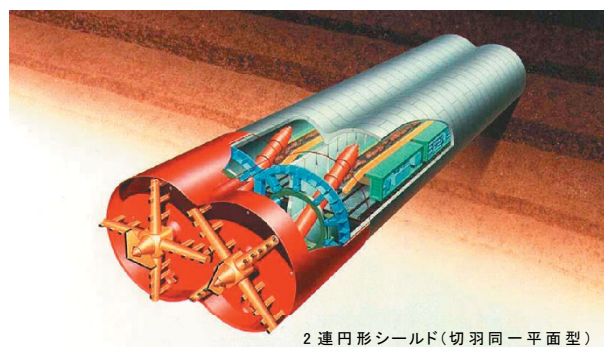
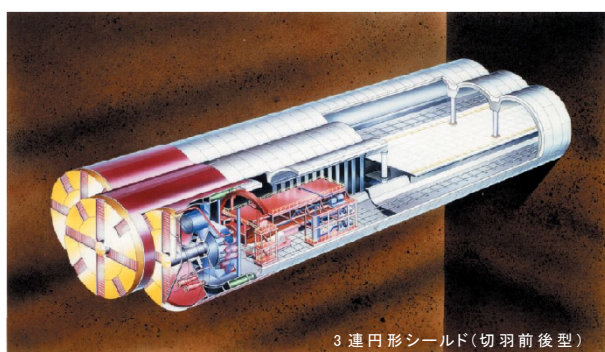


図 4.6.1-1 MF シールド工法

出典：シールド工法技術協会³⁾

図 4.6.1-2 DOT 工法

出典：シールド工法技術協会⁴⁾

表 4.6.1-1 複円形シールドの主な実績

番号	断面の種類	トンネル 断面形状	シールド 形式	土質	地下水压 (kN/m ²)	シールド形状 全高×全幅 (m)	施工 延長 (m)	用途
1	2連円形		泥土圧	粘性土, 砂質土, 礫	310	φ6.52×11.12 切羽同一平面型	1 238	鉄道
2	縦2連並列円形 地中分岐後単円		泥水式	シルト, 砂質土, 粘性土	180	φ6.24×3.29 切羽同一平面型	736 929	下水道
3	横2連並列円形 地中分岐後単円		泥水式	細砂, 砂質シルト, シルト混り細砂	400	φ9×13.27 切羽同一平面型	2 323 1 017	下水道
4	横2連並列		泥土圧	砂質シルト, 粘土	250	φ6.42×11.62 切羽同一平面型	1 580	鉄道
5	3連円形		泥水式	粘性土, 砂質土, 礫	290	φ8.84×17.44 切羽前後型	275	鉄道駅
6	3連円形		泥水式	粘性土, 砂質土	260	φ10.04×15.84 切羽前後型	120	鉄道駅

出典：土木学会²⁾

4.6.2 矩形シールド工法

矩形シールド工法は、トンネルの断面を矩形（四角形）に掘削する工法であり、地下施設の使用目的に応じた合理的な断面の地下空間を構築することが可能である。一方、円形シールド工法に比べて、「トンネルの掘削が複雑になる」、「ライニングに作用する曲げモーメントが大きくセグメントの断面が大きくなる」、「掘進時のローリングに対して厳しい管理が必要になる」など、対応すべき技術的な課題は多い。

矩形シールド工法は、主に掘削機構の相違によって、偏心多軸方式（図 4.6.2-1）、回転軸偏心方式、複合円形方式（図 4.6.2-2）、揺動カッター方式（図 4.6.2-3）、オーバーカット方式、ドラムカッター方式（図 4.6.2-4）などに分類される。矩形シールド工法の主な実績を表 4.6.2-1 に示す。



図 4.6.2-1

矩形断面シールド（偏心多軸方式）

出典：シールド工法技術協会⁵⁾



図 4.6.2-2

矩形断面シールド（複合円形方式）

出典：鹿島建設⁶⁾

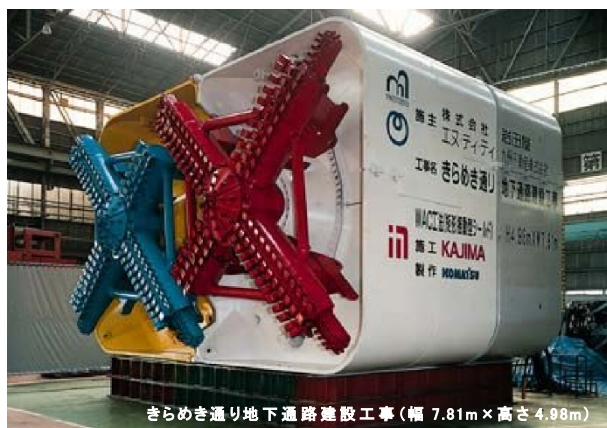


図 4.6.2-3

矩形シールド（揺動カッター方式）

出典：鹿島建設⁷⁾

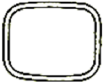


図 4.6.2-4

矩形シールド（ドラムカッター方式）

出典：鹿島建設⁸⁾

表 4.6.2-1 矩形シールドの主な実績

番号	断面の種類	トンネル 断面形状	シールド 形式	土質	地下水压 (kN/m ²)	シールド形状 全高×全幅 (m)	施工 延長 (m)	用途
1	矩形(横長)		泥土圧	ローム層・砂層	20～40	6.8×5.7 偏心多軸方式	509	下水道
2	矩形(横長)		泥土圧	シルト, 砂質土, 砂礫	50	3.83×4.28 回転軸偏心方式	98	通路
3	円弧状矩形 (横長)		泥土圧	粘性土, 砂層	210	8.66×9.96 複合円形方式	739	鉄道
4	矩形(横長)		泥土圧	粘性土, 砂礫	160	6.87×10.24 揺動カッター方式	760	鉄道
5	矩形(縦長)		泥土圧	砂礫ローム, 砂礫	150	6.8×5.7 オーバーカット方式	175	鉄道
6	矩形(横長)		泥土圧	固結シルト, 砂礫, 細砂, シルト	46～205	7.74×10.64 ドラムカッター方式	577	鉄道

出典：土木学会²⁾

【参考文献】

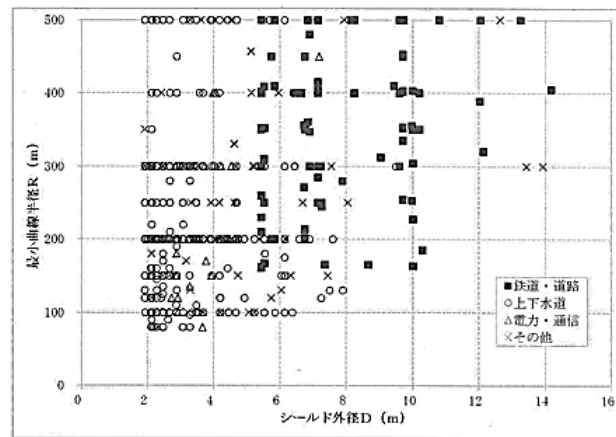
- 1) 最新のシールドトンネル技術編集委員会；最新シールドトンネル技術，(株)技術書院，1990.11
- 2) (公社)土木学会；トンネル標準示方書 [共通編]・同解説／[シールド工法編]・同解説，2016.8
- 3) シールド工法技術協会；MF シールド工法 詳細パンフレット（参照 2021.11），
http://shield-method.gr.jp/wp/wp-content/uploads/doc_dt_mf.pdf
- 4) シールド工法技術協会；DOT 工法 詳細パンフレット（参照 2021.11），
http://shield-method.gr.jp/wp/wp-content/uploads/doc_dt_dot.pdf
- 5) シールド工法技術協会；偏心多軸シールド工法 -技術資料-，2020.8
http://shield-method.gr.jp/wp/wp-content/uploads/doc_tec_dpl.pdf
- 6) 鹿島建設(株)；地下鉄 13 号線用の複合円形シールド機が完成！（参照 2021.11）
<https://www.kajima.co.jp/news/press/200506/17c1fo-j.htm>
- 7) 鹿島建設(株)；アポロカッター工法「APORO-CUTTER 工法」（参照 2021.11）
https://www.kajima.co.jp/tech/c_shield_tunnel/excavation/index.html#body_01
- 8) 鹿島建設(株)；カッターヘッドの往復でトンネルを掘る～世界初の Wagging Cutter Shield 工法の開発・実用化（参照 2021.11）
https://www.kajima.co.jp/news/digest/feb_1999/techplz/tech.htm

4.7 急曲線施工

都市域における地下空間の再構築について、シールド工法による地下空間の構築は、一般的に公共用地で適用されることが多いため、立坑位置、地表面の利用状況、支障物件、近接構造物への影響などからその範囲を制約され、急曲線となることがある。上下水道や電力、通信などのトンネルは、交差点などにおいて極めて小さい曲線半径を設けることがある。鉄道トンネルと道路トンネルは、技術基準類が整備されている¹⁾。

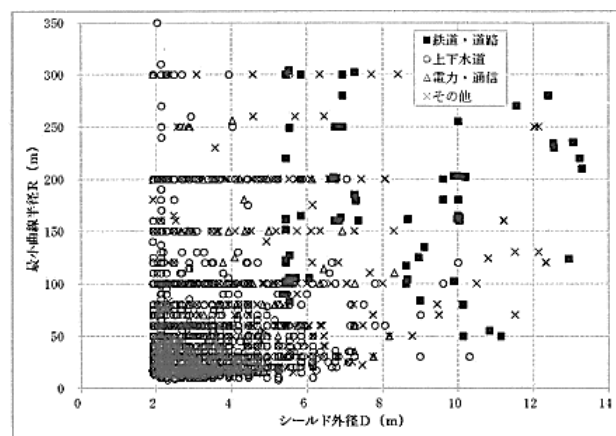
通常の曲線半径は、シールドに中折れ装置等の装備や補助工法の併用等を必要とせず掘進可能な曲線半径が一般的である。図4.7.1-1に、最小曲線半径とシールド外径（中折れ無し）との施工実績を示す。限界となる曲線半径について明確な定義はない¹⁾。

急曲線半径は、シールドの中折れ装置、余掘り装置やセグメントの種類、幅などの形状寸法の対策や、薬液注入や高圧噴射攪拌工法などによる地山安定のための補助工法が必要となる曲線半径が一般的である。図4.7.1-2に、最小曲線半径とシールド外径（中折れ有り）との施工実績を示す¹⁾。



最小曲線半径とシールド外径（中折れなし）との関係 出典：トンネル標準示方書¹⁾

図4.7.1-1 最小曲線半径とシールド外径（中折れ無し）との施工実績



最小曲線半径とシールド外径（中折れ有り）との関係 出典：トンネル標準示方書¹⁾

図4.7.1-2 最小曲線半径とシールド外径（中折れ有り）との施工実績

急曲線施工が可能なシールド工法、また管の更生技術について、次項以降で紹介する。

4.7.1 急曲線シールド工法

急曲線施工が可能なシールド工法の主な工法を、表4.7.1-1に示し、各工法の特長の概要について述べる。

表4.7.1-1 急曲線施工可能な主なシールド工法

工法名	工法概要	協会名
コンパクトシールド工法	4分割3ヒンジ構造の溝付き二次覆工一体型セグメント、後方設備を内包した3分割シールド、ガイドローラー付きタイヤ式無操舵搬送システムなどの特長がある。	コンパクトシールド工法研究会
ミニシールド工法	小口径を対象に開発されたシールド工法である。工法の種類として、泥土圧式ミニシールド工法、TBM式ミニシールド工法、ロードヘッダー式ミニシールド工法、手掘り式ミニシールド工法、カッタービット機内交換がある。 特長として、1500m以上の長距離施工、曲線半径10mの急曲線施工、ボルトレス三等分割セグメント、二次覆工不要などがある。	ミニシールド工法研究会
ECO SPEED SHIELD工法	工法として、推進・シールド併用タイプ（特殊推進工法）、推進タイプ（巨礫破碎型・既設構造物到達型）、シールドタイプ（小口径シールド工法）がある。 シールドタイプの特長として、1000m以上の長距離施工、曲線半径10mの急曲線施工がある。	ECO SPEED SHIELD 工法協会
デュアルシールド工法	推進工法とシールド工法のそれぞれの利点を最大限取り入れたものであり、緩やかな曲線および直線区間を推進工法で施工し、急曲線や連続した曲線区間をシールド工法で施工するものである。 特長として、曲線半径10mの急曲線施工可能、推進工法サイズの立坑で施工可能、泥濃式工法では同一掘進機で多様な土質に対応可能などがある。	デュアルシールド工法協会
Wagging Cutter Shield工法	カッターヘッドを一定の角度内で往復運動させながら掘進するシールド工法で、円形はもちろんのこと、伸縮自在のオーバーカッターを併用して、様々な形状のシールドトンネルの施工が可能である。 R=8mの急曲線の施工実績（マシン外径φ5.24m、土圧式シールド）がある。 ⁷⁾	シールド工法技術協会

(1) コンパクトシールド工法

コンパクトシールド工法の特長は、4分割3ヒンジ構造の溝付き二次覆工一体型セグメント、後方設備を内包した3分割シールド、ガイドローラー付きタイヤ式無操舵搬送システムである。長さは最大2200mの施工実績があり、曲線半径10mの急曲線施工、仕上がり内径を1800mm、2000mm、2200mm、2400mm、2600mmに限定してシールド機の転用を行いコストダウンを図っている。

1) 4分割3ヒンジ構造の溝付き二次覆工一体型セグメント

セグメントは一次覆工と二次覆工を一体化し、新型のインバート付き4分割3ヒンジ構造とすることで、二次覆工厚を薄くでき、掘削断面の削減と二次覆工の工程省略ができる。3ヒンジ構造であり、静定構造物となり安定性が高い。分割数を少なくしたことにより、セグメント組立時間が短縮できる。図4.7.1-3にコンパクトシールド工法のセグメントを示す。

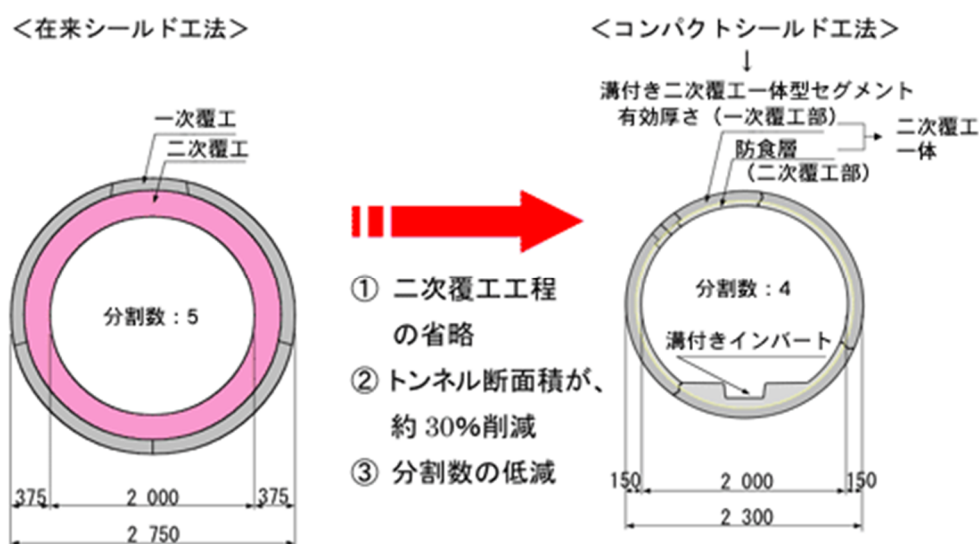


図4.7.1-3 コンパクトシールド工法のセグメント

出典：コンパクトシールド工法 HP²⁾

2) 後方設備を内包した3分割シールド

シールド機を3節に分割・ユニット化し、後方台車設備をマシン内に内蔵する構造とすることで、後方設備内蔵のため初期掘進を省略、分割のまま発進することで立坑長を短縮、分割化によるシールド機の転用を図りやすいなどがある。図4.7.1-4に3分割シールド機の概略図を示す。

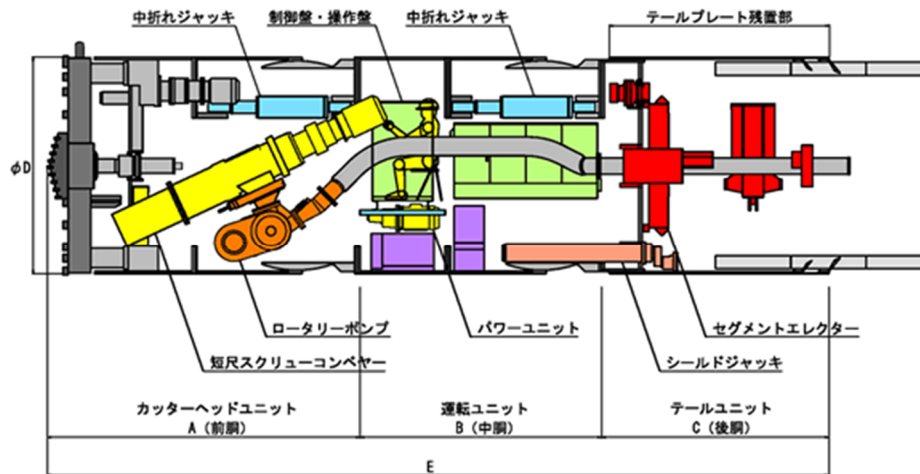


図4.7.1-4 3分割シールド機の概略図

出典：コンパクトシールド工法 HP²⁾

3) ガイドローラー付きタイヤ式無操舵搬送システム

インバート溝をガイドとして無操舵で走行するタイヤ式の搬送システムを開発し、従来のレール・枕木などの軌条設備が不要である。図4.7.1-5にタイヤ式の搬送システムの概略図を示す。

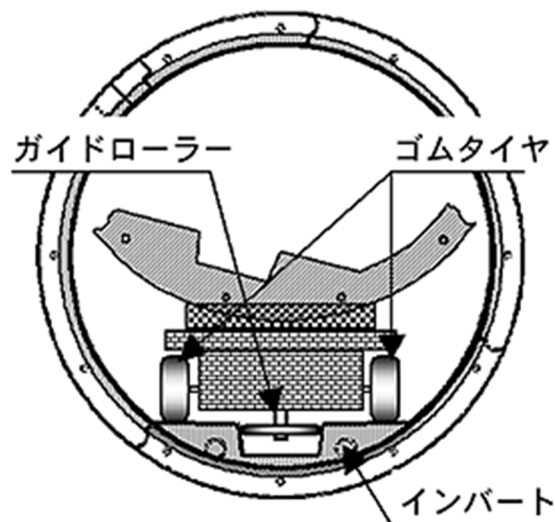


図4.7.1-5 タイヤ式無操舵システム

出典：コンパクトシールド工法 HP²⁾

4) 施工実績

コンパクトシールド工法の施工実績を表4.7.1-2に示す。

表 4.7.1-2 コンパクトシールド工法施工実績 ※一部抜粋

仕上り内径 (mm)	発注者名	工事名	工期	施工延長 (m)	最小曲線 半径(m)	シールド機の転用
1,800	東京都下水道局	世田谷区松原五、六丁目付近枝線工事	平成18年 2月～平成20年 1月	551	20	新規製作
	東京都下水道局	東陽幹線その5工事	平成18年 9月～平成21年 3月	2,053	30	新規製作
	東京都下水道局	⑧墨田区押上一丁目、横川二丁目付近再構築その1、2工事	平成21年 3月～平成24年 2月	972	15	新規製作
	東京都下水道局	⑪港区新橋五丁目、芝公園一丁目付近整備工事	平成24年 2月～平成25年10月	603	15	⑧⇒転用
	東京都下水道局	⑬江東区大島六、七丁目付近再構築工事	平成24年 8月～平成26年 6月	942	15	新規製作(以外)
	東京都下水道局	⑭北区豊島三、四丁目付近再構築工事	平成25年11月～平成27年12月	671	15	⑧⇒⑪⇒転用
	東京都下水道局	⑮北区十条台二丁目、十条仲原二丁目付近再構築工事	平成28年 3月～平成29年11月	1,305	15	⑬⇒転用(以外)
2,000	東京都下水道局	練馬区旭丘二丁目、豊島区長崎六丁目付近再構築工事	令和1年7月～令和4年5月	638	12.5	新規製作
	東京都下水道局	①台東区三筋二丁目、鳥越二丁目付近再構築工事	平成13年 3月～平成16年 1月	1,283	30	新規作成
	東京都下水道局	②江東区大島四、五丁目付近再構築その2、3工事	平成15年 1月～平成17年10月	1,389	30	①⇒転用
	東京都下水道局	港区赤坂五丁目、南青山一丁目付近再構築工事	平成16年 3月～平成19年 3月	780	15	新規製作
	東京都下水道局	③港区赤坂六、九丁目付近再構築工事	平成16年10月～平成18年10月	509	15	①⇒②⇒転用
	愛知県建設部	⑥日光川下流域下水道事業管きよ布設工事(本部田工区)	平成19年12月～平成22年 3月	2,178	20	新規製作
	名古屋上下水道局	⑨山田東雨水幹線下水道築造工事	平成22年 3月～平成23年 4月	437	15	⑥⇒転用
2,400	東京都下水道局	⑫堀船1号幹線工事	平成24年 3月～平成26年 7月	664	15	⑥⇒⑨⇒転用(以外)
	東京都下水道局	⑮北区十条台二丁目、板橋区加賀二丁目付近再構築工事	平成24年12月～平成28年 3月	409	25	新規製作(以外)
	京都府向日市	向日市公共下水道和井川1号幹線築造工事	令和1年8月21日～令和3年3月31日	693	30	⑮⇒転用(以外)
	東京都下水道局	第二戸山幹線その5工事	平成21年10月～平成24年10月	927	25	新規製作
	日本下水道事業団	⑭八街市大池第三雨水幹線建設工事	平成24年12月～平成27年 9月	1,419	50	新規製作(以外)
	東京都下水道局	第二戸山幹線その7工事	平成26年 4月～平成29年 9月	705	20	新規製作
	東京都下水道局	江東区平野四丁目、三好三丁目付近再構築工事	平成29年 9月～令和 2年 1月	1,454	15	⑭⇒転用(以外)
2,600	仙台市建設局	⑯地蔵前雨水幹線工事1	平成31年 3月～令和 3年 3月	393	13	新規製作(以外)
	東京都下水道局	京島幹線その3工事	令和2年7月～令和4年6月	903	30	⑯⇒転用(以外)
	東京都下水道局	④北区中里一丁目、西ヶ原四丁目付近再構築その1、2工事	平成17年11月～平成20年11月	1,984	13	新規製作
	東京都品川区	目黒川右岸低地部排水施設整備工事(その2、3)	平成18年 7月～平成21年 3月	1,320	15	新規製作
	東京都下水道局	⑤港区南麻布一、二丁目付近再構築工事	平成19年 1月～平成20年 6月	1,015	60	新規製作
	東京都下水道局	⑦第二谷田川幹線その1、2工事	平成20年 3月～平成22年 6月	1,419	15	④⇒転用
	東京都下水道局	⑩第二谷田川幹線その3、その3の2工事	平成23年 2月～平成30年 3月	998	15	⑤⇒転用
2,600	東京都下水道局	第二谷田川幹線その4工事	平成24年10月～平成26年 7月	217	20	新規製作
	東京都下水道局	杉並区荻窪二丁目付近枝線工事	平成29年 2月～平成30年11月	398	40	新規製作

※丸数字は発注毎の転用施工順序を示します。

出典：コンパクトシールド工法 HP²⁾

(2) ミニシールド工法

ミニシールド工法の特長は、1500m以上の長距離施工、曲線半径10mの急曲線施工、ボルトレス三等分割セグメント、二次覆工が不要である。

1) ボルトレス三等分割セグメント、ボルトレス継手

セグメントは、中心角120°の三等分割セグメントで幾何学的に安定した構造である。セグメント継手構造はセグメント間、リング間ともに凸凹ナックル形式の突き合わせ方式であり、一般セグメントに使用される結合ボルトが不要である。図4.7.1-6にセグメントの概略図、図4.7.1-7にボルトレス継手の概略図を示す。

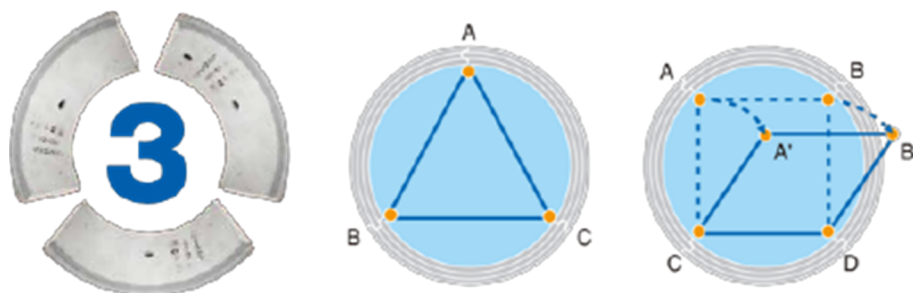


図4.7.1-6 セグメント概略図

出典：ミニシールド工法 HP³⁾

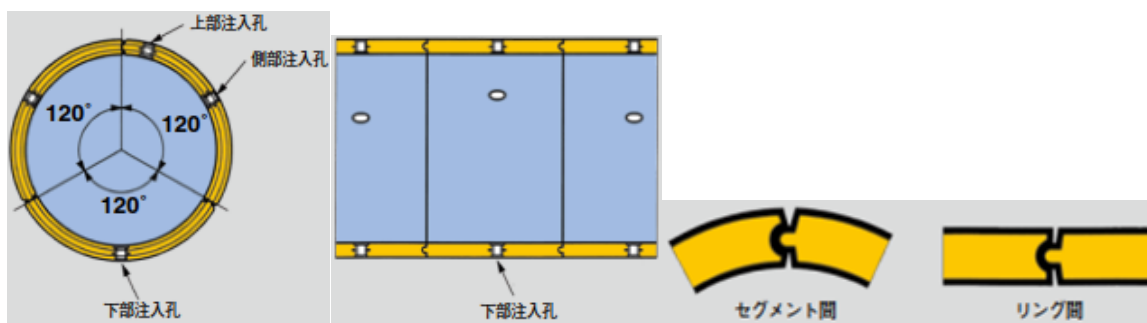


図4.7.1-7 ボルトレス継手概略図

出典：ミニシールド工法 HP³⁾

2) 施工実績

ミニシールド工法の施工実績を表4.7.1-3に示す。

表4.7.1-3 ミニシールド工法施工実績 ※一部抜粋

年度	起業者	工事件名	工期	口径 (mm)	延長 (m)	掘削方式
17	長野県土尻川砂防事務所	平成29年度防災・安全交付金(総合流域防災)緊急改築(地すべり)〈重点〉工事	17.09～18.03	1,350	214	空伏せ
17	神奈川県 酒匂川流域下水道整備事務所	【県土経1-14】酒匂川流域下水道 箱根小田原幹線2-2工区管渠築造工事	17.12～21.03	1,000	1,707	泥土圧
17	和歌山市	新堀第1排水区支線工事その1	17.12～19.03	1,200	593	泥土圧
17	岩国市	公共下水道尾津3号污水幹線管きょ工事	18.02～20.03	1,000	606	泥土圧
17	堺市	黒山外下水管布設工事(29-1)	〇.〇～20.03	1,350	1,202	泥土圧
17	日本下水道事業団	石巻市住吉1号幹線管渠他1施設復興建設工事	18.02～20.12	1,500	1,070	泥土圧
17	山梨県富士・東部農務事務所	山風呂地区 上野原用水路トンネル 掘削設備工事(一部債務)	18.03～18.12	1,200	401	泥土圧
18	熊本市上下水道局水道整備課	東区錦ヶ丘(錦ヶ丘公園～東バイパス) φ700杉記水管シールド工事	18.04～20.11	1,000	1,387	泥土圧
18	広島市	八木・緑井地区雨水渠築造工事(その3)	18.06～19.12	1,200	357	泥土圧
18	広島市	八幡地区下水道築造30-5号工事	18.06～20.03	1,000	643	泥土圧
18	横浜市環境創造局管路整備課	中部処理区仲尾台第二合流幹線下水道整備工事	18.04～19.12	2,000	713	泥土圧
18	秋田市上下水道局下水道整備課	公共下水道中央幹線築造工事(18032)	18.09～20.03	1,000	959	泥土圧

出典：ミニシールド工法 HP³⁾

(3) ECO SPEED SHIELD工法

ECO SPEED SHIELD工法のうちシールドタイプの特長は、1000m以上の長距離施工、曲線半径10mの多彩なカーブバリエーションの急曲線施工が可能である。セグメントは、ESS工法用セグメント（RC・合成・スチール）の他に、内水圧およびライニングに対応可能である。

1) シールドタイプ

全てをシールドタイプで施工するため、あらゆる線形（急曲線R=10m、1スパン1000m以上）に対応できる。裏込注入は、掘進即時注入方式を採用し、地盤への影響を最小限に抑える。後続設備の内蔵により、仕上がり内径1000mmからシールド施工が可能であり、長距離施工、巨礫・玉石層、岩盤層施工でビットが摩耗した場合は機内交換、地中障害物遭遇時に機内撤去ができる。図4.7.1-8にシールド機を示す。

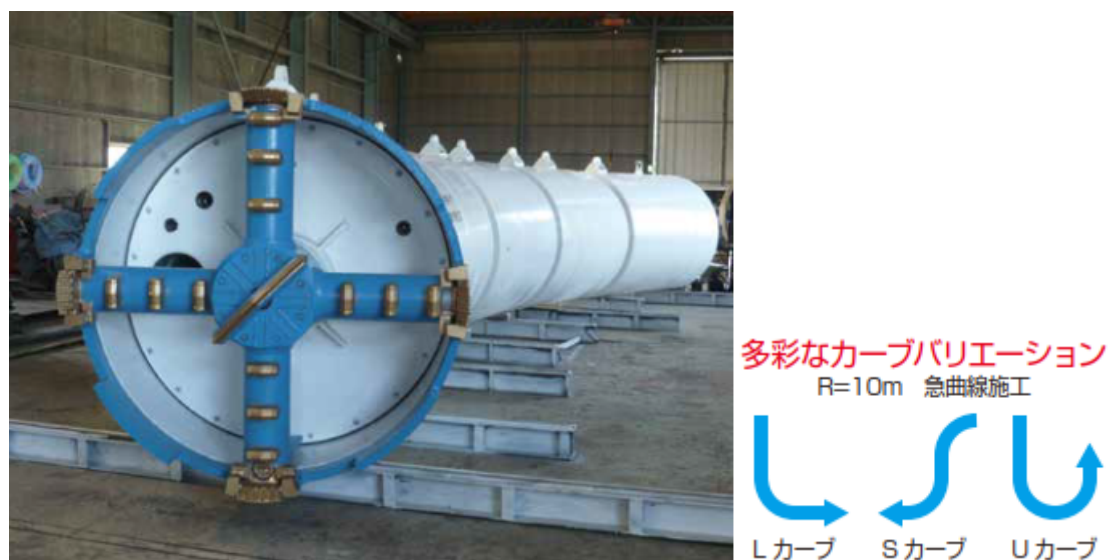


図4.7.1-8 シールド機

出典：ESS 工法 HP⁴⁾

2) ESS工法用セグメント

ESS工法用セグメントは、曲線半径や施工条件に合わせてRCセグメント・合成セグメントの2種類から選択でき、取付け管施工も可能である。

二次覆工省略型により、従来型のシールド工法と比較し、工期短縮とともに、掘削排出土量を大幅に削減できる。セグメントは、「振動製法」と「遠心力製法」を採用している。内水圧対抗型セグメントは、内水圧が作用する雨水貯留管・伏せ越し管路・農業用水路等に対応可能である。可とうセグメントの使用により、耐震設計にも対応可能である。上水道や農業用水路等のさや管築造では、スチールセグメントが使用可能である。図4.7.1-9にセグメントを示す。



図4.7.1-9 ESS工法用セグメント

出典：ESS 工法 HP⁴⁾

3) 施工実績

ECO SPEED SHILED工法の施工実績を表4.7.1-4に示す。

表4.7.1-4 ECO SPEED SHILED工法施工実績 ※一部抜粋

件数	工 期	発注者	工 事 名	呼び径	施工延長	土 質			備 考	
				(mm)	(m)	土質名	N値	最大粒径 (mm)		
1	H 23.5 ～ H 23.11	広島市下水道局 施設部管路課	江波地区下水道築造22-6号工事	1,200 1,200	95.889 79.583	シルト～砂 シルト～砂	38 17	600 600	高土被り24m シールド到達	推進タイプ（既設構造物到達型） R200 推進タイプ（既設構造物到達型） R200
2	H 23.8 ～ H 23.10	日本下水道事業団	泉大津市汐見夕風幹線建設工事 その4	800	227.45	砂礫	10	600	障害物多数	推進タイプ（巨礫破砕型） 直線
3	H 23.11 ～ H 24.1	(株) T. M コーポレーション	堺市南区美木多上・大池造成工事	900	125.20	固結シルト	50超	0		推進タイプ（巨礫破砕型） 直線
4	H 24.2 ～ H 24.11	京都市上下水道局	大手筋北幹線（その1） 公共下水道工事	1,800 1,100	344.48 275.12	砂礫 砂礫	50超 50超	200 200	推進延長 335.48m シールド延長 9.00m	推進・シールドタイプ R200 R80 推進タイプ（既設構造物到達型） R150 R50 R50（河川横断）
5	H 24.3 ～ H 24.4	日本下水道事業団	大津市合流改善貯留管渠建設工事	1,200	19.21	砂礫土	35	180	シールド到達	推進タイプ（既設構造物到達型） R30
6	H 24.6 ～ H 24.12	広島市下水道局 施設部管路課	千田地区下水道築造23-4号工事	1,000	413.60	砂質土	10	0	既設人孔到達	推進タイプ（既設構造物到達型） R700 R28 R200
7	H 24.6 ～ H 24.8	日本下水道事業団	大津市合流改善貯留管渠建設工事	1,000	110.46	砂質土	38	0	シールド到達	推進タイプ（既設構造物到達型） R161
8	H 25.4 ～ H 25.12	八千代市上下水道局	平成24年度公共下水道事業八千代台北 地区雨水排水整備工事	1,100	241.442	砂質土	16	0	推進延長 23.540m シールド延長 217.902m	推進・シールドタイプ R50 R10 R100
9	H 25.9 ～ H 26.6	広島市下水道局 施設部管路課	井口地区下水道築造24-2号工事	1,500 1,200 800 800 800	233.10 259.85 17.85 20.85 15.60 14.00	砂礫 玉石混り砂 玉石混り砂 玉石混り砂 玉石混り砂 玉石混り砂	15 13 16 16 13 10	450 150 150 150 150 150	既設人孔到達	推進タイプ（巨礫破砕型） R200 推進タイプ（巨礫破砕型） R700 推進タイプ（既設構造物到達型） 直線

出典：ESS 工法 HP⁴⁾

(4) デュアルシールド工法

デュアルシールド工法の特長は、曲線半径10mの急曲線施工が可能、推進工法サイズの立坑で施工可能、泥濃式工法では同一掘進機で多様な土質に対応可能などである。

1) デュアルシールド掘進機

デュアルシールド掘進機を図4.7.1-10に示す。

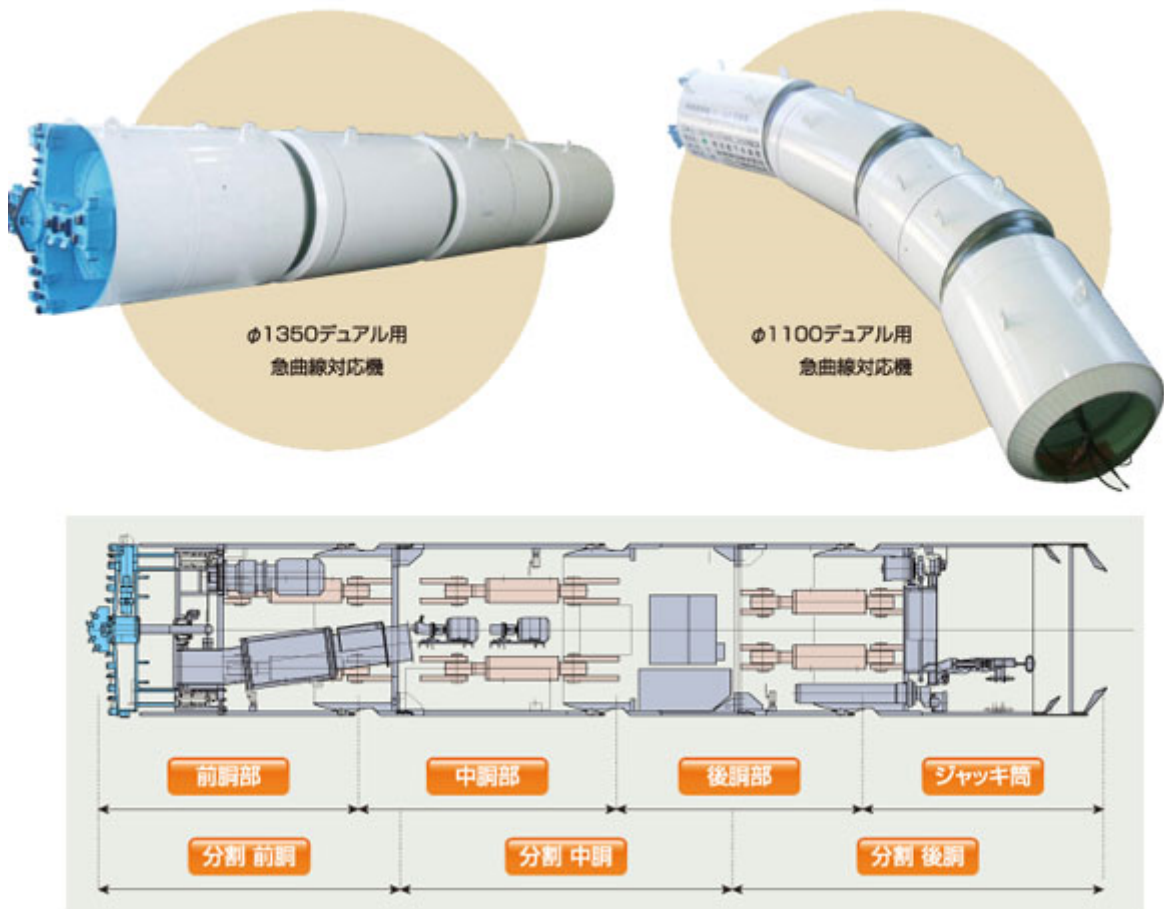


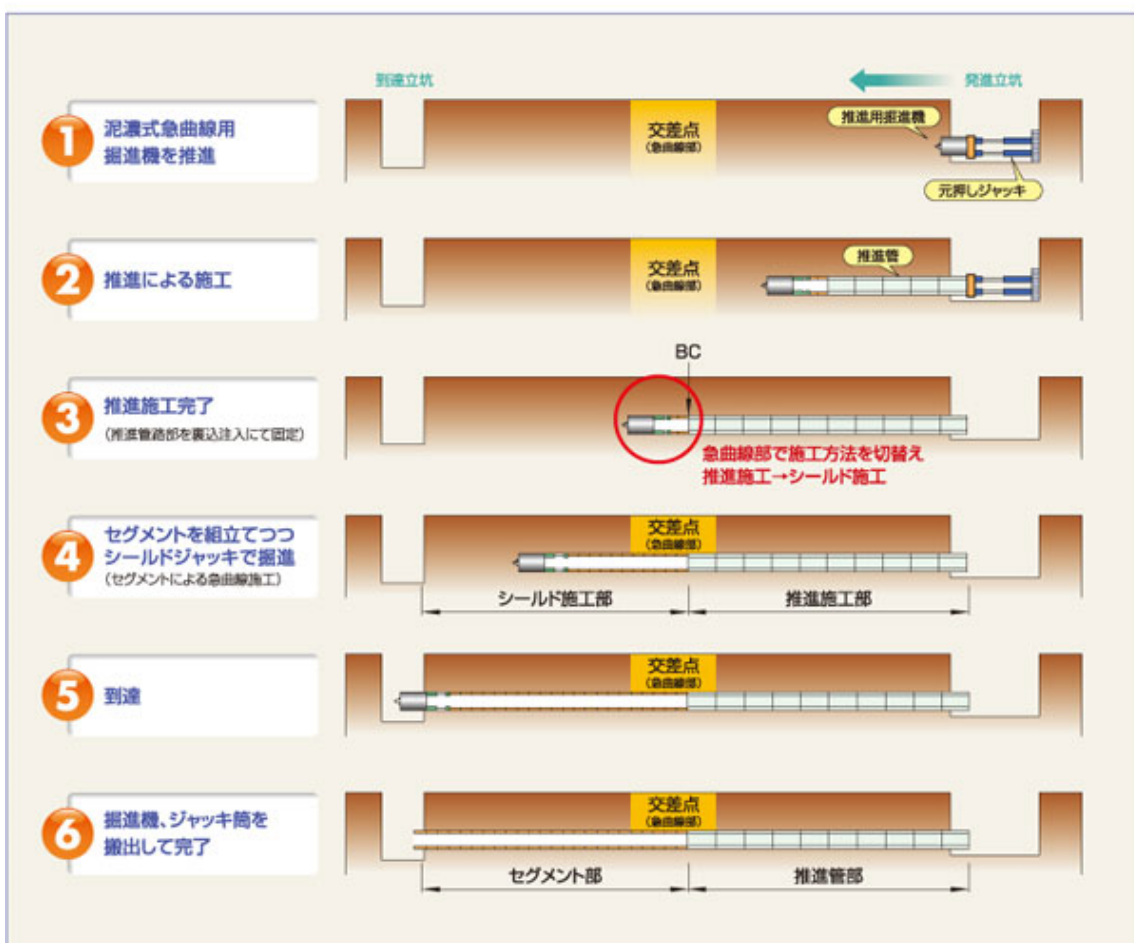
図4.7.1-10 デュアルシールド掘進機

出典：デュアルシールド工法 HP⁵⁾

2) 施工手順

デュアルシールド工法（泥濃式急曲線推進）の施工手順を図4.7.1-11に示す。

デュアルシールド工法施工手順例 泥漕式急曲線推進



推進施工



ヒューム管からセグメントへ

図4.7.1-11 デュアルシールド施工手順

出典：デュアルシールド工法 HP⁵⁾

3) 施工実績

デュアルシールド工法の施工実績を表4.7.1-5に示す。

表4.7.1-5 デュアルシールド工法施工実績 ※一部抜粋

工事 番号	工 事 名	発注者	工事場所	掘進方式	仕上り 内 径	施工延長		土 質	線 形	備 考
						推進延長	シールド延長			
29-1	千代田区紀尾井町、 麴町六丁目付近再構築 工事	東京都下水道 局	東京都 千代田区	泥漕式	1,100	614.90		砂質土	R75 R40	
						318.50	296.40			
29-2	上沼部雨水幹線	東京都下水道 局	東京都 大田区世 田谷区	泥漕式	1,800	466.70		砂礫土 土丹	R10×2 R15×6	
						68.70	398.00			
30-1	台東区東上野上野六 丁目、松が谷一丁目 付近再構築工事	東京都下水道 局	東京都 台東区	泥漕式	2,000	474.30		砂質土	R10×1 R15×1	
						45.25	429.05			
31-6	八千代1号幹線浸水 対策管渠布設（シールド 工法）工事	千葉県八千 代市	千葉県八 千代市	泥漕式	2,000	571.28		砂質土	R15×1	
						271.70	299.58			
31-7	板橋区加賀1丁目付 近石神井川流域貯留 管工事	東京都下水道 局	東京都 板橋区	泥漕式	1,500	446.97		砂礫土	R30×3	
						89.67	357.30			
31-8	上長津川1号幹線管 渠築造工事	千葉県船橋 市	千葉県船 橋市	土圧式	2,600	727.45		砂質土	R18.5 R10	
						82.40	645.05			

出典：デュアルシールド工法 HP⁵⁾

(5) Wagging Cutter Shield工法

Wagging Cutter Shield工法は、カッターヘッドを一定の角度内で揺動運動しながら掘進するシールド工法であり、強力なオーバークッターを併用することで様々な掘削断面形状への適用が可能である。特長として、カッターヘッドを複数配置し、余掘り装置を併用することで円形以外に複円形や矩形などの様々な形状のシールドトンネルの施工が可能、カッターヘッドを少数の揺動ジャッキで駆動するためシールド内部の機器の簡素化、扁平断面への適用などがある。この工法は、泥土圧シールド工法を前提とした工法である。

1) 掘進機構

掘進機構を図4.7.1-12に示す。

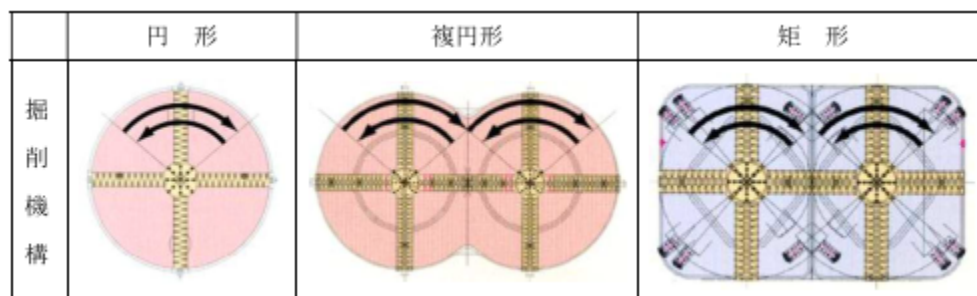


図4.7.1-12 掘進機構

出典：シールド工法技術協会 HP⁶⁾

2) 急曲線施工事例

急曲線の施工事例を表4.7.1-6に示す。

表4.7.1-6 Wagging Cutter Shield工法施工実績一覧 ※一部抜粋

NO.	工事名称	発注者	施工場所	シールド 断面形状 (m)	最小曲線 半径 (m)	施工 延長 (m)	工 期
1	きらめき通り地下通路建設工事	きらめき通り地下通路 建設共同事業者	福岡県 福岡市	W 7.81 H 4.98	—	114	H9.8～ H11.4
2	三沢川第4号雨水幹線築造工事	三沢市	青森県 三沢市	φ 3.94	R=12	602	H10.12～ H13.3
3	都市基盤河川改修事業白川改修 (今出川分水路) 工事	京都市建設局	京都府 左京区	W 4.90 H 4.30	R=200	90	H11.10～ H13.10
4	高速鉄道東西線建設工事 (六地藏北工区)	京都市交通局	京都府 宇治市	W10.24 H 6.87	—	753	H11.10～ H14.10
5	馬込幹線工事	東京都下水道局	東京都 大田区	φ 5.24	R=8	1,309	H12.3～ H14.2
6	西宮市札幌筋幹線下水道新設工事	西宮市下水道整備部	兵庫県 西宮市	φ 2.64	R=30	1,109	H13.12～ H14.3

出典：シールド工法技術協会 HP⁶⁾

4.7.2 急曲線における管更生工法

急曲線施工が可能な管更生工法の主な工法を、表4.7.2-1に示し、各工法の特長の概要について述べる。

表4.7.2-1 急曲線施工が可能な主な管更生工法

工法名	工法概要	協会名
SPR工法	既設管の内側に硬質塩化ビニル製プロファイルの更生管を製管し、既設管と更生管の間隙に特殊裏込め材を充填する。古くなった管渠を既設管・更生管・裏込め材が一体となった強固な複合管として蘇らせる。	日本SPR工法協会
パルテム・フローリング工法	既設の管渠内で組み立てた鋼製リングに高密度ポリエチレン製のかん合部材と表面部材を組み付け、既設管渠と表面部材との間に充填材を注入することにより、既設管渠を更生する製管工法である。更生管は、既設管渠と更生材が一体になった複合管となる。	パルテム技術協会

(1) SPR工法

SPR工法の特長は、通水しながら施工可能、自走式製管機を用いれば円形・矩形・馬蹄形・背割り管に対応可能、開削不要、曲線（最小5D、D；既設管径）や長距離製管に対応、新管と同等以上の強度や流量に復元などがある。

1) 施工概要

図4.7.2-1に自走式による製管方法を示す。

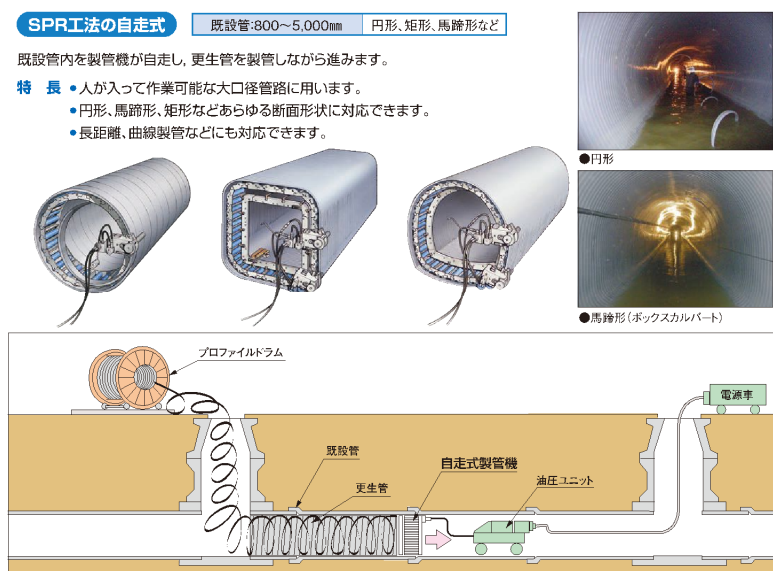


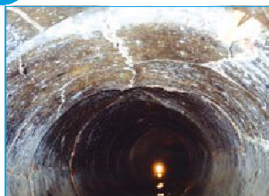
図4.7.2-1 SPR工法自走式による製管方法

出典：日本 SPR 工法協会 HP⁸⁾

2) 作業手順

図4.7.2-2に作業手順を示す。

1 事前調査・製管径の決定

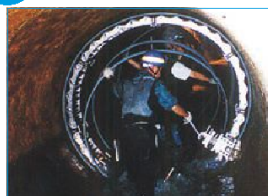


●クラック

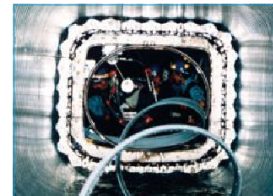


●腐食(矩形)

2 製管

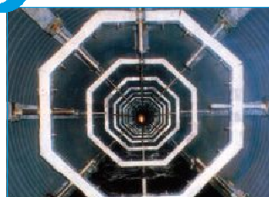


●自走式(円形)



●自走式(矩形)

3 裏込め材注入



●変形・浮上防止(円形)



●モルタル注入状況

4 取付管口削孔



●削孔(大口径の場合)



●削孔(小口径の場合)

5 管口・インバート仕上げ



●作業完了



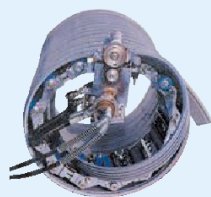
●更生完了(円形)

◆関連部材

●自走式製管機

中・大口径用
M型・L型

超大口径用
LL型

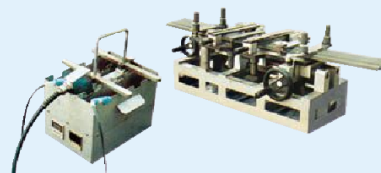


◆プロファイルの接続には

1ドラムで更生材料が不足する場合は、以下の方法で接続します。

①融着による接続(スチール補強材がない場合)

塩ビを加熱し、融着により一体化します。



②溶接による接続(スチール補強材がある場合)

製管途中でスチール補強材をはめ込んで接続し、施工後、管内から溶接します。

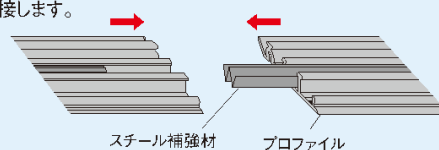


図4.7.2-2 SPR工法の作業手順

出典：日本 SPR 工法協会 HP⁸⁾

(2) パルテム・フローリング工法

パルテム・フローリング工法の特長は、通水しながら施工可能、円形・矩形・馬蹄形などに対応可能、開削不要、曲線（最小半径3.6m）・連続する屈曲管に対応、新管と同等以上の強度や流量に復元などがある。

1) 施工概要

図4.7.2-2に更生管の概要を示す。

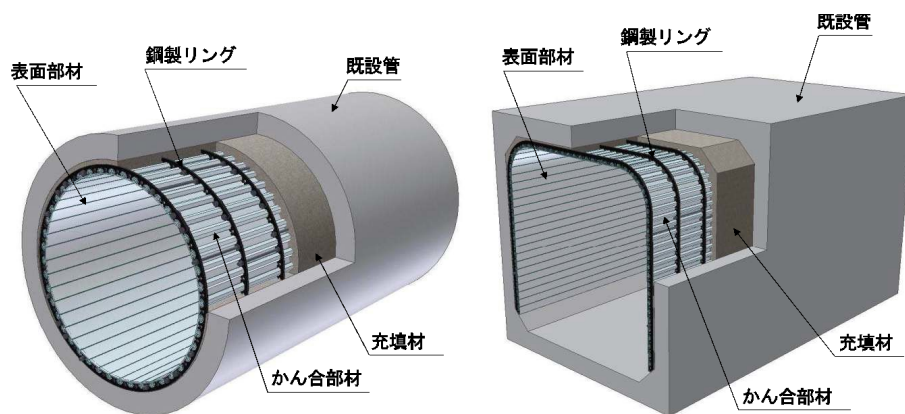


図4.7.2-2 パルテム・フローリング工法による管更生概要

出典：パルテム技術協会 HP⁹⁾

2) 作業手順

図4.7.2-3に作業手順を示す。

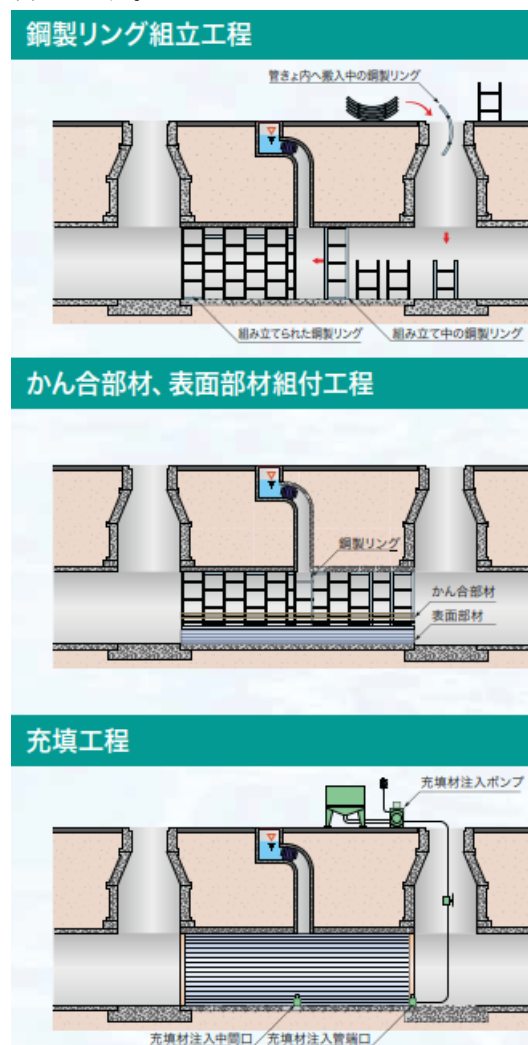


図4.7.2-3 パルテム・フローリング工法の作業手順

出典：パルテム技術協会 HP⁹⁾

【参考文献】

- 1) 2016年制定 トンネル標準示方書[共通編]・同解説/[シールド工法編]・同解説
- 2) コンパクトシールド工法研究会：工法概要(参照2022.01)
<http://compact-shield.com/overview/>
- 3) ミニシールド工法研究会：工法概要(参照2022.01)
<http://www.minishield.com/overview/>
- 4) ECO SPEED SHIELD工法協会：工法紹介(参照2022.01)
<http://www.eco-speed-shield.com/kouhou/kouhou.html>
- 5) デュアルシールド工法協会：工法の特徴(参照2022.01)
<http://www.dual-shield.com/feature/>
- 6) シールド工法技術協会；工法概要 ワギング・カッタ・シールド工法(参照2022.01)
http://shield-method.gr.jp/construction-method/cm_ol_wc/
- 7) 鹿島建設(株)：シールドトンネル技術(参照2022.01)
https://www.kajima.co.jp/tech/c_shield_tunnel/construct/index.html#!body_05
- 8) 日本SPR工法協会：SPR工法(参照2022.01)
<https://spr.gr.jp/spr%e5%b7%a5%e6%b3%95>
- 9) パルテム技術協会：パルテム・フローリング工法(参照2022.01)
<http://www.paltem.jp/method/fr.html>

4.8 急速施工技術

地下インフラの再構築は既に市街化の進んだ都市部が対象となる場合が多いため、工事に伴い交通渋滞および騒音・振動、大気汚染等が発生することで、都市機能や周辺住民の生活環境に大きな影響を与える。これらの問題に対して、工事期間を短縮し、道路交通や周辺環境への影響を低減できる急速施工技術が開発されている。急速施工は、交通渋滞低減による経済損失の削減や生産性向上、さらに時間短縮による4週8休の実現、働き方改革なども期待できる。

急速施工技術の開発は、山岳、シールド、開削トンネル、立坑などの地下空間構築、交差点立体化や鉄道の連続立体交差、高速道路等の床版架替え、舗装、盛土、プレキャスト部材を用いた構築、既存構造物の補修・補強、解体など他分野にわたる。ここでは、これらの急速施工技術の中で、都市部での地下空間構築、再生に関連する①アンダーパス、②シールドトンネル、③開削トンネル、④立坑の4つの分野の急速施工技術を紹介する。

4.8.1 アンダーパス急速施工技術

交通量が多い都市部の交差点や踏切では交通渋滞が慢性的に発生している。一方、周囲には商業ビルやマンション、家屋が隣接しているため、立体交差工事に伴う、振動・騒音、景観等の周辺環境に留意する必要がある。交通規制や周辺環境への影響を最小限に抑えられるアンダーパスの急速施工法が求められている。アンダーパス工法には、箱形ルーフ（防護材）と本体構造物のボックスカルバートを置き換えるタイプや PC 鋼線を連結した函体をジャッキにて牽引するタイプ、トンネル外殻部を小断面の函体で先行して構築するタイプなど多くの工法があるが、ここでは、立坑の省略、掘進機や施工法の工夫などにより、大幅な工期が期待できる 3 工法（①URUP 工法、②R-SWING 工法、③トロンボーン工法）について表 4.8.1-1 および図 4.8.1-1～図 4.8.1-3 に示す。

表 4.8.1-1 アンダーパス急速施工技術

工法名	概 要	会社名
①URUP工法 (Ultra Rapid Under Pass)	立坑を構築することなくシールド機を地上から発進し、そのまま掘進して再び地上に到達させることで、交差点のアンダーパスや地上からのアプローチトンネルを非開削で構築できる工法である。開削工法やトンネル両端に立坑が必要な従来のシールド工法と比較して、大幅に工期を短縮できるとともに、騒音・振動の低減、建設発生土・排出ガスの抑制など環境にも優しいトンネル施工である。	大林組
②R-SWING工法	非開削矩形アンダーパス工事に特化した掘削機を使用し、掘削機上部に可動式の屋根（ルーフ）を持つユニークな機構で、そのルーフが地山を先行掘削することにより地盤沈下の防止や、不測の埋設物などの先進探查を行いながら掘削する。掘削機は幅2.3mのユニットしたマシンで構成され、組立・解体時間の短縮が可能な他、地上発進・到達技術の組合せにより工期短縮が可能となる。	鹿島建設
③トロンボーン工法	U型の堀割り部と土被りの浅いトンネルはアプローチ区間用シールドで施工し、交差点区間はトンネル区間用シールドに改造して1台のシールドマシンにより一体化施工する。トンネル断面は上下2段、幅方向に3列または5列に分割施工することで作業帯幅を小さくし、かつ、開削施工部分は両脇のトンネル函体を山留め代わりにして杭打ち作業を省略して工期を短縮する。	石川島播磨重工業

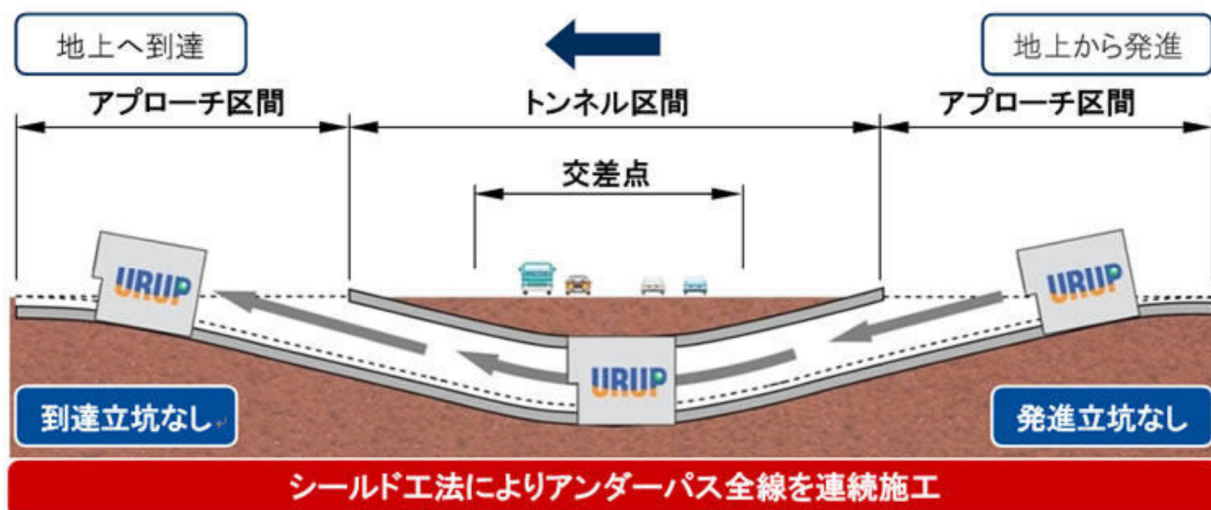


図 4.8.1-1 URUP 工法概要図

出典：大林組 HP¹⁾

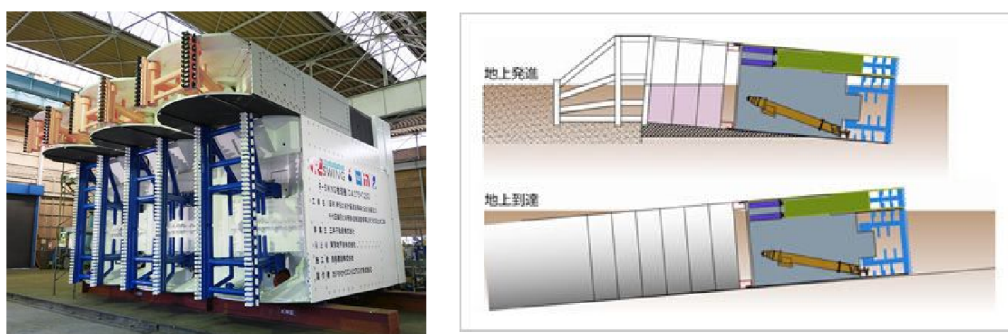


図 4.8.1-2 R-SWING 工法概要図

出典：鹿島建設 HP²⁾

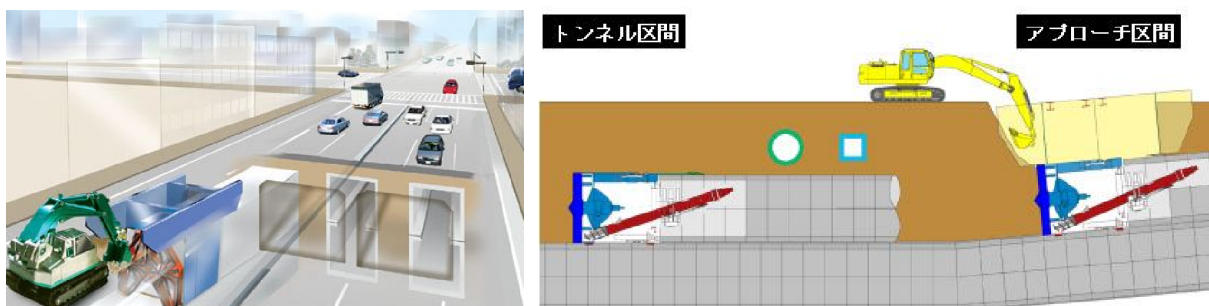


図 4.8.1-3 トロンボーン工法概要図

出典：石川島播磨重工業 HP³⁾

4.8.2 シールド急速（高速）施工技術

主に都市部の地下インフラ構築に用いられるシールド工法では、周辺環境への影響低減やコスト縮減を図るために工期短縮が求められている。ここでは、シールド掘削とセグメント組立を同時に行う掘進組立同時施工シールドおよびセグメント自動組立、資材搬送設備、内部構築に関する急速施工について代表的な技術を紹介する。

(1) 掘進組立同時施工シールド

シールドの掘進とセグメントの組立を同時に行うことで、掘進・組立のサイクルが短縮され、日施工量が増大して工期短縮が可能になる。掘進組立同時施工シールドはロングジャッキ方式とダブルジャッキ方式に大別される。代表的な掘進組立同時施工シールドを表4.8.2-1および図4.8.2-1～図4.8.2-5に示す。

表4.8.2-1 掘進組立同時施工シールド技術

工法名	概 要	会社名
①ラチス式同時施工シールド工法	シールド機の前胴と後胴を掘進・方向制御・トルク伝達の機能を備えたラチスジャッキで連結しカッタヘッドの位置・姿勢を任意に制御でき、前胴と後胴のスライド機構により、セグメント組立時に前胴のみ前進できる他、前後揺動可能なエレクトアヘッドにより、セグメント組立作業の高速化を図り、サイクルタイムを短縮する。	鴻池組
②ハニカムセグメントを用いた同時施工法	六角形のハニカムセグメントの特長を生かしてシールド機の掘進とセグメント組立を同時に行う工法である。掘進に伴うエレクトアと既設セグメントの相対位置の変化に対応する掘進同調機構がエレクトアに内蔵されている。また、自動ボルト締結装置により継手ボルトを自動締結する。	奥村組
③F-NAVIシールド工法	シールド本体部と前胴部をつなぐテンションジャッキと姿勢制御（前胴部の首振り）を行う球面アーティキュレートとそのジャッキ、および同時組立が可能な追従エレクトアとロングストロークジャッキから構成されており、前胴部がシールド機を正しい方向に誘導すると共に、シールド掘削とセグメント組立が同時に行える。	清水建設
④ASC-OMによる同時掘進システム	設定した力点に対して、ジャッキごとの圧力を自動で調整し、最適なジャッキ圧分布に制御するシステム（ASC-OM）により、掘削面にかかる圧力を調整し、正確な掘進方向を確保することで、掘進とセグメント組立の同時施工を可能とした高速施工技术である。	大林組
⑤ダブルジャッキ式同時掘進工法	掘進専用のジャッキとセグメント組立専用のジャッキの2種類のジャッキを装備し、シールド機本体の内部に装備した内胴を前後にスライドさせることで、掘進とセグメント組立を同時に行う。掘進ジャッキとセグメント組立用のジャッキを同一円周上に交互に装備し、内胴を反力に掘進を行いながら、内胴の後方でセグメント組立を行う。	鹿島建設

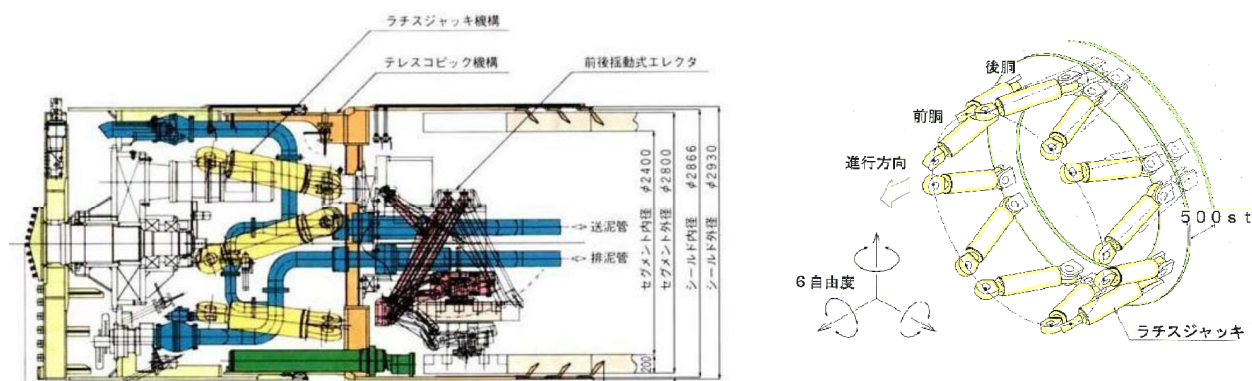


図 4.8.2-1 ラチス式同時施工シールド工法概要図

出典：鴻池組 HP⁴⁾

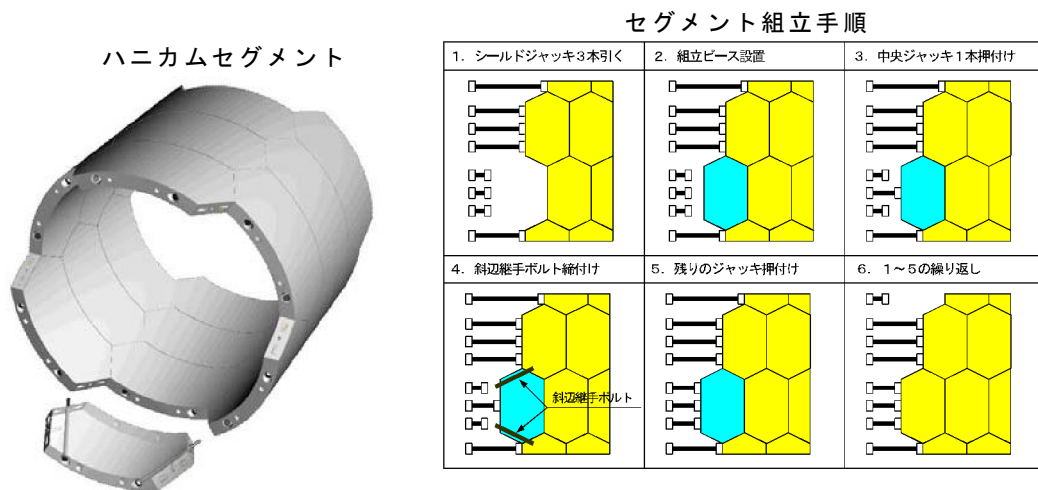


図 4.8.2-2 ハニカムセグメントを用いた同時施工法概要図

出典：奥村組 HP⁵⁾

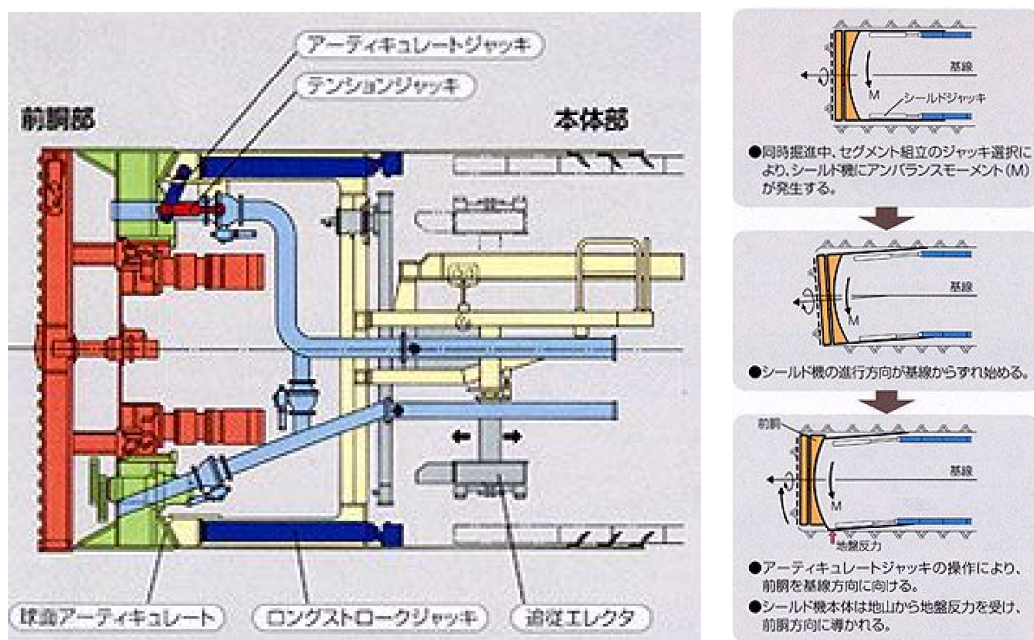


図 4.8.2-3 F-NAVI シールド工法概要図

出典：清水建設 HP⁶⁾

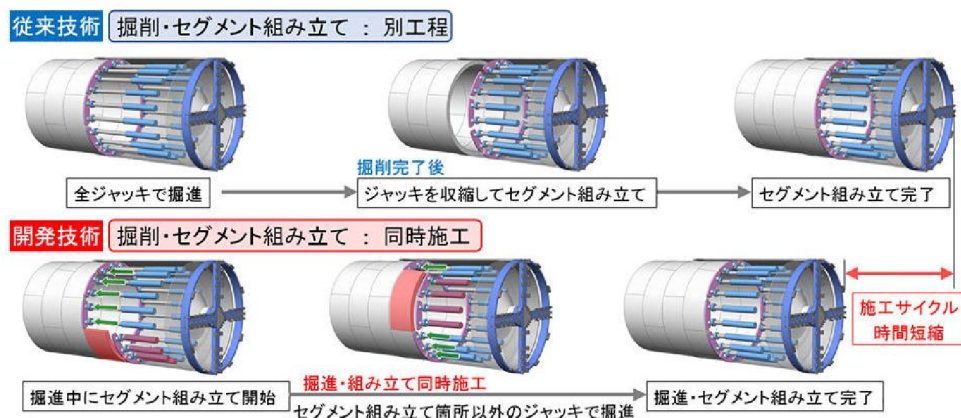


図 4.8.2-4 ASC-OM による同時掘進システム概要図

出典：大林組 HP⁷⁾

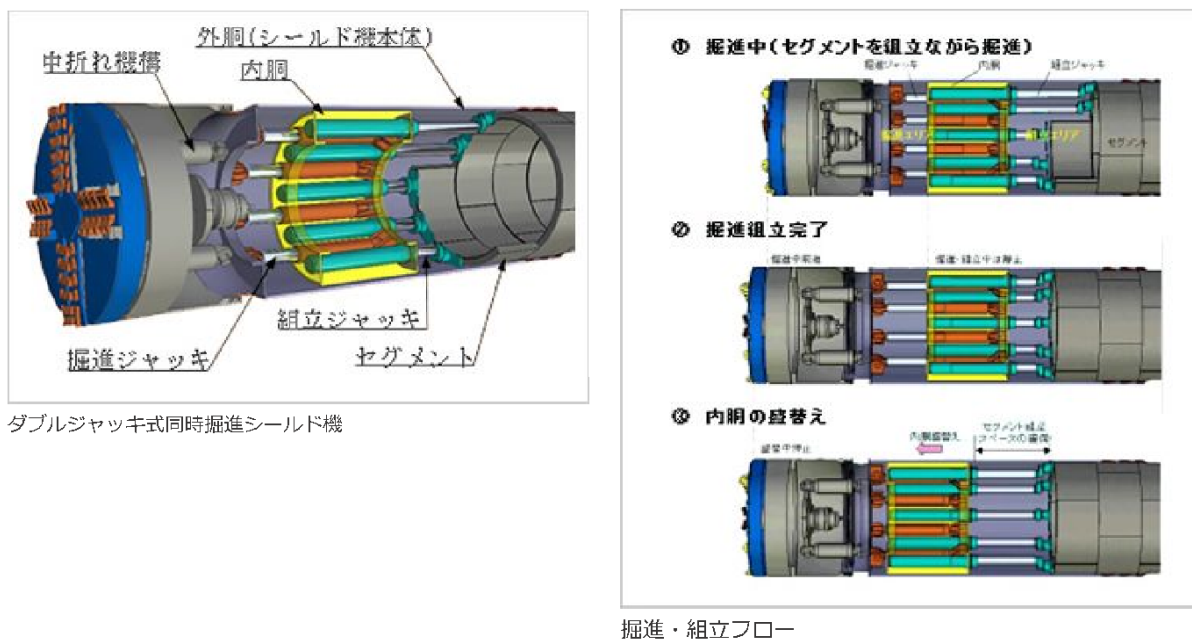


図 4.8.2-5 ダブルジャッキ式同時掘進工法概要図

出典：鹿島建設 HP⁸⁾

(2) セグメント自動組立

セグメント自動組立は、高速組立や高精度な組立、効率的な組立を目的に開発された技術である。セグメント供給装置、位置決め機構、高速組立機構などから構成され、全自動組立の他、一部手動も組み合わせた半自動組立がある。高速施工に伴うヒューマンエラーを防止し、セグメント組立の品質向上が期待できる。主なセグメント自動組立技術を表 4.8.2-2 と図 4.8.2-6 に示す。

表 4.8.2-2 セグメント自動組立技術

工法名	概 要	会社名
①セグメント自動組立システム	セグメント搬送・供給・把持・位置決め・締結の一連の作業を自動化したシステムで、多様なセグメント継手形式（短ボルト・長ボルト・コッター等）に対応可能で組立品質・安全性向上、大口径では特に高速化が可能となる。	地中空間開発
②セグメント自動組立システムおよび半自動組立システム	セグメントの搬送から把持、位置決め、さらに継手結合までの一連のセグメント組立作業を自動で安全に精度よく施工することができ、半自動組立システムは、セグメントの粗位置決めまでを自動化したシステムで、いずれも施工の効率化が図れる。	JIMテクノロジー

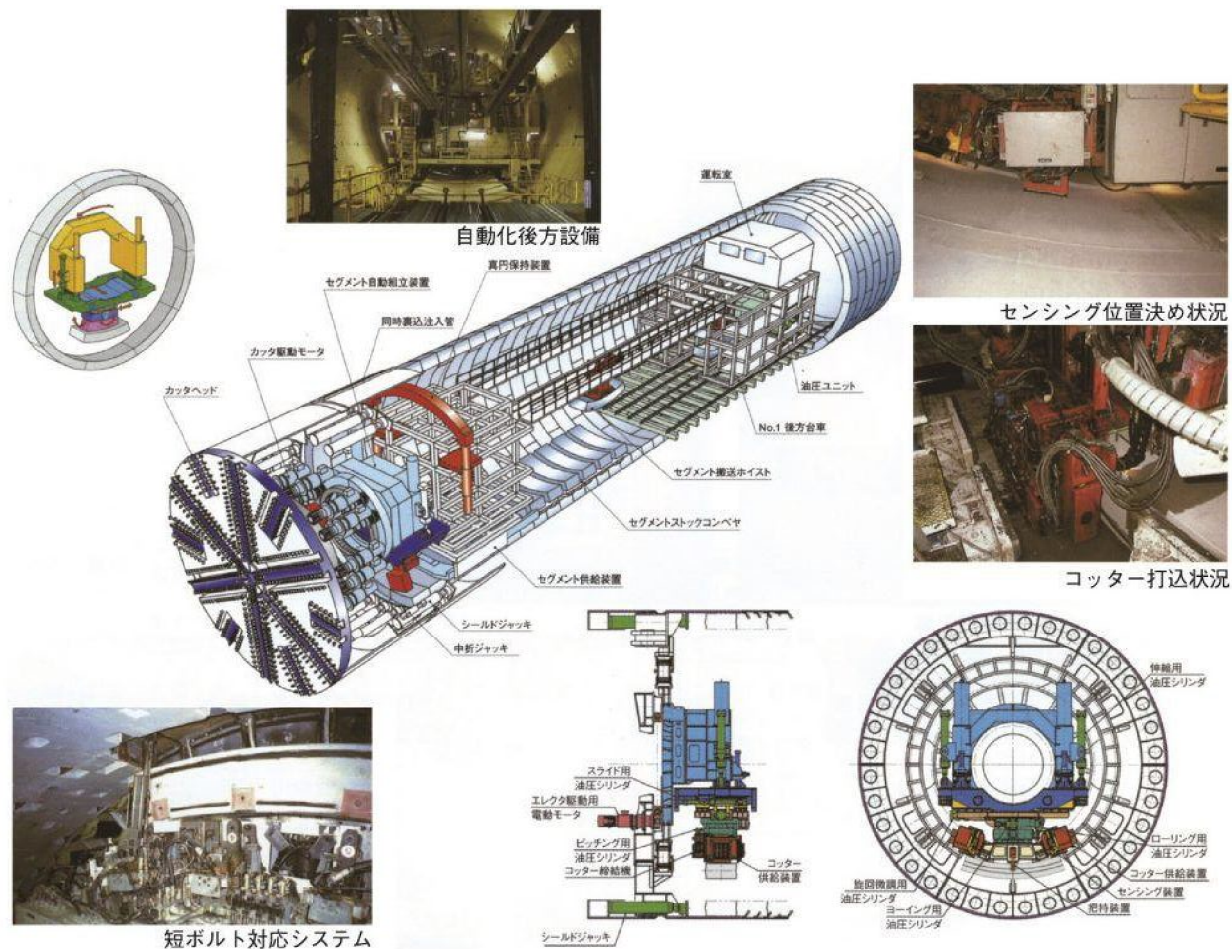


図 4.8.2-6 セグメント自動組立システム概要図

出典：地中空間開発 HP⁹⁾

(3) 資材搬送設備の自動化

掘進、組立サイクルの高速化を実現するためにはセグメントをはじめとする資機材の供給サイクルを高める必要がある。ここでは立坑上から立坑下および坑内のセグメント搬送に関する技術の例を表 4.8.2-3 および図 4.8.2-7～図 4.8.2-8 に示す。

表 4.8.2-3 セグメント自動搬送技術

工法名	概要	会社名
①セグメント自動搬送システム	立坑上からの荷下ろし、坑内搬送および切羽搬送までの自動搬送システムで、セグメントドーリー、セグメントリフト、セグメントセッター、バッテリーロコ、セグメント供給装置から構成されている。	鹿島建設
②セグメント立坑自動搬送システム	地上セグメントヤードからセグメントを受け取り、立坑下で待機するセグメント台車に積込むまで作業を自動化したシステムである。	フジタ

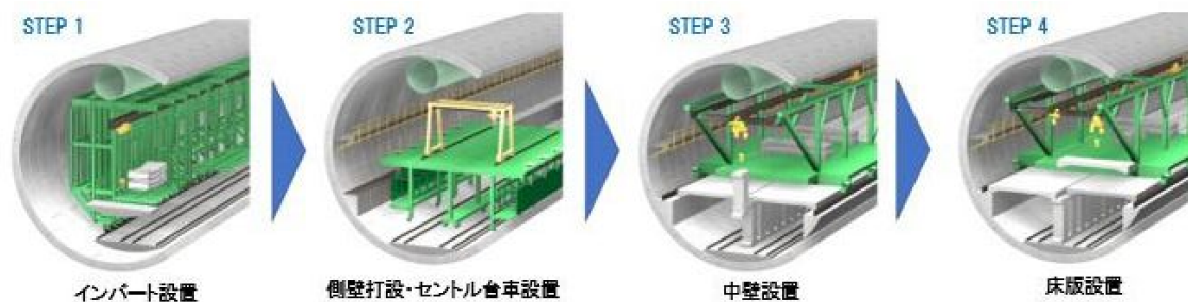


図 4.8.2-9 プレキャスト化内部構築部材による施工概要図

出典：鹿島建設 HP¹²⁾

4.8.3 開削工法急速施工技術

鉄道のアンダーパスのアプローチ部や都市部の道路トンネルなどを開削工法で施工する場合、既存道路の規制による交通渋滞や工事に伴う振動・騒音など周辺環境に与える影響が大きく急速施工技術が求められている。従来の開削工法では仮設土留めを施工後、土留め支保工を設置しながら掘削し、床付後躯体を構築することになる。ここでは、土留めの本体利用による省力化や土留め支保工の省略、躯体構築の効率化により工期短縮が可能となる。開削工法の急速施工技術を表 4.8.3-1 および図 4.8.3-1～図 4.8.3-3 に示す。

表 4.8.3-1 開削工法急速施工技術

工法名	概 要	会社名
① さくさくSLIT工法	プレキャスト部材を用いた逆巻き工法を基本とし、仮設土留め機能を兼ねる側壁部材を構築後に、プレキャスト頂版を架設し、早期に地上部を完成させた後、内部を掘削・構築する開削地下構造物の急速構築技術である。仮設土留め工の省略などによる工期短縮、頂版部材の先行構築により地上部を早期開放する。	戸田建設
② 斜め土留め工法	土留め壁を背面側に傾斜させることで、地下を掘削する際には作用する圧力（土圧）を低減させて、支保工を省略すると共に掘削内部をオープンな空間とすることで、支保工の架設撤去にかかる工程の短縮、掘削や躯体構築の施工性の向上により工程短縮が図られる。	大林組
③ スーパーリング工法	大型リングセグメントを地上で組み立て、土留め掘削した空間に吊り下ろして所定の位置までスライドさせた後、複数のセグメントのリング間をプレストレスによって一体化させることにより、道路トンネルなどを構築する工法で、リング構造により軽量化が図られ、コンクリート打設等の作業が不要で、施工性が向上し工程短縮が図れる。	鹿島建設

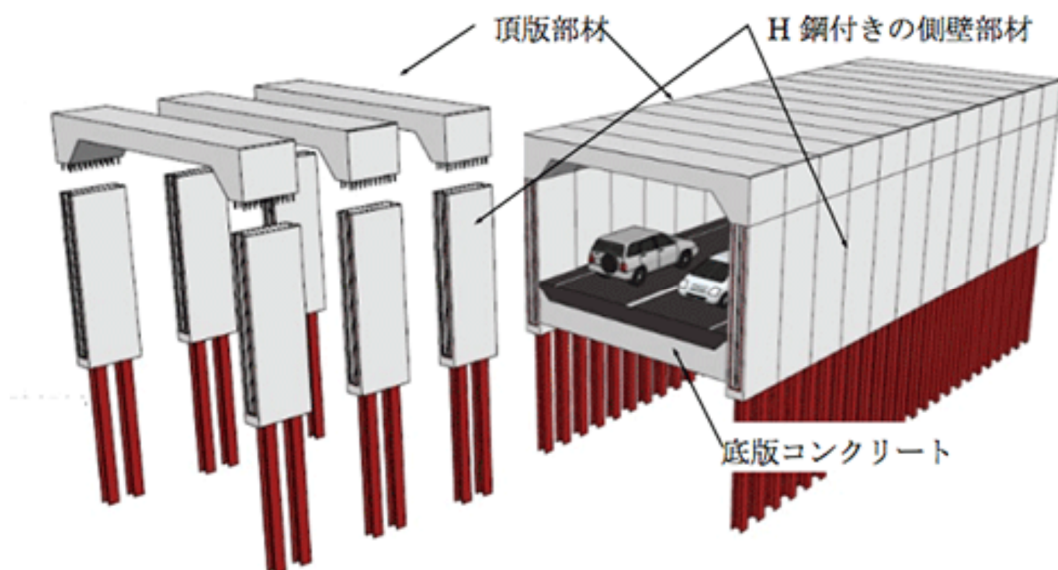


図 4.8.3-1 さくさく S L I T 工法概要図

出典：戸田建設 HP¹³⁾

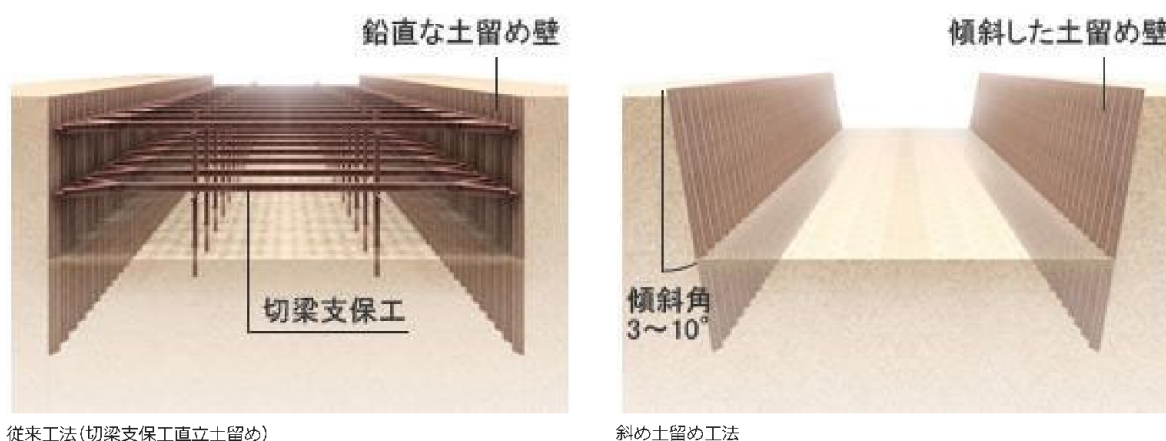


図 4.8.3-2 斜め土留め工法概要図

出典：大林組 HP¹⁴⁾

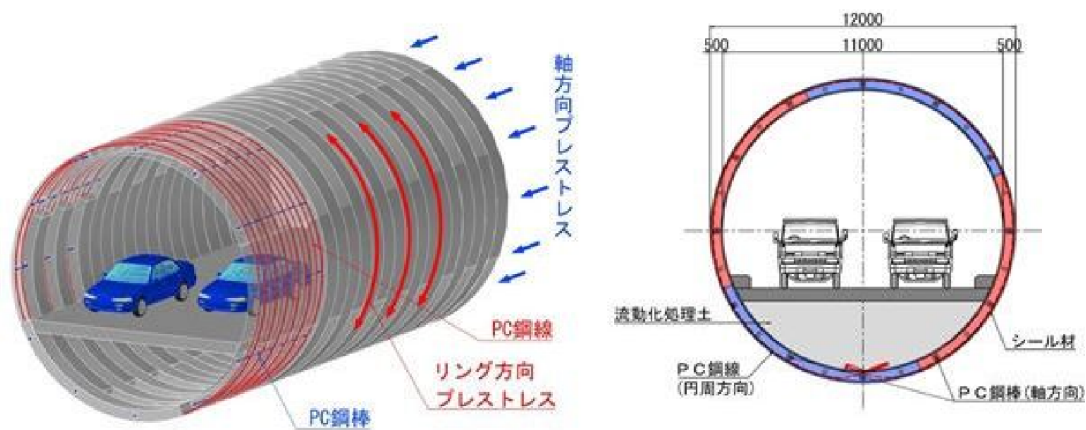


図 4.8.3-3 スーパーリング工法概要図

出典：鹿島建設 HP¹⁵⁾

4.8.4 立坑急速施工技術

立坑はシールド工法や推進工法でトンネルを構築する場合、掘進機を発進・到達させるために事前に構築することになる。近年、シールドトンネルは大断面、大深度化により、立坑規模および深度も大きくなってきている。それに伴い立坑の施工が長期に及ぶことになるため、立坑施工の工期短縮は重要となる。立坑の急速施工に関する技術を表 4.8.4-1 および図 4.8.4-1～図 4.8.4-2 に示す。

表 4.8.4-1 立坑急速施工技術

工法名	概 要	会社名
①アーバン・メカ・シャフト工法	鋼製のリング躯体を地上で組立てながら順次地中に圧入していく工法（アーバンリング工法）をベースとして、そのリング圧入システムとバケット揚土システムに新規開発した水中駆動掘削システムを組み合わせたものである。回転式カッタを使用するため掘削速度が速いのみならず、鋼製リング組立てと掘削を同時に行うため急速施工が可能である。	清水建設
②ハイパーシャフト工法	大口径深礎の機械化施工法として実績のある「スーパーRD工法」をベースに、径2～3mが標準であるケーシング回転掘削機の先端に拡張装置を取付け、ケーシングを動力軸としてその3倍程度の径の全断面機械掘削を行なうもので、ケーシング回転掘削機のトルクが大きく、掘削能力が高く急速施工が図れる。	鹿島建設

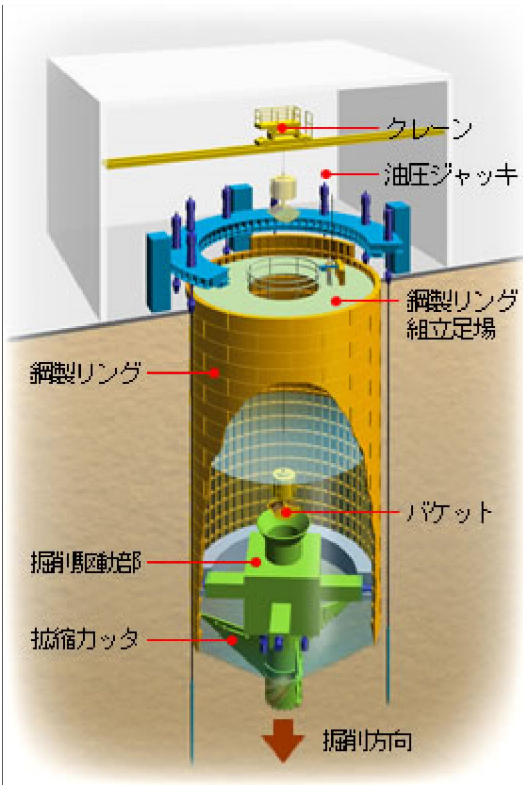


図 4.8.4-1 アーバン・メカ・シャフト工法概要図

出典：清水建設 HP¹⁶⁾

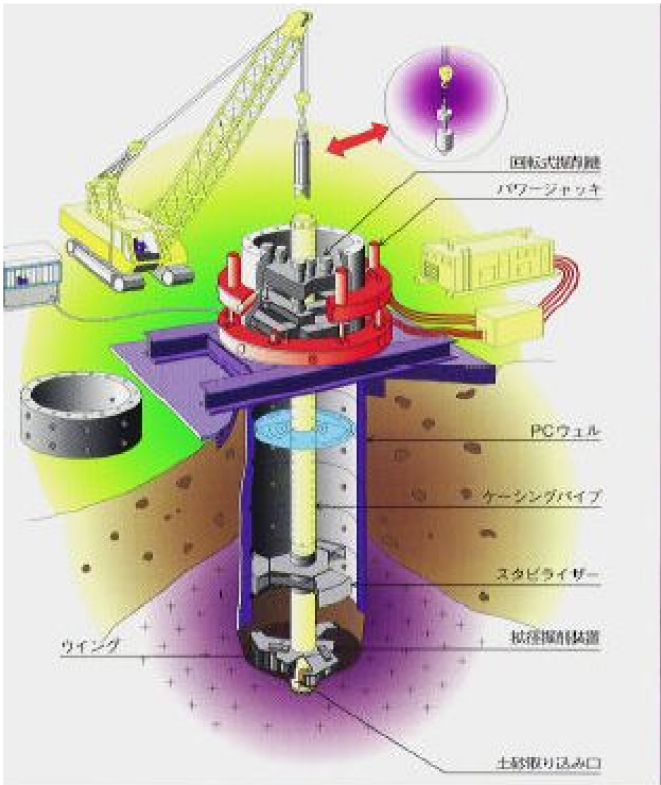


図 4.8.4-2 ハイパーシャフト工法概要図

出典：エンジニアリング協会 HP¹⁷⁾

【参考文献】

- 1) (株)大林組：大林組 H.P. ソリューション/テクノロジー（参照 2021.12）
https://www.obayashi.co.jp/solution_technology/detail/tech_d157.html
- 2) 鹿島建設(株)：鹿島建設 H.P. 技術とサービス，土木技術，シールドトンネル技術，掘進技術（参照 2021.12）
https://www.kajima.co.jp/tech/c_shield_tunnel/excavation/index.html#!body_02
- 3) 石川島播磨重工業(株)：石川島播磨重工業 H.P. プレスリリース，2004.3.17（参照 2021.12）
https://www.ihl.co.jp/ihl/all_news/2003/infrastructure_offshore/1189961_1843.html
- 4) (株)鴻池組：鴻池組 H.P. 技術とソリューション（参照 2021.12）
<https://www.konoike.co.jp/solution/detail/000423.html>
- 5) (株)奥村組：奥村組 H.P. 奥村組の技術，土木技術，シールド・推進（参照 2021.12）
<https://www.okumuragumi.co.jp/technology/engineering/shield/>
- 6) 清水建設(株)：清水建設 H.P. 技術・ソリューション（参照 2021.12）
<https://www.shimz.co.jp/solution/tech217/index.html>
- 7) (株)大林組：大林組 H.P. ソリューション/テクノロジー（参照 2021.12）
https://www.obayashi.co.jp/solution_technology/detail/tech_d139.html
- 8) 鹿島建設(株)：鹿島建設 H.P. 技術とサービス，土木技術，シールドトンネル技術，掘進技術（参照 2021.12）
https://www.kajima.co.jp/tech/c_shield_tunnel/excavation/index.html#!body_04
- 9) 地中空間開発(株)：地中空間開発 H.P. 技術紹介，高速施工（参照 2021.12）
<https://ugitec.co.jp/technologies/high-speed/>
- 10) 鹿島建設(株)：鹿島建設 H.P. 技術とサービス，土木技術，ICT，自動化（参照 2021.12）
https://www.kajima.co.jp/tech/c_ict/automation/index.html#!body_04
- 11) (株)フジタ：フジタ H.P. ソリューション・技術（参照 2021.12）
https://www.fujita.co.jp/solution-and-technology/detail/post_36.html
- 12) 鹿島建設(株)：鹿島建設 H.P. 企業情報，プレスリリース，2020.9.7（参照 2021.12）
<https://www.kajima.co.jp/news/press/202009/7c1-j.htm>
- 13) 戸田建設(株)：戸田建設 H.P. 技術とソリューション，土木，開削（地下工事）技術（参照 2021.12）
<https://www.toda.co.jp/tech/cutting/slit.html>
- 14) (株)大林組：大林組 H.P. ソリューション/テクノロジー（参照 2021.12）
https://www.obayashi.co.jp/solution_technology/detail/tech_d096.html
- 15) 鹿島建設(株)：鹿島建設 H.P. 企業情報，プレスリリース，2017.12.12（参照 2021.12）
<https://www.kajima.co.jp/news/press/201712/12c1-j.htm>
- 16) 清水建設(株)：清水建設 H.P. テクニカルニュース，2003.10.31（参照 2021.12）
<https://www.shimztechnonews.com/hotTopics/news/2003/s031028.html>
- 17) (一財)エンジニアリング協会：地下開発利用研究センターH.P.，会員技術紹介（参照 2021.12）
<https://www.ena.or.jp/GEC/tec/index.htm>

地下インフラの再構築における各種技術について、これまで紹介された分野以外のいくつかの項目について、現時点でのレベルと今後の動向について、簡単にまとめる。

(1) 概要

ここでは、東京外かく環状道路、リニア新幹線、および下水道幹線の事例を中心に、現時点での大深度施工のレベルを概観するとともに、そこで使われている施工法の限界深度等を確認する。なお、いわゆる山岳工法(NATM トンネルおよび発破式立坑)については、自立する硬質地盤を対象としており支保の考え方等が異なるため、基本的にここでは対象外とする。

本工事は、大深度法の適用第 2 号案件であり、東名 JCT 付近および大泉 JCT 付近からそれぞれ 2 機のシールドマシン合計 4 機で北行き線および南行き線を掘削し、地中接合にて繋げる予定である。このため、JCT 付近以外は 40m 以深の深度での施工が行われている。



IV-73

(3) リニア中央新幹線

リニア中央新幹線は、東京と名古屋を結ぶリニアモーターカーを利用した新幹線整備事業であり、JR 東海が事業主体として進めている。この路線はリニアの高速性を保つために縦断的にも横断的にも直線的な路線が計画されており、地形や既存施設の影響を極力回避するために、全線 286km のうちトンネル構造が 246km と 86%を占めている。このため、首都圏や名古屋付近の都市部でも大深度法を利用したトンネル構造が採用されている。

トンネルはシールド工法で施工され、この発進基地として将来は非常口として活用される立坑の掘削が進められている。計画深度等のオープン情報は開示されていないが、立坑の深度は 100m(東百合丘非常口²⁾)、90m(東品川非常口³⁾)などと報道されており、日本でも有数の深度での建設が進められている。

(4) 下水道幹線

下水道は古くから地下を利用する代表的なインフラとして整備が行われている。さらに、特に老朽化対策等のため施設の再構築等に際し、別系統との連携のために連絡管を整備する必要が生じ、既存のインフラを避ける必要から設置深度が深くなることもある。例えば、東京都の芝浦水再生センターと森ヶ崎水再生センターをつなぐ連結管整備⁴⁾では、両系統をつなぐシールドトンネルの発進・到達立坑はそれぞれ 70m を超える深度で施工され、シールドは最深部で 58m の実績が報告されている。

《芝浦水再生センター・森ヶ崎水再生センター間連絡管整備事業》

芝浦水再生センター、森ヶ崎水再生センターは水処理施設の老朽化や能力不足等の課題を抱えており、施設を全体的に造り替え機能向上を図る再構築の検討を進めています。

再構築時には、一部の処理施設を一時的に休止させる必要があり、処理能力が減少することから、不足する水処理能力をもう一方の水再生センターで補完するために、芝浦水再生センターと森ヶ崎水再生センターをつなぎ下水を相互融通する連絡管を整備しています。この連絡管は施設の再構築のみではなく、地震等の災害時に水処理施設等が被災した場合のバックアップ機能を確保する役割も有しています。

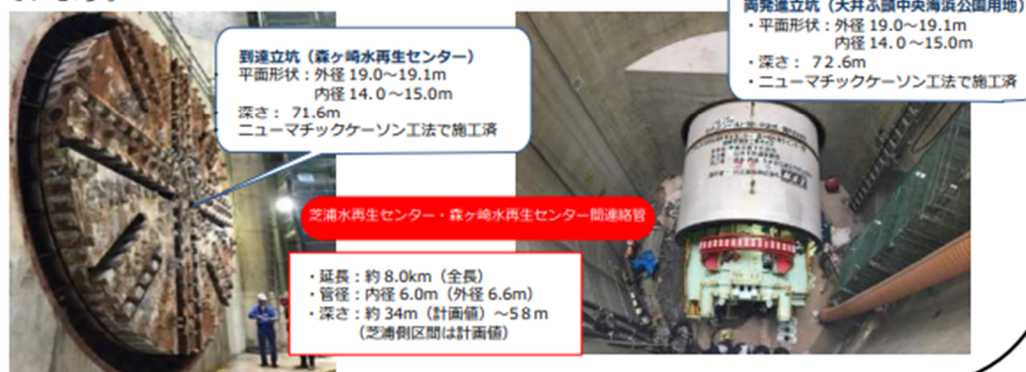


図 4.9.1-2 下水道連結管工事概要

出典：東京都下水道局事業概要（令和元年版）⁴⁾

(5) 大深度立坑構築工法の限界

大深度立坑の構築には地中連続壁工法とニューマチックケーソン工法が主に採用されている。このうち、地中連続壁工法は水平多軸回転カッターを用いて鉄筋コンクリートで坑壁を構築することにより、地質等の条件によっては深度 150m 程度まで施工が可能である⁵⁾とされている。

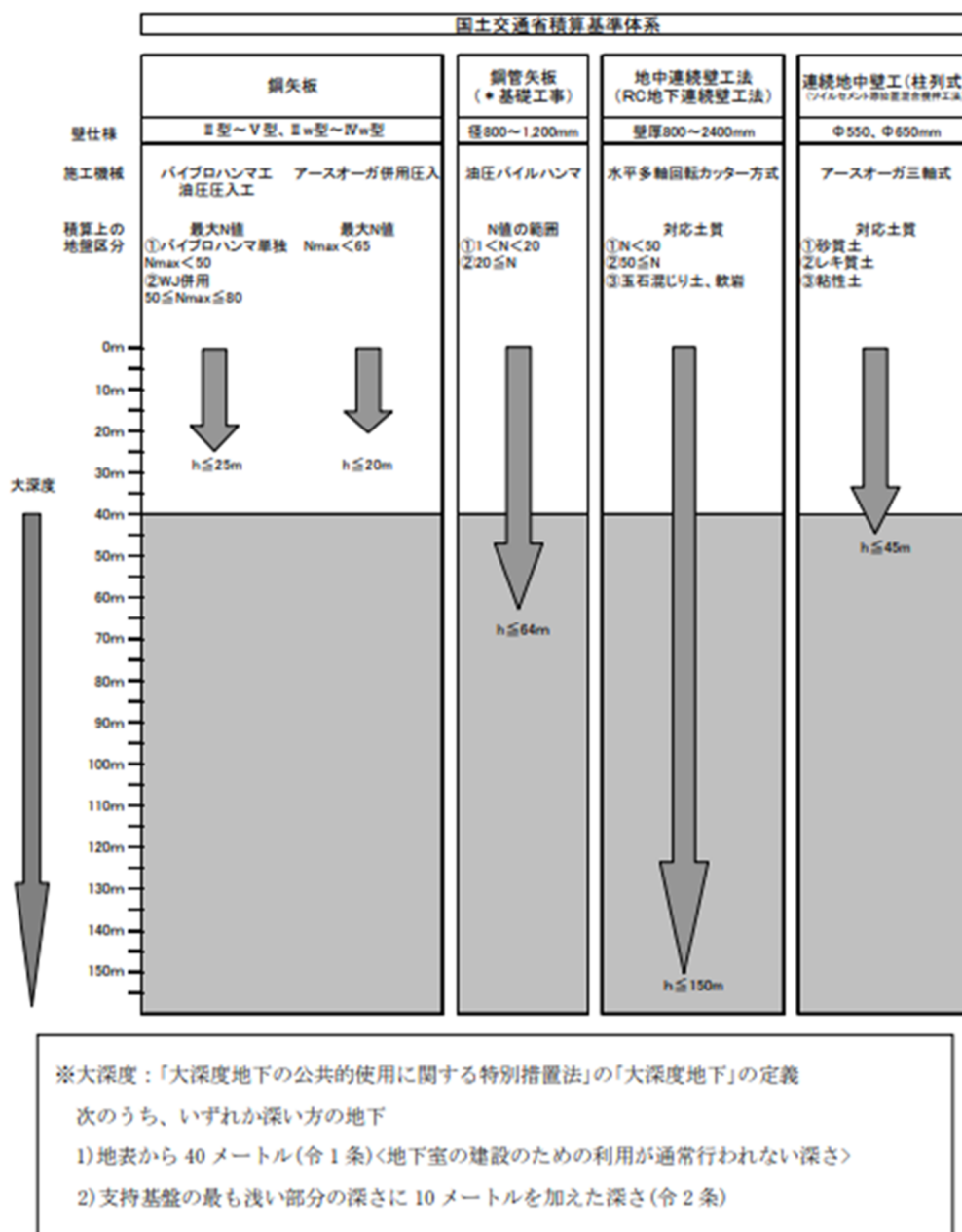


図 4.9.1-3 国交省積算基準における土留め工法の施工深度

出典：土木学会 建設技術研究委員会建設技術体系化小委員会⁵⁾

一方、ニューマチックケーソン工法は作業空間内の気圧を高めて地下水を排除して掘削する施工方法であるが、点検時やトラブル時に作業員の作業空間内への入坑が必要であることから、最大作業気圧は従来 0.4MPa 程度とされていたが、無人化施工とヘリウ

ム混合ガス呼吸システムを組み合わせることで 0.7MPa 程度⁶⁾、地下水面下 70m 程度までの施工が可能となっている。

(6) シールド工法の深度限界

シールド工法は、未固結地盤をシールドマシンと呼ばれる円筒形の掘削機械の前面に設けられたカッター面にかかる圧力で地盤から作用する土圧・水圧に対抗し、マシン後方でセグメントをつぎ足しながら掘進する工法である。カッター面に圧力をかける方法として、泥水加圧式、泥土圧式などがあるが、いずれも緻密な圧力調整が必要である。

シールド工法の深度限界については明確な基準は無いが、実績として東京湾アクアラインでは海面下 60m 程度⁷⁾、また海面下 70m 程度の実績⁸⁾も報告されている。

大深度施工適用の課題は、カッター面の圧力保持・調整、セグメントの止水シール、などが課題と考えられる。

4.9.2 無人施工・自動施工

(1) 概要

近年の建設業における担い手不足、働き方改革、IT 技術の進展に伴って、無人施工や自動施工の技術開発が急速に進められている。

ここでは、地下工事を主体に、これらの技術の先端的な取組みを紹介する。

(2) シールド工法の自動施工

シールド工法は、カッター面に作用する土圧・水圧への管理をはじめ、掘進管理(速度、方向、ずり排出、等)、セグメント組立等の管理項目があるが、これまでも運転室での遠隔操作が進められている。さらに、AI 技術が一般化し始めたことにより、運転制御等に取り入れる動きが加速しており、ゼネコン各社ともにシールド工事の完全自動化を見据えて、技術開発^{9),10)}を進めている。

(3) ニューマチックケーソン工法の無人施工

ニューマチックケーソン工法は、地下水圧に対抗するため作業空間の気圧を高めていることから、作業空間内での作業時間を減らすため、無人施工技術が発展している。現在は遠隔操作が主体であるが、さらに自動化¹¹⁾を見据えた開発が進められている。

(4) 山岳トンネルの無人施工

山岳トンネルでは、切羽近傍での事故が多いこともあり、切羽作業を中心に無人施工技術の開発が進められている。このうち、コンピュータジャンボを用いた削孔作業¹²⁾、鋼製支保工の建込作業¹³⁾、吹付作業¹⁴⁾等の単独工種は既に自動施工の取り組みがかなり進んでいる。さらに、ずり出しではベルトコンベアを利用したホイールローダの自動運転としてシステムの開発を含め、一連の自動施工技術の開発¹⁵⁾が進められている。

(5) ダムの無人施工

ダム施工においては、一連の作業を複数の重機が自律的に実施するレベルまで自動施

工技術が進んでいる。例えば、鹿島建設は東北地整・成瀬ダムの本体盛立て作業において、23 台の自動重機(ダンプトラック、ブルドーザ、振動ローラ)の堤体材料(CSG 材)の運搬・撤出し・転圧・清掃作業を自律・連携して行っている¹⁶⁾。

(6) 地下工事における無人・自動施工の課題

地下工事における無人施工・自動施工における課題として、GNSS による位置測定ができないこと、無線通信環境が脆弱なこと、施工ヤードが狭く錯綜していること、などが挙げられる。これらに対し、様々な IT 技術の活用(自動追尾型 TS、SLAM 技術、等)や、狭いがために可能なこと(ローカル 5G、詳細 3D モデル、等)などを利用した解決策があり、ニーズに応じて急速に施工技術が発展していくことが期待される。

4.9.3 新素材

(1) 概要

地球温暖化対策を契機とし、世界的にカーボンニュートラルが課題となっている。建設業においては、製造時に大量の CO₂ を排出するセメントの利用削減等がクローズアップされている。

ここでは、セメントに関する新しい動きとともに、その他の建設資材として有望な新素材について紹介する。

(2) CO₂ 削減型コンクリート

セメント(普通ポルトランドセメント)の製造過程では多くの CO₂ が排出され、我が国全体の 3%に達するといわれている。そこで、高炉スラグを混入することで普通ポルトランドセメントの使用量を削減する研究開発が行われており、ECM セメント(高炉スラグ 60~70%混入、CO₂ 削減 60%以上)¹⁷⁾やサスティンクリート(高炉スラグ+シリカフューム 73%、CO₂ 削減率 70%)¹⁸⁾、ジオポリマー(フライアッシュ+高炉スラグ 100%)¹⁹⁾などが知られている。中性化や自己収縮にも対応した材料とされている。

(3) CO₂ 吸収型コンクリート

セメントの削減のみならず、コンクリートが固まる過程で CO₂ を吸い込み、コンクリートの CO₂ 排出量を実質ゼロにする技術が注目されている。

CO₂-SUICOM(シーオーツースイコム)²⁰⁾はセメントの半分以上を特殊な混和剤(γ -C₂S)や産業副産物に置き換えること、および火力発電所の排気ガスに含まれる CO₂ をコンクリートに大量に固定することにより、

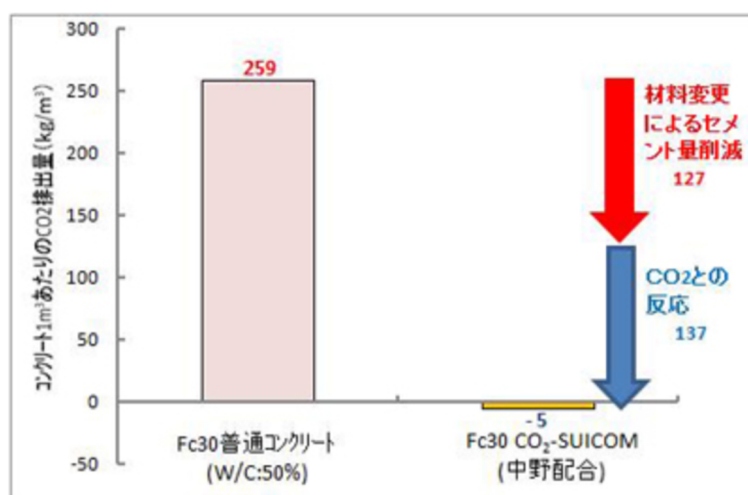


図 4.9.3-1 CO₂-SUICOM の CO₂ 削減量

出典：鹿島建設 HP²⁰⁾

ネットゼロ以下とする技術である。試算では、コンクリート 1m³ 当たりの CO₂ 排出量が、普通セメント(288kg/m³)に対し、本コンクリート(-18kg/m³)となり、コンクリートを施工することにより CO₂ を削減する結果となっている。

(4) 樹脂

コンクリートの代替材料としての炭素繊維を混入した CFRP 樹脂²¹⁾も開発されている。価格的に高価であるものの、軽量で耐久性も高いことから、場所を絞ったうえでの利用については、可能性が高い材料と考えられる。ただし、火災等に対しては、課題が残る。

(5) 木材

近年カーボンニュートラルや SDGs、地産地消等の観点で、特に建築分野で木材の活用が注目が集まっている。個人住宅のみならず、国立競技場や地方自治体庁舎などの大規模公共施設や文教施設、商業ビル等への活用も進んでいる。木材と鋼材、炭素繊維等とのハイブリット化²²⁾も進んでおり、また難燃化等の対策も施された材料²³⁾が開発されており、部材レベルで十分に利用可能な段階にある。

(6) 廃木材・廃プラスチック

リサイクル・未利用資源である木材とプラスチックを原料とした製品²⁴⁾が開発されている。これらの材料を「微粉末→混合→成形」することで、内装材(デッキ、ルーバー、ウォール)などに利用できる。廃棄物、特に近年注目されている海洋環境への影響が懸念されている廃プラスチックを建設資材に有効活用できる技術として、注目する必要がある。

【参考文献】

- 1) 東京都外かくパンフレット (参照2021.12)
https://www.toshiseibi.metro.tokyo.lg.jp/kiban/gaikaku/pp_06.pdf
- 2) 日刊建設工業新聞HP (参照2021.12) <https://www.decn.co.jp/?p=78846>
- 3) 朝日新聞HP (参照2021.12)
<https://www.asahi.com/articles/ASPBG4WF0PBFUTIL04V.html>
- 4) 東京都HP (参照2021.12)
https://www.gesui.metro.tokyo.lg.jp/about/pdf/jg01_gravure.pdf
- 5) 土木学会HP (参照2021.12)
<https://committees.jsce.or.jp/sekou05/system/files/11-4%20%E5%9C%9F%E7%95%99%E3%82%81%E5%B7%A5%E6%B3%95.pdf>
- 6) 日本圧気技術協会HP (参照2021.12)
<http://www.pneumatic.gr.jp/pneumaticmethod/pneumaticmethod01/>
- 7) 千葉県HP (参照2021.12)
<https://www.pref.chiba.lg.jp/doukei/aqualine/aqualinegaiyou/>

- 8) 鹿島建設HP (参照2021.12)
https://www.kajima.co.jp/news/digest/apr_2002/techno/index-j.htm
- 9) 清水建設HP (参照2021.12)
<https://www.shimz.co.jp/company/about/news-release/2021/2021052.html>
- 10) 大林組HP (参照2021.12)
https://www.obayashi.co.jp/news/detail/news20210322_1.html
- 11) 日刊建設工業新聞HP (参照2021.12) <https://www.decn.co.jp/?p=115649>
- 12) 古河ロックドリルHP (参照2021.12)
https://www.furukawakk.co.jp/info/2020/0615_release.html
- 13) 前田建設工業HP (参照2021.12)
<https://www.maeda.co.jp/news/2019/11/18/4998.html>
- 14) BUILT社HP (参照2021.12)
<https://built.itmedia.co.jp/bt/articles/1906/05/news049.html>
- 15) 鹿島建設HP (参照2021.12)
<https://www.kajima.co.jp/news/press/202106/30c1-j.htm>
- 16) 日刊建設工業新聞HP (参照2021.12) <https://www.decn.co.jp/?p=105426>
- 17) 竹中工務店HP (参照2021.12)
<https://www.takenaka.co.jp/solution/environment/ecm/>
- 18) 三井住友建設HP (参照2021.12) <https://www.smcon.co.jp/topics/2018/02261300/>
- 19) 日本コンクリート工学会HP (参照2021.12)
https://www.jci-net.or.jp/j/public/technology/archive/201612_article_1.html
- 20) 鹿島建設HP (参照2021.12)
<https://www.kajima.co.jp/news/press/201201/30a1-j.htm>
- 21) 大成建設HP (参照2021.12)
https://www.taisei.co.jp/about_us/wn/2019/191009_4805.html
- 22) 大成建設HP (参照2021.12) <https://www.taisei.co.jp/ss/tech/C0010.html>
- 23) 建材ナビHP (参照2021.12) <https://www.kenzai-navi.com/makers/awi/news/4754>

第5章 まとめ

第4部会報告では、社会と環境の変化を踏まえた地下インフラの再構築技術に関する調査研究についてとりまとめた。

第1章では本報告が取り扱う「再構築技術」の内容について検討し、いわゆる既存地下インフラの改築・改修技術のみならず、新規地下インフラの構築技術についても本報告の対象として扱うものとした。

第2章では地下インフラの新たな使い方について、社会環境の変化を踏まえ地下空間のメリット、地上と地下の使い分け、地下空間の具体的な新たな用途について検討した。

第3章では地下インフラの再構築において共通となる課題と、第2章の検討結果を踏まえ、その用途別に特有となる課題を挙げ、その解決に必要となる技術について検討した。

第4章では具体的な再構築技術についてカテゴリを分け、近年用いられている技術について調査した。以下に本報告において調査した再構築技術の一覧を示す。

表 5.1 地下インフラの再構築技術

施工カテゴリ	技術・工法の名称
4.1 拡幅	・円周シールド連結工法 ・ビックKアーチ工法 ・まがる一ふ工法 ・Kパイプリング工法 ・CS-SC工法 ・SR-JP工法 ・WJセグメント+シールドルーフ工法 ・地下水対応型継手による覆工の外郭先行構築工法 ・円周シールドと大口径密閉型パイプルーフを組合せた地中拡幅工法 ・3C先行覆工地中拡幅工法
4.2 接続	・EX-MAC工法 ・T-BOSS工法 ・分割フード式シールド接合工法
4.3 近接	・地盤改良，耐震補強工法（サンドコンパクションパイル，置換等） ・アンダーピニング工法
4.4 小土被り	・泥水加圧シールド工法 ・シールド地上発進，地上到達 ・R&C工法
4.5 大断面	・大口径円形シールド工法 ・外殻先行工法
4.6 特殊断面	・複円形シールド工法 ・矩形シールド工法
4.7 急曲線	・コンパクトシールド工法 ・ミニシールド工法 ・ECO SPEED SHIELD工法 ・デュアルシールド工法 ・Wagging Cutter Shield工法 ・SPR工法 ・パルテム フローリング工法
4.8 急速施工	・URUP工法 ・トロンボーン工法 ・掘進組立同時施工シールド ・セグメント自動組立 ・資材搬送設備の自動化 ・内部構築の同時施工 ・さくさくSLIT工法 ・斜め土留め工法 ・スーパーリング工法 ・アーバン メカ シャフト工法 ・ハイパーシャフト工法
4.9 その他	・大深度施工 ・無人施工，自動施工 ・新素材

本年度の報告では地下インフラの再構築技術について、近年の施工、研究事例から主要なものを取りまとめたが、今後は他部会の報告内容を踏まえて、地下インフラ構築に必要な技術を洗い出し、内容の充実を図る予定である。

また純粋な施工技術のみならず、「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」など地下インフラの再構築において関連する法規や探査技術などについても、今後は調査研究の対象とする。

以 上