

首都高速川崎縦貫線のMMST工法

都市内での浅層大断面非開削トンネル

大成・鹿島・戸田(高負)KJ124(4)～KJ132(1)トンネル特定建設工事共同企業体
現場代理人 水野 克彦

技士会は、1月20日(水)、約30名が参加するなか、「首都高速川崎縦貫線」の現場見学会を開催、今回は、その工事概要について報告する。

はじめに

川崎縦貫道路は、東西に縦長の川崎市内を、東京湾アクアラインと接続する川崎浮島ジャンクションから国道15号までの間を整備し、市内の渋滞緩和を図る事業であり、将来は東名高速まで延伸する構想もある。首都高速道路株式会社が事業中の高速川崎縦貫線は、浮島と殿町の間が既に営業中

であり、川崎縦貫線と横羽線を接続する大師ジャンクションと殿町の間が平成22年度の開通を目指し、現在建設中である(図1)。

現在施工中の川崎縦貫線の本線は、国道409号の直下において、殿町出入り口から産業道路に高架で併設した横羽線を地下で交差横断し、供用中の大師ジャンクションへ接続する区間である。

MMST(Multi Micro Shield Tunneling Method)は、その交差部を中心として、地表街路直下を浅い深度で通過する位置に、周辺住民への環境負荷を最小限に抑えながら大断面トンネルを建設するため、首都高速道路公団(当時)が開発した工法である。

当共同企業体は、MMST施工区間を施工担当している。

図1 ● 高速川崎縦貫線



MMST工法の概要・特徴

MMST工法は、複数の小断面矩形シールドにより掘削した後、それらを相互に接続してトンネル躯体外側(外殻)を先行構築し、内部土砂を掘削して大断面トンネルを構築する工法である。

外殻躯体を構築したのち、内部土砂を掘削し、

中床版および中壁を構築してトンネル全体を完成させる（図2）。

本工法は、開削工法や従来のシールド工法と比較すると以下のような特徴がある。

- ① 矩形シールド単体は小断面なので、土被りの浅いところでも掘進でき、最終的に大断面トンネルを非開削で構築可能（図3）
- ② 矩形断面のトンネルなので、円形の大断面トンネルに比べて余剰（デッドスペース）の少ない合理的な断面を確保することが可能（図3）
- ③ 小型矩形シールド間隔を調整することで、トンネルの断面形状をある程度変化させることが可能
- ④ 内部土砂は汎用掘削機械で掘削するため、産業廃棄物となる泥水または泥土の量を減少させることが可能

図2 ● MMST施工手順

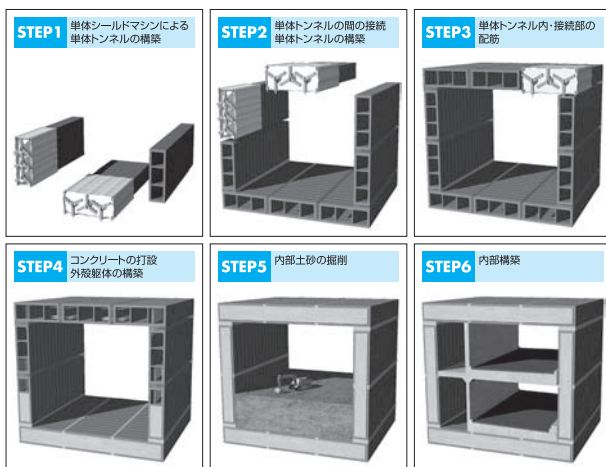
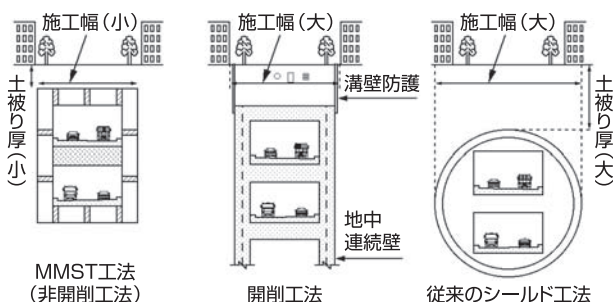


図3 ● 在来工法との比較



高速川崎縦貫線での工事では、トンネル全体の断面形状が、ジャンクション直近のため、道路線形変化が著しく、また、共同溝を併設する要求断面のため、内空最大高さ18m、最大幅23mの大断面トンネルが必要となり、これを最小幅29mという狭隘な道路用地、かつ最小土被り4.8mという浅層で実現している。

MMSTの設計概要

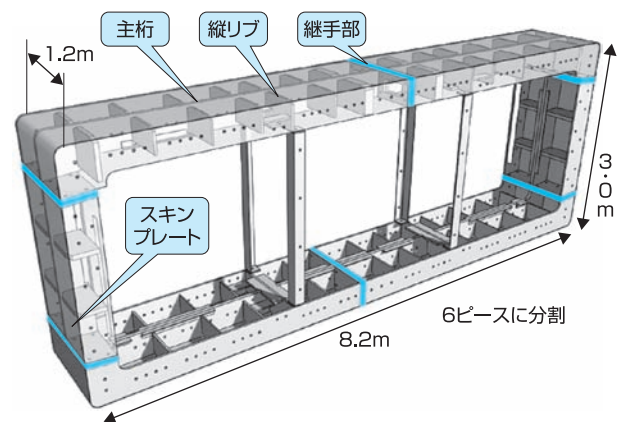
1 鋼殻の構造

小型矩形シールドの鋼殻の主桁は3本で構成し、縦リブはコンクリート打設時の充填性を良くするため、間隔を大きめに設定している。そのため、シールドジャッキは、能力を上げて本数を減らした。また、スパン中央には2箇所中間支柱を設置した（図4）。

横型鋼殻は、全体の大きさが高さ3m×幅8.2m×長さ1.2m、主桁板厚は、断面力により26～54mm、高さは、350mmである。

縦型鋼殻は、全体の大きさが高さ7.2m×幅2.5m×長さ1.2m、主桁の板厚は、断面力により26～34mm、高さ320mmである。

図4 ● 小型矩形シールド鋼殻



2 外殻の構造

(1) 構造設計

外殻は頂版と底版の厚さが3 m、側壁の厚さが2.5mのボックスカルバートであり、断面が一般部と、接続部の複合構造となっている（図5）。

一般部は、小型矩形シールドの鋼殻を構造部材として取り入れた鋼・コンクリート合成構造である。鋼殻の主桁は、縦リブがシアコネクタとなりコンクリートと一体化される。

接続部は、接続鉄筋を主鉄筋としたRC構造である。接続鉄筋の端部にある支圧板を、一般部の

主桁間に配置定着させる支圧方式で一体化させている（図6）。支圧方式とは、接続鉄筋に作用する引張力を、支圧板→コンクリート→エンドプレート→主桁と伝達させる構造である。鉄筋は主桁の間にD51×6本～D41×4本をかける応力に応じて配置した。支圧方式は、鋼殻組立の分割継手部にも配置している。

(2) 設計荷重

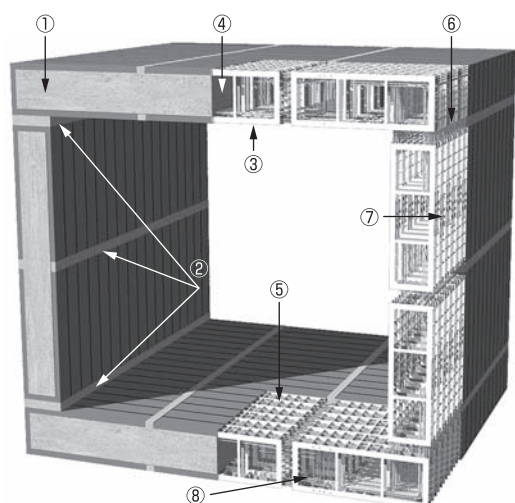
MMSTの設計に用いる土圧は、開削トンネルの考え方を適用し、静止土圧とした。鋼殻の挙動は、単体トンネルの状態から、全体断面構造へ移行するが、構造検討および構造実験の結果、本体構造時には、単体トンネルの状態の発生応力は、残留応力としては、扱わないこととした。

地震時の設計は、地盤と外殻構造を一体としてモデル化し、基盤面にL1、L2の地震波を入力して得られた応答値（震度）から断面力を求める応答震度法によった（図7）。MMST外殻のモデル化に際しては、接続部の曲げ実験を行い、接続部の降伏応力を解析値の70%とした。

(3) 耐火

外殻構造の耐火性に関しては、火災中は常時荷重に対して、火災後補修時は常時およびL1地震に対して曲げ耐力を確保することを要求性能とし

図5 ● 外殻の構造



- | | |
|--------------------|---------------|
| ① 一般部（鋼コンクリート合成構造） | ⑤ 縦リブ（シアコネクタ） |
| ② 接続部鉄筋（RC構造） | ⑥ 接続部鉄筋 |
| ③ 主桁 | ⑦ 継手部鉄筋 |
| ④ 中柱 | ⑧ セン断補強筋 |

図6 ● 支圧式接合

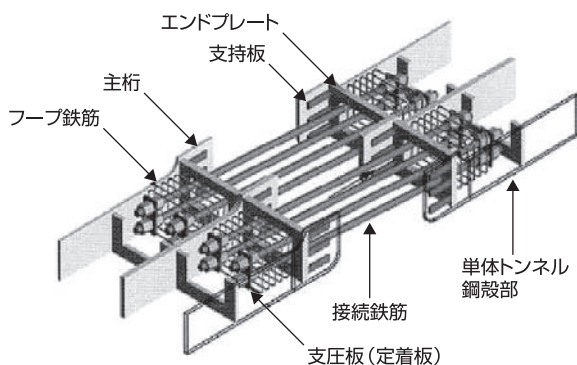
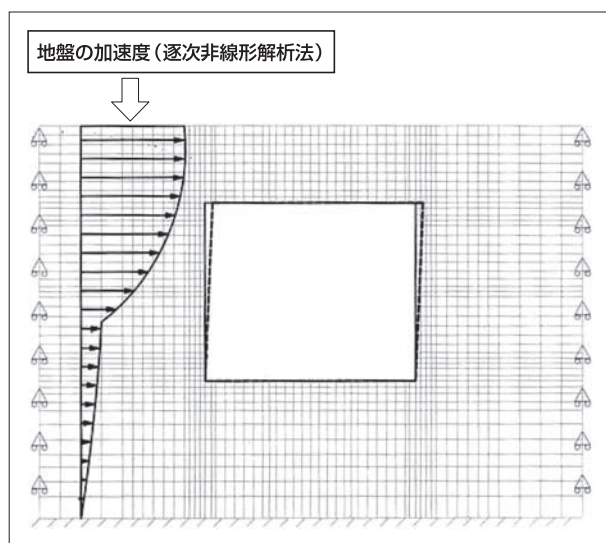


図7 ● 地震応答解析モデル



た。熱伝導解析、熱応力解析、コンクリートの爆裂性状を把握するための耐火性基礎実験を行い、側壁（一般部、接続部）頂版（一般部）は要求性能を満足し、耐火工の必要がないことを確認した。また、頂版の接続部についても、長期荷重に相当する引張力を導入した試験体を実験炉でRABT曲線（図8）に準拠して加熱し（写真1）、火災中および火災後補修時に所定の耐力を有することを確認した。

3 内部構築の構造

本トンネルは、上層が浮島行き、下層が大師行きの2層構造で、さらに共同溝が併設されること

図8 ● RABT曲線

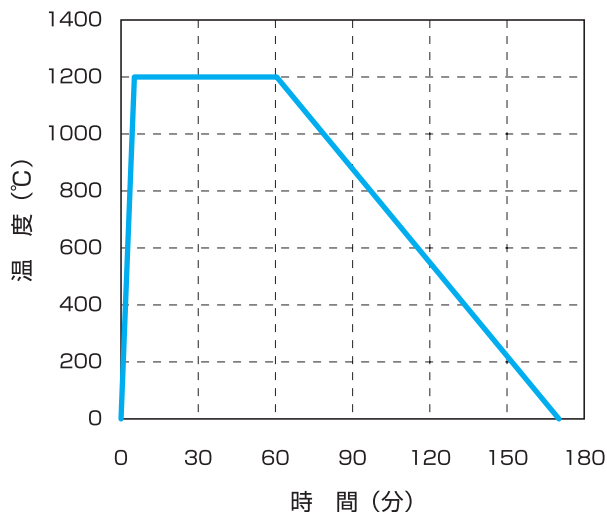
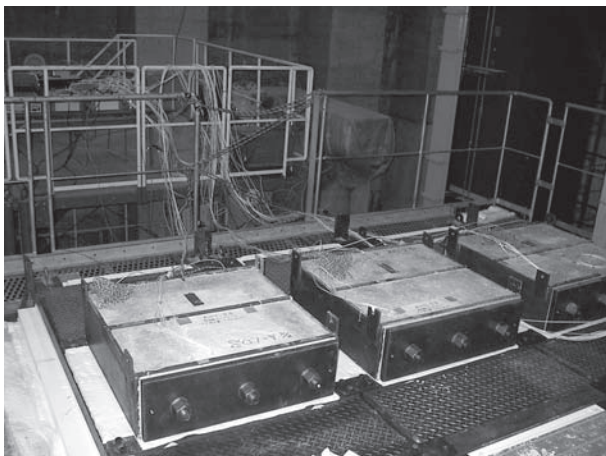


写真1 ● 耐火試験



から、中床版、仕切り壁などの内部構築が必要である。内部構築はRC現場施工によるのが一般的であるが、本工事では工程短縮のため、トンネル内に鋼製の柱と梁を架設し、ハーフプレキャスト床版を設置する工法を採用した（図9）。

(1) 柱・梁構造

外殻側壁にコーベルを構築し、下層の高速道路と共同溝の間に鋼製の柱を設け、鋼製の梁を横断方向に架け、床版を支持する構造とした。

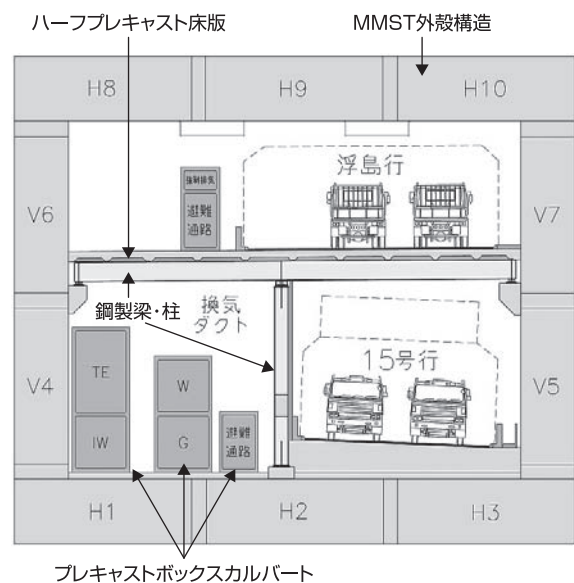
梁柱設置間隔は床版のスパンから6mとし、梁は900mm×700mmのH形断面でフランジ厚さ30mm、柱は650mm×650mmのH形断面でフランジ厚さ22mmを標準とした。

防食塗装は、トンネル内であることを考慮し、火災時に有毒ガスが発生しない無機系の塗装材料を使用した。

(2) 床版

床版はスパン6mのプレストレストコンクリート床版を採用し、トンネル内の作業を省力化するためプレキャスト化を図った。クレーンの揚重および施工性を考慮し、全体厚さ430mmのうち下側190mmをせん断補強トラス鉄筋付プレキャスト、残

図9 ● 内部構築の構造



りの240mmは現場打ち鉄筋コンクリートのハーフプレキャスト床版とした(図10)。

(3) 共同溝・避難通路

共同溝と避難通路は、延長方向にはほぼ同一な矩形断面であることから、コンクリート製のプレキャスト製品とした。

(4) 耐火

下層の高速道路と共同溝の間に設ける仕切壁には、柱の耐火を兼ね厚さ27mmの珪酸カルシウム板耐火パネルを設置した(図11)。

梁についても同様に高速道路上は耐火パネルを設置した。耐火パネルは、落下対策としてすべてワイヤーで結び、フェールセーフ構造とした。

床版については、火災の熱影響による爆裂を防止するためにコンクリートにポリプロピレン繊維(太さ48 μ m、長さ10mm、量2 kg/m³)を混入した。

図10 ● ハーフプレキャスト床版標準断面図

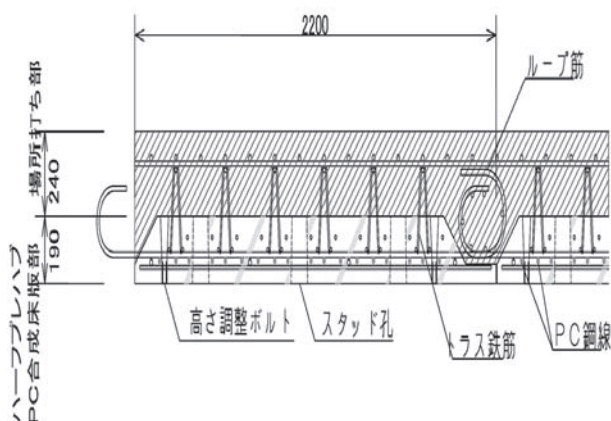


図11 ● 耐火パネル設置状況



小型矩形シールドの施工

MMST工法工事におけるシールドの施工にあたり、縦型シールド機と横型シールド機の2種類の小型矩形マシンを使用した(写真2、3)。

横型シールド掘削機は縦3.90m、横8.80m、長さ10.09m、重量670 tであり、縦型シールド掘削機は縦7.85m、横3.19m、長さ9.72m、重量547 tである。

1 小型矩形シールド機の仕様

(1) 掘削機構

泥土圧シールド方式を採用することにより、土被りの浅い掘進ならびに軟弱シルト層から砂礫層に至るまで幅広い土質に対応させた。切羽内に取

写真2 ● 横型シールド掘進機

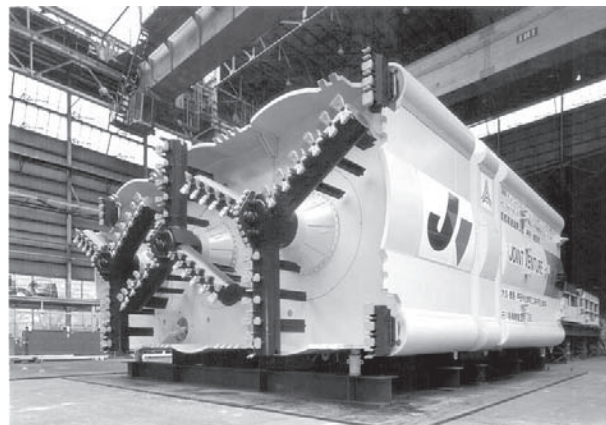
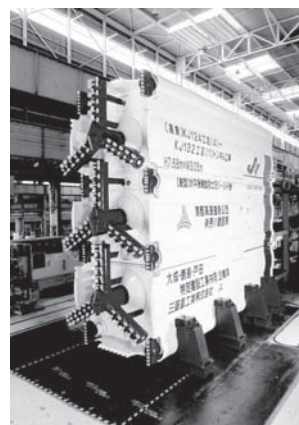


写真3 ● 縦型シールド掘進機



りこまれた切削土砂は、加泥材の注入により塑性流動化し不透水性を高め切羽の安定を図った。

矩形断面の掘削方法は、メインカッターでの掘り残し部をコーナーおよびサブカッターとコピーカッターの自動制御により切削する機構としている。したがって、コピーカッターストロークは縦型310mm、横型425mmと円形のものとは比べかなり長い。このメインカッターは縦型・横型共に同一平面上に3連配置し、そのトルク・速度・位置を同時に制御して回転することにより切羽の安定・切削抵抗のバランスを向上させている。加泥材はベントナイト溶液にポリマー系安定剤を添加したものを使用した。掘削地山に対する注入量は15～25%とし、排土量とともにモニタリングしながら管理した。

(2) 裏込め注入装置

掘削時に発生する鋼殻と地山の間のテールボイドは矩形シールドであるため円形シールドに比べ大きく、最大で450mmとなっている。

テールボイドに対しては、マシンテールからの同時裏込め注入工法を採用した。注入材料としては施工実績の多い可塑状裏込め材を使用した。材料特性は、ゲルタイムが15秒程度、長期強度で $qu = 2 \text{ N/mm}^2$ 以上（28日一軸圧縮強度）である。

注入は圧力により制御し注入量をテールボイド量に対し130%で管理した。

2 シールド機姿勢制御

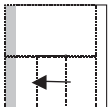
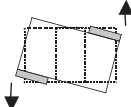
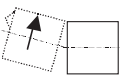
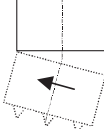
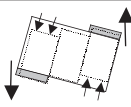
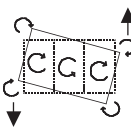
シールド機は各種姿勢制御装置を装備している（表1）。特にローリングについては、矩形シールドは制御が難しいため、前胴ブロックは、横型は左右3分割、縦型は上下2分割とし、機能の充実に図った。

3 シールド施工順序・能率

シールド掘進施工の順序は、下半から行った（9頁図2）。一般に外殻先行工法は上半から施工し、いわゆるアンブレラ効果により地表面影響を抑える方法をとる。本工事では、前述のとおり裏込め注入量が大きく、掘進中の注入量管理に課題があった。このため、まず、土被りが多く地山安定がある下半から施工し、注入量の管理方法を確立することとした。

実施工能率は、発進到達防護の地盤改良部以外においては、横型・縦型ともに初期掘進では日進4リング弱、本掘進では日進7リング強という進捗であった。

表1 ● シールド機姿勢制御

制御装置		制御項目	ピッチング (側面図)	ヨーイング (平面図)	ローリング (正面図)
オーバーカッタ コピーカッタ		移動方向側の地山を余掘りする			
カーブ用 中折れ装置		前胴・後胴間を折り曲げることで断面曲線・平面曲線への姿勢制御を行う			
ローリング 修正用 中折れ装置		前胴の両端が上下に折れる			
カッタ 回転方向		土の抵抗によりカッタの回転方向と逆方向にマシンが回転する			

4 施工管理

小型とはいえ浅い深度の地山を複数回応力解放するので、地表面沈下には十分留意する必要がある。施工管理は（表2）のとおりに行い万全を期した。鋼殻と民地の最小離隔は30cmであり、地表には、地盤沈下があれば影響が如実に現れるような大谷石塀等が沿線には多くあったが、有意な変状は発生していない（写真4）。

写真4 ● 地表面状況



外殻構築の施工

1 接続部の掘削

隣接する小型矩形シールド間の堀残し部を接続部という（次頁図12）。接続部の掘削は、まず、鋼殻の外側にあらかじめ装備しておいたスライド鋼板を隣接鋼殻側へ押し出し、接続部の一次的地山安定を図る。二次的地山安定として止水補助注入による地盤改良を行う。

そして、鋼殻のスキンプレートを撤去し、シールド間の土砂掘削を行い、配筋およびコンクリート打設によりシールド同士を接続する。

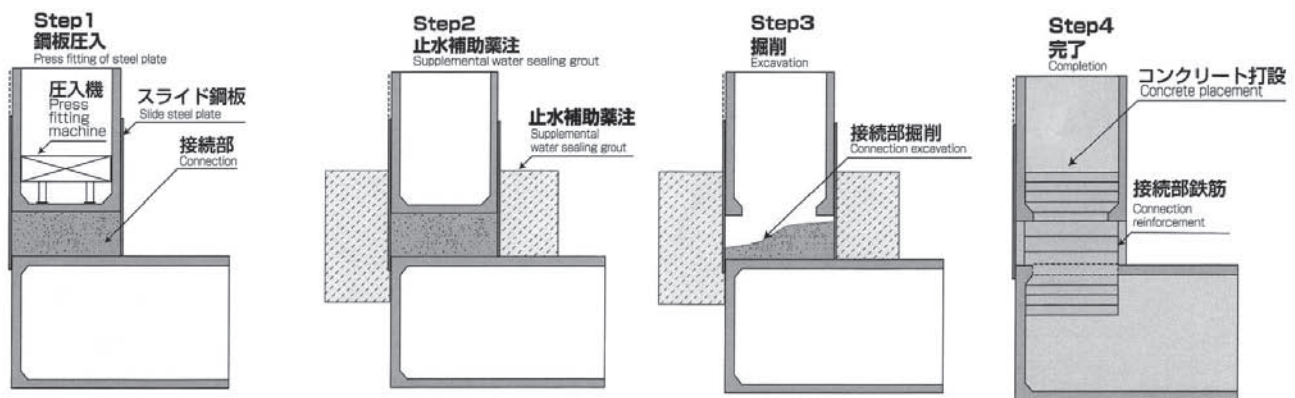
2 配筋

主桁間の狭い場所での配筋作業となるため、主筋は短尺のものを組み合わせ、継手は樹脂充填併用の機械継手とした。

表2 ● 施工管理一覧

項目	内容	検査内容・方法	規格値（目標値）	検査頻度
裏込め工	品質管理	フロー試験 ブリージング ゲルタイム 圧縮強度 (σ 1時間) (σ 28日)	8～11秒 5%以下/1hr 5～15秒 0.03N/mm ² 2.5N/mm ²	1回/1日 100リング毎
	注入圧	モニター確認	水圧＋（1～3）kgf/cm ²	リング毎（日報）
	注入量	モニター確認	130%	
シールド掘進	チャンバー内土圧	モニター確認	下限値・主働土圧＋0.2kgf/m ² 上限値・静止土圧＋0.2kgf/m ²	リング毎（日報）
	掘削排土量	流量計	設計数量×1.05（参考値）	
	ジャッキ総推力	モニター確認	5断面毎の縦リブ設計値以下	
	掘進速度	モニター確認	30mm/min（一般部掘削時、標準速度）	
	カッター回転方向	モニター確認	方向を記入	
	カッタートルク	モニター確認	トルク値を記入	
	使用ジャッキ	1R推す時に使用したジャッキ	使用箇所をマーキング	
作泥工	配合管理	プラント配合設定確認（添加材濃度）	0.05～0.4%	リング毎（日報）
	注入量	モニター確認	各土質毎に設定された量	
	注入率	注入量より算出	15～25%（参考値）	
国道上管理	地表面沈下測量	レベルによる測量・目視確認	解析沈下量以下	シールド掘進20M毎、1回
	埋設管沈下測量	計測機器による計測	各企業者毎に設定した規格値内	随時

図12 ● 小型矩形シールドの接続方法

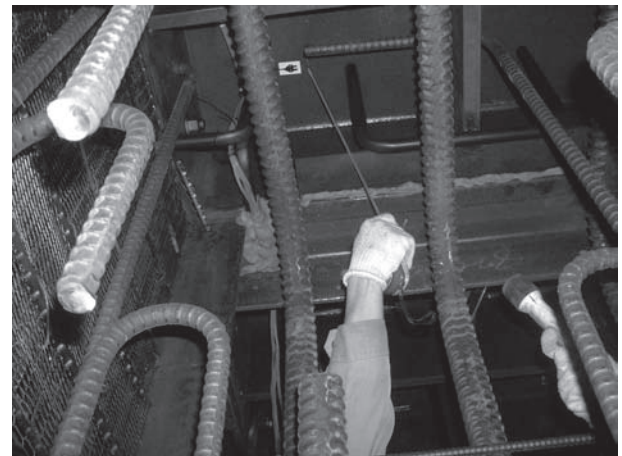


3 コンクリート充填

鋼・コンクリート合成構造は鋼殻内に確実にコンクリートを充填することが肝要である。頂版部と底版部は、人力による締め固め作業がきわめて困難であるので、高流動コンクリートを使用した。MMSTでは、地上部の立坑からの長距離圧送に耐える不分離性と流動性の確保のため、多糖類ポリマーを混和し高流動コンクリートそのものの性能を上げた。

さらに、コンクリートの充填作業は、①密閉空間の空気を順次コンクリートと置き換えていくための空気抜き配管、②フレッシュコンクリートの可使時間を充填速度から割り出し充填エリアをラス網で仕切る、③仕切ごとに横引き管を配置、④充填したことの確認を光センサーで感知、⑤打設箇所までの縦引き管は6インチ管にサイズアップなど、さまざまな工夫を施した（写真5）。

写真5 ● エア抜き管、充填センサー



内部掘削の施工

1 内部掘削機械構成

内部掘削（掘削土量192,000m³）は、2台のベンチカットにて掘削を進め、切羽には、0.4m³BH×2台、0.7m³BH、坑内運搬には、トラヒイカビリティ確保のため、10 t CD×3台にて立坑部まで運土した。立坑には、1.6m³BHを配置し、ベッセルへの積み込みを行った。

2 揚土方法

掘削土の揚土搬出箇所は、2つの立坑のみであるので、立坑下から地上への揚土は、全体工程のクリティカルであった。そこで、坑内掘削作業と調和した効率的な揚土方法（目標揚土量：80 m³/h）の確立のため、

- ① 汎用のベッセル（8 m³）を使用し直接トレーラーに積み込み搬出
- ② クラムシェルを使用し、直接ダンプに積み込む
- ③ 掘削土を泥土状にし、垂直スクリーンで揚土
- ④ 大型の転倒型ベッセル（20 m³）を使用し、いったん地上に仮置きしてダンプに積み込むという複数案を比較検討した。

図13 ● 内部掘削

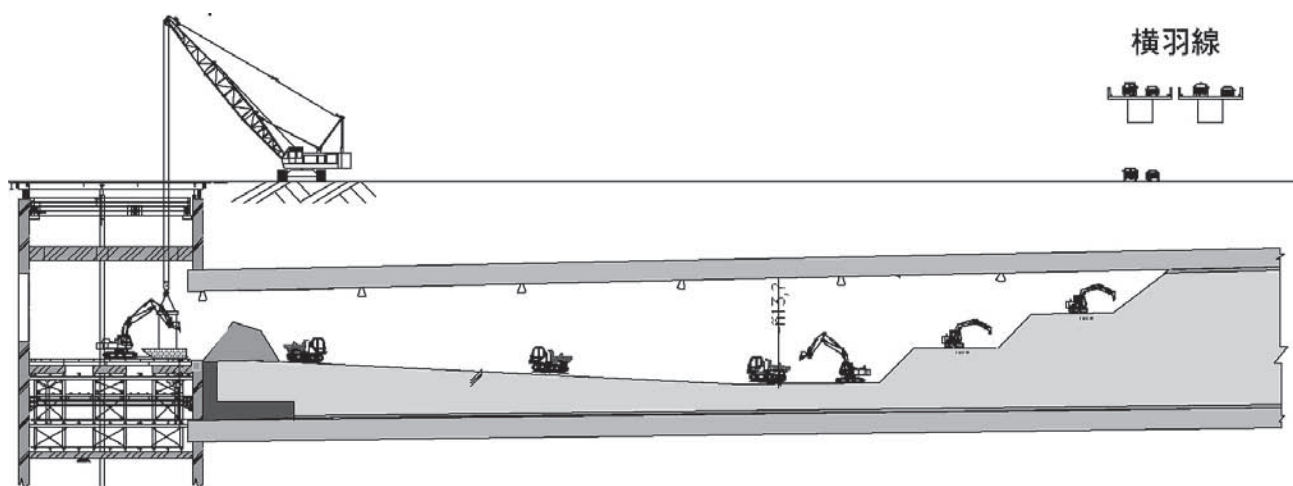
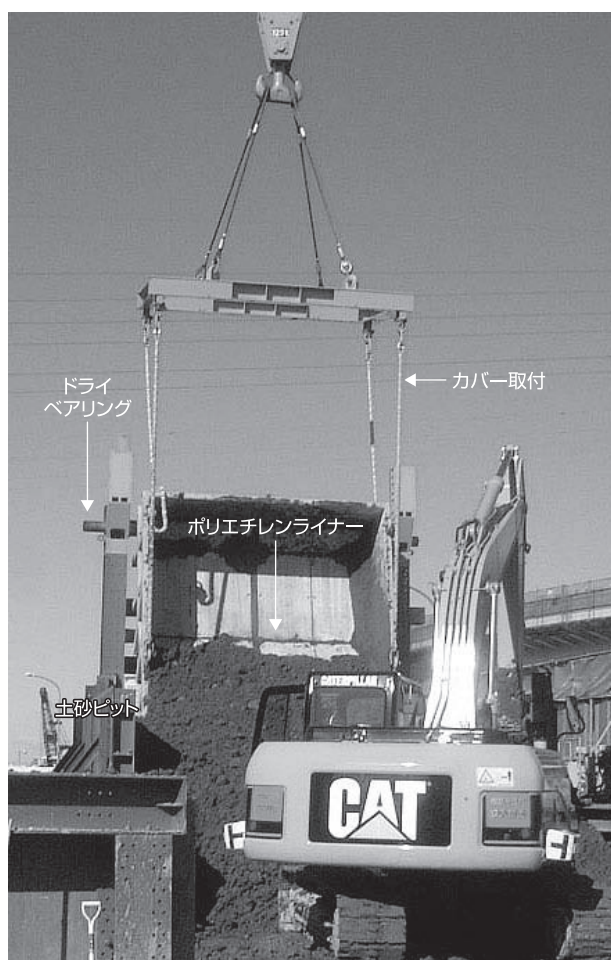


写真6 ● 転倒ベッセル



検討の結果、④大型の転倒型ベッセルを使用する方法を採用した（図13、写真6）。なお、20m³のベッセルには、内側に付着防止板（材質ポリエチレンライナー）を設置し、廃土効率を上げ、ベッセルからの排土に作業員の介入がないようにした。

3 騒音対策

工程確保のため、夜間の土砂搬出を行ったが、立坑上作業の騒音対策が必須であった。そこで、①ベッセルを吊り上げるチェーンにカバーを取り付け、転倒時のチェーンの音を緩和、②ベッセル転倒時のストッパーに衝撃吸収用のゴムを貼り付け騒音を吸収、③ベアリング構造のシャフトを採用し転倒時の軋み音の排除等、ベッセル転倒時に発生する音をできるだけ小さくした。

そのほか、土砂積込みのバックホウは低出力で作業するものとし、ダンプ誘導時に笛を使わず誘導棒で誘導する等、音を出さない作業を徹底して行った結果、近隣住民との大きなトラブルもなく作業を行うことができた。

内部構築の施工

床版をハーフプレキャストにしたことで、床版工事の現場作業を省力化するとともに、支保工が不要となり床版下空間を常に坑内の運搬経路として確保することができ、内部構築の効率化に成功

した。また、床版上側の現場打ち部分で路面の縦断勾配に応じた高さ調整を施すことで、調整層を不要とした。

坑内での荷吊り作業は、坑内に入れることのできる最大の50 t吊クラスのラフタークレーンで行った（写真7）。

ハーフプレキャストの現場打ちコンクリートは、幅が最大で23mあることから、乾燥収縮によるクラック発生の防止のため、ポリプロピレン繊維（太さ $28\mu\text{m}$ 、長さ19mm、量 1 kg/m^3 ）を打設前に現場配合した。

共同溝ボックスカルバートは、ボックスベアリ

ング工法で施工性向上を図った（図14）。この工法は、あらかじめ溝型鋼のレールを床版にセットし、ボックスカルバートをウインチで奥へ引き込んでいく工法であり、坑内作業では施工スペース・スピードの面で大変効果があった。

おわりに

現在、22年度内の開通に向け、内部の構築工、道床コン他付帯工事、および仮設立坑部の躯体構築を進めている。竣工まで無事故無災害で進めるべく、安全作業を行っていきたいと考えます。

写真7 ● 内部構築



図14 ● ボックスベアリング工法

