

都市内での限られた地下空間における MMST工法による道路トンネルの計画・設計・施工 The planning, design and construction of road tunnel using MMST method in the confined metropolitan underground area

相川 智彦¹・篠井 隆志²
Tomohiko AIKAWA・Takasi SASAI

Metropolitan Expressway Public Corporation employs tunnel instead of elevated structure because of consideration of environment around the construction site. Our company basically employs open cut method when we employ tunnel because of economical reason. However, there are many sites that we have to innovate a new method taking the place of open cut and shield method because of difficulties of acquisition of construction sites. In this paper, we explain the innovative method called MMST method which we can construct tunnel without consideration of difficulties of acquisition of construction sites.

Key Words : MMST, hybrid structure, composite structure, huge underground tunnel

1. はじめに

首都高速道路において現在建設中及び計画中の路線には、周辺環境などを考慮してトンネル構造として計画されている区間が多い。それらのトンネル構造物の施工は経済性の面から開削工法を基本としているが、施工条件、用地条件、環境条件などから開削工法の採用が困難な箇所が数多くある。しかし、道路線形上の制約や近接構造物の点から、一般的な非開削工法であるシールド工法やNATM工法などの採用が困難な場合もあり、また、経済性にも非常に問題がある場合が多い。

現在、高速川崎縦貫線のトンネル部において、施工条件、用地条件などから開削工法は採用できず、通常の非開削工法の採用も不可能な状況であるため、それらの厳しい条件に対応できる新しい非開削トンネル工法（MMST（Multi-Micro Shield Tunneling method）工法）を採用している。この工法による施工例がないため本施工に先立ち、試験工事として高速川崎縦貫線トンネル部と大師JCT内の換気用トンネルの構築にMMST工法を採用し、1999年にしゅん功して実用化の見通しがついた。現在は、本施工を実施しており、2006年9月現在の状況は、単体シールド10本の掘進及び単体シールド間の接続が完了しており、外殻構築についても8割ほど完了している。今後は、内部の掘削を行った後に内部構造の構築を実施して完成する予定である。（図-1）

本稿では、MMST工法による道路トンネルの計画・設計・施工概要についてまとめたものである。

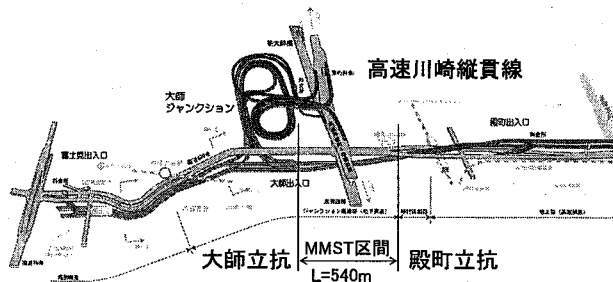


図-1 施工位置

キーワード：（MMST，複合構造，合成構造，大断面トンネル）

¹正会員 首都高速道路株式会社 神奈川建設局設計 G

² 首都高速道路株式会社 神奈川建設局建設管理 G

2. 計画

(1) 道路幾何構造

- ・道路規格 第2種第1級
- ・設計速度 $V=80\text{km/h}$
- ・車線幅員 3.5m
- ・車線数 2方向4車線
- ・共同溝 東電, NTT, ガス, 上水, 工水

(2) トンネル諸元 (図-2)

- ・トンネル延長 $L=540\text{m}$
- ・トンネル外寸 高さ24.05~22.5m
幅27.9~26.1m
- ・土被り 4.8~12.6m
- ・平面線形 $R=\infty\sim1,000\text{m}$
- ・縦断線形 $i_{\text{max}}=2.5\%$

(3) 制約条件 (図-3)

- a) 原道である国道409号 (25m幅) の中で常時4車線を確保し、昼間施工 (アセスの条件) を行う必要があり、かつ長期の大規模な工事借地は困難であるので開削工法は現実的に不可能である。
- b) 線形的には、パラレル構造から2層構造へ変化する構造であり、また土被りが少ないことから通常の大断面シールドでの施工は不可能である。
- c) 大師河原交差点部沿道の用地買収が困難である。

(4) MMST工法 (図-4,5,6)

上記制約条件をクリアするためにMMST工法を開発し、施工を実施しているところである。MMST工法とは、複数の小断面矩形シールドマシンを掘進し、単体トンネルを構築する。単体トンネルの施工完了後、鋼殻 (矩形的鋼製セグメント) の一部を撤去し、単体トンネル間 (接続部) の土砂掘削・配筋及びコンクリート打設を行い、単体トンネル同士を接続する。この作業を順次繰り返し、外殻部の躯体を構築した後、立坑より内部土砂を掘削して大断面のトンネルを構築する工法である。

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を有している。

- a) 開削工法と比較して地上部において作業帯や山留壁等の施工区域が不要となる。しかもトンネル上の車線規制や地下埋設物の移設や防護が少なくなる。
- b) 複数の小断面単体シールド大断面トンネルを構築できるため、大断面の円形シールドより土被り厚の小さい区間でも適用できる。また、単円の大断面トンネルに比べて合理的な断面を確保でき、

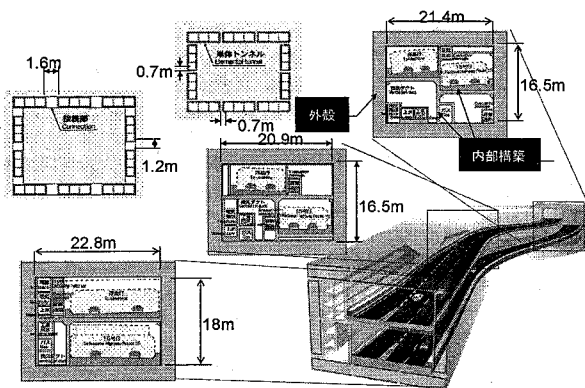


図-2 MMSTの線形

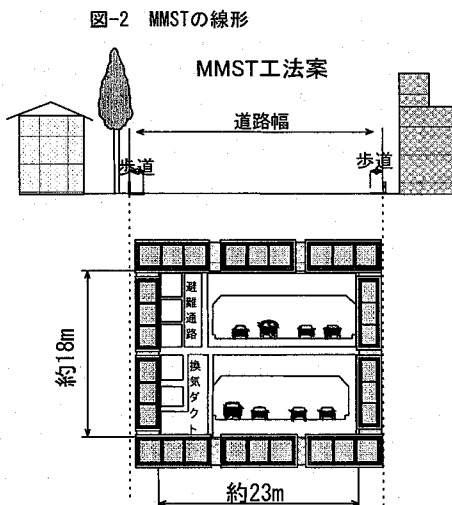


図-3 制約条件

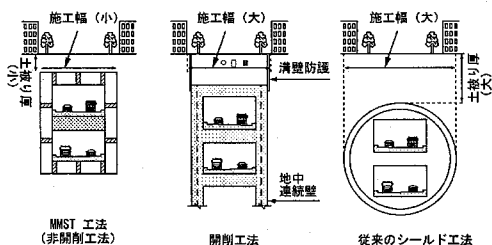


図-4 MMST工法と開削工法・円形シールドの比較

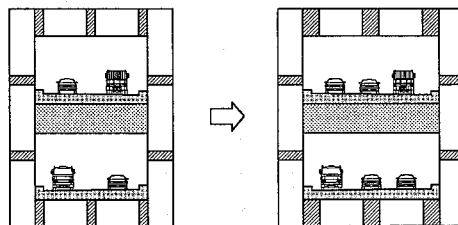


図-5 道路幅員の変化に伴う単体シールドの分割

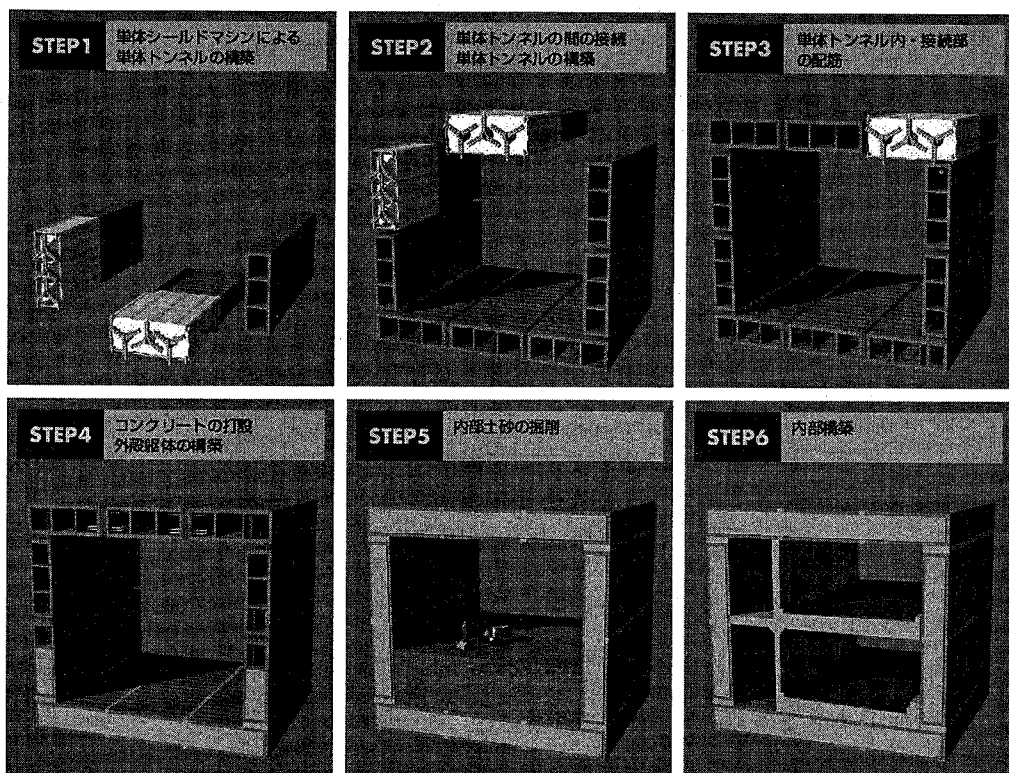


図-6 MMST施工ステップ

立坑の規模も小さくできる。

- c) 小断面シールド間の接続部間隔を変化させることによりトンネルの断面形状をある程度変化させることができ、道路の分合流部の施工に適用できる。
- d) 内部土砂は、通常の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できる。
- e) 構造系や作用荷重が施工段階に応じて変化するため設計プロセスが複雑である。
- f) 縦長または横長のシールドを施工するためシールド機の姿勢制御及び出来形の制度管理が重要である。

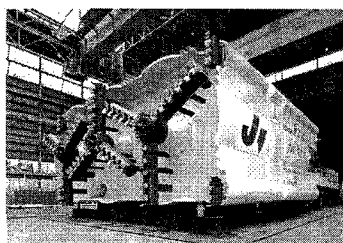
(5) シールド概要

シールドマシンは、横型2台・縦型2台製作した。狭いヤードでも施工可能なことや小土盛り施工に有利なことから泥土圧シールド工法を採用し、排土はポンプ圧送方式とした。(写真-1)

鋼殻寸法は、シールドマシンとの離隔を考慮し、横型8.2m×3.0m・縦型2.5m×7.2mのいずれも幅1.2m/リングを採用した。

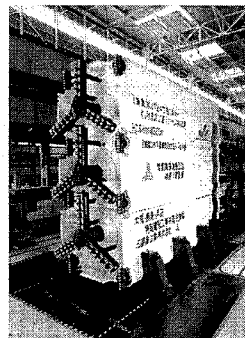
補助工法は、発進到達部にCJG、段取替え時マシン停止位置に薬液注入工を実施した。

MMST横型シールド機



重量670t 3.90m×8.80m×10.1m

MMST縦型シールド機



重量547t 3.19m×7.85m×9.72m

写真-1 シールドマシン

3. 設計

トンネル構造は、仮設段階である単体トンネル時は、鋼殻構造を有しており、本設の大断面トンネル時には鋼・コンクリート合成構造（一般部）とRC構造（接続部）の複合構造というMMST工法特有の構造形式を有している。（図-7, 8, 9, 10, 11, 12）

(1) 単体トンネルの設計（仮設時）

単体トンネル段階では、鋼殻は施工時荷重（土水圧、裏込め注入圧、隣接のシールドマシンの影響、コンクリート打設など）に耐えられる構造とする必要があるため、施工段階における作用荷重の変化を考慮して設計を実施している。部材の安全性の照査として許容応力度による鋼材の曲げ、せん断の照査を行う。

(2) 外殻構造の設計（常時）

外殻部完成段階では、全断面有効剛性と仮定した剛性一様モデルで解析を実施し、発生断面力に対し、合成構造部は主桁を主鋼材とした鉄筋コンクリートの慣用設計法に従い、曲げモーメント及び軸力に対する断面算定を行い、接続部は、通常のRC構造として設計を行う。

せん断力に対しては、コンクリートとせん断補強鉄筋で抵抗する構造である。このように単体トンネル施工時に配置される鋼殻を極力利用しているため、後施工の主鉄筋や配力筋をできる限り省略でき、構造の合理化を図っている。鋼殻を本設利用しない場合、鋼殻内に5～6段の配筋が必要となり、非合理的な構造となる。

また、鋼殻内に充填するコンクリートとして底版（H1, 2, 3）・頂版（H8, 9, 10）については、高流動コンクリート（併用系；スランプフロー65, 70）、側壁（V4, 5, 6, 7）については、普通コンクリート（高性能AE減水剤入）を採用している。

(3) 外殻構造の設計（地震時）

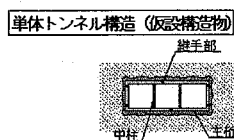
レベル1地震時及びレベル2地震時の検討を行っている。

レベル2地震時の検討は、鋼殻で囲まれた一般部・接続部及び構造変化点に対し、部材に応じた材料非線形特性（ $M-\phi$, $M-\theta$ ）を設定し、応答震動法にて解析を行っている。特に曲げモーメント・せん断力の卓越する隅角部の接続部は、交番実験および解析によりその構造特性を評価し、設計に反映している。縦断方向については、止水性および耐力にて安全性の照査を行っている。

(4) 接続部・継手部（図-6）

隣接する鋼殻間を繋ぐ接続部は、接続鉄筋を主鉄筋としたRC構造である。接続部鉄筋は、直接的に主桁に力を伝達する結合方式、支圧板を端部に配置し主桁内部に定着する支圧板方式を採用している。

結合方式は、鉄筋をエンドプレートを通して球面ワッシャーで接続することにより、鋼殻間の施工誤差を吸収できることとともに、底版上面においてコンクリートの充填性に左



MMST外殻構造（本設構造物）

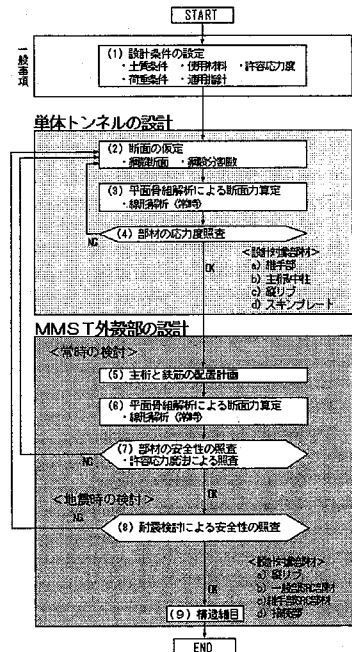
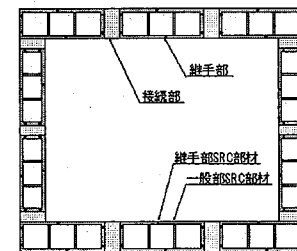


図-7 設計フロー

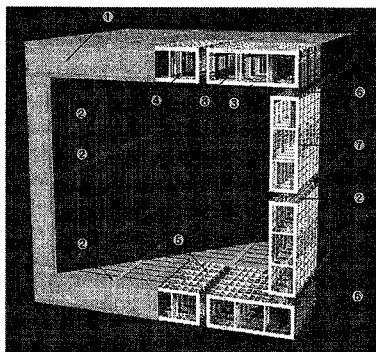
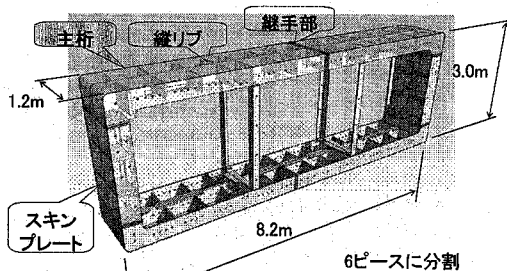


図-8 MMST外殻構造

- ①一般部(SRC)
- ②接続部(RC)
- ③主桁
- ④縦リブ
- ⑤接続部鉄筋
- ⑥継手部鉄筋
- ⑦せん断補強鉄筋



長辺方向の主桁、縦リブは外殻本体利用

図-9 MMST鋼殻構造（横型）

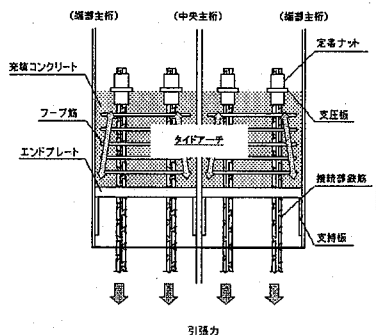


図-10 支持板方式の力の流れ

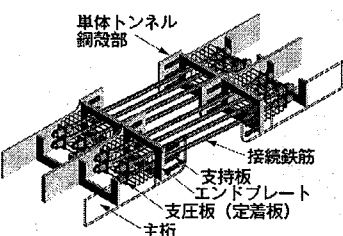


図-11 支持板方式構造

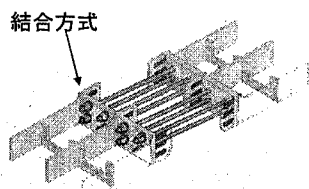


図-12 結合方式構造

右されことなく、直線的に主桁に力を伝達することができる。この方式の適用箇所としては、底板上面の継手部・接続部に適用している。

一方、支持板方式は、接続鋼材に作用する引張力を支持板⇒コンクリート⇒エンドプレート⇒支持板⇒主桁に伝達する構造である。

鋼殻の継手部は、単体トンネル施工時にボルト接合を行っているが、外殻構造時としての断面力に対して抵抗する必要があるため、継手部鉄筋をコンクリート打設前に配置し、主桁と同程度の強度を有するようになっている。定着構造は、接続部と同様に結合方式と支持板方式を採用している。

また、接続部・継手部において、接続鉄筋だけでは、断面力が不足する箇所については、鋼殻内側に鉄筋を追加している。

4. 施工

(1) 掘進実績（図-13, 14, 15）

シールド工事施工期間は、全体で4年6ヶ月であった。シールドマシン製作に1年2ヶ月、段取りに4ヶ月、単体シールド10本の掘進に約3年かかった。横型シールド総施工日数平均91日（本掘進時4リング/日），縦型シールド総施工日数平均116日（本掘進時3.5リング/日）であった。

掘進手順は、下記の理由により底板先行施工を採用した。

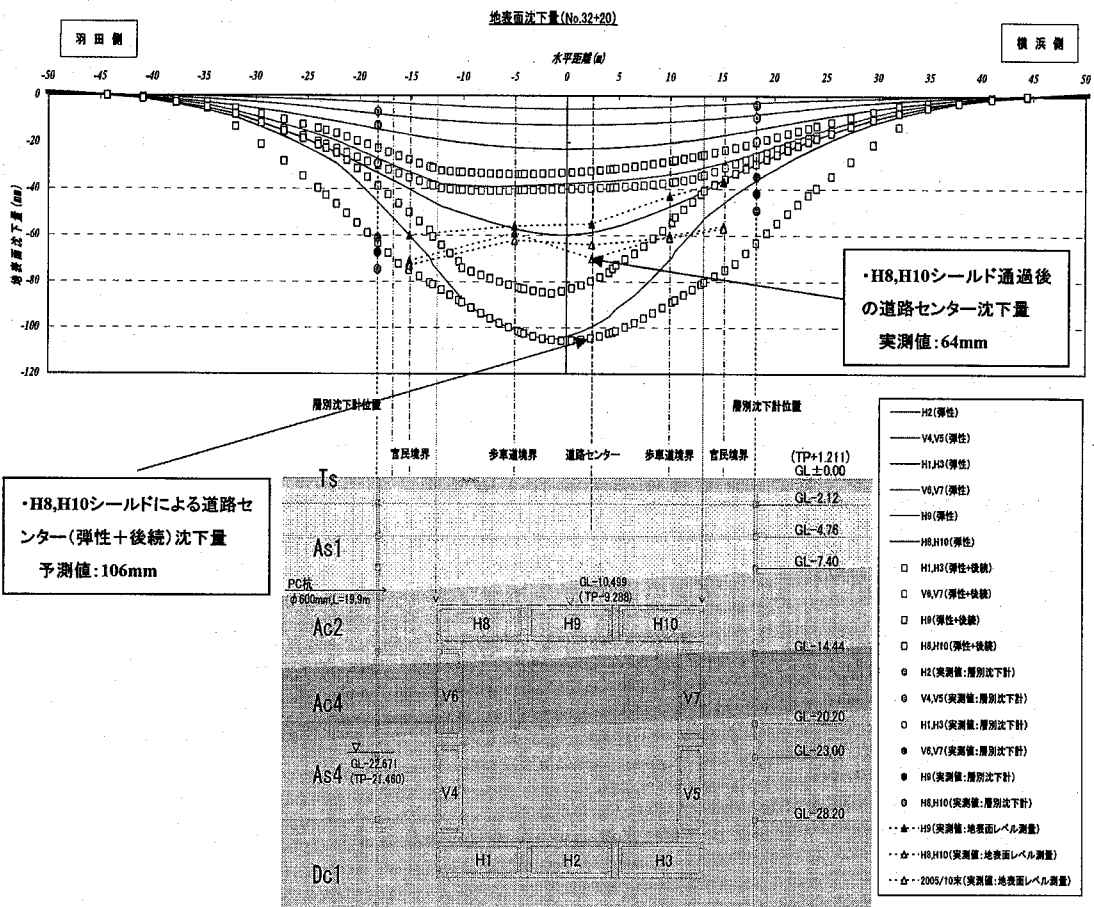


図-16 地表面沈下予測値と実測値の比較

(3) 単体トンネル間の接続

単体シールド掘進後に鋼殻に設置しているスライド鋼板を鋼殻内から接続部にジャッキにて圧入し、接続部の覆うように薬液注入により止水を実施する。その後、接続部の土砂を小型バックホウ及び人力にて掘削し、接続部に鉄筋を配筋してコンクリートを充填する。

(4) 高流動コンクリート (図-18, 表-1, 2)

高流動コンクリートは、フレッシュ時の材料分離抵抗性を損なうことなく高い流動性と自己充填性を有するコンクリートである。従来のコンクリートと比較して厳しい品質管理が要求され、コンクリートポンプによる圧送抵抗も大きい。

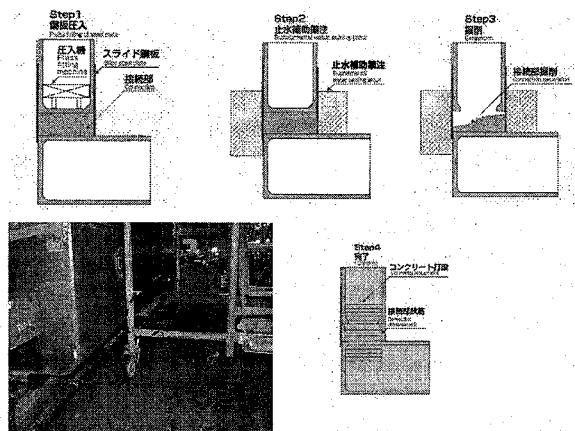


図-17 単体トンネル間接続工

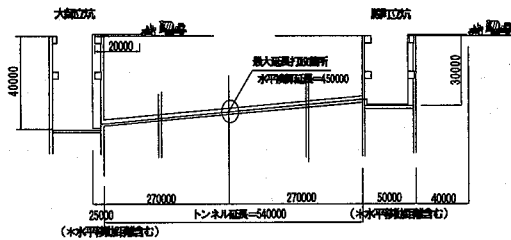


図-18 配管計画

表-1 施工数量と条件

	項目	単位	数量	摘要
施工数量	コンクリート工	m ³	130,000	
	鉄筋工	t	10,000	
施工条件	圧送距離			駅間立坑側
	水平距離	m	390	
	ベント管箇所	箇所	10	水平換算=6m/箇所
	水平換算距離	m	450	

表-2 高流動コンクリート配合

配合種別	スランプフロー (cm)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水 W	セメント C	石灰石 微粉末	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水材	増粘剤
A配合	30N-70-20L	70±5	165	330	270	780	770	7.2	0.3
B配合	30N-85-20L	65±5	165	314	206	855	797	6.8	0.3

底版及び頂版は、鋼殻内が狭く配筋が密となっており、コンクリートを締固める作業ができないことから、自己充填製に優れた高流動コンクリート（A配合：鋼殻上側，B配合：鋼殻下側）を採用した。施工の問題として、最大450m相当をコンクリート圧送しなければならないことであり、このような長距離圧送について実績が少なく定量的な評価が難しいことから圧送性の確認試験を実施した。その結果を以下に示す。

- 圧送時の圧力と吐出量には、高い相関性が見られ、一方に併せて他方も増加していた。
- 圧送時圧力が大きいほどスランプフローの損失も大きく、10Mpa程度の圧力を受けた場合にはスランプフローが10cm以上も低下していた。
- 吐出量が40m³/hを超える場合、圧送時圧力が高くなり、スランプフロー損失・500mmフロー到達時間の両方とも大きくなる。この結果、流動性を失う。
- 圧送前後の強度変化は、ほとんどなかった。

実施工は、試験結果よりコンクリート吐出量を30～40m³/h程度に管理して施工を行った。

5. まとめ

- 施工条件、用地条件、環境条件の厳しい施工区間において、開削工法及び円形シールド工法が不可能である中で、地下空間を有効利用したMMST工法を開発・実用化できた。
- 外殻構築の接続部・継手部の設計において、コスト削減の図れる支圧接合方式を開発し、適用した。

6. おわりに

今後、内部掘削工および内部構築工が引き続き施工される予定になっている。特に内部掘削工については、土砂の掘削に伴う計測結果と設計値を比較し、設計の妥当性について確認する予定である。また、内部掘削におけるMMST外殻構造のリバウンドについても注意深く計測することを考えている。

現在、外殻構造については、供用後に火害を受けた場合の残存耐力の確認を実施しており、耐火対策の要否について検討しているところである。

謝辞：MMST工法の開発・実用化にあたり多大なるご指導・助言を頂いた「川崎縦貫線におけるMMST工法の設計施工に関する調査研究委員会」の委員長（東京都立大学 今田徹 名誉教授）及び委員の皆様には、深く感謝の意を表します。