シールドトンネルの鋼製セグメント区間の覆工における吹付けライニング工法の開発と適用

川端康夫[1]・平間昭信[2]・酒井喜久雄[3]・高木聡史[4]

[1]正会員　飛島建設株式会社　土木事業本部　土木技術部（〒102-8332 東京都千代田区三番町2）
[2]正会員　飛島建設株式会社　技術研究所（〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472）
[3]株式会社エムシーエム（〒468-0006 愛知県名古屋市天白植田東2-1014）
[4]電気化学工業株式会社　無機材料研究部（〒949-0393 新潟県糸魚川市大字青海2209）

二次覆工一体型セグメントが適用される工事や二次覆工自体が省略される仕様のシールド工事では，鋼製セグメント区間の覆工の巻き厚が薄く，覆工構築の施工条件が厳しい．本工法は，従来の現場打ちコンクリートの施工では，品質確保が困難な鋼製セグメント内並びに鋼製セグメントと覆工仕上がり面との間隙を完全に充填し，耐久性の高いライニングを構築することを目標としている．新たに開発した特殊モルタルを鋼製セグメント内の狭空間に吹付け充填し，表層はシールドトンネルの用途に応じた高品質なモルタルを使い分け，吹付け・左官仕上げを行い，ライニングを形成する．また，硬化促進剤の添加装置や連続練りミキサを開発したことで，大容量吹付けが行え，工期短縮，コストダウンを可能にした．

キーワード：シールドトンネル，二次覆工一体型セグメント，鋼製セグメント，覆工，吹付けライニング工法

1. はじめに

近年，シールドトンネルでは，シールドマシンの性能向上や，セグメントの品質向上に伴い，二次覆工一体型セグメントが適用される工事や二次覆工自体が省略される仕様のシールド工事が主流になりつつある．このような中でも急曲線部では，シールドジャッキの大きな偏心荷重を受けるため，また，分岐合流部では将来的に開口を設けることなどから，鋼製セグメントが使用されている．しかしながら，ＲＣセグメント仕上がりとすることで，鋼製セグメントと覆工仕上がり面との間隔は，40～80㎜ と薄肉となり，さらに急曲線部の曲率半径が小さくなってきたことで，偏心荷重に耐えられるように補強リブが増え，開口部が少なくなっている．このため，鋼製セグメント区間の覆工は，従来のコンクリート打設では所定の品質確保が困難な状況になってきている．これらの状況に対し，**表-1** に示すような種々の覆工方法の取り組みが行われているが，これらの方法も密実性，平滑性，耐硫酸性（下水道施設の場合），難燃性（共同溝の場合），メンテナンスの容易さ，経済性などの要求性能の一部で課題を有している．

本工法は，劣化したコンクリートを断面修復する，高品質なモルタルの湿式吹付け工法をベースにした技術で，新たに開発した特殊モルタルを鋼製セグメントのリブ内の狭空間に吹付け充填し，表層は，シールドトンネルの用途に応じた高品質なモルタルを使い分け，吹付け・左官仕上げを行い，ライニングを形成するシステムで，鋼製セグメント部の覆工（以降，特殊二次覆工）の要求性能の達成を目標に開発を行った．

ここでは，工法の概要と適用事例，今後の取り組みについて報告する．

表-1 鋼製セグメント区間の各種覆工方法と特徴

覆工方法	特　徴
高流動コンクリート	自己充填性を有しているが，狭隘部の適用に限界がある．曲率半径に対応できる特殊な型枠を必要とする．
吹付けコンクリート工法	型枠を必要としない．補強リブのフランジが大きい場合は適応できない．仕上げが難しい．
埋め込み型枠工法	二次製品や樹脂パネルを仕上がり面に配置し，その内側に流動性の高いモルタルを充填する．
ポリマーセメントモルタル充填工法	鋼製セグメントの内外に吹付けやコテ塗りでポリマーセメントモルタルを充填し，最後に左官仕上げをする．

2．工法概要

(1)特殊二次覆工の要求性能

シールドトンネルにおける特殊二次覆工の要求性能は，通常の鉄筋コンクリート構造物を前提にしつつ，その用途により異なっている．**表-2** にトンネル標準示方書や二次覆工一体型セグメントの指針に準拠し，要求性能を整理した結果を示す．ＲＣセグメント仕上がりのトンネルでは，特殊二次覆工の施工条件が厳しい中，これら要求性能を満足できる工法の適用が求められる．特に鋼製セグメントのリブ内や仕上がり面までの薄肉部への覆工材料の充填状況が鋼製セグメントの耐久性に大きく影響を与えることに留意しなければならない．

(2)システムの概要

本工法を適用する特殊二次覆工の代表的な断面構成を**図-1** に示す．まず，鋼製セグメント内にプライマーを塗布し，硬化促進剤を用いた高性能な無機系モルタル（以降，充填モルタル）を吹付け，充填する．続いて，剥落防止やひび割れ防止を目的とした補強材を配置し，仕上げ層にトンネルの用途に適合する高品質モルタルを吹付け，左官仕上げを行う．最後に表層に養生剤を塗布する．**図-2** に吹付けシステムを示す．

充填モルタルは，液体の硬化促進剤を添加した圧縮空気により，ノズル先端でほぐされ，吹付け箇所に吹付けられる．硬化促進剤の効果により，吹付け後直ちに材料が締まり始めるため，吹付け箇所からダレることなく，連続して充填することができる．モルタルの練混ぜ・圧送は，連続練りミキサとスネーク式の圧送ポンプを用いることで，最大 2.0㎥/hr 吐出量を確保できる．但し，実際の吐出量は，充填性を考慮し，1.0～1.5㎥/hr で施工する．なお，硬化促進剤の供給を含む吹付け設備は，山岳トンネルのＴＢＭ（トンネルボーリングマシン）の吹付け工に適用される装置を本工法用に改良したものである．また，鋼製セグメントのリブ裏が完全に充填できるよう，専用の吹付けノズルの開発を行うとともに，圧縮空気の量を流量計で管理し，作業員が充填状況を目視で確認しながら，ノズルワークを行う．

表-2　シールドトンネルの特殊二次覆工の要求性能[1), 2)]

項　目	要求性能	具体的な要求項目，留意事項
防食性	塩害，中性化，化学的な浸食などの劣化外力に対する抵抗性を有すること．	①密実性：覆工材料が鋼製セグメント内に充填され，セグメントと密着していること． ②耐久性：覆工材料が想定される劣化外力に対し，抵抗性を有していること．通常は，塩害や中性化などによる鋼製セグメントや補強材の発錆抵抗が求められるが，下水施設では特に硫酸に対する抵抗性が求められる．
平滑性	流下能力確保のための平滑性を有すること．（下水道，水路）	コンクリート覆工の仕上がり面と同等の平滑性（粗度係数）が求められる．
摩耗対策	流水中のキャビテーションに対する耐摩耗性を有すること．（水路など）	長期的な摩耗作用で削られにくいことも重要だが，摩耗しても粗度係数の変化が少ない覆工が求められる．
難燃性	覆工材料が難燃性であること．（共同溝など）	覆工材料自体か難燃性であること，火災時に有毒ガスなどが生じないこと．
内空確保	所定の内空寸法を確保していること．	曲線部で覆工施工時の型枠や埋込み型枠の形状，寸法によっては，内空寸法やかぶりが確保し難いことに留意する．
内水圧	内水圧に対する耐荷力を有していること．（内水圧が作用する水路など）	覆工材料単独での耐荷力有すること，または補強筋を配置しても所定の耐久性を確保できること．
メンテナンス	メンテナンスフリー，メンテナンスの容易さを有していること．	一定期間メンテナンスフリーの耐久性を有すること．また，何らかの要因で損傷が発生しても修補が容易であること．
その他	経済性，工期に優れていること．	工事費，ライフサイクルコストも含めた経済性に優れていること，覆工は単独で施工されることが多く，工期の短縮が求められる．

(3)使用材料の性能

使用材料は，主に充填モルタルと仕上げモルタルからなる．仕上げモルタルは，トンネルの用途に応じ使い分ける．下水道施設では，耐硫酸性のポリマーセメントモルタルを，水路では，耐摩耗性のポリマーセメントモルタルを，共同溝では，劣化したコンクリートを断面修復する無機系の高性能モルタルを適用する．

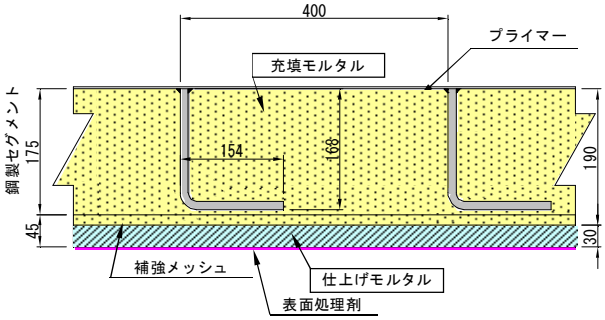


図-1　断面構成の例

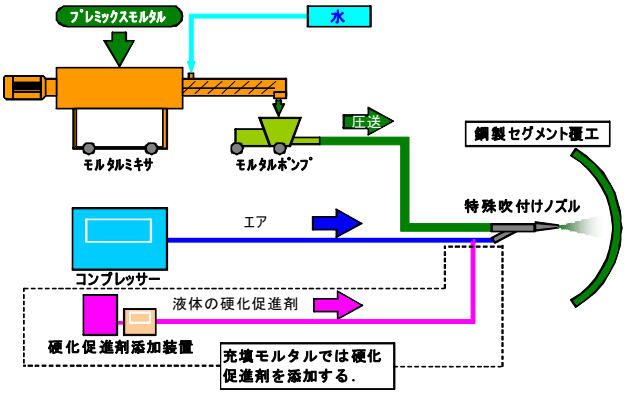


図-2　吹付けシステム

写真-1　鋼製セグメント

表-3　充填モルタルの配合（㎥当たり）

充填モルタル	水	硬化促進剤	ミニスランプ
1825kg	315kg	37kg	75±30mm

表-4　充填モルタルの性能

項　　目	材齢 28 日試験値	試験方法
圧縮強度	58.6　N/mm²	JIS A 1171
曲げ強度	9.5　N/mm²	JIS A 1171
付着強度	2.4　N/mm²	JIS A 1171
長さ変化率	0.06%	JIS A 1171

a) 充填モルタルの配合及び性能

鋼製セグメントの形状は，曲線部の厳しい箇所で，**写真-1** のように縦リブ間隔で幅 30cm，横リブ間隔で高さ 40cm 程度であり，充填モルタルをリブ内に充填したのち，収縮によって端部の縁切れや表面にひび割れが生じないような材料設計が求められた．また，モルタル圧送時の流動性の確保や吹付け時の粉じんの低減などを目標とした．

充填モルタルの材料組成は，普通ポルトランドセメントを主成分とし，上記目標を達成するため，良質な各種混和材料を添加している．硬化促進剤は，水溶性アルミニウム塩を主成分とした，人体に影響のない材料を選定している．さらにリブ内でのダレが空隙を生じさせるため，吹付けた直後に急激に可塑性化する材料を適用した．

表-3 に充填モルタルの配合を，**表-4** に吹付け後の各種試験結果の一覧を示す．充填モルタルは，各強度特性が高く，収縮量は，通常のセメント／砂＝1／3 のモルタルに比べ，1／2 程度に抑制できている．

また，本工法の中で，最も使用量が多いことから，材料設計では，コストダウンも目指している．

b) 耐硫酸モルタルの配合及び性能

下水道施設では，硫酸塩還元細菌によって硫化水素が生成され，引き続き硫黄酸化細菌によって硫酸が生成されるため，通常のセメント系の材料では硫酸劣化が生ずる．本工法で使用する耐硫酸モルタルは，アルミナセメントと高炉スラグ微粉末を主成分としたポリマーセメントモルタルで，日本下水道事業団及び東京都下水道局の下水施設に適用する断面修復材の基準を満足している．このモルタルは，元々コテ塗り用の材料であったが，ここでは吹付け用に改良している．なお，耐硫酸モルタルは，硬化促進剤を使用せず，充填モルタル施工後の壁面に層状に吹付け，最後にコテ仕上げを行う．

表-5 に耐硫酸モルタルの配合を，**表-6**，**表-7** に吹付け後の各種試験結果の一覧を示す．耐硫酸モルタルは，高い強度特性，収縮抵抗性を有しており，さらに中性化抵抗性は，W/C=40%のコンクリートと同等で，耐硫酸性

表-5　耐硫酸モルタルの配合（㎥当たり）

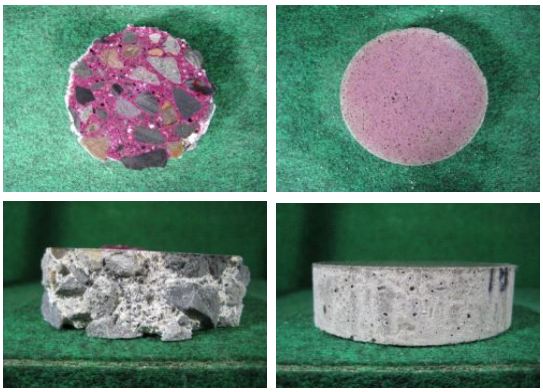
耐硫酸モルタル	水	ミニスランプ
1850kg	275kg	40±30mm

表-6　耐硫酸モルタルの性能

項　　目	材齢 28 日試験値	試験方法
圧縮強度	55.0　N/mm²	JIS A 1171
曲げ強度	7.9　N/mm²	JIS A 1171
付着強度	1.9　N/mm²	JIS A 1171
長さ変化率	0.04%	JIS A 1171

表-7　耐硫酸モルタルの耐久性

項　目	試験結果
中性化抵抗性	W/C=40%コンクリート　→　6.5mm 耐硫酸モルタル　→　6.7mm ※試験方法：JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠し，30℃，60%RH，CO_2 濃度 5%の環境で，4 週後の中性化深さを測定した．
硫酸抵抗性	【硫酸浸透深さ】 W/C=40%コンクリート　→　5.0mm 耐硫酸モルタル　→　2.0mm 【重量変化率】 W/C=40%コンクリート　→　-3.3% セグメント用コンクリート　→　-2.3% 耐硫酸モルタル　→　0.0% ※試験方法：日本下水道事業団試験法に準拠し，5%硫酸水溶液に 4 週間浸せきし，測定した．



W/C=40%コンクリート　　耐硫酸モルタル

写真-2　硫酸水溶液浸せき試験結果

に関しては，W/C=40%のコンクリートやセグメント用コンクリートと比較しても高い性能が確認できる．**写真-2** に硫酸水溶液浸せき試験の結果を示す．コンクリートは，表面のモルタル分が酸に浸食されボロボロとなり，径が100mm から 90～95mm 程度に縮小している．これに対し，耐硫酸モルタルは殆ど浸食されていない．

c)耐摩耗性モルタルの配合及び性能

導水路や農業用水などの水路では，長期の通水により，コンクリート表面のモルタル部分が削られ，骨材が浮き出た状態となる，いわゆる選択的な摩耗現象が生じている．この現象により，粗度係数が低下し，所定の通水量が確保できなくなることがある．この対策として，耐摩耗性を有するポリマーセメントモルタルを表面に 1～2cm 程度塗布する方法が採られている．

表-8 に耐摩耗性モルタルの配合表を，**表-9** に吹付け後の各種試験結果の一覧を示す．水路補修材に関しては，農林水産省で通水性，耐摩耗性の目安を示しており，ここで適用する耐摩耗性モルタルもその値を満足している．

表-8 耐摩耗性モルタルの配合（m^3当たり）

耐摩耗性モルタル	水	ミニスランプ
1925kg	262kg	40±30mm

表-9 耐摩耗性モルタルの性能[3]

項　　目	材齢 28 日試験値	試験方法・目安値
圧縮強度	50N/mm²	JIS A 1171
曲げ強度	9N/mm²	JIS A 1171
付着強度	2.2N/mm²	JIS A 1171
長さ変化率	0.04%	JHS432 0.05%以下
摩耗量	3.7g	JIS K 7204 5g 以下
粗度係数	0.012	実験水路 0.012 以下
水流摩耗試験	Ln/50→1.04	農工研法 1.05 以下

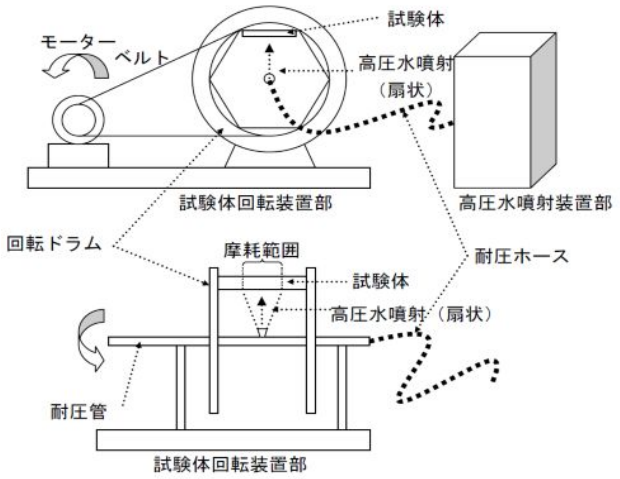


図-3 水流摩耗試験器の概要[4]

図-3 に示す水流摩耗試験は，農村工学研究所が開発した試験で，水流による摩耗状況を試験装置でシミュレーションした，合理的な試験方法である．粗骨材のすり減り試験機の考え方を応用し，回転軸の中心部から一方向に常時高圧水（Max4.9Mpa，24.1l/min）を噴出させ，周辺に配置された試験体を回転（30rpm）させることで，一定の頻度で高圧水の摩耗作用を受けさせる装置である．初期値（50mm）に対し，28 日試験後の凹凸延長をレーザ変位計で測定し，その比率（Ln/50 基準値 1.05 以下）で評価する．ここでの試験結果は，水流による摩耗を受け，細骨材が露出し，表面の凹凸が激しくなると，必然的に大きな値になる．なお，耐摩耗性モルタルは，耐硫酸モルタル同様，硬化促進剤を用いず，壁面に層状に吹付け，最後にコテ仕上げを行い，平滑性を確保する．

d)無機系高性能モルタル（断面修復材）の配合及び性能

共同溝の場合は，使用環境が今までのような特殊な条件でなく，通常の劣化環境であることから，劣化したコンクリートの補修方法としての断面修復工法を適用する．

ここで，適用する断面修復工法は，充填モルタルと同じコンセプトの硬化促進剤を用いる無機系高性能モルタルによる工法である．但し，塩害，中性化，凍結融解などの劣化外力に対し，充分な性能が得られるように各種混和材を配合している．また，硬化促進剤は，水溶性アルミニウム塩を主成分としているが，添加量を調整する

表-10 無機系高性能モルタルの配合（m^3当たり）

高性能モルタル	水	硬化促進剤	ミニスランプ
1900kg	266kg	19～38kg	95±25mm

表-11 無機系高性能モルタルの性能

項　　目	材齢 28 日試験値	試験方法
圧縮強度	42.3　N/mm²	JIS A 1171
曲げ強度	7.8　N/mm²	JIS A 1171
付着強度	2.1　N/mm²	JIS A 1171
長さ変化率	0.04%	JHS432

表-12 無機系高性能モルタルの耐久性

項　目	試験結果
遮塩性	コンクリート（24N/mm²）　→　6mm ポリマーセメントモルタル　→　3mm 無機系高性能モルタル　→　3mm ※試験方法：JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準拠し，塩分溶液に 28 日間浸せきし，塩化物イオン浸透深さを測定した．
中性化抵抗性	コンクリート（24N/mm²）　→　18.6mm 無機系高性能モルタル　→　6.7mm ※試験方法：JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠し，20℃，60%RH，CO_2 濃度 5%の環境で，26 週後の中性化深さを測定した．
凍結融解抵抗性	300 サイクル終了後，相対動弾性係数 88.7% ※JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠し，相対動弾性係数で評価した．

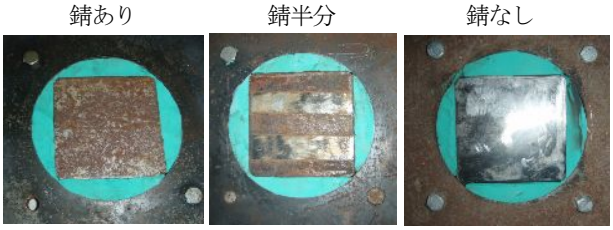


写真-3　試験片の種類

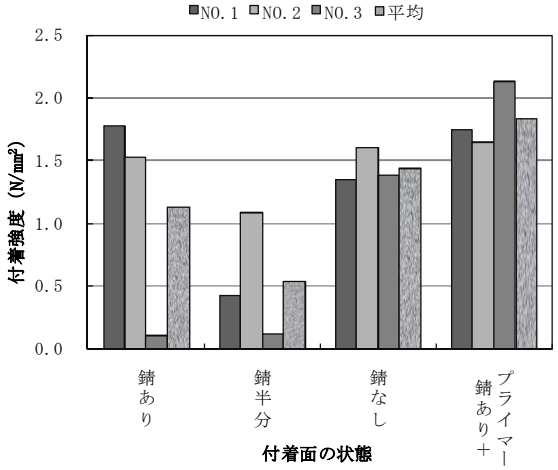


図-4　付着面の種類と付着強度の関係

ことでコテ仕上げができるように急結性を抑え，粘性を付与できる材料を用いている．**表-10** に配合表を，**表-11**，**表-12** に吹付け後の各種試験結果の一覧を示す．

通常のコンクリートと比較して，遮塩性で2倍程度，中性化抵抗性で3倍程度の能力があり，さらに収縮量も小さく，ひび割れ抵抗性が高いことから，充填モルタルの保護層として，充分な性能を有していることが確認できる．

e) 鋼製セグメントと充填モルタルの付着性

鋼製セグメントは，シールドマシーンの掘進中，高い湿度の中に置かれており，セグメント表面に錆が生じることが多い．かさぶたのような層状の錆は，除去する必要があるが，それ以外の場合は，除去も困難である．しかしながら，本工法では，鋼製セグメントと充填モルタルとが一体となって機能することから，その付着性を重視している．

ここでは，アクリル樹脂系吸水防止下地処理材をプライマーとして使用し，その付着性を検証している．鋼製セグメントの表面状態を**写真-3**に示す「錆あり」，「錆半分」，「錆なし」，「錆あり＋プライマー」の4種類で，充填モルタルの吹付けを行い，付着強度を確認した．試験片は，吹付けコンクリートのプルアウト試験の装置を応用している．試験結果を**図-4**に示す．この結果，プライマーを使用すれば，安定的に1.5N/mm²以上の強度が確保できることが確認できた．

表-13　付着試験の結果（材齢28日）単位：N/mm²

NO.	耐硫酸モルタル	無機系高性能モルタル
1	2.09	2.13
2	1.94	2.50
3	2.16	2.04
平均	2.06	2.22

写真-4　付着試験の破断面の状況

f) 充填モルタルと仕上げモルタルの付着性

充填モルタルと仕上げモルタルは，施工時期が 1～2 週間程度の間隔をおくことから，その付着性が懸念された．当然，仕上げモルタルがドライアウトしないように，水湿めを行い，乾燥が厳しい場合は塩化ビニール系の吸湿防止剤を適用する．

ここでは，標準的な施工条件を想定し，充填モルタルと仕上げモルタルの付着試験を実施した．仕上げモルタルとして，耐硫酸モルタルと無機系高性能モルタルの 2 種類を適用している．**表-13** に試験結果を，**写真-4** に無機系高性能モルタルにおける破断面の状況を示す．

何れの付着強度も平均で 2.0N/mm² を超えており，破断面が界面だけではなく，吹付け部材内でも生じていることで，充分な付着性が確認できた．

3．現場適用事例

以下に下水道施設と共同溝への適用事例を示す．

(1) 下水道施設の工事実績

工事名：目黒川右岸低地部排水施設整備工事
発注者：東京都品川区
施工者：飛島・大旺建設共同企業体
施工場所：東京都品川区大崎 5 丁目 2 番先～西五反田三丁目 16 番地
諸元：土被り GL-22～25m，仕上がり内径φ2,600mm，トンネル延長 1,320.25m
掘削方式：コンパクト泥土圧シールド工法（コンパクトシールド工法研究会）
適用箇所：曲線部（最小 15R，9 箇所），流入取込部（8 箇所），延長 235.3m，面積 1,502m²
特殊二次覆工施工時期：2008.8～10

写真-5　鋼製セグメント区間の全景

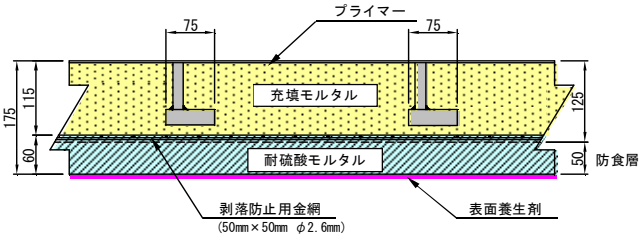


図-5　断面構成

本トンネルは，下水施設型のトンネルで，一般部は，防食層を有する二次覆工一体型のコンクリートセグメントを使用し，鋼製セグメント区間においても，50㎜ の防食層と，コンクリートセグメントと同等以上の硫酸に対する抵抗性が求められた．さらに供用時には 0.25MPa の内水圧が作用することに対する耐荷力と，併せて流水取込部に対する補強材の取付けやメンテナンスの簡易性が求めらた．このような要求性能を満足するために，鋼製セグメント内を充填モルタルで，表層の防食層を耐硫酸モルタルで施工した．**写真-5** に鋼製セグメント区間の全景を，**図-5** に断面構成を示す．補強材として，防食層 50㎜ を避けて，補強金網を配置した．また，表面養生材として，撥水機能や中性化抵抗性を付与できるシラン系の養生材を適用している．

写真-6 に充填モルタルの吹付け状況を，**写真-7** に耐硫酸モルタルの吹付け状況を示す．何れの吹付けにおいても粉じんが少なく，作業員が充填状況や吹付け面の仕上がり状況を目視で確認しながら施工できた．充填モルタルは，ノズルワークにより，リブ内にモルタルを充填しており，耐硫酸モルタルは，ノズル先端から一定の離隔距離を取り，満遍なく行き渡るように吹付けている．

本工事では，トンネル最深部より施工を開始し，工期短縮のため，充填モルタルと耐硫酸モルタルを同時に 2 箇所で施工した．先行する充填モルタルの吹付けプラントを毎日立坑まで引き出し，その後，耐硫酸モルタルの材料搬入を行い，順次充填モルタル吹付けプラント，材料を搬入している．吹付けプラントが台車 1 台に乗るコンパクトな仕様であるのも利点である．**写真-8** に完成後の全景を示す．仕上がり面が平滑で粗度係数も抑制でき，ひび割れの発生もなく，期待した仕上がり状態が得られた．

写真-6　充填モルタルの吹付け状況

写真-7　耐硫酸モルタルの吹付け状況

写真-8　完成後の全景

写真-9　鋼製セグメント区間の全景

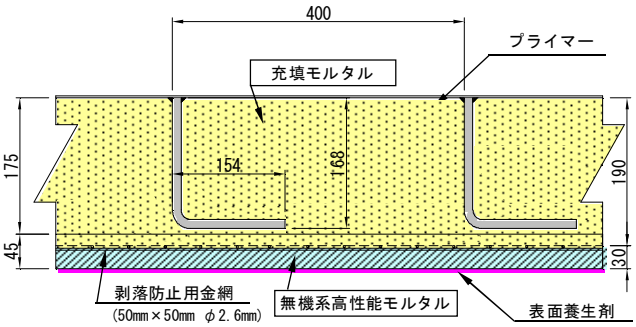


図-6　断面構成

(2) 共同溝での工事実績

工事名：金沢共同溝工事（その 2）
発注者：国土交通省関東地方整備局横浜国道事務所
施工者：飛島・東急特定建設工事共同企業体
施工場所：横浜市磯子区新杉田町～横浜市金沢区幸浦 1 丁目
諸元：仕上がり内径φ5,000mm，トンネル延長 2,284m
掘削方式：泥土圧シールド工法
適用箇所：曲線部（35R，2 箇所），分岐部（2 箇所），延長 105.6m，面積 1,246.1㎡
特殊二次覆工施工時期：2008.11～2009.2

本シールドトンネルは共同溝で，二次覆工が省略されたトンネル仕様となっており，一般部はＲＣセグメントの仕上がりで，35Ｒの急曲線部と立坑分岐部では，鋼製セグメントが使用された．**写真-9** に鋼製セグメント区間の全景を，**図-6** に断面構成を示す．特に本工事でルタルの吹付け状況は，仕上がり面と鋼製セグメントのかぶりが 45mm 以下と小さく，さらに鋼製セグメントリブの開口率が 60%以下と厳しい施工条件であった．このような条件下で，鋼製セグメント内を充填モルタルで，表層を無機系高性能モルタルで施工した．補強材として補強金網を配置し，表面養生材としてシラン系の養生材を適用している．

写真-10 に充填モルタルの吹付け状況を，**写真-11** に

写真-10　充填モルタルの吹付け状況

写真-11　充填モルタル吹付けプラント（2 セット）

写真-12　無機系高性能モルタルの吹き付け状況

充填モルタル吹付けプラントを，**写真-12** に無機系高性能モルタルの吹付け状況を示す．本トンネルの鋼製セグメントの構造は，横リブが上から覆い被さるような構造であり，このリブ内を充填する方法として，ノズル先端が緩く屈曲したスィベル構造の特殊ノズルを開発し，適用した．このノズルによって，リブの奥深くまでモルタ

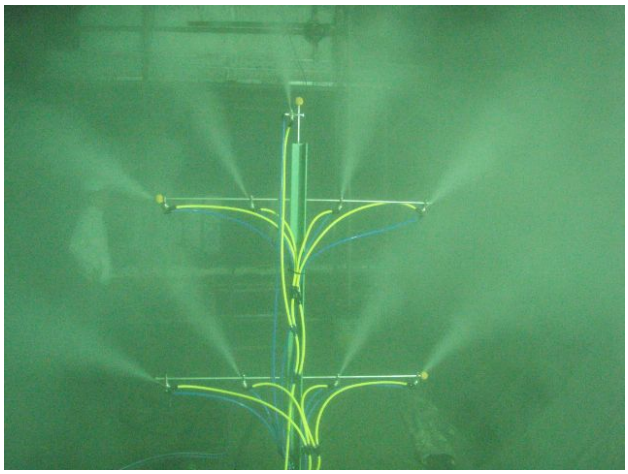


写真-13 噴霧養生装置

写真-14 完成後の全景

ルを充填することが可能となった．また，内空がφ5000と広かったことから，充填モルタルのプラントは，2 セットでの同時施工で，常時 7～8㎥/日の施工量を確保し，工期短縮を図っている．補強材の設置は，充填モルタルの施工と並行に作業を行っており，仕上げモルタルの施工は，施工箇所毎に充填モルタルの施工終了後，直ちに施工を開始している．本工事の施工は，冬期間に行われ，トンネル坑内が乾燥する環境下（相対湿度 70%RH 程度）にあったが，施工直後の養生として，**写真-13** に示す噴霧養生装置を開発し，夜間作業停止時に相対湿度 95～100%RH の環境を確保した．**写真-14** に完成後の全景を示す．仕上がり面が平滑で，ひび割れもなく，期待した仕上がり状態が得られた．

4．おわりに

シールドトンネルの用途は，鉄道，道路，共同溝，下水道，水路など多岐に渡っており，覆工に求められる要求性能もそれぞれ異なっている．また，断面寸法も工事中の仮設条件も種々多用である．本工法は，可能な限り，各種ニーズに応えられるよう，開発を行ってきた．用途に合わせ，使用材料が変更でき，狭隘な環境下でも対応できる施工システムとし，実施工でその効果を確認している．

現在，本工法の課題として，以下を考えている．

①表層の仕上げモルタルのコストが高い．反面，能力が高く 20～30㎜ の厚さで期待する耐久性が得られる．

②充填モルタルの硬化促進剤の急硬性が高く，左官仕上げが難しい．仕上げモルタルを薄肉にするためには，充填モルタルの施工段階で粗仕上げが求められる．

③補強材に補強金網を用いる場合は，一定のかぶりが必要で，これが仕上げモルタルを厚くする要因ともなっている．

これらに対し，既に実験的検討を実施し，充填モルタルで左官による粗仕上げが行える硬化促進剤の組み合わせや，新たに硬化促進剤の供給装置を開発した．さらに補強材として，補強金網の代わりに，樹脂メッシュを用い，仕上げ層にこれを配置することで，剥落やひび割れに対し，効果があることを検証している．

シールドトンネルでは，今後も二次覆工一体型のセグメントの適用や二次覆工省略型のトンネル仕様が標準になっていくことが予想される．このような中，急曲線部や分岐合流部の特殊二次覆工の性能，施工品質に対しても，厳しい目が向けられており，本工法は，その期待に応えて行くことが可能であると考えている．

最後に，本工法の開発，現場適用にあたり，ご指導，ご支援をいただきました，企業者，現場スタッフの皆様方に謝意を表します．

参考文献

1) 土木学会：トンネル標準示方書「シールド工法・同解説」，pp.114-116，2006.

2) 東京都下水道サービス株式会社：下水道シールド工事用二次覆工一体型セグメント設計・施工指針，pp.8-11，pp.53，pp.116-120，2009.

3) 石神暁郎，渡嘉敷勝，森充広，増川晋：農業用水路コンクリートにおける断面修復工法の開発および評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第６巻，pp.173-178，2006.10.

4) 石神暁郎，森充広，渡嘉敷勝，増川晋：農業用水路コンクリートに生ずる摩耗現象と促進試験方法に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.805-810，2005.