

ラッピング工法(トンネル外周被覆工法)の開発

栄 毅熾¹・芳賀由紀夫²・島田哲治³

¹正会員 大成建設株式会社 土木技術開発部 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町334-1)

²非会員 大成建設株式会社 土木技術開発部 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町334-1)

³正会員 大成建設株式会社 土木技術開発部 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町334-1)

大深度高水圧に対応する止水技術として、また、塩害等の腐食性環境下における劣化防止技術として開発されたラッピングシールド工法は、「平成10年度23号大高シールド工事」にて実証施工を行い、目標とした施工性、サイクルタイム及び品質・出来形等を確認し、本工法の現場への適用性を検証できた。

その一方で、大断面シールドや高速(長距離)施工への対応には課題が残った。そこで、さらなる技術の向上を目指して大断面施工や高速施工にも対応可能なラッピング工法の開発を行った。

今回、開発した施工システムをφ3478mmシールド実験機に装備して、実施工レベルの実験を行い、本システムの機能・施工性の検証と品質確保を確認し、実用化の見通しを得ることができた。

キーワード：シールドトンネル、外周被覆工法、防水シート、止水技術、耐久性向上技術

1. はじめに

現在、都市トンネル建設の主流に位置づけられているシールド工法は、品質確保はもとより形状・規模、自動化、高速化、コスト低減などの多様なニーズに対応すべく技術開発が行われ、東京湾横断道路に代表されるような大深度・大断面シールドトンネルの施工が可能となってきた。今後も、「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」の施行への対応など、さらなるシールド工法の技術開発が望まれている。

ラッピングシールド工法は、大深度高水圧下に対応できる「止水技術」、塩害等の腐食性環境下における「セグメント劣化防止技術」そして初期投資だけでなく将来の維持管理を含めて「トータルコストダウン」をキーワードに、大成建設・五洋建設・日立建機と共同で、平成5年より開発を行ってきた。

本工法は、セグメントの外周に厚さ2mm以上のポリエチレン製防水シートを巻立て、トンネルを水と地盤から遮断することで、止水性・耐久性に優れたシールドトンネルを構築する技術である。

この度、本工法は、「平成10年度23号大高シールド工事」において、高水圧区間に存在する重要構造物下区間の防護対策として採用され、試験フィールド事業として施工を行い、施工性や止水性能等の有効性を確認することができた。

実証施工後は、大断面シールドや高速(長距離)施工およびTBM工法にも対応可能な技術を目指し、

さらなる技術の向上と今後のインフラ整備への対応として、開発体制も奥村組と石川島播磨重工業を加えた5社でラッピング工法の開発を行った。

開発技術は、ラッピングシールド工法の防水シート接合方法等を見直した防水シート高速被覆システムで、φ3478mmのシールド実験機に開発したシステムを搭載し実施工レベルの実験を行い、実用化の見通しを得ることができた。

本論文では、ラッピングシールド工法の実証施工とラッピング工法の実証実験結果について報告する。

2. 施工概要

(1) 工事概要

名古屋市東部地区では、電力、ガス需要への対応、信頼度の高いNTTネットワークの確保を目的とした名四共同溝および東海共同溝の建設が進められている。本工法が採用された「平成10年度23号大高シールド工事」は、一般国道23号線直下に計画された名四共同溝(全長5,290m)の内、名古屋市緑区大高町から名古屋市緑区有松町までの2,150m区間の工事である。路線平面図および地質断面図を図-1、図-2に示す。

本工事は、近年施工例が増大しているボルトレスセグメントによる二次覆工省略型のトンネル工事である。

本工事のシールド線形は、重要構造物直下で1.5D

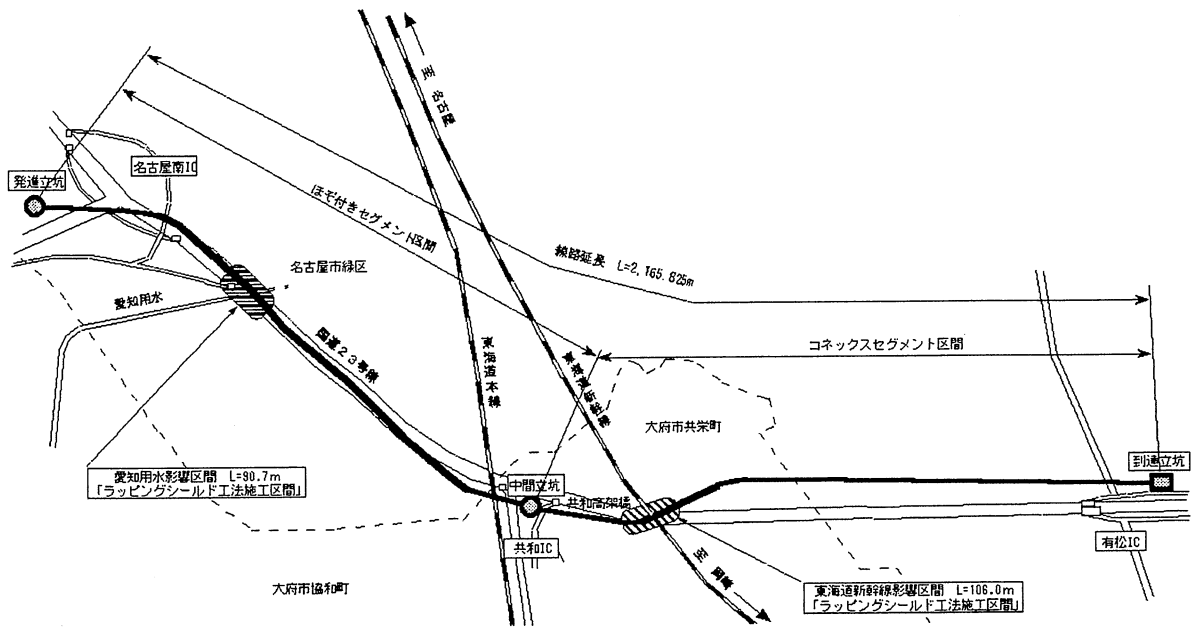


図-1 路線平面図

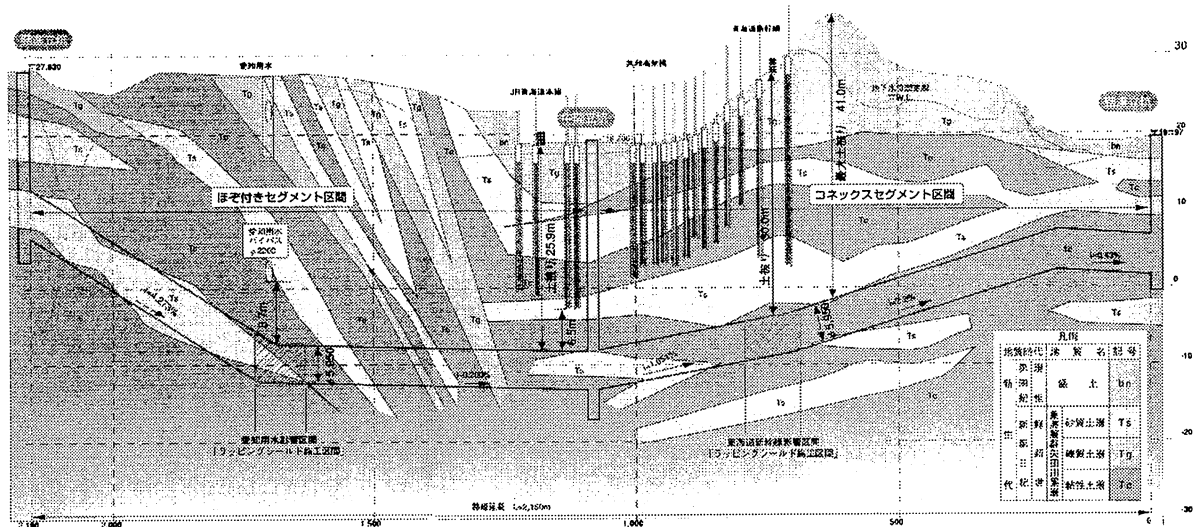


圖-2 地質断面圖

以上の離隔を確保して設定されている。このため、土被りは最大 41.2m の部分があり、地下水圧も 0.4MPa と大きな値を示し、現在まで施工されたシールドの実績と比較しても高水圧の加わるシールドトンネルといえる。

セグメント継手部のシール材は、耐水圧 0.45MPa を確保するものとなっているが、シールドトンネル直上の重要構造物への影響を、施工中はもとよりトンネル完成後の長期にわたって避けなければならないことから、二次覆工省略による高水圧下における防護対策の検討が加えられた。

検討の結果、ラッピングシールド工法は、0.3MPa以上の高水圧が作用し、かつ重要構造物直下区間で

ある愛知用水影響区間（L=90.7m）および東海道新幹線影響区間（L=106.0m）の2ヶ所の計196.7m区間で、防護対策として採用され実証施工に至った。

以下に本工事内容を示す.

発注者：建設省中部地方建設局名四国道工事事務所

(現 国土交通省中部地方整備局名四国
道工事事務所)

施工者：大成・五洋・大本特定建設工事共同企業体

工事名：平成10年度23号大高シールド工事

工事場所：名古屋市緑区大高町～名古屋市緑区有松町

工 期：平成 10 年 7 月 11 日～平成 13 年 3 月 30 日

工事数量：シールド工（泥水式シールド）一式

・シールド機 一基 (外径 $\phi 6,114\text{m}$)

- ・掘削延長 2150m
- ・RCセグメント
(外径 ϕ 5,950mm, 桁高250mm, 幅1,200mm)
ほぞ付きセグメント 890R
コネックスセグメント 887R
- ・中 壁 889枚 (4.2t/枚, W2.4m)
- ・インバートコンクリート 一式
- ・中間立坑 一式 (連続地中壁, 内径 ϕ 13.75m, $t=1,000$ mm)
- ・ラッピングシールド工法施工区間
90.7m (愛知用水影響区間) + 106.0m (東海道新幹線影響区間)

(2) ラッピングシールド工法の概要

本工法の施工は、シールド機に装備したラッピングシールド工法専用機構を使用して行う。1リングごとに、シールド掘進と併行して防水シートを巻立て、円周方向および軸方向の溶着を行う。その後、巻立・溶着した防水シートの内側に、セグメントを組立てる。これを1サイクルとして繰り返し行い、セグメント外周全体が、防水シートで覆われたシールドトンネルを構築する。

さらに、約30m間隔のセグメントリング間にセーフティバリア（錨状の隔壁）を設置し、止水区間を区画化することで、防水シートとセグメント間の漏水を限定し漏水箇所の発見と補修を容易にする機能を有している。本工法の概要を、図-3に示す。

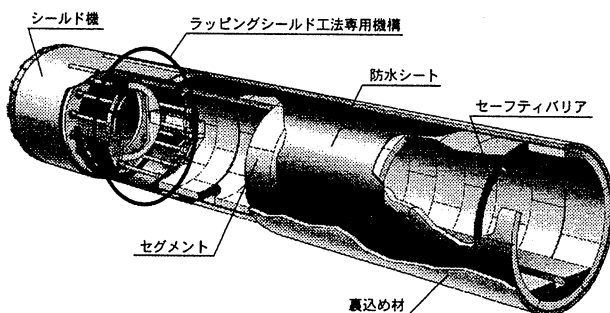


図-3 ラッピングシールド工法トンネル概要

(3) ラッピングシールド工法専用装置

ラッピングシールド工法シールド機には、機内で掘進と同時にシート防水工を行うため、写真-1、-2に示す以下の専用装置が装備されている。

① ロングロッドシールドジャッキ

本装置は、最も縮まった状態でロッド部が突出しているジャッキで、巻立てスペースを確保し、掘進・巻立て同時施工を可能とする。

② フリーロックスプレッダ

本装置は、スプレッダ間に装備され、スプレッダのローリング防止装置で、スプレッダのローリングによって生じる防水シートの破損を防ぐ。

③ 防水シート巻立て装置

本装置は、防水シートの巻立てを行う装置であり、旋回リング・防水シートロール受け・巻立てアーム・防水シートセッタ・防水シートアジャスタから構成される。

④ シートプロテクタ

本装置は、テールプレートに配置された緩衝材で、巻立てた防水シートが直接テール部で擦れて傷つくことを防ぐ。

⑤ 自走式溶着機走行ガイド

防水シートの円周方向溶着は、セグメント端面から600mm離れた位置で行われる。本装置は、上半部のシールドジャッキに取り付けられており、円周方向溶着機の走行をガイドする。走行板は、自走式溶着機の走行状況、溶着状況を監視できるように透明板を使用している。



写真-1 ラッピングシールド工法用専用装置1



写真-2 ラッピングシールド工法用専用装置2

(4) 防水シート

本工法に使用する防水シートは、施工性・溶着性・耐薬品性・実績等を考慮し、各種試験を行い、ポリエチレン製の厚さ2.0mmを標準仕様としている。

3. 実証施工結果

ラッピングシールド工法の施工は、愛知用水影響区間を平成11年10月19日から平成11年10月30日まで、東海道新幹線影響区間を平成12年3月29日から平成12年4月11日にわたり施工を行った。

(1) 工程

通常施工区間と本工法施工区間における、1リング施工所要時間の比較を図-4に示す。シールド工について、掘進時には、影響がなかった。

セグメント組立時間は、巻立てられた防水シートの内側にセグメントを組立ることにより、当初は防水シートへの損傷を防ぐための慎重さから時間がかかったものの、慣れるにつれて通常施工区間とほとんど変わらない時間でセグメント組立が可能になった。

シート防水工についても同様で、当初は、狭いシールド機内で行う溶着作業に戸惑っていたが、徐々に施工時間も短くなり、平均で6分程度の時間延長であった。

セーフティバリア施工は、当初計画していた施工時間（1時間）に比べると、図-5に示すように施工方法を変更し大幅に時間がかかったため、昼夜交代時間に施工を行うことで、工程への影響を抑えた。

2回目の東海道新幹線影響区間では、平均日進量12Rを達成しており、工程は、ほぼ通常施工区間と同等に進めることができた。

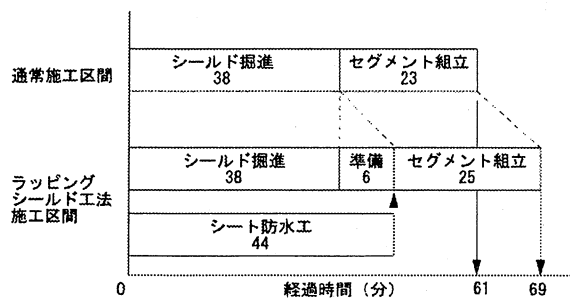


図-4 1リング施工所要時間の比較

(2) 施工性

シート防水工が、他の工種の作業性、施工性へ及ぼす大きな影響はなかった。シート防水工についても、巻立て率（セグメント外周長に対する、防水シートの巻立て長さの割合）を多少変更した程度で、大きな施工手順・方法の変更はなく施工できた。

各工種についての管理を含めた評価を表-1から表-3に示す。

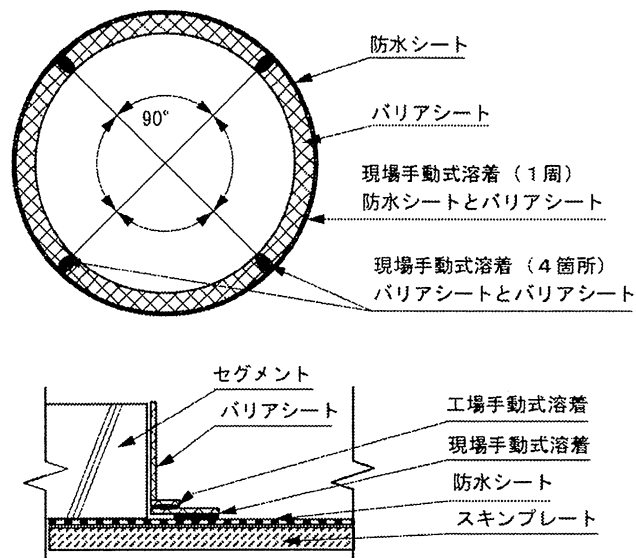


図-5 セーフティバリア施工

表-1 シールド掘進工

No	作業手順、方法	評価
1	マシン推進制御	推力、クリアランス等、通常区間と相違なく影響なし。
2	裏込め注入	裏込め注入量・注入圧等、通常区間と相違なく影響なし。
3	測量	クリアランス測定時、シートを損傷を与えないように、専用治具を製作し使用。
4	清掃他	防水シートの破損を防止するため、スキンプレート上、防水シート上の清掃・点検を、通常区間より慎重に行った。

表-2 セグメント組立

No	作業手順、方法	評価
1	ジャッキ操作	フリーロックスプレッドのためジャッキの単独操作はできないが、施工性、サイクルタイムにもほとんど影響なし。
2	組立作業	リング状になった防水シートは、自重やセグメント組立により下部が垂れやすく、最終のKピース組立時局所的な張力が発生しやすい。この対処として、上部のセグメント組立時は、防水シートを押し広げながら組立を行うことで、局所的なシートの張力が発生することを防止できた。 また、防水シートの挟まれ等による損傷を与えないように、慎重に組立を行った。
3	出来形	真円度、目違い、目開き等の出来形は、通常区間と相違なし。

表-3 シート防水工

No	作業手順、方法	評価
1	防水シートセット ①ロール受けに設置 ②巻立てアームに把持	・手順、方法に問題なし ・シートロール受けの軸を回転式に変更し、シートが絞られても回転可能にした。
2	防水シート巻立て ①シート巻立て ②シートセッタにより外径の調整 ③シートアジャスタにより位置調整	・手順に問題なし ・巻立て長さは、セグメントの挿入時にシワを発生させないよう適切な巻立て率に変更した。 愛知用水影響区間：-0.1% 東海道新幹線影響区間：+0.3%
3	円周方向溶着 ①自走式溶着機による円周方向溶着 ②エアチェック	・手順、方法に問題なし ・自走式溶着機（写真-3）の、トンネル上半部施工についても問題なし。
4	軸方向溶着 ①手動式溶着機による軸方向、重ね部の溶着 ②バキュームチェック	・手順、方法に問題なし
5	シート裁断 曲線施工で防水シート端面をシールド機中心線に垂直する裁断作業を想定	・セグメント組立等によっても、セグメント端面からの防水シート出しろ長さの不均一が発生したため、裁断作業が発生した。手動カッターでの裁断には、多少時間がかかった。

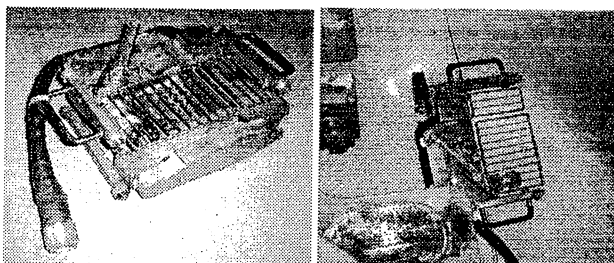


写真-3 自走式溶着機

(3) 安全性

本工法は、シールド掘進と同時にシールド機テール部でシート防水工を行うので、他の作業との輻輳作業はない。しかし、安全面または品質面からも、直接防水シートの上に乗って作業を行わないように、通常のシールド機の設備に加えてシート防水工用足場を設置して施工を行った。

また、防水シートを溶着すると多少の煙が生じる。事前に行った燃焼試験で、発生する煙の成分を調査し、人体には無害であることは確認していたが、テール部に籠もらないように換気を行った。

(4) 品質と出来形

本工法の施工は、重要構造物影響区間の2区間で

の部分施工であったが、この部分施工への対応も、セーフティバリアを2箇所連続して設けることで、施工区間を確実に区画化することができた。

本工法の施工品質および出来形を確認するため、セグメント表面の目視調査と一部グラウトホールを開けて漏水状況の調査を行った。

調査結果より、水のしみや漏水は見られなかった。また、防水シート溶着後に行う溶着部検査（エアチェック、バキュームチェック）結果からも溶着不良はないと考えられ、施工結果は良好である。施工後の状況を写真-4に示す。



写真-4 ラッピングシールド工法施工区間状況

(4) 本工法の有効性

実証施工結果より、開発目標であったセグメント外周全体に防水シートを確実に被覆することが確認できた。

近年、工事費のコスト縮減から、内面平滑セグメントの開発や高性能シール材の開発等により、二次覆工省略の傾向にある。本工法は、今回の施工のように二次覆工省略型トンネルにおいて、トンネル全線ではなく覆工外面の周辺地盤環境による区間の防護対策としても、工期延長等の影響が少ないことで有効な工法であることが確認できた。

4. ラッピング工法の開発

(1) 実証施工からの課題と対応

実証施工により、ラッピングシールド工法の施工性や品質を確認することができた。しかしながら、シート防水工の施工時間から、今後さらに進んでいくと思われるシールドの大断面化や高速化には、適用が困難であることなどもわかった。

以下に、さらなる技術の向上を図るべく抽出した課題を示す。

- ① 防水シート溶着時間の短縮
- ② 一連のシート防水工施工時間の短縮
- ③ 他作業への影響をさらに軽減する

上記課題に対応すべく、大断面化などの多様なニーズに応えられる汎用性の高い技術を目指し、新たにラッピング工法として開発を行った。

(2) 開発技術の特徴

a) 防水シート高速溶着装置

溶着装置開発は、防水シートの接合方法の見直しから始めた。接合方法は、諸検討の結果、現場での高速施工を重視し、熱コテ式溶着方法を採用した。また、溶着機は、品質確保も考慮した構造とした。

検討した溶着装置の構造を図-6 に、また、ラッピングシールド工法で使用した自走式溶着機との比較を表-4に示す。

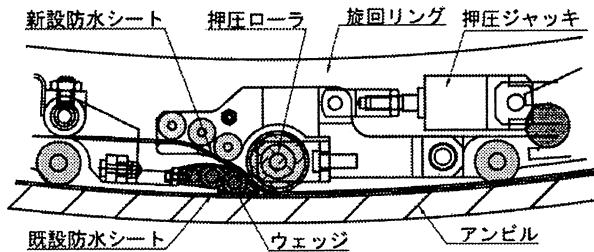


図-6 円周方向溶着装置

表-4 溶着方法比較表

項目	自走式溶着機	検討溶着装置
接合方法	熱コテを使用した溶着方法	熱コテを使用した溶着方法
溶着方法	2枚のシート間に熱コテを挿入し、2枚のシートの上下からローラで圧着	2枚のシートの下に押付力の反力台（アンビル）を設置。2枚のシート間に熱コテを挿入し、2枚のシートの上からローラで押付け圧着。
溶着機走行方法	両輪駆動の押圧ローラにより走行	溶着機に旋回機構または、スライド機構を設け走行
特記	溶着のため、防水シートの重ね幅が一定であるため、裁断作業が必要になる。	溶着のための重ね幅に自由度があるため、裁断作業が不要。

防水シート熱溶着の品質に大きな影響を与える要素は、溶着速度・溶着温度・押圧ローラによる押付力の3つの要素である。溶着機開発にあたっては、

設定した速度に対して、所定の品質を確保できる溶着温度と押付力の範囲が広い許容範囲で、現場施工においても、管理が容易に行えるように改良を重ねた。実験より、所定の溶着品質を確保できる3要素の値は、以下のとおりである。

- ・円周方向溶着：溶着速度2.5m/minに対して、溶着温度460℃～520℃、押付力0.6kN～1.0kN
- ・軸方向溶着：溶着速度1.0m/minに対して、溶着温度370℃～430℃、押付力0.6kN～1.0kN

開発した溶着装置は、防水シートの円周方向を溶着する円周方向溶着装置と軸方向を溶着する軸方向溶着装置からなる。

円周方向溶着装置は、写真-5に示すように、溶着機と溶着機を円周方向に旋回させる旋回機構より構成される。軸方向溶着装置は、溶着機と溶着機を軸方向にスライドさせるスライド機構より構成される。

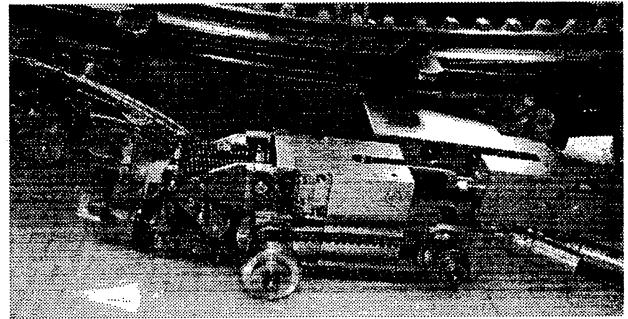


写真-5 円周方向溶着装置

この装置により、ラッピングシールド工法で使用していた溶着機の溶着速度が2倍以上となるだけでなく、防水シートの重ね幅を一定にする必要がないため裁断が不要になり、防水シート溶着時間が短縮される。

b) 防水シート高速被覆システム

シールド機内でシート防水工を行うために、ラッピング工法用シールド機に装備されるシステムで、掘進・巻立同時施工機構、防水シート巻立装置、防水シート固定装置、溶着装置等からなる。

ラッピングシールド工法の専用機構と大きく違う点は、防水シート巻立時の周長を確保し、形状を円形に保持する機構（アンビル、防水シート固定装置）があることと、すべての装置が一つのフレームに搭載されていることである。

このシステムにより、防水シートを常に一定の巻立長さにする施工性の向上や、セグメント組立時も、シートを固定し円筒状に確保できることから、セグメント組立の施工性を向上できる。

また、このシステムは、シート防水工をシールド掘進との同時施工だけでなく、セグメント組立時にも同時施工を可能にする。ラッピング工法用シールド機の構造例を図-7に示す。

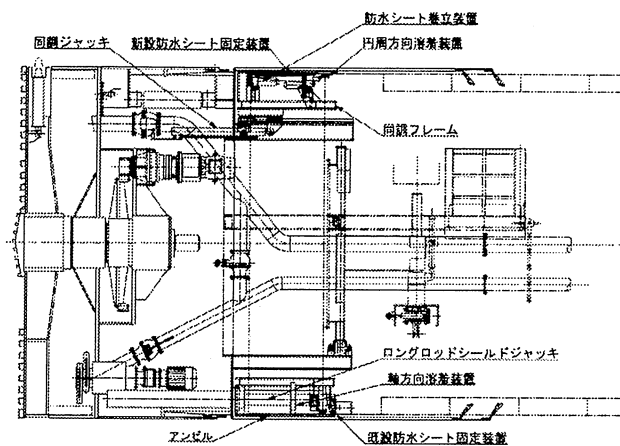


図-7 ラッピング工法用シールド機

c) ラッピング工法用防水シート

通常土木工事で使用される防水シートは、耐候性を付与するために、カーボンブラックが樹脂の中に練り込まれているが、本工法で使用する防水シートは、地中で使用することが前提であることから、カーボンブラックを除き半透明にした。

このことにより、溶着後は目視でも溶着状況が判断できるとともに、溶着後に検査溝に色水を加圧注入することで、溶着不良箇所を即座に発見できるようにした。

今回開発した防水シートについて、各種試験を行い、本工法に必要な防水シートの規格値¹⁾を満足していることを確認した。規格値は、「併進工法におけるシート防水工設計施工の手引(案)・都市トンネル編」²⁾、「山岳トンネル工法における防水工指針」³⁾を参考にした。

試験結果を表-5に示す。

表-5 ラッピング工法用防水シート物性試験値

試験項目	単位	規格値	試験値	
比重	—	0.95±0.05	0.903	
硬さ	—	85～98	97	
厚さ	mm	2.0以上	2.09	
引張強さ	20℃	N/mm ²	10以上	32.3
	-10℃		18以上	41.2
伸び	20℃	%	500以上	800
	-10℃		350以上	602
接合部強度(残率)	%	30以上	85.7	
引裂強さ	N/mm	40以上	95	
耐薬品性	アルカリ	%	±1以内	±0.0
質量変化率	酸			±0.0
	食塩水			±0.0

また、耐薬品性試験では、質量変化率確認の他に引張試験(引張強さ、伸び)も行った。引張試験結果を表-6に示す。

耐薬品性試験結果は、耐アルカリ・耐酸・耐食塩水のいずれも、浸漬時間334時間と短時間ではあるが、劣化がほとんどなく、規格値である質量変化率±1%以内、引張強さ10N/mm²以上と伸び500%以上を満足していることが確認できた。

以上試験結果より、今回選定したシートが高い安定性を示し、耐薬品性に優れていることが確認できた。

表-6 耐薬品性試験/引張強さ・伸び

試験条件				
試験項目	試薬	温度	備考	
耐アルカリ	NaOH10%溶液	70℃	pH13程度	
耐酸	H ₂ SO ₄ 10%溶液	50℃	pH3程度	
耐食塩水	食塩水3.5%溶液	70℃	海水を想定	
試験結果				
試験項目	浸漬時間0時間		浸漬時間334時間	
	引張強さ	伸び	引張強さ	伸び
耐アルカリ	29.6N/mm ²	829%	29.2N/mm ²	820%
耐酸	29.6N/mm ²	829%	29.5N/mm ²	809%
耐食塩水	29.6N/mm ²	829%	29.6N/mm ²	847%

5. 実証実験結果

開発したシステムの機能・施工性と品質検証を行うために、実証実験を行った。実験は、開発したシステムをφ3478mmシールド実験機に搭載して、各装置の性能確認と、実施工レベルの掘進・巻立同時施工とセグメント組立の連続施工を行い、施工性・品質・施工時間について確認を行った(写真-6)。

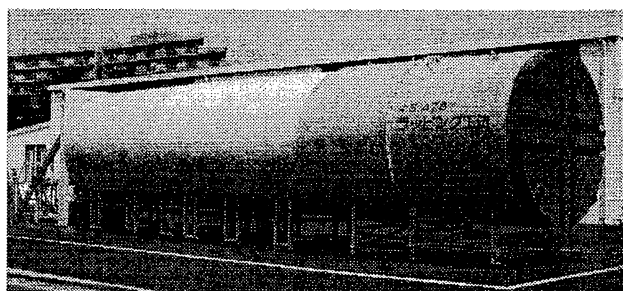


写真-6 実証実験状況

(1) 施工性

本システムの施工性は、シート防水工、掘進同時施工およびセグメント組立において、特に大きな支

障となる問題はなかった。

曲線半径50mの施工では、防水シート溶着部の重ね幅を調整することで、防水シートに極端なしわ等を発生させることなく施工可能であることが確認できた。

(2) 品質

防水シート溶着部の品質確認は、溶着後に行う検査方法¹⁾であるウォータチェック（従来はエアチェック、今回、溶着不良箇所を容易に発見できるように色水を注入して加圧）で行う。

検査結果は、すべて合格し、溶着品質に掘進やセグメント組立の影響を受けることはなかった。さらに、溶着部より試験片を採取して、写真-7に示す耐水圧試験機で、2MPaまで加圧して耐水圧性も確認した。

防水シートの巻立長さは、基準となるアンビルの内周長（＝セグメント外周長）とほぼ均一な長さを確保でき、巻立ての不具合による溶着品質への影響や、セグメント組立作業への影響はなかった。

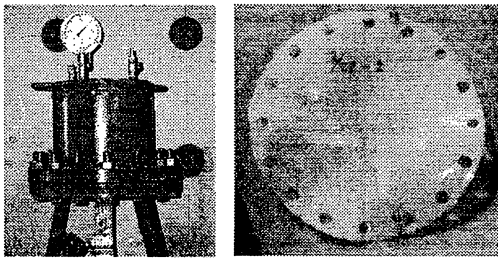


写真-7 耐水圧試験器および試験片

(3) 施工時間

実験で得られた平均施工時間は、24分台で、このクラスの径での目標時間であった25分を達成することができた。また、この実験結果より試算すると、 $\phi 6m, 10m, 14m$ クラスのシールド径で充分対応できる施工サイクルタイムを得ることができた。

6. おわりに

外周被覆工法は、近年の傾向である二次覆工省略型トンネル工事において、高水圧地盤や塩害等の腐食性環境のような条件下でも、工期延長等の影響が少なく、長期間にわたり高い止水性と耐久性確保できる有効な防護対策であることが、実証施工や実証実験から確認できた。

現在、コスト縮減を念頭においたシステムの改良等、さらなる技術の向上も行っている。

最後に、実証施工および実証実験にあたり、御指導ご協力を頂いた皆様に深謝いたします。

参考文献

- 1) 財団法人 国土開発技術センター：一般工法・技術審査証明報告書 ラッピングシールド工法, pp. 91-116, 2000.
- 2) 日本鉄道建設公団監修 トンネル防水工研究委員会：併進工法におけるシート防水工設計施工の手引き（案）都市トンネル編, 1991.
- 3) 社団法人 日本トンネル技術協会：山岳トンネルにおける防水工指針, 1996.