

23. ラッピング工法（トンネル外周被覆工法）の開発

大成建設(株)：*島田 哲治、高見沢 計夫

1. はじめに

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、地下構造物の輻輳化により大深度化する傾向にある。また、「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」の施行により、その傾向にますます拍車がかかるものと考えられる。そのため、これからのシールド工法の課題の一つに、大深度高水圧下に対応できる「止水技術」が挙げられる。

一方、海底部や臨海部でのトンネル建設においては、塩害等の腐食性環境下におけるセグメントの「劣化防止技術」が求められている。

ラッピング工法（トンネル外周被覆工法）は、これらの要望に応えるべく開発された技術で、セグメント外周全体を防水シートで覆うことで、土と水からセグメントを遮断し、止水性と耐久性に優れたシールドトンネルを構築するものである。

本稿では、ラッピング工法の概要と実証実験の結果を報告する。

2. ラッピング工法の概要

(1) 施工法

図-1にラッピング工法の概要図を示す。

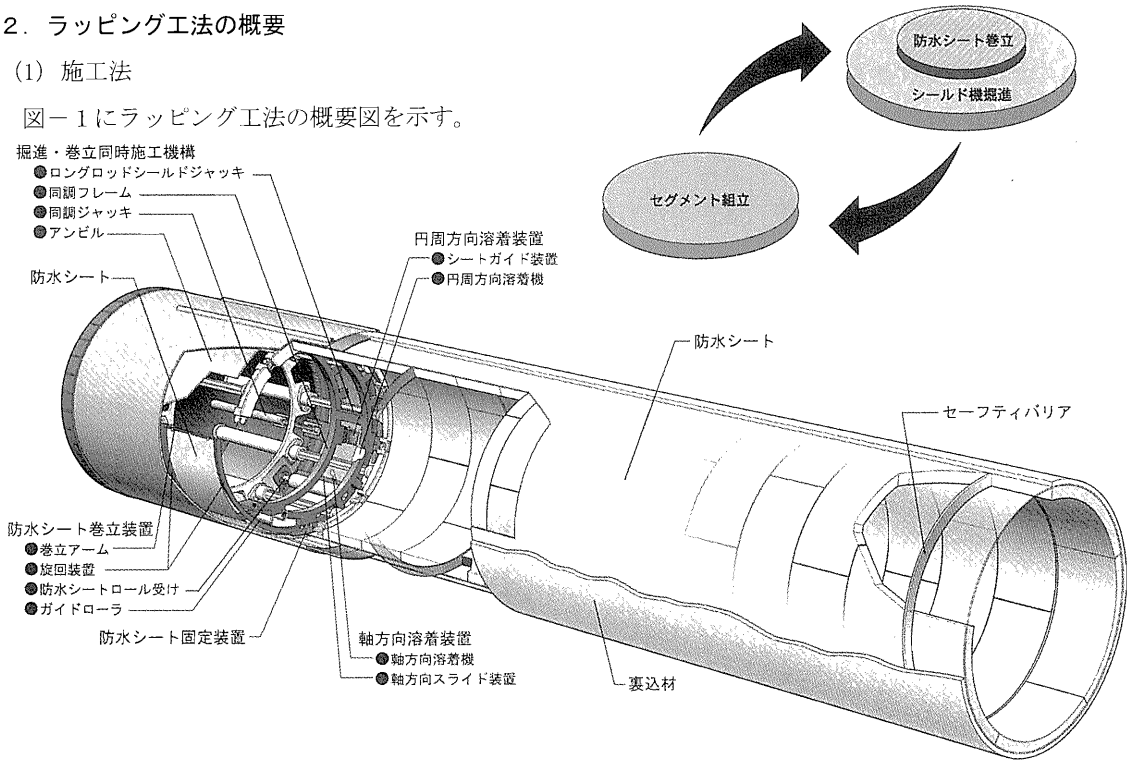


図-1 ラッピング工法概要図

本工法の施工は、シールド機テール部に装備したラッピング装置を使用して行う。1リング毎にシールド掘進と併行して防水シートを巻立て、円周および軸方向の溶着を行う。その後、防水シートの内側にセグメントを組み立てる。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。

なお、約30m間隔のセグメントリング間にセーフティバリア（鏑状の隔壁）を取り付け、止水区間を区画化することで、万一の漏水時にも漏水範囲を限定し、漏水箇所の発見と補修を容易にしている。

また、裏込め注入は、セグメントを覆った防水シートの外側に、シールド機の同時裏込め注入装置より行う。

(2) 特長

本工法（外周被覆工法）の特長（効果）は次の3項目である。

① トンネルの長寿命化

- ・トンネルを土と水から遮断し、構造物、坑内設備の長寿命化を達成する。

② トータルコストダウン

- ・高水圧や腐食性環境下においても、二次覆工の省略に貢献し、工事費用の低減ができる。
- ・供用中の排水処理などランニングコストが、削減できる。
- ・構造物、坑内設備の劣化を抑止し、ライフサイクルコストが低減できる。

③ 地下環境の保全

- ・止水性能が高いため、地下水の変動や地盤沈下など、環境に対しての影響を防止することができる。

(3) 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・耐久性・経済性・実績等で検討を行い、厚さ2mm以上のポリエチレンシートを使用することとした。

表-1に本工法に用いるポリエチレンシートの物性を示す。なお、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き（案）・都市トンネル編」を参考に設定した。

表-1 防水シートの物性

試験項目	単位	規格値	試験方法
比重	—	0.95±0.05	JIS K 6773
硬さ	—	85~98	JIS K 6773
厚さ	mm	2.0以上	JIS A 6008
引張強さ	20℃	14以上	JIS K 6773
	-10℃	26以上	
伸び	20℃	500以上	JIS K 6773
	-10℃	400以上	
引裂強さ	N/mm	50以上	JIS K 6252 準拠
接合部破断荷重	N/mm	10以上	JIS K 6773 準拠 試験片 JIS K6850
耐薬品性 質量変化率	アルカリ	%	±1以内
	酸		
	食塩水		

(4) ラッピング装置

ラッピング工法のシールド機には、従来の機構に加え、ラッピング装置が装備される（図-2参照）。ラッピング装置は、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、溶着装置等から構成される。また、ラッピング工法シールド機には、防水シート破損防止機構として、フリーロック装置とシートプロテクタが装備される。

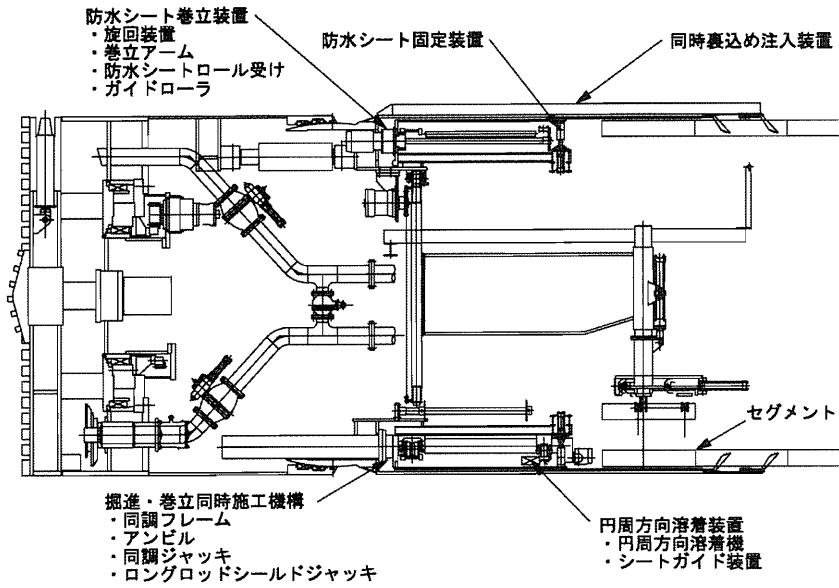


図-2 ラッピング工法シールド機

(5) 施工手順

施工手順を以下に示す (図-3 参照)。

1. 掘進開始前に、既設防水シートを防水シート固定装置にてアンビルに押付け固定する。
2. 掘進開始と同時に、防水シートロール受けにセットされた新設防水シートの端部を巻立アームに把持し、旋回装置によりシートを巻立てる。
3. 新設防水シートをシートガイド装置でアンビルに押付けながら、円周方向溶着機により既設防水シートとの重なり部を溶着する。
4. 軸方向スライド装置で軸方向溶着軸方向溶着機を走行させ、新設シートの重なり部を軸方向に溶着する。
5. 掘進および防水シート巻立・溶着が完了した後で、防水シートの内側にセグメントを組立てる。

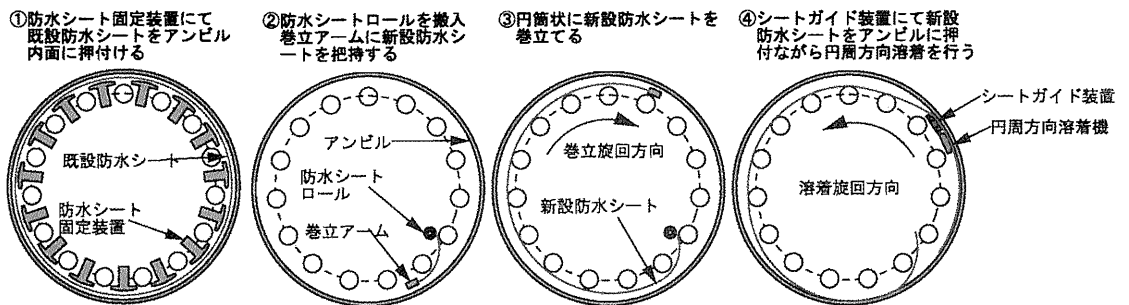


図-3 防水シート巻立・溶着手順

3. 実証実験

(1) 実験機の仕様

開発したラッピング装置の機能・施工性と品質検証のため、φ3,478mm シールド実験機に搭載し、各装置の性能確認実験および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った。

実験機を写真－1、仕様を表－2に示す。



写真－1 実証実験機全景

表－2 実験装置仕様

シールド機	外径	φ3478mm
	シールドジャッキ	ロングロッドシールドジャッキ 100kN×1450mm×10本 スプレッダ（フリーロック装置）
	テールシール	ワイヤーブラシ2段
	ラッピング装置	同調フレーム／ガイドロッド 防水シート巻立装置 防水シート固定装置 円周方向溶着装置 軸方向溶着装置
	シートプロテクタ	超高分子量ポリエチレン
セグメント	種類	スチール製／5分割／軸挿入式
	外径／内径／幅	φ3350mm／φ3050mm／900mm
防水シート	材質／厚さ	ポリエチレン／2.0mm

(2) 実験装置の製作

ラッピング装置の製作にあたり、特に検討を要した項目について、表－3に示す。

表－3 検討項目一覧

項目	内容	対応
同調装置	・構造	・固定ジャッキの仕様（固定力）と作業スペース確保を考慮して強度計算。 ・機内作業スペースを確保するため、溶着装置の配線はケーブルリールを使用。 また、電磁弁等は、同調フレーム内に収めた。
	・制御方法	・制御対象、精度 ・基本的には、同調ジャッキにストローク計を付ける。 実験装置では、ガイドロッドを設け、同調フレームとシールドジャッキを接続する制御方法にした。
アンビル	・仕様	・アンビルの剛性確保（真円度） ・厚さ、幅 ・固定ジャッキの仕様（固定力）により解析し、実験機スキムプレートとの隙間50mm以内に確保できる厚さにした。
	・巻立長さ	・内径 ・セグメント外径+4mm（防水シート厚×2）
固定装置	・仕様	・形状、配置 ・ストローク ・既設防水シートをポイントではなく、全周をアンビルに押付けて固定。
	・固定力	・固定ジャッキ ・防水シート引張試験機のつかみ力を参考に算定。
	・表面材質	・防水シートとの摩擦 ・防水シートと摩擦の少ない材質であるMCナイロンを使用。
シートガイド装置	・構造	・狭い区間に設置 ・溶着中に防水シートに張力を発生させない ・従動式のキャタピラ方式を採用し、キャタピラが新設シートを引きずらないように回転速度とキャタピラの回転速度の同期をとった。 ・昇降機構をリンク構造とした。 ・押付力は、「新設シート重量+新設シートの引込み抵抗≤必要押付力」とし、新設シートの引込み抵抗は、バンドブレーキの張力計算方法を参考にした。 ・アンビル上に摩擦材を貼付け、アンビルと新設シート間の摩擦力を確保した。

(4) シートの溶着

防水シートの接合方法は、諸検討の結果、現場での高速施工と品質確保を重視し、熱コテ（以下、ウェッジと呼ぶ）式溶着方法を採用した。

溶着機は、図-4と写真-2に示すように、防水シートとシート間にウェッジを挿入し、押圧ローラによってアンビルに押し付けて接合する構造で、旋回リングに装備される。この時、防水シートの接合部強度は、溶着速度、溶着温度、押付力の3要素に影響を受ける。

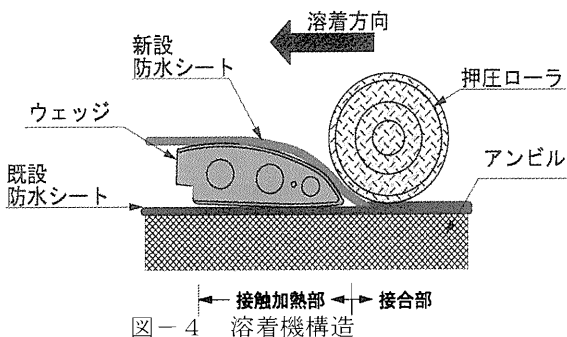


図-4 溶着機構造

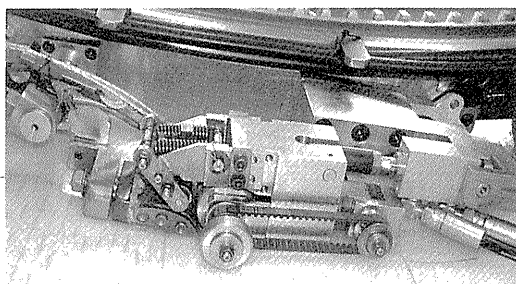


写真-2 円周方向溶着機

実験により、円周方向と軸方向の溶着速度をそれぞれ設定した溶着速度に対して、溶着温度と押付力は、規格値である接合部強度 10N/mm 以上を広い範囲の中で確保できることが確認できた。

実験より、得られた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

このことから、現場施工においても、防水シート溶着の施工管理が容易であることが確認できた。

(5) 施工性

本システムの各機構、装置については、固定装置の固定力等に多少オーバースペックな部分があったが、基本的な構造や仕様には問題はなかった。

シート防水工と掘進同時施工を検証するために、実験機を前進させながら同時施工を行った結果、立案した施工方法や手順で、作業性や施工性に問題はなかった。曲線施工（曲線半径 50m）についても、防水シートの溶着部の重ね幅を調整することで、シートに極端なしわや張力が発生することなく施工可能であることを確認した。

また、セグメント組立は、シートの固定により垂れが防げ、シートがない状態とほぼ同じ時間で施工できた。

(6) 品質

防水シートの巻立・溶着は、しわやずれが少なく、アンビル内径（セグメント外径）とほぼ同径で行えることが確認できた。

溶着後は、溶着部確認検査であるウォータチェック（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）とバキュームチェックを行った。

また、溶着部より試験片を採取して写真-3に示す耐水圧試験機で、2MPa まで加圧して耐水圧性

を確認し溶着品質に掘進やセグメント組立の影響がないことを確認した。

(7) サイクルタイム

このクラスの径での目標とした防水シート1リングの所要時間25分に対して、実験より得られた巻立時間は21分で、目標を達成することができた。

また、実験結果より試算すると、中口径・大口径に対しても充分対応できることが確認できた。

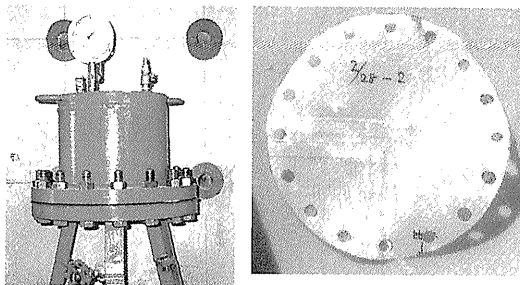


写真-3 耐水圧試験機と試験片

5. おわりに

平成12年度からラッピング工法の開発に着手し、施工技術を確認してきた。その後、以下に示すように、適用範囲の拡大、品質の向上およびコストダウンを目指し種々の改良技術の開発に取り組んできた。

- ①ラッピング工法用防爆システム
- ②ラッピング工法用可とうセグメント
- ③改良型シート巻立固定装置

本工法は、大深度地下を有効利用する上で必要な技術であり、さらなる技術の向上を図るには、実工事へ適用され実績を積み重ねることが必要不可欠と思われ、さらなる努力を行う所存である。

近々、現場にて実証する予定であり、今後、さらに本工法の普及を図る予定である。