

# シールドトンネルにおけるラッピング工法 (外周被覆工法) の開発

島田 哲治・栄 毅 熾

現在、都市トンネルの建設は、地下構造物の輻輳化によりますます大深度化する傾向にあり、高水圧に対応する止水技術が求められている。また、海底部や湾岸部では、塩害によってセグメントが劣化することを抑止する技術も求められている。

このような要望に対応する技術に、「メンブレンラッピング工法」と「ラッピングシールド工法」のようにセグメントの外周全体を防水シートで覆う外周被覆工法がある。

「ラッピング工法」は、両工法の技術を融合して、大断面施工や高速掘進施工にも対応可能な汎用工法を目指して開発を行った。

このたび、 $\phi 3,478$  mm シールド実験機に開発した施工システムを装備して、実施工レベルの実験を行い、本システムの機能・施工性の検証と優れた品質確保を確認し、実用化の見通しを得ることができた。

本報文では、「ラッピング工法」の開発の概要、実験結果を紹介するものである。  
キーワード：トンネル、外周被覆工法、防水シート、止水技術、劣化防止技術、

## 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、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には、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。

さらに、最近の建設事業は、新規建設費のコスト縮減が強く求められており、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が求められている。

ラッピング工法（外周被覆工法）は、それらの要望に応えるべく開発した技術である。本工法は、セグメント外周全体を止水性、耐久性に優れた防水シートで覆う技術である。

今回、開発した施工システムについて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。本報文では、開発の概要、実験結果について報告する。

## 2. 開発の概要

### (1) ラッピング工法の特長

ラッピング工法は、トンネルの外側をシートで覆うことでトンネルを土と水から遮断する。

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。

(2) 開発のコンセプト

既存の外周被覆工法には、メンブレンラッピング工法とラッピングシールド工法がある。

ラッピング工法は、大成建設(株)、五洋建設(株)、(株)奥村組、日立建機(株)、石川島播磨重工業(株)が、共同で、両工法の技術を融合して大断面や高速掘進施工にも対応できる汎用性の高い外周被覆工法を目指して開発を行った。

新しく開発した技術は、以下のとおりである。

- ① 大断面シールドや高速掘進に対応した防水シート高速溶着装置
- ② 施工性と優れた品質を確保できる防水シート高速被覆システム
- ③ 耐水圧性・耐久性・施工性に優れたラッピング工法用防水シート

開発にあたり、セグメント外径と掘進速度に対して、目標と定めた防水シート巻立て時間を表-1に示す。

表-1 目標防水シート巻立て時間

セグメント外径 (mm)	セグメント幅 (mm)	掘進速度 (mm/min)	掘進時間 (min)	目標巻立て時間 (min)
3,550	1,000	40	25' 00"	25' 00"
5,750	1,200	35	34' 20"	30' 00"
9,800	1,200	30	40' 00"	35' 00"
14,000	1,200	25	48' 00"	45' 00"

3. ラッピング工法の概要

(1) 施工法

ラッピング工法を図-1に示す。

シールド機に装備した防水シート高速被覆システムにより、掘進中にセグメント1リング分のシートを巻立てる。掘進およびシート巻立て後、セグメント組立てを行う。以後、掘進・防水シ

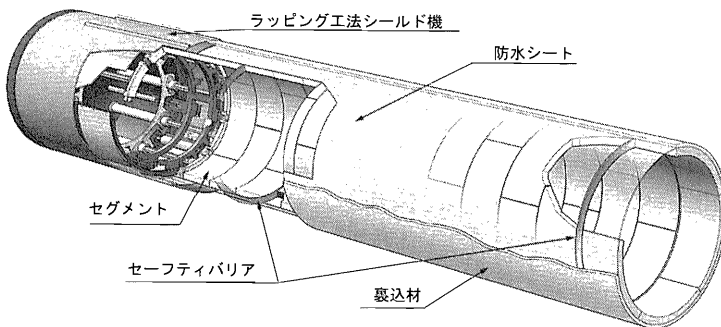


図-1 ラッピング工法概念図

ト巻立ての同時施工（以下、掘進・巻立て同時施工と呼ぶ）とセグメント組立てを順次行い、トンネル全体を防水シートで覆う。

セグメントで覆ったシートの外側への裏込め注入は、シールド機より同時裏込め注入装置により行う。

なお、約30mごとにセグメントリング間に錨状の隔壁（以下、セーフティバリアと呼ぶ）を設け、万一、シートが破損しても区間を限定することで漏水箇所の発見と補修を容易にする。

(2) 防水シート

当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。また、製品に対する仕様を表-2のように定めた。なお、規格値は、日本鉄建公団の防水シート品質管理基準<sup>1)</sup>を参考とした。

表-2 ラッピング工法用防水シート物性規格値

試験項目	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
引張り強さ (N/mm <sup>2</sup> )	20°C	10以上
	-10°C	18以上
伸び (%)	20°C	500以上
	-10°C	350以上
継目強度(残率) (%)	30以上	JTA(案) <sup>2)</sup>
引裂強さ (N/mm)	40以上	JIS K 6252 準拠
耐薬品性質質量変化率 (%)	アルカリ 酸 食塩水	±1以内 準拠 JIS K 6773

<sup>2)</sup>JTA(案)：継目強度の規格値は、「山岳トンネル工法における防水工指針/社団法人日本トンネル技術協会」のうち、日本鉄道建設公団のECBシート防水材の品質管理基準値(案)の数値を採用した。

(3) 施工システム構成

ラッピング工法のシールド機には、従来の機構に加え、防水シート高速被覆システムが装備される。ラッピング工法シールド機を図-2に示す。

防水シート高速被覆システムは、掘進・巻立て同時施工機構、防水シート巻立て装置、防水シート固定装置、溶着装置等

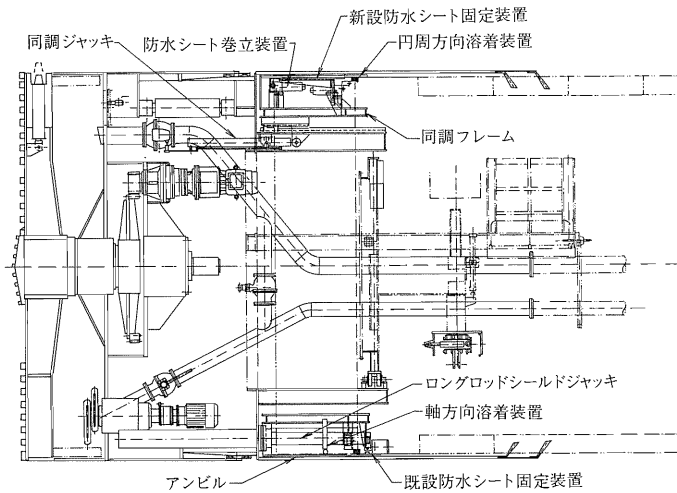


図-2 ラッピング工法シールド機

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。以下に各装置、機構の特長について説明する。

#### ① 掘進・巻立て同時施工機構

防水シート施工装置全体を掘進と同期しシールド機テール内を摺動させる装置である。

防水シート巻立て装置、防水シート固定装置、溶着装置等を搭載する同調フレームとテール内を摺動させる同調ジャッキおよび巻立てスペースを確保するためのロングロッドシールドジャッキにより構成される。

#### ② アンビル

防水シート巻立て時の周長を確保し、巻立て形状を円形に保持するための装置で、アンビルの内径はセグメント外径に防水シートの厚さを加えた径である。また、防水シート溶着時の受け台として使用される。

#### ③ 防水シート巻立て装置

ロール状に巻かれた防水シートを円周状に巻立てる装置である。

防水シートを受けるための防水シートロール受け、防水シート端部を把持する巻立てアーム、および、巻立て旋回リングと巻立て旋回リング旋回機構より構成される。

#### ④ 既設防水シート固定装置

既設防水シートをアンビルに押付けて固定し円

形を保持する装置で、溶着時に既設防水シートのずれを防止する。また、セグメント組立て時は防水シートの垂れを防止する。

#### ⑤ 新設防水シート固定装置

アンビル内面に巻立てられた防水シートをセグメント外径と同径に固定する装置で、溶着時に新設防水シートのずれを防止する。

#### ⑥ 円周方向溶着装置

既設防水シートと新設防水シートの円周方向の重なり部分を接合させる装置で、アンビルとシールドジャッキの間に装備される。

装置は、円周方向溶着機と溶着機

を円周方向に旋回させるための溶着旋回リング、および溶着旋回リング旋回機構より構成される。

溶着機は、図-3に示すように、新設および既設防水シートを加熱し溶融させるための熱こて（以下、ウェッジと呼ぶ）、および溶融した防水シートをアンビルに押付け接合させるための押圧ローラより構成される。

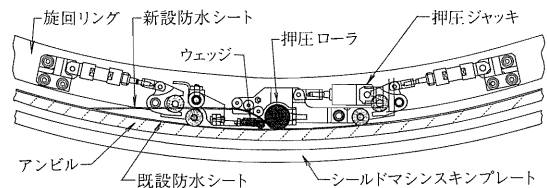


図-3 円周方向溶着装置

#### ⑦ 軸方向溶着装置

新設防水シートの端部同士を溶着するための装置で軸方向溶着機とトンネル軸方向のスライド機構および円周方向の位置をずらすためのスライド機構により構成される。

溶着方法は、円周方向溶着と同様である。

#### ⑧ 防水シート破損防止機構

・フリーロック装置：

スプレッドのローリング防止装置である。スプレッド間に装備され、スプレッドのローリングによって生じる防水シートの破損を防ぐ。

・シートプロテクタ：

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。

(4) 施工手順

ラッピング工法の施工手順を図-4に示す。

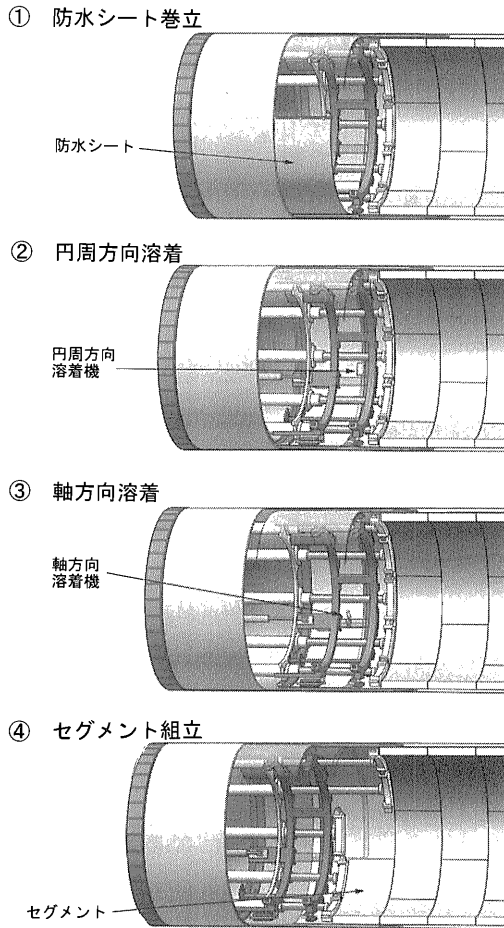


図-4 施工手順

① 防水シート巻立て：

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てアームに把持し、巻立て巡回リングを回転させてシートを巻立てる。

② 円周方向溶着：

既設防水シートと新設防水シートの重ね合わせた部分に円周方向溶着機をセットし、溶着巡回リングを回転させて円周方向の溶着を行う。

③ 軸方向溶着：

新設防水シートの重ね合わせた部分に軸方向溶着機をセットし、軸方向スライド装置で走行さ

せ、軸方向の溶着を行う。

④ セグメント組立て：

掘進および防水シート巻立て・溶着が完了した後で、シートの内側にセグメントを組立てる。

4. 実 験

開発したラッピング工法用防水シートについての物性確認試験と、防水シート高速被覆システムについて、機能・施工性と品質検証のためシステム実証実験を行った。

(1) ラッピング工法用防水シート

ラッピング工法に用いる防水シートは、今回新たに開発したメタロセン触媒ポリエチレンシート（以下、MPEと呼ぶ）とラッピングシールド工法に用いたポリエチレンシート（PE-2S）の2種類がある。

実験では、MPEの物性確認試験を行い、すべて規格値を満足していることが確認できた。

試験結果を表-3に示す。

表-3 MPE物性確認試験結果

試験項目		規格値	物性試験値
比重(-)		0.95±0.05	0.903
	硬さ(-)	85~98	97
	厚さ(mm)	2.0以上	2.09
引張り強さ(N/mm <sup>2</sup> )	20℃	10以上	32.3
	-10℃	18以上	41.2
伸び(%)	20℃	500以上	800
	-10℃	350以上	602
継目強度(残率)(%)		30以上	85.7
引裂強さ(N/mm)		40以上	95
耐薬品性質量変化率(%)	アルカリ	±1以内	±0.0
	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り試験（引張り強さ、伸び）も行った。

引張り試験結果を表-4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、引張り強さ10 N/mm<sup>2</sup>以上と伸び500%以上を満足していることが確認できた。

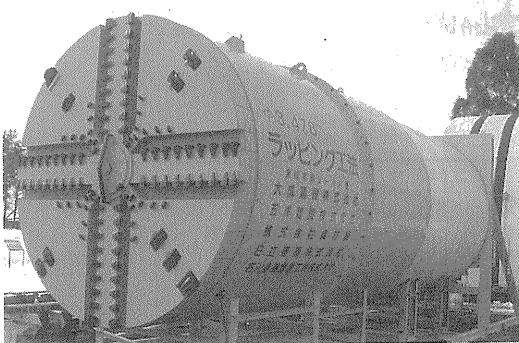
表—4 耐薬品性試験/引張り強さ・伸び

試験条件				
試験項目	試薬	温度	備考	
耐アルカリ 耐酸 耐食塩水	NaOH 10%溶液	70°C	pH 13程度 pH 3程度 海水を想定	
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 10%溶液	50°C		
	食塩水 3.5%溶液	70°C		
試験結果				
試験項目	浸漬時間10時間		浸漬時間334時間	
	引張り強さ	伸び	引張り強さ	伸び
耐アルカリ	29.6 N/mm <sup>2</sup>	829%	29.2 N/mm <sup>2</sup>	820%
耐酸	29.6 N/mm <sup>2</sup>	829%	29.5 N/mm <sup>2</sup>	809%
耐食塩水	29.6 N/mm <sup>2</sup>	829%	29.6 N/mm <sup>2</sup>	847%

以上の試験結果より、MPE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。

## (2) 防水シート高速被覆システム

防水シート高速被覆システムについての検証は、φ3,478 mm シールド実験機に搭載して実験を行った。実験機とその仕様を、写真—1と表—5に示す。



写真—1 シールド実験機

### ① 防水シート高速溶着装置

防水シート溶着部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け力の3つの要素である。

実験により、円周方向と軸方向のそれぞれに設定した溶着速度に対して所定の品質を確保できる溶着温度と押付け力の許容範囲が広範囲であり、現場施工でも容易に管理できることが確認できた。

実験結果を以下に示す。

- ・円周方向溶着：速度 2.5 m/min に対して温度 460～520°C、押付け力 0.6～1.0 kN
- ・軸方向溶着：速度 1.0 m/min に対して

表—5 実験機および実験仕様

	外径	φ3,478 mm
シールド機	シールドジャッキ	ロングロッドシールドジャッキ 100 kN×1,450 mm×10本 スプレッド(フリーロック装置)
	テールシール	ワイヤブラシ2段
	防水シート高速被覆システム	同調フレーム/ガイドロッド 防水シート巻立て装置 既設防水シート固定装置 新設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 外径/内径/幅	スチール製/5分割/軸挿入式 φ3,350 mm/φ3,050 mm/900 mm
防水シート	材質/厚さ	ポリエチレン/2.0 mm

温度 370～430°C、押付け力 0.6～1.0 kN

### ② 防水シート高速被覆システム

実施工と同じ手順で、掘進・巻立て同時施工とセグメント組立ての連続施工を行い、施工性、品質、施工時間の検証を行った。

(i) 施工性(各装置、機構の機能)について  
実験レベルでは、同時施工およびセグメント組立てについて特に問題はなかった。曲線施工(曲線半径 50 m)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。

#### (ii) 品質について

溶着後の溶着部確認検査<sup>2)</sup>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)にすべて合格した。また、溶着部より試験片を採取して写真—2に示す耐水圧試験機で、2 MPaまで、加圧して耐水圧性を確認した。

巻立て長さについては、基準としたアンピルの周長(セグメント外周長)以下で、新設及び既設防水シートの長さの差により溶着品質に影響がない範囲内で巻立てることができた。

#### (iii) 防水シート巻立て施工時間

このクラスの径での目標とした防水シート巻立て時間(25分00秒)に対して、実験より得られた巻立て時間は、24分40秒で、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、φ5,750、φ9,800、φ14,000 mmに対しても十分対応できることが確認できた。

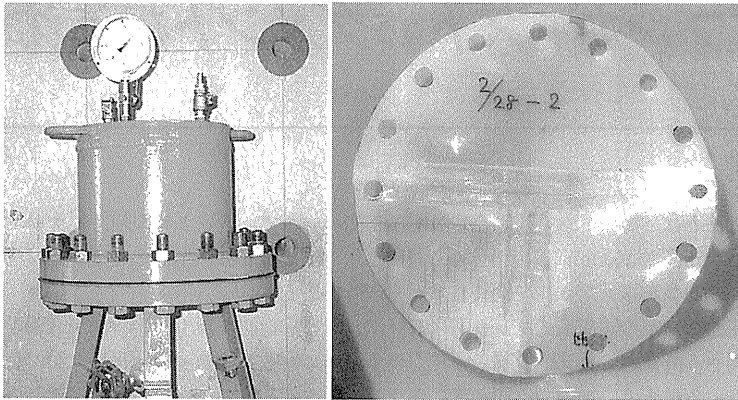


写真-2 耐水圧試験機および試験片

## 5. おわりに

平成12年6月より開発に着手し、防水シートの開発とラッピング工法の施工システムの基本構想を立案した。そして、実験により開発したラッピング工法の施工性および品質を確認し、実用化の見通しを得ることができた。

今後は、実験結果をもとに、コスト縮減を念頭においた防水シート高速被覆システムの検討を行うとともに、本工法のさらなる技術の向上を図り、実工事への適用を積極的に行っていく予定である。

J C M A

### 《参考文献》

- 1) 日本鉄道建設公団監修トンネル防水工研究委員会：併進工法における防水シート工設計施工の手引（案）都市ト

ンネル編，pp. 7-16，平成3年11月

- 2) 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.112-116，平成12年11月

### 【筆者紹介】



島田 哲治（しまだ てつじ）  
大成建設株式会社  
技術センター  
土木技術開発部  
シールド・TBM 工法開発室  
主任



栄 毅熾（さかえ たけし）  
大成建設株式会社  
技術センター  
土木技術開発部  
部長