

ラッピング工法の開発と実証実験

- ラッピングシールド工法のバージョンアップ -

松岡 義治^{*} 原 修一^{*}
尾崎 裕之^{*}

要 旨

近年のシールド技術の課題は、大深度の高水圧地盤におけるシールドトンネルの漏水対策や、腐食性環境下の地盤でのセグメントの劣化対策が挙げられる。そこで、これらの課題を解決するため、1993年度からセグメントの外周全体を防水シートで覆うラッピングシールド工法（外周被覆工法）の開発に着手してきた。ラッピングシールド工法は1999年度に試験フィールド事業として採用された平成10年度23号大高シールド工事における実施工、2000年度に建設省技術審査証明取得と実績を上げた。その一方、大断面施工と高速掘進施工への対応という課題が挙げられていた。

これらの課題に対応するため、同様に外周被覆工法であるメンブレンラッピング工法と技術を融合して、新たにラッピング工法の開発に着手し、2001年度、高速溶着装置・施工機構・専用防水シートの検討と、3478mm実証実験シールド機により気中での実証実験を行い、ラッピング工法の機構・機能および施工性の検証を行った。

1. はじめに

都市部の地下において各種構造物が輻輳化し、新しくシールドトンネルを構築する場合、既存の構造物を避けるためさらなる大深度化が進んでいる。また、「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」が施行され、シールドトンネルはますます大深度化が進むと思われる。

シールドトンネルの止水・防水技術は、セグメント間に挟むシールド材の開発が進み、高水圧に対応した水膨潤性シールド材が開発され、実績を積み重ねている。

しかし、近年のシールド技術の課題は、大深度トンネルの高水圧対策が挙げられ、より確実な止水・防水技術が求められている。

大成建設(株)・(株)奥村組・日立建機(株)・石川島播磨重工業(株)との共同開発で、シールド工法の外周被膜工法であるラッピングシールド工法とメンブレンラッピング工法の技術を融合し、防水シート（以下、シート）巻立の高速施工が可能で、施工性に優れたラッピング工法を新たに開発した。

ラッピング工法はセグメントの外周全体をシートで覆うことで、セグメントと地盤とを遮断する工法である。このため、大深度の高水圧地盤に対しても、漏水がなく止水性の高いシールドトンネルを構築することができる。また、臨海部や腐植土・有機質土を含む腐食性環境下の地盤に対してもセグメントの劣化を抑制し、耐久性の高いシールドトンネルを構築することができる。

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

ラッピング工法は1リング毎に巻立てられたシートでセグメント外周全体を覆うことで、セグメントと地盤とを遮断したシールドトンネルを構築するシールド工法の新しい施工技術である。このため、大深度の高水圧地盤に対しても止水性が高く、また、腐食性環境下の地盤に対しても耐久性が高いシールドトンネルを構築することができる。

施工は、シールド機テール部に装備したラッピング専用機構を使用して行う。1リング毎にシールド掘進と併行してシートを巻立て、円周および軸方向の溶着を行う。その後、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（鏝状の隔壁）を取り付け、止水区間を区画化することで、万が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が容易になる。

図-1にラッピング工法の概要図を示す。

^{*}技術研究所

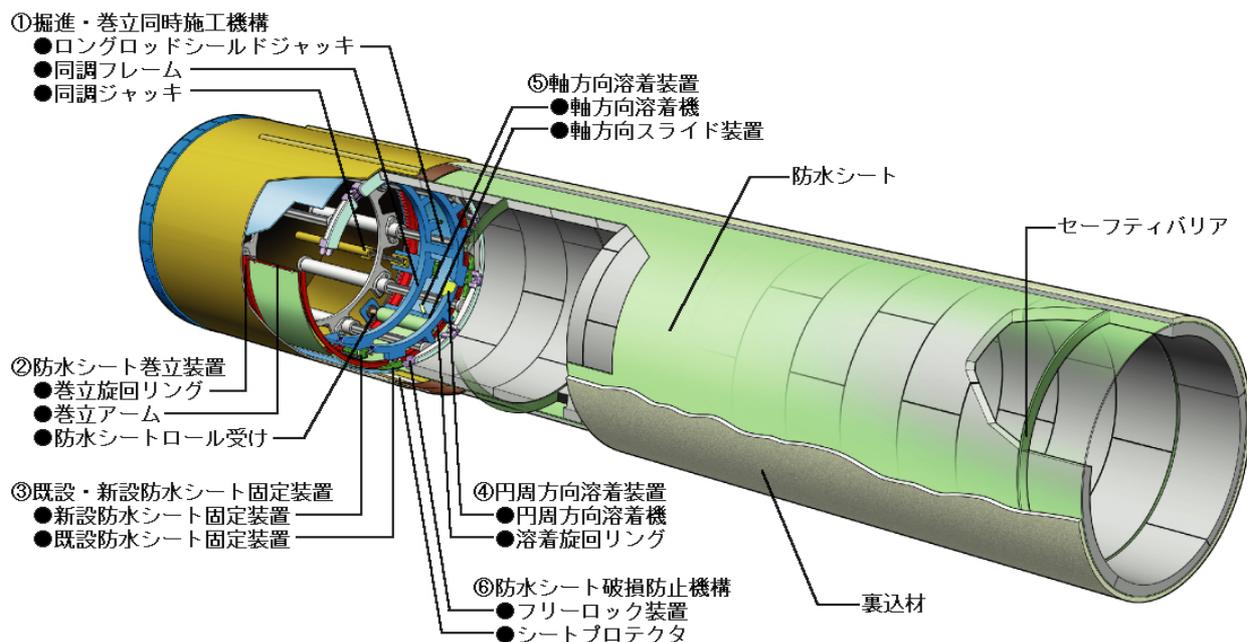


図 - 1 ラッピング工法の概要図

3. ラッピング工法専用機構の構成

ラッピング工法は以下に示す機構によってセグメント外周をシートで覆うことを可能にしている。

掘進・巻立同時施工機構

ロングロッドシールドジャッキ：掘進開始時からシートを巻立てるスペースを確保する。

同調ジャッキ：シールド掘進に同調して、同調フレームをシールド機テール部で摺動させるジャッキ。

同調フレーム：シート巻立・固定・溶着装置が取り付けられているフレーム。同調ジャッキで摺動する。

防水シート巻立装置

巻立旋回リング：回転することで巻立アームが旋回し、アンビル（シートの受けフレーム）内側にシートを巻立てる。

巻立アーム：シート端部を把持してシートを巻立てるアーム。

防水シートロール受け：ロール状のシートをセットする。

新設・既設防水シート固定装置

新設防水シート固定装置：新設シートをアンビルに固定することで、シートをアンビル沿いに均一な長さにし、また、溶着時、新設シートのずれを防止する。

既設防水シート固定装置：既設シートをアンビルに固定することで、溶着時、既設シートのずれを防止する。

円周方向溶着装置

円周方向溶着機：新設シートと既設シートの重ね合わせ部の間にウェッジ（熱コテ）を挿入することによってシート表面を溶融し、押圧ローラでシートに押付力を加えてシートを接合する。

溶着旋回リング：回転することで円周方向溶着機が旋回し、円周方向溶着を行う。

軸方向溶着装置

軸方向溶着機：新設シートの軸方向の重ね合わせ部を円周方向溶着機と同様の原理で接合する。

軸方向スライド装置：スライドすることで軸方向溶着機が移動し、軸方向溶着を行う。

防水シート破損防止機構

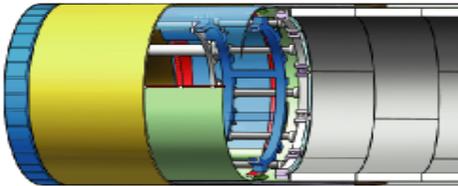
フリーロック装置：スプレッドのローリングによって生じるシートの損傷を防ぐため、スプレッド間に装備されている。

シートプロテクタ：巻立てたシートがテール部で擦れて傷付かないようにテールプレートに配置されている。

4. ラッピング工法の施工手順

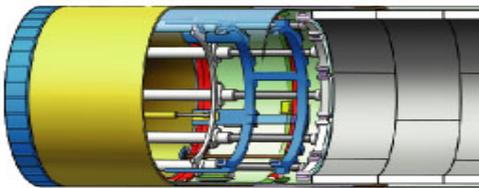
ラッピング工法の施工手順を図 - 2 に示す。

防水シート巻立



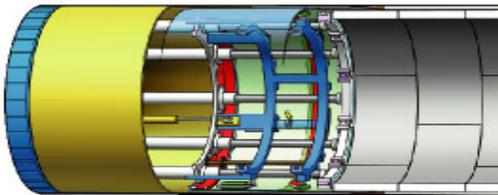
掘進開始と同時に、防水シートロール受けにセットされたシートの端部を巻立アームに把持し、巻立旋回リングを回転させてシートを巻立てる。

円周方向溶着



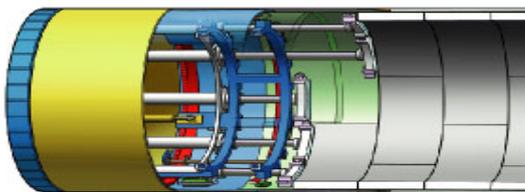
既設シートと新設シートの重ね合わせた部分に円周方向溶着機をセットし、溶着旋回リングを回転させて円周方向の溶着を行う。

軸方向溶着



新設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。

セグメント組立



掘進およびシート巻立が完了した後で、シートの内側にセグメントを組み立てる。

5. ラッピング工法の特長

ラッピング工法の特長を以下に示す。

漏水防止

トンネル全体がシートで包まれているため、地下水が坑内へ漏水することを防止できる。

優れた耐久性

耐久性に優れたシートがセグメントを土と水から遮断するため、トンネルの長寿命化を達成できる。

工期の短縮

塩害等のセグメントの劣化が促進される条件下でも二次覆工の省略が可能となり、大幅な工期の短縮が図れる。

トータルコストダウン

二次覆工省略の場合の工事コストダウンはもとより、供用中の排水処理など、ランニングコストが削減できる。さらに、構造物・施設の劣化も抑止され、ライフサイクルコストの低減も行える。

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。

6. 防水シートについて

ラッピング工法で使用するシートは、表 - 1 に示す規格値を満足するものを使用する。現在においては、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）とラッピングシールド工法で使用したポリエチレンシート（以下、PE-2S）の2種類がある。

6.1. 防水シートの物性試験

ラッピング工法用シートの物性規格値とMPEとPE-2Sの物性試験値を表 - 1 に示す。

表 - 1 シートの物性規格値と MPEとPE-2Sの物性試験値

試験項目	単位	試験方法	規格値	防水シートの物性値	
				MPE	PE-2S
比重	-	JIS K 6773	0.95 ± 0.05	0.903	0.93
硬さ	-	JIS K 6773	85 ~ 98	97	92
厚さ	mm	JIS A 6008	2.0以上	2.09	2.02
引張強さ	20	MPa	JIS K 6773	10	32.3
	-10			18	41.2
伸び	20	%	JIS K 6773	500以上	800
	-10			350以上	602
引裂強さ	N/mm	JIS K 6252準拠	40以上	95	81
耐薬品性 質量変化率	アルカリ	%	JIS K 6773準拠	±1以内	±0.0
	酸			±1以内	+0.1
	食塩水			±1以内	+0.1
継目強度(残率)	%	JTA(案)	30以上	85.7	73.5

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¹⁾」内、ECBシート防水材の品質管理基準(案)数値を採用した。

図 - 2 ラッピング工法の施工手順

6.2. 防水シートの耐久性

新たに開発したシートのMPEに関して、腐食性環境下での耐久性を検証するため、耐薬品性試験を行った。

耐薬品性加熱促進試験

公的機関に依頼し、長期に亘る現象を比較的短時間で評価できる耐薬品性加熱促進試験を行った。334時間の耐薬品性加熱促進試験結果は、表-2に示すようにいずれも表-1の規格値を満足していた。

表-2 公的機関による耐薬品性加熱促進試験

試薬	濃度	温度	試験期間	備考	質量変化率
耐アルカリ性	NaOH 10%水溶液	70	334時間	pH13程度	0.0%
耐酸性	H ₂ SO ₄ 10%水溶液	50	334時間	pH3程度	0.1%
耐食塩水	NaCl 3.5%水溶液	70	334時間	海水を想定	0.1%
耐硫化水素	50~100ppm	20~25	334時間	硫黄イオンを想定	0.0%

アレニウス則²⁾に基づく寿命予測

アレニウス則に基づく寿命予測を行うため、各試薬に対して温度を3点とり、耐薬品性の自主試験を行った。試験条件を表-3に示す。アレニウスによれば、“化学反応は温度の関数であり、温度が上昇するとともに反応は早く進む”とされている。つまり、この試験において、試験温度が高いほど劣化速度が速くなるはずである。しかし、図-3に示すように、そのような傾向は見られず安定している。このため、アレニウス則に基づく寿命予測はできなかった。

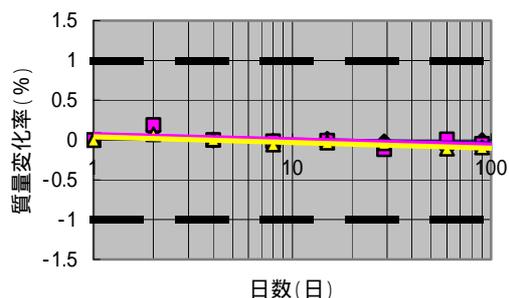
表-3 耐薬品性の自主試験条件

試薬	濃度	温度	試験期間	備考
耐アルカリ性	NaOH 10%水溶液	70、50、30	90日間	pH13程度
耐酸性	H ₂ SO ₄ 10%水溶液	50、40、30	90日間	pH3程度
耐食塩水	NaCl 3.5%水溶液	70、50、30	90日間	海水を想定

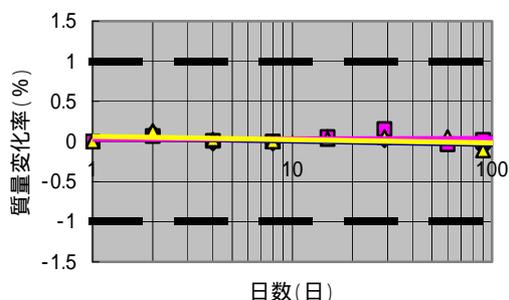
回帰曲線による100年後の質量変化率

図-3から回帰曲線によって算出した100年後の推定質量変化率を表-4に示す。表-4から分かるように、回帰曲線による100年後の推定質量変化率はいずれも表-1の規格値を満足しており、耐久性に優れていると推定される。

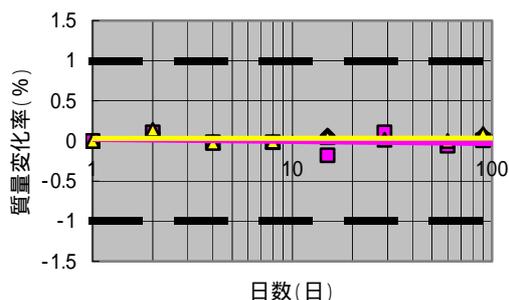
また、同時に測定したいずれの試験片の伸びと引張強さの結果は、浸漬期間90日後も劣化がほとんどなく規格値を満足している。また、回帰曲線による引張強さと伸びの100年後の劣化予測値はいずれも表-1の規格値を満足していたため、ここからもこのシートが耐久性に優れていることが分かる。



(a) 耐アルカリ性質量変化率



(b) 耐酸性質量変化率



(c) 耐食塩水質量変化率

図-3 耐薬品性試験結果

表 - 4 回帰曲線による 100 年後の推定質量変化率

試 薬	濃 度	試験期間	備考	温度	質量 変化率	回帰曲線 による 100年後の 推定質量 変化率
耐アルカリ性	NaOH 10%水溶液	90日間	pH13程度	70	-0.1%	-0.3%
				50	0.0%	-0.2%
				30	0.0%	-0.2%
耐酸性	H ₂ SO ₄ 10%水溶液	90日間	pH3程度	50	-0.1%	-0.1%
				40	0.0%	0.0%
				30	-0.1%	-0.1%
耐食塩水	NaCl 3.5%水溶液	90日間	海水を想定	70	0.1%	0.0%
				50	0.0%	-0.1%
				30	0.0%	0.0%

7. 実証実験

気中において、掘削機構を除いた実物大の実証実験シールド機とシートの MPE を使用して、本工法の機構・機能および施工性を検証した。また、直線施工を 6.3m と曲線施工（曲線半径 50m）を 4.5m の掘進・巻立同時施工とセグメント組立の連続施工を行うことによって、連続施工における溶着品質を検証した。

7.1. 実験装置と資材

実証実験に使用したシールド機を写真 - 1 に、実験装置と資材の仕様を表 - 5 に示す。



写真 - 1 実証実験シールド機

表 - 5 実験装置と資材の仕様

シールド機	外径	3478mm
	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（フリーロック装置つき）
	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 新設防水シート固定装置 既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	スチール製 / 5 分割 / 軸挿入式
防水シート	外径 / 内径 / 幅	3350mm / 3050mm / 900mm
	材質 / 厚さ	MPE / 2.0mm

7.2. 実験装置の施工性

実証実験シールド機の各装置の機構・機能および施工性を検証した。結果を以下に示す。

掘進・巻立同時施工機構

シールド機の 3 時と 9 時方向に位置するシールドジャッキを同調ジャッキとして用いた。これらのジャッキと同調フレームを連結することで、掘進・巻立同時施工を可能とした。また、同調フレームがシールドテールプレートと並行を保ちながらスムーズにスライドできるようにガイドロッドが設けてある。さらに、アンピルとスキンプレートが擦れても大きな抵抗とならないように、摩擦抵抗を低減させるための緩衝材がアンピル外面に配置されているため、アンピルをスムーズにスライドさせることができた。

防水シート巻立装置

本装置は幅約 1m、長さ約 10m、重さ約 20 kg のシートを巻立てる。巻立アームの把持機構は、巻立途中でシートが外れることなく、また、把持力によるシートの破損もなく良好だった。防水シート巻立装置を写真 - 2 に示す。



写真 - 2 防水シート巻立装置

既設・新設防水シート固定装置

新設シート固定位置は円周方向溶着部から 300 ~ 500 mm の調整が可能であったが、溶着部から 300 mm の位置で固定すると、よりよい溶着結果を得られることが分かった。

円周方向溶着装置

本工法において、円周方向溶着が最もクリティカルな作業となる。したがって、一周約 10m をできるだけ速く溶着することによって施工時間の短縮が可能になる。本実験において溶着速度は 2.5m/分まで所定の溶着品質が得られることを確認した。円周方向溶着装置

を写真 - 3 に示す。

また、平面的な床の上での溶着とは異なり、円筒状に巻立てたシートを溶着するにはいくつかの問題点が発生した。これら問題点・原因・対策を表 - 6 に示す。

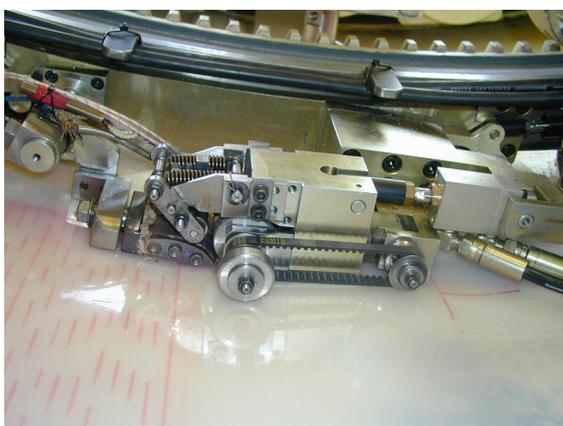


写真 - 3 円周方向溶着装置

表 - 6 円周方向溶着の問題点・原因・対策

問題点	原因	対策
溶着時、新設シートが切羽側にずれることで溶着重ね幅が減少する。	押圧ローラ自体の抵抗が大きい。	押圧ローラが駆動するように改造した。
溶着不良が多く、溶着部強度も弱い。	シートがウェッジに接触する範囲が短いため、シートへのプレヒート（事前加熱）が不足している。	ウェッジに積極的にシートを押しつけるようにガイドローラを設けた。
	既設シートへのプレヒートが少ないウェッジ形状である。	既設シートが長くウェッジに接触できるようにウェッジの形状を変更した。

軸方向溶着装置

軸方向溶着装置については、円周方向溶着装置とほぼ同様の構造にすることで対応できた。軸方向溶着装置を写真 - 4 に示す。

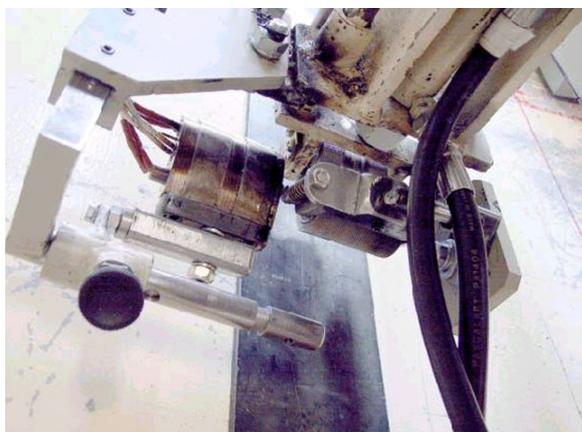


写真 - 4 軸方向溶着装置

7.3. 溶着部の強度と止水性

シート溶着部の品質に大きな影響を与える3つの要素は溶着速度、溶着温度、押付力である。溶着速度を速くする場合は、それに合わせて溶着温度を高くする。そして、溶着速度、溶着温度のバランスとシートの硬さ、厚さに合わせて押付力を調整する。

実証実験では円周方向と軸方向のそれぞれの溶着条件に合わせてこれらのパラメータを設定して溶着を行い、試験片を採取してせん断剥離強度試験を行い、継目強度を確認した。また、溶着部の止水性が確保されていることを確認するため、耐水圧試験を行った。

円周方向溶着部の強度

溶着速度は、本工法の開発目的である高速溶着に対応させるため2.5m/分に設定した。溶着温度は、溶着速度から460～520の範囲で設定した。押付力は、0.6～1.0kNの範囲で設定した。

実験結果の前に、表 - 1の規格値から溶着部のせん断剥離強度の規格値を換算する。

$$\begin{aligned} & \text{【引張強さの規格値】} \times \text{【シートの厚さ】} \\ & \quad \times \text{【残率の規格値】} / 100 = \\ & 10 (\text{N/mm}^2) \times 2.09 (\text{mm}) \times 30 (\%) / 100 \\ & \quad = 6.27 (\text{N/mm}) \end{aligned}$$

以上から、溶着部のせん断剥離強度の規格値は6.3 (N/mm)となる。

溶着温度と押付力とのせん断剥離強度の関係を図 - 4に示す。図から分かるように、多少のばらつきはあるが、せん断剥離強度は20N/mm前後であり、継目強度は上記の6.3N/mmを満足している。

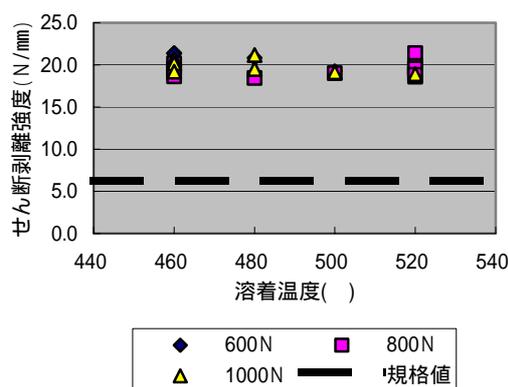


図 - 4 円周方向溶着部のせん断剥離強度

軸方向溶着部の強度

溶着速度は、1.0m/分に設定した。溶着温度は、溶着速度から370～430の範囲で設定した。また、押

付力は、0.4～1.0kNの範囲で設定した。

溶着温度と押付力とのせん断剥離強度の関係を図-5に示す。図から分かるように、多少のばらつきはあるが、せん断剥離強度は20N/mm前後であり、継目強度は表-1から算出した6.3N/mmを満足している。

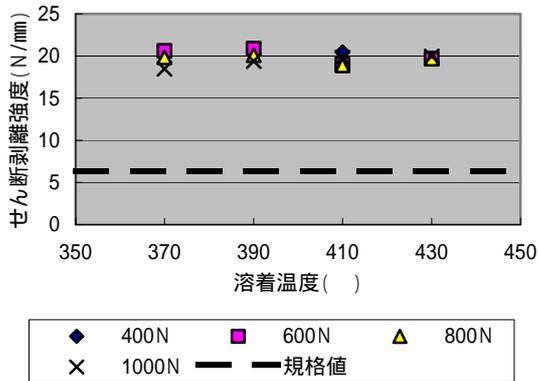


図 - 5 軸方向溶着部のせん断剥離強度

溶着部の止水性

シート防水工施工後、円周方向溶着部、軸方向溶着部、三重溶着部（円周方向溶着始点および段差部、軸方向溶着始点部含む）から漏水が発生しないことを確認するため、セグメント外面を想定した耐水圧試験器に各溶着部を設置して、その上から所定の水圧をかける耐水圧試験を実施した。耐水圧試験器を写真-5に示す。

各溶着部は2.0MPaに加圧後も漏水が発生しなかったため、2.0MPaの耐水圧性を確保していると考えられる。

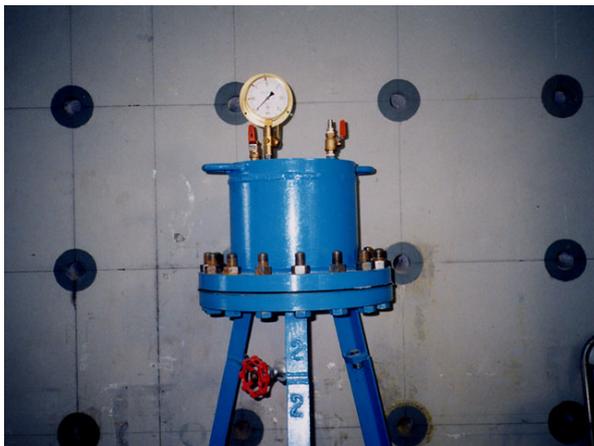


写真 - 5 耐水圧試験器

7.4. 防水シートの巻立長さ

シートはシート固定装置によってセグメント外周長さとはほぼ同じ巻立長さでアンビルに固定されるが、シートの巻立長さによっては、隣り合うシート固定装置の間のシートがセグメント外周長さより長いために弛んだり、短い場合張ったりする。新設シートと既設シートで隣り合う固定装置の間の状態が異なると、新設シートと既設シートの溶着位置がずれてしまう。そこで、実証実験シールド機の下部において長さ約3.0mのシートを使用して、巻立長さが円周方向溶着に及ぼす影響を確認する要素実験を行った。実験結果を表-7に示す。表から分かるように、確実な円周方向溶着を行うためには、既設シートも新設シートも巻立長さをセグメント外周長さ以下にして、常に同じ巻立長さを保つ必要がある。

この実験結果をふまえて、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。連続施工におけるシートの巻立長さの推移と円周方向溶着品質検査結果を表-8に示す。表から分かるように溶着前の新設シートの巻立長さは10,446～10,489mmの範囲に収まり、良好な溶着品質が得られた。

表 - 7 巻立長さが円周方向溶着に及ぼす影響確認の要素実験

既設シート巻立長さ	新設シート巻立長さ	溶着部の評価	備考
セグメント外周長さより小 (固定装置間が張っている状態)	セグメント外周長さより小 (固定装置間が張っている状態)		良好
	セグメント外周長さと同等		新設シートにややしわが発生
セグメント外周長さと同等	セグメント外周長さより大 (固定装置間で弛んでいる状態)	×	新設シートのずれが大きく、重ね幅が小さい
	セグメント外周長さより小 (固定装置間が張っている状態)		新設シートにややしわが発生
セグメント外周長さと同等	セグメント外周長さと同等		良好
	セグメント外周長さより大 (固定装置間で弛んでいる状態)	×	新設シートのずれが大きく、重ね幅が小さい
セグメント外周長さより大 (固定装置間で弛んでいる状態)	セグメント外周長さより小 (固定装置間が張っている状態)	×	既設シート2箇所ですしわを潰し溶着不良
	セグメント外周長さと同等	×	既設シート3箇所ですしわを潰し溶着不良
セグメント外周長さより大 (固定装置間で弛んでいる状態)	セグメント外周長さより大 (固定装置間で弛んでいる状態)	×	既設シート1箇所、新設シート1箇所ですしわを潰し溶着不良

7.5. 曲線施工の円周方向溶着部への影響

本工法において曲線施工のシールド掘進時、既設防水シート固定装置で既設シートを固定することによって、曲線中心側の既設シートに発生する弛みをセグメントと既設防水シート固定装置の間に集中させて、円周方向溶着部の重ね幅の変化を防ぐ。また、この弛みが円周方向溶着に影響して溶着不良が発生することを防ぐ。曲線連続施工において、既設防水シート固定装置のこの機能について検証を行った。

曲線施工における円周方向溶着前後で、溶着部の重ね幅の変化やしわの発生は認められないため、既設防水シート固定装置が十分機能していることが分かった。また、表 - 8 から分かるように、曲線施工においても良好な溶着品質が得られた。

表 - 8 連続施工の結果

線形	既設シート切羽側巻立長さ (mm)	溶着前新設シート坑口側巻立長さ (mm)	巻立長さ変位 (mm)	円周方向溶着品質検査結果	備考
1 直線	10,491	10,489	-2		
2 直線	10,491	10,470	-21		
3 直線	10,474	10,446	-28		
4 直線	10,446	10,472	26		
5 直線	10,459	10,469	10		
6 直線	10,466	10,467	1		溶着装置の押付力低下が原因補修後、溶着品質検査合格
7 直線	10,474	10,474	0		
8 50 R	10,468	10,463	-5		
9 50 R	10,482	10,487	5		
10 50 R	10,486	10,458	-28		
11 50 R	10,472	10,465	-7		
12 50 R	10,460	10,470	10		
13 直線	10,471	10,470	-1		

セグメントの外周長さ：10,524mm

7.6. サイクルタイム

本実験でのサイクルタイムを図 - 6 に示す。図から分かるように、円周方向溶着を高速化したことで円周方向溶着時間が非常に短縮された。一方、シート巻立・シート固定・軸方向溶着準備に時間がかかっているが、装置をさらに改良することで時間を短縮できると考えられる。

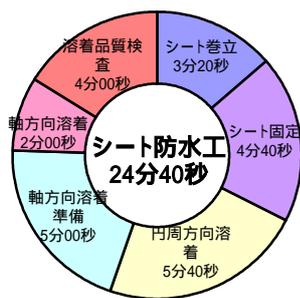


図 - 6 シート防水工のサイクルタイム

8. まとめ

新たに開発したシートの耐薬品性試験と実証実験の結果から確認できた項目を以下に示す。

- ・シートの M P E は腐食性環境下において長期間に渡り物性の劣化がほとんどないと考えられる。
- ・円周方向溶着と軸方向溶着は、溶着品質が確保できる溶着温度と押付力が広範囲であるため、施工管理が容易である。
- ・溶着部は 2.0 MPa の耐水圧性を確保している。
- ・円周方向溶着は 2.5m/分の高速溶着が可能のため、大幅なシート防水工の施工時間の短縮が可能である。その結果、大断面施工と高速掘進施工においても従来のサイクルタイムと同等の施工が可能である。

9. おわりに

ラッピング工法は、シールドトンネルの止水性の向上と長寿命化というニーズに十分応えることができると確信している。実証実験によりラッピング工法の機構・機能が確立され、施工性に優れていることが確認された。しかし、問題点・課題も発生しているため今後はその解決にあたり、ラッピング工法のさらなる前進を考えている。

最後に、国土交通省関東地方整備局関東技術事務所をはじめとして御協力いただいた関係者各位に厚く感謝する次第であります。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：山岳トンネル工法における防水工指針、pp50～61、1996.
- 2) 大石・成沢、日刊工業新聞社：プラスチック材料の寿命、1987.