

## シールドトンネルの止水技術の開発 - ラッピングシールド工法 -

原 修一\* 松藤 広行\*

### 要 旨

ラッピングシールド工法は、セグメントの外周全体に防水シートを巻立て、完全止水のシールドトンネルを構築する工法で、大深度の高水圧下における漏水防止、海底や臨海部におけるセグメントの腐食防止を主目的として'93～'94年に開発された。

本年度、これまでの課題であった施工サイクルタイムの短縮を目指し『掘進・巻立て同時施工』技術を開発した。また、ほぞ付きセグメントを使用した場合のセーフティバリアの材質・形状を選定することによって「パーカス工法」( Perfect Cut-off Single-Shell Shield method )を確立し、さらに巻立てた防水シート内でセグメントを組み立てる実証実験を行った。本報では、これらの詳細について報告する。

### 1. まえがき

都市部の地下は、その利用が年々進み、鉄道、上下水道、電気・通信洞道などで輻輳している。将来も、都市の発展と社会資本の整備を目指し、特に大深度での地下利用が増加していくものと思われる。地下利用の空間が大深度になればなるほど地下水圧が高くなり、構築された地下構造物からの漏水が懸念される。都市の地下開発はシールド工法が主流であり、その漏水対策としてはセグメントに施す止水シールや二次覆工で行われてきた。また海底や臨海部ではセグメントの腐食防止対策も重要であり、横浜市営地下鉄や東京湾横断道路(アクアライン)では、セグメントの内面に防水シートを巻立て、二次覆工を行うことによって止水性の向上と耐蝕性の向上が図られている。

一方、工事コストの縮減が強く叫ばれる昨今は、二次覆工の省略や工期の短縮が求められており、また地下水保全等の環境対策も求められている。

ラッピングシールド工法は以上の観点から完全止水の二次覆工省略型シールドトンネルを構築する工法として開発された。

なお、本工法は大成建設株式会社・日立建機株式会社との共同開発である。

### 2. 工法概要

ラッピングシールド工法はセグメントの外周全体に防水シートを巻立てて、完全止水のシールドトンネルを構築する工法である。主な機構としては次の要素がある(図-1参照)。

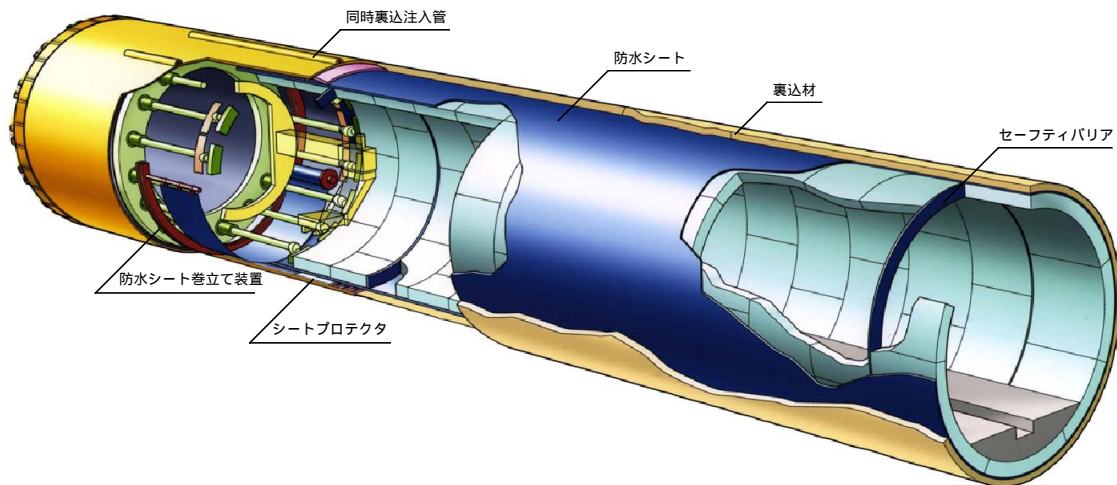


図 - 1 ラッピングシールド工法概要図

\* 技術研究所

「防水シート巻立て装置」  
シールド機内で防水シートを巻立てる装置であり、「旋  
回リング」「巻立てアーム」「防水シートロール受け」  
「自走式溶着機走行ガイド」から構成される。

「シートプロテクタ」  
巻立てた防水シートが曲線施工時にテールプレートと  
擦れ合って破損することを防止する緩衝材。

「セーフティバリア」  
防水シート破損時に漏水区間を限定し止水材の注入に  
よる補修を容易にするための隔壁となるシート。

「グラウト注入方法」  
重要構造物との近接施工で地盤強化を行う場合に、防  
水シートの止水性を損なわずに坑内からの注入を可能  
にする方法。

2.1 工法の特長  
ラッピングシールド工法には以下の特長がある。

完全な漏水防止  
2mm以上の厚みを持った防水シートをセグメント全  
体に巻立てるため、シールドトンネル内への漏水を完  
全に防止する。

止水性能を回復  
防水シートが破損した場合でも、セーフティバリアに  
よって漏水区間が限定されるので、止水材を注入す  
ることにより完全にかつ容易に止水性能を回復するこ  
とが可能である。

環境保全  
完全止水が実現できるため、漏水による地下水の変動  
や地盤沈下など、環境に対する影響を与えない。

工期短縮  
完全止水が実現できるため、二次覆工の省略が可能で  
あり、大幅な工期短縮が実現できる。

トータルコストダウン  
工事費のコストダウンはもとより供用中の排水処理な  
どのランニングコストを削減する。さらに、構造物や  
施設の劣化も抑制し、ライフサイクルコストの低減が  
可能である。

2.2 開発経緯  
ラッピングシールド工法は'93年に 3,250mm 巻立て

実験機による防水シート巻立て実験、およびシートプロ  
テクタ性能確認実験を行い、施工方法の検証とシールド  
機テール部で防水シートが破損しないことを確認した<sup>1)</sup>。  
'94年にはセーフティバリア、およびグラウト注入方法を  
開発し、工法の基幹部分の開発を終えている<sup>2)</sup>。また、  
'96年には施工現場における水やグリス等の飛散物の影響  
を想定した溶着性能確認実験を行った。

本年度は、今までの課題であった施工サイクルタイム  
の短縮を目指し、シールド掘進と防水シートの巻立てを  
同時に行う『掘進・巻立て同時施工』技術を開発した。ま  
た、「セーフティバリア押付実験」によってほぞ付きセグ  
メントに適応可能なセーフティバリアの材質・形状を検  
討した。さらに巻立てられた防水シート内でのセグメン  
ト組立性能の確認を目的に「セグメント組立実験」を行  
った。

3. 「掘進・巻立て同時施工」の開発  
従来のラッピングシールド工法の施工サイクルは、[シ  
ールド掘進] [防水シート巻立て] [セグメント組立]の3つ  
の繰り返し作業で構成されていた。ラッピングシールド工  
法は完全止水により二次覆工の省略を可能にするが、一  
般的なシールド工法の一次覆工と比較すると[防水シート  
巻立て]に必要な時間だけサイクルタイムが伸びること  
になる。この課題の解決のために  
[シールド掘進]と[防水シート巻立て]を同時に施工する  
『掘進・巻立て同時施工』を開発し、一般的なシールド工  
法と同等な施工サイクルタイムを実現した。

3.1 掘進・巻立て同時施工の原理  
ラッピングシールド工法ではシールドジャッキとスキ  
ンプレートの間に新設の防水シートを巻立てて、自走式  
溶着機で既設の防水シートと溶着接合する。シールド掘  
進中に防水シートを巻立てるには、掘進を開始する時点  
(シールドジャッキが縮限状態)で新設の防水シートが巻  
立て可能でなければならない。(図-2参照)したがっ  
て、シールドジャッキのロッドは通常よりもセグメント  
幅相当分だけ長く、かつ自走式溶着機が走行可能な空間  
をスキンプレートとロッド間に確保したものでなければ  
ならない。

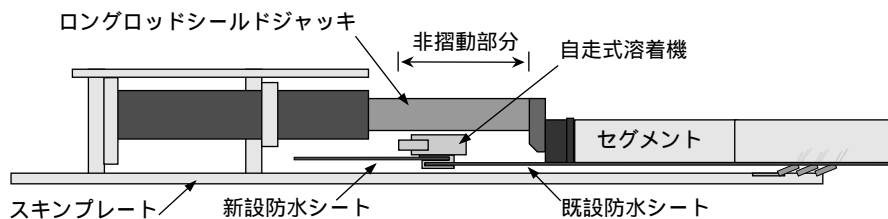


図-2 ロングロッドシールドジャッキ

3.2 施工手順

「ロングロッドシールドジャッキ」を用いた掘進・巻立て同時施工のラッピングシールド工法における施工手順を以下に示す。(図-3参照)

シールド掘進を開始しロール受けに取り付けた防水シートの端部を巻立てアームにクリップする。

旋回リングを回転し、テールプレートとシールドジャッキの間に防水シートを巻立てる。

自走式溶着機を使用して円周方向を溶着し、エアーチェックを行う。

手動式溶着機を使用して軸方向を溶着し、バキュームチェックを行い防水シートの巻立てを終了する。

掘進終了後、セグメントを組み立てる。

3.3 防水シートの巻立て時間

防水シートの巻立て時間は表-1から算出される。表-2は防水シートの巻立て時間とシールド機の掘進時間、および余裕時間(掘進時間-巻立て時間)を示している。

防水シートの巻立てはシールド機の掘進時間内に終了し、掘進・巻立て同時施工が十分に可能である。

3.4 シールド機の試設計

セグメント外径 6,150mm におけるラッピングシールド機(掘進・巻立て同時施工タイプ)の試設計を行った。ラッピングシールド工法は手掘式・泥土圧式・泥水式等のすべての掘削方式に適応可能であるが、今回は泥水式とした。図-4にその検討図を示す。

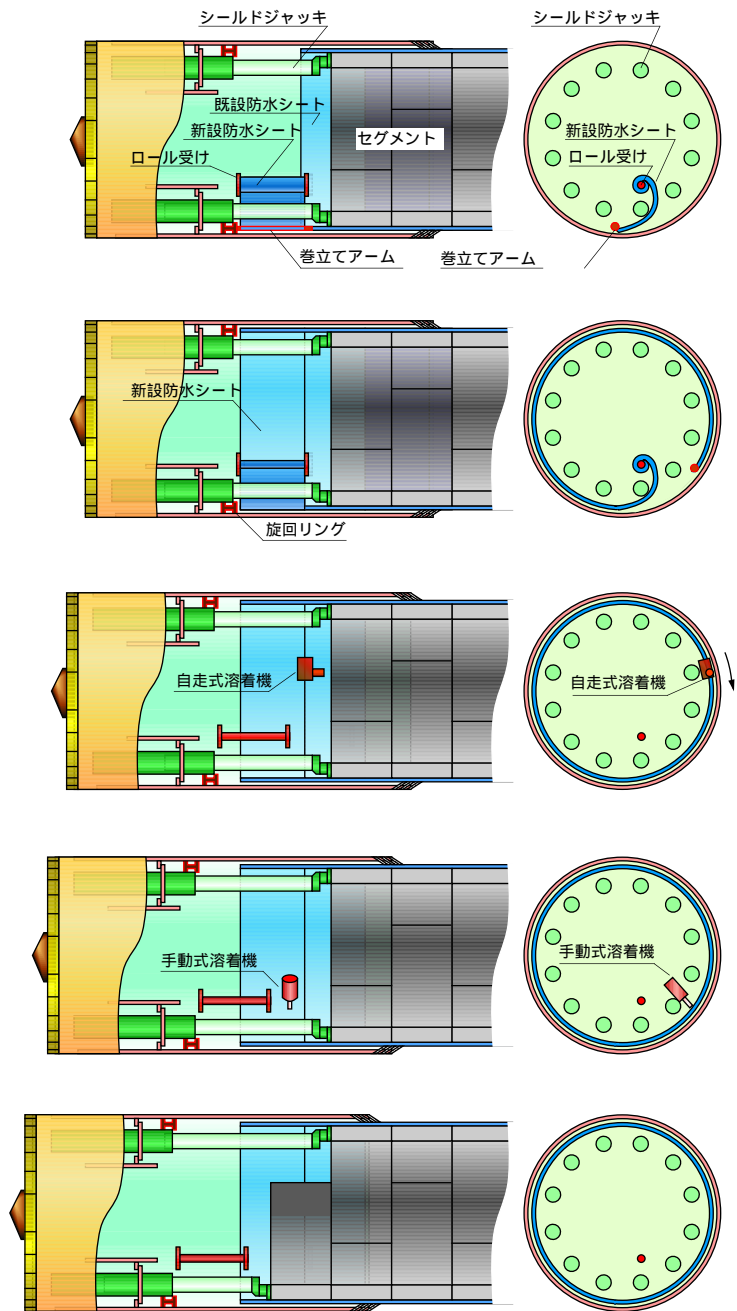


図-3 施工手順

表-1 防水シート巻立て時間算出表

防水シート巻立て (巻立てアームの回転)	$L / V_1 + t_1 = M_1 \text{ min}$
円周方向の溶着	$L / V_2 + t_2 = M_2 \text{ min}$
円周方向溶着部のエアーチェック	$t_2 = 2.0 \text{ min}$
軸方向の溶着	$B / V_3 + t_3 = M_3 \text{ min}$
円周方向ラップ部面取り・溶着	$t_2 = 5.0 \text{ min}$
軸方向溶着部のバキュームチェック	$t_3 = 3.0 \text{ min}$
合計	$M = M_1 + M_2 + 2.0 + M_3 + 5.0 + 3.0 \text{ min}$

凡例  
M:防水シート巻立て時間 (min)  
L:セグメント外周長 (m)  
B:セグメント幅 (m)  
V<sub>1</sub>:巻立て速度 20.0(m/min)  
V<sub>2</sub>:円周方向溶着速度 1.0(m/min)  
V<sub>3</sub>:軸方向溶着速度 0.5(m/min)  
t<sub>1</sub> t<sub>2</sub> t<sub>3</sub>:余裕時間 各1.0(min)

表-2 防水シート巻立て時間算出結果

セグメント外径 (mm)	セグメント幅 (mm)	掘進速度 (mm/min)	巻立て時間 (min)	掘進時間 (min)	余裕時間 (掘進時間 - 巻立て時間) (min)
3,550	1,000	30	26	33	7
3,800	1,000	30	26	33	7
4,050	1,000	30	27	33	6
4,300	1,000	30	28	33	5
4,550	1,000	30	29	33	4
4,800	1,000	30	29	33	4
5,100	1,200	30	31	40	9
5,400	1,200	30	32	40	8
5,700	1,200	30	33	40	7
6,000	1,200	30	33	40	7
6,600	1,200	25	35	48	13
6,950	1,200	25	36	48	12
7,400	1,200	25	38	48	10
8,050	1,200	25	40	48	8
8,300	1,200	25	40	48	8
9,600	1,200	25	44	48	4
9,800	1,200	25	45	48	3

1) 主要設備

「防水シート巻立て装置」、「シートプロテクタ」等の専用設備を有し、掘進・巻立て同時施工のための「ロングロッドシールドジャッキ」を装備する。

なお、防水シートがセグメントの外周全体を覆っているため同時裏込注入管、テールシール充填材供給管は必須となる。

2) シールド機長

ロングロッドシールドジャッキを使用するためシールド機長はセグメント幅相当分長くなる。但しKセグメン

トが軸挿入タイプの場合は防水シートの巻立てスペースとKセグメントの挿入スペースが重複するためその限りではない。ラッピングシールド機の機長はそれぞれ次式で表される。

半径方向挿入形式Kセグメント

$$RL = NL + Ws \quad (1)$$

軸方向挿入形式Kセグメント

$$RL = NL + Ws - K1 \quad (2)$$

ここに、

RL : ラッピングシールド機長

NL : 通常のシールド機長

Ws : セグメント幅

K1 : Kセグメント挿入代

3) シールド外径

ラッピングシールド機のスキンプレート内面には、防水シートの保護を目的とした超高分子量ポリエチレンのシートプロテクタを取り付けており、その厚さ分だけシールド機外径は増加する。また、防水シートの接合部分の厚さも考慮するとシールド機外径は以下となる。

$$RD = ND + (Pt + St \times 2) \times 2 \quad (3)$$

ここに、

RD : ラッピングシールド機外径

ND : 通常のシールド機外径

Pt : シートプロテクタ厚さ

St : 防水シート厚さ

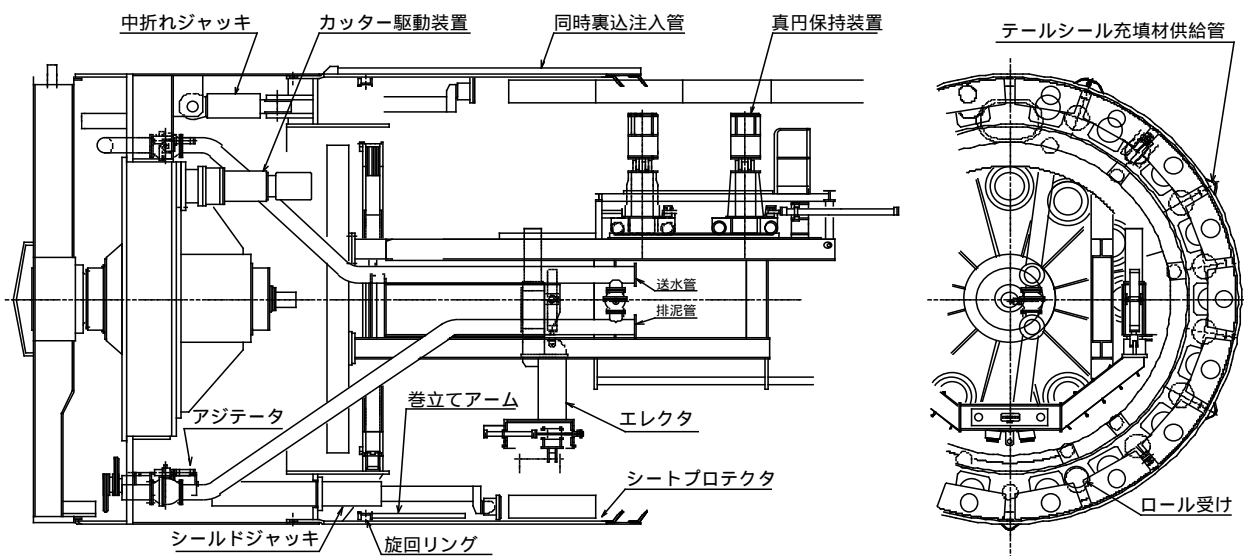


図-4 ラッピングシールド機検討図



#### 4. セーフティバリア押付実験

セーフティバリアは、約30m毎のセグメント間に挟み込み、防水シートの一部が破れた場合に漏水の拡散を防ぎ、止水材注入による補修を容易にするためのものである。

セーフティバリアは写真 - 1 のように押出式溶着機によって防水シートと溶着し、セグメント組立後にはセグメント間に挟まれてシールド掘進推力を受ける。従来のRCセグメント・スチールセグメントは継手面が平坦であるが、ほぞ付きセグメントの場合はリング間継手面に凸凹ほぞの嵌合わせ構造を有するためバリア材の損傷、溶着部の剥離等が危惧される。そこで、セーフティバリアの材質と形状の選定、および溶着方法の確認を目的として、外径 5,300mm ほぞ付きセグメントのリング間にセーフティバリアを施し、この外径クラスのシールド機が装備する最大推力で押し付ける実験を行った。

##### 4.1 実験材料

実験に用いるセーフティバリア材は強度・柔軟性を考慮して選定した。柔らかい材料として、EVA(エチレン酢酸ビニル共重合体・厚さ0.8mm、1.0mm) 硬い材料としてCHD(ポリエチレン系・厚さ1.5mm)の3種類を用いた。CHDはポリエチレンの一種であり、適度な溶着性と強度を有した材料である。

ほぞ付きセグメント(インターレア材を含む)に適したバリア材の形状としては、ほぞ継手部の形状に合った型抜き型も考えられたが今回の実験では特に形状の加工を施していない平板型を用いた。

なお、セーフティバリア材を溶着する防水シートにはCHD(厚さ2.0mm)を用いた。

##### 4.2 実験方法

実験フローを図 - 5 に示す。

セーフティバリアの溶着(写真 - 1 参照)

シールド機テール部のスキンプレート内面を模した架台上で行い、セグメントとスキンプレート間にはテールクリアランスに相当する間隙を設けた。溶着には押出式溶着機を用いた。

スパークチェック(写真 - 2 参照)

セーフティバリアの溶着性を確認するためのものであ

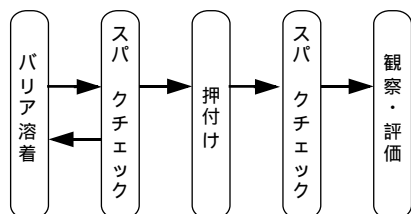


図 - 5 セーフティバリア押付実験フロー



写真 - 1 セーフティバリア溶着状況



写真 - 2 スパークチェック状況

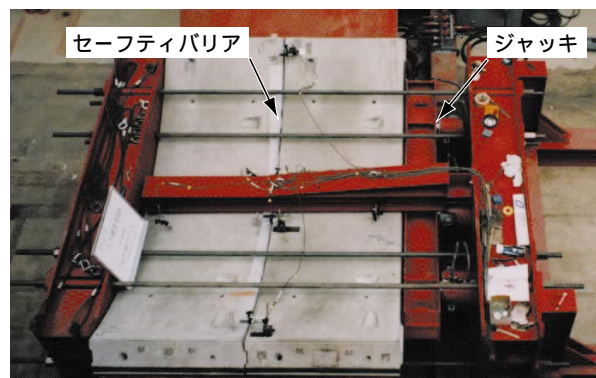


写真 - 3 セーフティバリア押付状況

り、溶着部を介したセグメントとチェッカー間に15,000Vの高電圧を加えたときの通電の有無により溶着部のピンホールを発見することができる検査方法である。押付前、押付後にそれぞれ行った。押付前に溶着不良個所が発見された場合は再溶着を行った。

押付け(写真 - 3 参照)

押付側セグメントを組み込み、推力4,413Nで押し付けた。

観察・評価

押付け後のバリア材・溶着部の状態を目視によって観察評価した。

4.3 実験結果

実験結果を表 - 3 に示す。

1) 溶着

EVA(厚さ0.8mm)、EVA(厚さ1.0mm)は材料が柔らかく薄いため押出式溶着機の押付と熱によってしわが発生し、穴あき箇所もあったが、CHD(厚さ1.5mm)にはしわや穴あき箇所が発生せず良好な結果を得た。

2) バックスペーサ

セーフティバリア溶着時には防水シート背面とスキンプレートの間クリアランスがあるために、防水シート背面をサポートするスペーサ(以後バックスペーサと称す)が必要である。今回、押出式溶着機とともに移動する手持型スペーサと予めクリアランス部全体に挿入しておく固定型スペーサを用いた。

溶着直後のバリア材と防水シートは余熱により柔らかい状態となっている。手持型スペーサを使用した場合はスペーサを移動すると防水シートが変形する結果となった。固定型スペーサを使用した場合は安定した溶着ができ、また溶着部も高品質なものが得られた。

3) 押付け

EVA(厚さ1.0mm)、CHD(厚さ1.5mm)の押付けは、いずれも損傷や溶着箇所の剥離は確認されずほぞへの追従性も良好な結果を得た。なおEVA(厚さ0.8mm)は表 - 3 に示すとおり溶着不良となったため、押付けは行わなかった。

4) バリア材の形状

今回用いた平板型で良好な結果を得た。

5) 総合評価

1) ~ 4) からセーフティバリア材にはCHD(厚さ1.5mm)平板型を選定した。また、ラッピングシールド工法にほぞ付きセグメントも適用可能であることも確かめられ、ゆえにパーカス工法の確立がなされた。(「ほぞ付きセグメント」と「ラッピングシールド工法」を合併して、平滑な内面を持つ完全止水の二次覆工省略型シールドトンネルを構築する工法を「パーカス工法」(Perfect Cut-off Single-Shell Shield method)と称している。) また、バックスペーサに固定型を用いることにより施工性が向上することも確かめられた。

表 - 3 セーフティバリア押付実験結果

項目		実験番号			
		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
材 料 ・ 条 件	材質	EVA(エチレン酢酸ビニル共重合体)		CHD(ポリエチレン系)	
	厚さ	0.8(mm)	1.0(mm)	1.5(mm)	1.5(mm)
	形状	平板型	同左	同左	同左
	融解温度	200( )	同左	同左	同左
	熱風温度	100( )	同左	160( )	同左
溶 着 の バ ッ ク ス ペ ー サ	材料	材料が薄く柔らかいため施工困難である。		材料の厚さ硬さは施工上、十分である。	
	溶着速度	計測不可能	43.0(cm/min)	39.6(cm/min)	62.5(cm/min)
	バックスペーサ	手持型	同左	同左	固定型
施 工 性	溶着状況	材料の柔らかさと熱による膨張によりバリア材にしわが発生し円滑な施工ができない		材料が硬いため、しわの発生はない。	
		溶着完了部が冷えて固まる前にスペーサを移動すると防水シートが変形した。			固定型のスペーサにより施工性が向上。
溶 着 結 果	溶着部の状態	バリア材のしわと、防水シートの伸び等で溶着部の肉厚等にばらつきが生じ、穴あき箇所も発生した。		防水シートの伸びで溶着部の肉厚等にばらつきが生じ、穴あき箇所も発生した。	伸び、しわを生じる事なく施工できた。
	スパークテスト	不良	不良(修正)	同左	良好
	溶着部強度	-	-	-	102~145N/cm
溶 着 判 定		×	×	×	
押 付 け 結 果	押付推力	-	4413(N)	4413(N)	4413(N)
	溶着部の状態	-	変化なし	同左	同左
	ほぞへの追従性	-	良好	同左	同左
	バリア材の状態	-	変形なし	同左	同左
	防水シート背面	-	伸び、膨れ等あり	同左	伸び、膨れ等なし
押 付 判 定		-			
総 合 判 定		×	×	×	

5. セグメント組立実験

「セグメント組立実験」により、巻立てた防水シート内でのセグメントの組立性能を確認した。

5.1 実験方法

セグメント組立実験は、5,300mmのほぞ付きセグメントと材質CHD 厚さ2.0mmの防水シートを用い、防水シートの巻立ておよびセグメント組立を2リング行った。図-6に実験フローを示す。

ラッピングシールド工法における防水シートがテール部に破損しないためには、防水シートをセグメントにぴったりと巻立て、ゆるみ・たるみがないことが必要である。したがって、防水シートはセグメント外周長よりもやや短く巻立てる。今回の実験では防水シートの巻立て周長をトンネル標準方書 [シールド編] における {セグメント外径許容寸法差 (30mm)<sup>3)</sup>} × 2 で設定した。この値は防水シートの伸び率に換算すると0.4%であり十分に防水シートの弾性範囲 (4.0%) 内にある。

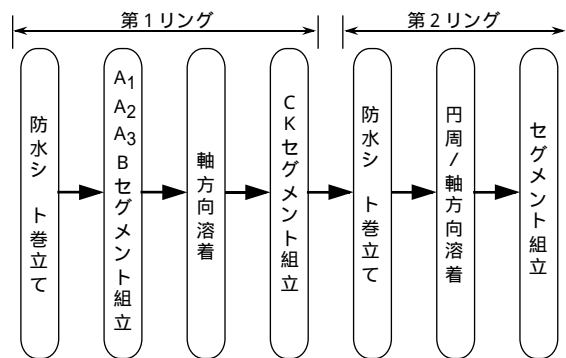


図-6 セグメント組立実験フロー

5.2 実験結果

セグメントの組立はKセグメントの挿入も含めスムーズに行うことができ、防水シートのめくれ等も発生せず、良好な結果を得た。(写真-4~7参照)

また、組立後の状況からしてラッピングシールド工法のエレクタには特別な性能アップは必要ないことが判った。

6. まとめ

本年度の開発結果を以下に示す。  
掘進・巻立て同時施工の開発によって、ラッピングシールド工法のサイクルタイムが従来のシールド工法と同等になる技術が確立した。  
ラッピングシールド工法がほぞ付きセグメントにも適用可能であることを確認し、パークス工法の技術が確立した。



写真-4 セグメント組立状況

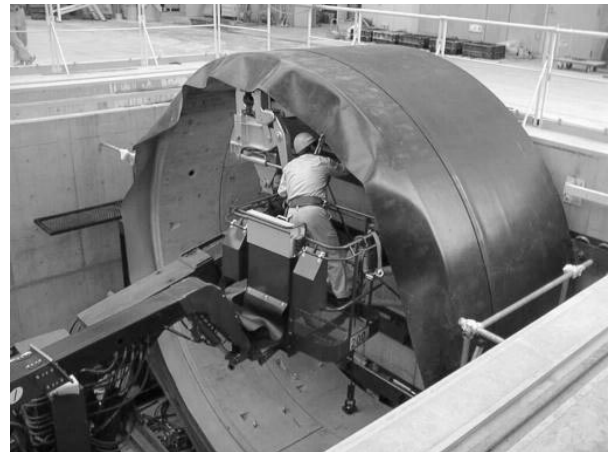


写真-5 Kセグメント挿入状況



写真-6 Kセグメント挿入状況





写真 - 7 組立完成

防水シート内でのセグメント組立に支障がないことを確認した。

#### 7. あとがき

大深度地下の有効利用の方向性としては、鉄道、道路、河川、電気、ガス、通信、水道等の公益性の高い事業が適用事業として挙げられており、現行では深さ 100 m 程度までは施工が可能であると言われている。

そのような社会的要請の中、開発されたのが『ラッピングシールド工法』である。大深度・高水圧下はもとより、海底あるいは臨海部におけるセグメントの腐食という問題をも解決に導く有力な工法であると確信している。

#### 参考文献

- 1) 原修一・飯尾正史：ラッピングシールド工法の開発、五洋建設技術研究所年報、Vol.24、pp.155 ~ 160、1994
- 2) 飯尾正史・原修一：ラッピングシールド工法の止水性向上技術の開発、五洋建設技術研究所年報、Vol.25、pp.69 ~ 72、1995
- 3) 土木学会：トンネル標準示方書、シールド工法編同解説、102p.、1996