

15. シールド二次覆工簡素化工法（パーマライニング）の開発

Development of Streamlined Secondary Lining Method "Perma-Lining" for Shield Tunneling

村上 譲二*

要 旨

最近のシールド工事では、コスト縮減や工期短縮のために二次覆工を省略する傾向がある。しかし、下水道管渠のシールド工事では特に防食を考慮することが必要であり、省略化ではなくその簡素化が求められている。

今回、管渠更新技術の一つである耐久性の高い部材を管内面に成形する形成工法を応用して、薄肉で耐久性の高いFRP材料をセグメント内面にライニングするシールド二次覆工簡素化工法「パーマライニング」を開発した。開発にあたって、ライニング材の要素試験、および施工性、内面の仕上がり精度を確認するため実証実験を行ったところ、いずれも良好な結果が得られた。

キーワード：シールド／二次覆工／ライニング／簡素化

1. はじめに

昭和40年以降急速な発展を遂げたシールド工法は、都市整備に伴う地下鉄建設、上下水道管路工事、電力・通信管路工事等、都市地下空間におけるトンネル構築技術として多く採用されている。しかし、他のトンネル工法と比べて工事費の高いことから、経済性の高い工法の開発が望まれていた。また、1997年に政府から発表された「公共工事コスト縮減対策に関する行動指針」の「シールド、推進に関する内容」の中で、シールドの長距離化とともに、二次覆工の省略、簡略化が取り上げられ大きくクローズアップされてきている。

電力や地下鉄あるいは地下河川等のシールドトンネルでは、既に従来の二次覆工を省略し、トンネルの使用目的を満たす機能的な一次覆工セグメントを用いる工法が採用されつつある。

一方、下水道シールド管渠の場合、勾配の確保や、防食・防錆、流入異物による損傷からの保護といった目的から、現在のところ、コンクリート打設による二次覆工が必ず施工されている。しかし、この場合でも、シールド工事の合理化・効率化が期待され、二次覆工の簡略化技術の開発が強く求められてきた。

このような状況をふまえ、耐久性と耐蝕性に優れ、効率よく合理的にシールド二次覆工を簡素化することのできる工法「パーマライニング」の開発に着手した。以下、このパーマライニングの概要と特長、および実証実験の結果について報告する。

2. 工法概要

本工法は、主として下水道管渠用の小口径シールド工事を対象として、耐久性に優れたFRP管（ガラス繊維強化樹脂管）を現場で成形する方式の全く新しいシールド二次覆工簡素化工法である。具体的には、一次覆工が完了したトンネル内に未硬化のFRP材料を引き込み、空気と蒸気とによりライニング材を拡張・加熱硬化させて、セグメントの内面にFRP管を形成する二次覆工工法である。一次覆工材としては、内面が平滑なRCセグメントを対象としている。以下、その構造および施工方法について述べる。

2.1 構造

(1) ライニング材

図-1にライニング施工後のシールド管渠構造を示す。

ライニング材の基本構造は、管内面から①ポリエステル内面被膜、②ガラス繊維織物、③ポリエステル不織布、④ガラス繊維織物、⑤外面被膜の5層構造となっている。これらの繊維材料には硬化性樹脂として不飽和ポリエステル樹脂を含浸させており、樹脂が硬化すると耐久性の高いFRPとなる。

各層の機能は以下のとおりである。

ポリエステル内面被膜には、管渠内面の耐食性の向上と平滑性を確保する機能を持たせるとともに、被膜に気密性を持たせ圧縮空気での拡張をさせるエアバックの機能も持たせている。

中層部のガラス繊維織物、ポリエステル不織布、ガラス繊維織物の3層をサンドイッチ構造とすることで、ガ

*土木構造研究室

ラス繊維の縁強度により高強度が確保できる構造としている。ここに使用されるガラス繊維は耐酸性のあるECRガラスであり、その不織布は硬化性樹脂の含浸性が良く硬化後も厚みの減少が少ないものである。

外面被膜は、坑内に未硬化のライニング材を引き込む工程時に摩擦抵抗を低減させライニング材の破損を防止する機能および拡張時に外径を保持する機能を受け持っている。

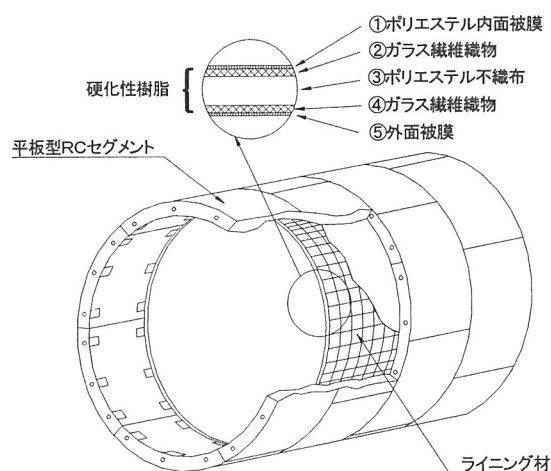


図-1 ライニング後のシールド管渠構造図

(2) 逆止弁

地震や不等沈下等の外力によりセグメントの接続部から地下水が侵入した場合、この外水圧に樹脂ライニング材だけで対抗させようとすると、経済性、施工性の悪い材厚の大きいライニング材とする必要がある。

そのため、ライニング材のバックリングを防ぐ目的から、外水を内側に逃がす機構を取り付けている。この機構は、一定の外水圧が働けば地下水を管内に排出するが、内側からは下水が外に漏出しな逆止弁機構となっている（図-2参照）。

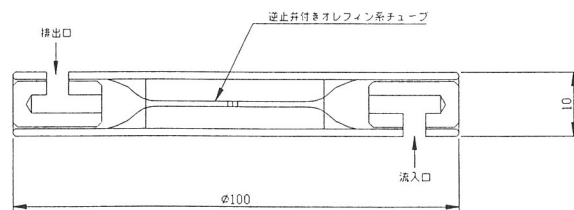


図-2 逆止弁機構図

2.2 施工方法

本工法の施工方法を以下に述べる。

- ①まず、発進立坑から硬化性樹脂を含浸させたライニング材を搬入し、ウインチを用いて坑内の所定の位置に引き込み設置する。概略を図-3の①に示す。
- ②設置したライニング材の両端部に金具を取り付けたのち、圧縮空気を送ってライニング材を拡張させ、セグメントに密着させる。次に、圧縮空気を蒸気に換えてライニング材を硬化させる（図-3の②参照）。
- ③10cm程度離し目地部として、次のスパンを施工し、上記①、②の工程を繰り返す。
- ④最後に、目地と管口を樹脂モルタルで仕上げ、硬化したFRPライニングに一定間隔ごとに穴を開け、逆止弁を取り付ける。

2.3 工法の特長

本工法は、前述した構造および施工方法により、以下の特長を有するものである。

① 耐久性に優れた仕上がり面

ポリエステル樹脂を主体とするライニング構造であるため耐久性に優れており、汚水から発生する硫化水素等による管渠の劣化や腐食を防ぐことができる。

② 二次覆工の工期を1/3に短縮可能

1回の施工長さが50m～80mと長距離であり、1サイクルの施工が一昼夜と短時間でできるため、従来工法に

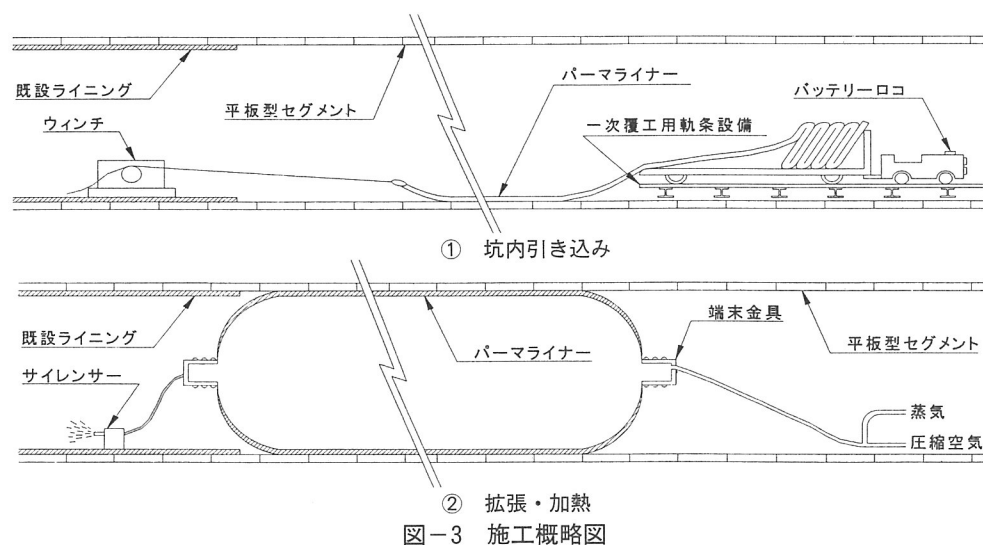


図-3 施工概略図

比べ大幅な工期短縮が図れる。

③ シールド外径の縮小が可能

ライニング材の粗度係数が $n = 0.010$ 以下とコンクリートに比べ流下性能に優れていること、ライニング厚さが約12mmと薄くセグメントに密着しているために充填材が不必要なことから、掘削外径を従来工法より大幅に縮小することができる。例えば、仕上がり内径 $\phi 1650\text{mm}$ の管渠で比較すると、掘削外径を580mm縮小することができ、掘削土量を約40%減らすことができる。

3. 実験概要

前述した本工法の性能を確認するため、ライニング材の要素実験および模擬的な施工実験を実施した。

以下に実験の概要と実験結果について述べる。

3.1 ライニング材の要素実験

a) 耐薬品性確認実験

使用するポリエステル内面被膜材の耐薬品性能を確認するために、以下の試験を行った。

試験方法は、被膜材を40℃の各溶液に浸漬させ、30日後の引張り強さの保持率で測定する方法を採用した。この試験はASTM-F1216に準拠したものであり、保持率は80%以上という規定となっている。表-1に試験結果を示す。いずれの溶液に対しても85%以上の保持率があり、耐薬品性について優れていることが確認できた。

表-1 引っ張り強さ保持率

浸漬液	保持率 (%)
ガソリン	93
軽油	93
メタノール	92
水	94
10% 磷酸	92
塩化ナトリウム飽和液	92
30% 硫酸	91
5% 水酸化ナトリウム溶液	85

b) 耐摩耗性確認試験

内面被膜材の耐摩耗性能を確認するための試験を行った。

試験方法はJISK7204（摩耗輪によるプラスチックの摩耗試験方法）に基づき、試験前と試験後に測定した試料の重量変化から摩耗深さを推定した。

摩耗試験の状況を写真-1に示す。

試験条件： 摩耗輪 GC150H（JISR6210）

試験回数 1000回

荷重 1000g

回転速度 60rpm

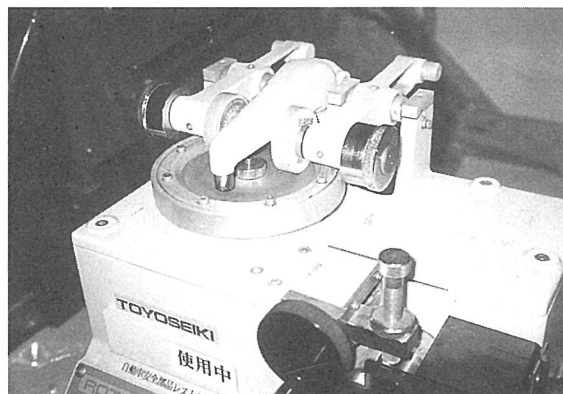


写真-1 摩耗試験状況

表-2に試験結果を示す。ポリエステル内面被膜の摩耗による供試体の重量減少はコンクリートの約1/6、摩耗深さは約1/3であり、耐摩耗性について優れていることが確認できた。

表-2 摩耗輪による摩耗量

試料	重量変化 (mg)	摩耗深さ (mm)
ポリエステル内面被膜	140	0.04
コンクリート板	900	0.127

c) 曲げ物性確認試験

ライニング材の曲げ強さを確認するための試験を行った。平面成形枠に25cm×45cmに切断した試料を入れ、一定量の硬化性樹脂を含浸させたのち、プレス圧50MPa、温度81～84℃の下で2時間置いて硬化させ、さらに常温で4時間放置したのちに取り出し、JISK7055に準じて幅15mm、長さ120mm以上の短冊状の試験片を作成し、曲げ試験機で測定した。

写真-2に試験状況を、表-3に試験結果を示す。

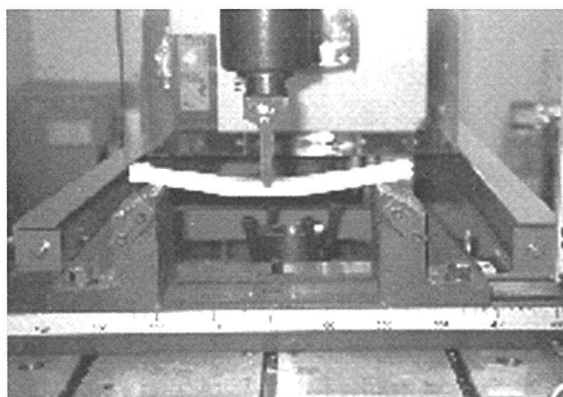


写真-2 曲げ物性試験状況

表-3 曲げ物性値

試 料	厚 み (mm)	曲げ強さ (N/mm ²)	曲げ弾性率 (N/mm ²)
①	5.2	164.7	13,357
②	5.3	177.3	10,659
③	5.3	175.8	12,619
平 均	5.3	172.6	12,210
参 考	塩化ビニール樹脂		3,000

ライニング材は、塩化ビニール樹脂に比べ、約4倍の曲げ弾性率を有することが確認できた。

d) 外水圧試験（座屈圧力試験）

厚み12mm、口径1200mmに縫製したライニング材料を内径1200mmの鋼管内で装着硬化させたのち、鋼管とライニング間に1.5mm程度の隙間をあげその端部を樹脂モルタルで止水処理し、水注入口から水圧をかけ、ライニング管がバックリング状態（座屈）になった時点における外水圧力を測定した。図-4に試験の概略を示す。

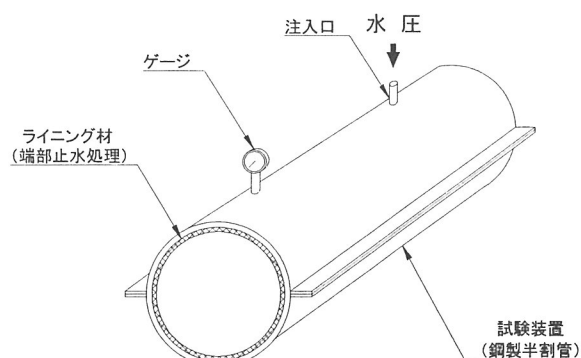


図-4 外水圧試験概略

試験の結果、バックリングが発生した時点における外水圧力は0.078MPaであった。これは、後述の外水圧逃がし機構が作動を開始する外水圧0.003MPaの約25倍の圧力であり、ライニング材が十分な強度を有することが確認できた。

なお、この実測値は、あらかじめ測定した曲げ物性値からチェモシェンコの円管の座屈公式にて求めた理論値の13倍であった。これは、ライニング管が一次覆工のセグメントを模した鋼管に支持されることにより、支持を考慮しない理論上の座屈圧力より向上したことを示している。チェモシェンコの円管の座屈公式を以下に示す。

$$P = \frac{E \cdot t^3}{4(1 - \mu^2) \cdot R^3}$$

P：座屈圧力 … N/mm²

E：曲げ弾性率 … N/mm²

μ ：ポアソン比 … 0.3

t：ライニング材の厚み … mm

R：管中心半径 … mm

e) 外水圧逃がし機構の性能確認試験

外水圧逃がし機構である逆止弁の性能確認試験結果を表-4に示す。

この試験結果から、地下水がセグメントの接続部等から侵入してライニング管に外水圧が0.003MPa以上作用した場合は管渠内に地下水を排出するが、内水圧がライニング管に0.03MPa作用しても管渠内の下水は漏出しなことが確認できた。

表-4 外水圧逃がし機構性能試験結果

特 性	圧 力	結 果
耐外水圧性	0.002MPa	外水を管内へ排出せず
	0.003MPa	外水を管内に排出した
耐内圧性	0.03MPa	漏水せず

3.2 施工実験

本工法の施工性、工程上の問題点の有無、内面仕上がり状況等を確認するため、セグメントおよび鋼管を地上で配管し、その内面をライニングする模擬的な施工実証実験を行った。実験の概要を以下に述べる。

(1) ライニング材料

考案した5層構造のライニング材を9m縫製し、硬化性樹脂を塗布したのちライニング材の両端に端末金具を取り付け、片側にエア注入口を、もう一方の端にドレーン排出口を取り付け、つづら折りにして格納した。

作製したライニング材料は以下のとおりである。

ライニング材の厚み（硬化前） … 12mm

ライニング材の重量（樹脂塗布前） … 10kg/m

硬化性樹脂 … 不飽和ポリエステル樹脂（増粘タイプ）

樹脂塗布量 … 25kg/m

総重量 … 約300kg

(2) 使用機械

今回の実験に用いた機械は以下のとおりである。

引込み用ウインチ（2.5t）1台

コンプレッサー（7.5m³/分）1台

ボイラー車（1.0t/h）1台

(3) 配管

地上で内径1200mm、長さ2mの鋼管4本と長さ90cmのRCセグメント2リングを直線状に配管し、延長9.8m

の模擬シールドトンネルとした。図-5に配管概要を示す。

本工法の一次覆工に使用するセグメントは、内面が平滑であることが条件である。通常、小口径管渠にRCセグメントを用いるとコスト高になるため、今回は、ヒューム管と同様に製作でき、低コストで供給可能な遠心力成形セグメントを使用した。

写真-3にその遠心力成形セグメントの出来型外観を示す。

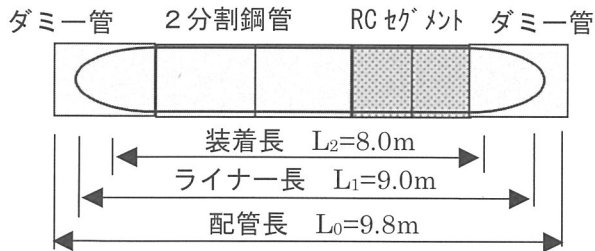


図-5 配管概要図

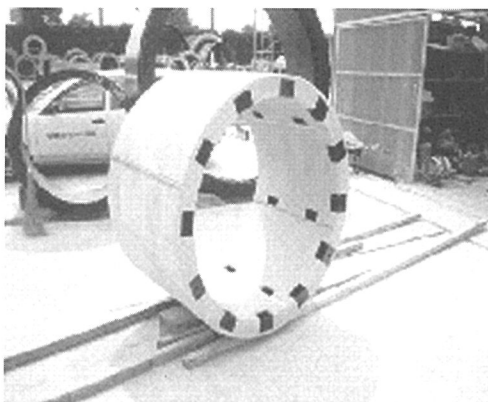


写真-3 遠心力成型セグメント外観

(4) ライニング工程

前述したライニング材料を用いて、あらかじめ配管した管内にライニング施工を行った工程を以下に記す。

①ライニング材引き込み

準備したライニング材を配管内にウインチで引き込み、所定の位置に設置した。なお引き込み荷重は最大2kNであった(写真-4)。

②加圧工程

0.04kPaの圧縮空気圧でライニング材を拡張し配管内面に密着させた(写真-5)。

③加熱工程

圧縮空気を蒸気に換えて、空気圧と同じ0.04kPaの蒸気圧力で加熱した(写真-6)。

④冷却

加熱後、蒸気を抜き、そのままの状態での冷却した。

⑤端末を切断し、逆止弁を取り付けた(写真-7)。



写真-4 ライニング材引き込み状況

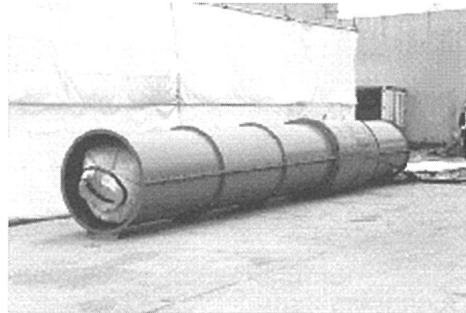


写真-5 加圧状況



写真-6 加熱状況



写真-7 逆止弁取付状況

(5) 実験結果

パーマライニングの模擬的な施工実験を行った結果、以下のことが確認できた。

①作業性及び内面仕上がり状況の確認

ライニング材の坑内引き込み時の荷重は最大2kNと小さく、他の工程も問題なく実施することができた。また、内面の仕上がりは硬化後のシワはまったくなく、高い平滑性を有していた。

の模擬シールドトンネルとした。図-5に配管概要を示す。

本工法の一次覆工に使用するセグメントは、内面が平滑であることが条件である。通常、小口径管渠にRCセグメントを用いるとコスト高になるため、今回は、ヒューム管と同様に製作でき、低コストで供給可能な遠心力成形セグメントを使用した。

写真-3にその遠心力成形セグメントの出来型外観を示す。

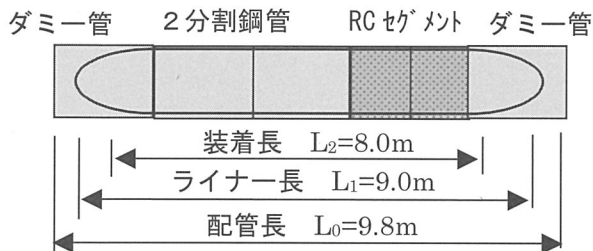


図-5 配管概要図

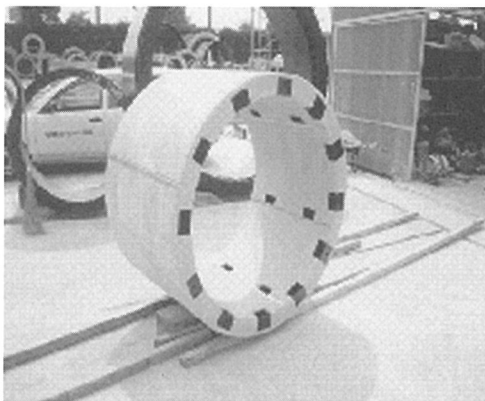


写真-3 遠心力成型セグメント外観

(4) ライニング工程

前述したライニング材料を用いて、あらかじめ配管した管内にライニング施工を行った工程を以下に記す。

①ライニング材引き込み

準備したライニング材を配管内にウインチで引き込み、所定の位置に設置した。なお引き込み荷重は最大2kNであった(写真-4)。

②加圧工程

0.04kPaの圧縮空気圧でライニング材を拡張し配管内面に密着させた(写真-5)。

③加熱工程

圧縮空気を蒸気に換えて、空気圧と同じ0.04kPaの蒸気圧力で加熱した(写真-6)。

④冷却

加熱後、蒸気を抜き、そのままの状態での冷却した。

⑤端末を切断し、逆止弁を取り付けた(写真-7)。



写真-4 ライニング材引き込み状況

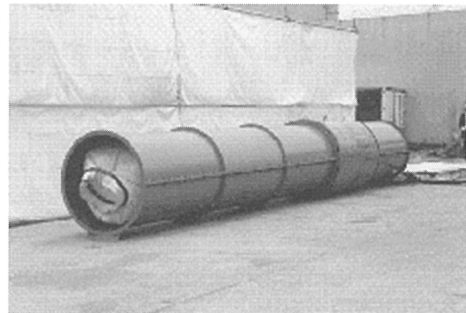


写真-5 加圧状況



写真-6 加熱状況



写真-7 逆止弁取付状況

(5) 実験結果

パーマライニングの模擬的な施工実験を行った結果、以下のことが確認できた。

①作業性及び内面仕上がり状況の確認

ライニング材の坑内引き込み時の荷重は最大2kNと小さく、他の工程も問題なく実施することができた。また、内面の仕上がりは硬化後のシワはまったくなく、高い平滑性を有していた。

②施工サイクルの確認

実験時の各工程の作業時間を以下に記す。

- ・引き込み時間 : 2分
 - ・拡張時間 : 3分
 - ・加熱硬化時間 : 約2時間
 - ・冷却時間 : 10分
 - ・端末処理時間 : 50分
 - ・逆止弁設置時間 : 10分 (3カ所/1人)
- 合 計 3時間15分

上記の結果から、実施工で予定している一回のライニングスパンを80mと設定して施工サイクルを想定すると、以下のように考えられる。

- ・引き込み時間 : 20分
 - ・拡張時間 : 30分
 - ・加熱硬化時間 : 約4時間
 - ・冷却時間 : 1時間
 - ・端末処理時間 : 50分
 - ・逆止弁設置時間 : 30分
- 合 計 7時間10分

※ウインチは同型の2.5t級で施工可能

※ボイラー車は同型を2台使用

ライニング材を立坑上から坑内まで搬入する工程を考慮しても、1スパンの施工延長80mを一昼夜で十分施工可能であると推定できる。

4. おわりに

近年、セグメントシール材の止水性能等覆工技術の向上により、一次覆工後の漏水量が少なくなってきたことから、特に経済性を考慮した薄肉樹脂ライニングを用いる二次覆工簡素化工法（パーマライニング）を開発した。

今回、小規模で模擬的ではあるが、本工法の施工実証実験を行った結果、作業工程上で特に問題となるものはみられなかった。内面の仕上がり状況は非常に良好であり、効率的に施工が行えることを確認した。

今後、実際のシールド工事における作業環境を配慮した施工面での詳細な検討を行い、実施工に向けての展開を目指し、さらに研究開発を進めていくつもりである。

なお、本工法は(株)鴻池組、芦森エンジニアリング(株)、芦森工業(株)と共同で開発したものである。