

# 下水道シールドの内面被覆工法 に関する研究

## 1. 研究の目的

下水道シールド管渠には従来から二次覆工が用いられてきたが、最近のシールド技術の進歩により二次覆工の主要な機能の一つである蛇行・勾配修正の必要性は少なくなってきた。また、硫化水素によるコンクリートの腐食に対して二次覆工では十分な防食機能を期待できないことが明らかになってきている。そのため、二次覆工に替えて、セグメント内面に薄肉の防食ライニングを施す「内面被覆工法」が注目されており、施工事例も増えつつある。この内面被覆工法の採用により、管渠の長寿命化および掘削断面の縮小化によるコスト縮減、工期の短縮等が期待できる。

本研究は、内面被覆工法を下水道シールドへ適用するための技術資料の作成を目的としており、材料の耐硫酸性等の評価方法や諸工法の実用化について、維持管理やライフサイクルコストの観点も含めた検討を行う。

## 2. 研究体制

本共同研究は、財団法人 下水道新技術推進機構と、鹿島建設株式会社、株式会社熊谷組、大成建設株式会社、鉄建建設株式会社、戸田建設株式会社および西松建設株式会社が共同で実施する。

## 3. 研究成果

### 3.1 検討方針

検討フローを図-1に示す。本年度は、内面被覆工法に必要な機能の整理とその評価方法の設定までを行った。

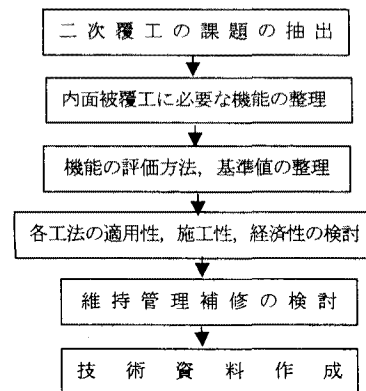


図-1 検討フロー

### 3.2 工法概要

共同研究で開発中の6工法の概要を表-1、写真-1～3および図-2に示す。

各工法は、耐硫酸性がある薄肉（厚さ20mm以下）構造物であり、シート・パネル工法と吹付け・塗布工法に大別される。また、工場で製作するもの、現場施工となるもの等、各工法で特徴があり、施工性、信頼性、コスト等条件に応じた使い分けが可能と考

えられる。

なお、耐硫酸性の目安として、各工法とも日本下水道事業団「コンクリート防食指針（平成9年6月）」（以下、「防食指針（案）」と記述する）のD種の環境条件下で満足できる性能を有している。また、RCセグメント内面に樹脂ライニングを施しセグメントと一体化する構造であり、急曲線部等に使用す

る鋼製セグメントは、コンクリートで中詰めした上で一体化させる構造とする。

参考：コンクリート防食指針 D種<sup>(1)</sup>

硫化水素の滞留が多く、かつ構造上の条件等のため補修等のメンテナンスが困難である構造物に対して適用される。硫化水素濃度が10ppm以上、コンクリートの腐食速度は5～36mm/年の環境を想定している。

表-1 各工法の概要

施工形態	工 法 名	開発会社	樹脂材料	コンクリートとの一体化の方法
シート・パネル工法	HDライニング	鹿島建設	ジシクロペンタジエン	セグメント製作工場にて樹脂パネルを型枠内に組み込み、コンクリート打設
	タフシート	鉄建建設	FRP	セグメント内面をプライマー処理し、樹脂シートを接着、紫外線により硬化
	レコパネル	西松建設	エポキシ又はFRP	成形した樹脂パネルをセグメント内に建て込み、セグメントへはボルト接合
吹付け・塗布工法	HDライニング	鹿島建設	ポリウレタン	セグメント製作工場にて、コンクリート中詰め鋼製セグメント内面をプライマー処理し、樹脂吹付け（または塗布）
	ミゼロン	熊谷組	ポリウレタン	セグメント内面をプライマー処理し、樹脂吹付け（または塗布）
	ポリウレアNNT	大成建設	ポリウレア	セグメント内面をプライマー処理し、樹脂吹付け（または塗布）
	アクリル樹脂防食被覆	戸田建設	アクリル	セグメント内面をプライマー処理し、樹脂吹付け（または塗布）

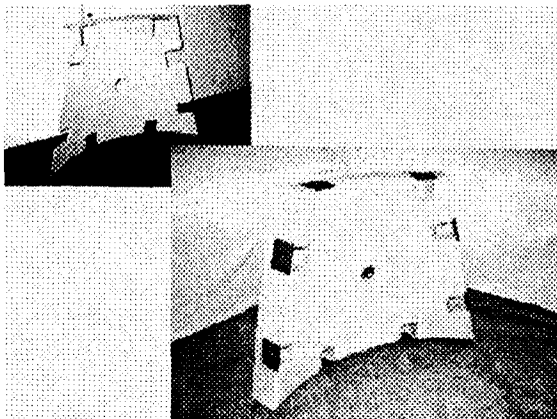


写真-1 HDライニング工法

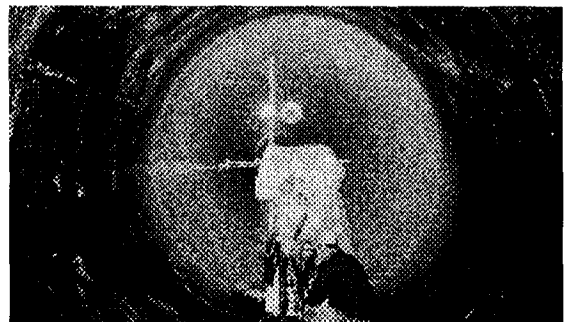


写真-3 吹付け工法

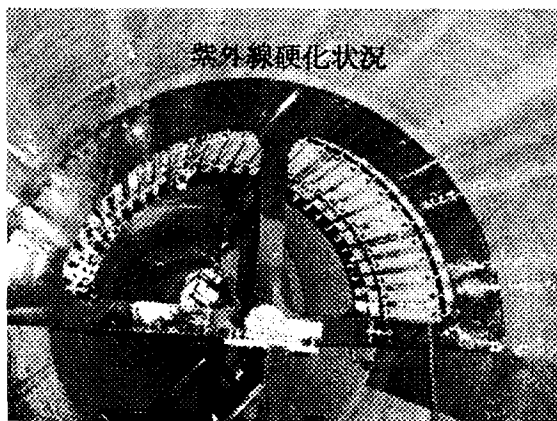


写真-2 タフシート工法

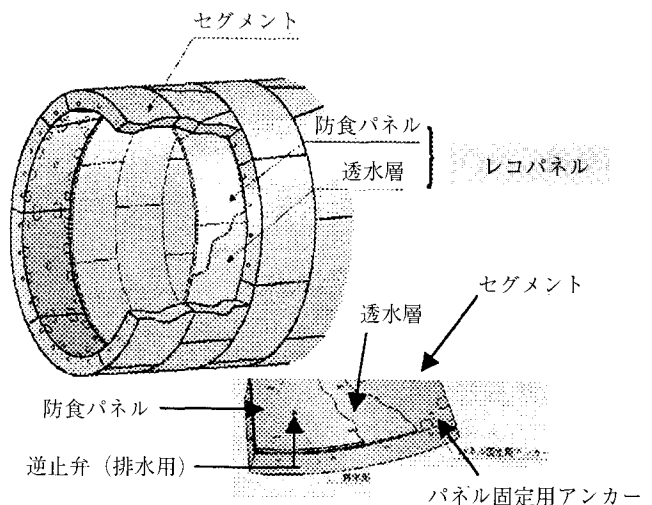


図-2 レコパネル工法

### 3.3 二次覆工の課題の抽出

従来から、シールドトンネルには二次覆工が標準的に用いられてきた。二次覆工に期待される諸機能の内、下水道シールド、特に污水管や合流管で要求される諸機能の必要性と効果について考察した結果を表-2に示す。

この表から、次のことがわかる。

- ① 硫酸に対するセグメントの防食以外は、必要性が低下しているか、他の方法で機能の確保が可能である。
- ② 二次覆工は硫酸の浸入を防止できないため、セグメントの防食に対しては完全でない。

したがって、硫酸が発生する環境下では、二次覆工に代わり内面被覆工法によりセグメントへの硫酸の浸入を遮断するか、セグメント自体の耐腐食性能を高めるように対応する必要がある。

セグメントの耐腐食性能を高めるには、防菌コンクリートの採用や、腐食代（かぶり）の増加が考えられる。防菌コンクリートはイオウ酸化細菌の増殖抑制効果があるが、硫化水素が高濃度の環境下では抑制しきれない。また、腐食代の増加のみでは対処しきれない場合も考えられる。したがって、硫化水素の滞留する厳しい腐食性環境でも適用可能な工法として、硫酸の浸入を遮断する内面被覆工法が有効と考えられる。

### 3.4 内面被覆工法に必要な機能の整理

#### 3.4.1 二次覆工としての機能

二次覆工に求められていた機能に対して、内面被覆工法においてこれをどのように満足させるのかを検討した。

蛇行・勾配修正：内面被覆工法の防食ライニングは薄肉であることから、この機能は求めない。

内面平滑性の確保：樹脂ライニングは二次覆工以上の平滑性を確保できるため、特にこの機能を規定しない。また、継手部はボルトボックス穴埋め工や内面平滑型セグメントにより内面平滑性を確保できる。

防食機能（耐硫酸性）：セグメントおよび継手金物の防食機能が必要である。

以上の検討結果から、二次覆工に求められていた機能の内、内面被覆工法に必要な機能としてセグメントおよび継手部の防食を考慮する。

#### 3.4.2 内面被覆工法に新たに必要となる機能

二次覆工の代わりに内面被覆材を採用した場合に新たに必要となる機能として、次のような機能がある。

セグメントとの一体性の確保

（セグメントとの剥離防止）

外荷重に対する耐久性の確保

（変位に対する追従性、強度）

耐摩耗性、耐衝撃性の確保

水密性の確保

その他、製作時や施工時に考慮すべき条件があれば、別途検討する必要がある。

#### 3.4.3 機能のまとめ

内面被覆工法に必要な機能を整理し、表-3に示す。シールドトンネルとしての機能を確保するためには、内面被覆材のみでなく目地材についても、この表に準じた機能を確保する必要がある。

表-2 二次覆工の諸機能と下水道における必要性

二次覆工の諸機能	必要性	効果	備考
蛇行・勾配修正	△	○	施工精度の向上により、必要性低下。
内面平滑性の確保	△	○	ボルトボックス穴埋め工、内面平滑型セグメント等でも対応可能。
防水・止水	△	△	一次覆工での対応が基本。
セグメントの防食 （硫酸環境下）	○	×	硫化水素に起因する腐食には効果なし。 ・二次覆工ではクラック等からの硫酸の浸入を防止できない。 ・セグメントのかぶりのみでは長期間にわたる十分な防食効果を見込めない。

（注）必要性、効果 ○：高い △：中位 ×：低い

表-3 内面被覆工法に必要な機能

機能	内容
耐薬品性 (耐硫酸性)	要求される状況、期間において耐硫酸性を有すること。
セグメントとの一体性	ジョイント部やセグメントのクラックからの漏水による剥離がないこと。温度変化や経時変化によって剥離しないこと。
水密性	ライニング自体が水密性を有すること。
変形性能 (変位追随性、強度)	施工時、常時および地震時の荷重によるセグメントの変形・変位によって破損しないこと。
耐摩耗性	流水、流砂に対して耐摩耗性を有すること。
耐衝撃性	漂流物等によって破損しないこと。

### 3.5 機能の評価方法

#### 3.5.1 評価方法の検討方針

各機能の評価は、次の方針で行う。

- ① 原則として、「防食指針(案)」に規定されている評価方法に準拠する。ただし、シールドとして特別な検討が必要な場合、本工法に適した方法を検討する。
- ② 独自に評価方法を設定する場合、JIS等で定められている基準から選定することを原則とする。
- ③ 内面被覆材の施工方法(工場製作、現場施工等)や材質の違い等により、工法ごとに異なる評価方法を検討する必要がある場合も考えられる。その場合でも、類似の工法に対しては同一の方法で評価できるように考慮する。

#### 3.5.2 内面被覆材

##### (1) 耐硫酸性

開発中の各工法は「防食指針(案)」に規定するD種相当の耐食性能を有している。

耐硫酸性の評価は、「10%硫酸水溶液に60日間浸漬しても、被覆にふくれ、割れ、軟化、溶出がないことを、外観の目視や、重量の変化等で確認する」ことで行っている。

一方、シールドトンネルへ内面被覆工法を適用する際には、次の理由から、より厳しい条件で評価を行う必要がある。

##### ① 対象の違い

「防食指針(案)」は下水道施設から生成する硫化水素に対するコンクリートの防食を目的として規定した指針である。通常10年に一度は調査診断が実施されることを前提としており、被覆材の耐用年数を10年としている。一方、管渠の場合、供用開始後は内部点検が実施されることはまれであり、しかも常時供用されているので補修補強も容易ではない。したがって、管渠における防食ライニングの耐用年数は、一般の構造物よりも長い期間(例えば50年)に設定するのが妥当である。なお、この場合、60日間の浸漬では、長期間にわたる安定性を把握できない可能性もある。

##### ② 耐硫酸性確認方法

防食ライニング材料を長期間(1年程度)硫酸水溶液に浸漬してEPMA(電子線マイクロアナライザー)で計測すると、ライニング内部に硫黄の浸透が認められ、その浸透度合いが防食材料によって差異のあることが明らかになっている。表面が健全であっても内部が浸食されている状況は、外観検査のみでは確実に把握できないケースも考えられるため、外観検査、重量検査に加え、EPMAによる計測を追加する必要がある。

以上の考察から、耐硫酸性試験方法を次のように設定した。

試験方法：10%硫酸水溶液に対する1年間の浸漬試験を行う。

性能評価：目視による観察の他、EPMAによる硫黄浸透深さの測定を行う。測定は浸漬後120日、240日、360日の3点で行う。

長期安定性の予測：EPMA測定結果より、拡散式による予測を行う。

検討ケース：通常の状態、摩耗を受けた状態、欠損を補修した状態および目地のある状態とす

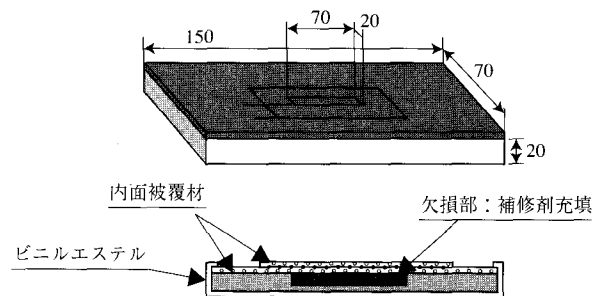


図-3 浸漬試験供試体(補修状態)

る。被覆や下地の処理は実施工と同等とする。  
 なお、目地の試験は、目地材が露出する工法  
 (HDライニング、レコパネル) に適用する。

(2) セグメントとの一体性

- ① コンクリート防食指針(案)で規定されている  
 「JIS A-6916 (仕上げ塗材用下地調整塗材/  
 付着強さ)」に準拠する。

特に、吹付け工法やシート貼付け工法では、  
 施工面(セグメント内面)が湿潤状態であると  
 供用後に剥離する懸念があるため、この試験を  
 行う必要がある。

基準値

標準状態：1.47 MPa以上  
 湿潤状態：1.18 MPa以上

- ② 継手部からの漏水に対する安全確認のためには、**下図**のような模型実験を行うのが望ましい。

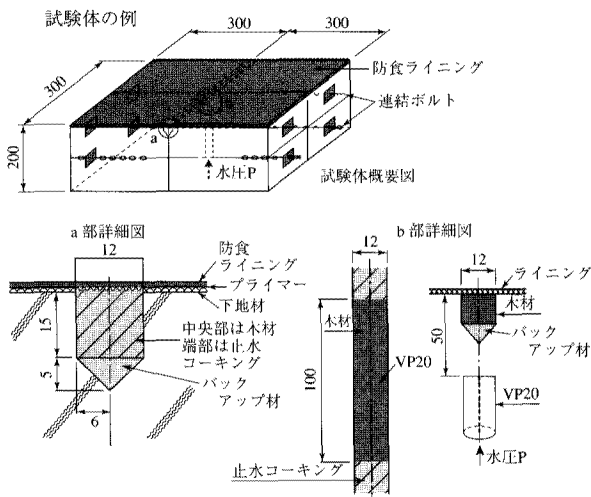


図-4 耐水圧試験の例

(3) 水密性

コンクリート防食指針(案)で規定されている「JIS  
 A-1404 (建築用セメント防水材の試験方法/透水  
 試験)」に準拠する。

基準値：水圧0.294 MPaで1時間後の透水  
 量が0.15 g 以下

(4) 変形性能

- ① 可撓性に乏しい、HDライニングは、セグメ  
 ントの単体曲げ試験を行う。単体曲げ試験の方  
 法は、日本下水道協会で規定している方法によ  
 る。

- ② 目地部の追随性が期待できる材料では、継手  
 部の目開きに追従できる性能を確認するため、  
 日本道路公団で規定しているゼロスパン引張り  
 試験を行う。

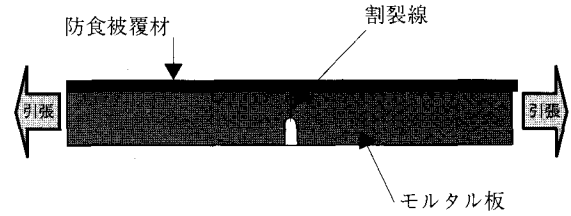


図-5 ゼロスパン引張り試験

(5) 耐摩耗性

「JIS K-7204 (摩耗輪によるプラスチックの摩  
 耗試験方法)」により、耐摩耗性の検証を行う。な  
 お、コンクリートの耐摩耗性の検査に使用される、  
 次の試験条件で行う。

摩耗輪の硬さ：CS-17  
 質量：1kg  
 回転数：1,000回転

(6) 耐衝撃性

標準的な樹脂材料の耐衝撃性試験の内から、落下  
 エネルギー(重りの重量、落下高さ)が明確であり、  
 各工法の相対的評価が可能な試験として、「JIS A-  
 6916 (仕上げ塗材用下地調整塗材/耐衝撃性試験)」  
 で行うこととした。

重りの質量：1,000g  
 落下高さ：50cm

(7) 機能評価方法のまとめ

評価方法のまとめを表-4に示す。

3.5.3 目地材

目地材については、次の機能を確認する試験方法  
 を各工法で検討中である。

(1) 目地材に必要な機能

次の機能について評価する必要がある。

- ① コンクリートとの接着性
- ② 耐水圧性
- ③ 変形性
- ④ 施工性(充填のしやすさ)

目地材が露出するHDライニング工法やレコパ  
 ネル工法では、さらに次の項目について検討する  
 必要がある。

表-4 内面被覆材の評価試験一覧

機能	評価方法	評価基準 肉厚(mm)→	シート・パネル			吹付け・塗布			
			HDライニング	タフシート	レコパネル	HDライニング	ミゼロン	アクリル樹脂	ポリウレア
			4.0	2.5	15~20	3.0	3.0	2.5	3.0
耐硫酸性	EPMA, 目視 (360日浸漬)	通常, 摩耗, 補修	実施中			実施中			
		目地				実施中	不要(目地の露出なし)		
セグメントとの一体化	JIS A-6909	標準1.47MPa 湿潤1.18MPa	独自試験	2.2 2.3	不要	2.5 実施中	2.5 2.0	2.1 2.1	2.5 2.1
水密性	JIS A-1404	透水量0.15g	0	0	計画中	0	0.02	計画中	0.04
変形性能 <sup>1)</sup>	単体曲げ試験	相対評価	実施 <sup>2)</sup>						
	ゼロスパン引張	相対評価(mm)		計画中 <sup>3)</sup>	不要	6~8	4	計画中	5
耐摩耗性	JIS K-7204	相対評価(mg)	42	実施中	35	23	40	実施中	15
耐衝撃性	JIS A-6916	相対評価(目視)	計画中	計画中	計 画 中				

注1) 変形性能の試験 各工法とも、被覆材の物性試験はJISに従って実施済み。

注2) 単体曲げ試験 HDライニング：剥離開始荷重>セグメントの破壊荷重。

注3) ゼロスパン試験 タフシート：セグメントモデルによる目地追従試験を実施。

- ⑤ 耐硫酸性
- ⑥ 耐摩耗性

- ③ 施工法の検討：各工法の詳細検討を行い、内面被覆工法に共通に必要な事項を抽出して行く。
- ④ 経済性の検討：従来工法に対するコスト縮減効果を検討する。また、ライフサイクルコスト、維持管理・補修等を考慮して検討する。
- ⑤ 技術資料作成：研究により得られた知見をまとめ、技術資料を作成する。

#### 4. 今後の検討事項

今後は内面被覆工法の実用化に向けて、次の各項目について詳細検討を進めて行く予定である。

##### ① 機能の評価

耐硫酸性：試験結果から、耐用年数等の推定を行い、補修方法やライフサイクルコスト検討の基礎資料とする。

その他の試験：目地材も含め、本書で定めた試験方法に準拠した試験を、各工法で実施して行く。

##### ② 適用性の検討：内面被覆工法の適用条件(口径、耐水圧等)、設計・積算に必要な事項を整理する。

#### ●この研究を行ったのは

研究第二部長 中里 卓治  
 研究第三部技術課長 本重 信宏  
 研究第二部研究員 曾我 誠意  
 研究第二部研究員 加藤 雅治

#### ●この研究に関するお問い合わせは

研究第二部長 中里 卓治  
 研究第三部技術課長 本重 信宏  
 研究第二部研究員 馬上 英機  
 研究第二部研究員 加藤 雅治