

FRP 防食パネル工法の開発と下水道施設への適用

ーコンクリートの防食被覆工法（シートライニング工法）ー

Development of FRP panels Corrosion Protection Method and Practical Applications

- Concrete Lining Corrosion Protection Method -

東 邦和* 石井敏之* 廣中哲也*
向 広吉** 高橋一成*** 沼田 憲****

要 旨

下水道施設のコンクリート構造物の防食性能向上のために、下水道施設での硫化水素から生成される硫酸に対して優れた耐食性を持つFRP防食パネル工法を開発した。本工法に用いるFRP防食パネルはビニルエステルを基材としてガラスロービングを収束して引抜成形法により一体成形しており、厚さ5mmで背面にL形アンカー脚を有する。本工法はシートライニング工法に位置付けられ、防食効果、経済性、施工性に優れている。品質確認試験、施工試験、実証施工を行い、工法を完成したのでその概要を報告する。本工法は独立行政法人土木研究所、(株)奥村組、福井ファイバーテック(株)の3社の共同開発であり、(財)下水道新技術推進機構の建設技術審査証明を取得している。

キーワード：FRP防食パネル工法、シートライニング工法、下水道施設、コンクリート、維持管理

1. まえがき

下水道施設の維持管理を軽減するために、コンクリート構造物の防食性能の向上が求められており、耐食性に優れた新素材を下水道施設に活用する技術が必要とされている。FRP防食パネル工法はこの要求に応える新素材による補修技術であり、下水道施設での硫化水素から生成される硫酸に対する優れた防食性能を持つ工法である。本工法はシートライニング工法¹⁾に位置付けられ、防食効果、コストかつ施工性に優れ、独立行政法人土木研究所、(株)奥村組、福井ファイバーテック(株)の3社で「下水処理施設のコンクリート補修材料に関する共同研究」²⁾の中で開発したものである。本工法は(財)下水道新技術推進機構の建設技術審査証明を取得している。

2. FRP 防食パネル工法の概要

2.1 下水道施設の劣化

下水道施設の劣化状況を写真-1に、硫酸によるコンクリート腐食の概念を図-1に示す。一般に下水道施設では、下水中に含まれる硫酸イオン（蛋白質）が嫌気性条件下で硫酸塩還元細菌の作用により硫化水素に還元される。硫化水素は気相中に放散された後、コンクリート壁面の付着水（結露、飛沫水）の中で再溶解し、好気性

条件下で硫黄酸化細菌により硫酸に酸化される。硫酸によるコンクリートの腐食は、①「化学反応に伴うセメント水和物の分解、結合能力の消失、反応生成物の溶出によりコンクリートの組織が粗になる」、②「反応に伴う膨張等によるコンクリート自体の耐力低下、ひび割れ、溶解、剥落等が発生する」ことにより劣化が進行する現象である。

2.2 FRP 防食パネルの仕様と適用対象

FRP防食パネルの断面を図-2に、外観を写真-2



写真-1 下水道施設の劣化状況

*技術研究所 **技術本部関西土木技術部 ***東京支社土木工務部 ****東京支社環境プロジェクト部

に示す。パネルの基材構成はEガラスコンティニュアスストランドマットを外周材として、中にガラスロービングを配置したもので、バインド材の樹脂は含ブロムビスフェノールA型エポキシアクリレート（ビニルエステル：VE）を用いている。

FRP防食パネルは、引抜成形法により一体成形しており、厚さ5mmで背面にL形アンカー脚を有する。製作する長さには制限はないが、長さ2700×幅600mmを標準サイズとしている。パネル1枚の重量は18.4kgで、人力作業が可能である。また、パネルの切断・加工は木製パネルと同様に施工できる。L形アンカー脚は15度傾斜しており、その傾斜によって横使いした場合でもアンカー下部に隙間なくモルタルを充填できるのでパネルを縦横の両方向に使用できる。

FRP防食パネル工法は、新設および補修に適用できる。新設の場合は、FRP防食パネルを組立て、内部にコンクリートを打設し、L形アンカー脚により一体化させる（埋設型枠工法）。補修の場合は、既設コンクリートにコンクリートアンカーでFRP防食パネルを固定し、その隙間に高流動高強度モルタルを充填することによって一体化させるものである（後貼り工法）。

3. 開発目標

本工法の開発目標を次に示す。

(1) FRP防食パネルおよびシーリング材の品質

FRP防食パネル、シーリング材は、次の項目について、シートライニング工法（D₂種）の品質規格に適合すること。

- ① 被覆の外観
- ② 耐酸性
- ③ 硫黄侵入深さ（シート部、目地部）
- ④ 耐アルカリ性
- ⑤ 透水性

(2) FRP防食パネルの施工性

FRP防食パネルは以下の施工性を有すること。

- ① パネルの切断・加工が従来の木製型枠工法と同様であること
- ② パネルの質量が従来の木製型枠と同等であること
- ③ 出隅部、入隅部、ハンチ部、天井部の施工が従来の木製型枠工法と同様に施工できること
- ④ 新設の場合に、パネルを埋設型枠として用い、内部に打設したコンクリートがパネル背面のL形アンカー脚と空隙なく確実に一体化できること（埋設型枠工法）
- ⑤ 補修の場合に、後貼り工法として既設コンクリートとパネルの間に充填モルタルが隙間なく充填でき、パネル背面のL形アンカー脚と空隙なく一体化できること（後貼り工法）

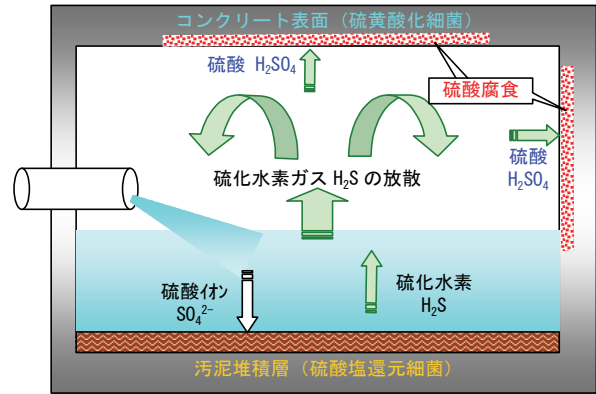


図-1 硫酸によるコンクリート腐食の概念

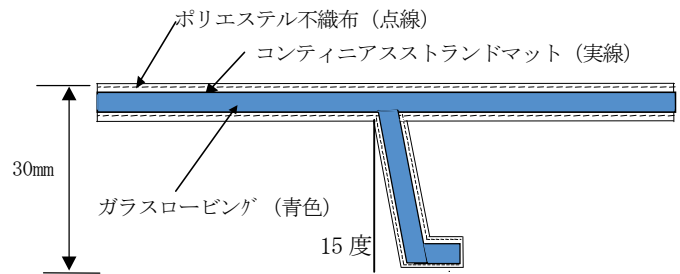


図-2 FRP防食パネル断面

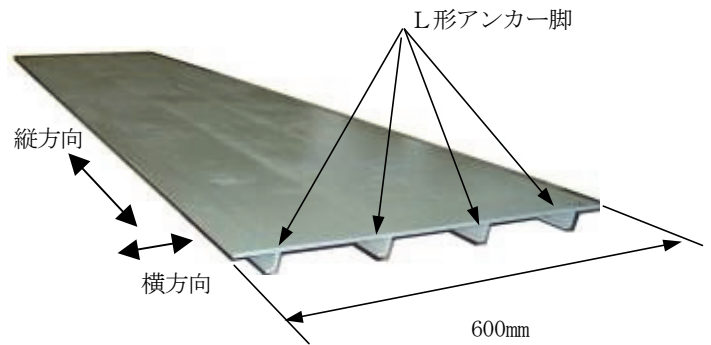


写真-2 FRP防食パネル（標準パネル）

(3) FRP防食パネルの固着性

- ① 新設の場合には、パネルとコンクリートとの固着性が、補修の場合には、パネルと充填モルタルの固着性が、シートライニング工法のコンクリートとの固着性の品質規格（0.24 MPa以上）に適合すること

(4) FRP防食パネルの耐衝撃性

- ① FRP防食パネルは、耐衝撃性を有すること

表－1 FRP防食パネルとシーリング材の品質性能試験結果

項目		試験結果 ⁴⁾	品質規格 ¹⁾
被覆の外観		被覆にしわ、むら、はがれ、われが認められない。	被覆にしわ、むら、はがれ、われのないこと
耐酸性		被覆にふくれ、われ、軟化、溶出を認めない。	10%の硫酸水溶液に 60 日間浸せきしても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと
硫黄侵入深さ	シート部	設計厚に対して 0% 侵入深さ 1 μ m 以下	10%の硫酸水溶液に 120 日間浸せきした時の侵入深さが設計厚さに対して 1% 以下であること
	目地部	設計厚に対して 0% 侵入深さ 8 μ m	10%の硫酸水溶液に 120 日間浸せきした時の侵入深さが設計厚さに対して 5% 以下であること、かつ 100 μ m 以下であること
耐アルカリ性		被覆にふくれ、われ、軟化、溶出を認めない。	水酸化カルシウム飽和水溶液に 60 日間浸せきしても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないこと
透水性		0.02 g	透水量が 0.15 g 以下

4. FRP防食パネルの品質

防食工法に要求される性能は、①被覆層の耐久性、②劣化因子の遮断性、③コンクリートとの一体性である。FRP防食パネル、シーリング材の品質性能試験を日本下水道事業団下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル（平成 14 年 12 月版）シートライニング工法の品質規格D₂種に準じて行った。結果を、公的機関の試験結果⁴⁾および土木研究所共同研究報告書²⁾に基づいて表－1に示す。

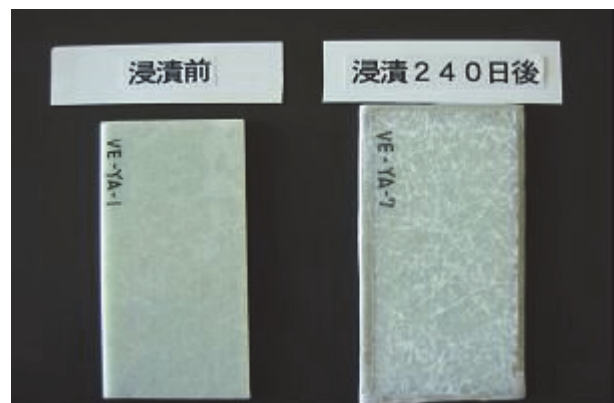
(1) 耐久性と劣化因子の遮断性

耐酸性試験ではFRP防食パネル被覆の外観に異常はなく、ふくれ、われ、軟化、溶出がない結果から、被覆層の耐久性を確認した。また、10%の硫酸水溶液に 120 日間浸せきした結果から、シート部および目地部において規定の侵入深さを満足しており、劣化因子の遮断性を確認した。同様に耐アルカリ性は、水酸化カルシウム飽和水溶液に 60 日間浸せきしても被覆にふくれ、われ、軟化、溶出がないことが確認された。透水性に対しても透水量は 0.02 g と規格値 0.15g を下回っている。

土木研究所共同研究による10%硫酸水溶液に240日間

浸せきしたパネルの外観検査の一例を写真－3に示す。目視による検査によりパネル表面にはポリエステル不織布の模様が見えるが、被覆にしわ、むら、はがれ、われはない。写真左側のパネルは浸せきしていない比較用試験体である。

公的機関でのパネル試験体の硫酸浸せき状況を写真－4に、EPMA（波長分散型分析装置）による硫黄侵入深さ測定結果を写真－5に示す。120日の浸せき後の硫黄侵入深さはシート部目地部とも設計厚さに対して0%であった。



写真－3 パネルの外観（耐酸性240日浸せき）



写真-4 パネル試験体の硫酸浸せき状況

(2) 固着性

固着性は公的試験による確認を行った。試験体は、L形アンカー脚があるため、120×120×60 mm の型枠にアンカー脚を有する大きさ 40×40 mm のFRP防食パネルを設置し、コンクリートおよび充填モルタルを打設する方法で作成した。固着性の試験方法は、JIS A 6916 に準拠し、試験の材齢を 28 日とし、建研式引張試験により固着強さを確認した。

固着強さの計算式を式(1)に示す。

$$\text{固着強さ (MPa)} = \frac{\text{最大引張荷重} \times 1,000}{1,600 \times 4} \quad \text{..式(1)}$$

ここに、

最大引張荷重 (kN)

1600 : 引張用鋼製ジグ (40×40 mm) の面積

低減率 4 : 1本のL形アンカー脚の分担幅比

160 mm/40 mm = 4

公的機関の試験結果を表-2に示す。固着性の試験体破断状況を写真-6に示す。FRP防食パネルの固着強さの平均値は 0.46MPa および 0.47MPa であり、「シートライニング工法の品質規格値」¹⁾の 0.24MPa を満たす試験結果が得られた。FRP防食パネルの破断面は、コンティニュアスストランドマット層とガラスローピング層の界面で生じた。

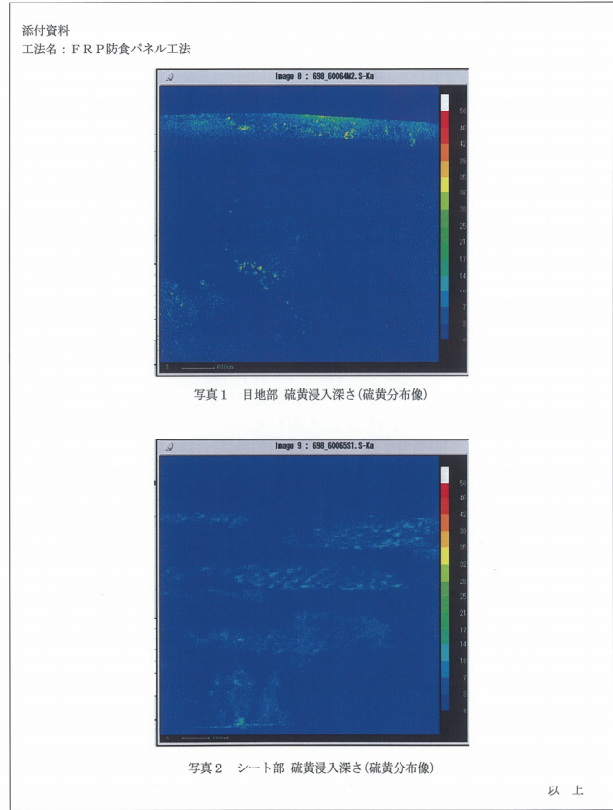
また、土木研究所共同研究の飽和水酸化カルシウム水溶液 (温度 23℃) の浸せき試験²⁾における 60 日浸せき前後の固着強さに変化が見られず、試験体の破断の状況が同様であることから、FRP防食パネルの固着性は、充填モルタルのアルカリによって影響を受けないと考えられる。

(3) 耐衝撃性

公的機関による耐衝撃性試験を JIS A 6916 2000 建築用下地調整塗材 7.10 耐衝撃性試験に準じて行った。い

ずれもひび割れ及びはがれがなく、FRP防食パネルは耐衝撃性を有することが示された。

依頼No. 060064



財団法人 日本塗料検査協会 東支部

写真-5 硫酸浸せきの EPMA 結果

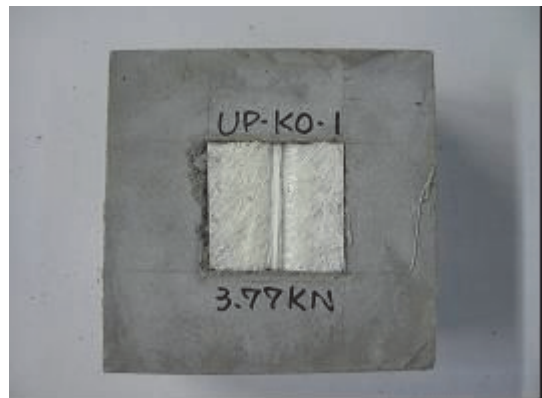


写真-6 固着強さ試験体の破断状況

表-2 固着強さ試験結果 (公的機関試験結果)

項目	試験結果	品質規格
コンクリートの固着強さ	平均値 0.46 MPa	0.24 MPa 以上
充填モルタルの固着強さ	平均値 0.47 MPa	

5. FRP防食パネル工法の構造

FRP防食パネル工法は、成形板をコンクリートに埋め込む方式であり、目地を持つ。目地部のシールには、ウレタン樹脂のシーリング材を使用する。目地部の裏当て材には、一般部では平板形状のFRP裏当て材を、出隅および入隅部のコーナ部ではFRPアングル材を使用する。FRP防食パネルの設置は、以下のように行う。

- ① 所定の位置にコンクリートアンカーを設置する
- ② コンクリートアンカーに棒ネジを取り付ける
- ③ 埋込モルタルコーンおよび軸足を取り付ける
- ④ FRP裏当て材を軸足位置に合わせて孔を削孔し、設置する
- ⑤ FRP防食パネルとFRP裏当て材の間にノロ漏れ防止用テープを貼る
- ⑥ FRP防食パネルを設置する
- ⑦ フォームタイで支保工を組み立てる

設置フローを図-3に示す。コンクリートアンカーの設置間隔は600mm程度とする。

図-4に一般部の構成、図-5に目地部の断面構成、図-6に入隅部の断面構成を示す。

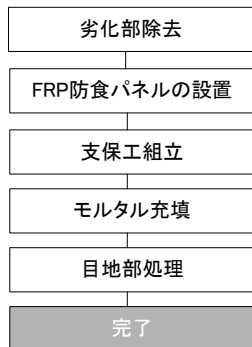


図-3 設置フロー

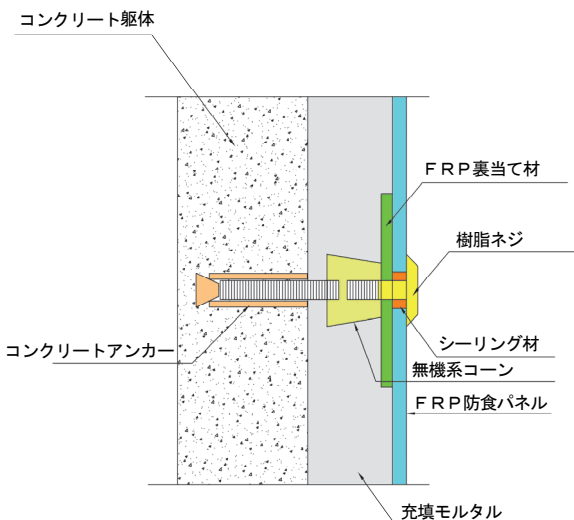


図-5 目地部（コンクリートアンカー部）の断面構成

6. 施工性能試験

FRP防食パネルの施工性能の確認を、茨城県にある浄化センター内の土木研究所施設で行った。その後、暴露試験を継続している。吐出水槽壁面に施工した作業状況を写真-7に示す。施工方法は後貼り工法である。

パネルの搬入、加工・組立作業の効率は良好であった。現場練りの高流動・高強度の充填モルタルは硬化後の体積変化が少なく、漏れのトラブルもなく確実な充填ができた。セパレータ部には、樹脂ネジを施工しており、目地部のコーキングも良好に実施できた。現在、暴露後2.5年の経過であるが健全な状況が確認されている。

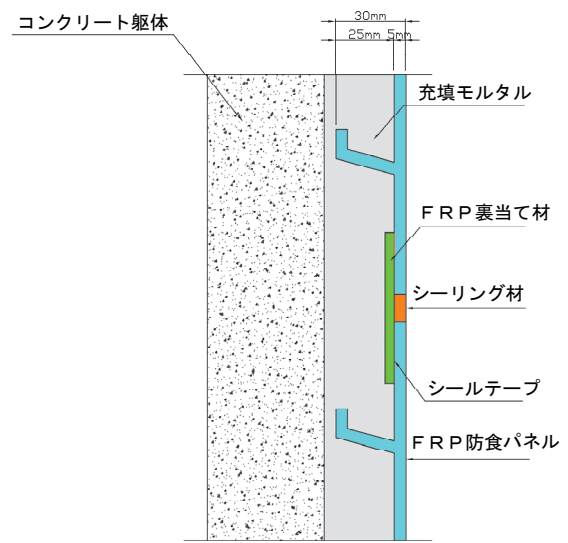


図-4 一般部の構成（後貼り工法の防食被覆層の断面構成例、充填モルタルで設置の場合）

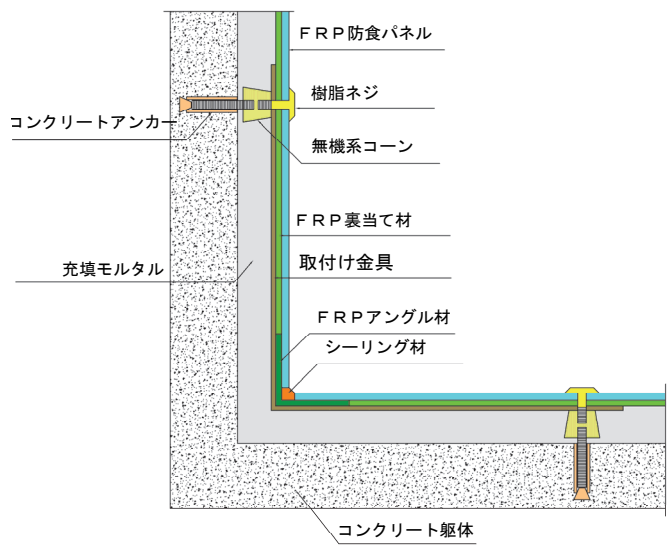


図-6 入隅部の断面構成



写真－7 試験施工状況

7. 実証施工

奈良県にある浄化センターの返送汚泥水路において実証施工を実施した。返送汚泥水路は新設構造物で全長 46.9m、高さ 2.75m、幅 1.1m である、ハンチ部、横断水路部、天井および側壁の箱抜き部を含めて全面を FRP 防食パネルで施工した。施工は埋設型枠工法であり、施工数量は 334 m² である。FRP 防食パネル組立て途中の箱抜き部・段差部の状況を写真－8 に、水路完成状況を写真－9 に示す。従来の「通常型枠施工+防食塗装」



写真－8 箱抜き・段差部



写真－9 水路完成状況

に替わる工法（埋設型枠）として施工した。

標準パネル以外の部材の切断加工は現場サイトで行った。本構造物では配管部や天井部の箱抜きなど細かな形状があり、細部の施工に工夫が必要であった。本構造物での施工によりパネルの割り付け、設置、コンクリートの打設、目地シーリングのすべての技術に向上が得られ、工法を完成することができた。

8. あとがき

本開発による FRP 防食パネルは次の性能を持つことが確認された。

- i. FRP 防食パネル、シーリング材は、シートライニング工法 (D₂種) の品質規格に適合する
- ii. FRP 防食パネルは、埋設型枠工法および後貼り工法として、加工性、充填性を有する
- iii. FRP 防食パネルは、埋設型枠工法および後貼り工法いずれの場合にも、所要の固着強さを有する (0.24 MPa 以上)
- iv. FRP 防食パネルは、耐衝撃性を有する

実証施工により有益な実績を得たので、更に実施工での適用を進めていきたい。なお、開発テーマ推進において技術本部土木部および環境プロジェクト部に、実証施工において関西支社土木部に多大の協力を受けたことを記す。

【参考文献】

- 1) (社) 日本下水道事業団：下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル、2002.12
- 2) 独立行政法人土木研究所：下水処理施設のコンクリート補修材料に関する共同研究報告書、2006.7
- 3) 石井、西崎、小宮：第 42 回下水道研究発表会、FRP パネルを用いた下水処理施設の防食工法、2004.6
- 4) (財) 下水道新技術推進機構：建設技術審査証明（下水道技術）報告書、FRP 防食パネル工法、2006.12