

## 20. 下水道施設への新素材の活用技術に関する調査

独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ（新材料）

上席研究員 明嵐 政司

主任研究員 西崎 到

### 1. はじめに

下水道整備を効率的に進めるためには、従来から広く利用されている鉄筋コンクリートよりも耐食性の高い新素材を活用する技術開発が求められている。本課題はこのような新素材を探索し、下水道施設での耐食性・適用性を調査する。さらに、下水道施設用防食材料としての改良・技術開発を行う。本課題の研究項目は下記の2項目である。

- ①下水道施設用防食材料の高性能化・高機能化技術の開発
- ②抗菌材料に関する調査

近年、下水道施設用の防食指針類が整備されたので、新設構造物の防食性能は向上している。また、下水道の整備率は平成12年度末で62%と増えているため、既設構造物補修の重要性が高まりつつある。これらの理由から、研究対象を下水道施設のコンクリート補修材料とした。

### 2. 下水道施設用防食材料の高性能化・高機能化技術の開発

#### 2. 1 下水道施設用コンクリート補修材料の現状と問題点

下水道施設用コンクリート補修材料の高性能化・高機能化の方向を探索するために、現状と問題点を整理した。

##### 2. 1. 1 下水道施設のコンクリートの損傷要因

###### (1) 硫酸による劣化

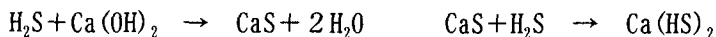
微生物により生成される硫酸は、下水道施設のコンクリートを腐食する。このメカニズムや実態は、例えば「下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術及び防食技術の評価に関する報告書」<sup>1)</sup>に詳しくまとめられている。その結論は以下の様に整理できる。

- ①硫酸塩還元細菌により、下水中の嫌気性環境で硫化水素が発生する。
- ②発生した硫化水素が大気部に拡散する。
- ③硫黄酸化細菌により、コンクリート表面で硫酸が発生する。

硫化水素の濃度は、通常1～100ppm程度であるが、時には2000ppmに達する測定事例もある<sup>1)</sup>。コンクリート表面の水素イオン濃度の上昇は、通常pH1程度と報告されている<sup>1),2)</sup>。

###### (2) 硫化水素による劣化

文献<sup>3)</sup>では、「硫化水素ガスは0.01g/ℓ(10ppm相当)以上の濃度でコンクリートに対して「かなりの浸食」を与える」と記述している。硫化水素は、次式の様子セメント硬化体中の水酸化カルシウムと反応して水溶性の塩〔Ca(HS)<sub>2</sub>〕を作り、セメント硬化体中の水酸化カルシウムを消費させ、水溶性の塩を溶出し、コンクリートの中性を促進させる。



下水道施設のコンクリート腐食の原因は、細菌により作られた硫酸によると考えられているが、このような、硫化水素による劣化も同時に起きている可能性がある。

2. 1. 2 コンクリート補修材料の現状と課題

(1) 補修工程と材料

劣化したコンクリート構造物の補修工程を以下に示す。

- ①劣化部分の除去
- ②鉄筋の防錆処理
- ③断面修復
- ④防食被覆（ライニング）

この工程の中で材料の性能が問題となるのは、主に③断面修復と④防食被覆（ライニング）である。

(2) 断面修復材料

断面修復材料には主にポリマーセメントモルタルや無収縮モルタルが使用されている。また近年では、下水汚泥焼却灰スラグや高炉スラグの超微粉末高含有セメントによる耐硫酸性モルタルが開発されている。耐硫酸性モルタルは pH2 程度の酸性環境まで耐えるとともに、塗布型ライニング材のピンホールに起因する欠陥をある程度防ぐことができる。東京都下水道局<sup>4)</sup>は耐硫酸性モルタルの基準を定めている。

(3) ライニング材

補修時のライニング材は新設時と同じものが用いられる。「コンクリート防食指針（案）」<sup>5)</sup>には、腐食環境条件に応じて、A種からD種までの4種類（表 1）のライニング材が設定されている。現場で塗膜を形成する塗布型ライニング材と、工場で成型された防食シートを用いるシートライニング材がある。

表 1 ライニング材の分類と主要な材料（「コンクリート防食指針（案）」<sup>5)</sup>より作表）

分類	腐食環境条件	想定対象施設			主要な材料	
		環境条件	気相部	液相部	塗布型ライニング材 (塗装回数等, 設計膜厚/mm)	シートライニング材 (仕様, 設計厚/mm)
A種	硫化水素は多いが腐食に至らない環境	防食指針では汚泥消化槽の液相部分を想定している。硫化水素は液相部では特にコンクリート腐食には寄与しない。しかし汚泥消化槽では嫌気性分解の際、酸発酵により pH が低下することを考慮し腐食環境条件を想定した。	-	汚泥消化槽	エポキシ樹脂または <sup>6)</sup> ポリウレタン樹脂(2回, 0.20)	(設定無し)
B種	硫化水素の滞留が少なく腐食が穏やかな環境	硫化水素による腐食が明らかに見られる場合を想定している。硫化水素があまり高濃度(H <sub>2</sub> Sでおおむね 10 ppm以上)にならない場合に適用される。	汚水調整池、雨水貯留池、脱水ケーキビット、ブリエアレーションタンク	脱水ケーキビット	エポキシ樹脂(3回, 0.35) ガラス繊維入り VE 樹脂(3回, 0.35) <sup>6)</sup> ポリウレタン樹脂(1回, 1.50)	(設定無し)
C種	硫化水素の滞留が多く腐食が厳しい環境	硫化水素による腐食が顕著に見られる場合を想定している。放置した場合、2-3年(腐食速度でおおむね 5-36mm/年)でコンクリートが腐食し、鉄筋にまで達すると考えられる環境(H <sub>2</sub> Sでおおむね 10 ppm以上)で、本格的な対策が必要とされる場合に適用される。	沈砂地・スクリーン室、ポンプ井、着水井、分配槽、汚泥濃縮槽、汚泥消化槽、汚泥洗浄タンク、汚泥貯留槽、受泥槽、コンポスト発酵槽	汚泥貯留槽	エポキシ樹脂(ガラス繊維入り1層, 0.70) エポキシ樹脂(ガラス繊維入り1層, 1.00) UP 又は VE(ガラス繊維入り1層, 1.00) セラミックパウダー入りエポキシ樹脂(1回, 3.00) ウイカ入り変性シリコーン樹脂(4回, 0.30) <sup>6)</sup> ポリウレタン樹脂(1回, 2.00)	硬質塩化ビニル樹脂 (成型シートによる被覆, 2.0) 高密度 <sup>6)</sup> ポリウレタン樹脂 (成型シートによる被覆, 2.0) VE 系 <sup>7)</sup> コンクリート (埋設型枠による被覆, 20.0)
D種	硫化水素の滞留が多く腐食が厳しい環境	C種の環境条件で構造上の条件より事実上補修等のメンテナンスが困難と考えられる施設、部位。	吐出渠、導水渠、初沈スカムビット及びスカム水路、終沈スカムビット及びスカム水路、脱離液、分離液ビット、返送汚泥水路	吐出渠、導水渠、初沈スカムビット及びスカム水路、終沈スカムビット及びスカム水路、脱離液、分離液ビット、返送汚泥水路	エポキシ樹脂(ガラス繊維入り2層, 1.30) エポキシ樹脂(ガラス繊維入り2層, 2.00) UP 又は VE(ガラス繊維入り2層, 2.00) セラミックパウダー入りエポキシ樹脂(1回, 5.00) ウイカ入り変性シリコーン樹脂(4回, 0.30) <sup>6)</sup> ポリウレタン樹脂(1回, 3.00)	C種と同じ材料

注：樹脂の略号は次の通りである。VE:ビニルエステル樹脂, UP:不飽和ポリエステル樹脂

## 1) 塗布型ライニング材

塗布型ライニング材は、塗料を塗布して被膜を形成する。補修部位の形状が複雑な場合には、シートライニング材よりも塗布型ライニング材の方が、施工性に優れている。主要な塗布型ライニング材を表 1 に示した。最も一般に使用されている塗布型ライニング材はエポキシ樹脂系ライニング材である。腐食条件が厳しい場合ほど、遮蔽性及び耐酸性を向上させるために、ライニング材の膜厚が厚い。C種及びD種の一部で使用されるガラスクロス・マットは、膜厚を厚くする目的で使用されている。塗布型ライニング材の主な課題を以下にまとめる。

### ①ピンホール

ピンホールは、ふくれ・はがれの原因となる。検査には目視と機器の両方を使って行う必要がある。

### ②施工性

施工時の条件（例えばコンクリート表面の素地調整、コンクリートの水分量、温度、塗りむら等）がライニング材の性能に影響を与える。このため施工時期、環境条件などに留意して施工する必要がある。また、ガラスクロス等を使用するものでは、配管などの役物との取り合い部、天井面、端部などで施工性が悪くなりやすい。

### ③コンクリートとの接着性

塗布型ライニング材は短期的には十分な接着性が得られるが、長期的な接着性には不明な点が多い。また、エポキシ樹脂系ライニング材は一般に硬く、コンクリートのひびわれに対する追従性が考慮されていない。

## 2) シートライニング材

シートライニング材は、高密度ポリエチレンやビニルエステル樹脂系レジンコンクリート（GFRP（ガラス繊維強化プラスチック）と高分子系の芯材等を組み合わせたもの）の板に、コンクリートとの接着性を向上させる工夫を施した構造を有している。断面修復材の上に突起を施したシートライニング材を貼り付けるものと、内側にパネル状のシートを設置した型枠を用いてグラウト材を充填するものがある。耐酸性及び遮蔽性は、塗布型ライニング材に比べると十分大きい。但し、以下に示す課題が挙げられる。

### ①施工性

シートライニング材は工場製品であるので、現場で被膜を形成する塗布型ライニング材に比べて、被膜の性能が安定している。しかし、既設構造物の形状に合わせて、シートを現場で加工する必要がある。このため、構造物の形状や配管との取り合いが複雑な場合には施工性が悪く、目地部の遮蔽性確保に留意する必要がある。

### ②コンクリートとの接着性

シートライニング材は、塗布型ライニング材と同様に、コンクリートとの長期的な接着性に不明な点が多い。また、シート・型枠とコンクリートの中にグラウト材を充填する方法では、グラウト材の確実な充填の確認が課題である。

### ③コスト

シートライニング材の標準的な材料単価は、3～4万円/m<sup>2</sup>（材工費）程度である。比較的高価な塗布型ライニング材：12,000～15,000円/m<sup>2</sup>（材工費、ポリウレア系）の2倍以上である。現場条件により端切れが多く出る場合には、特に高コストにつながる。

## 2. 1. 3 補修用ライニング材に求められる性能

断面修復材料とライニング材を比較すると、ライニング材の方が種類が多く、材料による性能の格差も大きい。ライニング材は、コンクリート系材料を硫酸から保護する役割があるので、耐食性の高い新材料の適用に

より性能向上が期待できる。ライニング材に求められる性能を以下に整理した。

#### ①遮蔽性

ライニング材は、構造物表面の硫酸をコンクリートに接触させずに、コンクリートを強アルカリ性に保つことにより防食効果を発揮する。このため、硫酸イオンと水素イオンの遮断性能は、補修用ライニング材にに必要な防食上の基本性能である。

#### ②耐酸性および耐アルカリ性

補修用ライニング材は、下水に接する面では pH1 程度の硫酸に耐える必要がある。また、コンクリートに接着する面ではコンクリートのアルカリに耐える必要がある。

#### ③コンクリートとの接着性

補修用ライニング材には、コンクリートとの高い接着性が必要であるが、現在のライニング材は長期的な接着性に不明な点が多い。コンクリートとライニング材との接着性を低下させる主な要因として、コンクリート中の水分が考えられる。このため、コンクリートとの接着性は、コンクリートの含有水分量が多い場合でも、長期（50 年程度）にわたり保たれることが望ましい。

#### ④コスト

新材料を利用したコンクリート補修工事のコストは、新材料導入による工事費全体のコスト（材料費だけでなく、加工費用や施工性の向上・工期の短縮化による人件費の削減等）により判断する必要がある。新材料導入による工事費全体のコストは、現在の材料の場合と同程度か、それ以下であることが望ましい。また、将来の維持管理に関わるコストまで考慮したライフサイクルコストでも、新材料の方が有利であるのがよい。

#### ⑤施工性

施工管理が困難な材料は、施工不良による性能低下の原因となりやすい。時期（冬期、夏期、梅雨時期など）に関わらず施工できることも重要である。また補修工事中には、下水道施設を停止させる必要があるので、新材料の導入により工期が短縮化し、下水道施設の停止期間を短くできることが望ましい。

## 2. 2 補修用ライニング材としての新材料

補修用ライニング材に適していると期待される新材料を探索し、前項の要求項目に関する性能を検討した。可能性を検討した新材料は以下の3種類である。

- (1) 高耐食金属材料（チタン箔）
- (2) 炭素繊維
- (3) ポリウレタ樹脂

### 2. 2. 1 チタン箔

#### (1) 耐酸性

チタンは pH1 の強酸性環境に耐える材料である。その耐酸性能を、表 2 及び図 1 に示す。下水道施設の環境条件（pH1 0 (0.3 3%硫酸水溶液)、温度 30 35℃) よりもはるかに厳しい条件（表 2 の 1 番及び 2 番、濃度 1 3%、温度 60℃) で 0.00762 0.01274mm/year と、十分小さい腐食度を示しているため、チタンはライニング材として十分な耐酸性能を持つと考えられる。

表 2 チタンの耐硫酸性<sup>6)</sup>

番号	条件	濃度(%)	温度(°C)	腐食度(mm/year)
1	硫酸、空気を通気	1	60.0	0.00762
2	同上	3	60.0	0.01270
3	同上	5	60.0	4.8260
4	同上	10	35.0	1.2700
5	同上	40	35.0	8.6360
6	硫酸+0.25%CuSO <sub>4</sub>	30	37.8	0.06096

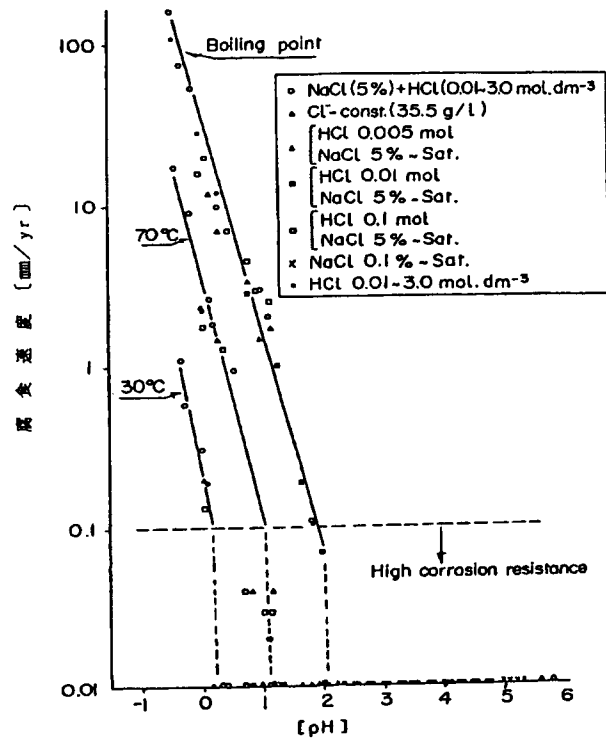


図 1 チタンの耐酸性 (塩酸系)<sup>7)</sup>

(2) 既存の適用事例

材料製造者に対する調査から、いくつかのチタン箔の適用事例をまとめた。

50 100 $\mu$ m のチタン箔を、鋼材表面に貼り付けて、防食する方法が実用化されている。鋼材との接着には両面テープが使用される。鋼橋上部エジョイント部の防食に使用された事例がある。チタン箔の厚さは 100 $\mu$ m がもっとも経済的とされている。

鋼材で良好な接着性能を示した両面テープが、コンクリート橋脚の補修用ライニング材として試験施工された事例では、良好な接着強度を得られなかった。

終末処理場の防臭蓋(SUS304 製) の内面に貼り付けて、防食した事例もある。実施から 6 年を経過した時点で、チタン箔には異常が認められていない。

(3) 下水道用ライニング材としての適用性

チタン箔は、シートライニング材のひとつと位置づけられる。ライニング材の要求項目のうち、チタン箔が

遮蔽性及び耐酸性・耐アルカリ性を十分に満足することは明らかである。コストは、13,000 円/m<sup>2</sup>（材工費）程度であり、既存のシートライニング材より安くなる可能性があることが分かった。したがって、残された課題はコンクリートとの接着性向上である。

## 2. 2. 2 炭素繊維

炭素繊維は、コンクリート補強材料、防食材料として、橋梁などの分野で広まりつつある。その活用方法としては、樹脂を用いて炭素繊維シートをコンクリート表面に貼付する連続繊維シート工法、CFRP（炭素繊維補強プラスチック）を用いたシートライニング材、CFRPグリッド工法が考えられる。

### （1）連続繊維シート工法

連続繊維シート工法は、橋梁床版、橋脚、桁などのコンクリート部材の補強工法として実績のある工法であるが、下水道施設で実施された事例はない。連続繊維シート工法には、主に炭素繊維シートが使われる。連続繊維シート工法は、ガラス繊維クロス・マットを用いた塗布型ライニング工法と類似している。炭素繊維を用いた連続繊維シート工法の方が、材料力学性能（剛性および耐クリープ特性）と耐酸性能においてより優れている。また、連続繊維シート工法は、コンクリート橋の補強に適用できる<sup>8)</sup>ので、下水道施設の補強材料としての適用の可能性もある。

炭素繊維を用いた連続繊維シート工法のコスト（20,000～50,000 円/m<sup>2</sup>程度（材工費））は、ガラス繊維を用いる塗布型ライニング材のコスト（12,000～17,000 円/m<sup>2</sup>（材工費））より高価であり、シートライニング材（30,000～40,000 円/m<sup>2</sup>（材工費））と同程度と考えることができる。

### （2）CFRPシートライニング材

既存のシートライニング材は、「コンクリート防食指針（案）」<sup>5)</sup>に規定された耐酸性及び材料力学性能を有している。CFRPを採用することで、シートライニング材の耐酸性と材料力学性能を、さらに向上させることができると期待できる。

### （3）CFRPグリッド工法

CFRPグリッド工法は、格子状のCFRP（CFRPグリッド）を断面欠損のある鉄筋と置き換えるものである。腐食が激しい下水道施設の補修で適用された事例が数例報告されている。CFRPグリッド工法は軽量であるため鉄筋に比べ作業性が高い。補強筋の耐食性・耐アルカリ性も十分であるため、下水道施設用補強材料として適している。

## 2. 2. 3 ポリウレア樹脂

塗布型ライニング材のひびわれ追従性、施工性等を改良した材料として、ポリウレア樹脂が普及しつつある。ポリウレア樹脂は、超速硬化性（硬化時間数十秒）で、スプレーによる施工が可能であり、施工性が良く工期も短い。なお、従来の塗布型ライニング材で課題となるピンホールに対する性能改善は期待できない。また、コンクリートとの長期接着性は確認されていない。

## 2. 2. 4 その他の材料

良好な耐食性をもつアルミニウム合金材料が、下水処理槽の覆蓋に用いられた事例がある。軽量であることから、覆蓋用材料としては適している。しかし、耐アルカリ性が悪いため、コンクリート補修材料としては課題が多い。

## 2. 2. 5 補修用ライニング材の比較

本報告で検討した新材料のうち、ライニング材として適用できる材料の性能を比較した結果を表 3 に示す。

シートライニング材は、塗布型ライニング材よりも、遮蔽性、耐酸性、耐アルカリ性は優れているが、接着性、コストが劣っている。チタン箔は、遮蔽性、耐酸性、耐アルカリ性はさらに優れているが、接着性に関する技術開発が不可欠である。チタン箔のコストは塗布型ライニング材と同程度である。連続繊維シート工法の遮蔽性はチタン箔に及ばないが、構造物補強の可能性が期待できる。CFRP シートライニング材の性能は、従来の GFRP のシートライニング材と同程度である。新しい塗布型ライニング材（ポリウレタ樹脂）は、施工性は高いが、ややコスト高である。

したがって、チタン箔は、接着性が技術開発されれば新しいライニング材として利点が多い。また、連続繊維シート工法も構造物補強が必要な場合には有力である。

表 3 新材料のライニング材としての性能比較

	遮蔽性	耐酸性	耐アルカリ性	接着性	施工性	コスト	備考
塗布型ライニング材(比較)	△	○	○	○	△	○	
シートライニング材(比較)	○	◎	◎	△	△	△	
チタン箔	◎	◎	◎	△	△	○	
連続繊維シート工法	○	◎	◎	○	○	△	耐震補強の可能性
CFRP シートライニング材	○	◎	◎	△	△	△	
ポリウレタ樹脂系塗布型ライニング材	△	○	○	○	◎	○	

凡例：◎ 非常に優れている，○ 優れている，△ 改善の余地あり

### 3. 抗菌材料に関する調査

#### (1) 抗菌性コンクリート

硫黄酸化細菌による硫酸生成を抑制するために、硫黄酸化細菌の活性を阻害する物質（防菌剤や抗菌剤）を混入する、抗菌性コンクリートが開発されている。防菌剤、抗菌剤は、ニッケル系、酸化タングステン系、銀・銅担持ゼオライト・銀系等の金属あるいは金属酸化物である。ギ酸カルシウムや有機系の抗菌剤の研究も行われている。平均硫化水素ガス濃度が 10ppm 程度以下の環境（B 種環境）では、硫黄酸化細菌の抑制効果があるといわれている。<sup>1)</sup>

#### (2) 銅箔

銅は酸化した場合に有毒な塩となる可能性がある。また、硫化水素の作用で表面に硫化銅が発生し、抗菌性能が低下する。したがって、下水道施設では適応が困難と考えられる。

### 4. まとめ

平成 13 年度には、新材料の活用による下水道施設用補修材料の高性能化・高機能化の可能性を検討した。下水道コンクリート施設の損傷要因を整理し、劣化したコンクリートの補修材料の現状を調べ、研究課題を整理した。防食効果の主要な材料であるライニング材に求められる性能をまとめ、要求性能に適合する新材料を探索した。この結果、チタン箔、炭素繊維（連続繊維シート工法）、ポリウレタ樹脂系塗布型ライニング材が有力であることが分かった。抗菌材料に関する調査も行った。

### 5. 参考文献

- 1) 「下水道構造物に対するコンクリート腐食抑制技術及び防食技術の評価に関する報告書」日本下水道事業団編（平成 13 年 3 月）
- 2) 「FRPM 管の破損に関する共同研究報告書」神戸市建設局及び(財)下水道新技術推進機構（平成 11 年 3 月）
- 3) 水上国男「化学的腐食」技報堂（昭和 61 年 12 月）
- 4) 「コンクリート改修技術マニュアル（汚泥処理施設編）」東京都下水道局施設管理部（平成 12 年 10 月）
- 5) 「コンクリート防食指針（案）」日本下水道事業団編（平成 9 年 6 月）
- 6) 「チタン・デザインデータブック」 （社）日本チタン協会編
- 7) 渡辺他, 「NaCl HCl 系溶液におけるチタンの自由表面の腐食挙動」, 日本金属学会誌, 第 50 卷, 第 8 号(1986)
- 8) 「連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針」コンクリートライブラリー101 号、土木学会（平成 12 年 7 月）