

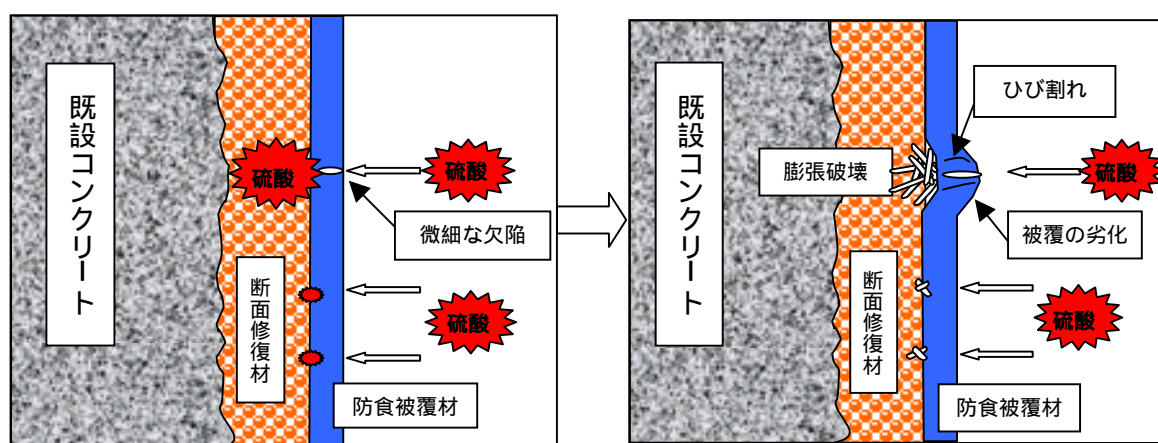
2 - 1 耐酸性モルタル及び耐食性 FRP 補強材による 下水道施設における劣化コンクリート補修工法の開発

施設管理部 施設保全課 小澤 孝吉
計画調整部 事業調整課 安藤 太郎

1. はじめに

下水道施設の劣化コンクリート補修工事において、従来使用されていた断面修復材は、高強度及び早強型であるが耐酸性を有していないため、形成された防食被覆材のピンホール等のわずかな欠陥箇所からでも硫酸が浸透した場合には、断面修復材が容易に腐食する。さらに、断面修復材の腐食過程で生じる体積膨張により防食被覆材が損傷を受け劣化が加速するため、耐用年数を短命化させる要因となっている。(図1参照)

本研究は、下水道施設を維持管理していく上で、劣化した鉄筋コンクリート構造物を原設計耐力に回復させるとともに、施設の供用環境下で耐食性などの機能を恒久的に保持し得る補修工法の開発を目的に、平成12年度から平成15年度にかけて実施した、日本ジコウ株式会社とのノウハウ+フィールド提供型共同研究である。



〔説明〕

防食被覆材に微細な欠陥(ピンホール、膜厚不足)が生じている場合、防食被覆材を透過した硫酸は断面修復材に到達する。

なお、防食被覆材に微細な欠陥がない場合でも、長期的には微量の硫酸が防食被覆材を浸透拡散し、断面修復材まで到達する。

〔説明〕

断面修復材まで到達した硫酸により、耐酸性のない断面修復材は、コンクリートと同様にセメント硬化体が分解され、膨張崩壊し、ひび割れを発生させる。

図1 硫酸によるコンクリートの劣化進行状況

2. 技術概要

本技術は、超微粒子高炉スラグ系及び汚泥溶融スラグ系の耐酸性モルタルと耐食性 FRP 補強材を組み合わせる工法である。また、従来の高強度モルタルと鉄筋とを使用する工法と比較して、より耐酸性、高い強度特性及び耐久性が得られる工法である。

- (1) 超微粒子高炉スラグ系耐酸性モルタルは、超微粒子高炉スラグ(比表面積 $8,000 \sim 10,000 \text{ cm}^2/\text{g}$)の持つ潜在水硬性を利用する。潜在水硬性とは、水酸化カルシウム等のアルカリ性物質の刺激により、高炉スラグ自体が水和し粒子の周囲にケイ酸カルシウムやアルミン酸カルシウム等の水和物を

形成する性質である。つまり、スラグの一部と水酸化カルシウムが化合して不溶性のケイ酸カルシウムやアルミン酸カルシウム等の水和物を生成する。長期強度の増進、組織の緻密化（水密性の向上）を図るとともに、水酸化カルシウム生成量の抑制による化学抵抗性（耐酸性）を増強させたものである。

- (2) 汚泥溶融スラグを利用する耐酸性モルタルは、スラグ微粉の細骨材への置換（50%程度）によりスラグの持つ潜在水硬性を利用し、長期強度の増進、組織の緻密化、化学抵抗性（耐酸性）を増強させたものである。
- (3) 耐食性 FRP 補強材は、高性能連続炭素繊維をビニルエステル樹脂に含浸させる格子目状（グリッド）及び、エポキシ樹脂に含浸させる棒状（ロッド）の 2 種類があり、耐食性ととも高強度・高弾性を有する。また、軽量であることから運搬や作業性に優れている。
- (4) 耐酸性モルタルと耐食性 FRP 補強材とによる補修工法は、下水道施設における硫化水素に起因するコンクリート構造物の腐食による耐久性低下に対して、耐酸性を有する断面修復材及び補強材の組み合わせによって、構造物の機能・耐力を回復させ、より一層の耐久性能の向上を図るものである。

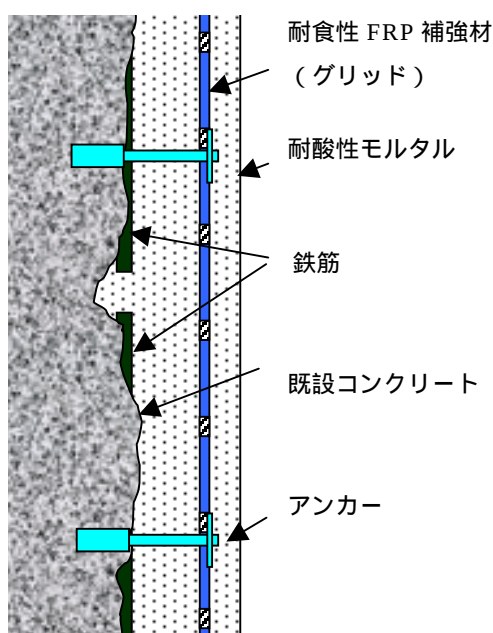


図2 耐酸性モルタルと耐食性 FRP 補強材（グリッド）

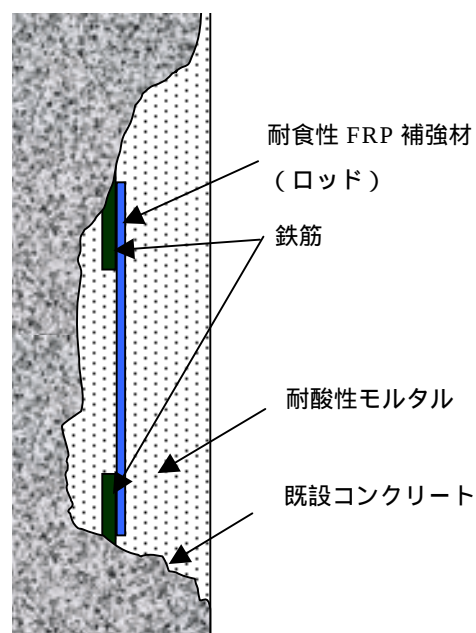


図3 耐酸性モルタルと耐食性 FRP 補強材（ロッド）

3．材料及び調査方法

3．1 使用材料

今回新たに開発したコンクリート補修工法に使用する材料は、超微粒子高炉スラグ系及び汚泥溶融スラグ系の耐酸性モルタルと耐食性 FRP 補強材である。なお、比較検討用には従来利用されていた断面修復用のモルタル（高強度）及び補強・補充用の鉄筋（異形棒鋼）を用いた。

(1) モルタル類

室内試験及び現場調査に使用するモルタル類の種別及び品質性能は、表 1～2 に示すとおりである。なお、品質性能は、「コンクリート改修技術マニュアル（処理施設編）平成 15 年 3 月 東京都下水道局施設管理部」に定める指標である。

表 1 使用したモルタル類の種別

記 号	種 別	特 徴
C-	コンクリート（セメント量：255kg/m ³ ）	W/C：55%、s/a：47%、スランプ：8cm
NM-	普通モルタル（セメント量：417kg/m ³ ）	コンクリート（C- ）から骨材を除く
M-	高強度モルタル	従来の断面修復材（耐酸性なし）
FS-	超微粒子高炉スラグ系モルタル(0)	従来の断面修復材（耐酸性なし）
FS-	超微粒子高炉スラグ系モルタル(A)	セメント置換率の変化（A 社製品）
FS-	超微粒子高炉スラグ系モルタル(B)	セメント置換率の変化（B 社製品）
SS-	汚泥溶融スラグ系モルタル	汚泥溶融スラグ微粉を細骨材に置換

注） 印が新たに開発した耐酸性モルタルである。

表 2 耐酸性モルタルの品質性能

項 目	単位	品質性能指標	FS-	FS-	SS-
強度特性（圧縮強度）	N/mm ²	25 以上	34	29	36
		45 以上	52	68	55
強度特性（曲げ強度）	N/mm ²	3.0 以上	4.0	5.5	6.1
		7.0 以上	7.5	8.7	7.2
密度特性（硫黄浸透深さ）	mm	3.0 以下	2.5	2.8	3.0
無収縮性（長さ変化率）	%	- 0.1 以上	- 0.08	- 0.07	7.8
接着安定性（引張強度）	N/mm ²	平均値 1.5 以上	2.0	2.3	3.0
耐硫酸性（重量変化率）	%	± 10 以内	- 1.3	+7	7.8
施工性（一回の塗り厚）	cm	2 以上	2 が可能	2 が可能	2 が可能

注）強度特性の欄は、上段：材齢 3 日強度、下段：材齢 28 日強度を表す。

(2) 補強材

室内試験及び現場調査に使用する補強材の種別及び品質性能は、表 3 に示すとおりである。

表 3 補強材の品質性能

種 別	引張強度（N/mm ² ）	弾性率（kN/mm ² ）	質 量
FRP グリッド	1,400	100	1,000g/m ²
FRP ロッド（φ6mm）	1,700	130	60 g/m
鉄筋（SD295A、D13）	295	200	995 g/m

3.2 調査箇所及び調査方法

調査については、下記の場所及び内容で実施した。

みやぎ水再生センター内における試験施工及び施工品質の耐久性確認

砂町水再生センター内における供試体の暴露試験

室内における硫酸水溶液浸漬試験

3.2.1 みやぎ水再生センター（試験施工及び施工品質の耐久性確認）

(1) 試験施工及び調査箇所

施工箇所：汚泥分配槽（№1～3 槽）

施工面積：1 箇所当たり約 25m² 程度

施工位置：気相部（部分的に液相になるものは可）

施工部位：壁面及び天井部

(2) 環境調査

施設の環境調査については、気相部（気中）においては硫化水素等がコンクリートの劣化（腐食）に及ぼす影響、液相部（水中）においては水質からの硫化水素発生要因の程度を確認する目的で実施した。

調査項目は、気相部においては表面 pH、温度、湿度、硫化水素濃度（24 時間連続自動測定）、二酸化炭素濃度（24 時間連続自動測定）、液相部では、pH、水温、酸化還元電位（ORP）、溶存酸素量（DO）、溶存硫化物濃度（DS）である。

(3) 劣化度調査

劣化度調査は、腐食環境下における断面修復材（モルタル）及び補強材の劣化度を確認することにより、耐久性能を検証した。

調査項目は、劣化現象（目視外観観察）、脆弱深さ、中性化深さ（フェノールフタレイン法）、硫黄浸透深さ（エネルギー分散型分析装置：EDS）である。

3.2.2 砂町水再生センター（供試体の暴露試験）

暴露試験は、供試体（材料）を入れたかごを壁や天井から吊るし、経年変化による劣化度を確認することにより、材料の耐久性能を検証した。

(1) 調査箇所

第一沈殿池導水渠及び汚泥濃縮槽（3 号槽）

(2) 環境調査

施設の環境調査は、気相部（気中）において硫化水素等がコンクリートの劣化（腐食）に及ぼす影響を確認する目的で実施した。

調査項目は、気相部の温度、湿度、硫化水素濃度（24 時間連続自動測定）、二酸化炭素濃度（24 時間連続自動測定）である。

(3) 劣化度調査

劣化度調査は、腐食環境下におけるモルタル（供試体）及び補強材の劣化度を確認することにより、耐久性能を検証する。

調査項目は、劣化現象（目視外観観察）、中性化深さ（フェノールフタレイン法）、硫黄浸透深さ（エネルギー分散型分析装置：EDS）、引張強度（引張疲労試験法）、弾性率（ひずみ）、交差強度（交点の固着強度）である。

3.2.3 室内における硫酸水溶液浸漬試験

作製したモルタル用供試体（直径 75mm、高さ 150mm の円柱形）を濃度の異なる 3 種類の硫酸水溶液（1%、5%、10%）に浸漬して耐硫酸性能を検証した。

調査項目は、質量変化率（試験前後の重量変化）、中性化深さ（フェノールフタレイン法）、硫黄浸透深さ（エネルギー分散型分析装置：EDS）である。

供試体及び補強材の硫酸水溶液への浸漬期間は、4 週間（28 日）、8 週間（56 日）、13 週間（91 日）、

17 週間（119 日）、21 週間（147 日）及び 26 週間（182 日）とした。

3.2.4 調査時期

調査の実施時期は、表 4 のとおりである。

表 4 調査の実施時期

調査項目		開始	第 1 回	第 2 回	第 3 回	第 4 回	第 5 回	第 6 回	第 7 回
みやぎ	環境調査	13.3	13.8	13.11	14.4	14.8	14.12	15.6	15.10
	劣化度調査	～5	14.5	14.11	15.11	—	—	—	—
砂町	環境調査	14.7	14.9	14.12	15.6	15.10	—	—	—
	劣化度調査		14.11	15.8	—	—	—	—	—

注）表中の数字は、平成年月を示す。

4. 調査結果と考察

4.1 みやぎ水再生センター（試験施工及び施工品質の耐久性確認）

(1) 試験施工

試験施工は、平成 13 年 3～5 月の間に汚泥分配槽で実施した。対象施設の施工前（劣化状況）、施工中（設置状況）及び施工終了後の状況を図 4～6 に示す。



図 4 施工前の状況



図 5 FRP 補強材の設置状況



図 6 施工終了後の状況

(2) 環境調査

環境調査のうち、汚泥分配槽内(№1 ～ 3 槽)の硫化水素濃度の測定結果を表 5 及び図 7 に示す。
 なお、図 7 は各調査月の平均値(1 日 24 時間連続測定 の平均)を示す。

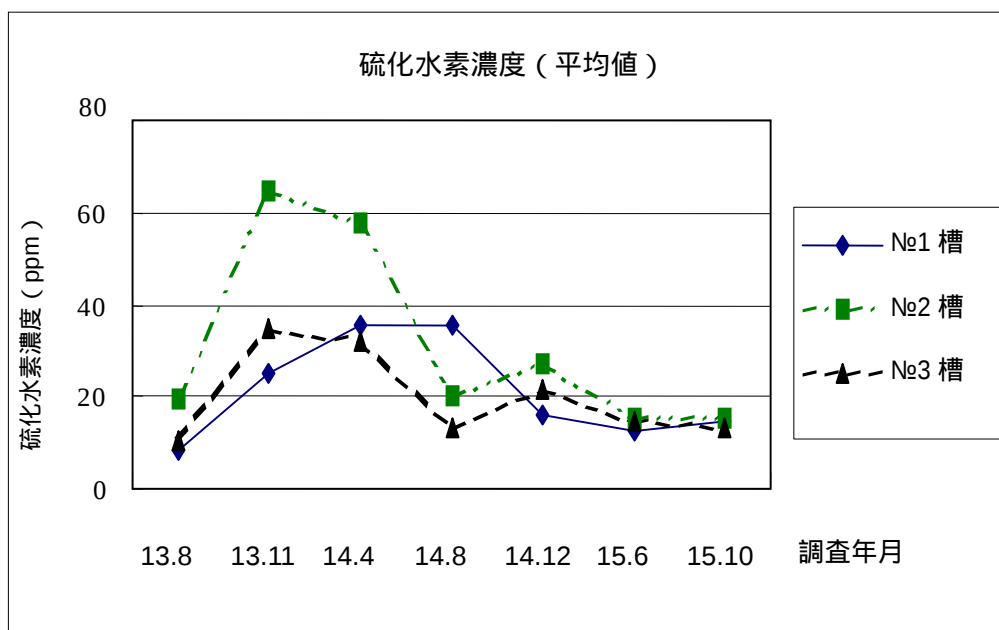
施設内の腐食環境は、硫化水素濃度の平均が 20 ～ 30ppm 程度であることから、「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術指針・同マニュアル(平成 14 年 12 月) 日本下水道事業団」によると Ⅱ 類(年間平均硫化水素濃度が 10 ～ 50ppm の腐食環境)に分類される。

表 5 硫化水素濃度の測定結果

箇 所	注 1) 平均値 (ppm)	注 2) 最高値 (ppm)
№1 槽	21.0	267.0
№2 槽	31.3	455.0
№3 槽	19.8	139.7
平 均	24.1	-

注 1) 平均値は、各調査月の平均である。なお、測定は各調査月のうちの
 1 日(1 日 24 時間連続測定)のみである。

注 2) 最高値は、各測定のうち最高値を示した値である。



(3) 劣化度調査

1) 劣化度の指標

下水道施設におけるコンクリート構造物の主な劣化要因は、硫化水素に起因する化学的劣化(硫酸劣化)である。劣化度の指標には、脆弱化深さ、中性化深さ、硫黄浸透深さがある。各指標の概念を図 8 に示す。

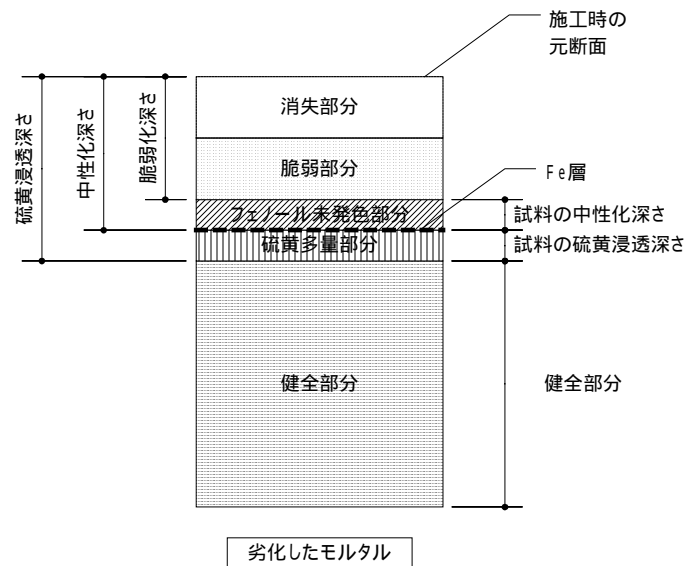


図 8 劣化深さの概念

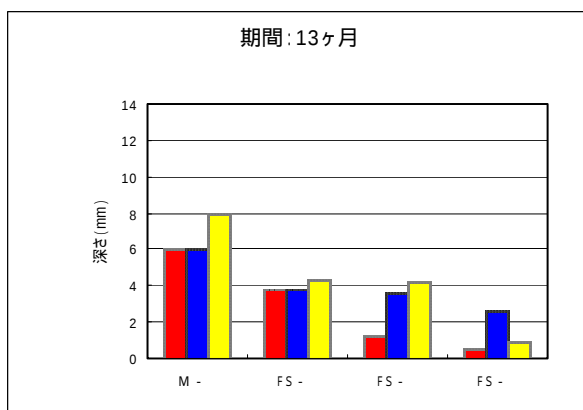
2) 劣化度の調査結果

汚泥分配槽内における主な材料の劣化度調査の結果を表 6 及び図 9 に示す。

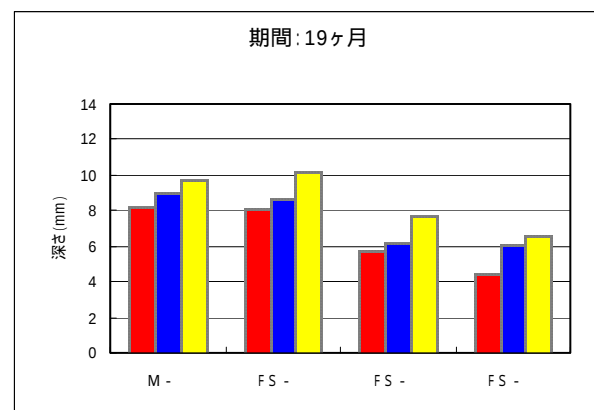
表 6 材料別及び経過年数別の中性化深さ

種 別	1 年後(mm)	1.5 年(mm)	2.5 年(mm)
M-1	6.00 (8.00)	9.05 (9.75)	11.50 (11.50)
FS-	3.87 (4.37)	8.69 (10.19)	8.65 (8.65)
FS-	3.63 (4.23)	6.22 (7.72)	6.13 (6.63)
FS-	2.70 (1.00)	3.96 (2.61)	4.00 (4.50)

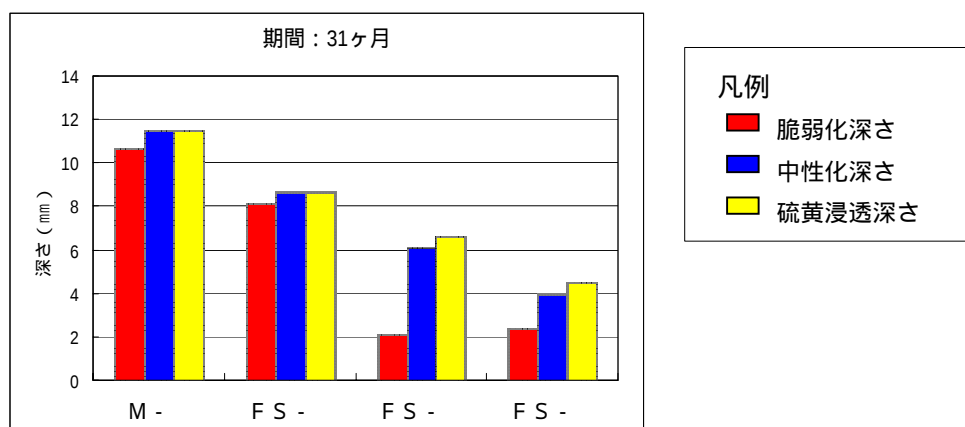
注)() 内は、硫黄浸透深さである。



(1 年後)



(1.5 年後)



(2.5年後)
 図9 材料別・経過年数別の劣化度

今回新たに開発した超微粒子高炉スラグ系モルタル（耐酸性モルタル）である FS- 及び FS- の 2.5 年経過した時点での劣化度（中性化深さ）は、断面修復材として一般的に用いられていた高強度モルタル（M-1）と比較して、耐酸性モルタル（FS- ）は約 1/2、耐酸性モルタル（FS- ）は約 1/3 であり、両材料とも良好な耐酸性を示していることが確認された。

3 点（1 年後、1.5 年後、2.5 年後）の実測値から回帰分析により求めた中性化深さの回帰式及び相関係数、回帰式より算出した 5 年後及び 10 年後の予測値を表 7 に示す。

供用 10 年後の中性化深さを予測した結果、FS- （超微粒子高炉スラグ系モルタル）が 14.3mm、FS- （超微粒子高炉スラグ系モルタル）が 7.5mm となり、M-1（高強度モルタル）の 31.5mm に対して約 1/2 と約 1/4 である。

また、回帰式による予測値から M-1（高強度モルタル）では年間 3mm 程度、FS- （超微粒子高炉スラグ系モルタル）及び FS- （超微粒子高炉スラグ系モルタル）では年間 1mm 前後の劣化が進行すると推測される。

表 7 供用施設における中性化深さから求めた予測値

種 別	回 帰 式	相関係数	2.5 年後の 実測値(mm)	5 年後の 予測値(mm)	10 年後の 予測値(mm)
M-1	$y = 6.2797 \times x^{0.6998}$	$R^2 = 0.95$	11.5	19.4	31.5
FS-	$y = 4.5763 \times x^{0.8401}$	$R^2 = 0.69$	8.65 (75%)	17.7 (91%)	31.7 (100%)
FS-	$y = 4.0662 \times x^{0.5463}$	$R^2 = 0.67$	6.13 (53%)	9.8 (50%)	14.3 (45%)
FS-	$y = 2.9172 \times x^{0.4115}$	$R^2 = 0.71$	4.00 (34%)	5.7 (29%)	7.5 (23%)

注 1) y : 中性化深さ (mm) x : 供用年数 (年)

注 2) () 内は、M-1（高強度モルタル）を 100 としたときの比率である。

4.2 砂町水再生センター（供試体の暴露試験）

(1) 環境調査

環境調査のうち、施設内における硫化水素濃度の測定結果を表 8 に示す。

表 8 硫化水素濃度の測定結果

(ppm)

調査箇所	平成 14 年 9 月	平成 14 年 12 月	平成 15 年 6 月	平成 15 年 10 月
汚泥濃縮槽	1.8	10.7	49.7	4.2
導 水 渠	8.5	1.7	0	0.3

(2) 劣化度調査

汚泥濃縮槽と第一沈殿池の導水渠における劣化度調査の結果を表 9、図 10～11 に示す。なお、各劣化度は、暴露試験の開始（平成 14 年 7 月）からの経過時点における測定の結果である。

表 9 材料別及び経時変化別の劣化度

供試体の状況	調査箇所	材料種別	中性化深さ(mm)		硫黄浸透深さ(mm)	
			4 ヶ月後	13 ヶ月後	4 ヶ月後	13 ヶ月後
未被覆	汚泥濃縮槽	C-	0	2.4	4.0	3.4
		NM-	0	0.7	2.0	9.7
		M-	0	0	0	1.0
		FS-	0	0	0.2	1.0
		FS-	0	0.5	0	1.0
		SS-	0	1.0	1.0	2.0
	第一沈殿池導水渠	C-	0	3.4	0	6.4
		NM-	0	1.1	0	4.1
		M-	0	0	0	0.5
		FS-	0	0.4	0	0.9
		FS-	0	0.7	0	1.2
		SS-	0	1.0	0	1.0

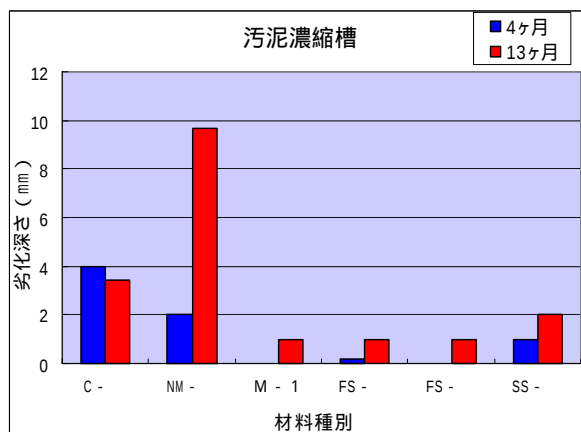


図 10 硫黄浸透深さ（汚泥濃縮槽）

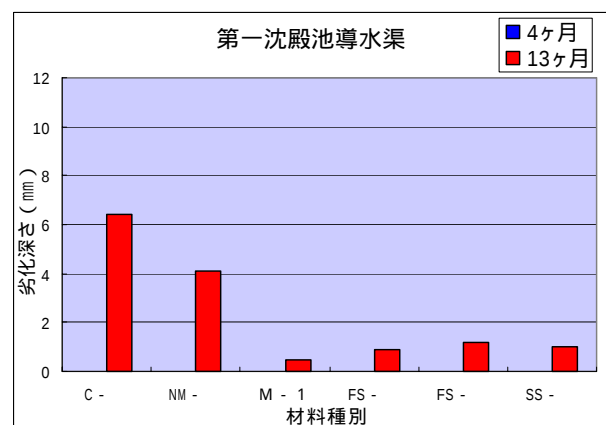


図 11 硫黄浸透深さ（第一沈殿池導水渠）

(3) 補強材の劣化度調査

1) FRP グリッド

FRP グリッドにおける引張強さ、弾性率及び交点強さの経年変化を表 10、図 12～13 に示す。
なお、FRP グリッドの外観には、特に異常は認められなかった。

表 10 FRP グリッドの経年変化（引張強さ、弾性率及び交差強）

調 査 項 目	未曝露	4 ヶ月後	13 ヶ月後
引張強さ (N/mm ²)	1,588	1,632	1,584
弾性率 (N/mm ²)	100.3	99.8	102.7
交点強さ (N/mm ²)	11.9	11.8	13.3

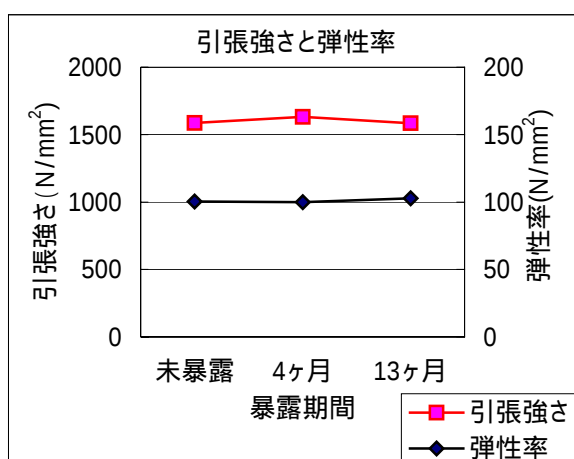


図 12 引張強さ及び弾性率の経年変化

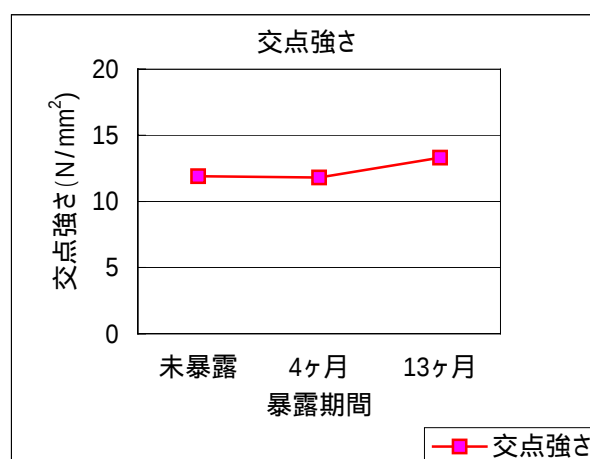


図 13 交点強さの経年変化

2) FRP ロッド

FRP ロッドの引張強さ及び弾性率の経年変化を表 11 に示す。なお、FRP ロッドの外観には、特に異常は認められなかった。

表 11 FRP ロッドの経年変化（引張強さ及び弾性率）

調査項目	未曝露	4 ヶ月後	13 ヶ月後
引張強さ (N/mm ²)	2,236	2,208	2,251
弾性率 (N/mm ²)	154	151	152

3) 鉄筋（異形棒鋼）

異形棒鋼の経年変化を表 12、図 14 に示す。

曝露 4 ヶ月後において 3 本ある供試体のうち、2 本は全面に赤錆が発生していた。他の 1 本は節部に錆が見られる程度で、発錆率は全体面積の 10%程度であった。

一方、曝露 13 ヶ月後では 3 本の供試体のすべての表面全体に赤錆が発生していた。

表 12 鉄筋の経年変化（引張強さ）

経 年	降伏点（N/mm ² ）	引張強さ（N/mm ² ）	伸び（％）
未 曝 露	352	524	27.3
4 ヶ月後	344	519	26.0
13 ヶ月後	302	449	21.0

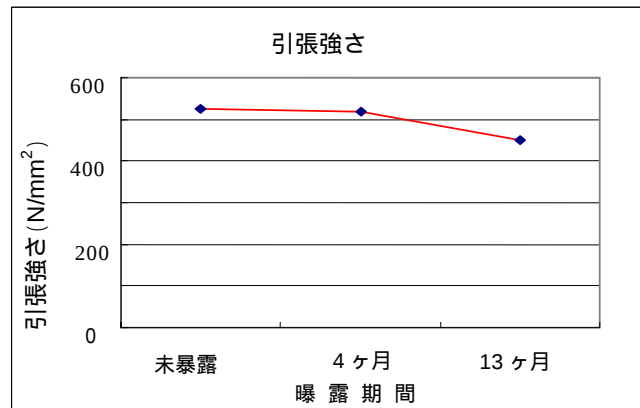


図 14 引張強さの経年変化

4) 補強材の引張強さ

3 種類ある補強材の引張強さの変化率を表 13 及び図 15 に示す。耐食性 FRP 補強材（グリッド、ロッド）は、約 1 年間（13 ヶ月）の曝露試験でも強度の低下は認められなかった。一方、鉄筋（異形棒鋼）については、約 14%の強度低下があった。

表 13 引張強さの変化率（％）

材料種別	未曝露	4 ヶ月後	13 ヶ月後
FRP グリッド	0	+ 2.8	- 0.3
FRP ロッド	0	- 1.3	+ 0.7
異 形 棒 鋼	0	- 1.0	- 14.3

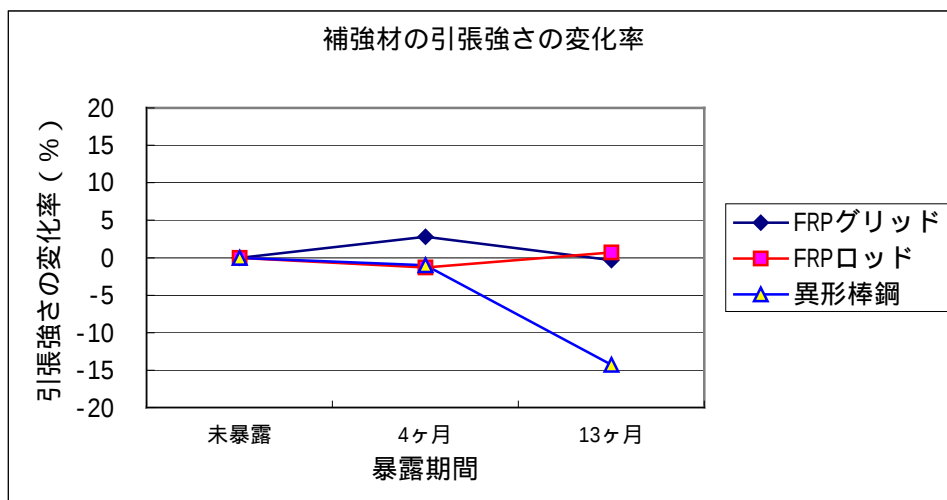


図 15 引張強さの変化率

4.3 室内における硫酸水溶液浸漬試験

(1) 試験体の劣化状況

10%の硫酸水溶液に21週間浸漬した後の試験体の劣化状況を図16に示す。



M- (高強度モルタル)

FS- (耐酸性モルタル)

FS- (耐酸性モルタル)

図16 硫酸水溶液浸漬後の劣化状況

(2) 劣化度試験

質量変化率(浸漬後質量 - 浸漬前質量) / 浸漬前質量 × 100 及び硫酸浸透深さの結果を表14及び図17に示す。

表14 材料別及び経年変化による質量変化率

(1%硫酸水溶液浸漬：%)

材齢 種別	4週間	8週間	13週間	17週間	21週間	26週間
C-	2.7	6.1	8.5	10.1	11.8	—
NM-	2.7	6.2	9.1	11.2	13.7	—
M-	0.5	4.1	7.8	12.2	14.1	—
FS-	4.1	8.2	11.0	12.9	14.6	—
FS-	1.0	3.3	4.3	5.0	5.7	—
SS-	3.7	7.5	10.2	11.7	13.0	—

(5%硫酸水溶液浸漬：%)

材齢 種別	4週間	8週間	13週間	17週間	21週間	26週間
C-	11.4	20.0	30.0	38.3	47.3	—
NM-	25.2	46.1	64.3	75.5	81.7	—
M-	19.2	33.3	47.5	56.2	65.3	—
FS-	3.4	5.6	7.2	8.7	11.1	—
FS-	2.0	3.0	4.7	5.3	5.3	—
SS-	3.2	5.0	7.4	10.9	12.9	—

(10%硫酸水溶液浸漬：%)

材齢 種別	4週間	8週間	13週間	17週間	21週間	26週間
C-	21.5	38.4	56.3	73.1	81.5	97.6
NM-	39.1	64.6	87.0	95.3	99.8	消失
M-	40.1	61.5	82.3	93.7	99.2	消失
FS-	6.9	19.4	34.5	44.2	50.3	59.3
FS-	5.8	9.2	9.0	9.0	7.8	7.0
SS-	6.4	22.6	36.2	45.9	50.6	58.9

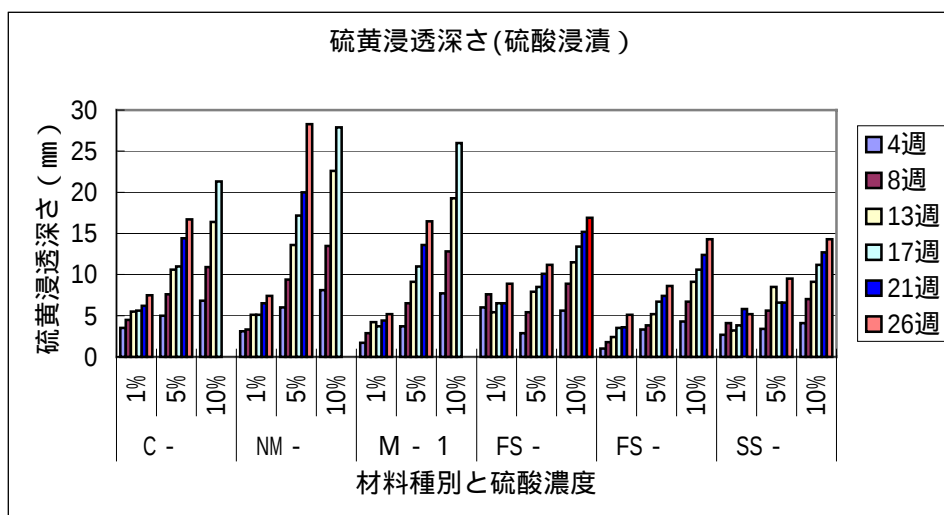


図 17 材料別及び経年変化による硫黄浸透深さ

1%硫酸水溶液浸漬では、質量変化率と硫黄浸透深さとも材料間に有意な差は認められなかった。
 5%硫酸水溶液浸漬では、高強度モルタル(M-1)と比較して超微粒子高炉スラグ系モルタル(FS-、FS-)及び汚泥溶融スラグ系モルタル(SS-)の硫黄浸透深さは、約 2/3 ~ 1/2 (68%、52%、58%) であり、良好な耐酸性能を有している。また、質量変化率についても有意な差がでた。
 10%硫酸水溶液浸漬では、コンクリート(C-)や高強度モルタル(M-)は 21 週間目で 30mm 以上の中性化や劣化進行により崩壊した。

なお、各材料の中性化深さは測定値にばらつきがあるものの、硫黄浸透深さよりおおむね 1mm 程度 (0 ~ 3mm) 少ない。

(3) 劣化度の予測

5%硫酸水溶液浸漬の測定値から、回帰分析 (硫黄浸透深さはばらつきがあったので中性化深さから求めた。)により、回帰式及び 10 年後の予測値を求めた。結果は、表 15 に示すとおりである。

なお、予測には 1%硫酸水溶液浸漬では各材料間に有意な差がないこと、また、10%硫酸水溶液浸漬では試験中に供試体が崩壊したことなどから、5%硫酸水溶液浸漬による測定値を採用した。

表 15 室内 5%硫酸水溶液浸漬における中性化深さから求めた予測値

種 別	回 帰 式	相関係数	0.5 年後の 実測値(mm)	2.5 年後の 予測値(mm)	10 年後の 予測値(mm)
C-	$y = 0.2949 \times x^{0.7506}$	$R^2 = 0.983$	15.2	49.2	139.2
NM-	$y = 0.2164 \times x^{0.9107}$	$R^2 = 0.990$	27.3	107.4	380.0
M-	$y = 0.2718 \times x^{0.7829}$	$R^2 = 0.998$	16.5	56.5	167.2
FS-	$y = 0.3688 \times x^{0.6276}$	$R^2 = 0.988$	10.1 (61%)	26.6 (47%)	63.5 (38%)
FS-	$y = 0.2519 \times x^{0.6687}$	$R^2 = 0.999$	8.2 (50%)	24.0 (42%)	60.7 (36%)
SS-	$y = 0.3237 \times x^{0.6160}$	$R^2 = 0.987$	8.0 (48%)	21.6 (38%)	50.6 (30%)

注 1) y : 中性化深さ (mm) x : 浸漬日数

注 2) () 内は、M-1 (高強度モルタル) を 100 としたときの比率である。

5. まとめ

5.1 耐酸性モルタル

(1) 耐酸性モルタル（超微粒子高炉スラグ系）

超微粒子高炉スラグ系の耐酸性モルタル（A、B）は、従来から下水道施設におけるコンクリート構造物の断面修復材として使用されている高強度モルタルと比較して、同等以上の強度特性や施工性を有していることが確認できた。さらに、超微粒子高炉スラグ系耐酸性モルタル（A、B）は、高強度モルタルに対して約2倍程度の耐酸性能を有していた。

なお、超微粒子高炉スラグ系耐酸性モルタル（A、B）の価格は、高強度モルタルと比較して約10%～20%程度割高であるが、耐酸性能や耐久性能の面で優れており、トータル的には高強度モルタルより優位であると言える。

(2) 耐酸性モルタル（汚泥溶融スラグ系）

汚泥溶融スラグ系耐酸性モルタルは、超微粒子高炉スラグ系耐硫酸性モルタル（A、B）と同程度の性能を有していた。

なお、当局の南部スラッジプラントで製造していた汚泥溶融スラグについては、平成13年度末をもって生産を中止している。

5.2 耐食性FRP補強材

耐食性FRP補強材（FRPグリッド、FRPロッド）は、コンクリートやモルタルの補強材として有効な高強度特性を有しており、現在道路橋などの一般コンクリート構造物の補強材料としても広く利用されている。

耐食性FRP補強材は、下水道施設における硫化水素による腐食環境でも強度（引張）の低下や劣化状況の変化は特に認められず、耐久性に優れていた。また、軽量であることから運搬や施工性にも優れている。さらに、加工（切断等）についても特殊な工具を必要としないなど有利な面がある。

5.3 劣化コンクリート補修工法の開発と結果

耐酸性モルタル及び耐食性FRP補強材を組み合わせた当工法は、下水道施設特有の劣化状況に対応した補修工法及び補強工法としての優位性があることが確認できた。

当工法は、従来用いられている工法（高強度モルタル＋鉄筋）に比べて工事価格は割高であるが、耐用年数及び維持管理費を含めたトータル的なコストの面で有意である。

6. 今後の展開

各腐食環境条件による劣化進行の予測は、施設の維持管理計画の策定においてコンクリート構造物の経年による劣化深さ及び劣化進行速度を推定し、施設の要求品質性能の判定、残存期間の予測、施設調査の要否とその時期の判定、改修工事の要否とその時期の判定等を行う際に重要な指標となる。

このことから、本調査で得られた劣化予測値や実際の施設で行われている定期点検や施設調査で収集されたデータ等を用いて、精度の高い劣化予測診断システムを構築することで、適切な時期での改修工事及び各腐食環境条件の相違や期待残存耐用年数に適合する工法の選定等が可能となる。

この結果、当局における計画的な維持管理計画の策定と、さらには維持管理を含めたコストの縮減を実現させることが可能になるものと考ええる。

本調査は約3年間の実施であったが、耐久性を評価するデータが十分に収集できなかった。今後さらに追跡調査を継続することにより、精度の高い劣化進行の予測が可能になることを期待している。

最後に、本調査に協力して頂いた、みやぎ水再生センター及び砂町水再生センターの関係各位に対し、感謝申し上げます。