

耐硫酸防食被覆工法の事後調査 — 防食被覆層の現状の性能について —

日本下水道事業団 技術戦略部 技術開発企画課

瀧本 由樹



● 発表内容の位置づけ

基礎・固有調査研究—標準化技術

硫酸腐食対策の充実による施設長寿命化

本報告の内容

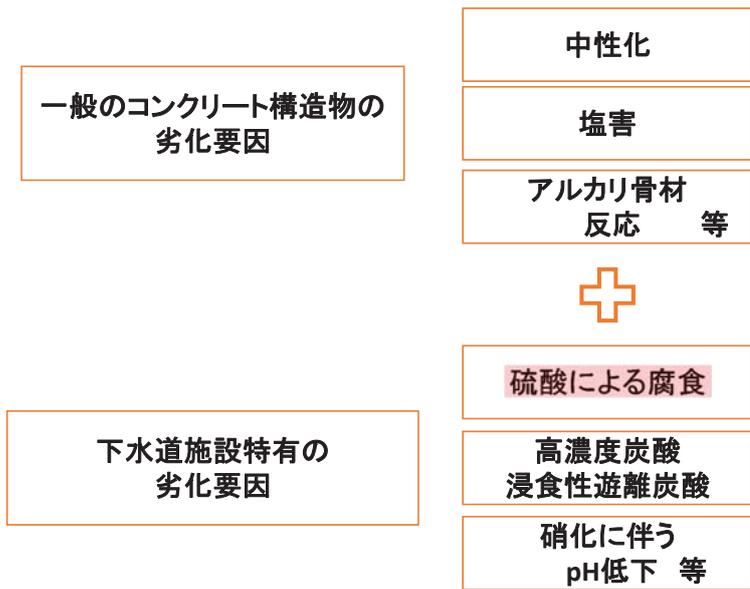
耐硫酸防食被覆工法の事後調査

- ・ 実施設において腐食環境の測定
- ・ 防食被覆層の劣化状況の調査

耐硫酸モルタルフォローアップ調査

- ・ 実施設において試験施工したモルタルライニング工法のフォローアップ調査
- ・ 同環境における試験体の暴露試験

● コンクリート腐食対策技術

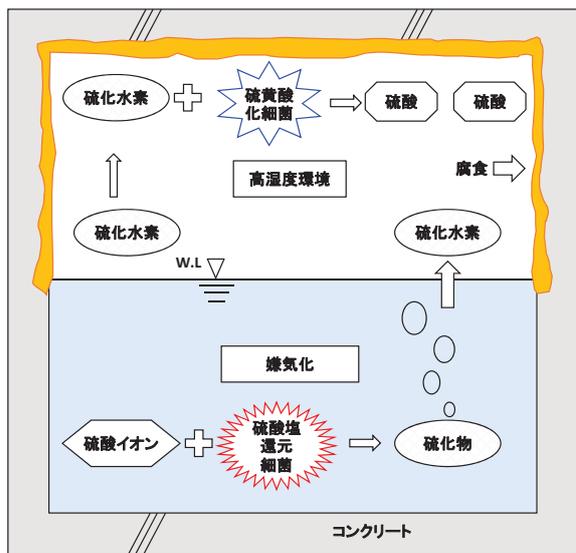


硫酸によるコンクリート構造物の腐食事例

着水井
 硫化水素ガス濃度30~60ppm
 経過年数23年

硫酸腐食は構造物の耐久性を著しく低下させる

● コンクリート腐食対策技術



下水道施設における硫酸によるコンクリート腐食の概念図



コンクリート腐食の抑制技術
 コンクリートの防食技術

低pH(強酸性)域ではパテ状下水の飛沫程度で断面欠損

技術開発等

- 試験研究・共同研究
 - ✓ 1980年代から施設の実態調査やコンクリート腐食メカニズム、コンクリート防食技術等の調査研究を継続的に実施
 - ✓ 1993年以降コンクリート防食技術(設計・施工方法、材料など多岐にわたる)について民間企業との共同研究を実施
- 技術評価
 - ✓ 2001年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
 - ✓ 2008年耐硫酸モルタル防食技術の技術評価
 - ✓ 2015年シートライニング工法(光硬化型)による防食技術の技術評価

技術基準類の整備

- コンクリート防食塗装指針(案)
 - ✓ 1987年 制定
- コンクリート防食指針(案)
 - ✓ 1991年 制定
 - ✓ 1993年 第一次改定
 - ✓ 1997年 第二次改定
- 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(防食マニュアル)
 - ✓ 2002年 制定
 - ✓ 2007年 第一次改定
 - ✓ 2012年 第二次改定
 - ✓ 2017年 第三次改定

↓
下水道施設の
防食技術に関する
デファクトスタンダード

硫酸によるコンクリート腐食に係る各種の防食被覆工法について、技術開発を行うとともに、技術基準の整備を継続的に実施

背景

- 防食被覆層には設計耐用年数内において性能の維持が求められる
- 長期間供用後の性能を調査した事例は少ない

手段と目的

- 実施設の腐食環境の把握
- 被覆層の劣化状況の把握

↓
被覆層の長期供用後の性能を確認・評価※
防食マニュアルの品質規格の妥当性の検証

※定量的な評価基準がないため、防食被覆層に要求される品質規格値(以降、「規格値」とする。)に基づき評価を行う

仕様要求性能

耐久性

防食被覆層の
基本的な要求性能

耐硫酸性

遮断性

接着安定性

※設計耐用年数(標準:10年)の間、防食被覆層としての機能の維持が求められている

基本的な要求性能の品質規格※1

要求性能	評価項目	塗布型ライニング工法	
		C種	D種
耐硫酸性	外観	試験条件: 10%の硫酸水溶液に45日浸漬	試験条件: 10%の硫酸水溶液に60日浸漬
		膨れ割れ、軟化、溶出がない	
遮断性	硫黄侵入深さ	試験条件: 10%の硫酸水溶液に120日浸漬	試験条件: 10%の硫酸水溶液に120日浸漬
		設計厚に対し10%以下、かつ200μm以下であること	設計厚に対し5%以下、かつ100μm以下であること
接着安定性※2	躯体との一体性	標準状態: 1.5N/mm ² 以上 吸水状態: 1.2N/mm ² 以上	

※1 材料の品質規格を示す。
 ※2 材料の品質規格のほか、施工完了後の現地検査基準が存在する。
 平均値: 1.5N/mm²、最小値: 1.2N/mm²

調査内容

実施設の腐食環境

→腐食環境調査
(稼働中の施設で実施)

- 硫化水素濃度
- 防食被覆層の表面pH 等



硫化水素濃度測定

→施設状況調査

- 施設管理者へのヒアリング 等

被覆層の現状の性能

→劣化状況調査
(停止中の施設で実施)

- 目視調査
- 硫酸侵入深強さ試験 等



接着強度試験

調査数(平成30~令和3年)

供用年数	件数
10年未満	2
10年以上20年未満	6
20年以上	6
防食被覆の施工方法・材料	件数
塗布型ライニング工法 (エポキシ樹脂)	7
塗布型ライニング工法 (ビニルエステル樹脂)	2
塗布型ライニング工法 (ポリウレア樹脂)	2
塗布型ライニング工法 (セラミックパウダー入りエポキシ樹脂)	2
塗布型ライニング工法以外	1

全14施設の内、11施設(供用年数10年以上かつ積層仕様の塗布型ライニング工法の施設)の調査結果について報告する。

● 調査施設の概要

		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
防食被覆層	材料	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	ポリウレア樹脂	ビニルエステル樹脂	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	エポキシ樹脂	ポリウレア樹脂	ビニルエステル樹脂
	工法規格	D種	D種	D種	C種	D種	C種	D種	C種	C種	C種	C種
防食被覆層の供用年数		26	23	22	17	13	17	16	12	19	20	21
調査施設		貯留槽(余剰汚泥)	重力濃縮槽	重力濃縮槽	重力濃縮槽	貯留槽(混合汚泥)	貯留槽(混合汚泥)	最初沈殿池	最初沈殿池	沈砂池水路	最初沈殿池	最初沈殿池
調査時期		10月	2月	9月	10月	2月	10月	11月	10月	11月	1月	9月

処理施設で分類した場合

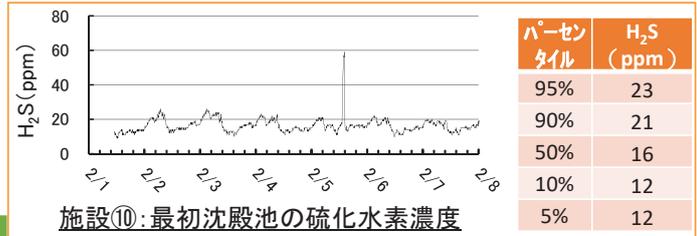
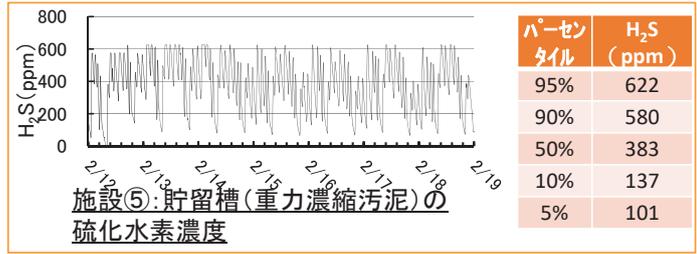
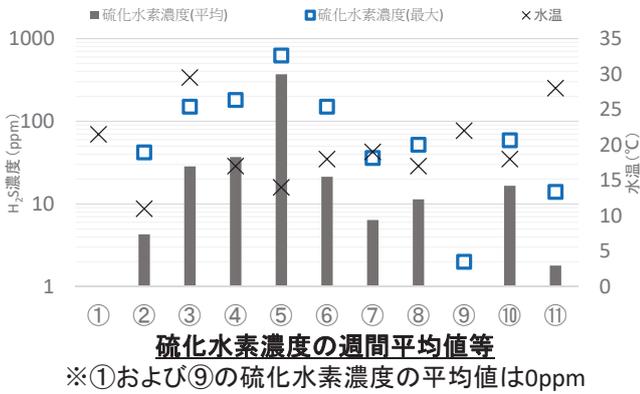
調査施設	件数	調査施設	件数
汚泥処理施設	6	水処理施設	5
重力濃縮槽	3	沈砂池水路	1
貯留槽(余剰汚泥)	1	最初沈殿池	4
貯留槽(混合汚泥)	2		

被覆材料で分類した場合

防食被覆の材料	件数
エポキシ樹脂	7
ポリウレア樹脂	2
ビニルエステル樹脂	2

調査の結果(硫化水素濃度)

➤ 硫化水素濃度は1週間の連続測定データ(2秒ピッチ)を5分ごとに平均して集計



設計腐食環境

年間平均H ₂ S	腐食環境
I類 50ppm以上	コンクリート腐食が 極度 に見られる
II類 10ppm以上50ppm未満	コンクリート腐食が 顕著 に見られる
III類 10ppm未満	コンクリート腐食が 明らか に見られる
IV類	硫酸による腐食はほとんど生じないが、コンクリートに接する液相が酸性状態になりえる

- 6施設でII類以上の腐食環境
- 2施設で週平均値が0ppm
 - ✓ 施設①は期間通じて0ppm
 - ✓ 施設⑨は概ね0ppm、時々1~2ppm

調査の結果(目視調査:耐硫酸性の検証)

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪
一部に浮きや剥がれ 全体的には健全	浮きや剥がれ 落下のコンクリートは脆弱	天井、梁、壁に浮きや剥がれ 梁の出隅では顕著	梁の出隅部やトラフの壁面に浮きや剥がれ	壁部に防食被覆の浮き	膨れや浮きはみられず、健全	一部白化があり劣化の兆候あり 特段の異常がなく健全	膨れや浮きはみられず、健全	梁の出隅の一部で膨れ 全体的には健全	天井、梁、壁面の一部に剥がれや浮き	一部白化があり劣化の兆候あり 特段の異常がなく健全
iv	ii	ii	ii	iii	v	iv	v	iv	iii	iv

「下水道事業のストックマネジメント実施に関するガイドライン-2015年版-(平成27年11月国土交通省水管理・国土保全局下水道部、国土交通省国土技術政策総合研究所下水道部)」に示される土木建築の健全度の判定例を参考にした防食被覆層の健全度。**劣化状況と範囲に基づきv(異常なし)~i(著しい劣化)**で表現される。

健全度 (劣化・程度の範囲)	構造物の状態
v	異常なし
iv(小)	劣化の兆候はあるが防食機能上問題がない
iii(中)	劣化が進行しているが保護機能は維持されている
ii(大)	劣化が進行し、防食被覆層の機能維持が困難
i(顕著)	劣化が著しく防食機能が失われている

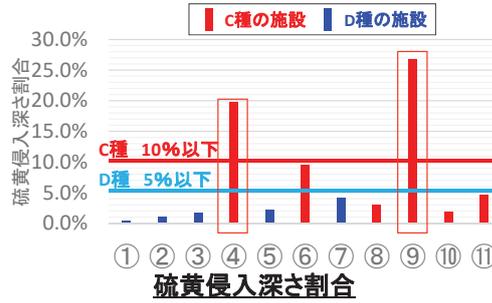
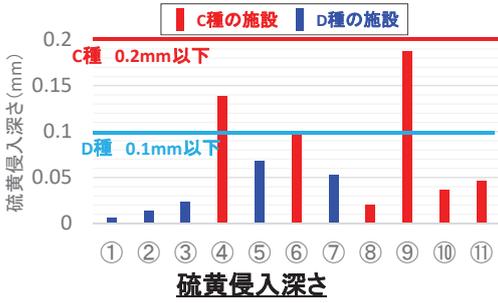
○ :健全度 i, ii, もしくは iii の施設
□ :硫化水素濃度が10ppm以上の施設

品質規格:10%の硫酸に45日(C種)または60日(D種)浸漬し膨れ、割れ、軟化、溶出が無いこと

- 5施設で中・大程度の表面異常
 - ✓ うち4施設がII類以上の腐食環境
 - ✓ 浮きは**全施設**、剥がれは**4施設**
- 耐硫酸性は腐食環境の影響を受ける可能性
 - ✓ 一方、腐食環境に**依らない施設も存在する**点は注意
→施工不良(ピンホール、塗り斑等)に起因する可能性

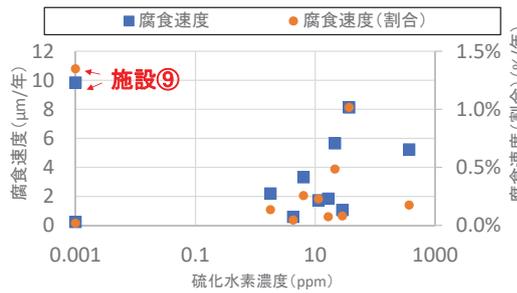
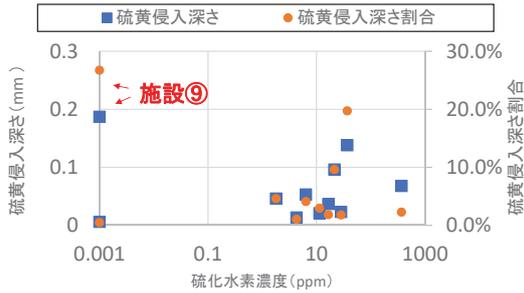
調査の結果(硫黄侵入深さ:遮断性の検証)

- 防食被覆層の硫黄侵入深さはEPMA(電子線マイクロアナライザー)分析により計測
- 硫黄侵入深さ割合は硫黄侵入深さを既存の防食被覆層厚で除した値
- 腐食速度は硫黄侵入深さを供用年数で除した値



品質規格:設計厚に対し10%以下、かつ200 μ m以下(C種)または設計厚に対し5%以下、かつ100 μ m以下(C種)

- 9施設は規格値以内
 - ✓ このうち8施設の侵入割合は0.5~4.6%で比較的表層
- 2施設は硫黄侵入深さ割合が規格値を超過
 - ✓ 硫黄侵入深さは規格値以内
 - ✓ 2施設ともエポキシ樹脂(C種)
 - ✓ 施設⑨はH₂S濃度が極低
- 腐食速度は硫化水素濃度に影響を受ける傾向
 - ✓ 施設⑨はこの傾向から逸脱
- 遮断性は概ね確保されている



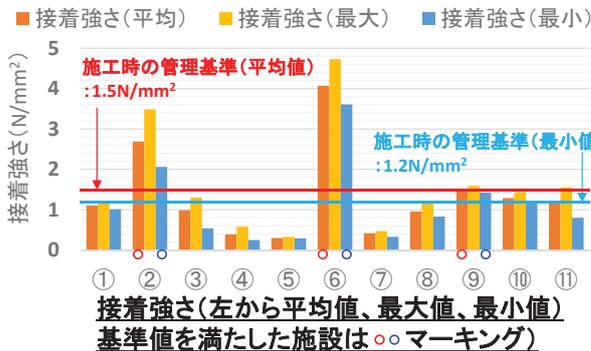
硫化水素濃度と硫黄侵入深さの関係

硫化水素濃度と腐食速度および腐食速度(割合)の関係

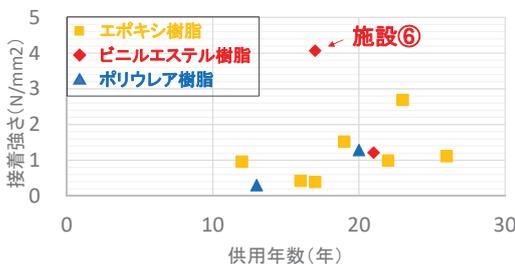
調査の結果(接着強さ:接着安定性の検証)

- 接着強さは実施設内において測定
- 調査をした箇所は、表面異常のない箇所を選定

施工完了後の検査基準値
 ・平均値:1.5N/mm²以上
 ・最小値:1.2N/mm²以上
 ※以上規格を共に満足する必要がある



- 3施設は基準値(平均値、最小値)以上
 - ✓ 施設②および⑥は、基準値を大きく上回っていた
- 8施設は基準値(平均値、最小値)以下
 - ✓ 接着強度の低下が示唆される
 - ✓ 施設①は硫化水素濃度が極低
- 材料ごとの極端なばらつきは見られない
- 接着安定性は長期の供用では性能の維持が困難である可能性



供用年数と接着強さ(平均値)の関係



硫化水素濃度と接着強さ(平均値)の関係

● 調査の結果(耐久性の検証)

13

			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	
供用年数			26	23	22	17	13	17	16	12	19	20	21	
調査施設			貯留槽 (余剰汚泥)	重力 濃縮槽	重力 濃縮槽	重力 濃縮槽	貯留槽 (重力濃 縮汚泥)	貯留槽 (混合汚 泥)	最初 沈殿池	最初 沈殿池	沈砂池 水路	最初 沈殿池	最初 沈殿池	
硫化水素濃度			調査結果 ppm	0.0	4.3	28.5	37	371.2	21.4	6.4	11.4	0.0	16.6	1.8
耐硫酸性	▶ 表面異常	調査結果	-	iv	ii	ii	ii	iii	v	iv	v	iv	iii	iv
		評価※		○	×	×	×	×	○	○	○	○	×	○
硫黄侵入深さ			調査結果 mm	0.006	0.013	0.023	0.138	0.068	0.096	0.053	0.021	0.187	0.037	0.046
遮断性	▶ 硫黄侵入深さ割合	調査結果	-	0.5%	1.0%	1.8%	17.3%	2.3%	8.2%	4.1%	2.7%	25.6%	1.5%	2.8%
		評価※		○	○	○	×	○	○	○	○	○	×	○
接着安定性	▶ 接着強さ(平均値)	調査結果	N/mm ²	1.11	2.69	0.99	0.39	0.30	4.07	0.42	0.96	1.52	1.29	1.21
		調査結果	N/mm ²	1.01	2.06	0.54	0.25	0.29	3.61	0.33	0.83	1.43	1.16	0.8
		評価※		×	○	×	×	×	○	×	×	○	×	×

※評価は防食被覆材料が満足すべき品質規格または施工完了後に満足すべき検査基準値に基づき行った。
(調査結果が規格値または基準値を満足もしくは健全度がiv, v:○、左記以外:×)

- 11施設のうち1施設(⑥)で3項目とも評価が○(適)であった
- 施設毎の不適(×)の項目数は硫化水素濃度に影響をうける傾向が見られた
- 評価が不適(×)となった施設数は、接着安定性が8施設で最も多く、遮断性が2施設と最も少なかった

● まとめ

14

耐硫酸性(表面異常)

- 5施設で防食被覆層の浮きや剥がれ等の表面異常
→ 梁出隅部等、施工不良起因の可能性あり

遮断性(硫黄侵入深さ)

- 2施設で規格値(硫黄侵入深さ割合)を超過
→ 最大25%程度。大部分は5%以下。
- 長期間供用でも概ね性能を維持できる

接着安定性(接着強さ)

- 8施設で施工完了後の基準値に未達
- 経年劣化等に起因して接着強さは低下する可能性

耐久性

- 1施設で3性能の品質を維持

品質規格の妥当性等

- 最も基本的な性能である防食被覆層自体の遮断性の観点からは、品質規格は概ね妥当と判断
- 防食被覆層の耐久性の向上の観点からは、接着安定性(接着強さの維持)が課題。
- 標準的な設計耐用年数10年を超えての使用にあたっては、接着安定性の確認が必要。評価方法の確立は今後の課題。

- 竹内智哉,清水克祐,橋本敏一: 下水処理場におけるコンクリート腐食および防食被覆工法の実態調査, 第55回下水道研究発表会講演集, pp.854-856, 2018.
- 中西 啓,山下 洋正,清水 克祐: 下水処理場における耐硫酸防食被覆工法の現地調査結果について, 第56回下水道研究発表会講演集, pp.863-865, 2019.
- 中西啓: 下水処理場における防食被覆工法の事後調査, 防水ジャーナル, Vol.51(No.4), pp.75-78, 2020.
- 瀧本 由樹,中西 啓,細川 和也,橋本 敏一: 実施設における腐食環境および耐硫酸防食被覆層の劣化状況の実態, 第57回下水道研究発表会講演集, pp.805-807, 2020.
- 瀧本由樹,細川 和也,糸川 浩紀,橋本 敏一: 実施設における腐食環境に応じた耐硫酸防食被覆層の劣化傾向, 第58回下水道研究発表会講演集, pp.491-493, 2021.

— 謝 辞 —

本調査の実施にあたり、ご協力を賜りました自治体関係者各位に
感謝の意を表します。

ご清聴いただきありがとうございました。