

論文 下水道コンクリート構造物のエポキシ樹脂 による防食および耐久性について

嘉指 成詞*¹, 杉田 博*², 藤原 陽*³, 猿田 明德*⁴

趣旨: 近年, 下水道施設コンクリート構造物において, 硫化水素に起因する硫酸の影響でコンクリートの化学的侵食が確認されている。平成3年, 日本下水道事業団よりコンクリート防食に関する指針として, 防食材料にエポキシ樹脂を用いた「コンクリート防食指針(案)」が制定されたが, 防食の効果, エポキシ樹脂の耐久性については不明な点が多く, 全国上下水道エポキシ工事業協会では, 全国の10箇所の下水処理施設に防食供試体を暴露することでエポキシ樹脂ライニング工法の耐久性, 有効性を確認したので, 内容について報告する。

キーワード: 下水道, コンクリート, 防食, エポキシ樹脂

1. はじめに

下水道施設におけるコンクリート構造物の腐食システム, 腐食状況については不明な部分が多かった。昭和60年頃下水道処理施設コンクリート構造物の調査結果より, 腐食環境が整えばコンクリートの劣化は急速に進行することが明らかになり, 日本下水道事業団より昭和62年に「コンクリート防食塗装指針(案)」が制定され, 防食塗装材料としてはエポキシ樹脂系材料が標準として設計されていた。¹⁾

平成3年には硫化水素に起因するコンクリート腐食機構と統計的なコンクリート腐食対策について示された「コンクリート防食指針

(案)」が制定された。防食材料としてはエポキシ樹脂系の他, ポリエステル樹脂, ビニルエステル樹脂が追加され, 腐食環境条件についてもA~D種に分類されより現状の腐食環境に即した指針となった。^{2, 3)}

平成13年には「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」が発表された。報告書ではコンクリート腐食のシステム, 腐食抑制技術, 防食技術についてより詳細な評価が記載されており, 昭和後期に比べて下水道施設コンクリート構造物の腐食に関してより明確にされてきている。

しかしエポキシ樹脂ライニングが指針で制定され, 施工実績も多数あるにもかかわらず, 耐久性に関して明確にされていなかった。当協会では防食指針(案)が制定された平成3年より全国10箇所の下水道処理施設にエポキシ樹脂で防食被覆したコンクリート供試体を実暴露し, その変化を経時で調査することでエポキシ樹脂ライニングの耐久性を確認してきたが, 暴露試験開始より10年程度経過した供試体の調査結果について述べてみたい。

全国上下水道エポキシ工事業協会 会員

* 1 サンユレック(株) 建設材料事業部 グループリーダー

* 2 コニシ(株) 研究開発第4部 係長

* 3 日米レジン(株) 技術部 係長

* 4 大日本色材工業(株) 開発1課

2. エポキシ樹脂ライニング工法

下水道事業団防食指針（案）におけるエポキシ樹脂ライニング工法例を表-1に示す。

表-1 エポキシ樹脂ライニング工法例

腐食環境条件	防食材料	仕様	設計膜厚 (mm)
A種	エポキシ樹脂又はタールエポキシ樹脂	塗り回数2回以上の被覆	0.2以上
B種	エポキシ樹脂	塗り回数3回以上の被覆	0.35以上
C種	エポキシ樹脂	補強材(ガラスクロス)を1プライ積層の被覆	0.7以上
	セラミックパウダー入りエポキシ樹脂	塗り回数1回以上の被覆	3.0以上
D種	エポキシ樹脂	補強材(ガラスクロス)を2プライ積層の被覆	1.3以上
	セラミックパウダー入りエポキシ樹脂	塗り回数1回以上の被覆	5.0以上

3. コンクリート暴露調査概要

全国10箇所における暴露を実施しているが2処理場、3構造物について報告する。

3.1 暴露条件

R市処理場の予備曝気槽、汚泥濃縮槽及びQ市処理場の汚泥濃縮槽の気相部で暴露を実施し



写真-1 コンクリート供試体暴露状況

た。暴露状況は写真-1、暴露環境は表-2、防食を施さないブランクコンクリートの腐食状況は図1を参照。

3.2 コンクリート供試体

10×10×40 cm (約10kg)

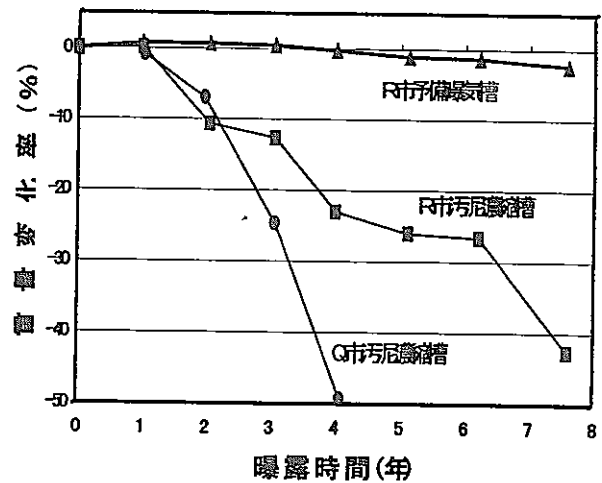


図-1 ブランクコンクリートの腐食状況

表-2 各処施設の暴露環境

項目	R市処理場		Q市処理場
	予備曝気槽	汚泥濃縮槽	汚泥濃縮槽
硫化水素ガス濃度 (ppm)	0~2.0	5~390	5~150
炭酸ガス濃度 (%)	0.05~0.11	0.07~1.7	0.25~3.0
コンクリート躯体状況	気相部全面が骨材露出	流出部付近の腐食顕著	コンクリートは1cm以上の深さで脆弱化

3.3 防食仕様：表-3の仕様で試験体を作成し暴露を実施

表-3 暴露供試体の防食仕様

項目	R市処理場		Q市処理場
	予備曝気槽	汚泥濃縮槽	汚泥濃縮槽
防食仕様	A：ブランク（無塗装）	○	○
	B：カラーエポキシ350 μ m	○	
	C：タールエポキシ500	○	○
	D：カラーエポキシ500	○	○
	E：タールエポキシ1mm（ガラスプライ）	○	○
	F：カラーエポキシ1mm（ガラスプライ）		○
	G：タールエポキシモルタル3mm	○	○
	H：クリヤーエポキシモルタル3mm		○
	I：クリアーエポキシセメントモルタル3mm		○
	K：クリヤーエポキシモルタル5mm		○

3.4 調査項目

調査項目として、供試体の重量変化、動弾性係数、超音波伝播時間を年1回の調査時に現地で行った。また、付着強度、中性化深さ及び電子線マイクロアナライザー（EPMA）を用いて硫黄浸透深さを測定した。

3.5 調査結果

ブランク供試体は表-2、図-1に示すように、硫化水素濃度の高い汚泥処理施設で腐食により重量が減少しており、特に腐食の激しいQ市の汚泥処理では供試体の重量が約4年で半分程度まで減少しているが、エポキシ樹脂で防食被覆した供試体では重量変化その他に大きな変化が見られず腐食環境の厳しい汚泥濃縮槽の実暴露試験においてエポキシ樹脂ライニングの有用性を確認できた（図-2参照）。例としてカラーエポキシ500 μ 仕様（D）の硫黄浸透深さ測定結果を表-4に示す。

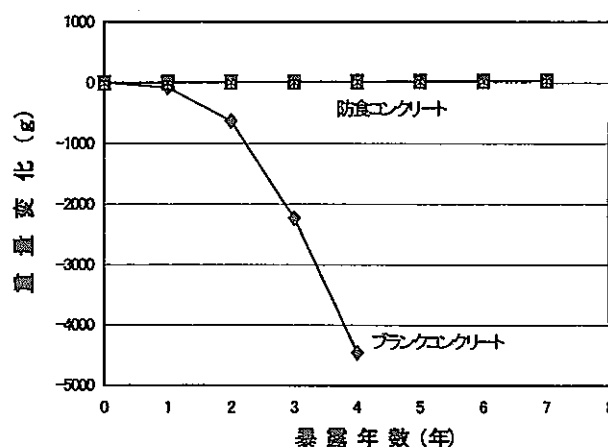


図-2 Q市汚泥濃縮槽における重量変化

表-4 硫黄浸透深さ測定結果

項目	R市処理場		Q市処理場
	予備曝気槽	汚泥濃縮槽	汚泥濃縮槽
供試体	ガラス球径500 μ 工法 D-1	ガラス球径500 μ 工法 D-3	ガラス球径500 μ 工法 D-34
暴露時間	7.9年 (2882日)	7.9年 (2882日)	6.56年 (2393日)
硫黄元素の浸透深さ	8 μ m	95 μ m	315 μ m

4. エポキシ樹脂ライニングの寿命予測

東京工業大学 久保内教授らによると有機系防食材料の内、エポキシ樹脂の硫酸による腐食形態は「全面侵入型」に分類される。これは酸が塗膜内部、すなわち塗膜の分解反応が起きる部分に拡散侵入によって到達した後に反応が進行するタイプであり、腐食は浸透拡散に支配されて腐食劣化を起こすと考えられるため、浸透深さによって腐食劣化を把握できる。(4)

また、土木学会「コンクリート標準示方書」ではコンクリートの化学的浸食の進行予測を実施する際に、酸性劣化ではpHが低い場合(pH=1~3程度)には、劣化因子の浸透深さは時間の平方根に比例する場合が多いとしており、塗膜内部の硫黄浸透深さを予測することで寿命推定を実施している。(√t則) (5, 6)

4.1 暴露試験による寿命予測

暴露試験結果をもとに下記の手法を用いた経年における硫黄浸透深さ予想を表-5, 図-3に示す。

寿命推定の結果、Q市汚泥濃縮槽で30年程度の寿命が予想され、さらに腐食環境が緩やかな、R市予備曝気槽、汚泥濃縮槽では硫化水素に起因する硫黄元素の浸透によるコンクリートの腐食劣化は発生しない結果が得られた。

表-5 硫黄浸透予測

項目	R市処理場		Q市処理場
	予備曝気槽	汚泥濃縮槽	汚泥濃縮槽
暴露時間	7.9年 (2882日)	7.9年 (2882日)	6.56年 (2393日)
硫黄元素の浸透深さ	8μm	95μm	315μm
b:劣化因子の浸透速度	0.149	1.77	6.44
防食被覆部設計塗膜厚	350μm	700μm	700μm
寿命推定	15117年	429年	32年

√t則

$$y = b\sqrt{t}$$

y:劣化因子の浸透深さ(μm)

t:化学的浸食をもたらす物質に暴露される期間(日)

b:劣化因子の浸透速度(μm/√日)

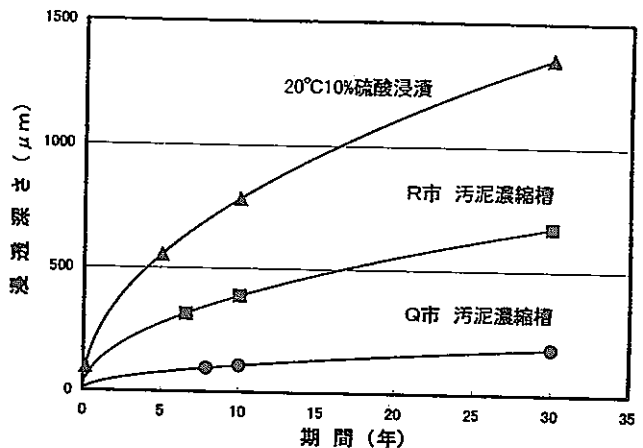


図-3 協会塗料化学品の硫黄浸透深さ予測

4.2 暴露試験と硫酸浸漬試験との比較

下水道事業団防食指針(案)では耐硫酸性試験として20℃ 10%硫酸水溶液に試験体を浸漬することで評価を実施している。暴露試験に用いたエポキシ樹脂(H4)を指針(案)の試験方法と同様に20℃, 10%硫酸水溶液に浸漬した結果と暴露結果とを比較した。結果を表-6, 図-3に示す。

表-6 協会塗料化学品(H4)の硫黄浸透深さ

項目	56日後
硫黄元素浸透深さ	97μm
b:劣化因子の浸透速度 (μm/√日)	12.96

以上のように硫黄元素がコンクリート躯体又は素地調整材に到達するまでの時間を防食材料の寿命として考えた場合、Q市汚泥濃縮槽では30年程度の寿命が予想され、さらに腐食環境が緩やかな、R市予備曝気槽、汚泥濃縮槽では実質硫黄元素の浸透によるコンクリートの腐食劣化は推定されない結果が得られた。

また、硫酸浸漬試験では腐食環境の非常に厳しいQ市の汚泥濃縮槽よりさらに倍程度硫黄浸透速度が速く、20℃、10%硫酸浸漬結果で得られた寿命予測は、実際の汚泥処理施設での供用を想定した場合、おおよそ2~10倍程度の安全係数が見込まれる（R市汚泥濃縮槽：7.3倍 Q市汚泥濃縮槽：2.0倍）。

5. 協会における耐硫酸性試験

暴露試験以外に数種のエポキシ樹脂を20℃、10%硫酸水溶液に浸漬させ、浸漬後の特性を評価している。

表-7 試験材料及び硫黄浸透深さ（20℃、10%硫酸水溶液浸漬）

番号	材 料	硫黄浸透深さ (μm)	
		56日後	120日後
H1	協会標準当量配合	52	82
H2	協会標準 硬化剤-20%	19	34
H3	協会標準 硬化剤+20%	152	267
H4	協会標準塗料化品	97	174
H5	エポキシ/ポリアミド	390	650
C1	クリアー品①	13	20
C2	クリアー品②	7	20
C3	クリアー品③	29	42
L1	塗料化品①	35	59
L2	塗料化品②	35	73
L3	塗料化品③	4	19
L4	塗料化品④	13	20

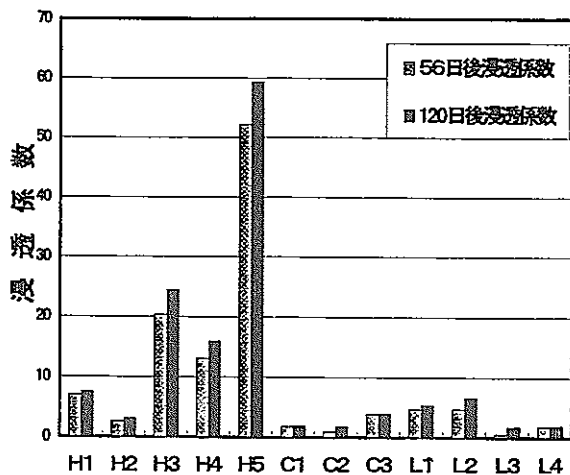


図-4 硫黄拡散係数 b ($\mu\text{m}/\sqrt{\text{日}}$)

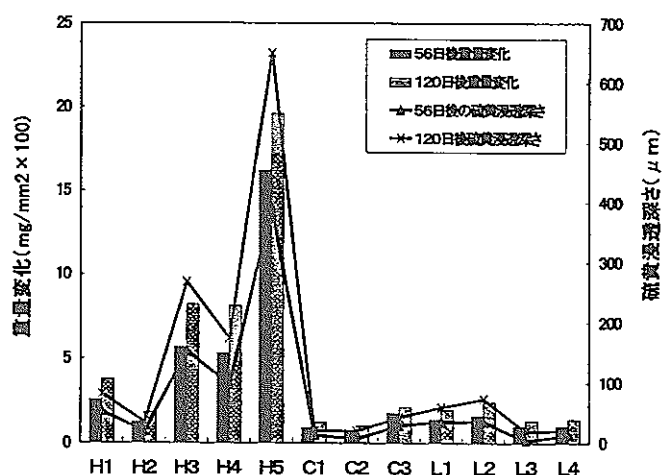


図-5 浸漬後の重量変化および硫黄浸透深さ

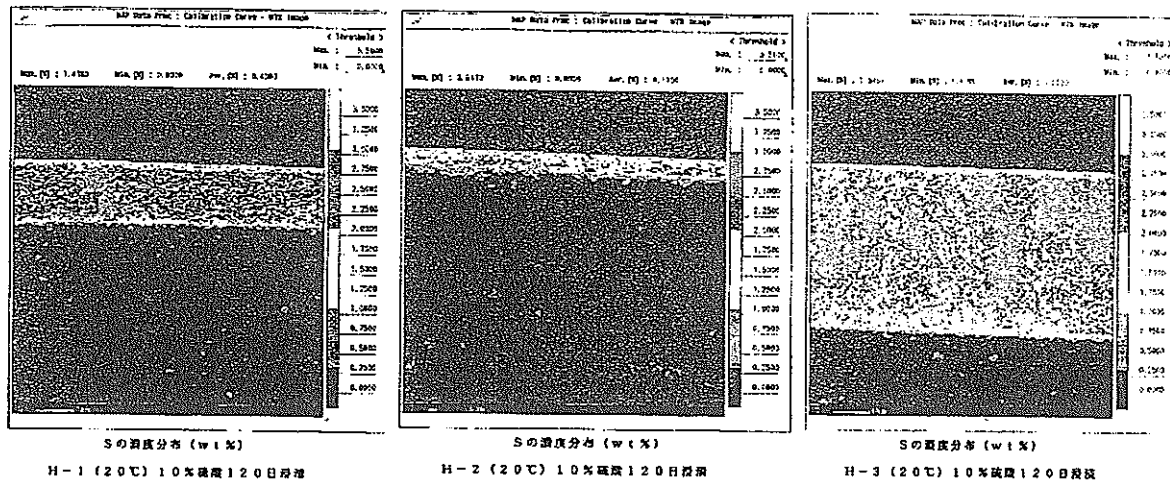


写真-2 協会標準エポキシの配合比による硫黄浸透深さ (H1, 2, 3)

表-7のH1, 2, 3は同じ材料を用いても、配合比が異なると、写真-2の様に硫黄浸透深さが異なり耐硫酸性が異なる結果が得られた。また、配合メーカーで種々の変性を加えたクリア樹脂(C)及び塗料化樹脂(L)ではより耐酸性の優れたものもあり、使用する材料の選択、変性の方法等で耐硫酸性が異なる結果が得られた。

図-4では56, 120日後の拡散係数を比較した結果で、浸漬日数が異なっても同程度の拡散係数であり、エポキシ樹脂における硫黄浸透深さが拡散則に従って浸透していると考えられる。また、硫酸浸漬後の重量変化は硫黄浸透深さとおおむね相関が得られ、耐硫酸性の評価を浸漬後の重量変化で評価できると考える(図-5)。

6. まとめ

約10年間、下水道施設における暴露試験の結果、腐食環境の非常に厳しいQ市汚泥処理施設においてもエポキシ樹脂による防食ライニングの有用性が確認された。さらに、拡散則による寿命推定でも30年以上の寿命が期待でき、R市のような平均的な腐食環境の汚泥濃縮槽では実質的には硫黄浸透によって直接コンクリート躯体が腐食されない結果がえられた。従って、H4程度の耐硫酸性を有していれば、硫黄の浸透拡散における腐食が発生しないと考えられる。防食材料の他の性能として、躯体コンク

リートとの接着性、湿潤接着性、塗膜層間の密着性を含めた一体化が重要であると考えられる。また、同一配合においても配合比率が異なること、耐硫酸性等の特性が変化することから、現場における工程管理・施工管理・施工技術の向上が重要と考える。

今後、生活の多様化により益々腐食環境が厳しくなる傾向にあり、今後、更にエポキシ樹脂ライニングの耐酸性・一体性等の性能を向上する事で、腐食環境の厳しい施設における防食材料として適用できると考える。

参考文献

- 1) 下水道事業団 コンクリート防食塗装指針(案)昭和62年3月
- 2) 下水道事業団 コンクリート防食指針(案)平成3年6月
- 3) 下水道事業団 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 平成13年3月
- 4) 津田, 久保内 日本海水学会誌 第52巻第1号(1998) 水溶液環境下における樹脂およびFRPの腐食
- 5) 土木学会 コンクリート標準示方書[維持管理編] 制定資料 平成13年1月
- 6) 土木学会 コンクリート標準示方書[維持管理編] 平成13年1月