T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報 Article / Book Information

論題(和文)	既設濃縮余剰汚泥貯留槽の調査結果に基づく防食被覆工法の有効性の 検討	
Title(English)		
著者(和文)		
Authors(English)	Ryuta Imai, Nobuhiro Chijiwa, Ken-ichi Fujisawa, Manabu Fujii	
出典(和文)	コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, ,	
Citation(English)	Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol. 45, ,	
発行日 / Pub. date	2023, 7	

論文 既設濃縮余剰汚泥貯留槽の調査結果に基づく防食被覆工法の有効性 の検討

今井 隆太*1・千々和 伸浩*2・藤澤 健一*3・藤井 学*4

要旨: 下水道コンクリート構造物では,硫酸によるコンクリート腐食の対策として防食被覆工法が採用され ているが,長期供用後の実構造物に対し行った調査・分析の報告は少ないのが現状である。本研究で行った 調査から,防食被覆層が残っている部分では,コンクリートが露出している部分と比較しコンクリート内部 の硫黄濃度は低く,表層部のビッカース硬度の低下は生じていないことが分かった。これらの調査・分析結 果に基づき,防食被覆工法の有効性を検討した結果,供用開始から20年経過した実環境下においても防食被 覆層は硫酸によるコンクリート腐食の抑制に寄与し続けていることを確認できた。 キーワード:濃縮余剰汚泥貯留槽,防食被覆,硫酸腐食,EPMA,硫黄濃度分布,ビッカース硬さ

1. はじめに

下水道コンクリート構造物は、10年を待たずして防食 工事を再度実施する事例¹⁾がある。その原因は、硫酸に よるコンクリートの腐食である。日本の下水道構造物で の硫酸腐食は、1980年以降に顕在化し相次いで報告され ている。この事態を受けて、1987年に日本下水道事業団 がコンクリート腐食対策の技術基準であるコンクリート 防食塗装指針(案)を制定した。そして、2002年に設計・ 施工・維持管理にわたる総合的な腐食対策を明確化した 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 マニュアル(以下,防食マニュアル)を制定した。

防食マニュアル²⁾では、コンクリート表面の被覆及び コンクリート自身の耐硫酸性向上の2種類がコンクリー トへの対策として制定されている。コンクリート表面の 被覆工法のうち、塗布型ライニング工法の施工実績が多 い³⁾。しかしながら、防食対策が実施されても硫酸によ る腐食環境からコンクリート構造物が遮断されず、コン クリート腐食につながった事例⁴⁾がある。また、橋本ら ⁵⁾が行った調査でも、防食被覆層の劣化を報告している。 これらの表面異常の発生が部分的であったことや作業が 困難な箇所で見られたことから、橋本らは経年劣化では なく施工不良の可能性を指摘している。しかしながら、 防食被覆層の劣化や剥離の有無によるコンクリートへの 影響を技術的に評価・検討した研究はほとんどない。

そこで,防食被覆層によりコンクリートの硫酸腐食の 抑制効果を検討することを本稿の目的とした。初めに, 20年間供用されたコンクリート構造物を対象とし,防食 被覆層の有無に関わらず気相部や液相部の部材ごとに調 査及びコア採取を行った。そして,採取したコアに対し, 力学性能を評価するための強度評価試験を行うとともに,

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系 (学生会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系准教授 (正会員)

*3 日本ジッコウ株式会社 技術研究所

*4 東京工業大学 環境・社会理工学院土木・環境工学系准教授

硫黄の侵入深さを検討するために EPMA 試験を行った。 これらの調査・試験に基づき,実構造物における硫酸腐 食に対する防食被覆層の有効性を検討する。

2. 下水処理場における調査

2.1 調査対象施設の概要

調査対象施設は、汚泥処理過程の濃縮余剰汚泥貯留槽 である。防食マニュアルでは、硫化水素ガスが発生しや すい箇所として取り上げられている。この貯留槽では、 2001年に防食工事が行われ、槽全面を範囲としてエポキ シ樹脂を用いた防食被覆(エポキシ樹脂+補強材1プラ イ積層、硬化後厚さ0.7mm以上)が行われた。そして、 工事後20年経過した2021年に調査及び防食工事を実施 した。

2.2 硫化水素ガスの発生状況

硫化水素ガス濃度の測定では、株式会社ガステックの 拡散式硫化水素測定器(GHS-7AT)を用いた。測定条件





図-2 気相部の劣化状況



図-3 壁面の劣化状況

は、ロギング間隔5分間で各測定区間の最大値を記録した。測定期間は、2021年8月3月9時から2021年8月10日10時までの7日間である。

測定結果を図-1 に示す。平均硫化水素ガス濃度は、 14.01ppm となった。この平均濃度から、調査施設の腐食 環境は、防食マニュアルより腐食環境II類に相当する。 また、測定期間内において、8月8日0時台に最大硫化 水素ガス濃度 624ppm を観測し、この変動の大きさは筆 者らが行った返流水槽での観測結果のと同じ傾向である。 最大硫化水素ガス濃度を観測した後、濃度の変化が起き ていない原因は、8日午前中の降雨により汚泥・汚水中 の溶存酸素が多くなり嫌気性細菌である硫酸塩還元細菌 の活性度が低下したためだと考えられる。

2.3 濃縮余剰汚泥貯留タンクの内部状況

濃縮余剰汚泥貯留槽内部の劣化状況を図-2に示す。

気相部においては,梁及び柱の出隅部において防食被 覆層の剥離が生じ,コンクリート腐食及び断面欠損に繋 がっていた。また,天井及び壁面においても部分的に同 様の現象が生じ,骨材が露出していた(図-3)。

気相部の防食被覆層表面及びコンクリートが露出して いる箇所の表面 pH を pH 試験紙により測定した。その 結果,防食被覆層表面の pH は 1 程度で,コンクリート 表面も同様 pH は 1 程度であった。

水位変動部や液相部での防食被覆層は、大きな膨れや 剥離などの変状は無かったが、図-4 に示す小さなふく れが多数存在していた。防食被覆層の表面を pH 試験紙 で、防食被覆層背後のコンクリートの pH をフェノール フタレイン溶液で測定した。防食被覆層表面はpH7程度、



図-4 防食被覆層の表面の様子

表-1 コアの採取箇所

箇所	劣化の有無
生 扣如	劣化部
×148 Db	健全部
业位本新知	劣化部
不过发到可	健全部
液相部	健全部



防食被覆層背後のコンクリートは pH9 以上であった。

2.4 採取コアの概要

コアは,壁面から表-1 に示す箇所から採取した。壁 面からの劣化有無に関して,コンクリートが露出してい る箇所を「劣化部」,防食被覆層が残存している箇所を「健 全部」と評価する。また採取コアの直径は45 mmである。 各試験では,対象箇所から複数採取したものを試験ごと に分けて使用し,試験体の再使用はしない。

3. 試験目的及び概要

3.1 圧縮強さ試験

硫酸腐食の影響を受けていない箇所 (図-5) のサンプ ルに対し圧縮強さ試験を行い,使用されたコンクリート 本来の力学性能を評価する。一方,硫酸腐食の影響があ る表層部については,圧縮強さ試験が困難であることか ら,ビッカース試験によって力学性能を評価する。

試験方法に関しては, JIS A 1107 及び JIS A 1108 に従った。試験体サイズが直径 45mm で高さ 90mm となるように, 圧縮強度が表層部の劣化程度に左右されない深部から圧縮強さ試験体を採取した。また, 載荷中のひずみより JIS A 1149 に基づき静弾性係数を算出した。

3.2 EPMA 試験

硫酸によるコンクリート腐食深さを評価するために EPMA 試験を行った。日本電子株式会社の電子プローブ マイクロアナライザー (EPMA)を用い,硫黄元素,カル シウム元素及び鉄元素の濃度を,面分析により測定を行 った。EPMA 試験の測定条件を表-2 に示す。

試験試料は端部及び劣化部保護のためにアクリル樹脂 によって樹脂埋めを行い,乾式カッターにより切断した 後,粒度 80,180,320,400,600,800,1200番の順に 研磨を行った。研磨後,表面の異物除去のために超音波 洗浄を行った。

「硫黄侵入深さ」と「劣化深さ」を図-6のように定義 する。EPMA 試験から得られる硫黄の到達深さは、「硫黄 侵入深さ」である。「劣化深さ」は、「硫黄侵入深さ」と 劣化部コンクリートの表層部の剥落した「剥落深さ」の 和とする。なお、調査時、腐食の進行が激しい箇所があ り、施工当時のコンクリート表面位置を推定できなかっ たため、劣化部において「劣化深さ」は「硫黄侵入深さ」 と一致せず、「劣化深さ」は「硫黄侵入深さ」よりも大き いことに注意が必要である。

3.3 ビッカース試験

硫酸イオンの侵入によりセメント硬化体の微小構造は



表-2 EPMA 測定条件		
試料分析サイズ	35×45 mm	
プローブ径	100 µm	
ピクセルサイズ	100×100 µm	
単位測定時間	50 ms	
加速電圧	15.0 kV	
照射電流	100 nA	
測定元素	S, Ca, Fe	

変化するため,ビッカース試験によりコンクリート表層 部の微小領域の硬度を測定し,力学特性の変化を検討す る。

株式会社島津製作所の微小硬度計 (HMV-G31D-HC) を 用い, 試験力 980.7mN, 荷重保持時間 15 秒の条件で試験 を行った。圧子には, 対面角 136°のビッカース圧子を 用い式(1)からビッカース硬さを測定した。

$$HV = 0.1891 \frac{F}{d^2}$$
(1)

測定箇所は、コンクリート表面から 0.1 (劣化部コアの み)、0.3、0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、 9.0、10.0、15.0 (mm)の合計 14 点である。1 測定点に付 き 30 回測定を行い各測定位置において、95%信頼区間 「平均値±1.96×標準偏差」を基に分布の歪み(非対称 性)を考慮した「第 1 四分位値—0.983×四分位範囲」以 上、「第 3 四分位値—0.983×四分位範囲」以下の範囲に存 在する測定値を平均した。四分位値及び四分位範囲を用 いた理由は、今回の試験データが正規分布に従わず、外 れ値に影響を受けないように考慮したためである。

4. 試験結果及び考察

4.1 圧縮強さ試験

5 か所(表-1)のコアでの圧縮強度の平均値は 38.2N/mm²,変動係数は 0.18,静弾性係数の平均値は 28.6kN/mm²,変動係数は 0.035 となった。圧縮強度の最 も低かった箇所は水位変動部の劣化部で,設計基準強度 24.0N/mm²の 119%程度となった。硫酸による腐食を受 けていない健全なコンクリートは,設計で想定した力学 性能を満足する状態を維持できている結果となった。

圧縮強度及び静弾性係数と天井部からの深さとの関



係を図-7 に示す。圧縮強度は水位変動部あるいは液相 部で低い結果となった。静弾性係数は、気相部が最も高 く液相部で最も低い結果となった。この原因として、静 弾性係数が液相部で最も小さいことからコンクリート中 に何らかの要因で微細ひび割れが発生していた可能性や、 液相部の圧縮強度が水位変動部よりわずかに高いことか ら施工時の打継ぎによるコンクリート特性に違いがある 可能性などが考えられるが、本研究の範囲では特定する ことが出来なかった。

4.2 EPMA 試験

図-8 に硫黄の侵入状況,図-9 にカルシウムの溶脱 状況を示す。健全部の結果において,劣化因子侵入面側 で直線状に硫黄が分布している箇所は防食被覆層の領域 である。EPMA の面分析結果を元にした,コンクリート 表面から深さ 10mm までの濃度分布を図-10 に示す。

気相部の硫黄侵入深さは、劣化部で7.2mm、健全部で 3.8mm となった。劣化部では、硫黄濃度が5.0%に達して いる領域で、カルシムの溶脱が 3.2mm の深さまで見られ た。この領域では、S/Ca モル比から、エトリンガイト及 び二水石膏の生成が推定できたため、コンクリート腐食 はかなり進行していると考えられる。健全部では、防食 被覆層背後のコンクリート部分に濃度の高い箇所がある が、図中の上側は濃度が高くないため、防食被覆層が剥 離していた箇所から硫酸が拡散してきたかピンホールな どの欠陥部分から硫酸が拡散した可能性がある。この硫 黄が侵入している領域では、S/Ca モル比からモノサルフ ェートの生成が推定されたため、コンクリート腐食を引 き起こす量の硫酸は侵入していないと考えられる。した がって、防食被覆層が残り、なおかつ欠陥がない箇所で は、硫酸腐食は抑制できている。

水位変動部の硫黄侵入深さは、劣化部で7.8mm、健全 部で0.6mmとなった。劣化部において、気相部に比べ硫 黄濃度が低い理由は、コア採取時あるいは供用中に表層 部の硫黄濃度の高い脆弱層が剥離したため、硫黄濃度の



低い領域が表面に露出したためだと考える。劣化部に比 べ健全部は,気相部と同様に硫黄濃度が低いため,防食 被覆層により硫酸腐食環境から遮断できていると考えら れる。

液相部では、コンクリート中へ硫黄の侵入が起きてお らず、防食被覆層表面で一部濃度が高い領域がありつつ も硫黄の侵入はその表層部に限られている。したがって、 液相部では、汚泥が嫌気状態で硫酸分子が硫化物に還元 されるため硫酸が生じにくかった可能性が考えられる。

図-11 に気相劣化部及び水位変動劣化部における鉄 元素の EPMA の面分析結果を示す。硫酸によるコンクリ ート腐食は二水石膏及びエトリンガイトの境界面に Fe 層が形成される²⁾が,本試験においては Fe 層の形成は見 られなかった。

4.3 ビッカース試験

図-12 にビッカース硬度分布を示す。深さ 0mm に関 して、劣化部ではコンクリートの剥落が起きているため、 施工当時のコンクリート表面位置ではない。健全部では、 コンクリートの剥落が起きていなかったため、施工当時 のコンクリート表面を表す。

気相部の劣化部だけ,硬度低下が2か所(図-12中の ①と②)で生じている。1か所目(①)は、コンクリート 表面から0.1mm付近である。この領域では、硫酸イオン の侵入による膨張性化合物の破壊、溶脱による強度低下 が生じていることに起因している可能性がある。2か所 目(②)は、7~8mmの領域である。この硬度低下の原



図-11 鉄元素の分布状況(劣化因子侵入面:左側)

因は,硫黄浸透のフロント領域で起こる硬度増加により 硫黄の侵入領域との間に硬度差が生じたためだと考えら れる。前田らは硫酸イオンが初めて到達した場合,硬度 は直ちに低下せずに,若干硬度が大きくなる傾向がある ことを報告している⁷⁾。EPMAの結果より,ビッカース 試験体においても硫黄浸透が深さ 8~10mm まで進行し ている可能性があるため,深さ 7mm と比較し深さ 8mm における硬度差が若干大きくなったと考える。

水位変動部の劣化部においては、気相部で見られた硬 度変化は起きていなかった。水位変動部では、硬度低下 が起きる表層部が外的作用により剥落したため硬度低下 は起きなかったと考えられる。

健全部においては,試験箇所に関わらず,表層部の硬 度が大きくなる傾向が見られた。硬度が大きくなった要 因として,劣化部と比較しコンクリート表面が剥落せず に,硫酸の侵入初期による硬度上昇あるいは,施工時の コンクリート中の未水和セメントが供用期間中に樹脂内 を透過してきた水分と反応し構造組織が緻密になった可 能性が考えられる。

5. 調査・分析に基づく防食被覆工法の有効性

濃縮余剰汚泥貯留槽は、コンクリートの防食対策とし て、エポキシ樹脂による防食被覆工法が採用されていた。 防食被覆工法の目的はコンクリート構造物をコンクリー ト腐食環境から遮断することである²⁾。本調査対象施設 である汚泥貯留槽は、防食マニュアルにおいて硫酸によ るコンクリート腐食への配慮が必要であるとしている。 本調査施設においては、梁や柱の出隅部及び壁面のコン クリートが露出している箇所を除き、防食被覆層が残存 している箇所では 20 年経過しても硫酸腐食環境から遮 断されていた。

実際に壁面から採取したコアに対し実施した各種試 験から,気相劣化部及び水位変動劣化部の表層部では, 高濃度の硫黄が分布し,硬度の低下を引き起こしている。 一方で,気相部の健全部でも硫黄の侵入が見られるが,



図-12 ビッカース硬度分布(実線:硬度, 点線:変動係数)



図-13 防食被覆層断面図

劣化部と比較し硫黄濃度は小さく,硬度低下は生じず, むしろ表層部の硬度が大きくなった。また,防食被覆層 が残っている水位変動部や液相部では,硫酸によるコン クリート腐食の進行を抑制できていた。以上から,適切 な施工によってエポキシ樹脂による防食被覆が実施され れば,コンクリート躯体を硫酸腐食環境から長期間保護 することが可能だと考えられる。

硫酸腐食が進行している箇所を改めて見ると図-2 に 示す通り梁や柱の出隅部,あるいは壁面で生じている。 出隅部では構造的に防食被覆層の厚さが減少しやすい部 位である。また採取したコアの防食被覆層断面部からエ ポキシ樹脂に内在される気泡が見つかっている(図-13 の赤丸)。これらのような局所的に施工厚が規定の厚さを 満たさない場所では,硫酸がコンクリートに達するまで の時間が短くなり,防食被覆の早期の剥離剥落に繋がっ た可能性がある。今後,下水道施設を確実に延命化して いくためには,このような施工などに起因したばらつき の影響を受けにくい防食工法の開発が急務であると考え らえる。

6. まとめ

本論文では,濃縮余剰汚泥貯留槽で調査・コア採取を 行い,採取したコアに対し分析を行った。調査・分析に 基づき,防食被覆工法の有効性の議論を行った。得られ た知見を以下に示す。

- (1) 濃縮余剰汚泥貯留槽は、エポキシ樹脂による防食被 覆工法がコンクリート防食対策として実施されて いた。しかしながら、梁・柱の出隅部や壁面の一部 でコンクリートの露出が見られた。この槽内は、硫 化水素ガスが平均14.01ppm発生し、防食被覆層表 面及びコンクリート露出箇所の表面はpHが1に達 している箇所もあったが、防食被覆層下のコンクリ ート表面はアルカリ領域であった。
- (2) 防食被覆層の有無による硫酸腐食の進行を確認す るために、採取したコアで分析を行った。各種分析

を通し,防食被覆層がコンクリート表面に残ってい ることにより硫黄の侵入は抑制でき,表面硬度の低 下は生じていないことが分かった。

(3) 各種分析の結果より,防食被覆工法により20年間 経過しても硫酸腐食環境からコンクリート腐食を 抑制できることが分かった。一方で,腐食が起きて いる箇所は,構造的要因や内在される気泡により局 所的に施工厚が規定の厚さを満たさないと考えら れる。このような施工などに起因したばらつきの影 響を受けにくい防食工法の開発が急務であると考 えられる。

謝辞

本研究は、公益信託下水道振興基金の助成を得て実施 したものである。検討にあたっては国立研究開発法人土 木研究所の宮本豊尚様、日本ジッコウ株式会社の倉田知 一様にも有益なご助言を賜りました。またEPMA試験 では、東京工業大学オープンファシリティーセンター分 析部門にご協力いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 大脇英司,宮原茂禎,荻野正貴,新藤竹文:耐硫酸 コンクリートを活用した下水道施設の整備と再生, コンクリート工学,54 巻,12 号,pp.1169-1177,2016
- 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マニュアル,平成 29 年 12 月
- 日本下水道事業団技術戦略部:硫酸腐食対策の充実 による施設長寿命化(平成 29 年度~令和 3 年度), 令和4年3月
- 4) 久保田慶太,河村翔太,鈴木重聡,三繩義和:既存 ポンプ場・処理場の躯体調査と硫化水素濃度測定に 関する取り組み,第53回下水道研究発表会,pp.296-298,2016
- 5) 橋本敏一, 瀧本由樹, 山森隼人, 糸川浩紀:長期間 供用された耐硫酸防食被覆層の性能等の実態, 第59 回下水道研究発表会, pp.649-651, 2022
- 6) 今井隆太,千々和伸浩,藤井学:下水道コンクリートの実測環境状態を反映するための予測手法の提案,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集,第21巻,pp.277-282,2021
- 前田悦孝,松藤泰典,原田志津男,米澤敏男:硫酸 酸性地盤に接する高品質コンクリートの暴露7年目 の微小構造,コンクリート工学年次論文集,Vol.22, No.1,2000