

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題	防食被覆層の施工が下水道コンクリート構造物の耐久性に与える影響
著者	今井隆太, 千々和伸浩, 藤井学, 藤澤健一, 倉田知一
出典	第60回下水道研究発表会講演集, N-8-3-5
発行日	2023, 8

# 防食被覆層の施工が下水道コンクリート 構造物の耐久性に与える影響

東京工業大学 ○今井隆太・千々和伸浩・藤井学  
日本ジッコウ(株) 藤澤健一・倉田知一

## 1. はじめに

下水道コンクリート構造物では、硫酸による腐食対策として防食被覆工法が実施されている。このうち有機系防食被覆材を塗布した塗布型ライニング工法の施工実績が多いが、硫酸腐食が厳しい環境下においては防食被覆層の厚みを増す目的でガラスクロスも併用される。しかし、このような防食対策にもかかわらず実構造物では硫酸腐食環境から遮断されずにコンクリート腐食が進行しているものが多くみられる<sup>1)</sup>。橋本ら<sup>2)</sup>は防食被覆層の表面異常を調査し、発生が部分的であることや出隅部で顕著であることを報告している。

そこで、本稿では出隅部や壁面部での防食被覆層の特性を定量的に分析評価することとした。出隅部の特性を評価するために、防食塗装を行った凸部試験体の防食被覆層の層厚計測を行った。壁面部の特性を評価するために、ガラスクロスの使用による防食被覆層の層厚の計測及び樹脂内部に固定化される気泡量の測定を行った。これらの試験結果及び久保内ら<sup>3)</sup>のエポキシ樹脂への硫酸侵入機構モデルに基づき、出隅部および壁面部での防食被覆層の劣化年数の算出を行い耐久性の評価を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 出隅部の特性に関する実験

#### (1) 防食被覆層の層厚計測

凸部試験体(図-1)に対し防食塗装(素地調整層+エポキシ樹脂 2回塗り)を行った。本計測では、ガラスクロスは出隅部で浮きが発生する(図-2)ため使用しなかった。防食塗装工程に関して、素地調整層はヘラで、エポキシ樹脂はローラーで1日おきに塗布を行った。エポキシ樹脂の施工においては、施工者の塗布技術力の違いを考慮し、筆者を除いた10人の協力者が塗布を行った。エポキシ樹脂の硬化後に切断を行い、画像処理によりエポキシ樹脂の層厚を合計16箇所計測した。計測箇所は、図-3に示す凸部上面、出隅部、垂直面、入隅部及び段差上面であり、計測間隔は5mmである。



図-1 凸部試験体



図-2 ガラスクロスの浮き

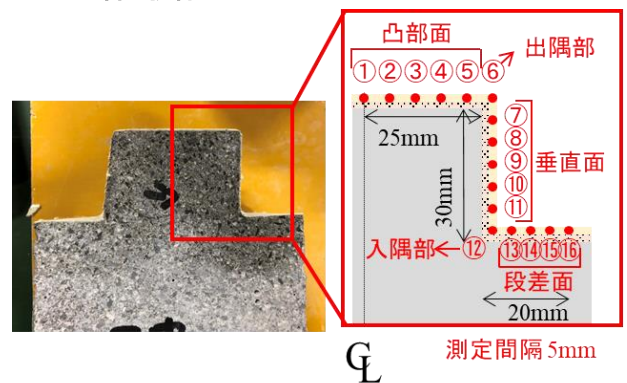


図-3 計測箇所

### 2.2 壁面部の特性に関する実験

#### (1) 防食被覆層の層厚計測

100×100×400mm 角柱試験体の2つの面に対し防食塗装(素地調整層+エポキシ樹脂 2回塗り)を行った。2つの面のうち1面にはガラスクロス(厚み約250μm)を使用し塗装を行った。防食塗装工程に関して、素地調整層はヘラで、エポキシ樹脂はローラーで1日おきに塗布を行った。施工は著者自身で行った。エポキシ樹脂硬化後に切断を行い、画像処理によりエポキシ樹脂の層厚を鉛直方向に20mm間隔で計測した。

#### (2) 樹脂内部の気泡分布

アクリル板上に対し透明エポキシ樹脂をローラーによる塗布を行い、ガラスクロスを含まない樹脂試料とガラスクロスを含む樹脂試料の2つの試料を作製した。試料の硬化後、顕微鏡画像を二値化処理し ImageJ

ソフト上で気泡分析を行い、空隙率及び細孔径を測定した。この測定は異なる領域で3回行った。

### 3. 結果・考察

#### 3. 1 出隅部の特性に関する実験

##### (1) 防食被覆層の層厚計測

各測定位置における層厚の計測結果を図—4に示す。平均層厚及び変動係数に関しては、凸部面（位置番号 No.1～No.5 の平均）で 626.8 $\mu\text{m}$ 、0.51、出隅部で 107.8 $\mu\text{m}$ 、0.48、鉛直面（位置番号 No.7～No.11）で 130.0 $\mu\text{m}$ 、0.46、入隅部で 1140.2 $\mu\text{m}$ 、0.28、段差面で 775.4 $\mu\text{m}$ 、0.48 となった。

凸部面の層厚と比較し、出隅部の層厚は 82.8%、鉛直面の層厚も 79.3%減少した。したがって、出隅部及び鉛直面では注意深く施工を行なっても層厚が減少することが分かった。層厚が減少した箇所において硫酸が早期に素地部まで透過することで、出隅部において防食被覆層の剥離やコンクリート腐食が生じていると考えられる。

#### 3. 2 壁面部の特性に関する実験

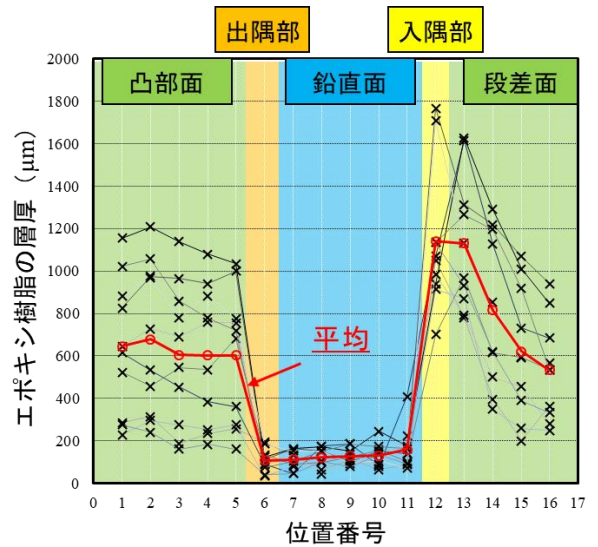
##### (1) 防食被覆層の層厚計測

防食被覆層の鉛直層厚分布を図—5に示す。平均層厚及び変動係数に関して、ガラスクロスを使用しない場合は 201.7 $\mu\text{m}$ 、0.14、ガラスクロスを使用する場合は 591.4 $\mu\text{m}$ 、0.11 となり、ガラスクロスを使用すると層厚が 2.9 倍に増加する。ガラスクロスの厚みが、約 250 $\mu\text{m}$  あるため、エポキシ樹脂だけの層厚はガラスクロスの厚みを引いた 341.4 $\mu\text{m}$  となり、ガラスクロスの使用目的である層厚増加の効果を確認できた。

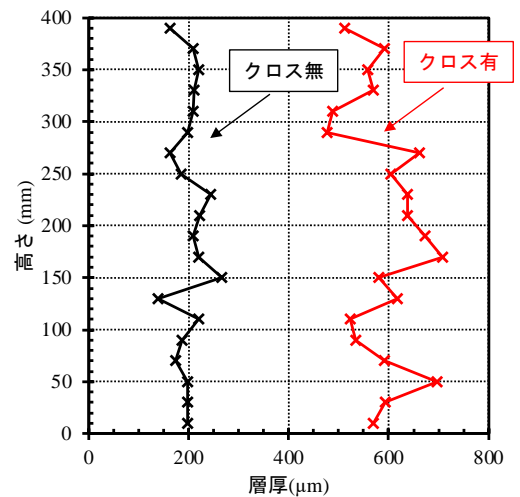
しかしながら、樹脂内部には図—6に示すような気泡が見られ、気泡部とエポキシ樹脂の硫酸透過速度の違いから、防食被覆層の硫酸の対遮断性に影響を与える可能性がある。そのため、次項で固定化される気泡はガラスクロスによる影響なのかを検討した。

##### (2) 樹脂内部の気泡分布

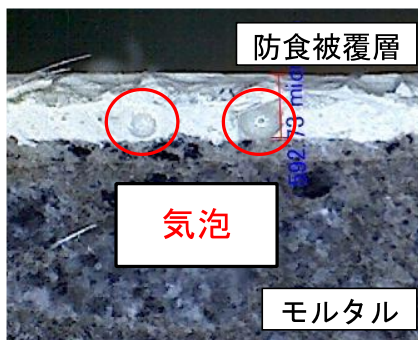
樹脂内部の気泡分布を図—7に示す。平均空隙率は、ガラスクロスを使用しない場合 0.57%、ガラスクロスを使用する場合は 15.10%となった。ガラスクロスを使用することによって、多くの気泡が樹脂内部に固定化されることが確認できた。樹脂内部に含まれる気泡の大きさは、100 $\mu\text{m}$  前後が多く、また 200 $\mu\text{m}$  以上



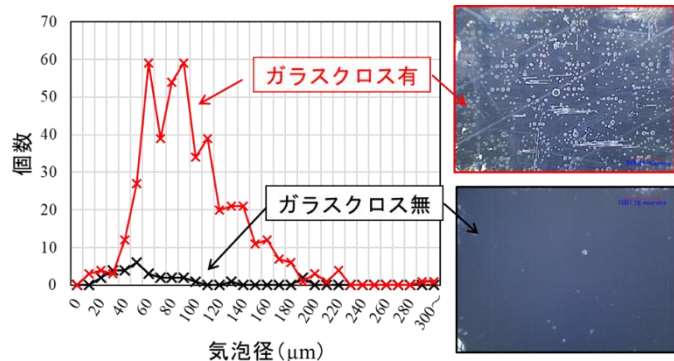
図—4 凸部の防食被覆層の層厚計測結果



図—5 防食被覆層の鉛直層厚分布



図—6 樹脂内部の気泡



図—7 樹脂内部の気泡分布

の比較的粗大な空隙を含むことがある。ガラスクロスを使用することによって多くの気泡が含まれる原因は、樹脂の硬化中に気泡が繊維部分に引っかかり固定化され表面まで浮上してこないことだと考えられる。樹脂内部に固定化される気泡は、ピンホールと違い検査（ピンホール試験あるいは目視点検）での発見が困難である。そのため、検査時に規定の施工厚を満足していても、硫酸の透過抵抗性を有するエポキシ樹脂の実質的な厚みが小さくなり、硫酸が想定よりも早い透過を引き起こすと考えられる。

#### 4. 出隅部及び壁面部における防食被覆層の寿命評価

日本下水道事業団が作成したマニュアルにおいて、防食被覆層の標準耐用年数は10年と定められている。しかしながら、10年を待たずして防食被覆層の劣化が起きることがある。特に劣化箇所として、梁や柱の出隅部や壁面部で発生していることから、劣化原因は、防食被覆層の層厚の不均一さや樹脂内部に固定化される気泡の可能性がある。そこで、これらが生じた場合の防食被覆層の耐久性の評価を行う。耐久性の評価においては、防食被覆層の劣化深さは時間と濃度の平方根に比例する関係<sup>3)</sup>から劣化までの年数を算出する。本章においては、3章の実験結果を用いて評価を行う。

初めに、出隅部での耐久性の評価を行う。凸部面の計測結果 $626.8\mu\text{m}$ を10年で硫酸が透過すると仮定すると、層厚 $107.8\mu\text{m}$ である出隅部では0.30年、つまり約3.5ヶ月で硫酸が透過することになる。

次に、壁面部での耐久性の評価を行う。ガラスクロスを使用するときの防食被覆層の平均層厚 $591.4\mu\text{m}$ を10年で硫酸が透過すると仮定する。樹脂内に含まれる気泡のうち粗大な空隙 $200\mu\text{m}$ が存在すると硫酸の透過抵抗性を有するエポキシ樹脂だけの厚さは $141.4\mu\text{m}$ となり、約0.57年で硫酸が透過することになる。

いずれの箇所においても、想定よりも早く硫酸が素地部のコンクリートまで透過する結果となる。硫酸が透過した場合、防食被覆層の硫酸透過速度と比較しコンクリート内部での硫酸透過速度は大きいため、防食被覆層の標準耐用年数内においても、構造物としての耐久性能の極度な低下を引き起こす可能性がある。したがって、構造物の長期供用に向けては、出隅部の層厚減少や樹脂内部での気泡の固定化を抑制することが必要になる。

#### 5. 結論

本論文では、施工時における防食被覆層の特性に関する定量的評価を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 出隅部の施工においては、平滑面である凸部面と比較し協力者10人全員で層厚の減少が確認できた。凸部面の平均層厚が $626.8\mu\text{m}$ であったが、出隅部の平均層厚は $107.8\mu\text{m}$ となり、出隅部での層厚は約82.8%減少した。
- (2) ガラスクロスの使用により、防食被覆層の厚みが $201.7\mu\text{m}$ から $591.4\mu\text{m}$ となり、ガラスクロスの使用目的である防食被覆層の厚みを増すということは確認できた。しかしながら、ガラスクロスの使用により、樹脂内部に多くの気泡が固定化され、平均空隙率は15.10%となった。
- (3) 出隅部における層厚減少や、壁面部における気泡の固定化によって早期に素地部のコンクリートまで硫酸が透過する可能性があり、数年で透過が起こりコンクリートの腐食を生じてしまう可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 久保田慶太, 河村翔太, 鈴木重聡, 三縄義和: 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
- 2) 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
- 3) 久保内昌敏, 矢代顕慎, 三品文雄, 須賀雄一, 宇野祐一: コンクリートライニング用エポキシ樹脂への硫酸の侵入と腐食挙動, アップグレード論文報告集, 第4巻, pp.163-168, 2004

問合わせ先: 東京工業大学 環境・社会理工学院 千々和伸浩

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-1 緑が丘 1号館 510号室

T E L 03-5734-3767 E-mail chijiwa.n.aa@m.titech.ac.jp