

論文 引き剥がし試験による防食ライニング材のふくれ評価手法の検討

藤澤 健一^{*1}・富山 禎仁^{*2}・大島 敏幸^{*3}・稗田 省三^{*4}

要旨：本研究では，下水道施設などの硫酸劣化環境下における防食被覆工法の性能評価手法について検討した。塗膜の耐久性を，硫酸の浸透による物理的性能の変化により検討した結果，劣化は認められなかった。

また，防食ライニング材のふくれの発生しやすさの指標として，引き剥がし試験による評価の有効性を検討した。温水浸漬試験によるふくれの再現を行った結果，ふくれの発生と引き剥がし強さの間には明確な関係性が確認できた。この結果，引き剥がし試験は防食ライニング材のふくれ抑制の指標として利用可能であると考えられた。

キーワード：防食ライニング材，ふくれ評価，引き剥がし試験，

1. はじめに

下水道関連施設では微生物の関与した硫酸劣化が大きな問題となっている。コンクリート構造物の硫酸劣化は進行が非常に速く，年 5mm の速度で劣化したという報告¹⁾もある。

当該構造物の硫酸劣化への対策としては，防食被覆によるコンクリートの表面保護方法が有効であり，環境改善などの方法と共に広く適用されている。防食被覆工法に関しては，日本下水道事業団，(財)日本農業集落排水協会等からマニュアル，指針等^{2),3)}が発行されているが，一方で，硫酸環境下における工法の性能を定量的に評価できる手法は十分に確立されていないのが現状である。

例えば，コンクリート躯体への塗膜の接着強さについては，一軸引張試験により評価されているが，この手法によって得られる接着強さと防食被覆のふくれ抑制効果との間には，明確な関係を見出すことは困難である⁴⁾。最近では，塗膜の接着強さを評価する新たな手法として，引き剥がし試験による方法が提案されている⁵⁾。この方法は，塗膜の性状変化による接着強さへの影響を，よりの確に捉えることができると考え

られるため，塗膜の接着性評価の有力なツールになり得ると期待される。

そこで本研究では，防食ライニング材により表面被覆したコンクリート試験体を硫酸浸漬し，硫黄浸透深さを測定すると共に，引張試験によって塗膜の耐硫酸性を評価した。さらに，引き剥がし試験による塗膜の接着性評価の妥当性を検討すると共に，引き剥がし強さと防食被覆のふくれ抑制効果との相関性を考察した。

2. 試験方法

2.1 試験の種類

(1) 硫酸溶液浸漬試験

硫酸環境下での塗膜の耐久性を評価するために，硫酸溶液に浸漬した場合の塗膜への硫酸浸透と塗膜の強度及び伸び率の変化を測定した。

また，硫酸の浸透による接着性の評価として硫酸溶液に浸漬した試験体について引き剥がし強さ，接着強さの変化を確認した。

(2) 温水浸漬試験

塗膜のふくれ発生要因としてコンクリート躯体からの水あるいは水蒸気の圧力が考えられる。

ここでは，試験体を 60℃温水・23℃水へ交互

*1 日本ジッコウ (株) 技術研究所課長 農博 (正会員)

*2 (独) 土木研究所 材料地盤研究グループ新材料チーム 工博

*3 日本ペイント (株) 汎用塗料事業本部開発部

*4 三井化学産資 (株) 技術開発部部長

表－1 コンクリート基板の配合

組骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	40.5	5	44.5	165	407	761	973	1.018

表－2 防食被覆工法

番号	素地調整材	上塗り材	補強材
1	ポリウレタン樹脂系パテ材 (1)	ポリウレタ樹脂 (1)	－
2	ポリウレタン樹脂系パテ材 (2)	ポリウレタ樹脂 (1)	－
3	エポキシ樹脂ポリマーセメントモルタル (1)	ポリウレタ樹脂 (2)	－
4	エポキシ樹脂ポリマーセメントモルタル (2)	ポリウレタ樹脂 (2)	－
5	エポキシ樹脂ポリマーセメントモルタル (3)	エポキシ樹脂 (1)	ガラスクロス
6	エポキシ樹脂ポリマーセメントモルタル (4)	エポキシ樹脂 (1)	ガラスクロス
7	エポキシ樹脂パテ材	エポキシ樹脂 (2)	炭素繊維
8	エポキシ樹脂プライマー (1)	エポキシ樹脂 (3)	炭素繊維
9	エポキシ樹脂プライマー (2)	エポキシ樹脂 (4)	炭素繊維

に浸漬することにより躯体内に蒸気圧を発生させることによりふくれ発生の再現を行い、引き剥がし強さおよび接着強さの変化を測定した。

2.2 試験体

(1) 硫酸溶液浸漬試験用試験体

硫黄浸透深さは 70×70×20mm のモルタル板の型枠面を試験面として工法仕様に基づいて塗装し、硫酸浸漬に耐えるよう試験面以外も表面被覆した試験体を用いて測定した。

引張強さおよび伸び率は、工法の上塗り材を JIS K 5400-2000 (塗料一般試験方法)8.8(引張強さと伸び率)(3)に基づき JIS K 6301 (加硫ゴム物理試験方法)に規定するダンベル 1 号形状に成形した試験片、または、300×300×2mm のシート状に成形し、硫酸溶液浸漬後ダンベル 1 号形状に成形した試験片により測定した。

引き剥がし強さおよび接着強さの測定は 300×300×60mm のコンクリート板の型枠面を、工法仕様に基づいて塗装し、硫酸浸漬に耐えるよう試験面以外も表面被覆した試験体により測定した。なお、引き剥がし試験用の治具を取り付けられるように塗膜の一部を基板よりはみ出すように作製した。

試験体作製に用いたコンクリート基板を表－1 に示す。

(2) 温水浸漬試験用試験体

試験体は 300×300×60mm のコンクリート板を用いて作製した。

試験体は標準条件および湿潤条件の 2 条件で作製した。標準条件では乾燥状態のコンクリート板型枠面に、工法仕様に基づいて塗装を行った。湿潤条件では、養生終了後 24 時間水浸漬した湿潤状態のコンクリート型枠面に塗装を行った。また、塗装中および塗膜の養生中にはコンクリート板の半分を水浸漬し湿潤状態を保った。

なお、引き剥がし試験用の治具を取り付けられるように塗膜の一部を基板よりはみ出すように作製した。また、塗装面以外は未被覆とした。

(3) 防食被覆工法

試験では 9 種類の防食被覆工法を用いて評価を行った。

試験に用いた防食被覆工法を表－2 に示す。

2.3 試験条件

(1) 硫酸溶液浸漬試験条件

表－3 に硫酸溶液浸漬試験の条件を示す。

硫酸溶液濃度は、23±2℃および 40±2℃それぞれの温度条件で、0%, 0.05wt%, 0.5wt%, 3wt% とした。また、40℃では 10wt% の条件も試験し、全部で 9 条件とした。

試験体は溶液中へ完全に浸漬した。また、試験面は他の試験体から 20mm 以上離れるように

表－３ 硫酸溶液浸漬試験項目

評価項目		引張強さ・伸び率・硫黄浸透深さ	引き剥がし強さ・接着強さ
試験温度	硫酸濃度	試験時期	試験時期
23±2℃ 40±2℃	0%	0日・28日・56日・120日	—
	0.05%	28日・56日・120日	—
	0.5%	28日・56日・120日	—
	3%	28日・56日・120日	—
40±2℃	10%	28日・56日・120日	0日・28日・56日・120日

表－４ 温水浸漬試験項目

試験条件	評価項目	外観変化・引き剥がし強さ・接着強さ
23±2℃←→60±2℃	繰り返し	0回・5回・10回・15回・20回

設置した。

初期（0日）、28日、56日、120日経過後に硫黄浸透深さ、引張強さおよび引き剥がし強さを測定した。

(2) 温水浸漬試験条件

表－４に温水浸漬試験の条件を示す。

温水浸漬は試験体養生後、24時間 23±2℃水浸漬と 60±2℃温水浸漬をくり返し行った。

試験体は水中および温水中へ完全に浸漬した。また、試験面が他の試験体から 20mm 以上離れる位置に、試験体側面が下になるよう設置した。

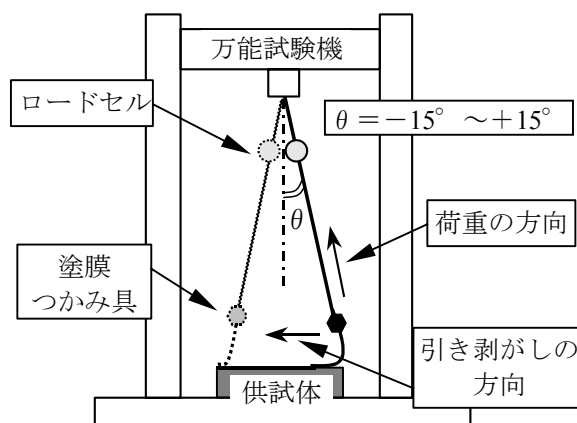
初期（0回）、5回、10回、15回、20回で外観観察を行った後、引き剥がし試験および接着強さ試験を行った。

2.4 評価方法

外観観察は、硫酸溶液引き上げ直後または温水引き上げ直後に行った。外観は、JIS K 5600-8-1～8-6のシリーズに基づきふくれ、剥がれ、白亜化について記録した。

引張強さは、JIS K 5400-2000（塗料一般試験方法）8.8（引張強さと伸び率）、または JIS K 7073（炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法）に準じて測定した。

硫黄浸透深さは、日本下水道事業団の「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」参考資料-3 防食被覆



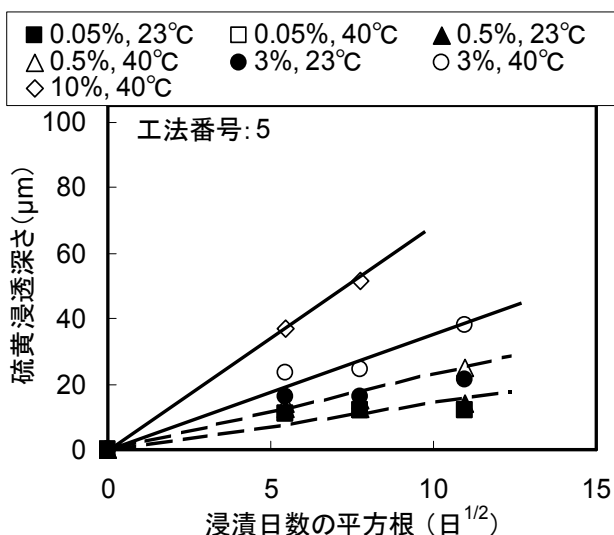
図－1 引き剥がし試験の概要図

層の品質試験方法 3-1 の(3)6硫黄侵入深さに準じて EPMA を用いて測定した。

引き剥がし試験は JIS B 7721 に規定する試験装置を用いた。図－1に引き剥がし試験の概要を示す。試験速度は 100mm/分を基準とした。

引き剥がし試験は、幅 30mm、長さ 170mm の寸法でコンクリート表面まで塗膜面に切り込みを入れ、1つの試験体で5箇所測定を行った。

引き剥がし箇所の中心部分に試験機のチャックが位置するように供試体を固定し、基板からはみ出した塗膜端部へ長さ 600mm のワイヤーを取り付け、塗布面に対して鉛直方向に引張荷重をかけ試験した。塗膜に負荷される荷重の方向は、試験基板を固定しているために、鉛直方向 ±15° 程度の範囲で変化する。



図－2 硫黄浸透深さ測定結果例（工法5）

引き剥がし強さの解析は、引き剥がし開始初期に生じる応力の影響をなくするため、試験開始の50秒後から60秒間の結果を用いて行った。解析はJIS K 6256 3項波状曲線の解析に従った。試験結果は波状部の変化が少ない（うねり曲線）場合があったため、解析条件をそろえ3.4項D法に従い曲線の最大値と最小値の平均値を求めた。

接着強さ測定は、引き剥がし試験後1つの試験体に対して3箇所行った。測定はJIS K 5400-2000（塗料一般試験方法）8.7（付着強さ）に準じた。

3. 硫酸溶液浸漬試験結果

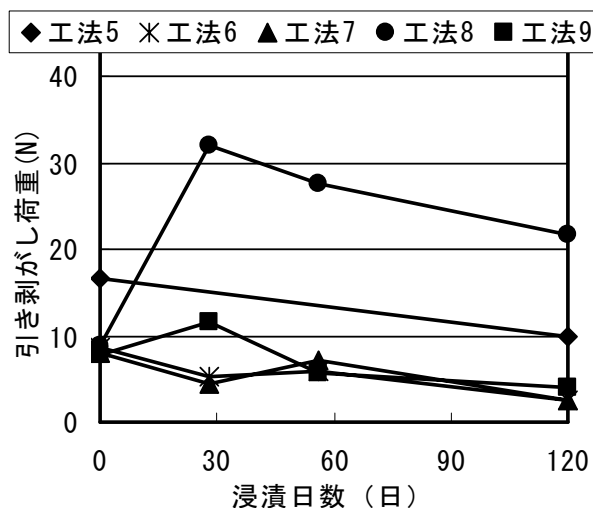
3.1 硫黄浸透深さ

硫黄の浸透深さ測定の結果の一例を図－2に示す。浸透深さが浅い場合は明確な傾向が見られなかったが、既往の研究⁶⁾から硫酸浸透はFickの拡散則に従い時間の平方根に比例して増加すると考えられる。

3.2 硫黄浸透と塗膜性能

塗膜の引張試験の結果、全ての工法で引張強さおよび伸び率に大きな変化はなかった。このことから、本研究における浸漬期間内では、硫酸浸透による塗膜の物理的性能の変化は無いものと考えられる。

一方、塗膜の引き剥がし試験の結果（図－3）、



図－3 引き剥がし強さ測定結果例
(40°C・10%硫酸浸漬試験)

浸漬日数の増加に伴い引き剥がし荷重が低下する傾向が見られた。試験後に引き剥がし面の状況を観察したところ、素地調整材で剥離していることが明らかとなった。硫黄浸透深さの測定結果から、素地調整材までは硫酸が浸透していなかったことから、引き剥がし荷重の低下は硫酸浸透による劣化が原因とは考えにくい。また、塗膜強度にも大きな低下は見られなかったことから、引き剥がし強さの低下は、水分または温度による影響であると推測される。一方、接着強さには顕著な変化は見られなかった。

4. 温水浸漬試験

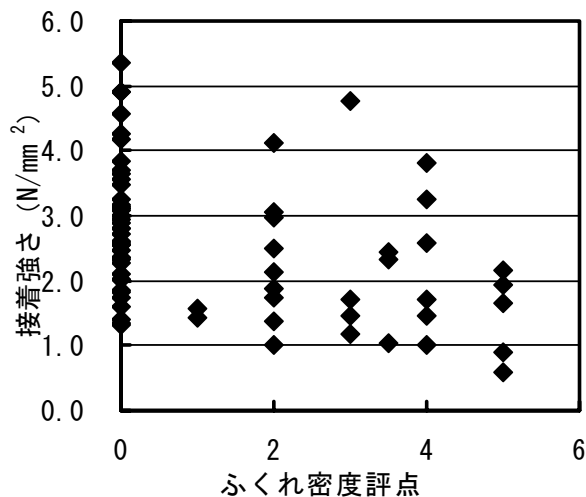
4.1 外観変化

ふくれは、繰り返し回数が10回程度を超えると発生していた。ふくれ内部には水が貯まっている場合と、無い場合があったことから、本試験でふくれが発生した機構として、コンクリートの孔内の空気が膨張した圧力および水蒸気圧が関与していると考えられる。

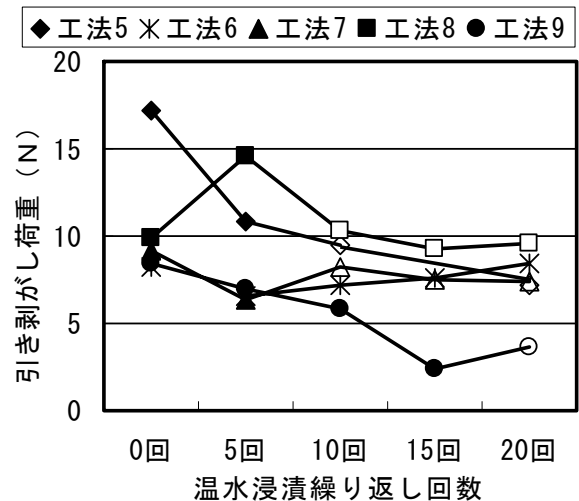
4.2 ふくれ密度と接着強さの関係

ふくれ密度と接着強さの関係を図－4に示す。ふくれ密度と接着強さ、あるいはふくれの大きさと接着強さとの間に、明確な関連性は認められなかった。

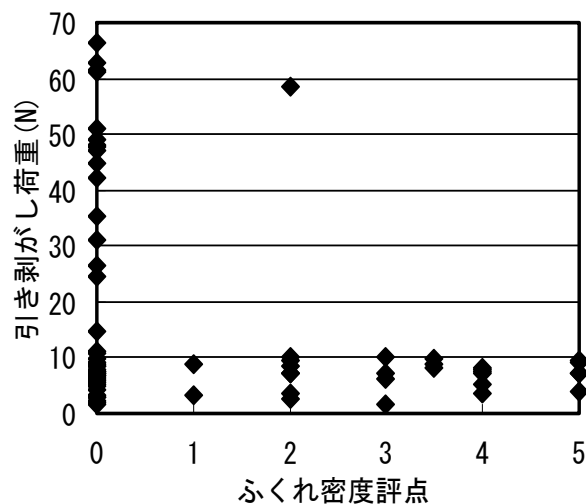
ふくれが生じている部分は接着強さが0と考



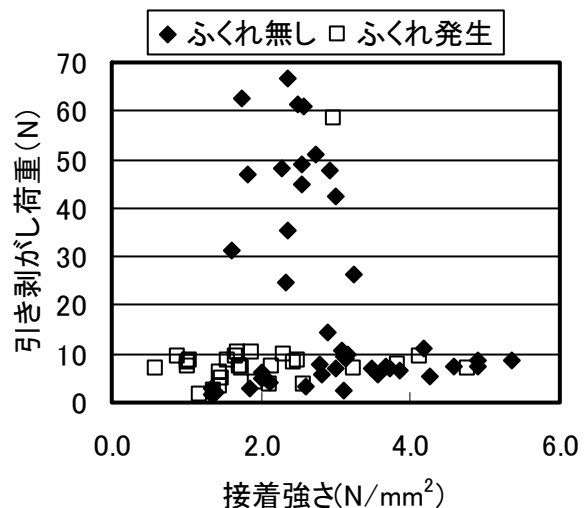
図－4 接着強さとふくれ密度の関係



図－5 引き剥がし強さとふくれの関係例
(温水浸漬試験)



図－6 引き剥がし強さとふくれ密度の関係



図－7 引き剥がし強さと接着強さの関係

えられ、これが塗膜の接着強さを低下させる要因になっているものと推測されるが、ふくれが生じていない部分の接着強さが十分大きいいため測定値に現れなかったと考えられる。

4.2 外観変化と引き剥がし強さの関係

引き剥がし荷重とふくれ発生状況の関係例を図－5に示す。

ふくれ発生に伴い引き剥がし強さが低下している傾向が認められた。

引き剥がし荷重とふくれ密度の関係を、図－6に示す。一部の例外を除くと、ふくれが発生している場合には、引き剥がし荷重が10N以下の値であった。また、ふくれ密度や大きさと引

き剥がし強さの間には明確な関係は見られなかった。

4.3 ふくれ評価手法の検討

接着強さと引き剥がし強さの関係を図－7に示す。

ふくれ発生の機構から、ふくれ発生時では、鉛直方向への押し上げの応力が働き、接着強さとの関係性が高いと考えられ、また、ふくれ成長の過程では、躯体と接着している部分へ引き剥がし応力が働き、引き剥がし強さとの関係性が高いと考えられる⁷⁾。

本試験の結果もこの関係性をよく示している。接着強さが比較的小さい範囲で、引き剥がし

強さが十分に大きい場合、または、引き剥がし強さが比較的小さい場合で、接着強さが十分大きい範囲では、ふくれの発生が抑制できる傾向が確認できた。

以上の結果から、接着強さまたは引き剥がし強さ単独の評価ではなく、両者を組み合わせることにより、よりの確な接着性評価を行えると考ええる。

ただし、本試験で得られた接着強さおよび引き剥がし強さの値は、基板強度に大きく依存しており、ふくれ抑制に必要な強さとは異なっていると考えられる。

また、一部の試験体では、上塗り材層内のふくれもあったことから、温水（60℃）中に浸漬したことによる使用材料の温度劣化の影響があると考えられる。

今後、ふくれ抑制に関する接着強さおよび引き剥がし強さについてさらに詳細な検討をすると共に、使用材料への影響が少ないふくれ再現方法の検討等を行い、ふくれ評価手法の精度向上を図る必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、下水道施設などの硫酸劣化環境下における防食被覆工法の評価方法について検討した。塗膜の耐久性を、硫酸の浸透による物理的な性能の変化により調べた。また、ふくれ評価の指標として、温水浸漬試験によるふくれの再現を行い、引き剥がし試験による評価の有効性を検討した。本試験の結果を以下にまとめる。

- (1) 硫酸の浸透による塗膜の物理的性能への影響は見られなかった。
- (2) 温水浸漬試験の結果、ふくれの発生と接着強さの間には明確な関係性は見られなかった。
- (3) 温水浸漬試験の結果、ふくれが発生している場合は、引き剥がし荷重が 10N 以下の値であった。
- (4) 接着強さと引き剥がし強さの関係から、接着強さ、引き剥がし強さが共に比較的小さい範

囲でふくれ発生が顕著であった。

- (5) ふくれ発生時の抵抗力を評価できる接着強さと、ふくれ成長に対する抵抗力を評価できる引き剥がし試験を組み合わせることにより、よりの確な接着性評価を行えると考えられる。

参考文献

- 1) 森 忠洋, 彦坂 康夫, 野中 資博, 古賀 みな子, 野田 修司, 三品 文雄, 堺 好雄, 小泉 淳一: 下水管生物腐食の原因と対策(3) 一腐食速度一, 下水道協会誌論文集, Vol.27, No.316, pp.137-144, 1990.
- 2) 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指針・同マニュアル, 2002.12
- 3) 社団法人日本農業集落排水協会: 日本農業集落排水協会ーコンクリート防食設計指針一、日本農業集落排水協会ーコンクリート防食施工指針一, 2000.7
- 4) 堀江悟, 小川健, 小柳洽, 宮川豊章: 凍結防止剤散布環境下で複合劣化要因による損傷を受けたコンクリートの塗装材料検討, コンクリート工学, Vol.40, No.3, pp.43-52, 2002.3
- 5) 樫山 好幸, 内田純二, 舌間 貴宏, 吉田敦: コンクリート構造物の塗装系防食材の性能評価手法の提案, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol.2, 2002.10
- 6) 岩崎 基恭, 上利 佳弘, 藤澤 健一, 石井将幸, 野中 資博: コンクリート防食被覆への硫酸浸透に関する基礎的研究, 複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画に関するシンポジウム論文集, 2001.5
- 7) 橋田 浩, 田中 享二, 小池 迪夫: 防水層の下地コンクリートと接着力のふくれ性状屋根防水層ふくれ現象のメカニズム解明・その5, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 1991.9