

防食ライニングのピンホールがモルタルの硫酸劣化に与える影響とその予測

京都大学 学生員○佐々木 亘 正会員 山本 貴士 正会員 服部 篤史 フェロー 宮川 豊章

1. 研究目的

防食ライニングを施したモルタル供試体にドリルでピンホールを作成し、10wt%硫酸水溶液に浸せきすることで、その劣化過程および劣化予測に関する知見を得ることを目的とした。

2. 実験概要

供試体一覧を表 1 に示す。150×70×20(mm)のモルタル板の 1 面に防食ライニングを適用し、他の 5 面には樹脂モルタルによる重防食を施した。試験要因は以下に示す 2 種類とした。

(1) 防食ライニング 実際に用いられる仕様を中心とした。防食被覆層に用いる樹脂の剛性による影響を調べるため、軟質・硬質ポリウレタンを選定した。また、軟質ポリウレタンでは、素地調整材を変化させた。さらに、耐酸性が良好とされるポリウレタ、補強材（ガラスクロス 1 層および 2 層、炭素繊維シート、珪砂またはセラミック）を用いたエポキシを選定した。

(2) ピンホール径・深さ 直径 0.5 mmと 1 mmのものをドリルで作成した。軟質ポリウレタンの一部でピンホールの貫通深さを変えた。

3. 実験結果および考察

3.1 外観観察・ふくれ径

多くの供試体でピンホール部に円形のふくれが観察されたが、PU-S3、PU-H2、M-C、M-K では浸せき 210 日目で観察されなかった。ふくれは硫酸とセメント水和物の反応による腐食生成物の膨張によるものである。ふくれ径は、剛性が小さいもの(例:PU-S1)や、素地調整材(EP-パテ)にひび割れが発生し面外方向へ変形しやすいと考えられる仕様(例:PU-S2)で大きく、ピンホール径が大きい方が硫酸の侵入量が多いと考えられ大きかった。

3.2 中性化範囲

図 2 に示す中性化深さ(モルタル面を基準)、中性化幅(水平方向の中性化範囲の半分の長さ)は腐食生成物の範囲にほぼ一致した。また、図 3(a)に示すように、中性化幅はふくれ半径とほぼ等しく、ただしライニング厚のためやや小さい。

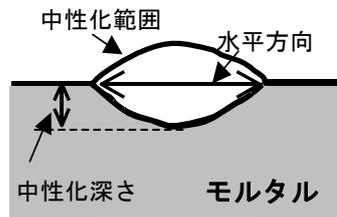


図 2 中性化の測定方法

中性化範囲は深さ方向より水平方向で進行していた。反応部がモルタルで囲まれている深さ方向よりも、モルタルより剛性の低いライニングがあるか、剛性がある程度大きい場合は接着面のある水平方向の方が、腐食生成物が膨張しやすく、粗な部分ができ硫酸が浸透しやすくなり、中性化の速度が速くなったと考えられる。しかし、図 3(b)に示すように中性化幅と中性化深さには線形関係が見られた。

表 1 供試体一覧

供試体名	素地調整材	防食被覆層(設計厚さ mm)
PU-S1	EP-プライマー	軟質ポリウレタン(0.6)
PU-S2	EP-パテ	
PU-S3*		
PU-S4*	EP-PCM + EP-プライマー	
PU-S5*	耐酸モルタル10mm + EP-パテ	
PU-H1	PU-プライマー	硬質ポリウレタン(2.0)
PU-H2		
PU-A1	EP-パテ	ポリウレタ(2.0)
EP-G1		EPガラスクロス1層(0.7)
EP-G2		EPガラスクロス2層(1.3)
EP-CF1		EP CFS 1層(0.7)
M-C	—	EP セラミック(3.0)
M-K	—	EP 樹脂モルタル(3.0)

\* は、ピンホール到達位置が素地調整面まで。他はモルタルまで。

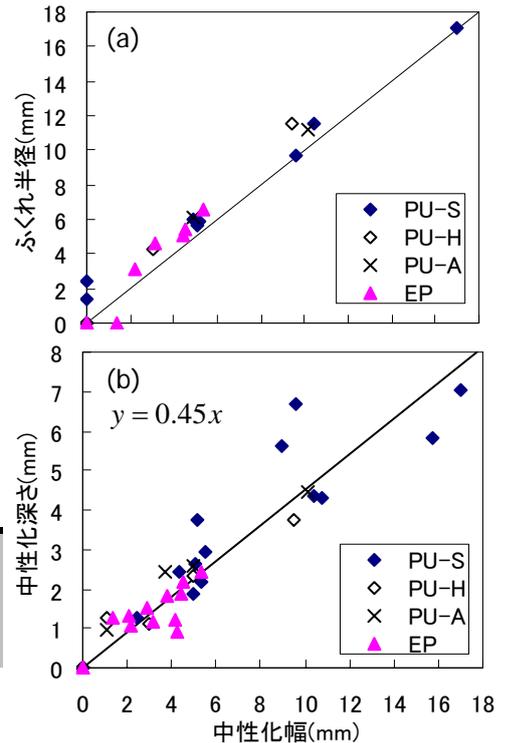


図 3 中性化幅とふくれ半径(a)および中性化幅と中性化深さ(b)の関係

キーワード:防食ライニング ピンホール 硫酸 下水道 微小硬度

連絡先: 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 TEL:075-383-3173 FAX:075-383-3177

3.3 微小硬度

ピンホール位置の深さ方向の各測定点において、細骨材界面から 10 μm 間隔で 100 μm まで測定し、最小値(遷移帯)と最大値(バルク部)を定め、モルタル面からの深さとの関係を求めた。なお、各深さを図 4 のように定義した。中性化深さが検出されなかった供試体でも浸入深さが確認された。浸入深さにおける微小硬度の分布は硫酸の拡散に関係があると仮定し、次式にあてはめた。

$$HV(x,t) = HV_0 \cdot erf \frac{x - x_0}{2\sqrt{D \cdot t}}$$

$HV(x,t)$ : 深さ  $x$  (mm)、時刻  $t$  (日) における微小硬度の最小値または最大値  
 $HV_0$ : 微小硬度の最小値または最大値の基準値(健全部の値)  
 $D$ : 見かけの拡散係数(mm<sup>2</sup>/日)  $x_0$ : 中性化深さ(測定値)  
 (初期条件  $HV(x,0) = HV_0$ 、境界条件  $HV(0,t) = 0$ )

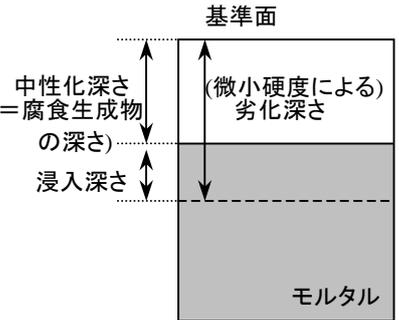


図 4 各深さの定義

3.4 SEM による観察

剛性の高い PU-H1 での腐食生成物の膨張による端部剥離を起こしている様子(図 5)や、素地調整材(EP-パテ)のひび割れが発生している様子が確認された。

3.5 腐食生成物の範囲の予測

ふくれ径の経時変化は浸せき日数の  $\alpha$  乗に比例するとし、以下の式を仮定した。

$$y = b(t - t_s)^\alpha$$

$y$ : ふくれ径(mm)  $t$ : 浸せき日数(日)  $t_s$ : ふくれ発生日(日)  
 $b$ : 速度係数(mm・日<sup>1/α</sup>)  $\alpha$ : 定数(=0.35) 初期条件:  $t < t_s$  のとき  $y = 0$

図 6 に、予測式によるふくれ径の経時変化(実線)を実測値と併せて示す。 $b$  は各供試体について、最小二乗法を用いて求めた。予測式は、実測値を概ね良く表している。そこで、図 3(a)(b)を考慮すれば、腐食生成物の範囲も予測できると考えられる。一方、本実験の全要因に対して  $\alpha$  が同じ値(0.35)とできたことから、 $\alpha$  は少なくとも本研究における要因(ピンホール径、防食ライニング)に依存しない定数であることがわかった。また、この値は拡散支配の  $\sqrt{t}$  則や溶出を伴う  $t$  則より小さく、防食ライニングとモルタルの間に腐食生成物が停留しながら劣化が進展するため腐食生成物の範囲の拡大が遅いという特長を表していると考えられる。

また、図 7 に示すように、浸入深さ(微小硬度の最小値による)は経時的には変化が少ないが、仕様・ピンホール径により異なると考えられる  $b$  が大きい程、大きい傾向にある。

4. 結論

- (1) 面外方向へ変形しやすい仕様でふくれ径が大きく、変形にともなう素地調整材のひび割れもみられた。
- (2) 中性化範囲は腐食生成物の範囲にほぼ一致し、深さ方向より水平方向に進行しやすい。
- (3) 中性化深さが検出されなかった供試体でも浸入深さがみられた。
- (4) ふくれ径の経時変化は  $y = b(t - t_s)^\alpha$  でよく表され、腐食生成物の範囲が予測できる。

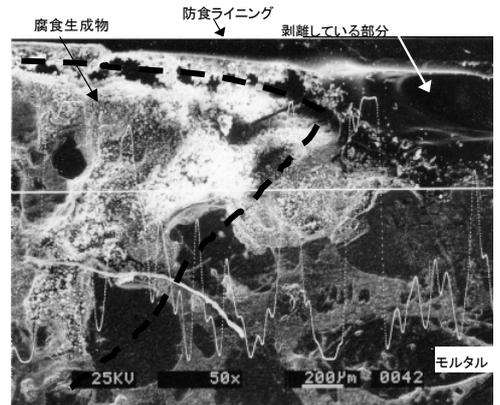


図 5 SEM による観察例(PU-H1,ピンホール径 1.0mm)

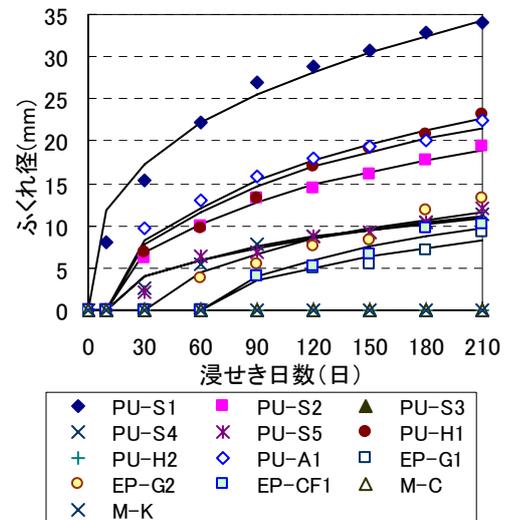


図 6 予測式と実測値の比較例

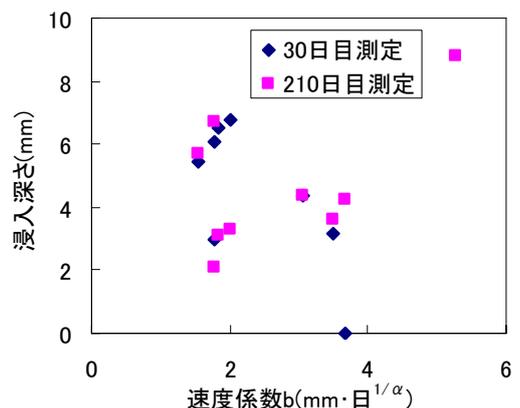


図 7  $b$  と浸入深さの関係