第Ⅴ部門　　ピンホールを有する防食ライニングモルタルの硫酸環境下での劣化予測に関する研究

京都大学大学院　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

防食ライニングを適用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ア、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 ㎜と 1 ㎜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。

これらの供試体において、10wt%硫酸水溶液に浸せきし、外観観察、発生したふくれの径・高さ、中性化範囲の測定を行った。

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 ㎜）
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10㎜ + EP-パテ	
PU-H1	PU-プライマー	硬質ポリウレタン(2.0)
PU-H2	EP-パテ	
PU-A1		ポリウレア(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。

3. 実験結果および考察

3.1 外観観察

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 日でもふくれは観察されなかった。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。ふくれが確認された供試体のうち、防食被覆層に軟質ポリウレタンを用いた PU-S1、S2、S4、S5 ではふくれの境界が明確であるのに対し、その他の PU-H1、A1、EP-G1、G2、CF1 はふくれの境界が明確ではなかった(**写真 1**)。また、補強材としてガラスクロスを用いた EP-G1 および EP-G2 では、特にふくれの成長の初期において、繊維の面外移動に沿ってふくれが生じているように見られた。

写真 1　ふくれの形状
（上：PU-S1、下：PU-H1、共に 210 日）

3.2 ふくれ径・高さ

図 1 にふくれ径と高さの関係の経時変化を示す。ピンホール径が大きい方が硫酸の浸透量が多いと考えられるためふくれ径も大きく、剛性が小さく面外方向へ変形しやすいと考えられるライニングほどふくれ径が大きい。一方、補強材を用いたものや、ピンホールが素地調整材までのものはふくれ径は小さく抑えられているが、M-C および M-K ではふくれが確認されなかったのに対し EP-G1,G2,CF1 ではふくれが確認されており、先述の繊維に沿ったふくれにより、ふくれ径が広がりやすくなった可能性がある。また、面外方向に変形しやすいと考えられる軟質ポリウレタンは径に対して高さが大きく、硬質ポリウレタン、ポリウレアおよび補強材を用いたものは小さい。後者では、先述の通り外観観察においてふくれの境界が明確でない。

Wataru SASAKI, Takashi YAMAMOTO, Atsushi HATTORI and Toyoaki MIYAGAWA

3.3 中性化範囲

図 2 に示すように中性化深さ(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)を測定した。中性化範囲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、ふくれの半径と中性化幅はほぼ等しく、ただしライニング厚のためふくれ半径がやや大きい。

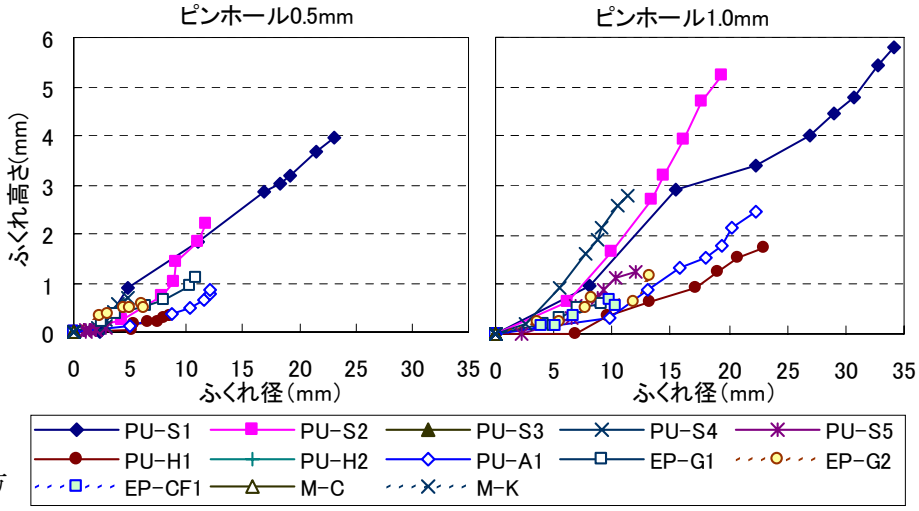

図 1 ふくれ径とふくれ高さの関係

中性化範囲は深さ方向より水平方向の方が進行している。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。

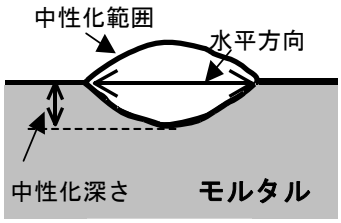

図 2 中性化の測定方法

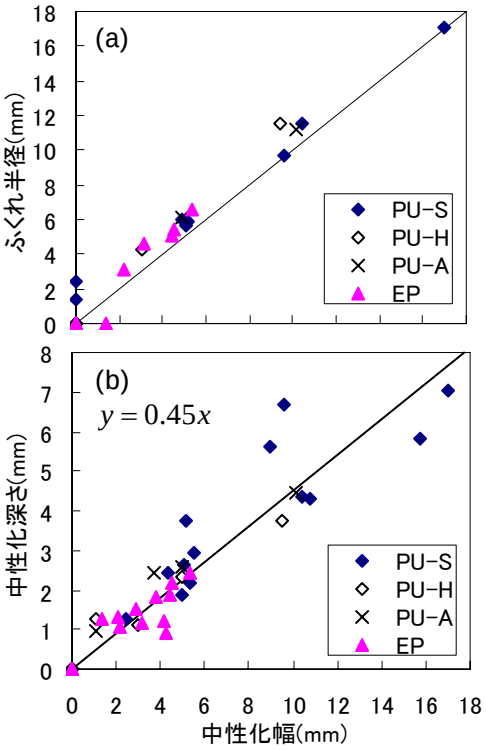

図 3 中性化幅とふくれ半径(a)および中性化幅と中性化深さ(b)の関係

3.4 腐食生成物の範囲の予測

前節より、ふくれ径の経時変化を予測することで、腐食生成物の範囲(深さ・幅)の予測が可能と考えられる。そこで、ふくれ径の経時変化は浸せき日数の α 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$^{1/\alpha}$)　α:定数(=0.35)　初期条件:$t < t_s$ のとき $y = 0$

図 4 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。また、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 α が同じ値(0.35)とできたことから、α 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[1]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あらわしていると考えられる。

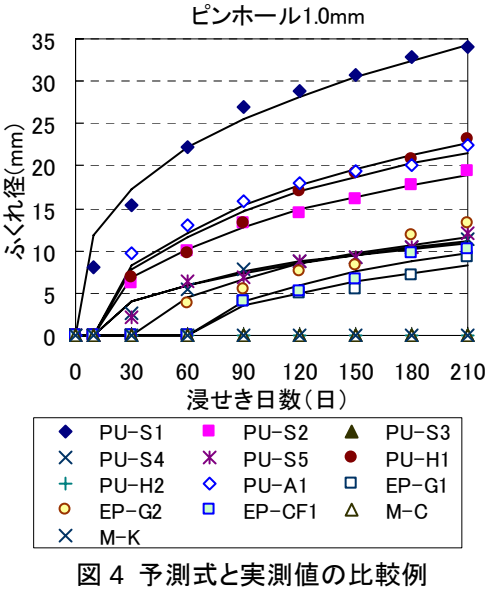

図 4 予測式と実測値の比較例

4. 結論

(1)面外方向に変形しにくい防食ライニングほどふくれ径が小さく、径に対する高さも小さい。(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)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。

参考文献 1) 土木学会:コンクリート標準示方書 [維持管理編]、2001