

京都大学 学生員○高橋 文彦 サンユレック(株) 正会員 嘉指 成詞
京都大学 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%の硫酸水溶液への浸せきを1ヶ月間行い、その劣化過程を明らかにす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。モルタルの寸法は2×7×15cmで、防食ライニングを1面に適用し、試験面とした。また、他の5面および試験面の隅角部は、共通の樹脂モルタルで重防食を施した。モルタルの曲げ強さおよび圧縮強さは、浸せき期間における変化がほとんどなく、浸せき1ヶ月時でそれぞれ10.5(N/mm²)および117(N/mm²)といずれも比較的高い。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ヤング係数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。軟質ポリウレタンにおいては、素地調整材を変化させるとともに、ピンホールの貫通深さを変えた。また、耐酸性が良好とされるポリウレタ、補強材を用いたEP(ガラスクロス1PLYおよび2PLY、炭素繊維シート)、珪砂またはセラミック入りEP樹脂モルタルを選定した。
- (2) ピンホール径…0.5mmと1mmのものをドリルで作成した。

これらの供試体において、硫酸浸せき1ヶ月後に外観観察およびピンホール径の測定、中性化深さの測定および微小硬度の測定を行った。

表1 供試体一覧

供試体番号	素地調整材 設計厚さ(mm) 塗布量(kg/m ²)	防食被覆層 設計厚さ(mm) 塗布量(kg/m ²)	硬質ポリウレタン 2.0mm 3.2
PU-S1	EP-プライマー 0.15	軟質ポリウレタン 0.6mm 0.4/0.4	PU-H2 EP-バテ 0.4/0.4
PU-S2	EP-バテ 0.4/0.4	軟質ポリウレタン 0.6mm 0.4/0.4	PU-A1 EP-バテ 0.4/0.4
※ PU-S3	EP-バテ 0.4/0.4	軟質ポリウレタン 0.6mm 0.4/0.4	EP-G1 EP-バテ 0.4/0.4
※ PU-S4	EP-PCM 0.8/0.7 0.15	軟質ポリウレタン 0.6mm 0.4/0.4	EP-G2 EP-バテ 0.4/0.4
※ PU-S5	耐酸モルタル 10mm P:0.1/23.0	軟質ポリウレタン 0.6mm 0.4/0.4	EP-CF1 EP-バテ 0.4/0.4
PU-H1	PU-プライマー 0.15	硬質ポリウレタン 2.0mm 3.2	M-C M-K

※は、ピンホールの到達位置が素地調整面まで
その他はモルタルまで

3. 実験結果および考察

3.1 防食被覆層に用いた樹脂の基本的性質

図1に防食被覆層に用いた樹脂の質量の経時変化を示す。ポリウレタ(PU-A)において2.5%を超える質量増加が見られた。これは、ポリウレタは吹付け工法によるものであり、樹脂内部に微小の気泡が多数存在したため、他の樹脂より硫酸の吸収率が高くなったためと考えられる。

図2にタイプDおよびタイプAデュロメータ(HDD、HDA)による硬度の経時変化を示す。浸せき開始後に若干の低下が見られるものもあるが、その後の変化は見られなかった。

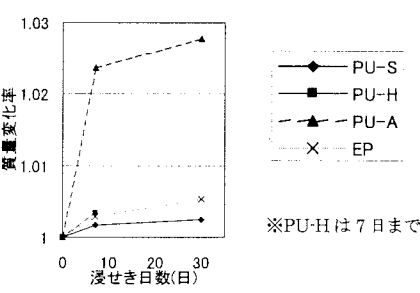


図1 質量の経時変化

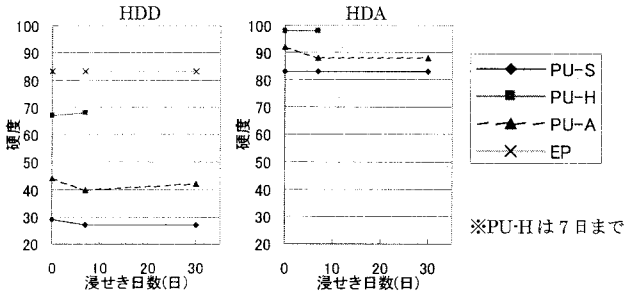


図2 硬度の経時変化

3.2 外観観察およびピンホール径の測定

軟質ポリウレタン(ピンホール到達位置がモルタルまで)、ガラスクロス 1PLY および 2PLY、炭素繊維シートでは、ピンホール部にふくれが観察された。図 3 にふくれ径とピンホール径の変化率の関係を示す。ピンホール径が大きい供試体は、ふくれ径が大きい供試体であり、腐食生成物が膨張することによってピンホールが押し広げられたものである。

3.3 中性化深さの測定

中性化深さはふくれのない面(モルタル面)を基準として測定した。また、図 4 に示すようにピンホールからの深さ方向とライニングに水平な方向において中性化範囲も併せて測定した。

中性化が確認された供試体は、外観観察でふくれが見られた供試体であった。また、深さ方向より水平方向に中性化が進行していた。これは、ピンホールから硫酸が浸入することにより、モルタルが劣化し、劣化生成物が膨張するため、軟質ポリウレタンなどの面外方向に変形しやすいライニングでは膨張する力に耐え切れず、ふくれあがり、ライニングとモルタルのはく離部が広がって、さらに水平方向に硫酸が浸透しやすくなり、深さ方向よりも硫酸の浸透速度が速くなったためであると考えられる。

3.4 微小硬度の測定と劣化深さの比較

図 5 に示す各測定点において、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との関係を求めた。一例を図 6 に示す。この形状より、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。

$$HV(x, t) = HV_0 - HV_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) = HV_0 \cdot \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}$$

$$\Rightarrow \text{溶脱深さ}(b_2 t) \text{を考慮すると } HV(x, t) = HV_0 \cdot \operatorname{erf} \frac{x - b_2 t}{2\sqrt{D \cdot t}}$$

$HV(x, t)$: 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 : 硫酸の見かけの拡散係数(mm²/日) erf : 誤差関数

(初期条件 $HV(x, 0) = HV_0$ 、境界条件 $HV(0, t) = 0$)

そして、式で表された微小硬度が基準値に達した位置を微小硬度における劣化深さと定めた。その結果、外観観察でふくれが見られた供試体以外にもピンホール位置に劣化が確認された。図 7 にふくれ径と劣化深さの関係を中性化深さとともに示す。最小値の劣化深さが最大値より大きく、より深い位置の遷移帯において劣化が進んでいる。劣化深さは防食ライニングが厚いほど小さく、HDD、HDA が小さいほどふくれが発生しやすいため大きくなった。また、微小硬度による劣化深さは中性化深さよりも大きかった。

4. 結論

- (1) 劣化は遷移帯から進行し、次いでバルク部、中性化の順であった。
- (2) 防食ライニングが厚いほど、また、硬度が大きいほどピンホールから硫酸が浸入しにくいとため、劣化深さが小さい。ふくれが大きくなるほどピンホールが拡張し、また、防食ライニングとモルタルのはく離部も拡張し、硫酸の浸透速度が加速するため、劣化深さが大きい。
- (3) ふくれを抑制するためには硬く、付着性能のよい樹脂を用いるのがよいと考えられる。

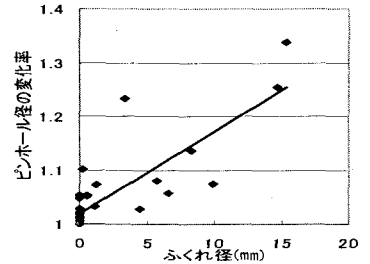


図 3 ふくれ径とピンホール径の変化率の関係

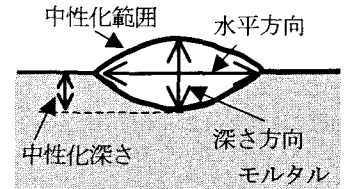


図 4 中性化の測定方法

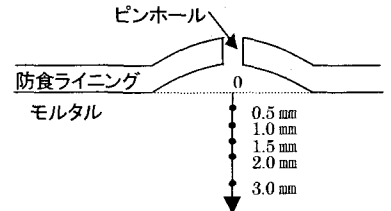


図 5 微小硬度測定位置

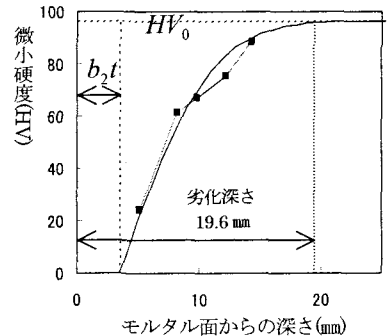


図 6 微小硬度測定結果

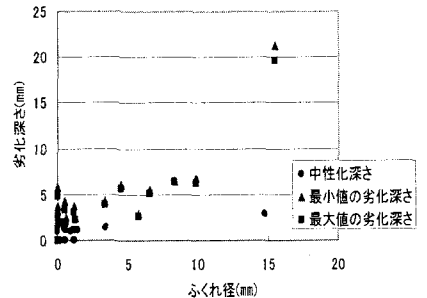


図 7 ふくれ径と各試験における劣化深さの関係