

エトリングサイトの遅延生成（DEF）に対する表面処理工法の効果

公益財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 ○山崎 由紀
 公益財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 上原 元樹
 公益財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 鶴田 孝司

1. 目的

エトリングサイトの遅延生成（Delayed Ettringite Formation, 以下 DEF）は、セメントの水和初期に生成したエトリングサイト（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ）が高温環境下で分解した後、再生成する現象である。DEF によりコンクリートが膨張し、ひび割れが生じた事例が報告されており、既往の研究により、DEF の発生条件やコンクリートの最高温度を指標とした DEF ひび割れの抑制方法等が検討されている¹⁾。

DEF の発生条件に関しては、コンクリートの高温履歴に加え、コンクリート中の硫酸塩量が多く、外部からの水分供給が多い場合に DEF 膨張が生じやすいものとされている²⁾。DEF が懸念される温度履歴のあったコンクリートにおいては、水分の浸透抑制効果を有する表面処理工法（表面含浸工法および表面被覆工法）によって、DEF が抑制されることが期待される。そこで、硫酸カリウムを添加し、最高温度を 85℃とした温度履歴を与えたモルタル供試体について、各種表面処理材（けい酸塩系表面含浸材 1 種、シラン系表面含浸材 1 種および樹脂系表面被覆材 1 種の計 3 種）をそれぞれ施工し、水中浸漬における膨張量を計測することにより DEF の抑制効果を検討した。表面処理材は、DEF ひび割れに対する予防保全および事後保全を考慮し、DEF による膨張が生じる前と生じた後の供試体それぞれで施工した。

2. 実験

モルタル供試体には、表 1 に示す材料を使用し、表 2 に示す配合で練り混ぜたコンクリートからウェットスクリーニングにより粗骨材を除去したモルタルを使用した。モルタルを型枠に充填・密封し、4 時間 20℃環境で静置した後に加熱（昇温・降温速度 20℃/h、最高温度 85℃を 12 時間保持）した。その後、材齢 1 日で脱型し、材齢 7 日まで 20℃の気中に静置した。供試体の寸法は 4×4×16cm とした。

表 1 使用材料

材料(記号)	種類	物性等
セメント(C)	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³ 全アルカリ量 0.40% 全 SO ₃ 量 2.99%
細骨材(S)	千葉県富津産山砂	表乾密度 2.61g/cm ³ 吸水率 1.24%
粗骨材(G)*	茨城県桜川産砕石 2005	表乾密度 2.64g/cm ³ 吸水率 0.84%
硫酸カリウム(K ₂ SO ₄)	試薬	—
練り混ぜ水(W)	上水道水	—

表 2 配合

単位量[kg/m ³]				K ₂ SO ₄ 添加率 [C×%] (SO ₃ 換算)	コンクリートの フレッシュ性状	
W	C	S	G		スランプ [cm]	空気量[%]
188	377	780	(984)*	2	7	1.4

※練り混ぜ直後にウェットスクリーニングにより除去

使用した表面処理材の概要を表 3 に示す。表面処理材の施工条件は、図 1 に示す①～③の 3 条件とした。条件①は表面処理材を施工しない条件で、材齢 7 日から 20℃の水中に供試体を浸漬した。条件②は DEF 膨張が生じる前に表面処理材を施工する条件であり、材齢 7 日時点で各種表面処理材をそれぞれ供試体に施工し、材齢 17 日から 20℃の水中に浸漬した。条件③は DEF 膨張が生じた後に表面処理材を施工する条件であり、材齢 7 日から 20℃の水中に浸漬し、約 0.2%の膨張が生じた時点で水中浸漬を中断した。その後、20℃の気中に 8 日間静置した後に各表面処理材をそれぞれ施工し、水中浸漬の中断から 23 日後に浸漬を再開した。条件①、③については材齢 7 日、②については材齢 17 日の浸漬前の供試体の長さ・質量を基準に、膨張率および質量増

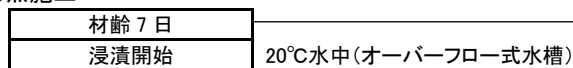
表 3 表面含浸材・表面被覆材の概要

種類	概要
けい酸塩系 表面含浸材	表面乾燥状態で塗布、表面乾燥後に重ね塗り
シラン系 表面含浸材	表面乾燥状態で塗布、表面乾燥後に重ね塗り
樹脂系 表面被覆材	エポキシ樹脂プライマー、エポキシ樹脂パテ、エポキシ樹脂塗料中塗、ふっ素樹脂塗料上塗を 4 工程で塗装

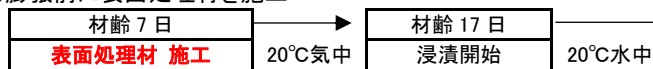
キーワード DEF, 表面含浸工法, 表面被覆工法, 補修, 硫酸塩, 膨張

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 TEL 042-573-7338

①無施工



②膨張前に表面処理材を施工



③膨張後に表面処理材を施工

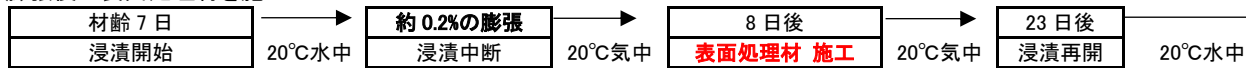


図 1 表面処理材の施工条件

加率を測定した。

3. 結果と考察

各種表面処理材を DEF 膨張前に施工した供試体では、無施工の供試体と比較して膨張が生じ始めるのが遅く、表面処理材の施工により DEF による膨張が抑制されたものと考えられる(図 2)。この DEF 膨張は、水中浸漬初期の質量増加率が低く、水分の浸透抑制効果が高い表面処理材を施工した供試体でより抑制された(図 3)。しかし、表面含浸材は水中浸漬条件のコンクリートでの使用が想定されていないこともあり、浸漬日数の経過に伴い DEF 膨張が生じた。また、DEF により約 0.2% の膨張が生じた後に各種表面処理材を施工した供試体においても、膨張前の施工と同様に、水分の浸透抑制効果の高い表面処理材で DEF のより大きな抑制効果がみられた(図 4)。

DEF 膨張が生じた後に樹脂系表面被覆材を施工した場合には、既に内部に滞留した水により DEF が進行する可能性が考えられたが、施工前に 20℃の気中(R.H. 60%)に 8 日間静置した本試験条件においては、浸漬 340 日時点で施工後に DEF 膨張が進行する傾向はみられていない。また、本試験は、供試体が常時水と接し、供試体に水圧のかかる環境条件である。そのため、外部から供給される水に対する撥水効果に加え、水蒸気透過性により含水率の低下を期待する表面含浸材に関しては、その効果が得られにくい環境条件と考えられる。今後、より実コンクリート構造物に近い環境における適用条件について検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 2016
- 2) 福田峻也, 羽原俊祐, 小山田哲也, 藤原忠司: DEF に及ぼすセメント, 骨材, 硫酸塩の影響, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp.358-341, 2007

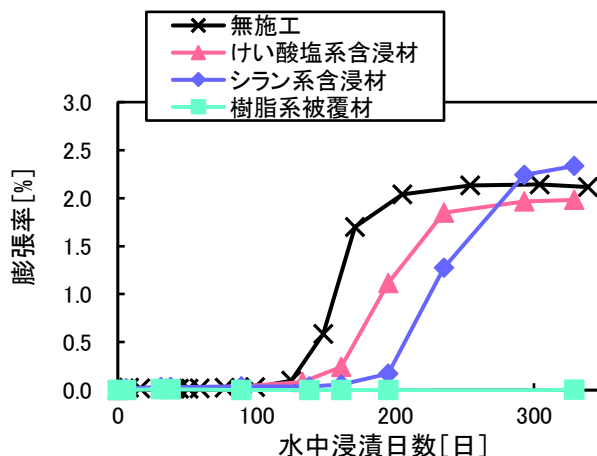


図 2 膨張率の推移(無施工/膨張前の施工)

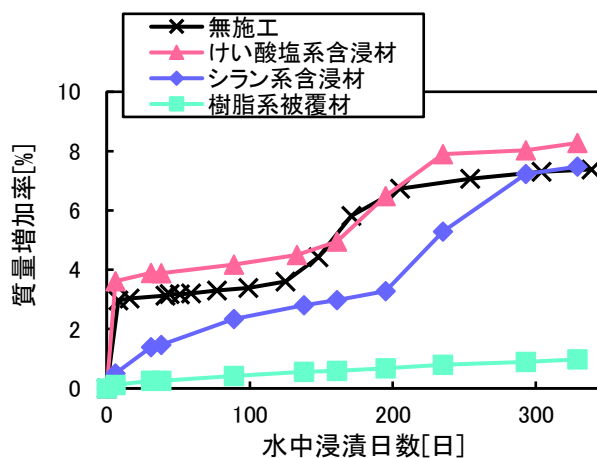


図 3 質量増加率の推移(無施工/膨張前の施工)

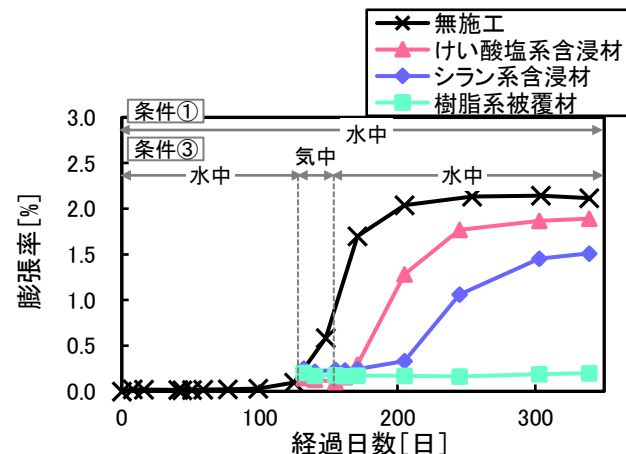


図 4 膨張率の推移(無施工/膨張後の施工)