

DEF 生成時の空隙特性に着目した膨張メカニズムとその判定手法の提案

芝浦工業大学 大学院 ○廣杉 海琴  
 芝浦工業大学 依田 琉生  
 伊代田 岳史

1. はじめに

セメントの水和反応によって生成されたエトリングイト (AFt) が、水和初期において高温履歴を受け分解し、その後の水分供給によって再生成する現象を DEF (Delayed Ettringite Formation) という<sup>1)</sup>。この際、硬化体に膨張 (DEF 膨張) が生じることで、コンクリート構造物にひび割れが生じて、耐久性を低下させることが指摘されている。しかし、DEF と DEF 膨張の関係性は未解明であり、DEF が発生した硬化体でも、DEF 膨張は発生しない場合がある。

そこで、本研究では、遅延生成したエトリングイトがすでに生成した別の水和物を作る空間を押し広げることで DEF 膨張するのではないかと仮定し、セメント硬化体中の空隙に着目して、DEF 膨張のメカニズムを把握する。それに加え、DEF 膨張メカニズムの特徴から DEF 膨張の可能性を判断する方法を検討する。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

表-1 に試験に用いた混和材と W/C を示す。本研究では、配合条件の違いが DEF 膨張に与える影響を検討するため、フライアッシュ (FA)、石灰石微粉末 (LSP)、高炉スラグ微粉末 (GGBS) の混和材を用いた配合と、水セメント比を変えた配合を作製した。S/C は 3.0 で一定とし、JIS R 5201 に準拠し練り混ぜを行い、40×40×160mm のモルタル供試体を作製した。また、AFt 生成に寄与する C<sub>3</sub>A 量を一定とするため、混和材はセメントに対して外割置換した。全ての配合において、DEF 促進のため、K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> をセメント量に対して SO<sub>3</sub> 含有率が 6.1% になるように添加した。また、打込み後は福田らの報告<sup>2)</sup>を参考に、前養生を 20°C4 時間、最高温度 90°C で蒸気養生を行い、その後 20°C の水中で静置した。

2.2 試験項目および試験方法

(1) 長さ変化試験

JISA 1129-3 に準拠し、ダイヤルゲージ法を用いて、長さ変化を 1 週間ごとに計測した。

(2) AFt 生成量

AFt 生成量を確認するため、高温履歴前後の材齢 4h、

表-1 使用した混和材添加割合と W/C

| 配合案     | W/C(%) | 外割:添加率(%) |    |     |
|---------|--------|-----------|----|-----|
|         |        | GGBS      | FA | LSP |
| 30N     | 30     | -         | -  | -   |
| 60N     | 60     | -         | -  | -   |
| 100N    | 100    | -         | -  | -   |
| F10     | 60     | -         | 10 | -   |
| F30     |        | -         | 30 | -   |
| LP10    |        | -         | -  | 10  |
| LP30    |        | -         | -  | 30  |
| B50     |        | 50        | -  | -   |
| LP10B50 |        | 50        | -  | 10  |
| LP30B50 |        | 50        | -  | 30  |

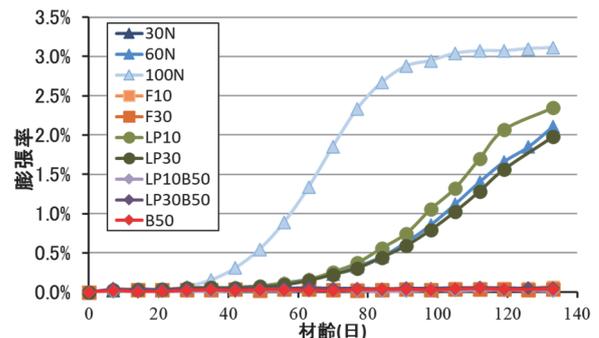


図-1 膨張率の経時変化

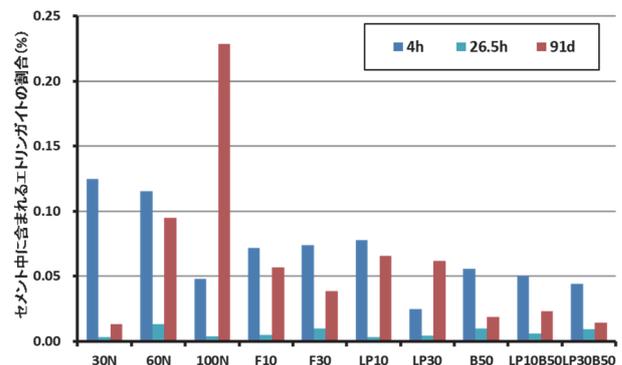


図-2 各材齢の AFt 量

26.5h と、DEF 膨張後の材齢 91 日において、粉末 X 線回折を行い、内部標準法を用いて AFt 量を算出した。

(3) 空隙径分布

硬化体の空隙構造を把握するため、水銀圧入式ポロシ

メーター (MIP) を用いて、DEF 膨張前の材齢 21 日の細孔径分布を測定した。

### 3. 試験結果

#### 3. 1 膨張率

図-1 に各配合の膨張率を示す。W/C では、W/C が高いほど膨張し、膨張の開始材齢が早くなることがわかった。混和材配合においては、LSP のみを置換した配合では、LP10 は 60N よりも膨張率が大きくなり、LP30 は 60N よりも小さい膨張率になることが確認された。FA 置換 (F10、F30)、LSP 置換 (LP10、LP30)、LSP と GGBS の複合置換 (LP10B50、LP30B50)、GGBS 置換 (B50) はいずれも膨張しなかった。

#### 3. 2 AFt 量

図-2 に材齢ごとの単位セメント中に含まれる AFt 量を示す。すべての配合で高温履歴直後の 26.5h で AFt はほぼ消失し、材齢 91 日で AFt が生成したことから、DEF が生じたことを確認した。また 60N と各材齢で比較すると、30N では AFt 量に差はないが、100N では材齢 91 日のみ多くなった。FA、GGBS 置換の配合では再生成した材齢 91 日の AFt 量は減少する傾向を確認した。

#### 3. 3 細孔径分布

図-3 に DEF 膨張発生前の材齢 21 日における各配合の細孔径分布を示す。また、材齢 91 日における膨張率が 0.1% 以上であった配合を赤枠で示す。各細孔径に着目し、赤枠で示した配合とそれ以外の配合で比較すると、50~500nm の細孔量に違いが確認された。膨張率が 0.1% 以上の配合では 50~500nm の細孔量が多い。一方、それ未満の配合では、この径の細孔量は少ないことが確認された。このことから、50~500nm の空隙が DEF 膨張に影響があるのではないかと考えられる。

### 4. DEF 膨張メカニズムの考察と判断方法

#### 4. 1 DEF 膨張における空隙の特性

図-3 の結果を踏まえて、DEF 膨張に寄与する空隙をより詳細に検討するため、AFt はどの空隙にも生成すると仮定し、各細孔径の割合と材齢 133 日の膨張率との関係を確認した。その結果、図-4 に示す 50~500nm の細孔径において、細孔量の割合が 10~25% を境に、それ以上では赤色の◆で示す膨張率が 1.0% 以上の配合が存在し、それ以下では 1.0% 未満の配合が存在している関係性が確認された。このことから、50~500nm の細孔径で AFt が生成されることが DEF 膨張に影響を与えることが示唆された。

#### 4. 2 細孔径の閾値を用いた DEF 膨張判定手法

DEF 膨張は、DEF 膨張前の空隙構造に依存することが示唆されたことから、DEF 膨張前の空隙構造を利用して、DEF 膨張の予測判断が可能か検討した。図-5 に各配合の積算細孔径分布を示す。材齢 133 日における膨張率が

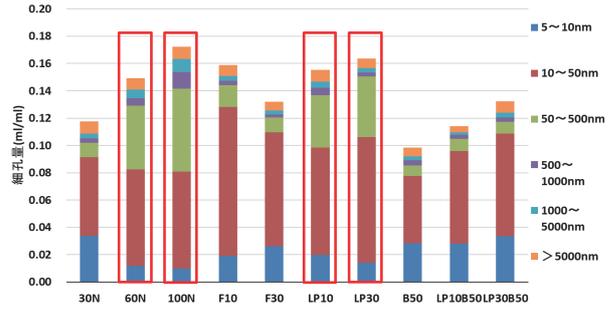


図-3 細孔径分布(材齢 21 日)

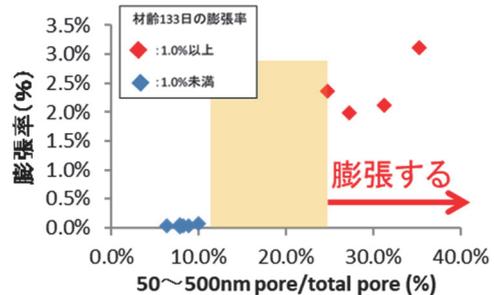


図-4 50~500nm の細孔径における膨張率との関係

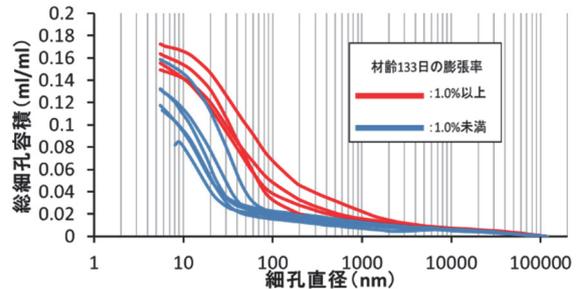


図-5 累積細孔径分布

1.0%以上の配合を赤線で、それ未満の配合を青色で示す。積算細孔径の線の傾きが大きくなる細孔直径 100nm の点で、膨張した配合とそれ以外の配合に分かれていることが確認された。そのため、この点を細孔径の閾値とし、DEF 膨張の判断基準として用いることができる可能性があることが示唆できた。

#### 謝辞

本研究は、鉄鋼スラグ協会様のご支援をいただいております。関係者各位に感謝申し上げます。

#### 【参考文献】

- 「DEF のリスクを考える」に関するシンポジウム、公益社団法人日本コンクリート工学会、2019
- 福田峻也、羽原俊祐、小山田哲也、藤原忠司：コンクリートの蒸気養生条件と DEF 膨張、土木学会東北支部技術研究発表会、2006