

膨張相の時空間変化が DEF の膨張挙動に及ぼす影響の解析的検討

名古屋大学 学生会員 ○前田 英香

名古屋大学大学院 正会員 三浦 泰人, 中村 光

1. はじめに

水和初期において 70 度以上の高温履歴を経たコンクリートは、エトリングタイトの 2 次生成による内部膨張が生じる可能性がある。この劣化現象は遅延エトリングタイト生成 (DEF) とよばれ、骨材が膨張の起点となるアルカリ骨材反応 (ASR) と異なりペーストが膨張する現象であり、その膨張量は 4 倍程度になることが知られている¹⁾。近年、プレキャスト部材の積極的な利用が進められているが、蒸気養生の際の温度管理が適切でない場合など DEF のリスクを払拭することは難しい。現状では、エトリングタイトの 2 次生成プロセスは解明されつつあるものの、DEF の膨張挙動の力学的要因については未解明な点が多い。DEF の膨張ひび割れ性状は、ASR で観察されるような局所化したひび割れが発生する¹⁾。すべてのエトリングタイトが膨張に寄与しないという報告²⁾を踏まえると、膨張の起点が点在している可能性があり、これが DEF 固有の膨張挙動を解明する上で重要であると予想できる。すなわち、膨張相の空間分布や時間変化が膨張ひび割れ進展プロセスや拘束下の膨張異方性¹⁾に深く関与している可能性がある³⁾。本研究では、膨張相の空間分布が時間軸上で変化するときの膨張挙動を数値解析的に評価することで、力学的観点から DEF の膨張メカニズムの解明を試みた。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

本研究では、DEF の膨張挙動を再現するために、ひびわれを直接評価可能な三次元剛体ばねモデル³⁾(RBSM)を用いた解析的検討を行った。解析モデルは、モルタル相と骨材相から成る 2 相モデルによってコンクリートを表現した。解析モデルは図-1 に示す。直径 20mm の球状の骨材を 80×80×80mm の空間にランダムに配置した。なお、平均要素寸法は 3.0mm とした。本解析ではすべてのモルタル相が膨張に関与するとして、膨張ひずみを初期ひずみとして導入することで、膨張挙動の再現を試みた。なお、図-2 に示す標点間の相対変位から x, y, z 方向のひずみを算出しマクロな膨張量変化を求めた。

2.2 解析シリーズ

本研究では、膨張相の時空間変化を明示的に導入し、DEF の膨張挙動に及ぼす力学的な影響を検証することを目的としている。そこで、図-3 に示す解析シリーズを設けた。シリーズ 1 では、入力した膨張ひずみの総量を一定とし、膨張相の時間変化の影響を抽出することを目的とした。ケース 1 は、全てモルタル要素が一樣に常に膨張するケース、ケース 2 と 3 は 200 日の膨張期間を 4 つに区分して、それぞれの期間で異なるモルタル要素が膨張することを想定した膨張相の時空間変化を考慮したケースである。ケース 2 と 3 は、それぞれ膨張相を等分割したケースと正規分布としたケースである。シリーズ 2 は、図-4 に示す実験

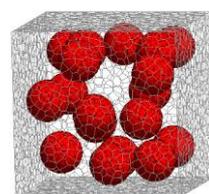


図-1 解析モデル

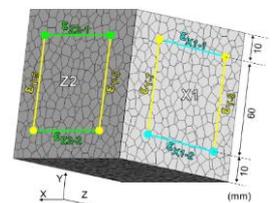


図-2 標点の定義

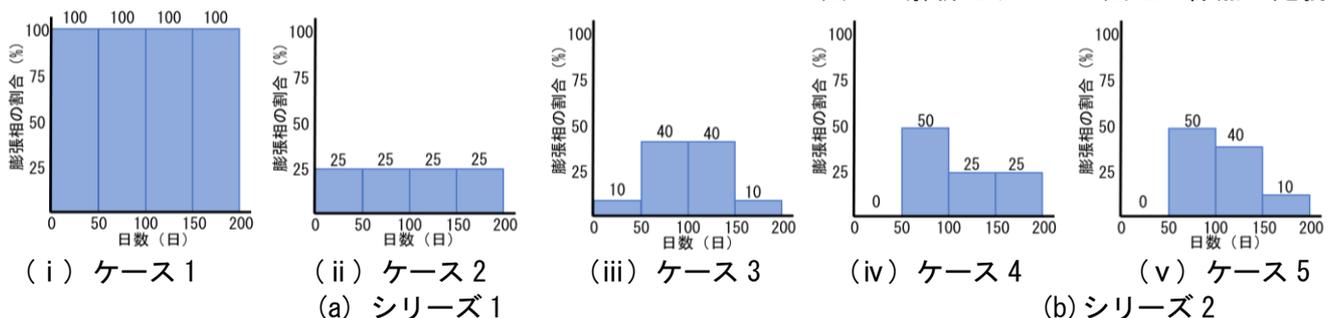


図-3 膨張相の割合

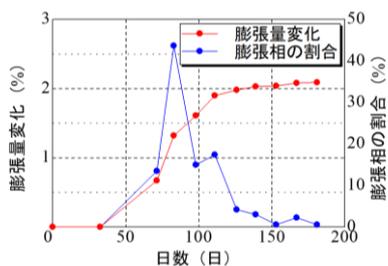
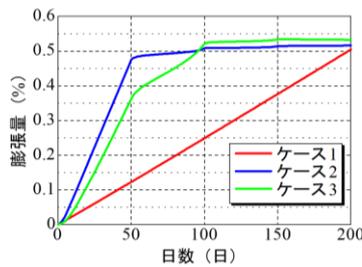
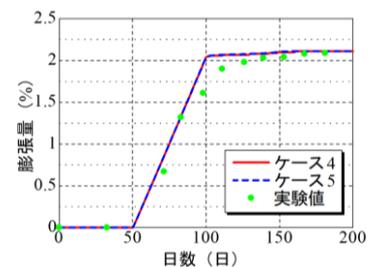


図-4 実験の膨張量変化



(a) シリーズ 1



(b) シリーズ 2

図-5 膨張量の経時変化

の膨張量変化から膨張量変化の時間微分を算出し、それを基に膨張相の割合をケース 4, 5 のように定義した。さらに、実験の膨張量変化と一致するように入力膨張ひずみを決定した。入力した膨張ひずみは、ケース 1 から 5 でそれぞれ 25, 100, 100, 400, 400 μ である。

3. 解析結果及び考察

3.1 膨張相の空間分布の時間変化の感度解析 (シリーズ 1)

図-5(a)にシリーズ 1 の膨張量変化を示す。ケース 1 では膨張量が直線的に増加していることがわかる。一方、ケース 2 および 3 では、それぞれ 50 日と 100 日以降で膨張量が律速状態になることが確認された。すなわち、入力膨張ひずみの総量を一定にすると、最終的な膨張量は同等となるが、膨張相の空間分布が変化するケース 2, 3 では初期の膨張が全体の膨張挙動に及ぼす影響が非常に大きく、それ以降の異なる膨張相は、全体の膨張にほとんど関与していないといえる。

3.2 膨張相の空間分布の時間変化の再現 (シリーズ 2)

図-5(b)にシリーズ 2 の膨張量変化を示す。ケース 4 と 5 では図-4 に示すように 100 日以降の膨張相の割合が異なる。それにもかかわらず、膨張量変化に大きな差異は確認できなかった。ケース 2 と 3 において同様の傾向が確認されたことから、膨張開始時の膨張相の空間分布が全体の膨張挙動に支配的であることがわかる。

図-6 に各ひび割れ幅の体積の経時変化を示す。これをみると、幅の小さいひび割れ体積が増加し、さらに膨張が進まなくなるとこのひび割れ幅が発達することで、幅の大きいひび割れの体積が増加するといったプロセスが連続的に生じていることが確認できる。しかしながら、100 日以降ではひび割れ体積の合計が減少する傾向が確認された。これは、ひび割れが発生した後に異なる膨張相が膨張することによって、ひび割れが狭まることの影響していると考えられる。本来膨張量変化とひび割れ体積の変化の傾向は一致するはずである。この差異は、本解析で定義した膨張ひずみが、標点間以外の領域に生じた比較的幅の大きいひび割れの変化を考慮できていないためと考えられる。このように、若干のひび割れ体積の減少がみられるものの、100 日以降で膨張相が異なっても、新たな膨張ひび割れが発生することは確認できない。このことから、膨張初期に生じたひび割れによって、異なる領域から生じる膨張の影響は非常に小さくなることが推測される。

4. まとめ

DEF 膨張では、膨張相の空間分布の時間変化が大きく影響していることが解析的に示された。また、初期の膨張が全体の膨張挙動に及ぼす影響が非常に大きく、それ以降の異なる膨張相からの膨張は、全体の膨張にほとんど関与していないことが確認できた。

5. 参考文献

- 1) Hassina Bouzabata et al. : Effects of restraint on expansion due to delayed ettringite formation, *Cement and Concrete Research*, Vol.42, pp.1024-1031, 2012
- 2) S. Diamond : Delayed Ettringite Formation-Processes and Problems, *Cement and Concrete Composites*, Vol.18, pp.205-215, 1996
- 3) Taito Miura et al. : Impact of origination of expansion on three-dimensional expansion crack propagation process due to DEF evaluated by mesoscale discrete model, *Construction and Building Materials*, No.260, 2020

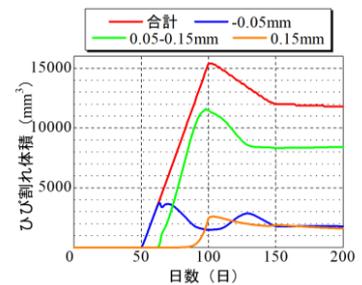


図-6 ひび割れ体積の経時変化