

アルカリ骨材反応の膨張に伴うひび割れ解析

琉球大学 学生会員 神田 康行・琉球大学 正会員 松原 仁
 琉球大学 正会員 伊良波 繁雄・琉球大学 正会員 富山 潤
 東京大学 矢川 元基

1. 目的

コンクリート構造物は、常に外気に曝されている場合が多く、自然の複雑な外力、あるいは反応により劣化していく。その中で、コンクリート中に有害骨材が存在すると、内部で膨張ひび割れの一つであるアルカリ骨材反応が起こり、コンクリート表面に亀甲状のひび割れが生じる。これまで、この現象を3次元的に捉え、解析的に評価することは困難であった。そこで、本研究では筆者らが提案するコンクリートの2相複合材料モデル¹⁾を用いてアルカリ骨材反応による膨張ひび割れシミュレーションを行う。なお、求解法はフリーメッシュ法(FMM)を用いた。

2. 2相複合材料としてのコンクリートモデル

筆者らは、実際の粗骨材のデジタル画像を用いて3次元モデル化し(図-1)、これらを乱数により解析モデル内に挿入することにより、図-2(a)に示すような2相複合材料としてのコンクリートモデルを作成する方法を提案した¹⁾。本モデルは有限要素法(FEM)、フリーメッシュ法(FMM)で利用可能であり、解析領域全体で直接、要素分割するのが最も望ましい。しかし、図-2の(a)のように粗骨材数が多くなってくると、モルタル部分の要素分割は、粗骨材が接近しているため要素分割は困難である。

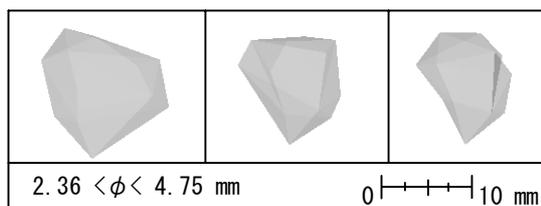
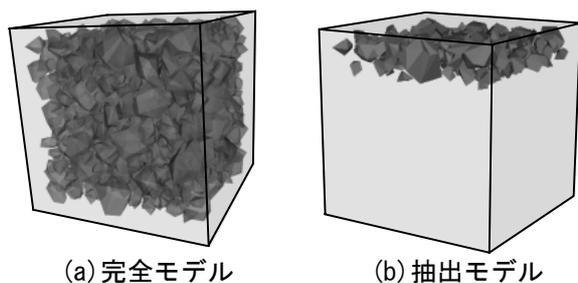
図-1 粗骨材形状モデル(ϕ : 粒径)

図-2 コンクリートモデル

このため、本研究では詳細に把握したい箇所については、完全に粗骨材を要素分割し、その以外の部分は剛性マトリックスを作成する段階で簡易的に点ベース³⁾で粗骨材を考慮する混合型の解析モデル²⁾を用いた。

3. アルカリ骨材反応による膨張量

コンクリート中に有害骨材が存在すると、長期の化学反応により、コンクリート内部の界面にゲルが生じ、これが膨張してコンクリート表面にひび割れが生じる。本研究では、骨材周辺のゲルの膨張を粗骨材自身の膨張によって表現した。粗骨材の膨張については、一般に熱応力解析に用いられる方法が応用できる。詳細な説明は文献4)に詳しいので、ここでは簡単に述べることにする。熱ひずみによる節点荷重ベクトル($\{f_i\}$)は次式で与えられる。

$$\{f_i\} = \int_V [B]^T [D] \{\epsilon^t\} dV \quad (1)$$

ここで、 V は要素体積、 $[B]$ は変位-ひずみマトリックス、 $[D]$ は応力-ひずみマトリックス、 $\{\epsilon^t\}$ は熱ひずみベクトルであり、次式となる。

$$\begin{aligned} \{\epsilon^t\} &= \{\epsilon_x^t \ \epsilon_y^t \ \epsilon_z^t \ \gamma_{xy}^t \ \gamma_{yz}^t \ \gamma_{zx}^t\}^T \\ &= \{\alpha T \ \alpha T \ \alpha T \ 0 \ 0 \ 0\}^T \end{aligned} \quad (2)$$

なお、 α は線膨張係数であり、 T は温度である。式(2)は、ある要素の温度による一様な膨張ひずみであるから、 αT は粗骨材の膨張ひずみである。よって、本研究では粗骨材のみに式(1)を適用し、粗骨材を膨張させながら解析を進めることにした。

4. ひび割れ進展解析法³⁾

アルカリ骨材反応に伴う骨材の膨張量は骨材の種類、コンクリート中のアルカリ量等多くの複雑な影響を受ける。このため、本論文では次のような簡略化して骨材が単純に膨張すると仮定してひび割れ解析を行った。

- 1) 粗骨材に任意のひずみ膨張量を与え、コンクリート内の応力を求める。
- 2) 応力より最大主応力を求め、最大主応力がコンクリートの引張強度に達する倍率を求める。
- 3) この倍率が最小のものをひび割れ節点とし、次のステップからはひび割れ要素を用いる。
- 4) 最小の倍率を全物理量に乗じることにより、ひび割

キーワード 2相複合材料モデル、コンクリート、ひび割れ解析、フリーメッシュ法

連絡先 〒903-0129 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地 琉球大学工学部環境建設工学科 TEL 098-895-8663

れ後の物理量を求める。

以上のステップをひび割れが十分進展するまで繰り返すことでひび割れ解析を簡易的に行うことができる。

5. 数値解析例

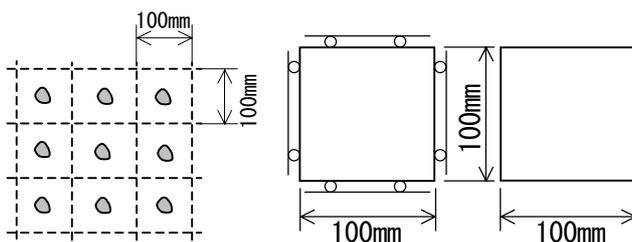
ここでは、本手法の適用例として、図-3(a)に示すような解析領域内部の表面に近い個所に、モデル粗骨材が等間隔（100mm）にある場合、図-2(a)に示すように粗骨材が多数個あり、その粗骨材の内、図-2(b)のようにコンクリート表面に近い粗骨材のみアルカリ骨材反応による膨張が生じたと仮定した2ケースの解析例を示す。等間隔に配置する場合は対称性を利用して100mm立方だけを図-3(b)の境界条件のもとで解析を行った。粗骨材を多数は配置する場合も図-3(b)の境界条件のもとで解析を行った。粗骨材・モルタルの材料係数を表-1に示す。

図-4にコンクリート表面の浅い場所で等間隔に配置された粗骨材が膨張した時のひび割れ進展状況を示した。解析は対称性を利用しているので長さ100mm立方体の領域である。図-4で(a),(b)は側面方向、(c)(d)は上面のひび割れ状況である。ひび割れは、最初に図中の(a)のように骨材界面付近から発生し、コンクリート表面に到達する(b)。最終的には(d)のように粗骨材を中心とし十字を描くようにひび割れが進展した。すなわち、骨材の配置が等間隔の場合は骨材を結ぶような格子状のひび割れが発生した。

次の解析例は図-2の(a)のように全ての粗骨材を考慮した解析例である。解析ではアルカリ骨材反応による膨張はコンクリート表面付近の骨材のみに生じると仮定し解析を行った。このため、図-2の(b)のように表面に近い粗骨材だけの形状を考慮して要素分割を行ない、その以外の部分は剛性マトリックスを作成する段階で簡易的に点ベースで粗骨材を考慮する混合型の解析モデルを用いた。この解析例のひび割れ進展状況は図-5(a)～(d)の順に進展した。粗骨材等間隔配置の

表-1 粗骨材とモルタルの材料係数

	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比
粗骨材	56122.45	0.15
モルタル	20000.00	0.21



(a) 粗骨材等間隔モデル(上面) (b) 境界条件

図-3 境界条件とモデル

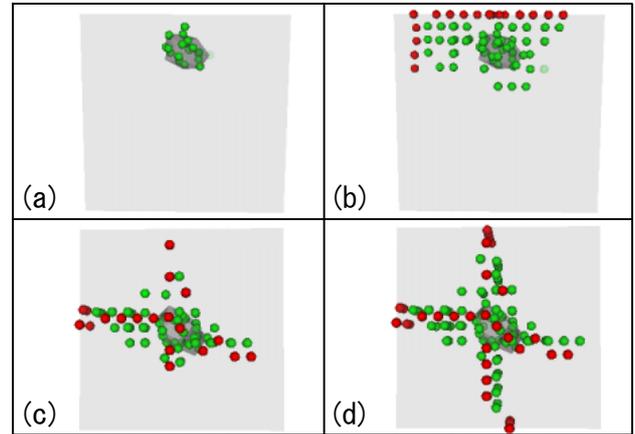


図-4 粗骨材等間隔配置の場合のひび割れ状況

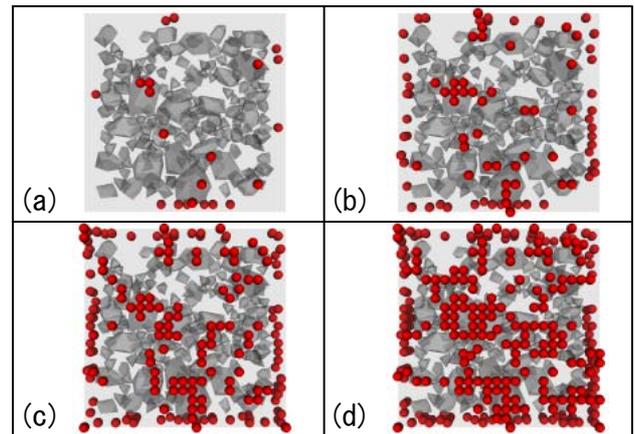


図-5 コンクリート表面のひび割れ状況(上面)

場合と同様に、ひび割れは粗骨材とモルタルとの界面付近から発生し、その後コンクリート表面に最も近い粗骨材界面のひび割れがコンクリート表面方向に進行し、図-5(a),(b)のように小さなひび割れが表面全体に広がっていく。最終的にはこれらのひび割れが結合し、コンクリート表面には亀甲状のひび割れが見られた。

7. まとめ

本研究では、これまで3次元的な解析が困難であったアルカリ骨材反応によるひび割れ現象をシミュレートする方法を示した。しかし、実際のひび割れとの比較検討は行ってないので、今後の課題である。

参考文献

- 1) 松原仁, 伊良波繁雄, 富山潤, 矢川元基: 平成14年度西部支部研究発表会, 2003
- 2) 松原仁, 伊良波繁雄, 富山潤, 稲葉正和, 矢川元基: モルタル-粗骨材2相複合材料としてのコンクリートの数値解析法, 平成15年度全国大会第58回年次学術講演会, 2003
- 3) 安和守史, 伊良波繁雄, 富山潤, 矢川元基: 3次元フリーメッシュ法を用いたコンクリートの破壊解析手法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, CD-ROM, 2002
- 4) 矢川元基, 宮崎則幸: 有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析, サイエンス社, 1985