

メゾレベルでのコンクリート非線形解析による ASR 挙動メカニズム 解明に向けた基礎研究

九州大学大学院 学生会員 ○片山 純一
九州大学大学院 正会員 浅井 光輝
九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

1. 目的

わが国において、アルカリシリカ反応 (ASR) に関する研究は多く行われており、判定試験方法の規格化やアルカリ総量の規制等で ASR の発生を抑制してきた。しかし、膨張挙動や損傷進展などの ASR の挙動メカニズムは未だ完全には解明されておらず、例えば、細骨材の膨張に伴いモルタルが均等に膨張しているのか、粗骨材自身が主に膨張しているのか、または骨材界面のゲルの膨張によるものなのか真相は定かではない¹⁾。そこで、本研究では、ASR 挙動メカニズム解明に向けた基礎検討として、メゾレベル²⁾ (粗骨材, 界面, モルタルの 3 層) でのコンクリート材料解析モデルを用いて不連続変形解析を実施し、骨材の膨張と亀裂進展挙動の関係について検討を行った。

2. 本解析手法

本研究においては、3次元画像の構成単位であるボクセルを有限要素と見なすボクセル有限要素法を改良し、2.1 節に示す積分平均化理論を導入した非局所型ボクセル有限要素法を採用した。この手法は、ある1点で応力を評価する際に、その応力評価点の周囲の影響を加味した大域的な点の情報から局所的な点での力学状態を評価することで、従来のボクセル有限要素法の問題点であった材料界面における応力振動の抑制効果を期待するものである。

2.1 積分平均化理論の導入

各 Gauss 点で算出されるひずみ値の要素内平均値を各要素の局所ひずみ ε とする。弾性内のテンソルを C とすれば局所応力は式 (1) で表される。

$$\sigma = C : \varepsilon \quad (1)$$

これに対し、評価点周りの局所ひずみの重み付き平均として非局所ひずみ $\bar{\varepsilon}$ を式 (2) のように定義し、非局所応力 $\bar{\sigma}$ は $\bar{\varepsilon}$ と C から式 (3) で算定する。

$$\bar{\varepsilon}(x) = \int_{\Omega} \alpha(x, \xi) \varepsilon(\xi) d\xi \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = C : \bar{\varepsilon} \quad (3)$$

ここで α は非局所重み関数であり、本研究では図-1で示されるような、式 (4) の釣鐘型関数を採用することとする。

$$\alpha(x, \xi) = \frac{\alpha_0(|x - \xi|)}{\int_{\Omega} \alpha_0(|x - \xi|) d\xi} \quad (4)$$

$$\alpha_0(r) = \begin{cases} (1 - \frac{r^2}{R^2})^2 & (0 \leq r \leq R) \\ 0 & (R \leq r) \end{cases} \quad (5)$$

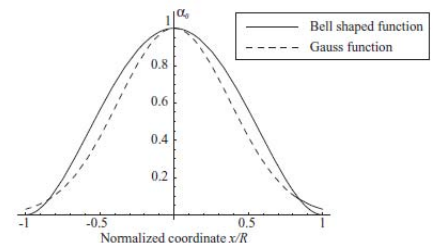
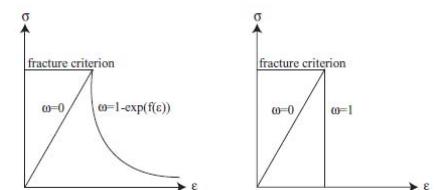


図-1 非局所重み関数



(a) 軟化挙動 (b) 弾脆性挙動

図-2 損傷モデルにおける局所挙動

ここで R は非局所影響半径と呼ばれるパラメータであり、 $r = |x - \xi|$ は評価点 x から任意点 ξ までの距離を示す。

2.2 不連続面の表現法

すべての領域が微小かつ定形要素で分割されるボクセル有限要素法との親和性や計算効率を考慮し、不連続面の簡易的な表現法としてエレメント除去技術を用いる。この技術は、ある破壊基準を満たした要素の剛性を劣化させる、または剛性を消失させ応力の伝達を遮り不連続面を表現するものである。通常の損傷モデルでは、図-2(a) のような損傷パラメータに指数関数を与えることにより、巨視的な軟化挙動を表現するモデルが大半を占めている。し

かし本解析では、ごく微小な領域での材料特性を与えるべきであり、図-2(b)のように破壊基準を満たした要素は瞬時に損傷パラメータを1とし、要素剛性を消失させることで不連続面を表現した。

3. メゾレベルでのコンクリート3次元モデル解析

本研究での解析手法の不連続面進展解析における有用性を示すため、図-3に示される境界条件の下、図-4(a)(b)に示されるコンクリートモデルについて1軸圧縮時の破壊挙動の解析を行った。

解析結果として、内部ひび割れの進展状況を図-5、表面ひび割れ図を図-6に示す。この図-5、図-6に示すように、非拘束になっているz方向に引張力が生じたため、z方向の法線方向x-y面でまずモルタルと骨材の界面剥離が発生し、最終的にはひび割れがモルタルへと進展することで破壊したと考えられる。

界面剥離からひび割れ進展・破壊までの一連の破壊現象を確認し、本研究解析手法での不連続面進展解析における有用性は確認できたといえる。

4. 簡易コンクリート3次元モデルでの膨張挙動解析

図-7に示される、簡易なコンクリートモデル内部に存在する半径7.6(mm)の球体を一様に膨張させることで、ひび割れの進展挙動を解析する。本研究では、拘束条件を図-7に示すような全面拘束(条件1)と、z方向の1面のみ拘束しない(条件2)、について数値解析を行った。

図-8(a)(b)に両者の解析結果を示す。条件1の結果は、ほぼ等方的に発生するひび割れの進展が解析領域の途中で止まるのに対し、条件2では非拘束であるz方向の1面にのみひび割れが発生し、ほぼ同時に解析領域表面まで進展する結果が得られている。ASR現象が変形の拘束がない自由表面近傍で特に顕著に観測される事実と同様な傾向を示す結果であり、今後はより現実的な変位の拘束状態を反映させた数値解析技術へと発展させる必要があるものとする。

5. 結論

本研究で用いたコンクリート材料のメゾレベル不連続体解析手法により、不連続面進展解析における有用性を確認した後、簡易モデルにより骨材の膨張時の不連続面進展挙動解析へと応用させた。数値解析の最大のメリットは、実験では観測困難な3次元的なひび割れの進展挙動が観測できることであり、ASR挙動メカニズムの解明にも有用であると思われる。今後は、数値解析の高速化、メゾレベルでの解析を利用したマクロスケール解析法の構築、そして、ASRについての様々な実験データを基に知見を集積し、より複雑な要因を絡めての数値解析を行うことが必要である。

参考文献

- 1)川端雄一郎, 山田一夫, 松下博通: 岩石学的分析に基づいた安山岩のASR反応性評価および膨張挙動解析, 土木学会論文集E Vol63.No4, pp689-703.2007.12
- 2)浅井光輝, 山岸道弘, 寺田賢二郎, 永井学志: 非局所型ボクセル有限要素法の開発とその破壊挙動解析への適用, 土木学会論文集No.759/I-67, pp233-245.2004.4

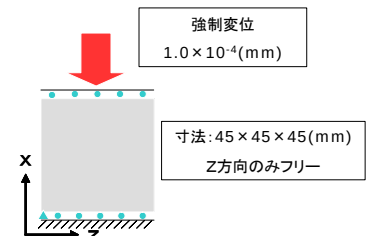


図-3 境界条件

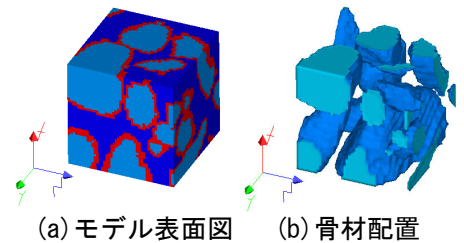


図-4 コンクリートモデル

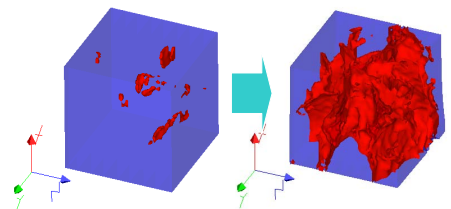


図-5 内部ひび割れの進展状況

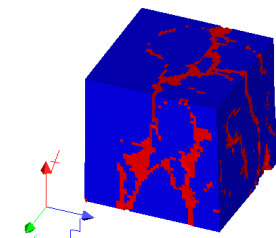


図-6 表面ひび割れ

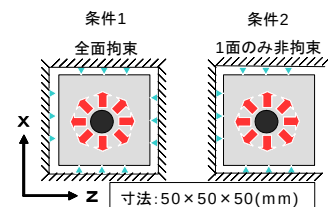
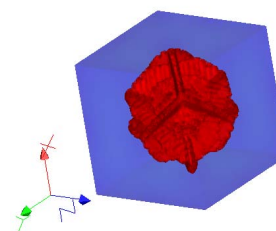
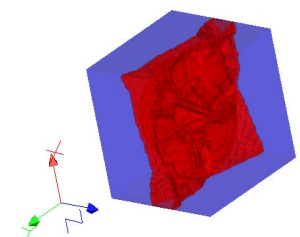


図-7 境界条件



(a) 条件1 (全面拘束)



(b) 条件2 (z方向のみ非拘束)

図-8 内部ひび割れ状況