

## ASR 挙動メカニズム解明に向けた メゾレベル・コンクリート非線形解析手法の開発

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、アルカリ反応性骨材と非反応性骨材の両者の混合比が、ある特定の値の場合にコンクリートの膨張量が最大となるペシマム現象の存在などにより、ASR の損傷挙動メカニズムは未だ完全には解明されていない<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>（粗骨材，界面，モルタルの 3 相）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、三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  $\varepsilon$  とする。弾性内のテンソルを  $\mathbf{C}$  とすれば局所応力は式(1)で表される。

$$\sigma = \mathbf{C} : \varepsilon \tag{1}$$

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  $\mathbf{C}$  から式(3)で算定する。

$$\bar{\varepsilon}(\mathbf{x}) = \int_V \alpha(\mathbf{x}, \xi) \varepsilon(\xi) dV \tag{2}$$

$$\bar{\sigma} = \mathbf{C} : \bar{\varepsilon} \tag{3}$$

ここで  $\alpha$  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。

$$\alpha(\mathbf{x}, \xi) = \frac{\alpha_0(|\mathbf{x} - \xi|)}{\int_V \alpha_0(|\mathbf{x} - \xi|) dV} \tag{4}$$

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

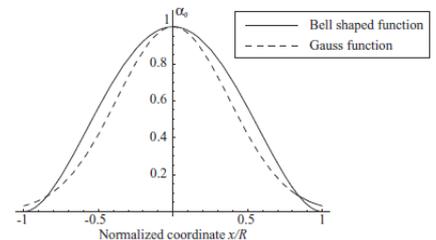
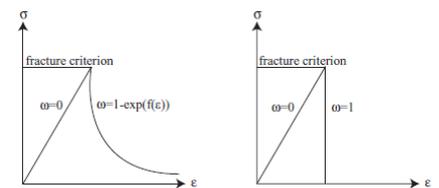


図-1 非局所重み関数



(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、 $r = |\mathbf{x} - \xi|$  は評価点  $\mathbf{x}$  から任意点  $\xi$  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消失させ応力の伝

キーワード ASR, ボクセル有限要素法, 不連続変形解析

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地 九州大学 TEL 092-802-3370

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で、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、本解析では微小な領域での材料特性を与えるべきとの観点から、図-2(b)のように破壊基準を満たした要素は瞬時に要素剛性を消失させることで不連続面を表現した。

2.3 破壊基準

各相（骨材、モルタル、界面）の破壊基準について説明する。骨材及びモルタルは最小主応力が破壊基準（それぞれ3MPa, 7MPa）を満たすと破壊するものとし。また、界面については表面力の法線方向成分が破壊基準（15MPa）に達した際に破壊するよう定義している。

3. メゾレベルでのコンクリート3次元モデル解析

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、表面ひび割れ図を図-6に示す。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xy面で、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が再現できており、本研究解析手法での不連続面進展解析における有用性を確認した。

4. 仮想三次元モデルでの膨張挙動解析

次に、各骨材が膨張するものとし、その際のひび割れ進展挙動をシミュレーションした。ここでは、図-7(a)に示されるように規則性に骨材が配置されたモデルと、図7-(b)に示されるようなランダムに骨材が配置されたモデルの2つを使用した。拘束条件としては、図-8に示すような全面拘束（条件1）と、z方向1面のみ非拘束（条件2）の2つを用いた。

以上のモデルを用い、境界条件や、骨材配置による規則性の有無についての検討を行った。解析結果については、当日の研究発表で示す。

5. 結論

コンクリートメゾレベル解析手法により、材料内部のひび割れ進展解析を行い、ASRを想定した骨材膨張時のひび割れ進展解析へと応用させた。本解析手法の最大のメリットは、実験では観測困難な三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、数値解析の高速化を図り、ASRについての実験データや解析結果との比較検討を繰り返し行い、ASR挙動メカニズムの解明に役立つ予定である。その際に、アルカリの浸透解析を含めた複合的な数値解析の検討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

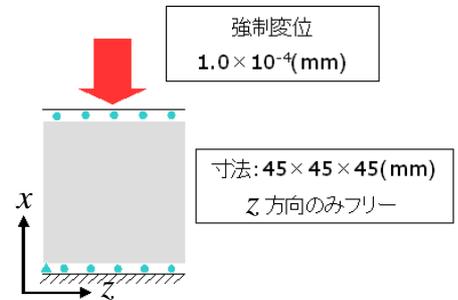


図-3 境界条件

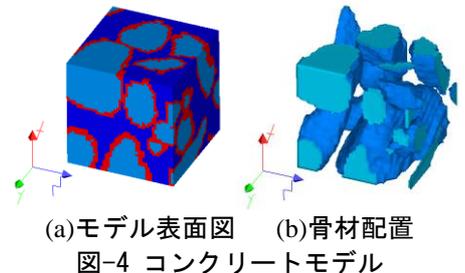


図-4 コンクリートモデル

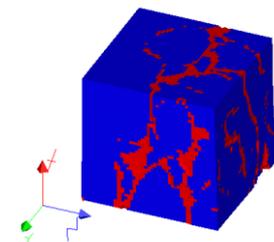


図-6 表面ひび割れ

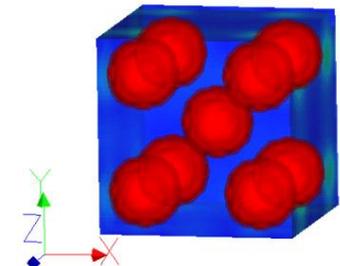


図-7(a) 仮想三次元モデル（規則性有）

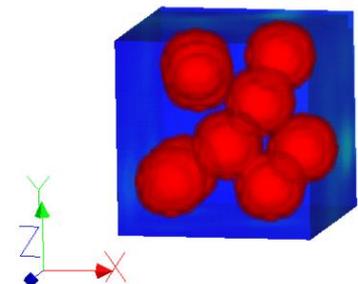


図-7(b) 仮想三次元モデル（ランダム）

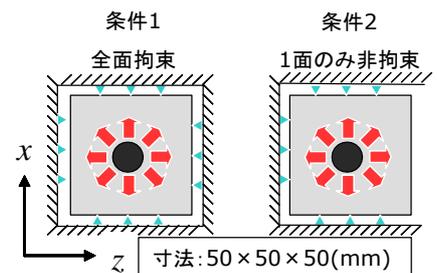


図-8 境界条件