

RBSMを用いたRC部材のASR膨張挙動評価に関する基礎的研究

名古屋大学大学院		○杉本 啓太
名古屋大学大学院	博(工)	山本 佳士
名古屋大学大学院	博(工)	三浦 泰人
名古屋大学大学院	正会員 博(工)	中村 光

Abstract : A numerical model based on 3-D Rigid Body Spring Model (RBSM) that aims to simulate the expansion behavior of concrete caused by Alkali Silica Reaction (ASR) was developed and validated. In this study, a modeling method that can evaluate the expansion strains and crack propagations of concrete in uni-axial restrained experiment (i.e., the reinforcement within the concrete is restrained which is generally different from other experiments) is suggested. The expansion strains and the crack propagations were evaluated by performing a sensitivity analysis. It was found that the 3-D RBSM model, which considers the uneven distribution of the reactive aggregate, can capture the expansion behavior and distribution of cracks similar to those observed in unconstrained and uni-axial restrained experiments.

Key words : RBSM, Alkali silica reaction (ASR), Reinforcement restraint, Crack propagation

1. はじめに

RC構造物にアルカリシリカ反応（以下、ASR）が生じると、膨張ひび割れが生じて耐久性を著しく低下させるだけでなく、コンクリートの力学特性（弾性係数、圧縮強度）の低下や、隅角部での鉄筋破断を引き起こす場合がある。また、ASRはアルカリ量や骨材中の反応性鉱物の量といった内在する要因だけでなく、温度や水分などの外部環境の影響を受けるため、劣化予測が非常に困難な現象である。とくに、一軸圧縮応力下や鉄筋により拘束力が作用する場合において、その膨張挙動が大きく変化することが知られており、PCおよびRC構造物の構造性能を評価する上で重要である。

ASRの膨張予測に関する既往のモデルとしては、上田ら¹⁾や村中ら²⁾のモデルが挙げられる。上田らは、ASRによる膨張に伴う力学特性の変化を、損傷理論に基づいて膨張ひずみ量に応じて弾性係数、強度が低下するモデルを提案している。村中らは、ASRゲルの生成量を予測する反応モデルと膨張ひずみを予測する力学モデルを統合することで、鉄筋の拘束や外部拘束の影響を考慮可能なモデルを提案している。このほかにもさまざまなモデル^{3)・4)}が提案されているが、既往の研究は有限要素法を用いたものがほとんどであり、ひび割れの再現性に着目した解析的研究はほとんどない。また、ひび割れを直接表現可能な利点を持つ、剛体バネモデル (RBSM)⁵⁾を用いた検討も未だ行われていない。

本研究では、RBSMを用いてASRによる長期的な構造性能予測を可能とする解析手法の構築を目的として解析的検討を行った。RBSMでは、幅、角度、間隔、連続性などのひび割れ詳細情報を直接評価することができるため、マクロな膨張量予測に加えて、従来の提案手法では評価が困難な膨張ひび割れを詳細に評価可能であり、ひび割れに伴う材料特性ならびに部材レベルの抵抗機構の変化を精度良く再現可能であると考えられる。本論では、その基礎的な検討として、一軸拘束下の膨張挙動を再現可能な、反応モデルと力学モデルを統合した手法を構築し、ASRによるマクロな膨張挙動のみならず、ひび割れ詳細情報の再現性にも着目して検討を行った。具体的には、拘束状態の異なる実験結果を対象として、膨張量の経時変化と膨張ひび割れ性状を再現することができるモデルをいくつか提案し、その感度解析を行った。

2. 解析手法

本研究では、拘束状態の異なるコンクリート供試体のASRによる膨張挙動を再現可能な解析手法を構築することを目的として次の検討を行った。まず、ASRの反応・力学モデルを統合し、RBSMに導入した。なお、反応モデルは魚本ら⁶⁾の提案したASRゲルの生成量を推定するモデルを使用し、力学モデルはFredericら⁷⁾が提案したASRゲルの生成量から膨張量を推定する手法を参考にして、再度定式化を行った。さらに、拘束下においてASRの膨張量が大幅に減少する現象を再現するために、1) 膨張ひずみの低減を考慮したモデル、2) 骨材の配置の偏在性を考慮したモデル、3) 骨材の偏在性に加え、クリープを考慮したモデルを構築し、それぞれの感度解析を行った。以下に解析モデルの詳細を示す。

2.1 RBSM

RBSMは、各要素を剛体として扱い、要素境界面に設置したバネのエネルギーを評価することで材料の力学的挙動を追跡するモデルである。コンクリートのモデル化には、Voronoi分割 (図-1) によるランダム多面体要素を適用した。この要素は剛体要素としており、3方向の位置および3方向の回転の自由度、計6つの自由度が与えられている。要素境界面の積分点に、垂直バネおよびせん断バネが配置されており、非線形構成モデルを導入することでコンクリートの力学挙動を再現している⁵⁾。本研究では、引張・圧縮軟化および局所化挙動が再現可能な文献⁵⁾に示す構成モデルを適用した。

2.2 ASR膨張モデル

本研究では、魚本らが提案した反応速度論に基づいてアルカリと接触する反応性骨材の表面積を考慮した反応モデルによって、ASRゲル生成量を算出した。詳しい計算方法は参考文献に譲る。

$$x = \sqrt{k_{TR}tC} \quad (1)$$

$$a_i = 1 - (1 - x/R_i)^3 \quad (2)$$

$$T_{ex} = A \sum \beta_i k_1 a_i \quad (3)$$

ここで、 x (mm) は骨材表面の骨材反応層の厚さ、 k_{TR} (cm²/h) は反応速度定数、 t (h) は材齢、 C (mol/l) はアルカリ濃度、 T_{ex} (mol/l) は膨張に起因する生成物量、 A (g/l) は単位反応性骨材量、 β_i は全骨材に占める半径 R_i の骨材の比率、 k_1 (mol/g) は反応率から生成物量に換算する係数、 a_i は時間 t (h)における半径 R_i の骨材の体積反応率を示している。

魚本らのモデルでは、反応生成物量 $k_1 a$ がある容量 h/R を超過しない限り膨張に寄与しないとしている。これは、骨材界面の領域にASRゲルが膨張圧を生じさせずに流入するために生じるとされ、ゲルの吸収領域としてさまざまなモデルにおいても同様の概念が適用されている。本解析では、ASRゲルは骨材から流出するとその組成が変化して粘性の低いゲルへと変質することが知られている⁸⁾ことから、吸収領域は骨材周辺の遷移領域のみであるとして定式化を行った (式(6))。また、ひび割れ後にはひび割れ幅に応じて膨張圧が低下することが想定されることから、算出されるひび割れ体積に応じて膨張量が低下する (式(4)) ものとした。なお、ひび割れ体積による膨張圧の低下は、遷移領域のような吸収領域とは異なり、ひび割れの増大に伴って骨材中に蓄積される膨張圧が低下することを想定しているため、この係数を用いて反応後期の膨張挙動の停滞を表現できる。

$$V_{g,act} = V_g - \beta V_{ITZ} - \gamma V_{cr} \quad (V_{g,act} \geq 0) \quad (4)$$

$$V_g = \alpha T_{ex} \quad (5)$$

$$V_{ITZ} = (4\pi/3)\{(D_i + T_{ITZ})^3 - D_i^3\} \quad (6)$$

ここで、 $V_{g,act}$ (mm³) は膨張に起因する生成物の体積、 V_g (mm³) は膨張低減容量を考慮した生成物総量の体積、 V_{ITZ} (mm³) は骨材表面の弱層領域、 V_{cr} (mm³) は剛体間のひび割れ体積をそれぞれ示している。 α (mm³/mol) は生成物量を体積に換算する係数、 β 、 γ は弱層領域およびひび割れ体積に関わ

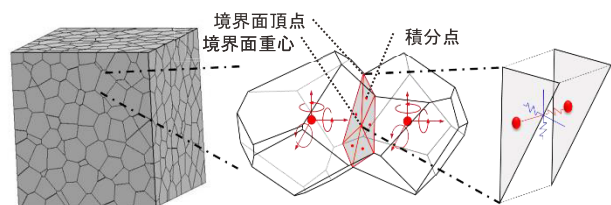


図-1 Voronoi 分割および積分点のバネの配置

る係数、 D_i (mm) は球体と仮定した骨材の半径である。弱層領域は骨材の表面積から厚さ $T_{ITZ} = 0.03\text{mm}$ の体積としている。膨張に起因する生成物の体積から次式を用いて膨張ひずみを評価し、RBSMの垂直バネに初期ひずみとして導入した。

$$\epsilon_{ASR} = V_{g,act} / V_{elm} \quad (7)$$

ここで、 ϵ_{ASR} はASR膨張によるひずみ量、 V_{elm} (mm³) は剛体要素の体積を示している。

2.3 膨張低減モデル

前述の通り、鉄筋や外部拘束によって拘束力が生じるとASRの膨張量が大幅に低下することが確認されている。例えば、村中ら²⁾は細孔構造に基づく微視的モデルにより拘束下のASR膨張量の低下を表現しているが、ここでは、とくに微視的機構は仮定せず、上記現象を表現するため、簡単に圧縮状態にある垂直バネに対しては、次式に示す低減係数を乗じた膨張ひずみ量を与えることとした。

$$\hat{\epsilon}_{ASR} = \eta \epsilon_{ASR} \quad (8)$$

$$\eta = \exp(c\sigma_1) \quad (\sigma_1 \leq 0) \quad (9)$$

ここで、 $\hat{\epsilon}_{ASR}$ は低減係数 η を考慮したASR膨張によるひずみ量、 η はひずみの低減係数、 c は低減係数 η の解析定数、 σ_1 (MPa) は垂直バネの応力を示している。また、図-2に拘束力による応力と低減係数 η の関係を示す。低減係数 η は式(8)に示すようにパラメータ c および垂直バネに作用する応力により決定される。ここで応力は拘束圧を仮定しているため、引張応力には関与しない。図に示すように圧縮応力の増加に伴って低減係数 η が小さくなり、膨張量が0に漸近するように定式化を行った。

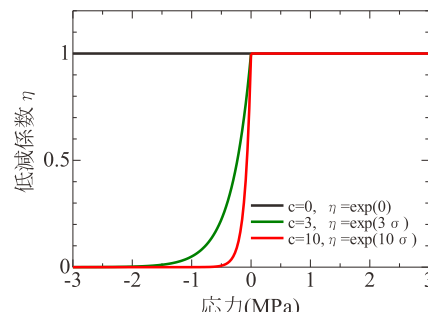


図-2 拘束圧依存性パラメータ

2.4 反応性骨材偏在モデル

2.2および2.3で示したモデルは、全要素が一様に膨張することを想定して膨張ひずみを定義したモデルである。しかしながら、実際には骨材はコンクリート中に不均一に分布しているため、発生する膨張圧は均質・等方的に作用するというよりは、骨材の配置に応じて非均質・異方的に膨張することが考えられる。そこで、

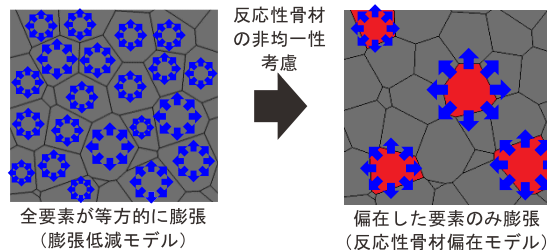


図-3 反応性骨材偏在モデル概要

で、反応性骨材を解析モデル内で偏在させることで疑似的に骨材の分布を再現し、膨張圧が局所的に作用するようなモデル(以下、偏在モデル)を構築した(図-3)。反応性骨材要素の偏在の方法は、一定距離内に反応性骨材要素の重心が存在しないように、反応性骨材要素間の最小距離 R (mm) (以下、反応性骨材距離)を設定して配置した。この反応性骨材距離は粒度分布と反応性骨材の割合により求められる反応性骨材の体積比により決定され、反応性骨材の体積比からある領域内の骨材分布を定義し、反応性骨材同士の最短隣接距離として求めている。具体的には、すべての反応性骨材を含む要素母点から反応性骨材距離以上離れている要素を反応性骨材を含む要素とし、これを反応性骨材の体積比に達するまで繰り返している。これによって、極端な反応性骨材要素の偏りが無いようにしている。なお、各モデルの感度評価のため、本モデルを適用する際に、2.3のモデルは同時に適用しない。

2.5 クリープモデル

拘束力が作用する場合、ASRによる膨張圧の増加に伴って圧縮応力が増加することからクリープの影響が存在することが想定される。これは、Giorlaら⁴⁾のクリープ損傷モデルやCusatisら³⁾の解析モデルにも導入されており、本解析においても圧縮応力作用下におけるクリープの影響を評価した。本解析では、Step by Step法によりクリープひずみを算出し、初期ひずみとして垂直バネに導入している。なお、クリープひずみの算定は土木学会、コンクリート標準示方書設計編⁹⁾で示されている一般的なものをを用いた。なお、本解析手法では、圧縮クリープと引張クリープは等しいと仮定した。

3. 鋼材による一軸拘束供試体のASR膨張

3.1 解析対象の実験概要

解析モデルの再現性の検討は矢村ら¹⁰⁾によって行われた一軸拘束供試体のASR膨張試験を対象にして行う。図-4に実験供試体の概要を示す。供試体は寸法が100×100×400mmの角柱供試体で、鋼板と異形鉄筋を溶接したものに直接コンクリートを打設したものである。コンクリートの配合は表-1に示す。反応性粗骨材として鳥取県産斜方輝石安山岩が使用されている。コンクリート中の全アルカリ量はNa₂O等量で2.0%である。供試体は、打設後温度20℃、湿度80%の恒温室で24時間養生されたのちに脱型され、各々温度20℃および40℃、湿度100%の保存槽中で養生された。また、実験では、断面中央に配置された異形鉄筋(SD345)をD10(鉄筋比0.71%)、D13(1.27%)、D16(1.99%)の3種類に変化させ、異なる拘束鉄筋比における鉄筋軸方向のASRによるコンクリートの膨張ひずみの経時変化が測定されている。また、無拘束(0.00%)の供試体についても同様に実験が行われており、自由膨張ひずみの経時変化が計測されている。

表-1 コンクリートの示方配合

最大骨材寸法(mm)	空気量(%)	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m ³)			
				W	C	S	G
20	2	45	40	203	450	600	1003

3.2 解析概要

図-5に解析モデルを示す。平均要素寸法は20mmとした。供試体両端には載荷板要素を配置し、鉄筋をモデル化した梁要素と剛結した。なお、梁要素は付着すべり挙動を表現するリンク要素を介してRBSMに結合している⁵⁾。また、反応モデルには基本的に魚本らの係数をそのまま使用している。これらの解析条件に基づいて、一軸拘束圧作用下におけるASR膨張挙動実験に対し、2.3~2.5に示した膨張低減モデル、偏在モデルおよびクリープモデルの感度解析を行った。なお、各モデルにおいて、無拘束の実験に対してパラメータ解析を行い、解析の膨張ひずみを実験値と合わせている。

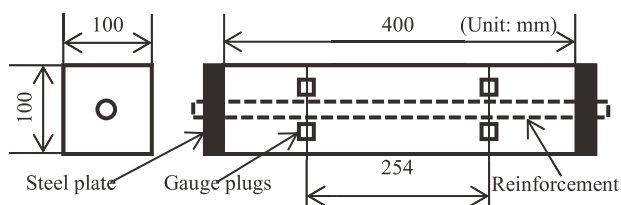


図-4 実験概要図

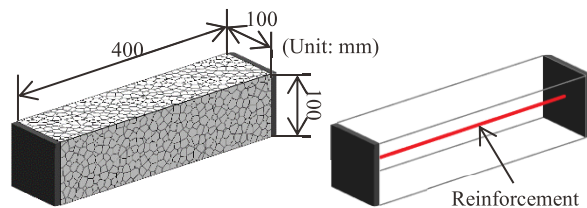


図-5 解析モデル

3.3 解析結果

(1) 軸方向ひずみ-材齢関係

図-6に拘束圧依存性を考慮した解析と実験の軸方向ひずみと材齢の関係を示す。なお、解析におけるひずみは実ひずみを出力している。ここで凡例中のpwは鉄筋比(%)を表している。ここでは、膨張低減量に関わるパラメータcの値を変化させて、それぞれの影響を確認した。c=0のとき(すなわち膨張低減モデルを考慮しない場合)は鉄筋比の増加に伴う膨張ひずみの拘束圧依存性を再現できていないことが分かる。cが大きくなるにつれて、膨張ひずみが低減され、拘束圧依存性が評価できることが分かる。これはこのモデルでは圧縮応力が作用しているとその方向の膨張ひずみをキャンセルしているため、その影響がでたものと考えられる。

図-7に偏在モデルを用いた解析における軸方向ひずみと材齢の関係を示す。なお、反応性骨材距離がR=23.5(mm)のときに反応性骨材を含む要素の体積比が実験の反応性骨材の体積比と一致した。図より、鉄筋の拘束により、膨張ひずみが低減され、拘束圧依存性が自然に表現できていることが分かる。しかしながら、鉄筋拘束による膨張ひずみの低減量は過小評価している。ここで、拘束供試体において時間に伴いひずみが減少している傾向がある。これは後述する偏在モデルにより発生したひび割れにより、軸方向の応力を受け持つ断面が減少するためである。

偏在モデルのみを導入するだけでは、拘束圧依存性を過小評価してしまう結果が得られたため、クリ

ープを考慮した。図-8に偏在モデルおよびクリープモデルを用いた解析における軸方向ひずみと材齢の関係を示す。材齢200日以降の一軸鉄筋拘束による膨張ひずみを精度良く評価できている。しかし、初期材齢における膨張ひずみの低減は過小評価していることが分かった。これは、若材齢時のクリープひずみは通常よりも大きくなることを考慮していないことが原因と考えられる。

(2) 表面ひび割れ性状

図-9に材齢2年(730日)における実験の表面ひび割れ図および解析の各モデルにおける表面ひび割れ図を示す。なお、実験においてひび割れ幅の計測はしていない。また、膨張低減は最も膨張挙動が実験に近い解析結果(c=3)のみを示す。実験では、無拘束供試体においては方向性がなく格子状のひび割れが発生し、拘束供試体においては軸方向に卓越したひび割れが発生していることが確認できる。膨張低減を考慮した解析では、無拘束供試体はひび割れが生じているが、拘束供試体にはまったくひび割れが生じていない。これは圧縮応力がわずかにでも発生すると膨張ひずみが低減されてかつ、等方的に膨張ひずみを与えられているために小さい変形量がさらに分散しているためである。一方、偏在モデルではひび割れ幅が比較的大きくなっており、鉄筋比が大きいケースで見られる軸方向のひび割れが卓越する傾向が見られるようになる。これは実験で見られる現象と一致する。また、偏在およびクリープモデルにおいては、偏在モデルと同様の傾向を示し、全体的にひび割れ幅が減少す

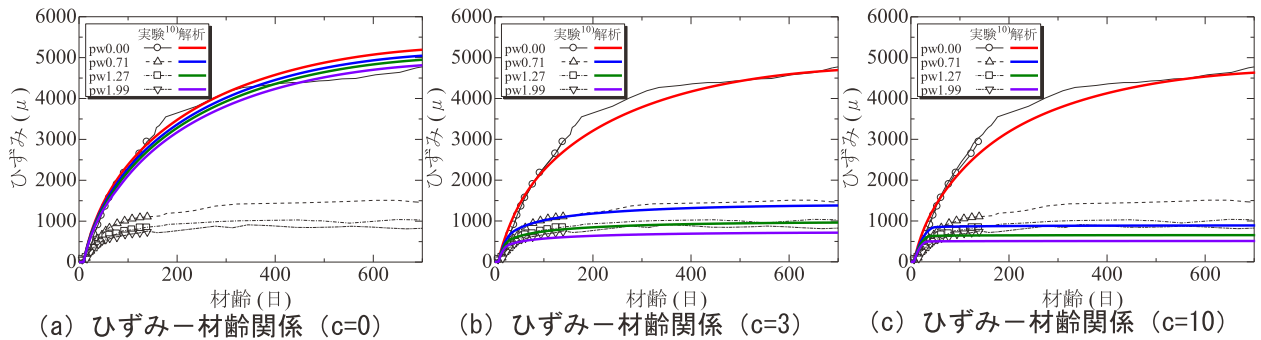


図-6 膨張低減モデル ひずみ-材齢関係

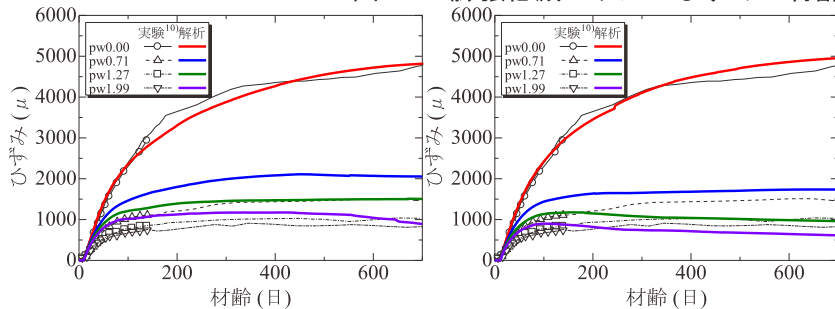


図-7 偏在モデル ひずみ-材齢関係 (R=23.5)

図-8 偏在&クリープモデル ひずみ-材齢関係 (R=23.5)

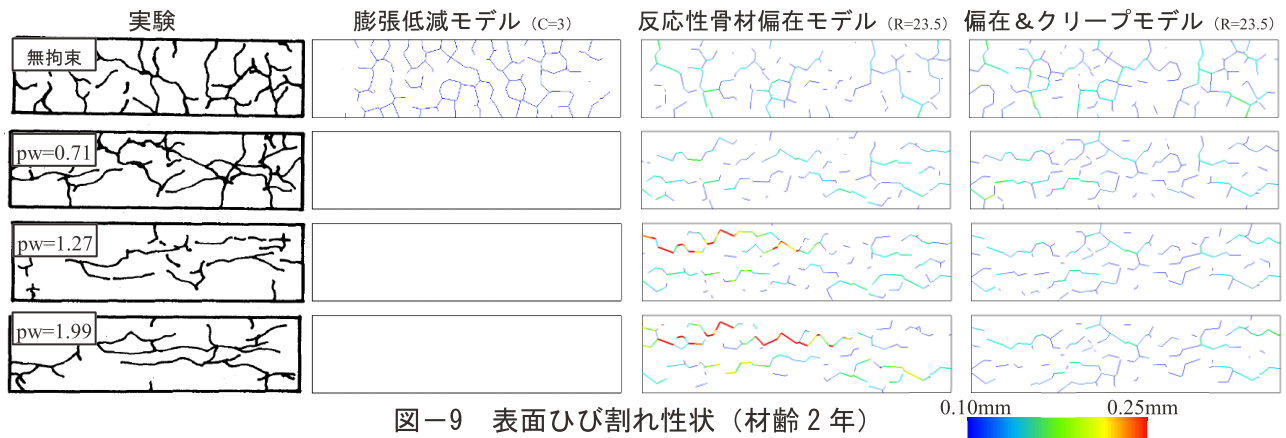


図-9 表面ひび割れ性状 (材齢2年)

る傾向を示した。

図-10に材齢2年における鉄筋比1.99%の供試体中央断面の軸方向応力分布を示す。図-10から、膨張低減を考慮した偏在なしのケースでは概ね一様に軸方向の応力が作用していることに対して、偏在あり ($R = 23.5$) のケースでは応力が不均一に分布していることが分かる。

これは、偏在モデルが導入された場合はひびわれが局所化することによって、断面の一部のみが応力を受けもった状態になることが考えられる。すなわち、応力を伝達する箇所が3次的に蛇行していると考えられ、応力を受けもつ断面が見かけ上小さくなったためであると考えられる。

実験では、ひび割れ幅が示されていないため、ひび割れ幅の定量的な評価は今後の課題であり、本解析手法は検討段階である。しかしながら、定性的には反応性骨材の偏在モデルがマクロな膨張挙動のみならず、ひび割れ性状までを再現できる可能性があることが示された。

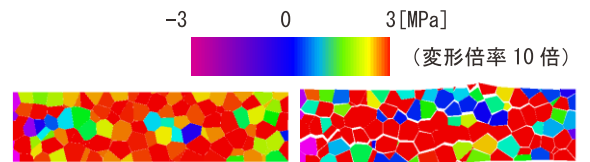
4. 結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 本解析手法により、ASRを受けた無拘束供試体の時間経過に依存したマクロな膨張ひずみが再現可能であることが分かった。
- (2) ASRを受けた一軸拘束供試体において、膨張低減を考慮することで、拘束鉄筋比による膨張ひずみの拘束圧依存性を考慮できることがわかった。しかし、ひびわれ性状は再現できなかった。
- (3) 反応性骨材偏在モデルを用いることで、無拘束、拘束供試体ともにマクロな膨張ひずみとともにASRによるひび割れの方向性の影響を自然に再現できる可能性が示された。しかしながら、ひび割れ幅の定量的な再現性は検証できておらず、今後、拘束軸直交方向の膨張ひずみや多軸拘束による影響評価などを含めてモデルの妥当性を検証していく必要がある。

参考文献

- 1) 上田尚史, 澤部純浩, 中村光, 国枝稔: アルカリ骨材反応による RC 部材の膨張予測解析, 土木学会論文集, Vol. 63, No. 4, pp. 532-548, 2007
- 2) 村中誠, 田中泰司: 反応機構に立脚した ASR 膨張挙動に関する物理-化学モデルの構築, 土木学会論文集 E2, Vol. 69, No. 1, pp1-15, 2013
- 3) M. Alnaggar, G. Cusatis, and G. D. Luzio.: Lattice Discrete Particle Modeling (LDPM) of Alkali Silica Reaction (ASR) deterioration of concrete structures., Cement & Concrete Composites, Vol.41, pp. 45-59, May. 2013
- 4) A. B. Giorla, K. L. Scrivener, and C. F. Dunant.: Influence of visco-elasticity on the stress development induced by alkali-silica reaction, Cement & Concrete Research, Vol.70, pp.1-8, Sep. 2015
- 5) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮試験, 土木学会論文集 E, Vol. 64, No. 4, pp. 612-630, 2008
- 6) 魚本健人, 古澤靖彦: アルカリ・シリカ反応によるモルタルバーの膨張挙動を予測するモデルの構築, コンクリート工学論文集, Vol. 3, No. 1, pp. 109-119, 1992. 1.
- 7) F. Coppel, C. Sauvaget, and E. Gallire: Assessment of Structures subject to Concrete Pathologies EDF contribution., ASCET workshop, Jul. 2015
- 8) Kazuo Yamada, Shinichi Hirono and Yoko Ando: ASR Problems In Japan And A Message For ASR Problems In Thailand., Journal of Thailand Concrete Association, Vol.1, No.2, Jul. 2013
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書設計編, 2007.
- 10) 矢村潔, 長井吾朗, 道廣一利: ASRによる損傷に及ぼす鉄筋拘束の影響に関する研究, JSMS, Vol. 43, No. 491, pp. 970-975, 1994.8.



(a). 偏在なし $c=3$ (b). 偏在モデル $R=23.5$
図-10 軸方向応力分布 (材齢 2 年)