

論文 ひび割れ性状までを再現可能なASR膨張を考慮したRBSM構築のための基礎的検討

杉本 啓太^{*1}・山本 佳士^{*2}・三浦 泰人^{*3}・中村 光^{*4}

要旨：本研究では、ASR劣化した構造物レベルの、破壊モードの変化を含む耐荷・変形性能を予測可能な構造解析手法の確立を目的として、1)ASR膨張の拘束圧依存性、2)ひび割れ性状、3)力学特性の変化を再現可能な、RBSMおよびASRモデルの提案および基礎的な検討を行った。具体的には、ASR劣化による膨張ひずみの経時変化および力学特性の変化をそれぞれ表現可能なモデルを提案し、その妥当性確認および感度評価を行った。検討の結果、圧縮応力に応じて膨張ひずみを低減するモデルおよび骨材の偏在性を考慮するモデルを併用することで、1軸拘束下の膨張挙動、ひび割れ性状および力学特性を同時に再現できる可能性が示した。

キーワード：ASR, RBSM, 拘束圧依存性, ひび割れ, 材料劣化

1. はじめに

ASRによりコンクリートが膨張すると、ひび割れが生じるとともに弾性係数や圧縮強度等の力学特性は低下する。一方で、劣化の度合いにもよるが、ASR劣化したRC部材の構造性能が健全時と比べて改善した例も報告されている。例えば小柳ら¹⁾は、健全状態でせん断破壊したRCはりは、ASR劣化すると曲げ破壊モードに変化し、変形性能が向上したことを報告している。すなわち、ASR劣化した構造部材の性能を精度良く評価するためには、上記の挙動も含めて破壊モードの変化までを再現する必要があり、したがって、ASR劣化に伴う材料特性の低下や、ケミカルプレストレスのみならず、ASRに伴うひび割れ性状までを再現することが重要であると考えられる。一方、これまでにASRの膨張予測に関する数値モデルは数多く提案されているが、既往の研究は有限要素法の使用を前提とし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。

そこで、著者らは、鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅、角度、間隔等の詳細情報までを定量的に再現可能な剛体バネモデル（RBSM）²⁾のためのASR劣化モデルを提案している。既往の実験との比較により、提案モデルは、軸方向鉄筋による1軸拘束下の平均的なASR膨張挙動を再現でき、さらにひび割れ性状までを再現できることを示した³⁾。しかしながら、ASR劣化に伴う材料特性の低下挙動に対する再現性は検討していなかった。

本研究では、既に提案しているASR劣化モデルの、1)拘束圧依存性、2)ひび割れ性状、に加えて3)見かけの力学特性の低下、特に弾性係数、圧縮挙動の低下挙動の再現性に着目して、再度、モデルの検討を行ったものであ

る。具体的には軸方向鉄筋による1軸拘束下におけるASR膨張試験および異なるASR膨張ひずみが生じた供試体の圧縮試験を対象として、膨張挙動および力学特性を再現できる可能性のあるモデルをいくつか提案するとともに、その感度解析を行った。なお、近年ASR劣化モデルは様々なスケールから提案されているが、本研究は、RC構造物レベルの構造性能予測を目的としており、したがって、RBSMを用いて可視ひび割れの詳細情報や、曲げ破壊、せん断破壊等、部材レベルの各種破壊モードが再現可能で、かつ過度に計算負荷が大きくならない、最大骨材寸法程度の要素寸法の使用を前提としてモデルを構築する。

2. 解析手法

2.1 RBSM

本研究では、Voronoi分割によるランダム形状多面体を用いたRBSMによりコンクリートをモデル化した。RBSMは、対象を剛体要素と要素間のバネで離散化する手法であり、バネに破壊やすべり等の非線形特性を導入することにより、容易にコンクリートのひび割れ等の不連続挙動を表現することができる。図-1に示すように、各要素内の任意点（本研究では要素重心）に6自由度の

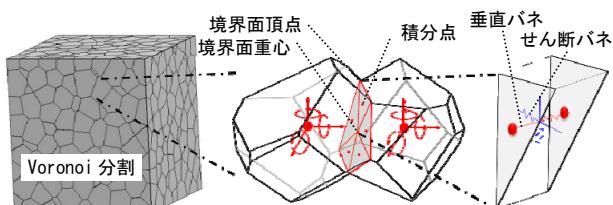


図-1 Voronoi分割および積分点のバネの配置

*1 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 准教授 (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 助教 (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 教授 (正会員)

3 次元剛体変位を設定し、要素境界面上には、表面力の評価点としての積分点を設定する。積分点には、垂直バネおよびせん断バネからなるバネ系を配置する（垂直バネが1個、せん断バネが2個）。本研究では、引張・圧縮軟化および局所化挙動を定量的に再現可能な文献²⁾に示す構成モデルを適用した。

2.2 ASR モデル

提案する ASR モデルは、おもに化学反応モデルおよび膨張モデルに分けられる。化学反応モデルでは、コンクリートの膨張に起因する反応生成物量が評価され、膨張モデルでは、反応生成物量に基づいて算定された膨張ひずみが、RBSM の垂直バネに初期ひずみとして導入される。また、膨張モデルでは、それぞれ ASR 劣化の過程における、1)膨張の拘束圧依存性、2)ひび割れ性状、3)力学特性の低下挙動に与える影響が異なる、下記に詳細を示す、「応力依存モデル」および「反応性骨材偏在モデル」を適用した。以下にそれぞれのモデルについて説明する。

(1) 化学反応モデル

本研究では、魚本らが提案した反応速度論⁴⁾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 による反応生成物量を算出した。詳しい計算方法は参考文献を参照されたい。

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

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

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

ここで、 x (mm) は骨材表面の骨材反応層の厚さ、 k_{TR} (cm^2/h) は反応速度定数、 t (h) は材齢、 C (mol/l) はアルカリ濃度、 T_{pr} (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。

(2) 膨張モデル

膨張モデルでは、反応モデルにより算出した反応生成物量から膨張に起因する ASR ゲルの体積を求め、膨張ひずみを算出した。提案モデルでは、ASR ゲルは骨材から流出すると Ca と反応して粘性の低いゲルへと変質することが知られている⁶⁾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、ひび割れがゲルの吸収領域となることを想定しており、反応後期におけるひび割れの増大に伴う膨張挙動の停滞を表現する。

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

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

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

ここで、 $V_{g,act}$ (mm³) は膨張に起因する生成物の体積、 V_g (mm³) は生成物総量の体積、 V_{ITZ} (mm³) は骨材表面の遷移領域、 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 ASR ゲルの体積に換算する係数、 β 、 γ は遷移領域およびひび割れ体積に関わる係数、 D_i (mm) は球体と仮定した骨材の半径である。遷移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⁷⁾。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。

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

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。

(3) 応力依存モデル

前述のように、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知られている。例えば、村中ら⁷⁾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式(7)の ε_{ASR} の増分に乗じることとした。

$$d\varepsilon_{ASR} = \eta d\varepsilon_{ASR} \quad (\sigma_1 \leq 0) \quad (8)$$

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

ここで、 $d\varepsilon_{ASR}$ 、 $d\varepsilon_{ASR}$ は低減係数 η を考慮前後の ASR 膨張ひずみ量の増分、 η は膨張ひずみの低減係数、 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

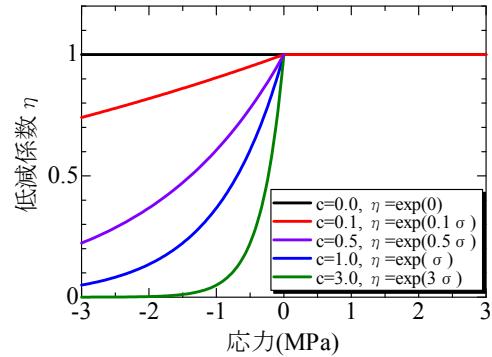


図-2 応力依存モデルパラメータ η

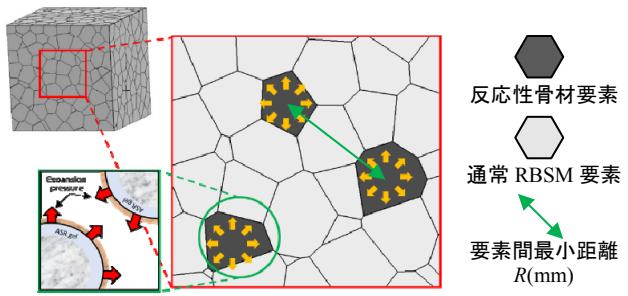


図-3 反応性骨材偏在モデル概要

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。図-2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。

(4) 反応性骨材偏在モデル

2.2 (2)あるいは(3)によって算定した膨張ひずみを、全要素に一様に導入することも考えられるが、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。この非均質性・異方性を表現するために、以下のように反応性骨材を解析領域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）を適用した。偏在モデルの概要を図-3に示す。反応性骨材要素の偏在方法は、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）を設定し、反応性骨材の体積分の要素を反応性骨材要素とした。これによって、極端な反応性骨材要素の偏りがないようにしている。詳細に関しては、参考文献に譲る³⁾。

3. 拘束圧依存性およびひび割れの再現性の検証

3.1 対象実験概要

解析モデルの再現性の検討は矢村ら⁹⁾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 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 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

クリート中の全アルカリ量は Na_2O 等量で2.0%である。供試体は、打設後温度 20°C 、湿度80%の恒温室で24時間養生された後に脱型され、温度 40°C 、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、自由膨張ひずみが計測されている。

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²⁾。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た。なお、前述のとおり、1)応力依存モ

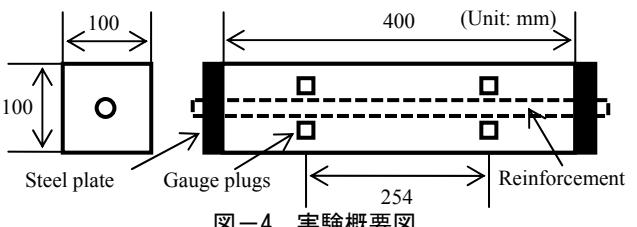


図-4 実験概要図

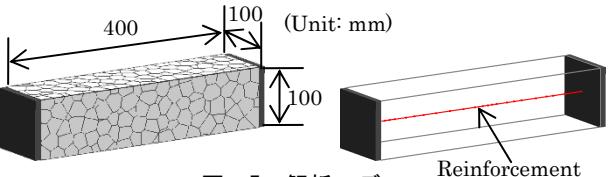


図-5 解析モデル

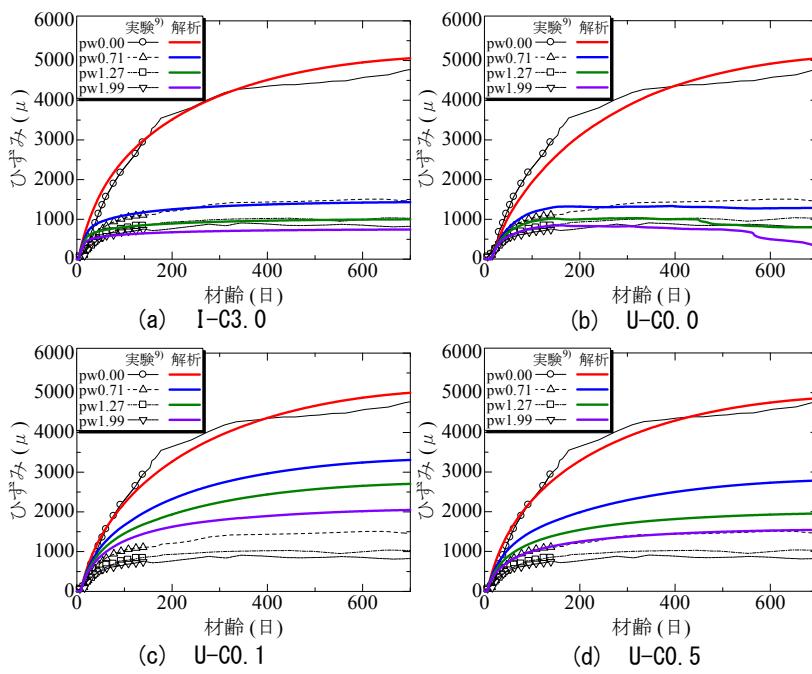


図-6 軸方向ひずみー材齢関係

表-1 解析ケース一覧

No.	c	備考
I-C3.0	3.0	応力依存モデル（式(9)）
U-C0.0	0.0	偏在モデル
U-C0.1	0.1	偏在モデルおよび
U-C0.5	0.5	応力依存モデルを併用
U-C1.0	1.0	（式(9)）

デルおよび偏在モデルは、それぞれ、拘束圧依存性およびひび割れの再現性に与える影響が異なる。したがって、ここでは、それぞれのモデルパラメータの感度評価と同時に、それらを独立に扱った場合、および併用した場合の感度評価も行う。ここで、式(4)の β , γ はそれぞれ0.65, 1.0としている。なお、解析結果におけるひび割れ幅および内部応力分布の算出方法は山本ら²⁾と同様である。解析ケースを表-1に示す。

3.3 解析結果

(1) 軸方向ひずみ-材齢関係

図-6に実験と解析の軸方向ひずみと材齢の関係を示す。ここで凡例中の p_w は鉄筋比(%)を表している。ここでは、応力依存モデルのみ、偏在モデルのみおよび両者を併用した解析について、応力依存モデルのパラメータ c を変化させて影響を検証した。まず、図-6(a), (b)の、応力依存モデルのみを考慮して、 c を3.0とした解析(I-C3.0)および偏在モデルのみを考慮した解析(U-C0.0)では、各拘束供試体の膨張ひずみの抑制効果(以後、拘束圧依存性)を再現していることが分かる。一方、両モデルを併用した場合、U-C0.1(図-6(c)), U-C0.5(図-6(d))およびU-C1.0(図-6(e))の解析結果より、 c が大きくなることに伴い、解析値は拘束圧依存性が大きくなる傾向を示し、実験値に近づくことが分かる。

(2) 表面ひび割れ性状

図-7に材齢2年(730日)における実験および各解析モデルにおける表面ひび割れ性状を示す。なお、ここで、応力依存モデルのみを考慮して、偏在を考慮しないI-C3.0はひび割れが全く生じなかつたため解析結果を省略している。しかしながら、偏在を考慮しなければひび割れが再現できることには注意が必要である。U-C0.0では、無拘束供試体における格子状のひび割れ、および拘束供試体における軸方向に卓越したひび割れが再現で

きている。一方、両モデルを併用した場合、U-C0.1は、U-C0.0と比較して、ひび割れが減少していることがわかる。U-C0.1の拘束供試体においてはU-C0.0同様に鉄筋軸直角方向のひび割れが抑制される様子が確認できる。U-C1.0では、無拘束供試体の格子状のひび割れは確認できるものの、拘束供試体においてはひび割れを過小評価している。

(3) 内部応力分布

図-8に、U-C0.0, U-C0.1, U-C1.0の解析により得られた、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。なお、凡例において、正が引張、負が圧縮応力を示す。図より、U-C0.0では軸直角方向の変形により軸方向のひび割れが発生し、断面の一部のみが応力を受け持っていることが分かる。すなわち、応力パスは限定され、見かけの軸方向の弾性係数が低下するとともに、軸直角方向にも変形が生じ、結果として軸方向への膨張が低下する。一方、U-C0.1およびU-C1.0の場合、軸直角方向の変形は小さく、軸方向のひび割れが少ないため、圧縮応力を受け持つ断面はU-C0.0と比較し減少しておらず、結果として、軸方向の膨張の低下も小さくなる。U-C1.0もU-C0.0と比較すると応力を伝達する経路が減少していないが、 $c=3.0$ であり、応力依存モデルの影響が顕著になり、結果として、このケースでは、拘束圧依存性が再現できている。

以上のことより、応力依存モデルのみ考慮した場合、拘束圧依存性の再現は可能であるがひび割れを全く再現できないこと、偏在モデルを用いることで、ひび割れの方向性および拘束圧依存性の両者をある程度再現できた。ただし、両者を考慮した場合、本検討の範囲では、拘束圧依存性およびひび割れ情報の両者を再現できていおらず、さらに、応力依存モデルの低減係数の関数の形状、あるいは偏在方法等をさらに検討する必要がある。なお、対

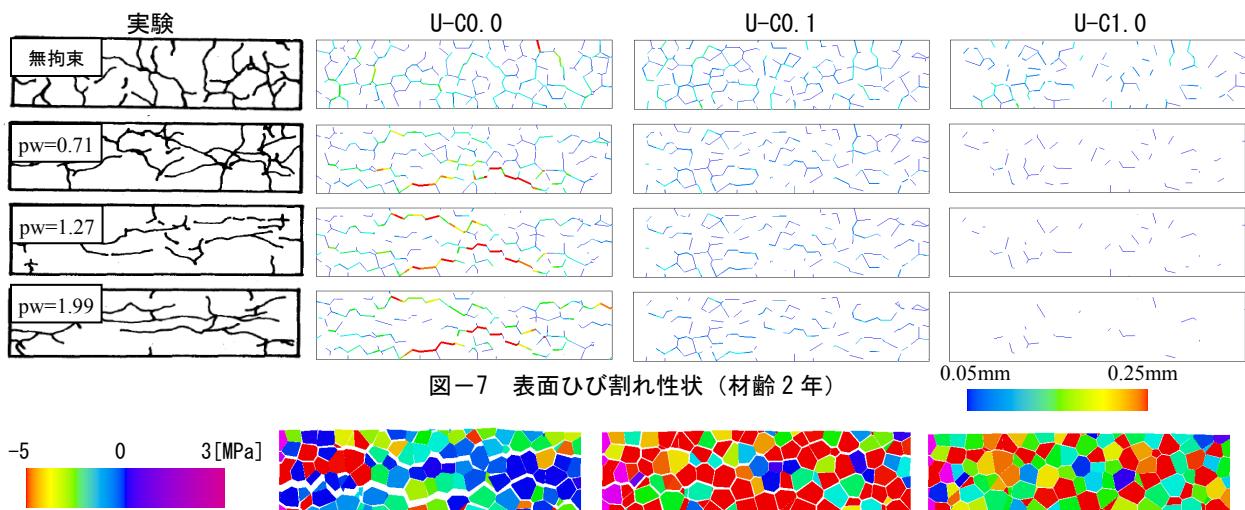


図-8 内部応力分布(材齢2年)

象実験ではひび割れ幅の情報がないため、実験、解析両面からより詳細な検討が必要である。

4. ASR 劣化による力学特性低下挙動の再現性の検証

4.1 解析対象の実験概要

ここでは、ASR 劣化したコンクリートの弾性係数および圧縮強度の低下挙動の再現性を検討するために、阪井ら¹⁰⁾によって行われた ASR 膨張ひずみが異なるコンクリートの圧縮試験を対象とした。供試体寸法は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体である。反応性粗骨材として、安山岩碎石を使用しており、JISA1145において、「無害でない」と判定されている。コンクリート中のアルカリ量は Na_2O 等量で $8\text{kg}/\text{m}^3$ である。この供試体は脱型後温度 20°C 、100%R.H.の環境で材齢 28 日まで湿布養生し、その後 40°C 、100%R.H.の環境で促進養生している。ここで材齢 28 日を膨張ひずみの初期値 (0μ) として供試体側面のゲージプラグにより膨張ひずみを測定しており、所定の膨張ひずみ ($100\mu, 500\mu, 1000\mu, 2000\mu, 4000\mu$) に達した時点で圧縮試験を行っている。ここで、圧縮強度は膨張ひずみ 100μ において最大を示している。表-2 に膨張ひずみ 0μ および 100μ の供試体の圧縮強度を示す。膨張前 (0μ) より膨張初期 (100μ) の圧縮強度が大きい理由として、筆者は促進養生により水和反応が促進され、強度が増進したと述べており、解析においては膨張初期 (100μ) を基準とした。

4.2 解析概要

図-9 に解析モデルおよび解析概要を示す。平均要素寸法は 20mm とした。反応モデルには 3 章と同様に魚本らの係数を使用した。なお、各モデルにおいて、実験で条件が記載されていないパラメータに関しては、膨張ひずみー材齢関係についてキャリブレーション解析を行い、圧縮載荷解析時の膨張ひずみが実験値と整合するよう決定している。このため、膨張ひずみー材齢関係は他のケースもほぼ同様のため、図-10 には U-C0.0 の膨張ひずみー材齢関係のみを示す。なお、式(4)の β, γ はそれぞれ $1.0, 1.0$ としている。

4.3 解析結果

表-2 実験の圧縮強度

膨張ひずみ量	0μ	100μ
圧縮強度(MPa)	55.0	64.5

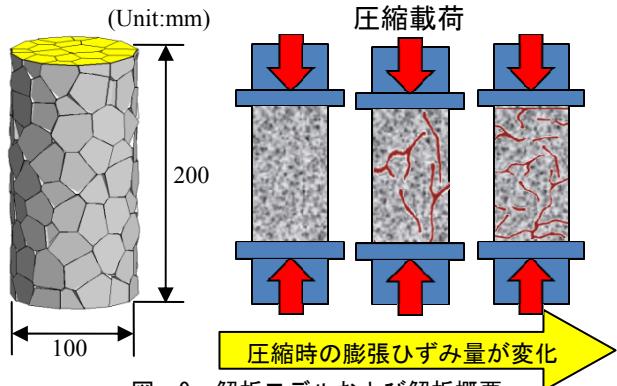


図-9 解析モデルおよび解析概要

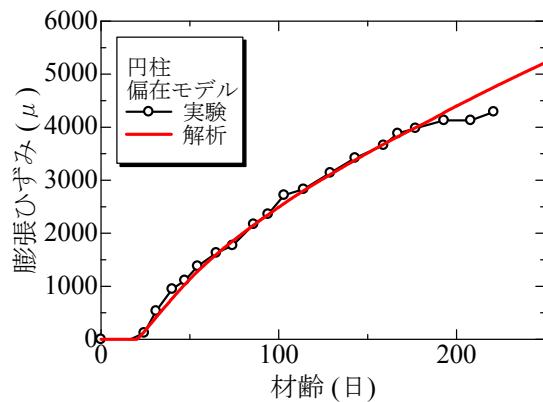


図-10 膨張ひずみー材齢関係

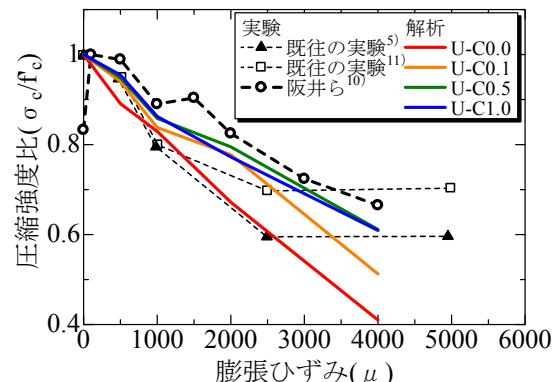


図-12 圧縮強度比ー膨張ひずみ関係

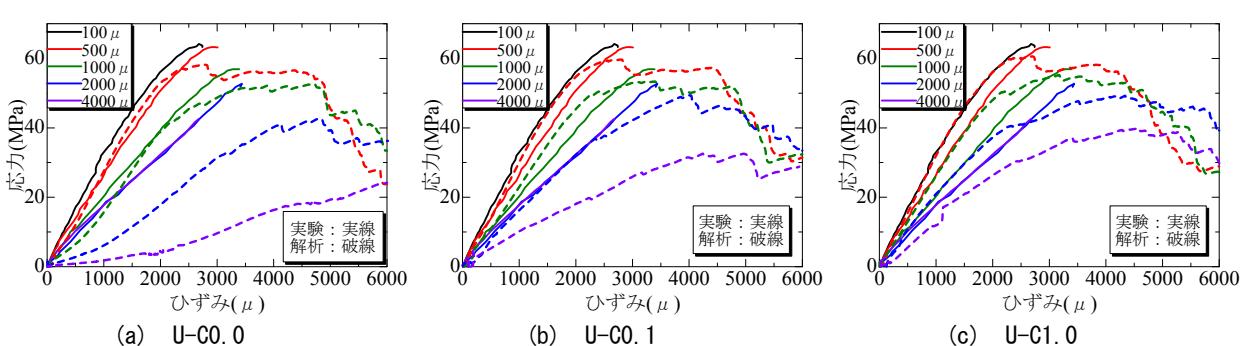


図-11 応力ーひずみ関係

図-11 に ASR 膨張後の圧縮試験により得られた応力-ひずみ関係を示す。なお、U-C0.5 は U-C0.1 とほぼ同様の応力-ひずみ関係を示すため省略している。また、図-12 には、既往の実験^{5), 11)} および解析により得られた圧縮強度比と ASR 膨張ひずみの関係を示す。図-11(a) より、U-C0.0において、膨張ひずみが 500μ, 1000μ の場合、ASR による圧縮強度および弾性係数の低下を概ね適切に再現している。しかし、ASR 膨張ひずみが 2000μ 以降の場合、圧縮強度および弾性係数を大きく過小評価することが示された。これは 3.3(3)で示したように、ひび割れによる損傷により圧縮応力を受け持つ断面が過度に減少したことが理由に挙げられる。一方、応力依存モデルを併用したモデルの場合、c が大きくなるのに伴い、ASR 膨張ひずみ 2000μ 以降においても圧縮強度および弾性係数を比較的再現できていることが分かる。これは前述のようにひび割れ、損傷量が比較的小さいためであると考えられる。また、図-12 より、U-C0.5 および U-C0.1 は他の実験と比較して、概ね圧縮強度を再現できていることが分かる。

以上のことから、偏在モデルおよび応力依存モデルを併用することにより、ASR 劣化したコンクリートの力学特性の低下を再現できる可能性が示された。ただし、本研究では、拘束圧依存性、ひび割れ性状、力学特性の低下、すべてを定量的に再現できるモデルおよびパラメータの組み合わせは、見つかっていない。ひび割れ性状については、表面と内部で 3 次元的に性状が異なる可能性もあるため、解析モデルの修正および妥当性検証も含め、実験、解析両面からより詳細な検討を行っていく必要があると考えられる。

5. 結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 応力依存モデルのみを考慮した場合、拘束圧依存性挙動は再現できるが、ひび割れ性状は再現できない。ひび割れを再現する場合には、反応性骨材の分布等を考慮する必要がある。
- 2) 偏在モデルのみを考慮した場合、拘束圧依存性およびひび割れ性状を再現できる。しかしながら、ASR 膨張量 2000μ 以上になると ASR 劣化したコンクリートの見かけの圧縮強度および弾性係数を過小評価することがわかった。
- 3) 偏在モデルおよび応力依存モデルを併用することにより、拘束圧依存性とともに ASR 劣化したコンクリートの圧縮強度および弾性係数を評価可能であることが示されたが、偏在モデルと比較し、ひび割れの再現性は低下した。

- 4) 偏在モデルおよび応力依存モデルを併用することで、ASR 劣化による拘束圧依存性、ひび割れの再現性、力学特性の低下を同時に再現できる可能性が示された。しかしながら、本研究では、上記の 3 つの挙動を同時かつ定量的に再現できる、パラメータは発見できておらず、今後より詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) 小柳治、六郷恵哲、内田裕市、長瀬道雄：著しい AAR 損傷を生じた RC はりの挙動、コンクリート工学年次論文集、Vol.15, No.1, pp.947-952, 1993
- 2) 山本佳士、中村光、黒田一郎、古屋信明：3 次元 RBSM による横拘束コンクリートの 1 軸圧縮破壊、土木学会論文集 E, Vol.66, No.4, pp.433-451, 2010. 11
- 3) 杉本啓太、山本佳士、三浦泰人、中村光：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、プレストレストコンクリート工学会、第 26 回シンポジウム論文集, pp.87-92, 2017.10
- 4) 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, No1, pp.109-119, 1992.1
- 5) F. Coppel, C. Sauvaget, and E. Gallire: Assessment of Structures subject to Concrete Pathologies EDF contribution., ASCET workshop, Jul. 2015
- 6) 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
- 7) 加藤佳孝、西村次男、魚本健人：骨材周囲の遷移帯厚さおよび空隙率の簡易算定手法の提案、セメント・コンクリート論文集、No.63, pp.308-315, 2009
- 8) 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, pp.1-15, 2013
- 9) 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
- 10) 阪井峻、山本大介、濱田秀則、佐川康貴：ASR 膨張によりひび割れが生じたコンクリートの圧縮応力下におけるひずみ分布に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.39, No.1, pp.889-894, 2017
- 11) 土木学会：コンクリートライブラー124、アルカリ骨材反応対策小委員会報告書、2005