複雑応力下におけるアルカリ骨材反応にともなう膨張挙動のモデル化

Modeling of expansion behavior due to alkali-silica reaction under complicated stress

柳原久美*・吉田秀典**

Kumi YANAGIHARA and Hidenori YOSHIDA

*香川大学 大学院工学研究科安全システム建設工学専攻 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

**博士 (工学) 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

Currently, the extension of life span of concrete structure is urgently needed. Therefore, it is important to predict the future deterioration of the concrete structure. The deterioration accompanied with alkali-silica reaction is one of the factors associated with durability. Generally, the aggregate expansion which is caused by the alkali-silica reaction brings about cracking, and the crack may decrease the durability with changing the mechanical properties of the concrete structure. Though there are a number of researches on alkali-silica reaction, the deterioration prediction under complex stress condition such as pre-stressed concrete is not well discussed. In this study, the degradation model for pre-stressed concrete structure is proposed and the validity of the model is examined through the comparison of exposure test of alkali-silica reaction using a pre-stressed concrete specimen.

Key Words: alkali-silica reaction, pre-stressed concrete, expansion, creep model

1. はじめに

現在、コンクリート構造物の延命化が急務となっていることから、コンクリートの劣化程度の将来予測が重要視されている。コンクリートの耐久性に影響を及ぼす劣化要因の一つにアルカリ骨材反応がある。アルカリ骨材反応では、コンクリート中のアルカリ性溶液と骨材の反応性鉱物が化学反応を起こし、コンクリートにひび割れを発生させる。これによって発生したひび割れは、コンクリート構造物の力学特性を変化させるとともに耐久性の低下を引き起こすことが知られている¹⁾。アルカリ骨材反応により劣化したコンクリート構造物は現地調査を行うことにより、コンクリート表面に発生しているひび割れの長さ、幅、深さといった現状の把握はできるが、コンクリート内部の状態やひび割れ挙動の力学的なメカニズムを把握することは困難となっている。

近年では、プレストレストコンクリート（以降、PC と記載）構造物のアルカリ骨材反応による劣化事例が複数確認されているが、アルカリ骨材反応に関する研究は非常に多い一方で、複雑な応力下にある PC 構造物の劣化、とりわけその予測に関しては十分な知見が得られていないのが現状である。アルカリ

骨材反応により劣化したコンクリート構造物の健全性の評価を行うには、コンクリート内部の状態やひび割れの程度を評価する必要があるが、それには、実験的アプローチのみでは十分な検討が困難であり、数値解析による検討が望ましいと考える。

既往の研究では、アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張挙動を精度良く再現できているものもあるが^{2),3)}、プレストレスの影響を考慮した解析モデルは少なく、また、プレストレスを考慮したアルカリ骨材反応に関する解析的研究もなされてはいるものの^{4),5)}、ひび割れ発生にまで着目した解析モデルはほとんどない。また、実際のコンクリート部材においては、様々の要因によりひび割れが発生し、部材内の応力状態は極めて複雑になっている。このように、アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張挙動に関して、複雑な応力下における実構造物の将来的な健全性の定量評価が可能なものは少ない。そこで本研究では、アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張挙動を再現するために、2 つのタイプの時間依存モデルを組み合わせたモデルを構築し、有限要素解析コードに組み込む。その上で、アルカリ骨材反応により劣化する PC 梁を対象とした実験を参考に有限要素解析を行い、アルカリ骨材反応に

よる PC 部材の膨張挙動の再現を試みる．さらに、解析結果と実験値との比較を行い、提案モデルの妥当性と有用性について検討を加える．

2. 膨張挙動のモデル化

本研究では、コンクリート中の粗骨材におけるアルカリ骨材反応の膨張挙動を再現するため、2つのタイプの時間依存モデルを採用した．一つ目は、ひずみが応力状態に依存し、圧縮応力場では圧縮ひずみが、また、引張応力場では引張ひずみが生ずるので、次式のようにひずみ $\bar{\varepsilon}^\sigma$ を定義する．

$$\bar{\varepsilon}^\sigma = A\sigma^n t^q \quad (1)$$

ここで、 A 、 n 、 q は材料定数、 σ は軸応力、 t は時間である．これは、いわゆる Norton 則と称される一般的なクリープ則である．式(1)を時間で微分することで次式が得られる．

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^\sigma = \frac{d\bar{\varepsilon}^\sigma}{dt} = qA\sigma^n t^{q-1} \quad (2)$$

前述の通り、式(2)は、圧縮応力場では圧縮ひずみが、また、引張応力場では引張ひずみが生じるというモデルになっているため、この式では、圧縮場における膨張挙動を表すことはできない．そこで、別途、アルカリ骨材反応にともなう膨張挙動を表現するモデルが必要となる．アルカリ骨材反応という化学反応では時間経過とともに反応性物質が消費される、つまり、時間経過とともにひずみは増大するものの、その増大幅は時間経過とともに小さくなっていくことを念頭に、次式に示すようなべき乗則にて膨張によるひずみ $\bar{\varepsilon}^r$ を定義する．

$$\bar{\varepsilon}^r = Bt^r \quad (3)$$

ここで、 B 、 r は材料定数である．式(3)を時間で微分することで次式が得られる．

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^r = \frac{d\bar{\varepsilon}^r}{dt} = rBt^{r-1} \quad (4)$$

さらに、式(2)を多軸状態におけるクリープモデルに拡張するため、多軸応力下では、式(2)の軸応力 σ を相当応力

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \} + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \quad (5)$$

に置き換え、塑性力学における Normality Rule を適用して、以下のようにひずみ速度テンソルを導く．

$$\dot{\bar{\varepsilon}}_{ij}^\sigma = \dot{\bar{\varepsilon}}^\sigma \frac{d\bar{\sigma}}{d\sigma_{ij}} \quad (6)$$

式(4)のひずみ速度は等方的に生じると仮定すると、

図-1 引張破壊とひずみ軟化

$$\dot{\bar{\varepsilon}}_{xx}^t = \dot{\bar{\varepsilon}}_{yy}^t = \dot{\bar{\varepsilon}}_{zz}^t = \dot{\bar{\varepsilon}}^t, \quad \dot{\bar{\varepsilon}}_{ij}^t = 0 \quad (i \neq j) \quad (7)$$

となる．したがって、材料全体の非弾性ひずみ速度テンソル $\dot{\bar{\varepsilon}}_{ij}^c$ は、式(6)と式(7)の和として、

$$\dot{\bar{\varepsilon}}_{ij}^c = \dot{\bar{\varepsilon}}_{ij}^\sigma + \dot{\bar{\varepsilon}}_{ij}^r \quad (8)$$

と表される

以上より、2つのタイプの時間依存モデルを組み合わせることで、PC のように複雑な応力下におけるアルカリ骨材反応による膨張挙動の再現を試みる．

3. ひび割れの発生と進展

ひび割れ挙動については、引張軟化曲線を定義することにより、ひび割れの発生と進展のモデル化を行う．本研究では、図-1 に示すように、引張側では、コンクリートの弾性係数 E を有しながら引張強度 f_{tk} まで上昇し、引張強度に達した後は、勾配 E_s を有しながら下降する、いわゆるひずみ軟化挙動を呈することとした．各要素において最大引張応力 σ_{max} を求め、その応力が引張強度に達した場合、最大主応力方向に対して垂直方向にひび割れが入るものとした．この場合、ひび割れの入った方向に対して直角となる方向にのみ軟化が生じ、他の2方向については、軟化はせずに弾性係数を保つものとしている．なお、本研究では、外部荷重が作用されない状態の供試体を対象に数値解析を行うことから、コンクリートの引張破壊だけを考慮し、圧縮破壊は考慮しない、つまり、圧縮側では弾性体であると仮定した．

4. 膨張解析

4. 1 参考実験の概要

本研究で提案した上記のモデルの妥当性を検討するためには、実挙動と解析結果の比較などが必要と

表-1 材料特性値

材料特性	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm ²)
コンクリート	3.00×10^4	0.2	2.0
鉄筋	2.05×10^5	0.3	—
PC 鋼材	2.05×10^5	0.3	—
支圧板	2.05×10^5	0.3	—

なる．佐々木ら⁶⁾は，アルカリ骨材反応による劣化が生じた PC 梁のせん断耐荷力を実験的に検証している．そこで本研究では，この実験事例を参考に 3 次元有限要素解析を行う．

4. 2 感度解析の概要

前述の佐々木ら⁶⁾の実験を参考にアルカリ骨材反応の膨張挙動を再現するため，有限要素解析を行った．有限要素解析には 3 次元の 8 節点ソリッド要素を採用し，節点・要素数を削減するため供試体の 4 分の 1 を解析対象とした．鉄筋と PC 鋼材（後掲の図-4 参照）に関しては，2 節点トラス要素を用いている．プレストレスの導入に関しては，実際は PC 鋼材に緊張力を加えるが，解析では，それが復元しようとする際に支圧板に作用する圧縮力を支圧板要素（後掲の図-4 参照）に作用させている．作用方法については，参考実験と同様に，概ね，梁の上端応力が 0 N/mm^2 ，下端応力が 10 N/mm^2 の三角形分布になるように圧力を加えている．文献⁶⁾には，解析に必要な材料特性値の記載がないことから，コンクリート（モルタルと粗骨材）および鉄筋における一般的な値を，表-1 のように設定した．なお，図-1 における勾配 E_s は，文献⁷⁾を参考に，弾性係数 E の 10 分 1 と設定した．

2 つのタイプの時間依存モデル，式(2)および式(4)における各解析パラメータ A ， n ， q ， B ， r については，このうちの A ， B という 2 つの係数がアルカリ骨材反応に膨張挙動に与える影響が大きいと考え，まず，これらの 2 つの解析パラメータについて感度解析を 4.3 節にて，次に，実供試体を対象とした解析を 4.5 節にて行う．なお，感度解析では，簡易的に，支圧板，鉄筋および PC 鋼材を除く全ての要素が膨張するものとするが，実供試体を対象とした解析では，実験に倣って，粗骨材要素の半分（反応性粗骨材）のみが膨張し，それ以外の半分（非反応粗骨材），モルタル要素，支圧板要素，鉄筋要素および PC 鋼材要素は非膨張としている．文献⁶⁾によれば，これらの体積比は，概ね，反応性骨材粗要素：非反応性粗骨材要素：モルタル要素=1:1:3 であることから，本解析でもそのように設定した．

図-2 解析メッシュ（単位：mm）

図-3 境界条件

図-4 各要素配置図

図-5 プレストレスの導入

その他の解析パラメータについては，吉田ら⁸⁾の研究を参考に， $n=0.5$ ， $q=0.5$ ， $r=0.5$ と定めた．また，解析メッシュ，境界条件，各要素の配置図を図-2，図-3，図-4 に示す．

プレストレスの導入に関しては，前述の通りであるが，PC 鋼材要素に接している 4 要素の圧力を一番大きく設定し，PC 鋼材要素から離れるにしたがって圧力を徐々に小さく設定している（図-5 参照）．

参考実験⁶⁾では，コンクリートの表面のひずみを図-6 にて赤丸で示した点で抽出しており，軸方向上

図-6 ひずみの抽出点

表-2 解析ケース

Case	係数 A	係数 B
Case 1	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}
Case 2	5.0×10^{-8}	1.0×10^{-6}
Case 3	3.0×10^{-8}	1.0×10^{-6}
Case 4	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-6}
Case 5	1.0×10^{-8}	7.0×10^{-7}
Case 6	1.0×10^{-8}	5.0×10^{-7}

端については Node 1 と Node 3，軸方向下端については Node 2 と Node 4，鉛直方向については Node 1 と Node 2，そして軸直角方向については Node 1 と Node 3 というそれぞれ 2 点の平均値を計測値としていることから，本解析でもこれに倣った．4.5 節にて示す PC 鋼材とせん断補強筋のひずみについても，参考実験⁶⁾の計測に倣い，本解析では，PC 鋼材のひずみを供試体中央（図-6 では Node 2）で，また，せん断補強筋のひずみを，図-6 にて青の三角で示した上縁，中央，下縁という 3 点（解析供試体右端より 160mm に位置する）で抽出している．

4. 3 感度解析の結果

感度解析における各解析ケースにて用いた係数 A，B の値を表-2 に，また，感度解析の結果を図-7～図-12 に示す．なお，凡例の Axial direction Upper edge は軸方向上端，Axial direction Inferior edge は軸方向下端，Vertical は鉛直方向，Right angle Upper edge は軸直角方向のひずみを表している．Case 2 から Case 4 では，Case 1 を基準に，式(1)における係数 A のみを Case 1 の 1.0×10^{-7} より小さく設定している．A の値のみを低減すると，鉛直方向，軸直角方向のひずみは減少傾向を示す．軸方向上端のひずみについては，Case 1 こそ圧縮ひずみ（負のひずみ）となっているが，Case 2 ではひずみがほとんど生じておらず，Case 3 と Case 4 では引張に転じている．これは，式(3)で定式化したひずみ（膨張ひずみ）が正のひずみとなっていて，式(1)で定式化される負のひずみが，絶対値として正のひずみを上回っていれば，全体としては負のひずみになるが，正のひずみを下回って

図-7 非弾性ひずみの経時変化（Case 1）

図-8 非弾性ひずみの経時変化（Case 2）

図-9 非弾性ひずみの経時変化（Case 3）

図-10 非弾性ひずみの経時変化（Case 4）

いれば，全体としては正のひずみとなる．Case 4 では，約 5000μ という引張ひずみを示している．軸方向下端のひずみについては，A の値を低減することで圧縮ひずみが減少しており，これについても Case 4 では引張に転じている．

図-11 非弾性ひずみの経時変化 (Case 5)

図-12 非弾性ひずみの経時変化 (Case 6)

また、Case 5 および Case 6 では、Case 4 を基準に式(3)における係数 B を、Case 4 の 1.0×10^{-6} より小さく設定している。Case 5 と Case 6 ひずみの値が Case 1 から Case 4 のそれと比べて小さいことから、図-11 と図-12 の縦軸（非弾性ひずみ）を図-7～図-10 の 4 分の 1 としている。 B の値を小さくすると、すべての引張ひずみが低減する傾向がうかがえ、軸方向下端については、圧縮に転じていることが分かる。式(3)で定式化したひずみは応力状態とは無関係に時間とともに増大するため、 B の値を小さくすることで正のひずみ、つまり、引張ひずみは減少するが、式(1)で定式化したひずみについては、応力成分が正であれば正のひずみ（引張ひずみ）が生じ、逆に、負であれば負のひずみ（圧縮ひずみ）が生じるため、 A の値の大小はひずみの絶対値を大小する。したがって、応力成分が正であれば、式(3)に基づくひずみ、即ち、アルカリ骨材反応による膨張に加えてひずみが増大し、一方、応力成分が負であれば、式(3)に基づくひずみ、即ち、アルカリ骨材反応による膨張を低減することとなる。圧縮場において発生するひずみが引張になるか、あるいは圧縮になるかは、これら A と B の大小関係によって定まることとなる。

Case 1 から Case 6 の解析では、解析領域の全てのモルタル要素と骨材要素を膨張させているが、実際のアルカリ骨材反応による膨張挙動では、コンクリート中の反応性骨材のみが膨張し、最終的にはコンクリートにひび割れが発生する。以降では、 A を

表-3 解析ケース

Case	骨材配置 パターン	係数 A	係数 B
Case 7	パターン 1	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-7}
Case 8		1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}
Case 9		1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
Case 10	パターン 2	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
Case 11	パターン 3	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}

1.0×10^{-8} 、 B を 5.0×10^{-7} という組み合わせを基準に、実供試体を対象とした解析を行う。

4. 4 実供試体を対象とした解析の概要

4.3 節では、解析対象物を均質な材料とし、支圧板要素、鉄筋要素および PC 鋼材要素を除くすべての要素が膨張するものと仮定して感度解析を行ったが、実際のコンクリートは反応性骨材のみが膨張する複合材料であることから、次節の解析では、支圧板要素、鉄筋要素、PC 鋼材要素に加え、モルタル要素と非反応性骨材要素は膨張させず、反応性骨材要素のみを膨張させることとした。参考実験では粗骨材全体の割合の半分が反応性骨材であるため、本解析でも同じ割合にて骨材要素を膨張要素と非膨張要素に設定し、乱数発生プログラムを用いてランダムに配置した。また、骨材の配置パターンによりひび割れ挙動に変化がないかを確認するため、配置を変化させた解析を 3 パターン行った。解析パラメータ A と B 、および各要素の配置パターンを変化させた解析の組み合わせを表-3 に示す。

4. 5 実供試体を対象とした解析の結果

Case 7～Case 11 の解析結果のうち非弾性ひずみの経時変化を図-13～図-17 に、実験結果（破線）と併せて示す。図-13 は A を 1.0×10^{-8} 、 B を 5.0×10^{-7} と設定した解析結果（Case 7）である。ひずみ量に関しては、鉛直方向が最大値を示し、続いて軸直角方向、軸方向上端、軸方向下端と続くが、この順序は実験と一致している。しかしながら、実験では材齢がおよそ 100 日あたりでひずみが急増しているのに対して、解析では 500 日あたりでひずみが急増している。また、解析のひずみの値は実験値よりも小さい。そこで、Case 8 では A の値を 100 倍大きく設定した。その結果、図-14 に示すように、およそ 100 日あたりからひずみが急増し、Case 7 よりも実供試体の挙動に近いが、最終の膨張量に関しては、鉛直方向では実験値よりも約 4000 μ 小さな値を示している。そこで、Case 9 では膨張量に関して、実供試体のそれに近い値となるよう、 B の値を 2 倍大きく設定した。

図-13 非弾性ひずみの経時変化 (Case7)

図-15 非弾性ひずみの経時変化 (Case9)

図-14 非弾性ひずみの経時変化 (Case8)

図-16 非弾性ひずみの経時変化 (Case10)

その結果を図-15 に示す。鉛直方向で約 7000 μ (実験値は約 8000 μ)、軸直角方向および軸方向上端で約 5000 μ (実験値は、軸直角方向で約 8000 μ 、軸方向上端で約 3000 μ)、軸方向下端ではほぼ 0 (実験値もほぼ 0) である。解析結果が実験値に近いものあれば、実験値より大きいあるいは小さい箇所もあってまちまちであるが、これについては、後述する骨材の配置と絡めて考察する。Case 9 については、Case 7 と Case 8 よりも B の値を 2 倍大きく設定することで、ひずみが大きい箇所ではより大きくなり、ほぼ 0 の箇所では、依然としてひずみは小さいことが分かる。また、解析においても、プレストレスが導入された軸方向下端部にて、極端にひずみのレベルが小さくなっていることが分かる。なお、 A の値を 100 倍にしても、極端にひずみの値が変化しない理由は、膨張要素 (反応性骨材) だけが膨張し、それ以外の要素 (非反応性骨材、モルタル、支圧板、鉄筋、PC 鋼材、) は膨張しないことと、ひび割れの発生にともなう応力再配分が生じるためである。

コンクリートは不均質材料であることから、本小節の解析では、各要素 (モルタル要素、膨張要素、非膨張要素) をランダムに配置している。Case 7～Case 9 は同一の配置パターンで解析を行っているが、各要素の配置パターンの違いが解析に及ぼす影響を検討するため、Case 10 および Case 11 では、 A および B に関しては Case 9 と同じ値と用いるものの、乱数発生プログラムを用いて、各要素の配置パターン

図-17 非弾性ひずみの経時変化 (Case11)

を Case 7～Case 9 とは変化させている。Case 10 および Case 11 の非弾性ひずみの経時変化を、それぞれ図-16、図-17 に示す。Case 9 と比較して、ひずみが急増する日時が若干異なるほか、最終的なひずみレベルも Case 10 は Case 9 より、いずれの箇所でも約 2000 μ 大きい、Case 11 と Case 9 ではそれほどの差はない。Case 10 については、解析により軸直方向および鉛直方向の最終的なひずみの値が実験値のそれと近くなっているが、逆に、軸方向下端は、解析が実験値を 2000 μ ほど上回っている。計測する箇所の近傍に膨張する骨材がある場合は、その箇所で大きなひずみを生ずることから、実験供試体における骨材の配置を正確に反映していない数値解析においては、すべての計測箇所において、数値結果が実験値と完全に合致しないのは、ある意味当然であり、こうした観点からすれば膨張する粗骨材要素の配置パ

図-18 PC 鋼材のひずみの経時変化 (Case9)

図-19 PC 鋼材のひずみの経時変化 (Case10)

図-20 PC 鋼材のひずみの経時変化 (Case11)

ターンは重要であると考える。

つぎに、Case 9, Case 10 および Case 11 における PC 鋼材のひずみの経時変化を、実験値と併せて、それぞれ図-18～図-20 に示す。実験では、材齢 200 日の手前で圧縮側に最大で約 400 μ まで減少している。その後、200 μ 程度引張側に変化している。図-18～図-20 の解析結果を見ると、初期段階で圧縮側にひずみが約 200 μ ～約 300 μ の範囲で変化し、その後は、引張側にひずみが転じており、実験と挙動が類似している。ただし、PC 鋼材におけるひずみについても、引張側に回復していくひずみ量は、Case 9 と Case 11 では約 300 μ 程度の差があり、これに関しても、前述と同様、膨張する骨材要素の配置パターンが重要と言えよう。なお、実際の供試体は、打設初期の段階では自己収縮、温度収縮、そして乾燥収縮などが卓越するのが一般的であるが、解析ではこうした収

図-21 セン断補強筋のひずみの経時変化 (Case9)

図-22 セン断補強筋のひずみの経時変化 (Case10)

図-23 セン断補強筋のひずみの経時変化 (Case11)

縮を考慮していない。約 200 日に亘って収縮している現象を表現するには、解析では考慮していない収縮現象を評価する必要がある。

さらに、Case 9, Case 10 および Case 11 におけるセン断補強筋のひずみの経時変化を、実験値(破線)と併せて、図-21～図-23 に示す。実験では、どの計測点においても、最終的に 2000～2700 μ 程度のひずみが発生しているが、Case 9 あるいは Case 11 では同程度のひずみのレベルを示しており、また、経時変化も実験と類似している。

最後に、一例として、Case 9 におけるひび割れの進展状況を図-24～図-27 に示す。これらは、供試体側面の軸直角方向のひび割れひずみ(クラックひずみ)を表している。このひずみは、最大引張応力が発生した方向における全ひずみより弾性ひずみ (f_{tk}/E) を差し引いて求めている (図-1 参照)。図-24～

図-24 ひび割れひずみ分布（1年経過）

図-26 ひび割れひずみ分布（3年経過）

図-25 ひび割れひずみ分布（2年経過）

図-27 ひび割れひずみ分布（4年経過）

図-27 より、供試体上面にひび割れが発生し、徐々にそのひび割れが長軸方向に進展していくことが分かる。参考実験においては、ひび割れを観察した結果の提示はないので、直接の比較はできないが、一般に、PC 部材におけるひび割れ性状は、PC 鋼材に沿ってひび割れが進展する傾向があり⁹⁾、本解析は、概ね、このひび割れ進展状況を再現できている。なお、下端端部の断面部分にひずみレベルの高いひび割れが発生しているが、この原因としては、モルタル要素と支圧板要素を完全固着させていることが挙げられる。こうした点については、今後、解決を図っていく必要がある。

5. まとめ

本研究では、複雑応力下におけるアルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張挙動を再現するために、一般的な Norton 則と膨張のみを生じるモデルという 2 つのタイプを組み合わせたモデルを構築し、それらを 3 次元有限要素解析コードに組み込んだ。

まず、数値解析モデルにおける 2 つの重要なパラメータについて感度解析を実施し、それらが有する特徴について把握した。感度解析により、適当はパ

ラメータを採用することで、圧縮応力下でも膨張するような挙動の表現が可能であることが分かった。

それを受けて、佐々木ら⁹⁾が実施したアルカリ骨材反応に関する実験を参考に、プレストレスを受けるコンクリート内部の状態やひび割れ挙動の再現を試み、実験結果と解析結果の比較を通して、提案する解析モデルの妥当性や有用性について検討した。コンクリート表面、PC 鋼材、そしてせん断補強筋に関して、解析と実験値を比較した結果、適当なパラメータを採用することで、プレストレスが導入された箇所付近でひずみの発生が抑制され、他方、そうでない箇所では大きなひずみが生ずるというような、実挙動で確認されるような挙動を再現することができた。また、各要素の配置パターンのみを変化させた解析より、大きなひずみの発生は、反応性骨材（膨張する骨材）の箇所に大きく依存する結果が得られ、これより、各要素の配置パターンは重要であることが判明した。さらに、解析において得られたひび割れひずみは、一般的な PC 構造物において確認されるひび割れ発生挙動と類似していた。以上より、提案した数値解析モデルにて、ひび割れの発生と進展挙動の再現も、概ね、可能であると思われる。

提案手法は PC 構造物におけるアルカリ骨材反応による劣化の程度の評価に関して有用であると思われるが、詳細な骨材の配置状況などが不明である以上、すべての計測箇所において、定量的な合致というのは難しい。本論文で示したように、骨材パターンのみを変化させた Case 9 から Case 11 の解析結果における上限値と下限の値の間に計測結果が収まっていれば、その際の解析パラメータを用いて、将来の劣化予測などが可能になると考えている。

なお、本研究では、アルカリ骨材反応にともなう膨張挙動のみに焦点をあて、そのモデル化などを行っているが、コンクリート構造物における時間依存挙動としては、モルタル部における乾燥収縮や自己収縮といった収縮挙動などもある。本来であれば、こうした挙動も含めて議論すべきであるが、多くの実験では、多種の時間依存挙動をマクロ的にしか捉えられないため、アルカリ骨材反応にともなって発生した変位（ひずみ）と、それ以外の変位（ひずみ）を分離できているわけではない。今後、アルカリ骨材反応にともなう膨張挙動のみの評価が可能な実験方法などについて考えていく必要がある。

さらに、本研究では、解析における骨材要素は、乱数を発生させることで配置させているが、用いた乱数は正規乱数のみであり、他の、例えば、指数乱数、ポアソン乱数などを用いた場合、解析結果にどのような影響を与えるかなどについても検討する必要があると考える。

参考文献

- 1) 野村倫一，松田好史，葛目和宏：ASR の影響を受けた構造物におけるコンクリートの力学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1273-1278，2009.
- 2) 岡幸二，吉田秀典，松島学，横田優：アルカリ骨材反応によるコンクリートのひび割れ発生モデルの構築と解析手法の提案，土木学会論文集 A，Vol.63，No.4，pp.744-757，2007.
- 3) 山城建樹，富山潤，伊良波繁雄，神田康行：アルカリ骨材反応によるひび割れ挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.77-82，2006.
- 4) 上田尚史，中村光，国枝稔：ASR を生じた PC はりの膨張挙動と損傷後の構造性能の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，2009.
- 5) 新名勉，松本茂，佐藤彰紀，久利良夫，真鍋英規：ASR による劣化を受けた PC はり部材の力学的挙動に関する解析的検討，アップグレード論文報告集，第 9 巻，2009.
- 6) 佐々木一則，松本茂，久利良夫，葛目和宏，金海鉦，宮川豊章：ASR 劣化が生じた PC はりの長期暴露試験における膨張挙動，材料，Vol.57，No.10，pp.973-980，2008.
- 7) 山野はるか，吉田秀典，檜垣勝久，三馬寛之：誘発目地の周辺に発生するひび割れに関する数値解析的検討，計算数理工学論文集，Vol.10，pp.51-56，2010.
- 8) 吉田秀典，奥村幸弘，加藤和之：トンネルの長期変形に影響を及ぼす因子に関する数値解析的研究，岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，Vol.32，pp.49-56，2003.
- 9) 城代和行，西村一紀，中村健一，三田健太，宮川豊章：ASR による劣化を受ける PC 部材の長期性状と補強効果に関する実験報告，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，Vol.9，pp.203-210，2009.

(2013 年 3 月 18 日 受付)