論文　仕事量一定則を用いたASR膨張挙動の評価

河合　真樹[*1]・石井　豪[*2]・堅田　茂昌[*3]・石川　靖晃[*4]

要旨：本研究では，ASR膨張を生じるコンクリートを用いた一軸拘束試験体を作成し，その膨張量からASR膨張エネルギーを算出した。また，求められたASR膨張エネルギーを有限要素法に適用し，一軸拘束試験体の解析を行った。その結果，ASR膨張エネルギーは，拘束鋼材になされた仕事量とケミカルプレストレスによってコンクリートになされた仕事量およびひび割れ面において解放されたエネルギーを合わせた場合，拘束鋼材比によらず一定となることが示唆された。さらに，試験結果から得られたASR膨張エネルギーを仕事量一定則に基づいた有限要素解析に適用することで，膨張履歴が再現できることを確認した。

キーワード：ASR，膨張エネルギー，仕事量一定則，一軸拘束試験

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下，RC）部材やプレストレストコンクリート（以下，PC）部材における，アルカリシリカ反応（以下，ASR）による膨張挙動は部材内の鋼材量や鋼材配置に影響を受けるため，例えば鋼材比の低い箇所ではコンクリート表面に網目状のひび割れが生じることや鋼材比の高い箇所では主鉄筋･PC鋼材に沿ったひび割れが卓越することがこれまでの調査・研究から明らかになっている[1)]。RC部材やPC部材では，コンクリートにケミカルプレストレスが導入されるものの，部材端部等の拘束力の小さい箇所でのひび割れによるコンクリートの性能低下，過大な膨張により生じた幅の大きなひび割れからの有害物質の侵入など，ASRによる劣化は構造的な観点および耐久性の観点から許容することができない。1986年のASR抑制対策以前に建設された構造物の中にはASR劣化を生じているものも多く存在しており，これらの構造物の耐荷力や変形性能の変化を適切に評価し，必要な場合には補修・補強等が行われなければならない。ASRによる劣化は一般的に長い時間をかけて進行することや複数の条件で検討をすることの難しさから，実験的な研究のみによって評価していくことは容易ではない。そのため，ASRが構造物に与える影響を評価する手法の一つとして，ASRによる膨張挙動や劣化を適切に予測できる解析手法の確立が望まれている。

ASRによる損傷を受けた構造物を解析により評価するためには，ASR膨張を定量的に評価する必要がある。土木学会コンクリート委員会アルカリ骨材反応対策小委員会報告書[2)]では，膨張コンクリートの膨張エネルギーの考え方をASRによる膨張に対しても利用できる可能性が示されている。これは，膨張エネルギー（膨張により生じる仕事量）は，同一のコンクリートであれば拘束鋼材比によらず一定の値となるという考え方（仕事量一定則）である[3)]。仕事量一定則の概念を解析に反映することにより，構造物の鋼材量や鋼材配置に依存する膨張挙動を推定することが可能になると考えられる。

一般にPC構造物は，プレストレスによりひび割れを制御できることや高強度のコンクリートが使用されることから，耐久性の高い構造物と言われている。一方，単位セメント量の多いコンクリートを使用するためセメントから供給されるアルカリ量が増加し，ASRが発生する可能性が高くなるという面もある。実際に，橋梁や舗装など各種PC部材においてASRによる劣化が報告されている[4)]。また，顕著なASR反応を示す骨材を使用したPCはり試験体の膨張挙動および曲げ載荷試験に関する実験的な研究も報告されている[5),6)]。

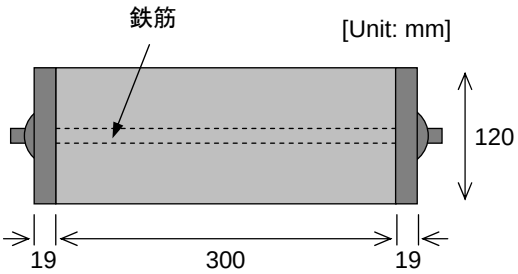
本研究では，ASR反応性骨材を使用したコンクリートの一軸拘束試験体を作成後，促進養生し，その膨張挙動からASR膨張エネルギーを算出した。また，求められたASR膨張エネルギーを仕事量一定則の概念を導入した有限要素法に適用し，一軸拘束試験体の膨張履歴を解析的に推定した。

2. 一軸拘束試験の概要

2.1 試験体概要

試験体の概要を**図－1**に示す。試験体の形状は120×120×300mmの角柱で，断面中心位置に拘束用の鋼材を1本配置している。鋼材は端部の鋼板と溶接し，部材が一様な拘束状態となるようにしている。拘束鋼材比は無拘束のものを含めて4種類とし，それぞれ2体ずつ作製した。**表－1**に使用した鉄筋とその時の鋼材比を示す。

*1　（株）安部日鋼工業　技術工務本部　技術部　工修　（正会員）
*2　（株）安部日鋼工業　技術工務本部　開発部　工修　（正会員）
*3　（株）安部日鋼工業　技術工務本部　技術部　（正会員）
*4　名城大学　理工学部建設システム工学科教授　工博　（正会員）



図－1　試験体形状

表－1　拘束鋼材比および試験体数

拘束鋼材	拘束鋼材比	試験体数
無拘束	0.00%	2
D6	0.22%	2
D13	0.88%	2
D19	1.99%	2

表－2　コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)					混和剤 (C×%)
		W	C	S	G	添加アルカリ	
38	44	150	395	839	1048	18.9	1.2

2.2 使用材料

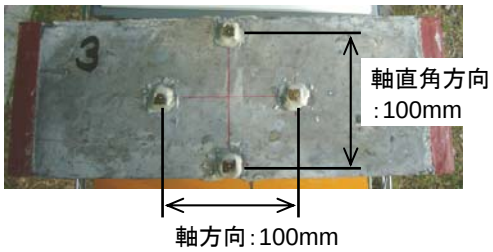
セメントは，早強ポルトランドセメントを使用した。使用骨材は，モルタルバー試験で顕著な ASR 膨張が確認された，北海道札幌近郊産の安山岩砕砂および砕石とした。この骨材は文献 5)および 6)で使用した反応性骨材と同一のものであり，詳細はそちらを参照されたい。骨材は全量を反応性骨材とし，ペシマム混合率 [1)]は考慮していない。また，骨材の ASR 膨張を早期に発生させるためにアルカリ（NaCl）を等価 Na_2O 量で 10kg/m^3 になるように添加した。なお，NaOH を大量に添加するとコンクリートの強度性状に悪影響を与えることが懸念されたため NaCl を用いた。また，セメントのアルカリ量は考慮していない。コンクリートの配合を**表－2** に示す。これは，文献 5)および 6)の反応性骨材を用いた早強単味の配合と同一のものである。

2.3 促進養生条件

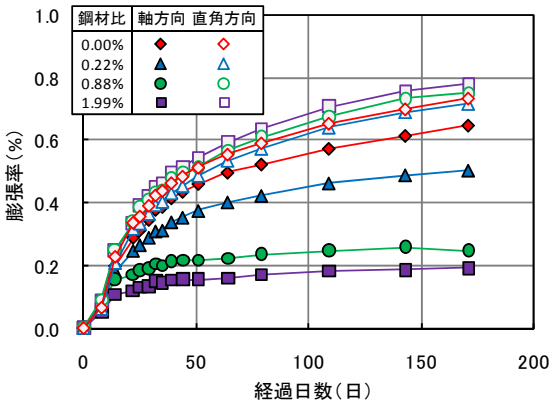
試験体は初期養生として蒸気養生を実施し，脱枠直後から恒温室内で保存した。反応の促進のために，恒温室内は 40℃で一定とし，試験体を濡らした布で包みビニール袋に入れて保存することで湿度を 100%とした。

2.4 計測方法

膨張量の計測は検長 100mm のコンタクトストレインゲージを用いて，各試験体の 4 面（打設面，両側面，底面）で行った。**図－2** に示すようにゲージチップを貼り付け，各面の中央において軸方向および軸直角方向の膨張量を計測した。ここで，軸方向とは拘束鋼材の方向である。また，拘束鋼材にひずみゲージを貼り付け，鋼材のひずみを計測した。



図－2　膨張量計測位置



図－3　膨張率（計測値）

3. 試験結果および考察

3.1 膨張履歴

図－3 に各拘束鋼材比の試験体で計測された軸方向および軸直角方向の膨張率の 4 面の平均値を示す。

まず，軸方向の膨張率に着目すると，計測開始後約 6 か月の時点で無拘束の試験体では 0.6%以上の膨張率が計測されたのに対し，拘束されている場合は拘束鋼材比が高くなるにつれて膨張は抑制されている。例えば拘束鋼材比が 1.99%の場合は無拘束の場合に比べて 3 分の 1 以下の膨張率となっている。

次に，無拘束の試験体の軸方向および軸直角方向の膨張率に着目すると，軸方向よりも軸直角方向の膨張率の方が大きな値となった。これは，計測点から試験体端部までの距離の違いやアスペクト比によるものであると考えられる。

また，各ケースの軸直角方向の膨張率に着目すると，拘束鋼材を配置している場合でも，無拘束の場合と同様の膨張挙動が見られる。ただし，鋼材比による膨張率の違いは小さいものの，鋼材比が高くなるにつれて膨張率も大きくなる傾向にある。この傾向は，試験体が拘束力によって軸方向に圧縮されることのポアソン効果の影響を受けるためであり，そのため，拘束の大きな試験体の方が軸直角方向への膨張が大きくなったものと考えられる。

以上の計測結果より，ASR により膨張する試験体を一軸拘束した場合，その拘束方向には鋼材量に依存した抑制効果がある一方，その他の方向の膨張挙動には大きな影響を与えないことが示された。

3.2 鉄筋のひずみ履歴

図－4 に，計測された拘束鋼材のひずみをコンクリートの軸方向膨張率とあわせて示す。拘束鋼材比が高くなるにつれて多少違いが生じるものの，概ねコンクリート表面の膨張率と拘束鋼材のひずみは一致している。

3.3 ひび割れ状況

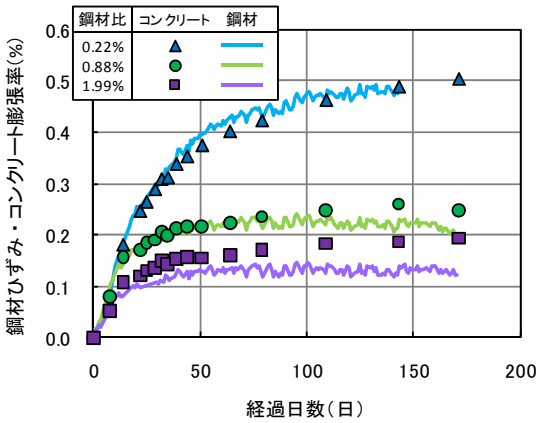
計測開始から約 6 か月経過した時点でのひび割れの発生状況の一例を**図－5** に示す。無拘束の試験体では，方向性のない網目状のひび割れが全体に発生している。拘束鋼材比が大きくなると，ひび割れ本数が減少するとともに，軸方向のひび割れが卓越している。

3.4 膨張エネルギー一定則の概念

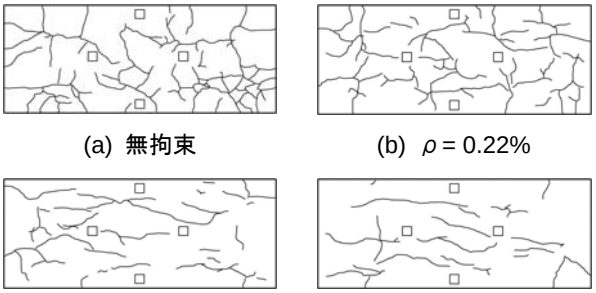
土木学会コンクリート委員会アルカリ骨材反応対策小委員会は，ASR によるコンクリートの膨張にも膨張コンクリートの膨張エネルギー一定則の考え方が適用できるとの見解を示している [2]。従来，膨張エネルギーは拘束鋼材になされた仕事量として求められるという考え方が一般的であったが，近年の研究によって，拘束鋼材になされた仕事量とコンクリートになされた仕事量の総和についてエネルギー一定則が成り立つことが理論的に解明されている [3]。文献 3)の知見において，コンクリートのクラックひずみ成分を考慮すると，最終的に，膨張エネルギー U は次式で表わされる。

$$U = U_s + U_{c,e} + U_{c,cr} + U_{c,crack} + U_{c,sh} \tag{1}$$

ここに，U_s :鋼材になされた弾塑性仕事量，$U_{c,e}$，$U_{c,cr}$，$U_{c,crack}$ および $U_{c,sh}$ ：コンクリートになされた弾性，クリープ，クラックひずみおよび収縮による仕事量である。式(1)中の鋼材になされた弾塑性仕事量 U_s は具体的には，次式となる。



図－4　拘束鋼材ひずみ・コンクリート膨張率（計測値）



(a) 無拘束　(b) ρ = 0.22%　(c) ρ = 0.88%　(d) ρ = 1.99%

図－5　ひび割れ状況（約 6 か月経過後）

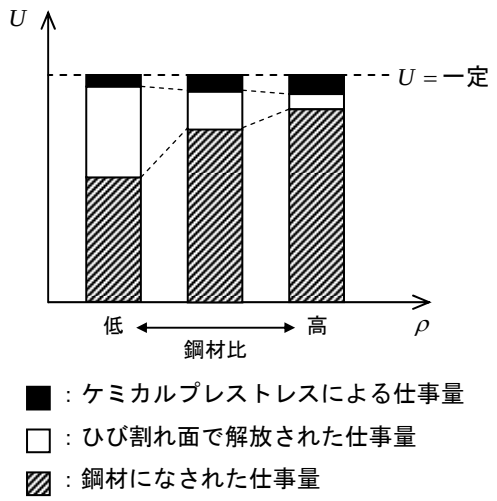
$$U_s = \rho \sum \sigma_s \Delta\varepsilon_{s,ep} \tag{2}$$

ρ ：拘束鋼材比，σ_s ：鋼材の応力，$\varepsilon_{s,ep}$ ：鋼材の応力依存性ひずみである。

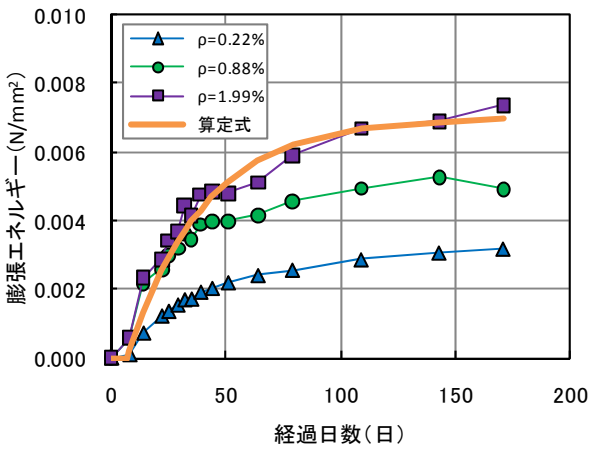
膨張コンクリートを対象とした既往の研究 [3]では，拘束鋼材になされる仕事量 U_s は拘束鋼材比が高くなるにつれて小さくなる傾向がある一方で，拘束鋼材になされる仕事量 U_s にコンクリートになされる仕事量 U_e の和を加えることにより，拘束鋼材の増加に伴う仕事量の減少傾向は緩和されると報告している。

3.5 ASR 膨張エネルギー

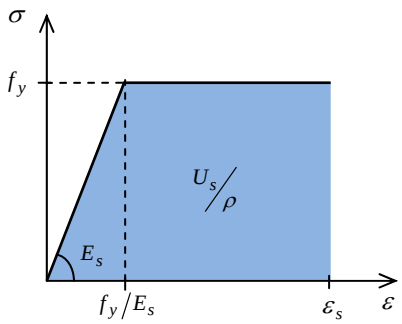
前述したとおり，膨張エネルギーは拘束鋼材になされた仕事量とコンクリートになされた仕事量の和で表わされるが，ASR による膨張はコンクリートのひび割れを伴うため，ひび割れ面で解放されたエネルギーを含めた場合に仕事量一定則を満足すると考えられる。なお，拘束鋼材比の低い試験体の方がひび割れの量が多いため，ひび割れ面で解放されたエネルギーは，大きくなると考えられる。同時にコンクリートになされた弾性，クリープおよび収縮による仕事量が総仕事量に対して如何ほどの割合を占めるか検討する必要がある。文献 7)によれば，膨張コンクリートを対象とした試験では，ケミカルプレストレスによりコンクリートになされた仕事量は，鋼材比が 2%程度の場合は鋼材になされる仕事量の 3 割



図－6　ASR 膨張エネルギーの分配のイメージ



図－7　拘束鋼材になされた仕事量



図－8　拘束鋼材の応力－ひずみ関係

程度となっている。なお，この場合，ひび割れは発生していないようである。

ASR による膨張においても同様の傾向があると仮定すると，ASR 膨張エネルギーの分配は**図－6** に示すような関係となると考えられる。

計測した膨張率から求められた，拘束鋼材になされた仕事量の履歴を**図－7** に示す。拘束鋼材になされた仕事量は，計測期間中のどの時点においても，鋼材比が高くなるにつれて大きな値となっている。これは，**図－6** に示した傾向と一致している。

なお，3.2 節より，膨張エネルギーの算出においては拘束鋼材のひずみはコンクリート表面で計測されたひずみと同一であるとした。また，膨張コンクリートの膨張エネルギー算出の際には，鋼材は線形弾性体であると仮定して応力の計算がされているが，今回の試験では**図－4** に示された通り，拘束鋼材のひずみが降伏ひずみ（約 0.175%）を大きく超えているケースもあるため，鋼材になされた仕事量を求める際には，**図－8** に示すような非線形な応力－ひずみ関係を考慮した。この時，単位鋼材比あたりの仕事量は，図中に示すように応力－ひずみ関係が成す面積と等しくなる。

他の仕事量について定量的に評価することは困難であること，および鋼材比が 2%の場合，鋼材の仕事量は，総仕事量の 7 割程度であるという事例が存在することから，本研究では，ASR による膨張エネルギーは，ケミカルプレストレスによる仕事量およびひび割れ面で解放された仕事量が比較的小さい，拘束鋼材比 1.99%の試験体における，拘束鋼材になされた仕事量を総仕事量とみなし，解析に導入することとした。なお，総仕事量が一定であるという概念に基づいて FEM 応力解析を行った結果，自由ひずみを単に初期ひずみとして与える手法に比べ計算値は実測値を良く表現していることが報告されている[8]。

膨張エネルギーを解析に導入するためには，膨張エネルギーを定式化する必要がある。一般に時刻 t における膨張エネルギー $U(t)$ は次式で表現できる。

$$U(t) = U_\infty\left(1 - \exp\left(-r\left(t - t_0\right)\right)\right) \tag{3}$$

ここに，U_∞：膨張収束時の膨張エネルギー，r：膨張速度に関するパラメータ，t_0：膨張開始材齢である。今回の試験結果から得られた ASR 膨張エネルギーの各係数を算定したところ，式(3)は次のようになった。

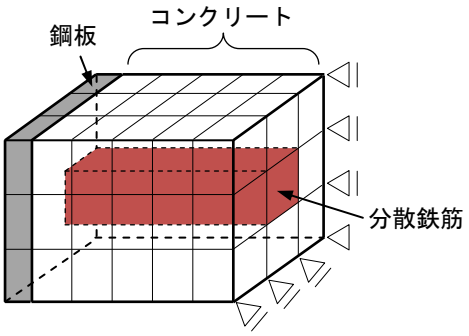
$$U(t) = 7.0 \times 10^{-3}\left(1 - \exp\left(-0.03\left(t - 7.0\right)\right)\right) \tag{4}$$

ただし，膨張エネルギーの単位は N/mm^2，時刻 t の単位は日である。式(4)により得られる，ASR 膨張エネルギーの経時変化を**図－7** に示す。

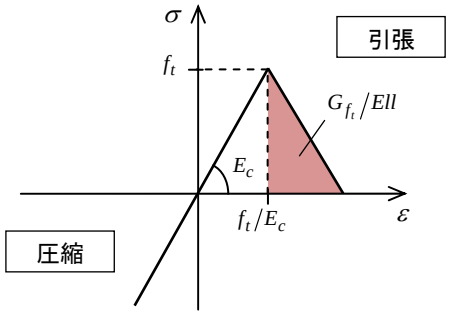
4. 解析概要

4.1 解析条件

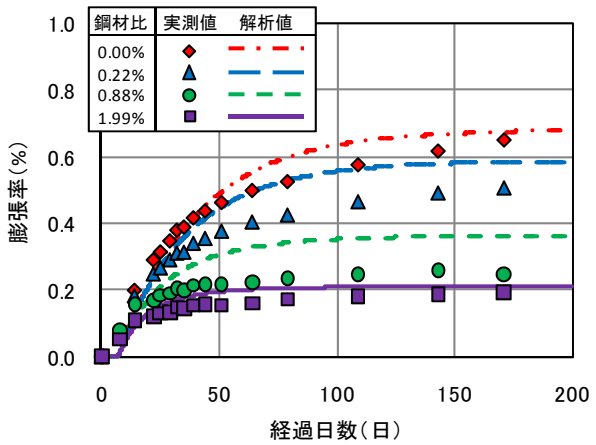
解析対象は 2 章および 3 章に示した，ASR 膨張を生じるコンクリートの一軸拘束試験体である。解析モデルを**図－9** に示す。解析は試験体の対称性を考慮して，2 分の 1 モデルとした。鉄筋は分散鉄筋としてモデル化し，断面中心の要素に鉄筋比を考慮した。



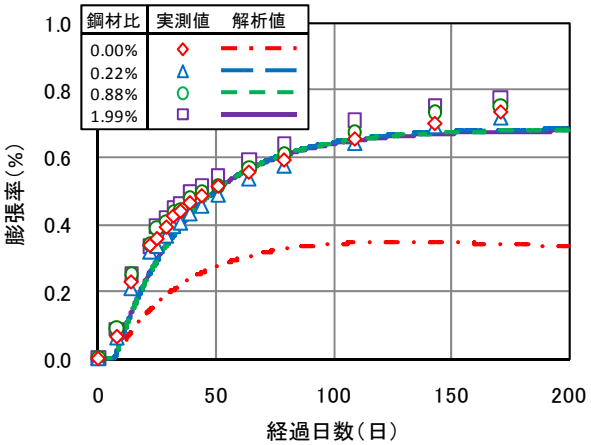
図－9　解析モデル



図－10　コンクリートの応力－ひずみ関係



図－11　軸方向膨張量（解析値と計測値）



図－12　軸直角方向膨張量（解析値と計測値）

4.2 解析手法

解析には，非線形有限要素解析プログラム LECOM[9)]（格子等価連続体モデル，Lattice Equivalent COntinuum Model）を用いた。

プログラム中では，鉄筋の応力－ひずみ関係は**図－8**のように，降伏ひずみ以降は一定の値をとるバイリニアモデルとした。また，コンクリートの応力－ひずみ関係は**図－10** に示すように，圧縮側は弾性とし，引張側には破壊エネルギー G_{ft} を考慮した。これにより，ひび割れ面での応力の解放を反映することが可能となる。鋼材の弾性係数は 210kN/mm^2 とし，コンクリートの弾性係数は健全な状態での値とし，25kN/mm^2 とした。

4.3 仕事量一定則に基づく自由膨張ひずみのモデル化

解析には，試験結果より求められた式(4)から得られる膨張エネルギーの経時変化を考慮した。仕事量一定則に基づく自由膨張ひずみのモデル化は具体的に以下の通りとした [8)]。

単位体積当たりのコンクリートの膨張エネルギー増分 ΔU は，主応力方向にそれぞれ生じる自由膨張ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_{che,i}(i=1,2,3)$ および主応力 $\sigma_i(i=1,2,3)$ を用いて，主応力成分ごとに次式で与えられる。

$$\begin{aligned}\sigma_1\Delta\varepsilon_{che,1} &= -\Delta U\\ \sigma_2\Delta\varepsilon_{che,2} &= -\Delta U\\ \sigma_3\Delta\varepsilon_{che,3} &= -\Delta U\end{aligned} \tag{5}$$

ここで，ΔU は必ず正値であるが，$\Delta\varepsilon_{che,i}$ は解析上，符号の異なる 2 つの解として得られる。ASR の生じたコンクリートでは膨張が生じるため，$\Delta\varepsilon_{che,i}$ を正値となるように制約することになる。

次に主応力テンソル $\sigma_{ij}^{*}(=diag\{\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3\})$ と全体座標系に対応する応力テンソル σ_{ij} 間において

$$\sigma_{ij}^{*} = Q_{ki}\sigma_{kl}Q_{lj} \tag{6}$$

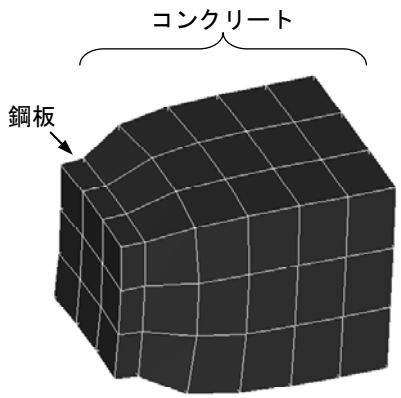
で定義される変換行列 Q_{ij} を用いて，主応力方向に生じる自由膨張ひずみを変換することにより，全体座標系での自由膨張ひずみ成分 $\Delta\varepsilon_{ij}^{che}$ は次式で表わされる。

$$\Delta\varepsilon_{ij}^{che} = Q_{ik}\Delta\varepsilon_{kl}^{*}Q_{jl} \tag{7}$$

ただし，$\Delta\varepsilon_{ij}^{*} = diag\{\Delta\varepsilon_{che,1},\Delta\varepsilon_{che,2},\Delta\varepsilon_{che,3}\}$ である。

式(7)を初期ひずみとして解析プログラムに導入することにより，仕事量一定則に基づいた膨張による変形解析を実施することができる。

本解析手法の特徴は，仕事量一定則に厳密に沿っており，一般性が高いことである。また，提案したモデルに



図－13　変形モードの一例

おける入力パラメータは，単位体積あたりのコンクリートの膨張エネルギーの経時変化 ΔU のみである。

5. 解析結果および考察

5.1 膨張履歴の比較

解析より得られた試験体の軸方向および軸直角方向の膨張率を試験結果とあわせて，**図－11**，12 に示す。解析によって計算された膨張率は軸方向・軸直角方向ともに，試験結果と概ね一致しており，解析での ASR 膨張の再現性が確認された。

ただし，解析結果の内，無拘束の試験体の軸直角方向膨張率は，試験で得られた膨張率とは大きく異なる値となっている。これは，今回の解析では，両端部の鋼板を表す要素とそれに隣接しているコンクリート要素間が完全に付着しているという仮定を設けているが，無拘束の試験体では実際には鋼板との摩擦抵抗はほとんど生じず，上記の仮定を逸脱するためであると考えられる。

5.2 変形モード

解析より得られた変形モードの一例を**図－13** に示す。変形モードはすべてこれと同様であり，合理的であると考えられる。端部の鋼板の影響があるため，鋼板近傍は軸直角方向の膨張量が小さくなっている。

6. 結論

以上のような，ASR 膨張エネルギーに関する試験および解析を通じて得られた知見は次の通りである。

1）ASR 反応性骨材を使用したコンクリートの一軸拘束試験体を促進養生し，膨張率の計測を行った。その結果，拘束鋼材比が高くなると軸方向膨張量は抑制されるのに対し，軸直角方向の膨張の抑制は見られなかった。

2）ASR による膨張は膨張コンクリートと異なりひび割れを伴うため，ひび割れ面においてエネルギーが解放される。したがって，拘束鋼材になされた仕事量とケミカルプレストレスによってコンクリートになされた仕事量およびひび割れ面において解放されたエネルギーを合わせた場合，拘束鋼材比によらず ASR 膨張エネルギーは一定となるものと考えられる。

3）今回の試験における ASR 膨張エネルギーは，拘束鋼材比 1.99%の試験体の鋼材になされた仕事量と等しいと仮定した。この ASR 膨張エネルギーの経時変化を仕事量一定則に基づいた非線形有限要素解析に適用し，試験での膨張履歴の再現が可能であることを確認した。

謝辞

本研究は，LECOM 研究会の協力を得て行われました。この場をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

1) 日本コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書，2008
2) 土木学会：コンクリートライブラリー124，アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005
3) 林陸太，石川靖晃：二軸拘束状態下での膨張コンクリートの仕事量に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.511-516，2009
4) 尾花祥隆，鳥居和之：プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.1065-1070，2008
5) 蓑田理希，古川柳太郎，尾花祥隆，鳥居和之：ASR による劣化を生じた PC 梁部材の耐荷力特性，コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1305-1310, 2007
6) 石井豪，宮島朗，松山高広，鳥居和之：高炉スラグ微粉末 6000 を用いた PC 梁の ASR 劣化抑制効果の報告，プレストレストコンクリート技術協会第 18 回シンポジウム論文集，pp.189-192，2009
7) 辻幸和，落合光雄，黒澤隆，岩崎和義：膨張コンクリートの弾塑性を考慮した仕事量の概念について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.373-378，1989
8) 石川靖晃，柴田要：仕事量一定則に基づく膨張コンクリートの変形挙動に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.351-356，2008
9) 田辺忠顕編著：初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム，技報堂出版，2004