

論文 ASR 膨張を表現するメソスケール・コンクリート要素の開発

水田 真紀^{*1}・児島 孝之^{*2}

要旨: 本研究では、ASR 膨張とそれによるひび割れ発生および進展を表現することのできるメソスケール・コンクリート要素の開発を行った。提案したコンクリート要素は、粗骨材要素とモルタルマトリクス要素で構成され、全ての要素間に接触要素をあらかじめ配置することにより、粗骨材の膨張とその後のひび割れ発生および進展をシミュレーションすることができた。ここでは、(1)アルカリシリカゲルの弾性係数、(2)コンクリートに占める粗骨材の割合、(3)粗骨材の形状、(4)コンクリート要素の数を要因とした FEM 解析を行い、ASR 膨張とひび割れ発生および進展との関連性について考察した。

キーワード: FEM 解析, ひび割れ, 接触要素, メソスケール, ASR 膨張

1. はじめに

本研究の目的は 2 つある。1 つ目は、アルカリシリカ反応（以下、ASR）による膨張過程を物理的に明らかにすることにより、ASR 劣化したコンクリート構造物の合理的な補修・補強に資する情報を得ることである。そして、2 つ目は、今後、資源の有効活用や環境への配慮から実績のない骨材を利用せざるを得なくなる状況を鑑み、メソスケール・コンクリート要素を開発することにより、骨材の特性を反映できる解析手法を提示することである。ここで、メソスケールとは、ミクロとマクロレベルの中間レベルを表す言葉として用いている¹⁾。

ASR 膨張過程は、まだまだ明らかにされていない問題が多い。これは、骨材の種類が多いことは元より、ペシマム現象を示すことや他の劣化要因との複合的な劣化などがあり、多種多様な現象が複雑に絡み合っていることが問題解決を非常に困難にしていると考えられる。そのため、経時的に複雑な化学反応が起こっていると予想されるが、膨張に寄与する物質の特定にはまだ至っていない。そこで、最近では化学的・岩石学的な見地からも研究が行われるようになり、その成果に期待が寄せられている。

ASR によりコンクリートが膨張し、劣化したコンクリート構造物の事例は今でも多く見られる。雨水の浸入を防ぎ、鋼鉄巻き立てなどによる補修・補強を行っても、なお長期にわたってコンクリートの膨張が確認される事例もある。一方、研究レベルでは、鋼鉄等による補修・補強後の ASR 劣化供試体の耐荷性状や、コンクリート内部に配置した鉄筋による拘束とひび割れ性状との関連性など、ASR 膨張を抑制する効果についての報告も多数ある。安全面のみならず、資源や環境保護の観点からも、たとえ ASR による劣化が生じていても、できる限り長期

供用されることが望ましい。しかし、まだ合理的な ASR 劣化構造物の補修・補強方法が提案されるには至っていないのが現状である。

鉄筋コンクリート構造における ASR 膨張の拘束とひび割れ性状の関係には、鉄筋の配筋方向や鉄筋径のみならず、鉄筋に拘束されている内部コンクリートの体積も影響を与える²⁾。そこで本研究では、①コンクリートに占める粗骨材の割合、②コンクリートの体積を要因とした FEM 解析を行い、それらの要因がひび割れ性状に与える影響について考察する。これにより、本研究の 1 つ目の目的とした、ASR 劣化したコンクリート構造物の合理的な補修・補強に役立つ基礎データになると考える。また、その他、③アルカリシリカゲルの弾性係数や④粗骨材の形状を要因とした解析も行い、ASR による膨張過程をシミュレーションする。

コンクリート中に占める骨材の割合は 70%程度にも上るため、骨材の特性がコンクリートの品質に与える影響は大きい。本研究の 2 つ目の目的として挙げたように、実績のない骨材を利用する場合だけでなく、最近、特に関心が高まりつつある乾燥収縮の問題解決のためには、骨材特性の影響を取り入れることのできる解析手法の提案は、非常に有効であると考えられる。そこで本研究では、骨材の特性を考慮でき、その影響を経時的なひび割れ発生および進展に関連付けられるメソスケール・コンクリート要素の開発を行った。

2. メソスケール・コンクリート要素の開発

2.1 ASR 膨張を表現できるコンクリート要素

ASR による粗骨材の膨張と、それに伴いコンクリート中に発生するひび割れを表現するため、図-1 に示す 2 次元のメソスケール・コンクリート要素を提案した。こ

*1 立命館大学 理工学部都市システム工学科 助教 工博 (正会員)

*2 立命館大学 理工学部建築都市デザイン学科 教授 工博 (正会員)

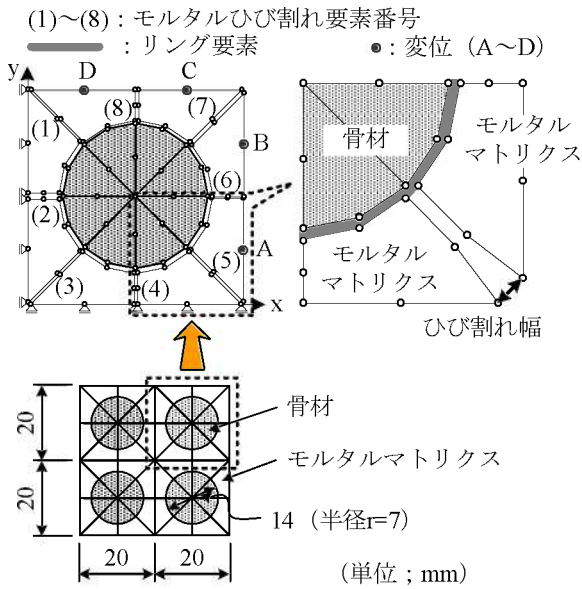


図-1 コンクリート要素

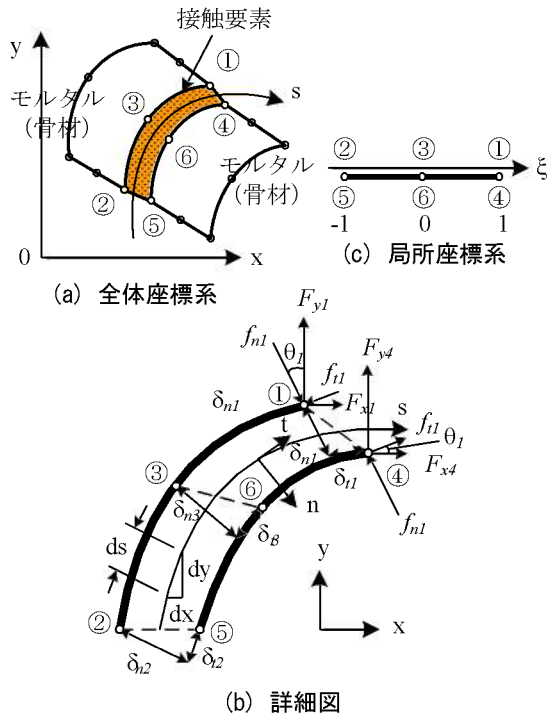


図-2 接触要素

ここでは、最も簡単にコンクリートをメソスケールで捉えることによる解析的な効果を検討するため、2次元でのモデル化を行った。コンクリート要素は、粗骨材とモルタルマトリクスで構成されており、円形の粗骨材要素を取り囲むようにモルタルマトリクス要素(1)から(8)を配置している。また、膨張により粗骨材から放射状にひび割れが発生する様子を表現できるように、要素分割を決定した。さらに、粗骨材要素の大きさは、通常のコンクリートに占める粗骨材の割合を考慮し、その直径 $2r$ (半径 $r=7(\text{mm})$)を基準とする)を決定した。ここで、図-1には解析の境界条件も同時に示しており、実際には図-

1 中の下図のように x 軸と y 軸に対称な4個のコンクリート要素を解析していることになる。

本研究では、骨材の特性がコンクリートとしての挙動に与える影響を把握できる要素の提案を目的の一つとしていることから、メソスケール・コンクリート要素は1つを基本として以下の解析を進めることにした。また、コンクリートを2種類の材料(骨材とモルタルマトリクス)からなる複合材料とした簡易的なモデルであるため、粗骨材の形状は円形を基本とし、実際の粗骨材形状の忠実な再現は行わなかった。

粗骨材は6節点を有する2次アイソパラメトリック三角形要素、モルタルマトリクスは8節点を有する2次アイソパラメトリック四辺形要素で表現した。そして、図-2に示す接触要素を全ての要素間にあらかじめ配置し、粗骨材の膨張とそれに伴うひび割れ発生を考慮した。また、接触要素は次の3つに区別した。

- a) モルタルひび割れ要素 (モルタル-モルタル間)
- b) 骨材ひび割れ要素 (粗骨材-粗骨材間)
- c) ASR リング要素 (粗骨材-モルタル間)

ここで、 x 軸と y 軸の境界線上にもモルタルひび割れ要素を配置している。また、ASRによる膨張は、反応性骨材の周辺にアルカリシリカゲルが徐々に生成されることにより引き起こされると考えられるため、本解析では、アルカリシリカゲルの増大をASRリング要素の膨張で表現することにした。

接触要素は、図-2に示すような3節点から成る2本の2次アイソパラメトリック線要素として表現した。ここで、ひび割れあるいは粗骨材の膨張が生じるまで、節点①と④、②と⑤、③と⑥は同じ空間を占めており、接触要素そのものに体積はない。また、式(1)で示す2本の線要素の相対変位と要素を介して伝達される応力の関係を接触要素の特性として導入した。

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{nn} & C_{nt} \\ C_{tn} & C_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \end{Bmatrix} = [C]\{\delta\} \quad (1)$$

ここで、係数 $C_{nn}=C_{tn}=0$ (N/mm^3)、 $C_{tt}=G/t_c$ (G : コンクリートのせん断弾性係数 (N/mm^2), t_c : コンクリート要素の厚さ 10 (mm))である。本研究で提案したコンクリート要素において、粗骨材は、形状が円形であることを基本とし、要素の中心に位置している。したがって、粗骨材から放射状に発生するひび割れ進展に最も影響が大きいと考えられるモルタルひび割れ要素の係数 C_{nn} のみに非線形な引張軟化特性 (ここでは、コンクリートの引張軟化曲線として一般的な-3乗モデル)を導入し、それ以外の係数は定数とした。さらに、本解析では粗骨材にひび割れが発生しないように、骨材ひび割れ要素の係数 C_{nn} は $20 \times E_{c0}/t_c$ (E_{c0} : 普通コンクリートの弾性係数

3.0×10^4 (N/mm²) とし、十分大きな値とした。

また、接触要素の剛性マトリクス[K_c]は次式で与えられる。

$$[K_c] = \int_s [B]^T [C][B] \cdot t \cdot ds$$

$$= \int_{-1}^1 [B]^T [C][B] \cdot t \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{d\xi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\xi}\right)^2} \cdot d\xi \quad (2)$$

本接触要素は筆者らが以前に開発したものであり、詳細な定義については文献³⁾を参照されたい。

2.2 各要素特性

解析に用いた粗骨材とモルタルマトリクス要素の材料特性を表-1に示す。

表-1 材料特性

要素	f _c	f _t	E	ν
モルタル	25	2.8	2.8 × 10 ⁴	0.1667
粗骨材	25	2.8	5.6 × 10 ⁴	0.1667

f_c: 圧縮強度(N/mm²), f_t: 引張強度(N/mm²),
E: 弾性係数(N/mm²), ν: ポアソン比

ここで、解析では普通強度のコンクリートを想定し、表-1に示す材料特性を決定した。また、粗骨材、モルタルマトリクス要素ともに弾性体と仮定し、コンクリートとしての非線形挙動は、モルタルひび割れ要素に導入した引張軟化特性によって表現した。したがって、骨材要素とモルタルマトリクス要素の圧縮強度 f_c と引張強度 f_t は解析結果に影響を与えないため、弾性係数 E を変えることにより、各要素の材料特性を表現した。

2.3 解析方法

本解析は、以下の順序に従って進めた。

- 1) ASR リング要素に膨張量 δ_m を与える。ここで、ASR リング要素の膨張量とは、2本の線要素間の要素軸 s に対して直角方向の相対変位である (図-2 参照)。
- 2) あらかじめ配置していたモルタルひび割れ要素について、要素軸 s に対して直角方向の相対変位 δ_n から伝達応力 σ_n を求め、それらの関係が引張軟化曲線に一致するよう繰り返し計算を行う。
- 3) ASR リング要素の膨張量 δ_m を増加させ、1)と2)を繰り返す。

ここで、ASR リング要素には、式(3)で与えられる膨張量 δ_m (mm) と経過時間 t (日) の関係を導入した。

$$\delta_m = \frac{1}{2700} (-2T^3 + 15T^2 - 24T + 1) \quad (3)$$

ここで、式(3)は本解析のために設定したものであり、T=log₁₀t である。

解析は、経過時間 2000 日まで行い、ひび割れ発生お

よび進展状況やコンクリートの膨張量について検討した。

2.4 検討項目と解析要因

本解析では、以下の4ケースについて、それぞれがひび割れ発生および進展状況とコンクリートの膨張量に与える影響について検討することにした。

- (ケース I) ASR リング要素の弾性係数 E_r
 - (ケース II) コンクリートに占める粗骨材の割合
 - (ケース III) 粗骨材の形状
 - (ケース IV) コンクリート要素の数
- ケース毎の解析要因を表-2にまとめる。

表-2 解析要因

検討項目	解析要因
ケース I	ASR リング要素の弾性係数 E _r ・ E _r =0.5 × E _{c0} , 1.0 × E _{c0} , 10 × E _{c0} ・ E _r =0.1 × E _{c0} ~ 20 × E _{c0}
ケース II	粗骨材の半径 r ・ r=3.0, 7.0, 9.0 (mm)
ケース III	粗骨材形状 ・ 楕円形
ケース IV	コンクリート要素数 (行 × 列) ・ 2 × 2, 2 × 4

3. 解析結果および考察

3.1 ASR リング要素の弾性係数 E_r の影響

ASR 膨張による膨張圧や生成されるアルカリシリカゲルの剛性については、まだ統一的な見解はないようである。そこで、ASR リング要素の弾性係数 E_r を変化させた解析を行った。各弾性係数を与えた場合のひび割れ図を経過時間とともに図-3に示す。ここで、モルタルひび割れ要素番号は図-1に示す(1)から(8)とし、今後の解析結果においても同じ要素番号を用いて考察することにする。

全ての場合において、要素長さが最も短いモルタルひび割れ要素(6)か(8)に初ひび割れが発生した。一方、要素長さが最長のモルタルひび割れ要素(3)が最後のひび割れとなった。また、ASR リング要素の弾性係数 E_r が大きくなるほど、初ひび割れ発生時期は 50 日から 40 日へ、最終ひび割れ発生時期は 300 日から 80 日へと、早くなる傾向が見られた。

いずれの弾性係数においても、膨張量と経過時間の関係は同様の傾向を示したため、E_r=1.0 × E_{c0} の場合のみを図-4に示す。ここで、x 方向の膨張量とは図-1に示す A 点と B 点の x 方向の変位量の平均値、y 方向の膨張量とは C 点と D 点の y 方向の変位量の平均値であり、以降

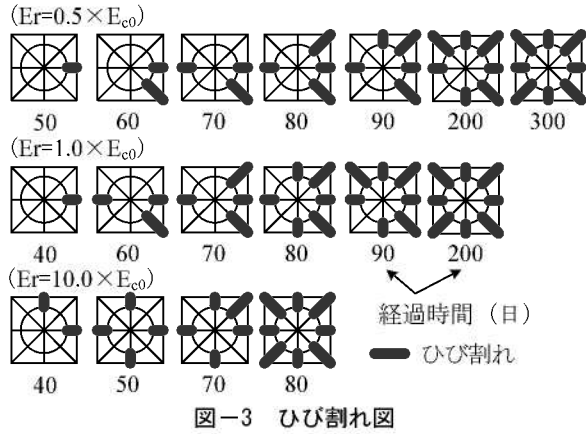


図-3 ひび割れ図

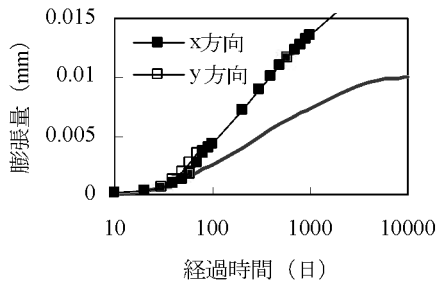


図-4 膨張量と経過時間の関係

の考察でも同じ定義で用いることにする。また、図-4中の実線は ASR リング要素に与えた膨張量と経過時間の関係を示している。

図-3に示すように、経過時間が100日程度までひび割れ発生箇所がx方向とy方向で対称にならない場合もあり、膨張量の増加に多少のずれはあるものの、その後はx方向とy方向で概ね一致する結果となり、ASR リング要素に与えた膨張量の約2倍になった。これは、本研究で提案したコンクリート要素の対称的な幾何学的形状を反映した結果であるといえる。

膨張量に大きな違いが観察されなかったため、ASR リング要素の弾性係数 E_r を $0.1 \times E_{c0}$ から $20 \times E_{c0}$ まで変化させた解析も行った。図-5に弾性係数 E_r と200日経過後の膨張量の関係を示す。これより、弾性係数 E_r が $0.3 \times E_{c0}$ 以上であれば膨張量にほとんど変化はなかったが、 $0.3 \times E_{c0}$ 以下になると膨張量の減少の程度が大きくなった。弾性係数 E_r が $0.1 \times E_{c0}$ と $0.3 \times E_{c0}$ の200日経過後の膨張量の差は約 0.002mm であり、ひずみに換算すると 100μ 程度である。

以上の解析結果より、ASR により生成されるアルカリシリカゲルの弾性係数は、ひび割れ発生時期に影響を与えるが、その後の膨張過程にはあまり大きく影響しないと考えられる。

3.2 コンクリートに占める粗骨材の割合の影響

円形の粗骨材の半径 r を3種類に変化させた場合のひび割れ図を経過時間とともに図-6に示す。ここに示す

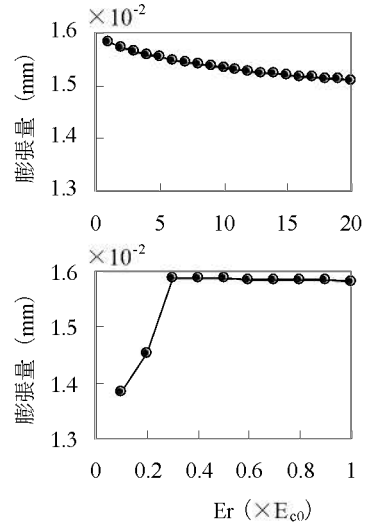


図-5 弾性係数 E_r と膨張量の関係

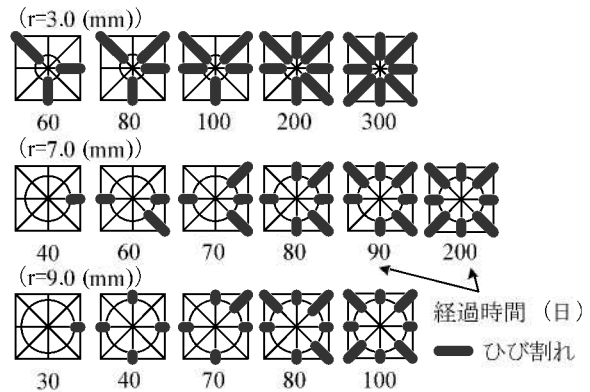
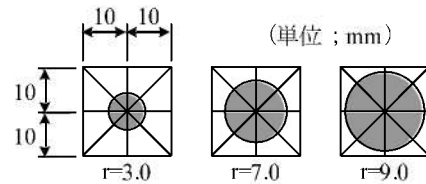


図-6 ひび割れ図

解析結果はすべて、 $E_r=1.0 \times E_{c0}$ として得られたものである。

コンクリートに占める粗骨材の割合が大きいほど、初ひび割れと最終ひび割れの発生時期が早くなった。本解析条件では、粗骨材の割合が大きいと ASR リング要素が長くなり、アルカリシリカゲルの生成量が多くなることを意味する。したがって、そのことと、粗骨材の膨張を拘束するモルタルマトリクスの割合が小さいことが等価であるため、粗骨材割合を大きいほど、ASR リング要素に与えた膨張量が小さくてもひび割れを生じさせるのに十分な膨張圧が生じたものと考えられる。また、粗骨材要素の半径が最小の $r=3.0$ (mm) の場合、他に比べて初ひび割れ本数が多く、ひび割れ発生順序が不規則になった。これは、モルタルひび割れ要素の最短長さに対する最長長さの比が1に近づき、モルタルひび割れを発生させるために必要な膨張圧に差異がなかったからで

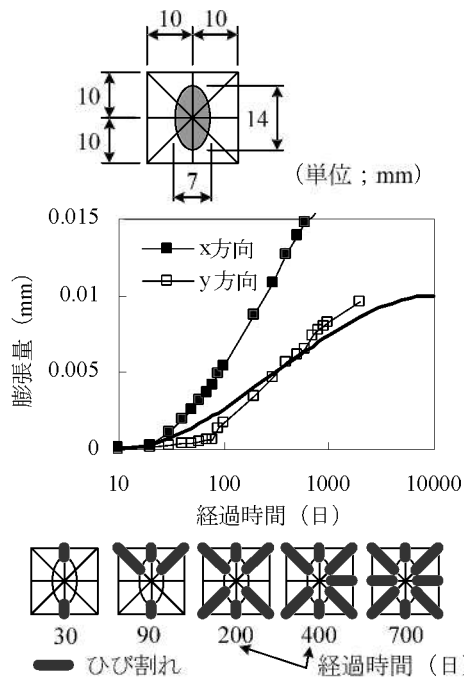


図-7 膨張量と経過時間の関係、ひび割れ図

あると考えられる。

以上より、ASRによるアルカリシリカゲルの生成量はひび割れ発生に影響を与え、ASR膨張の拘束に寄与するモルタルマトリクス部分が多いほど、ひび割れ発生時期が遅くなると考えられる。

3.3 粗骨材の形状の影響

粗骨材の形状を楕円形にした場合の膨張量と経過時間の関係をひび割れ図とともに図-7に示す。これは、 $E_r=1.0 \times E_{c0}$ として解析を実施した結果である。

円形の粗骨材の解析と同様に、最短長さのモルタルひび割れ要素からひび割れが発生した。しかし、円形の粗骨材の場合とは異なり膨張量に差が生じ、x方向の膨張量:y方向の膨張量はおおよそ2:1となり、楕円形粗骨材の短径:長径の逆数とモルタルひび割れ要素(6)と(8)の長さの比にほぼ等しくなった。これは、粗骨材が円形の場合と異なり、x方向とy方向の膨張を拘束する効果に差があったためであると考えられる。

3.4 コンクリート要素の数の影響

コンクリート要素を2x2に配置した場合について、膨張量と経過時間の関係をひび割れ図とともに図-8に示す。ここで、粗骨材要素は円形で、各コンクリート要素が接触する部分のモルタルマトリクス要素間には、モルタルひび割れ要素をあらかじめ配置してある。また、 $E_r=1.0 \times E_{c0}$ として解析を実施した。

膨張量は、x方向、y方向ともにほぼ同じになり、ASRリング要素の膨張量の約4倍になった。これは、コンクリート要素の対称的な形状と配置、粗骨材が円形であることが要因であると考えられる。また、ひび割れ図より、

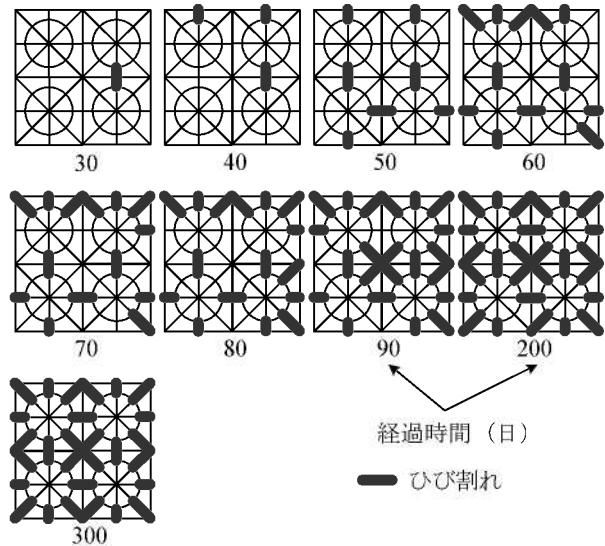
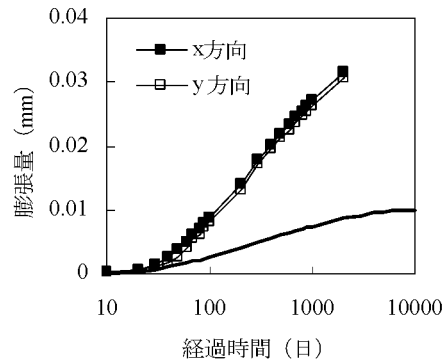


図-8 膨張量と経過時間の関係、ひび割れ図

これまで検討したケースと同様、モルタルひび割れ要素が最短長さのものからひび割れが発生した。さらに、コンクリート要素集合体の外縁から、徐々に内部にひび割れが進展していく傾向が観察された。

次に、コンクリート要素を2x4に配置した場合について、コンクリート要素の番号とともに、膨張量と経過時間の関係を図-9に示す。また、表-3に、各コンクリート要素[1]から[8]について初ひび割れと最終ひび割れの発生時期を示す。ここでは、 $E_r=1.0 \times E_{c0}$ として解析を行った。

表-3について、最も内部にあるコンクリート要素[1]が、初ひび割れ、最終ひび割れともに発生時期が遅くなる傾向が見られた。また、初ひび割れ発生時期に関しては、これまでの解析結果と同様、コンクリート要素集合体の外縁のコンクリート要素[4]、[6]、[7]、[8]からひび割れが発生した。本解析ではコンクリート要素を複数にすることにより、ひび割れの発生、進展に伴って各ひび割れが干渉し合い、発生順序が不規則になった。これは実際とは異なり、粗骨材の位置が規則的に並んでいることが影響した可能性がある。

図-9から、x方向とy方向の膨張量に差が生じ、各膨張量の比はおおよそ2:1となった。これは、コンクリ

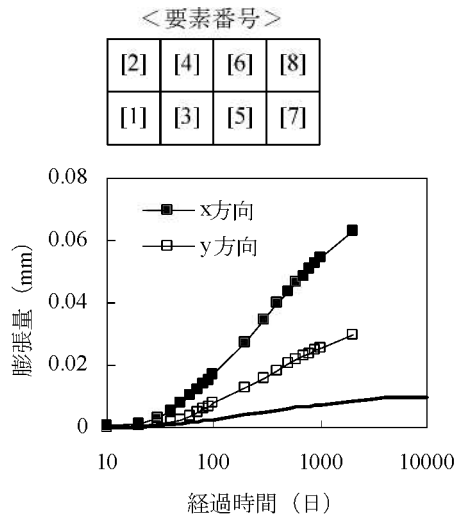


図-9 膨張量と経過時間の関係

表-3 ひび割れ発生時期

番号	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
初	50	40	30	30	40	30	30	30
最終	400	300	300	400	200	400	200	400

(単位；日)

ート要素集合体の x 方向と y 方向の長さを反映した結果であることから、断面寸法に比例して膨張量が大きくなることを示唆していると考えられる。また、ASR リング要素に導入した膨張量に対して、コンクリート要素集合体の x 方向の膨張量は約 8 倍、y 方向の膨張量は約 4 倍になった。このように、断面が正方形以外の形状であれば、断面寸法の違いによって膨張量に差が生じることから、ASR 劣化したコンクリート構造物の補修・補強を行う場合には、コンクリート断面の寸法と、ASR 膨張を拘束する補強の程度と方向に留意すべきであろう。

4. 結論

本研究から得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 粗骨材とモルタルマトリクス要素で構成されるメソスケール・コンクリート要素を開発した。すべての要素間に接触要素をあらかじめ配置することにより、ASR 膨張とそれに伴うひび割れ発生および進展を表現することができた。

- (2) ASR リング要素の弾性係数を変化させた解析を行った結果、アルカリシリカゲルの弾性係数は、ひび割れ発生時期に影響を与えるが、その後の膨張過程に与える影響は少ないと考えられる。
- (3) コンクリートに占める粗骨材の割合を変化させた解析を行った結果、アルカリシリカゲルの生成量の多少がひび割れ発生に影響を与えること、コンクリートに占めるモルタルマトリクス部分が多いほど ASR 膨張の拘束に寄与し、ひび割れ発生時期を遅らせる可能性があることを示唆した。
- (4) 粗骨材の形状を変化させた解析を行った結果、ASR 膨張を拘束する程度により、膨張量に差が生じることが示唆された。
- (5) コンクリート要素の数を変化させた解析を行った結果、コンクリート断面の寸法が膨張量に影響を与え、断面寸法が大きいほど膨張量も大きくなった。

本研究は、提案したメソスケール・コンクリート要素を用いて、ASR 膨張過程を解析的にシミュレーションしたものである。今後は、ASR 膨張に寄与すると考えられるアルカリシリカゲルの膨張圧などの特性を把握する実験を実施し、その結果を反映させた解析を行っていききたい。そして、ASR 膨張のメカニズムを物理的に明らかにしていきたい。

謝辞

本解析の実施には、立命館大学院生の武田裕之氏の多大なる協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 三橋博三：破壊力学と鉄筋コンクリート構造，コンクリート工学，Vol.34，No.5，1996.5
- 2) 藤井洋介，山村 智，葛目和宏，水田真紀，岡本享久，児島孝之：部材寸法が ASR による膨張に及ぼす影響に関する実験的研究，平成 20 年土木学会全国大会第 63 回年次学術講演会講演概要集，2008.9
- 3) 松尾真紀，日比野憲太，高木宣章，児島孝之：コンクリートのひび割れを表現する離散モデルとその基本的特性，土木学会論文集，No.655/V-48，pp.1-12，2000