

論文 鉄筋破断が ASR によるひび割れ進展挙動に及ぼす影響評価

上田 尚史^{*1}・中村 光^{*2}・国枝 稔^{*3}

要旨：ASR 膨張解析により、コンクリートに生じるひび割れの検討を行った。鉄筋破断等により、拘束が解放された後の挙動を評価可能な ASR 膨張モデルを構築し、鉄筋破断がひび割れ進展挙動に及ぼす影響を検討した。その結果、鉄筋破断により、表面ひび割れ幅が増大するとともに、ひび割れの局所化が生じることを示した。また、本研究で提案した ASR 膨張モデルは、ASR 劣化した構造物の表面や内部のひび割れを評価する上で有用であることを示した。

キーワード：ASR, 鉄筋破断, ひび割れ進展解析, 水分移動解析

1. はじめに

アルカリシリカ反応（以下、ASR）を生じたコンクリートは、アルカリシリカゲルの吸水膨張により多数のひび割れが生じることが知られている。一方で、ASR を生じたコンクリート構造物においては、膨張量の空間的な差異に起因した内部拘束の影響により、表面に幅の大きなひび割れが生じる。これらのひび割れは、数 mm オーダーのものもあり¹⁾、構造物の耐久性の急激な低下を引き起こす要因となりうると考えられる。

一方、ASR は鉄筋等の拘束の影響により、膨張が大きく抑制される。その結果、外見上著しくひび割れが生じている場合であっても、ひび割れの深さは鉄筋のかぶり程度で留まっているという報告がある¹⁾。しかし、近年では ASR 劣化した実構造物において内部の鉄筋が破断する事例もあり¹⁾、鉄筋破断によって膨張抑制効果が低下することで、ひび割れが構造物の内部まで進展することが考えられる。表面のひび割れが、どの程度の深さまで進展しているのかを、鉄筋破断の影響も含めて評価することができれば、ASR 劣化した構造物の補修・補強や維持管理において有益な情報となると考えられる。

そこで本研究では、ASR 膨張解析を行うことで、コンクリートのひび割れの発生ならびに進展挙動を、鉄筋破断の影響も含めて評価すること試みた。なお、著者らが

これまでに提案している ASR 膨張モデル²⁾では、鉄筋破断等による拘束力の解放が生じた際の挙動を十分に評価できない。本研究では、鉄筋破断後の挙動までを評価可能な ASR 膨張モデルを構築し、鉄筋破断がひび割れ進展挙動に及ぼす影響について検討した。

2. 解析概要

2.1 ASR 膨張モデルの修正

(1) 修正 ASR 膨張モデルのコンセプト

著者らは、これまでに鉄筋等による拘束下の ASR 膨張挙動を評価可能な ASR 膨張モデルを提案している²⁾。このモデルは、図-1(a)に示すようにコンクリートと鉄筋（拘束体）の並列ばね系の力学モデルを考え、コンクリートのばねに対して損傷理論に基づいた割線型の構成モデルを適用することにより構築したものである。本モデルは、RC、PC に関わらず、また、供試体レベルから実構造物レベルに対して、適用性があることが示されている³⁾。一方、割線型の構成モデルであるため、鉄筋の破断等により拘束力が解放された後は、弾力的な除荷挙動により塑性変形が生じないという問題があった。

そこで本研究では、図-1(b)に示すように、並列ばね系のコンクリートばねに対して変形のみを許容する塑性スライダーを追加することで、新たな ASR 膨張モデル

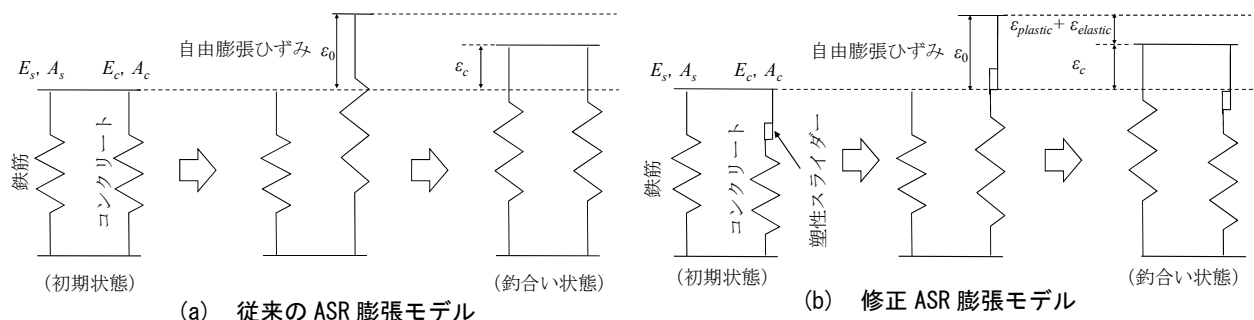


図-1 並列ばね系による力学モデル

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博(工) (正会員)

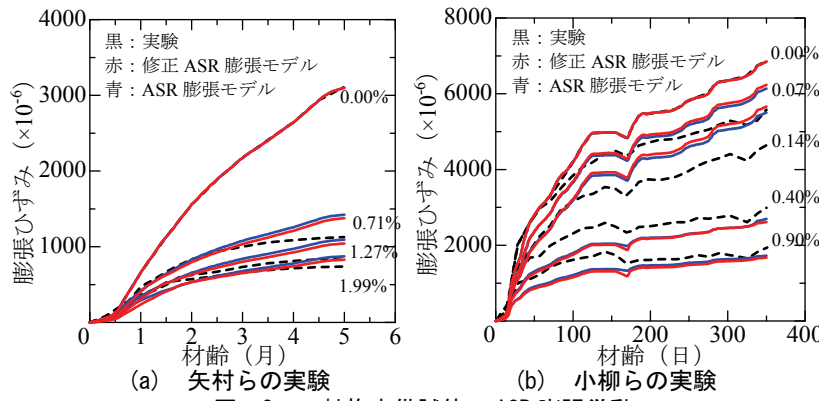


図-2 一軸拘束供試体の ASR 膨張挙動

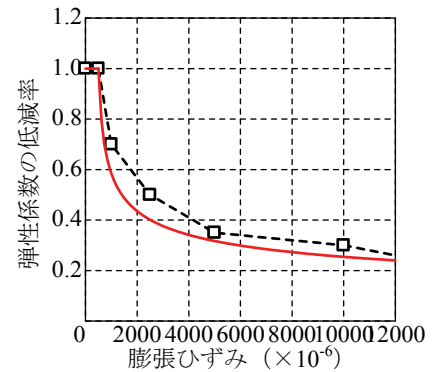


図-3 ASR 膨張に伴う圧縮強度の低下

(以後、修正 ASR 膨張モデル)の構築を試みた。ここで、コンクリートの応力 σ_c は、次式により求められる。

$$\sigma_c = \mu \cdot E_c \cdot \varepsilon_{elastic} = \mu \cdot E_c \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_{plastic} - \varepsilon_0) \quad (1)$$

ここで、 E はコンクリートの弾性係数、 ε_c 、 $\varepsilon_{elastic}$ 、 $\varepsilon_{plastic}$ 、 ε_0 はそれぞれ、コンクリートの全ひずみ (膨張ひずみ)、弾性ひずみ、塑性ひずみ、自由膨張ひずみである。また μ は、コンクリートの膨張に伴う弾性係数の低下を表す係数であり、不可逆性であると仮定した。なお、ASR を生じたコンクリートの時間依存挙動として、クリープや収縮等が考えられるが、本研究ではそれらの影響を全て含んだものを塑性ひずみとして評価することとした。

(2) 既往の実験結果の再整理と修正 ASR 膨張モデルの構築

修正 ASR モデルにおいては、弾性係数の低下 μ と塑性ひずみ $\varepsilon_{plastic}$ を妥当に評価することが肝要である。本研究では、図-2 に示す矢村ら⁴⁾および小柳ら⁵⁾の一軸拘束供試体の ASR 膨張試験結果を再整理することで、ASR 膨張モデルの検討を行った。矢村らの実験は、拘束鋼材比が比較的大きく (0.71%, 1.27%, 1.99%), 自由膨張ひずみが比較的小さい (3000 μ 程度) ケースであり、小柳らの実験は拘束鋼材比が比較的小さく (0.07%, 0.14%, 0.40%, 0.90%), 自由膨張ひずみが比較的大きい (7000 μ) である。

実験結果を再整理するにあたり、以下のことがらを仮定した。1) コンクリートの弾性係数は、ASR 劣化したコンクリートの強度試験から得られる弾性係数の低下と同程度とする。2) 任意の応力状態における除荷剛性は、その時点における弾性係数と等しいとする。3) 塑性ひずみは、コンクリートの膨張ひずみと自由膨張ひずみの差の関数とする。なお、ASR 劣化したコンクリートの弾性係数は、既往の知見¹⁾を参考にして、図-3 に示す曲線により低下することとした。ここで、図中の曲線は次式で表される。

$$\mu = \left(\frac{1}{1 + 10000 \cdot (\varepsilon_c - 0.0005)} \right)^{0.3} \quad (2)$$

図-4 に矢村らおよび小柳らの実験結果を基に算出した塑性ひずみを示す。なお、図において、横軸はコンクリートの膨張ひずみと自由膨張ひずみの差 ($\varepsilon_c - \varepsilon_0$) であり、圧縮を正としている。図より、塑性ひずみは、全ひずみと自由膨張ひずみの差とほぼ等しく、線形関係にあることがわかる。これは、コンクリートに作用する圧縮応力がそれほど大きくはなく (2~3N/mm² 程度)、塑性ひずみに対して弾性ひずみが小さいためである。この傾向は弾性係数の低下の程度を式(2)から変化させた場合においてもほとんど変化せず、矢村らおよび小柳らの実験において、比例定数は概ね 0.93~0.98 であった。以上のことから、塑性ひずみ $\varepsilon_{plastic}$ は、次式により得られることとした。

$$\varepsilon_{plastic} = \lambda \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_0) \quad (3)$$

ここで、 λ は比例定数であり、本研究では実験結果を参考に $\lambda=0.95$ とした。ただし、 $\varepsilon_{plastic}$ は 0 以下でありかつ不可逆であると仮定した。

(3) 一軸拘束供試体の膨張挙動評価に対する修正 ASR 膨張モデルの妥当性

矢村らおよび小柳らの実験を対象として修正 ASR 膨張モデルの妥当性について検証した。解析は、図-1 に示す並列ばねに対して ASR 膨張モデルを適用し、実験で得られた自由膨張ひずみを与えることで行った。図-2 に、解析より得られた一軸拘束供試体の ASR 膨張挙動を実験値と併せて示す。図中には、従来の ASR 膨張モデルを用いた場合の結果を併記している。図より、矢村ら、小柳らのいずれの実験に対しても、従来の膨張モデルと同程度の精度で膨張挙動を評価できていることがわかる。このことから、修正 ASR 膨張モデルは鉄筋等の拘束下の ASR 膨張を妥当に評価できるモデルであるといえる。

(4) 拘束力解放後の ASR 膨張挙動の評価

ASR 膨張により鉄筋破断が生じ、鉄筋による拘束が解放された後の膨張挙動を数値解析的に検討した。前節で対象とした矢村らの一軸拘束供試体のうち、拘束鋼材比 1.99% のケースを対象として、暴露 3 か月目において拘束鋼材が破断する場合を想定する。

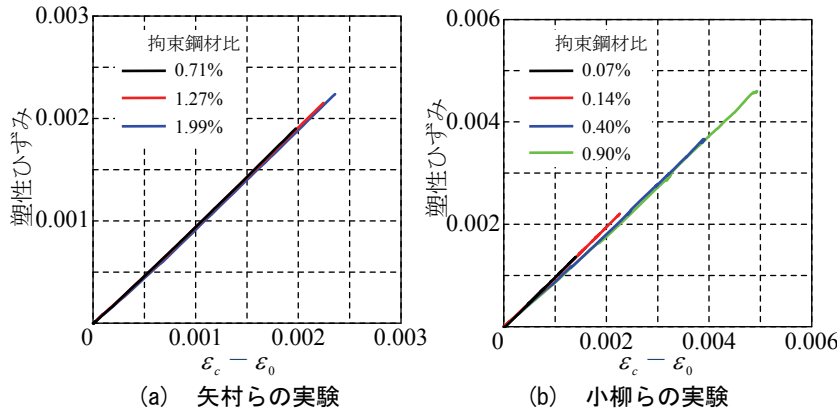


図-4 塑性ひずみの算定結果

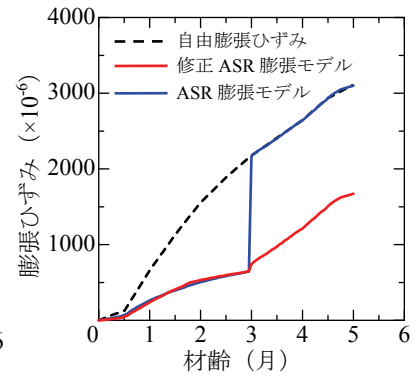


図-5 拘束力解放後の膨張挙動

図-5 に、膨張ひずみの経時変化を示す。図より、拘束鋼材の破断前後で膨張挙動が異なり、破断後の膨張ひずみの増加傾向は自由膨張ひずみと同様となることを確認できる。これは、拘束鋼材の破断により膨張に対する拘束力が喪失したため、それ以後は自由膨張ひずみに従い膨張するためである。図中には、従来の ASR 膨張モデルで同様の解析を行った際の結果を併記するが、破断後に膨張ひずみは自由膨張ひずみと等しくなり、破断以前の膨張抑制効果が失われる結果となっている。なお、拘束が解放された直後にコンクリートが膨張するといった報告⁶⁾もあることから、今後さらなるデータの蓄積により、拘束が解放された際の挙動の解明が望まれる。

(5) 3次元有限要素法への適用

修正 ASR 膨張モデルの3次元有限要素法への適用方法は、従来の ASR 膨張モデルと同様の手順²⁾で行った。具体的には、ASR 膨張は体積膨張であることから、主軸3方向に対して、修正 ASR 膨張モデルを独立に考慮することとした。すなわち、拘束の程度が3次的に異なる場合においては、それぞれの拘束の程度に応じて、膨張ひずみや弾性係数の低下の程度が異なることとなる。

一方、内部拘束等によりコンクリートの弾性ひずみが正となる場合は、従来の ASR 膨張モデルとは異なるモデルを仮定した。修正 ASR 膨張モデルでは、引張強度までは弾性挙動を示し、引張強度以降は、破壊エネルギーを考慮した 1/4 モデルに従い応力が低下するモデルを仮定した。なお、ASR 劣化による引張強度や破壊エネルギーの変化は、弾性係数の低下の程度と同様であるとした。これにより、ひび割れ発生ひずみや終局ひずみは、ASR 劣化により変化しないものとなる。

2.2 湿気状態の影響を考慮した ASR 膨張⁷⁾

(1) 水分移動解析による相対含水率の評価

コンクリートの相対湿度は相対含水率と等しいものと仮定し、水分移動解析として次式に示す非定常の拡散方程式を解くことにより相対含水率を求めた。

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla R) \quad (4)$$

ここで、 R は相対含水率、 D は水分伝導率、 ∇ は微分演算子である。式(4)は次の境界条件のもとに解くことができる。

$$\frac{\partial R}{\partial n} + \alpha(H - H_\infty) = 0 \quad (5)$$

ここに、 α は水分伝達率、 n は乾燥面の法線ベクトル、 H 、 H_∞ はそれぞれ乾燥面および雰囲気相の相対湿度 (= 相対含水率) である。また、水分伝導率 D は、次式⁸⁾により相対含水率依存性を考慮した。

$$D/D_1 = 1/\{22(1 - R/100) + 1\}^{1.4} \quad (6)$$

ここに、 D_1 は初期水分伝導率である。なお、ASR 劣化したコンクリートでは水分伝導率が変化することが考えられるが、本研究では、健全なコンクリートと同様であると仮定した。

本研究では、式(4)、(5)を差分法により時間に関して離散化し、陰解法により解を求めた。

(2) 自由膨張ひずみの相対含水率依存性

既往の研究⁹⁾より、ASR 膨張はコンクリートの相対湿度が高いほど大きくなり、相対湿度が 80% を下回ると膨張は生じないことが確認されている。本研究では、拡散解析から得られた相対含水率 R を用いて、次式に示す低減係数 μ を乗ずることにより、自由膨張ひずみ $\varepsilon_0(t)$ の低減を行った。

$$\varepsilon_0(t) = \varepsilon_{0n} = \sum_n \mu_n \cdot \Delta \varepsilon_{0n} \quad (7)$$

ここに、下添え字の n はステップを表している。 μ は相対含水率 100% で 1.0、80% で 0.0 とし、線形補完した。ただし、相対含水率 80% 以下では μ は 0.0 とした。また、 $\Delta \varepsilon_{0n}$ は相対含水率 100% における自由膨張ひずみ増分である。

解析では、まず式(4)の拡散方程式を解くことでコンクリートの相対含水率分布を求め、得られた相対含水率か

ら式(7)を用いて自由膨張ひずみの大きさを算定し、ASR膨張解析を行う。なお、本モデルでは、一度乾燥した後、に再び湿潤状態下におかれた際の再膨張は表現できない。

3. ASR 膨張解析によるひび割れ進展挙動評価

3.1 解析対象および解析モデル

解析対象は、 $2000 \times 2000 \text{ mm}$ の断面を有し、せん断補強筋として D19 の閉合スターラップ（曲げ内半径は 1ϕ （ ϕ は鉄筋直径））が 150 mm 間隔で配置されている、仮想的な RC はり部材である。解析モデルを図-6 に示す。断面の対称性を考慮して $1/4$ 断面（ $1000 \times 1000 \text{ mm}$ ）のみをモデル化し、また軸方向 150 mm の領域を解析領域とした。要素寸法 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ の立方体要素で要素分割した。せん断補強筋は、ファイバーモデルを考慮したはり要素により離散的にモデル化²⁾し、リンク要素によりコンクリートとの付着を考慮した¹⁰⁾。せん断補強筋の曲げ加工部は、図-6 に示すように、長さ 0.3 mm 程度の要素を用いて曲線形状を近似するようにモデル化した。ただし、曲がりはりとしての挙動は評価できないことに注意が必要である。境界条件は、対称面の法線方向の変位を固定し、断面軸方向の変位を完全拘束することで、平面ひずみ問題とした。コンクリートの弾性係数、引張強度は、それぞれ 25 kN/mm^2 、 2.0 N/mm^2 とした。破壊エネルギーは 90 N/m を仮定し、等価長さは要素の体積の 3 乗根とした。鉄筋の弾性係数、降伏強度は、それぞれ 200 kN/mm^2 、 345 N/mm^2 とした。

水分移動解析ならびに ASR 膨張解析は、解析時間を 2000 日間として行った。水分移動解析におけるパラメータは、構造物内部の湿度分布の違いが顕著に表れるように、初期水分伝導率 D_i を $5.0 \times 10^2 \text{ mm}^2/\text{day}$ 、水分伝達率 α を 3.8 mm/day とした。これらは、普通コンクリートと比較して、初期水分伝導率は大きく、水分伝達率は小さい値である⁸⁾。水分移動解析の境界条件は、上面と側面を水分伝達境界とし、初期湿度を 100% 、外気の湿度を 80% と仮定することで、断面内で膨張差が生じるようにした。ASR 膨張解析では、過大な ASR が生じるコンクリートを用いた場合の内部ひび割れ性状等を評価することを目的として、相対含水率 100% の状態における自由膨張ひずみ増分 $\Delta \epsilon_0$ を $5 \mu/\text{day}$ （最終的な自由膨張ひずみ 10000μ ）と仮定し、全てのガウス点に一樣に与えた。

3.2 解析結果と考察

図-7 に、水分移動解析の結果得られた断面内の湿度分布の経時変化を示す。上面ならびに側面から水分が逸散することで、曲げ加工部付近の隅角部の湿度が早期に低下することが確認できる。最終的に湿度 80% まで低下する領域は、隅角部ではせん断補強筋の内側の領域が、上面ならびに側面では深さ 50 mm 程度の領域である。

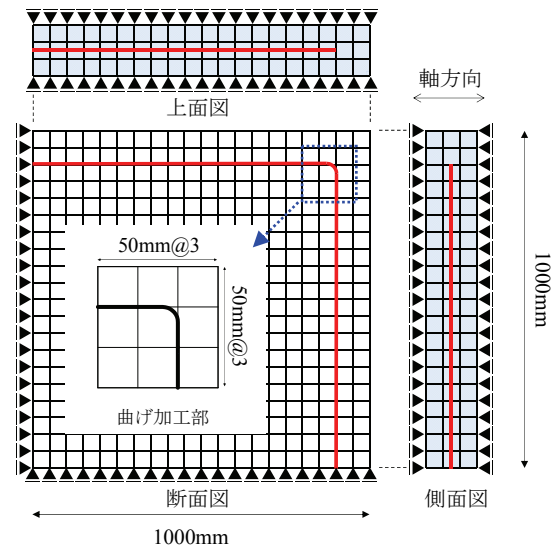


図-6 解析モデル

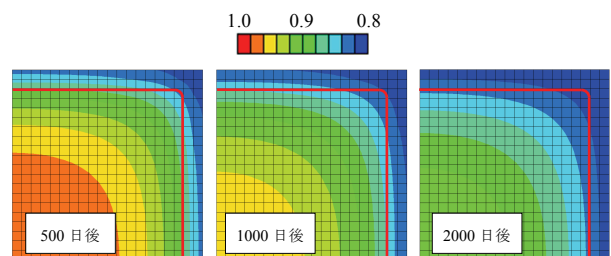


図-7 湿度分布の経時変化

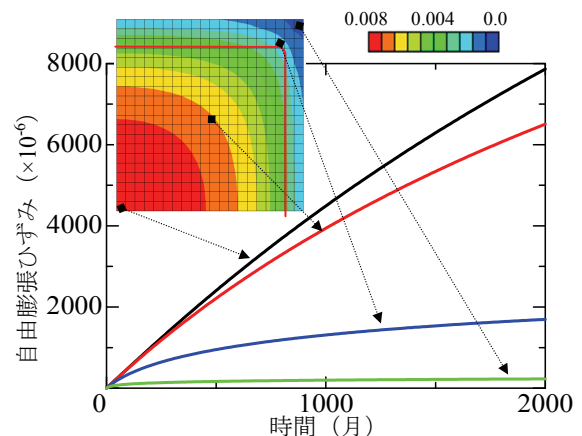


図-8 各点の自由膨張ひずみの経時変化

図-8 に、 2000 日後の断面内の自由膨張ひずみの分布と、断面内の異なる 4 点での自由膨張ひずみの経時変化を示す。湿度分布解析の結果から推定できるように、自由膨張ひずみは断面中央部から外側へ向かうにつれて、小さくなっており、また、外側であるほど自由膨張ひずみの増分は小さくなっている。

図-9 に主ひずみ分布の経時変化を示す。 1000 日後では断面内部と表面の局所的な領域において膨張が大きいものに対して、 1500 日後ではせん断補強筋の内側において、局所的な引張ひずみが生じていることがわかる。このひずみの局所化は、 2000 日後においても生じている。

図-10 にせん断補強筋の内側最外縁位置のひずみの分布を示す。図より、1000 日後には曲げ加工部において降伏ひずみ(1725μ)を超えるひずみが生じていることがわかる。1500 日後以降も曲げ加工部のみがひずみが増大する傾向となっている。これは、断面内部における膨張が大きいことで、せん断補強筋が大きく曲げ戻された結果であると考えられる。

図-11 に、ひび割れ性状図を示す。ここでは、主引張ひずみ分布に対して、引張応力に関するひずみに等価長さを乗じることでひび割れ幅を算定し、ひび割れ幅が 0.1mm 以上のもののみを示している。図より、1000 日後において、上面(側面)に表面ひび割れが生じていることがわかる。ただし、これらの表面ひび割れは内部へ進展することはない、曲げ加工部近傍に新たに生じた表面ひび割れが内部へと進展していることが確認できる。この内部のひび割れは、せん断補強筋の内側において鉄筋に沿って進展しており、ひび割れ幅は、表面ひび割れよりも大きくなっている。このようなひび割れは、せん断補強筋の付着の低下を引き起こし、構造物の安全性に影響を及ぼすことが考えられるため、早期に検知されなければならないと考えられる。一方で、解析の結果から、表面から検知することが困難なひび割れであるといえる。

3.3 鉄筋破断がひび割れ性状に及ぼす影響

鉄筋の破断により、ひび割れ性状がどのように変化するかを検討するため、鉄筋破断を模擬した解析を行った。前述のように、鉄筋の曲げ加工部において、ひずみが卓越する挙動が得られていることから、曲げ加工部のひずみが 10000μ に達した時点(およそ 1300 日後)で当該位置の鉄筋が破断するものと仮定した。また、あらかじめ鉄筋を切断した状態でモデル化した解析も行った。

図-12 に鉄筋破断を考慮した際のひび割れ性状を示す。図より、ひび割れ幅の大きさが大きくなっており、より顕著な損傷となっていることが確認できる。ひび割れ深さも、鉄筋破断によりさらに深くなっていることが確認できる。図-13 に、表面ひび割れ幅の経時変化を示す。鉄筋破断が生じる 1300 日までは、ひび割れの進展挙動は同じであるが、鉄筋破断後は曲げ加工部に近い位置のひび割れ幅は拡大するのに対して、その他のひび割れは閉じる挙動を示した。これは、鉄筋破断により、局所的な変形・損傷が生じたためであると推察される。

図-14 に鉄筋を初期から切断してモデル化した場合のひび割れ性状を示す。図より、鉄筋切断位置において、局所的なひび割れが生じており、時間とともにそのひび割れが拡大する挙動となっているといえる。内部ひび割れの進展の方向は、破断位置から断面中心に向かっており、鉄筋破断を生じない場合と異なったひび割れ性状となっている。また、表面ひび割れもほとんど生じておら

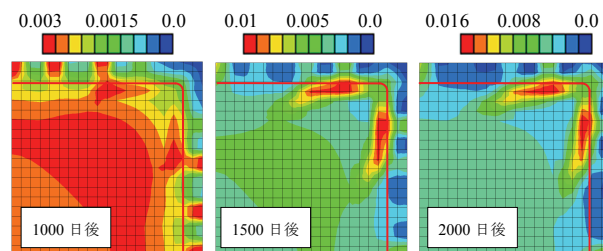


図-9 主ひずみ分布の経時変化

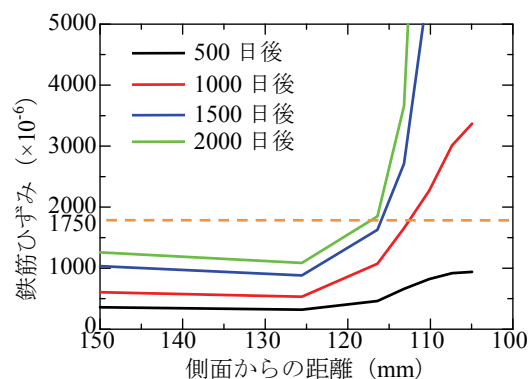


図-10 曲げ加工部の鉄筋内側のひずみ

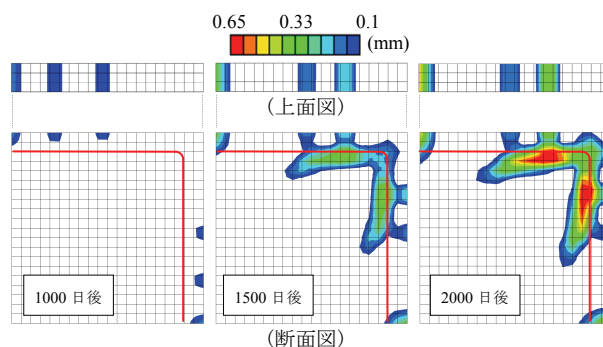


図-11 ひび割れ性状の経時変化

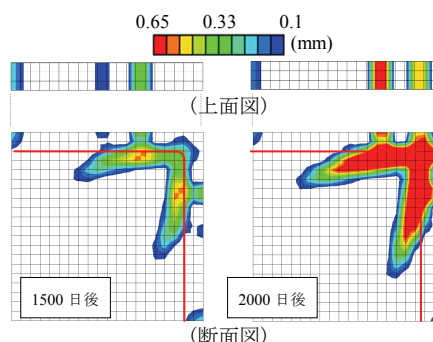


図-12 鉄筋破断後のひび割れ性状

ず、図-13 より曲げ加工部近傍の 1 つのひび割れのみが開く傾向となっていることがわかる。

4. 結論

本研究の結論を以下に示す。

- (1) 鉄筋破断後の ASR 膨張挙動を評価可能な膨張モデルとして、塑性ひずみを考慮したモデルを提案した。また、一軸拘束試験体を対象とした解析によりモデ

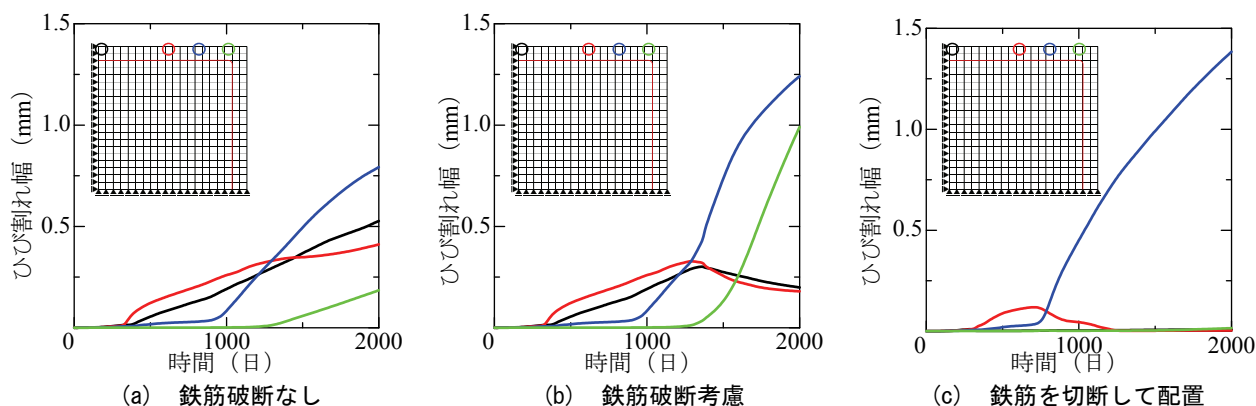


図-13 表面ひび割れ幅の経時変化

ルの妥当性を示した。

- (2) 提案したモデルを用いて、鉄筋破断後の ASR によるひび割れ性状を検討した。その結果、鉄筋破断により、表面ひび割れ幅が増大するとともに、ひび割れの局所化が生じることを示した。
- (3) 本研究で対象とした湿度条件（ASR 膨張条件）においては、表面ひび割れ幅よりも大きなひび割れが構造物の内部に生じる可能性があることを示した。また、膨張初期から鉄筋を切断させた場合には、ひび割れの発生や進展の挙動が鉄筋が健全な場合と異なることを示した。
- (4) 本解析手法を用いれば、内部のひび割れ性状を把握できることを示した。したがって、本解析手法は ASR 劣化した構造物の表面や内部のひび割れを評価する上で有用である。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省建設技術研究開発助成制度「政策課題解決型技術開発公募」の研究課題「ASR 劣化構造物の力学性能推定技術の確立（研究代表者：宮川豊章）」の研究助成を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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 E，Vol.63，No.4，pp.532-548，2007.
- 3) 上田尚史，中村光，国枝稔，前野裕文，森下宣明，浅井洋：コンクリート構造物における ASR 損傷と損傷後の構造性能の評価，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.67，No.1，pp.28-47，2011.
- 4) 矢村潔，西村新蔵，田中修一：鉄筋拘束がアルカリ

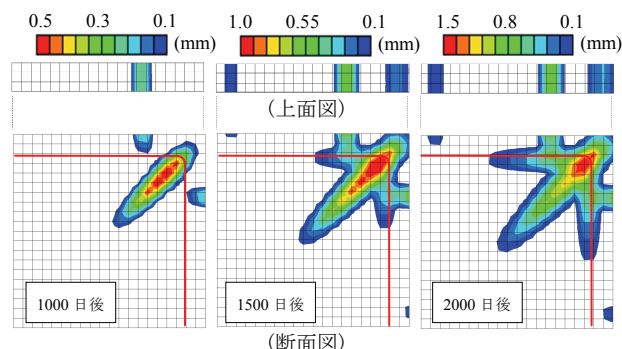


図-14 鉄筋を切断している場合のひび割れ性状

骨材反応に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.11，No.1，pp.135-140，1989.

- 5) 小柳洽，内田裕市，岩永武士，浅野幸男：低鉄筋比の RC 部材における ASR の膨張拘束に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.52，pp.786-791，1998.
 - 6) 鳥居和之，奥山和俊，大橋勇気，蔡云峰：ASR 劣化大型 RC 試験体による強度および膨張性状の検討，セメント・コンクリート，No.58，pp.353-358，2004.
 - 7) 上田尚史，中村光，国枝稔：湿気状態の影響を考慮した PC 橋脚の ASR 膨張性状評価，第 21 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，Vol.21，pp.69-74，2012.
 - 8) 秋田宏，藤原忠司，小西俊之，尾坂芳夫：コンクリート中の水分移動における水分伝導率の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.12，No.1，pp.161-166，1990.
 - 9) 鍵本広之，川村満紀：大型コンクリート円柱内部における湿度およびひずみの測定による ASR 表面ひび割れ発生過程の解明，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1225-1230，2009.
- 澤部純浩，上田尚史，中村光，国枝稔：せん断補強筋に定着不良が生じた RC はりのせん断破壊挙動解析，土木学会論文集，Vol.62，No.2，pp.444-461，2006.