

# 論文 内部ひび割れを可視化するための新手法の提案

岡崎 慎一郎\*1・車谷 麻緒\*2・氏家 勲\*3・高本 直樹\*4

**要旨**：引張の作用を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートには、内部ひび割れが導入される。この内部ひび割れの存在が物質移動抵抗性を低下させることは周知の事実ではあるが、載荷中で開口状態にある RC 部材の内部ひび割れを観察するのは不可能であるため、ひび割れ発生性状および開口幅が物質移動抵抗性に与える影響を関連づけることは困難であった。本研究は、実験的に観察することは困難であった内部ひび割れの進展を、RC 部材の鋼材の一部をむき出しにするという手法によって再現することを試みたものである。提案する試験体での内部ひび割れ発生性状を、数値解析により検証し、妥当性を確認することができた。

**キーワード**：内部ひび割れ、一軸引張試験、数値解析

## 1. はじめに

後藤ら<sup>1)</sup>は RC 試験体の鉄筋近傍に赤インク入りのチューブを沿わせる工夫により、引張載荷後に内部ひび割れが導入されると、チューブの亀裂に伴う内部ひび割れへのインク浸透により、鉄筋近傍の内部ひび割れ位置を痕跡として残すことで内部ひび割れの発生性状をはじめて可視化することに成功した(図-1)。この業績により鉄筋近傍の内部ひび割れは、しばしば Goto Crack と呼ばれている。内部ひび割れは使用状態にある RC 部材において、死荷重や収縮応力の影響などにより導入され、コンクリート表面からは決して確認することのできないものである。RC 構造物の適切な維持管理や寿命予測においては、内部ひび割れの存在がコンクリートの物質移動抵抗性に影響を与えることはよく知られてはいるものの、その影響度については、定量化されてはいない。

この理由の1つとして、上述の方法では、ひび割れの位置に関する情報は取得できるものの、除荷後閉塞状態での内部ひび割れ位置を確認しているため、かぶりの物質移動抵抗性を支配する、内部ひび割れの幅の情報は取得できないことが挙げられる。載荷中で開口状態にある RC 部材の内部ひび割れを観察するのは不可能であるため、ひび割れ発生性状および開口幅が物質移動抵抗性に与える影響を関連づけることは困難であった。

大塚ら<sup>2)</sup>は引張作用を受ける RC 試験体のひび割れ内部を X線造影により透視することによって確認している。本手法により、直接可視できないひび割れの発生様相を把握することが可能となつてはいるものの、ひび割れ部分の明確な判別が困難であり、内部ひび割れ幅の情報について正確には取得できなかった。

以上の背景を踏まえて本研究では、内部ひび割れを直

接可視する手法の確立に主眼を置き、鉄筋をできる限りコンクリート表層に配置させることにより、引張載荷中においてコンクリート表層に内部ひび割れを露出させることにより、ひび割れの位置のみならず、ひび割れ幅の情報を直接取得できることを目指すものである。また、提案する試験体および通常の一軸引張試験体での内部ひび割れ発生性状の相違を数値解析により検証する。

本手法の妥当性が確認されれば、ひび割れ露出面を透明樹脂等適切な処理を施すことによって、内部ひび割れの様態を直接確認把握しつつ、例えば透気性の変化が追跡できたり、塩分の供給により鉄筋腐食の様相をも追跡できたりするため、各種物質移動抵抗性と、内部ひび割れの位置および幅の情報を関連付けることができ、RC 構造の耐久性評価の高精度化に資する知見が多く得られることが期待できる。

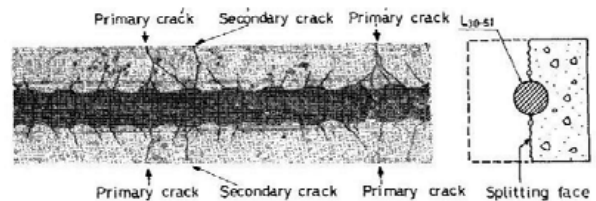


図-1 内部ひび割れ分布<sup>1)</sup>

## 2. 実験的検討

### 2.1 引張載荷試験装置の概要

本章では、RC 部材に発生する内部ひび割れを、試験体表面に露出させることによって、直接的に目視することで内部ひび割れの可視化を目指すものである。試験体の説明の前に引張載荷試験について説明を行う。

引張載荷試験装置を図-2に示す。H鋼を組み合わせ

\*1 独立行政法人 港湾空港技術研究所 構造研究領域 研究員 博(工) (正会員)

\*2 茨城大学 工学部 都市システム工学科 講師 博(工)

\*3 愛媛大学大学院 理工学研究科 生産環境工学専攻 教授 博(工) (正会員)

\*4 愛媛大学大学院 理工学研究科 生産環境工学専攻 大学院生 (学生会員)

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	空気量 (%)	スランブ (cm)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				AE 減水剤 (%)
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
50	3.5	7	50	175	350	825	922	1.2

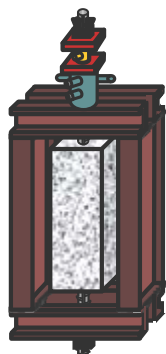


図-2 両引張載荷試験装置

て作製した鉄筋引張用反力フレーム(92cm×40cm×15cm)の、フレーム梁部分中央に空けた穴に鉄筋を通し試験体を設置した。一方の鉄筋にセンターホールジャッキを設置し、その上にセンターホール式のロードセルを載荷した。ロードセルの上と反力フレームの下から出ている鋼材に異形鉄筋用チャックを取り付け、センターホールジャッキによる載荷を行えるようにした。

## 2.2 試験体の使用材料およびコンクリートの配合・養生

本研究に使用した鉄筋は、本研究においてはすべてSD295-D25の異形鉄筋である。コンクリートの製作において、セメントには普通ポルトランドセメントを、細骨材には愛媛県東温市山之内産砂岩コンクリート用砕砂(表乾密度 2.55g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.65%, 粗粒率 2.8)を、粗骨材には愛媛県東温市山之内産砂岩コンクリート用碎石(表乾密度 2.61g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.80%)を使用した。コンクリートの示方配合を表-1に示す。

型枠に任意の位置に鉄筋を配置し、コンクリートを打設した。本研究で提案する試験体では、試験体を湿布で巻包し、それをさらにフィルムシートにて巻包することで十分な養生を施し、湿潤状態を28日間保持した。なお、同一養生を施された円柱供試体の一軸圧縮強度は45.4N/mm<sup>2</sup>であった。

## 2.3 試験体

本研究に用いた試験体では、上述のとおり鉄筋をコンクリート表層付近に設置させることにより、内部ひび割れの可視化を目指している。図-3に示す通り、鉄筋が極限にまで表層付近に存在するように配置させた。節が、ごく表層近傍に配置される試験体(以下 A 試験体)、リブが、ごく表層近傍に配置される試験体(以下 B 試験体)の場合、さらに、比較のため鉄筋軸方向に垂直な断面で鉄

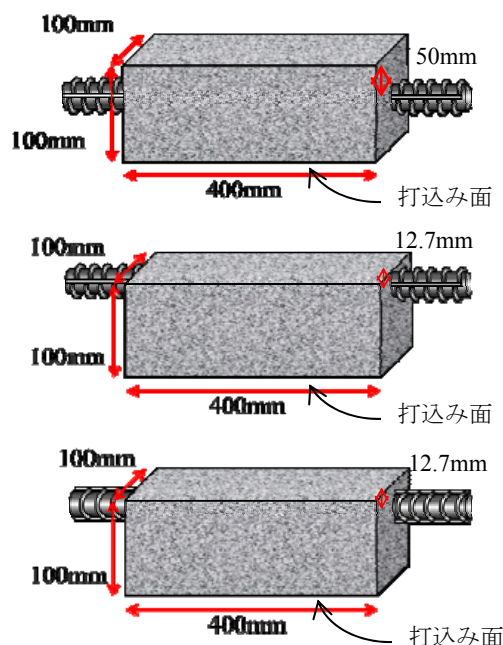


図-3 試験体の概要  
(上より Ref 試験体, A 試験体, B 試験体)

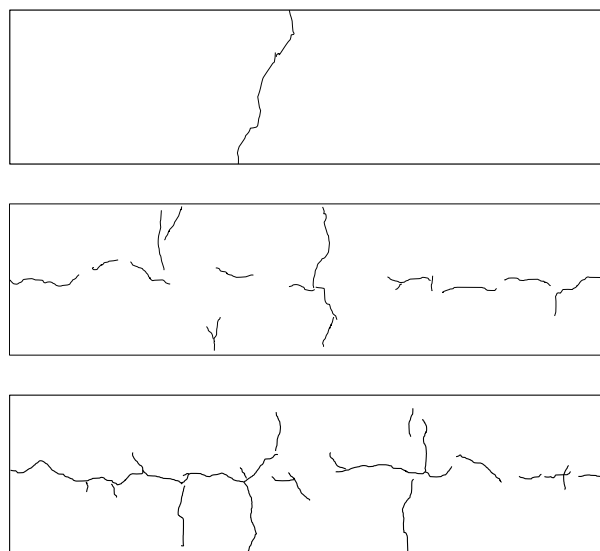


図-4 一軸引張載荷試験結果  
(上より Ref 試験体, A 試験体, B 試験体)

筋が中心に配置される試験体(以下 Ref 試験体)について実験を行った。引張載荷荷重は、鉄筋応力にして125N/mm<sup>2</sup>に相当する荷重を載荷した。

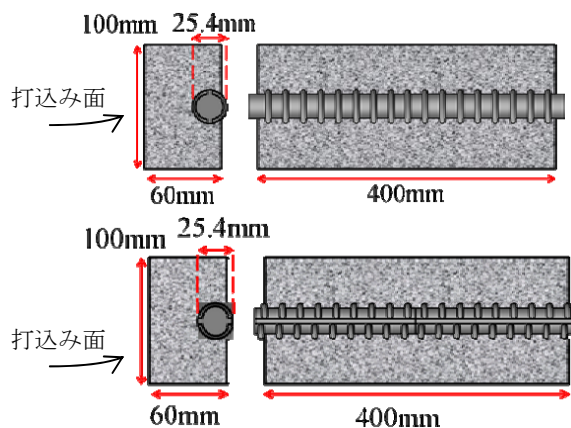


図-5 追試用試験体概要  
(上より A' 試験体, B' 試験体)

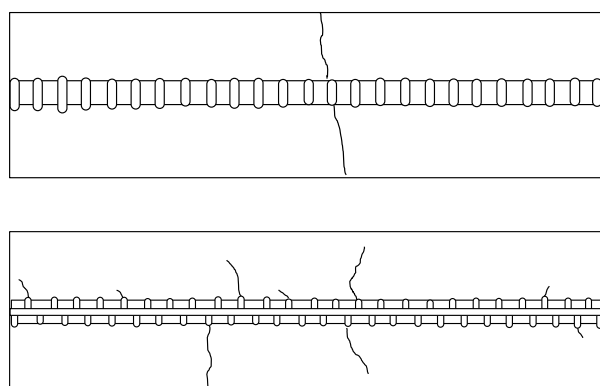


図-6 追試用試験体による一軸引張試験結果  
(上より A' 試験体, B' 試験体)

## 2.4 実験結果

図-3に示す各試験体の上面のかぶり面のひび割れの様相をスケッチしたものを図-4に示す。Ref試験体の場合、鉄筋の降伏荷重に至らない時点で鉄筋軸方向中心部付近に貫通ひび割れが導入された。無論、鉄筋近傍の内部ひび割れは観察できなかった。次にA試験体においては、Ref試験体と同様に貫通ひび割れが確認され、さらに鉄筋の軸方向にひび割れが導入された。しかし、貫通ひび割れ以外の、図-1のような軸方向に垂直方向に導入されるひび割れは、ほとんど確認されなかった。一方で、B試験体においては、A試験体同様に、貫通ひび割れおよび、鉄筋軸方向のひび割れが確認できるほか、貫通ひび割れ以外の軸方向垂直方向のひび割れで、内部ひび割れが表層に露出したと思われるものが確認された。ここで、軸方向に導入されたひび割れの存在により、内部ひび割れの判別が困難となっているため、試験体の鉄筋配置位置を、鉄筋が一部むき出しとなるまでに移動させた試験体による追試を実施することとした。図-5に追試用の試験体の概要を示す。B試験体において鉄筋をむき出しにしたものをB'試験体と呼び、この試験体による追試を行うが、比較のため、A試験体において鉄筋をむき出しにしたA'試験体の試験についても併せて実施した。

## 2.5 追試の概要と結果

図-6に追試試験体に鉄筋応力  $125\text{N/mm}^2$  に相当する荷重を載荷したときのひび割れ分布図を示す。A'試験体では、貫通ひび割れのみが発生し、鉄筋の節から発生する内部ひび割れは確認されなかった。これは、鉄筋のリブの存在のため、節から発生するひび割れがコンクリートごく表層には露出しなかったと考えられる。一方で、B'試験体においては、一部のひび割れを除き、鉄筋の節から、鉄筋軸方向に垂直にひび割れが進展せず、ある角度をもってひび割れが進展していることが確認できる。これは、図-1に示す後藤らの実験結果にあるような、

内部ひび割れのパターンに酷似していることから、内部ひび割れを表層に露出させることに成功していると思われる。無論、図-1のような通常の一軸引張試験結果における内部ひび割れとは厳密には異なるものではあるが、鉄筋近傍のひび割れ発生と進展、さらにひび割れ幅の情報を載荷中に取得できる点は特筆すべきと考えている。

## 2.6 載荷荷重とひび割れ発生・進展

前節のB'試験体を提案試験体と称し、この試験体を使用して、載荷荷重とひび割れ発生・進展の様相を捉える。

荷重は鉄筋応力度にして  $20\text{N/mm}^2$ 、 $100\text{N/mm}^2$ 、 $200\text{N/mm}^2$ 、 $295\text{N/mm}^2$  となったとき、荷重を保持し、供試体を観察し、アセトン塗布によりひび割れの存在を確認した。ひび割れ箇所は、マジックインキにて該当箇所の痕跡を残しつつ、鉄筋近傍のひび割れ幅を、ポータブルデジタル顕微鏡を用い  $1/1000\text{mm}$  の精度で測定した。なお、1本のひび割れ中であっても、ひび割れ幅は場所によって異なっており、本試験ではデジタル顕微鏡をひび割れ着目点に固定していないことから、載荷の度に全く同一の箇所のひび割れ幅を測定できるとは限らず、測定の度に測定箇所が異なることによる測定値の増減が生じうる。そのため、本試験においては鉄筋近傍の1本のひび割れ中において、幅のばらつきが少ない場合には3点、多い場合には5点程度、鉄筋のごく近傍でのひび割れの長さ方向に概ね等間隔に測定し、その平均をとることによって、上記の影響を極力排除することとした。

載荷中のひび割れ分布と、ひび割れ幅を併記したものを図-7に示す。なお、鉄筋の節から発生していないひび割れについては、内部ひび割れと見なさず、したがってひび割れ幅の数値は記入していない。載荷荷重の増加に従い、新しい内部ひび割れの発生と、ひび割れ幅の増加が確認され、ひび割れの幾つかは、鉄筋の降伏荷重に至らない時点において、ひび割れが目視できる程大きいものや、内部ひび割れが端部にまで進展しているもの

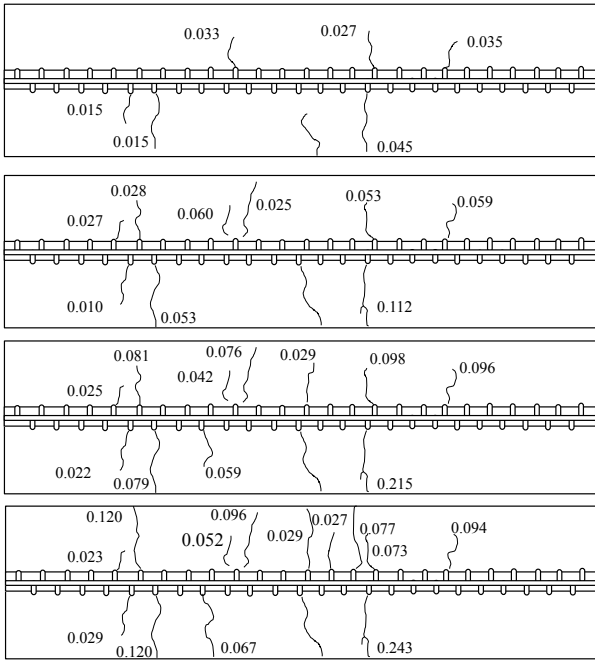


図-7 提案試験体のひび割れ分布図  
(上より鉄筋応力度 20, 100, 200, 295N/mm<sup>2</sup>,  
図中の数字は内部ひび割れの幅 (mm))

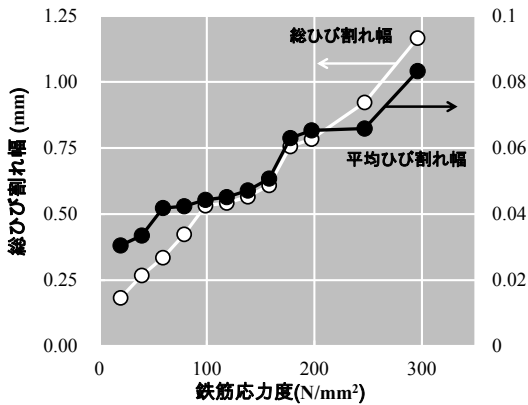


図-8 鉄筋応力度とひび割れ幅の総および  
平均ひび割れ幅との関係の関係

が見られた。ひび割れ幅については、Ref 試験体との比較検証が今後必要であるが、提案試験体が、幅を含めた内部ひび割れの発生様相を概ね再現できているとするならば、内部ひび割れが物質移動抵抗性に与える影響は非常に大きいものと推察される。図-8 に鉄筋応力度とひび割れ幅の総和の関係、さらに総和を内部ひび割れ本数で除した値を併せて示す。鉄筋応力度の増加に伴い平均ひび割れ幅は増加している。RC 部材内部の応力状態の増加と変形に伴って、従来の知見のとおり、貫通ひび割れの開口幅の増加のみならず、内部ひび割れの鉄筋近傍の開口幅も一様に増加しているものと言える。むき出し面を適切にシール処理すれば、例えば塩水の乾湿繰り返し試験による腐食促進試験などによって、内部ひび

割れと腐食発生箇所や、物質移動抵抗性低下度を関連付けることが期待できる。

### 3. 損傷モデルによる有限要素解析

#### 3.1 損傷モデルの概要

本章では、提案試験体に発生した内部ひび割れ再現の妥当性を、Ref 試験体に発生した内部ひび割れの様相と比較することによって検証することを目的とする。なお、Ref 試験体内部のひび割れ性状は視覚化できないため、本研究においては、数値シミュレーションによる両者の比較による検証を行う。

数値シミュレーションの実施に当たり、本研究ではコンクリートの破壊力学に基づく等方性の損傷モデルによる有限要素解析<sup>3)</sup>を採用する。

等方性の損傷モデルの構成式は、フックの法則にスカラー変数  $D$  を用いて、次式で表される。

$$\sigma = (1 - D)c : \varepsilon \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$  はコーシー応力テンソル、 $\varepsilon$  は微小ひずみテンソル、 $c$  は弾性係数テンソルである。 $D$  は損傷の度合いを  $0 \leq D \leq 1$  で表す損傷変数であり、損傷がなければ 0、完全に破壊すれば 1 となる。なお、ベクトル、テンソル表示の場合は太字としている。

図-9 に示す表面力-開口変位関係を有限要素における応力とひずみでモデル化し、損傷モデルの構成式に組み入れると、損傷変数  $D$  は次式で与えられる。

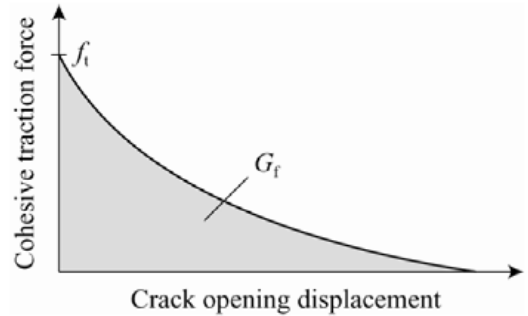


図-9 表面力-開口変位関係

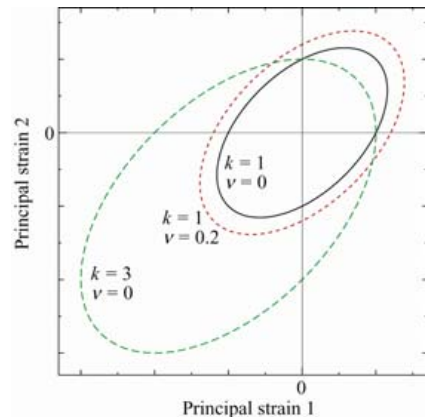


図-10 等価ひずみの等値面

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp \left\{ -\frac{E\kappa_0 h_e}{G_f} (\kappa - \kappa_0) \right\} \quad (2)$$

ここで、 $E$  は材料のヤング率、 $G_f$  は破壊エネルギー、 $h_e$  は要素代表長さである。 $\kappa$  は変形履歴における等価ひずみの最大値、 $\kappa_0$  は損傷開始時の等価ひずみである。多次元問題における等方性の損傷モデルでは、ひずみテンソルをスカラー値である等価ひずみに変換して損傷の進展を評価する。本研究では、de Vree *et al.*<sup>4)</sup>によって提案された修正 von-Mises モデルによる等価ひずみ $\varepsilon_{eq}$ を用いる。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu}\right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (3)$$

ここで、 $\nu$  はポアソン比、 $k$  は材料の圧縮引張強度比であり、コンクリートでは $k \approx 10$ となる。 $I_1$  はひずみテンソル $\boldsymbol{\varepsilon}$ の第一不変量であり、次式で表される。

$$I_1 = \text{tr} \boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon_{kk} \quad (4)$$

$J_2$  は次式で表される偏差ひずみテンソル $\boldsymbol{e}$ の第二不変量である。

$$J_2 = \frac{1}{2} \boldsymbol{e} : \boldsymbol{e} = \frac{1}{2} e_{kl} e_{kl} \quad (5)$$

ここで、 $\boldsymbol{e}$  は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{e} = \boldsymbol{\varepsilon} - \frac{1}{3} \text{tr} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (6)$$

2次元の主ひずみ空間に $\varepsilon_{eq}$ をプロットした例を図-10に示す。引張に弱く、圧縮に強い破壊特性を表現できることがわかる。また、本研究で採用する損傷モデルには破壊エネルギーが考慮されているので、要素寸法に依存しにくい損傷・破壊挙動を再現できる<sup>3)</sup>。

### 3.2 内部ひび割れの3次元数値シミュレーション

#### (1) 解析モデルと条件

異形鉄筋まわりのコンクリートの内部ひび割れ挙動を再現するために、図-11に示すような有限要素モデルを作成した。本モデルは、実験における供試体と同様であり、鉄筋については、異形鉄筋における節も正確にモデルに取り入れた。有限要素は、すべて線形の四面体要素であり、要素数は約116万要素である。コンクリートの寸法は、60 mm × 100 mm × 400 mm である。境界条件は、鉄筋の片方を固定し、もう片方に軸方向の強制変位0.6 mmを与える。鉄筋の両端において、面外方向の変位は拘束する。鉄筋はヤング率200 GPa、ポアソン比0.3の線形弾性体とする。コンクリートの材料パラメータは、ヤング率を20 GPa、ポアソン比を0.2、損傷開始の等価ひずみを0.0001、破壊エネルギー0.1 N/mm、圧縮引張強度比

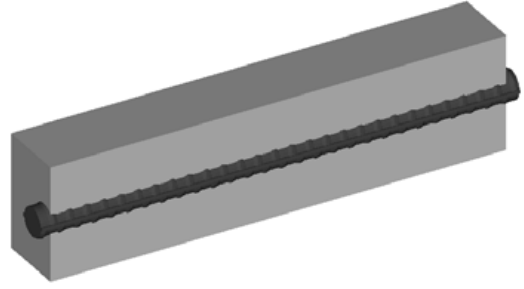


図-11 異形鉄筋と提案試験体モデル

を10とする。

#### (2) 解析結果と考察

コンクリート内部の損傷の進展を図-12に示す。詳細な有限要素メッシュを用いて損傷変数 $D$ を可視化しているため、損小変数の増加による変色箇所の可視化は、ひび割れ進展箇所の可視化とほぼ等価となる。

はじめに、部材の両端から損傷が開始し、荷重の増加とともに、異形鉄筋の周囲に損傷が発生・進展する様子が再現されている。実験結果の図-7と比較すると、ひび割れの本数に相違はあるものの、3次元コーン状の内部ひび割れが形成されており、定性的な傾向はおおむね一致していると言えることから、本研究で実施した数値シミュレーションが力学的に妥当であることを示す結果となっている。実験的検討においては、コンクリート内部の破壊の状況を見ることはできないが、数値シミュレーションでは図-12のように、コンクリート内部の損傷や破壊の様子を可視化することができる。なお、図-7のひび割れ発生の様相は幾分異なっており、実試験体においては、骨材などのコンクリート中の材料の局所的な材料不均一性が一因となっていると考えられる。

#### (3) Ref 試験体モデルと提案試験体モデルの比較

図-13に示すRef試験体モデルの数値解析を行い、提案試験体モデルの結果との比較を行う。コンクリートの寸法は120 mm × 100 mm × 400 mm であり、D25の異形鉄筋が中央に配置されている。境界条件と材料パラメータは提案試験体モデルと同様である。

Ref試験体モデルにおけるコンクリート内部の損傷の進展を図-14に示す。図-12でのモデルと同様に、はじめに部材の両端から損傷が開始した後、部材の中央付近に貫通ひび割れが発生し、さらに分断された各領域の中央付近に貫通ひび割れが生じている。貫通ひび割れの発生の数や順序は提案試験体モデルとは異なるが、鉄筋の節周辺における損傷の様子は、3次元コーン上の内部ひび割れの形成からも、提案試験体モデル中の内部ひび割れは、Ref試験体のそれと、貫通ひび割れ発生位置、発生数は異なるものの、鉄筋近傍の内部ひび割れ発生の様相はほとんど相違ないものであって、本研究で提案する試験体が妥当であることを裏付ける結果となった。

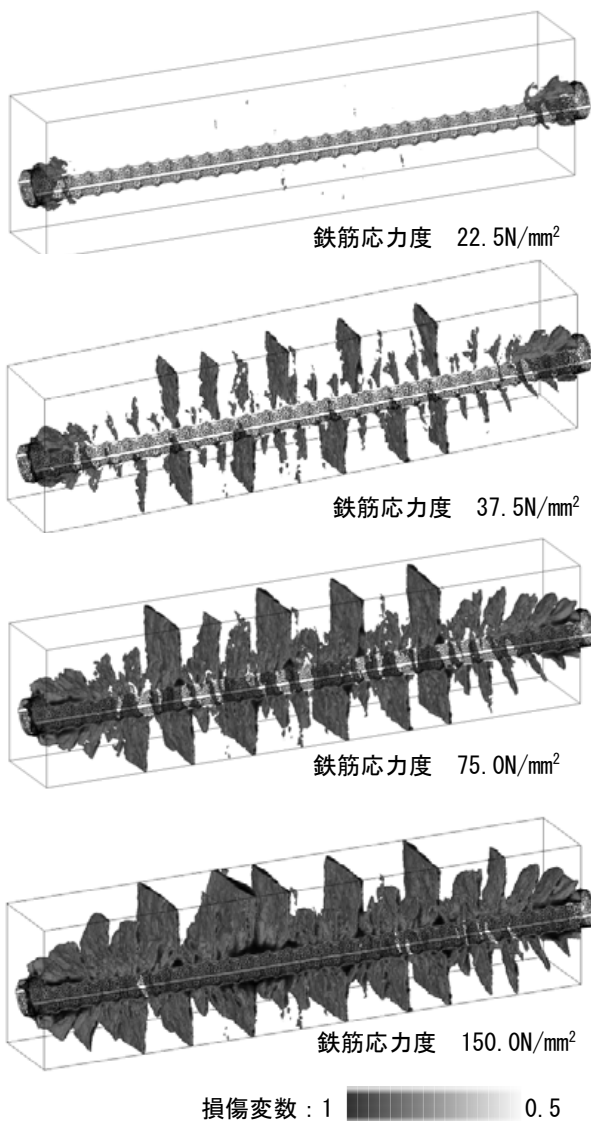


図-12 コンクリート内部の損傷の進展  
(提案試験体)



図-13 異形鉄筋と Ref 試験体のモデル

#### 4. 結論

本研究では、一軸引張試験体の鉄筋配置位置をむき出しにさせることによって、引張荷重が作用している間であっても、内部ひび割れを鉄筋むき出し面に露出させることに成功した。ひび割れ発生の様相は、既往の研究によって確認されたパターンに酷似していることが確認された。さらに、本試験体に発生する内部ひび割れの様相の妥当性を、数値解析により定性的に実証した。

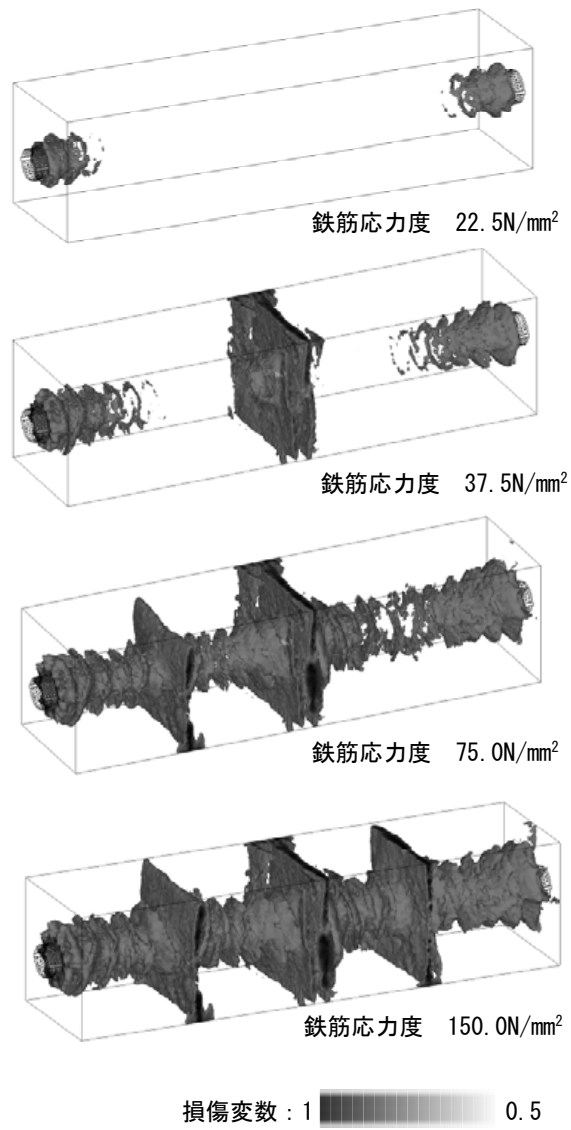


図-14 コンクリート内部の損傷の進展  
(Ref 試験体)

#### 参考文献

- 1) 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究, 土木学会論文集, No.294, pp.85-100, 1980.2.
- 2) 大塚浩司, 武田三弘: X線造影撮影によるコンクリート構造物内部のひび割れ検出技術の開発に関する研究, 土木学会論文集 No.725 /V-58, pp.143-156, 2003.2.
- 3) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 檜山和男: コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vol.2013, pp.20130015, 2013. 8.
- 4) J.H.P. de Vree, W.A.M Brekelmans and M.A.J. van Gils: Comparison of nonlocal approaches in continuum damage mechanics, *Comput. Struct.*, Vol.55, pp.581-588, 1995