

残留ひび割れ幅に基づく RC 部材の損傷度評価に関する基礎的検討

Basic Study on Damage Evaluation of Reinforced Concrete Member Based on Residual Crack Width

十 川 貴 行 曾我部 直 樹 玉 野 慶 吾 平 陽 兵

要 約

地震による RC 部材の損傷度を評価するためには、鉄筋に生じるひずみの最大値を把握することが重要であるが、そのためには連続かつ動的な鉄筋ひずみの計測が必要となることが課題であった。一方、部材の表面に残留するひび割れについては、地震後においても計測することが可能であるため、残留ひび割れ幅と地震時に鉄筋に生じた最大ひずみとの関係が明らかになれば、地震後の RC 部材の損傷度を部材表面の計測から定量的に評価することが可能となる。本研究では RC 部材の両引き実験における鉄筋ひずみを光ファイバセンサによって精緻に計測することで、残留ひび割れ幅とその近傍における鉄筋ひずみの積分値の最大値に強い相関関係を確認し、この関係を用いることで RC 部材の損傷度を定量的に評価できる可能性を示した。また、3次元非線形 FEM 解析によって、両引き実験の再現解析を試み、実験で確認されたひび割れ性状や鉄筋ひずみ分布を概ね再現できることを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. RC 部材の両引き実験
- III. 3次元非線形 FEM による再現解析
- IV. おわりに

I. はじめに

地震などの大きな外力によって曲げ破壊に至る RC 部材の損傷度を評価するには、鉄筋の降伏や座屈の兆候を把握することが重要である。これらの現象は鉄筋に生じるひずみと関係があるが、コンクリート中の鉄筋に直接センサを設置しない限り、鉄筋に生じるひずみを計測できず、地震時に生じるひずみを計測するためには連続かつ動的な計測が必要となることから、これまで地震後における RC 部材の損傷度を定量的に評価することは困難であった。一方、外力が作用した後は、その大きさに応じて部材表面にひび割れが残留し、その幅は地震後においても計測が可能である。そのため、残留ひび割れ幅と外力が作用した際に鉄筋に生じた最大ひずみとの関係が明らかになれば、地震後の RC 部材の損傷度を部材表面の計測から定量的に評価することが可能となる。

Fig.1 に示すように、部材表面の曲げひび割れ幅と、ひび

割れ近傍の鉄筋ひずみとの間には相関関係が確認されており、コンクリート標準示方書¹⁾においても曲げひび割れ幅が鉄筋ひずみに比例する形で定式化されている。同式は、外力が作用した状態での曲げひび割れ幅を算定するものであるが、外力が除荷された後に残留するひび割れ幅も、その近傍鉄筋に残留するひずみと相関があると考え、これらの関係が明らかになれば、Fig.1 に示すような鉄筋の応力-ひずみ関係¹⁾を用いることで、鉄筋の残留ひずみから加

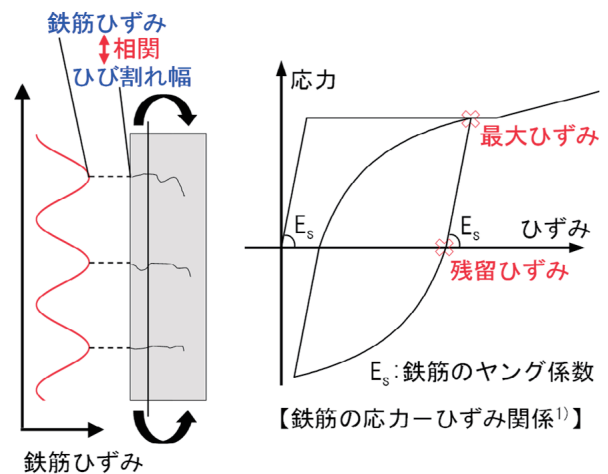


Fig.1 ひび割れ幅と鉄筋ひずみ
(Crack Width and Rebar Strain)

キーワード : RC 部材, ひび割れ幅, 両引き実験, 3次元非線形 FEM 解析

Keywords : RC member, crack width, double-pull experiment, 3D non-linear FEM analysis

力時に生じていたひずみの大きさを推定できる。すなわち、残留ひび割れ幅から加力時に生じていた鉄筋のひずみを推定でき、その結果に基づいて曲げひび割れの発生から最大耐力付近までの範囲における RC 部材の損傷度を定量的に評価できる可能性がある。

本研究では、RC 部材の両引き実験を実施し、光ファイバセンサで鉄筋ひずみを精緻に計測することで、残留ひび割れ幅と加力時に生じていた鉄筋ひずみとの相関関係について検証した。さらに、3次元非線形 FEM 解析によって、両引き実験の再現解析モデルを作成し、同実験で得られたひび割れ性状、鉄筋ひずみ分布の再現性について検討した。

II. RC 部材の両引き実験

1. 実験概要

(1) 試験体

Fig.2 に両引き実験における試験体の概要を、Table 1 に材料試験の結果を示す。試験体は断面が 140×140mm、長さが 2,500mm のコンクリートの中心に、D32 ネジ節鉄筋 (SD345) を配置した RC 部材である。試験体の断面は、かぶり一般的な RC 橋脚と同等となるように設定した。試験体の長さについては、加力に伴い試験体内に発生するひび割れが 8 本以上となるように設定した。

(2) 荷重方法

実験では試験体を鉛直にした状態で、両端に露出した鉄筋を介して試験体に油圧ジャッキで一軸の引張力を作用させた。荷重ステップを Table 2 に示す。鉄筋が降伏する前は鉄筋応力度に基づき、鉄筋が降伏した後は試験体表面のひび割れ幅の最大値に基づき荷重と除荷を繰り返し、ひび割れ幅の最大値が約 5.0mm となった時点で荷重を終了した。

(3) 計測項目

荷重はロードセルによって計測し、ひび割れ幅は試験体の片面に連続して設置したパイ型変位計 (標点距離 100mm) によって計測した。

鉄筋には光ファイバセンサを設置し、ひずみを計測した。光ファイバの計測システムには、Optical Frequency Domain Reflectometry²⁾ (OFDR, 光周波数領域反射計測法) を採用した。同計測手法では、光ファイバセンサに Fiber Bragg Grating (FBG) と呼ばれる回折格子が、コアに連続的に形成されている特殊なセンサを用いる。OFDR 計測器から波長を連続的に変化させながら光を照射することで、FBG 上で反射するレイリー散乱光と基準光とを干渉させ、その干渉光の周波数から位置を特定するとともに、FBG 部のレイリー散乱光からブラッグ波長を求めて、波長シフト量をひずみに換算する。同計測手法によれば、空間分解能 0.6mm、計測間隔 0.6mm で±1μ の精度でひずみを計測することが

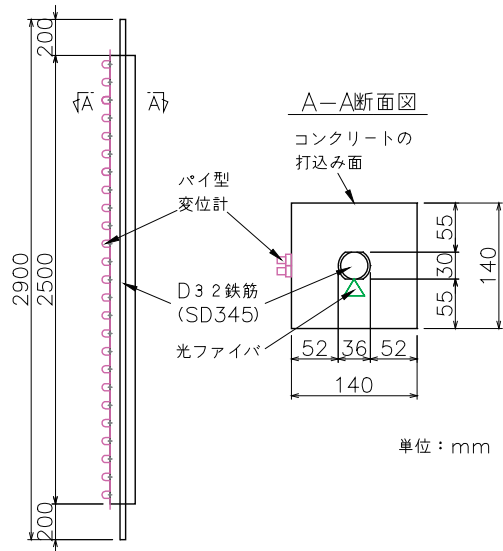


Fig.2 試験体の概要
(Geometry of Specimen)

Table 1 材料試験結果
(Mechanical Properties of Materials)

材料	項目	
コンクリート	圧縮強度(N/mm ²)	29.0
	ヤング係数(kN/mm ²)	24.6
	引張強度(N/mm ²)	2.72
鉄筋	降伏強度(N/mm ²)	402
	ヤング係数(kN/mm ²)	193.4
	引張強度(N/mm ²)	587

Table 2 荷重ステップ
(Load Steps)

荷重ステップ	
鉄筋の降伏前	鉄筋応力度 94, 180, 270, 345N/mm ² で荷重, 除荷を 1 回ずつ実施
鉄筋の降伏後	最大ひび割れ幅 0.6, 0.65, 1.1, 1.3, 1.5, 1.75, 2.0, 2.25, 2.5, 3.0, 3.4, 4.0, 4.9mm で荷重, 除荷を 1 回ずつ実施 ※ただし, 1.1, 1.5mm では 3 回繰返しを実施

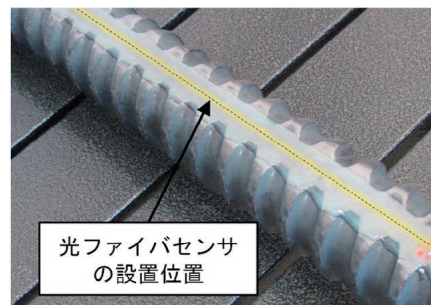


Photo 1 鉄筋に設置した光ファイバ
(Optical Fiber Installed Rebar)

できる。なお、空間分解能とは、通常のひずみゲージにおけるゲージ長 (検長) に相当する値である。光ファイバセンサは、Photo 1 に示すようにエポキシ系樹脂で鉄筋の表

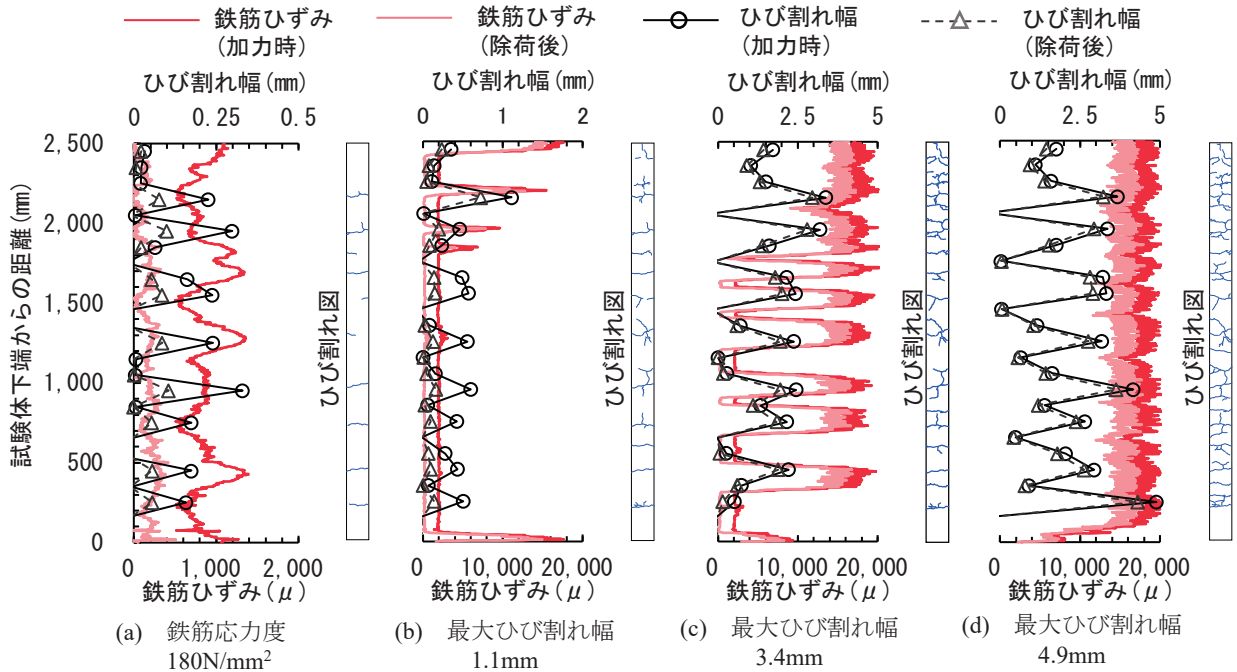


Fig.3 ひび割れ幅と鉄筋ひずみ分布
(Distribution of Crack Width and Rebar Strain)

面に接着した。

光ファイバセンサによる鉄筋ひずみの計測は、各載荷ステップの目標値に達した時点(以下、「加力時」と称す)と、そこから荷重10kNまで除荷した時点(以下、「除荷後」と称す)で実施した。

2. 実験結果

(1) ひび割れ幅と鉄筋ひずみ分布

Fig.3 に各載荷ステップの加力時および除荷後におけるパイ型変位計によって計測されたひび割れ幅の分布図と、光ファイバセンサによって計測された鉄筋ひずみの分布図を示す。これらの図には、パイ型変位計を設置した面のひび割れ図も併記している。ここでは、鉄筋が降伏する前として鉄筋応力度 180N/mm^2 の結果 (Fig.3 (a)) を、鉄筋が降伏した直後として最大ひび割れ幅 1.1mm の結果 (Fig.3 (b)) を、鉄筋の降伏後に降伏領域が拡大している段階として、最大ひび割れ幅 3.4mm 、 4.9mm の結果 (Fig.3 (c),(d)) をそれぞれ示す。

(a) 鉄筋応力度 180N/mm^2

鉄筋の降伏前である鉄筋応力度 180N/mm^2 時点では、Fig.3(a)に示すように、加力時には鉄筋ひずみがひび割れ位置で局所的に増加する分布であったのに対し、除荷後には、ひび割れ位置の鉄筋ひずみは 400μ 程度まで減少し、残留ひび割れ幅は 0.1mm 以下であった。

(b) 最大ひび割れ幅 1.1mm

鉄筋の降伏直後は、Fig.3(b)に示すように、試験体下端から約 $2,200\text{mm}$ の位置で加力時の鉄筋ひずみが局所的に $15,000\mu$ 程度まで増加しており、同位置のひび割れ幅も増加した。除荷後には鉄筋ひずみが直前の加力時に比べ、試

験体全域にわたり $2,000\mu$ 程度減少したことを確認した。また、この時点において、鉄筋応力度 180N/mm^2 時点で発生していたひび割れのほかに横方向および縦方向のひび割れが新たに複数発生した。これは、後藤ら³⁾の研究で示されている、鉄筋とコンクリート間の付着に起因して発生する「二次横ひび割れ」および「縦ひび割れ」であると考えられる。

(c) 最大ひび割れ幅 3.4mm 、 4.9mm

鉄筋ひずみが $15,000\mu$ 程度に到達した後は、Fig.3(c)に示すように、ひずみの最大値の上昇が鈍化し、ひずみが増加する範囲が鉄筋応力度 180N/mm^2 時点で発生していたひび割れを中心として周囲に拡がりつつ、同ひび割れ幅が拡大する傾向を確認した。別途実施した3体の鉄筋の単体引張試験の結果では、 $9,500\sim 14,500\mu$ のひずみで降伏棚を超えてひずみ硬化が始まっていたことから、Fig.3(c)の最大ひび割れ幅 3.4mm の時点では、ひび割れ位置の鉄筋がひずみ硬化域に入りひび割れ近傍の引張応力が増加することで、降伏の領域が拡大していると考えられる。Fig.3(d)に示すように、最大ひび割れ幅 4.9mm 時点では、試験体の全長にわたり鉄筋ひずみが $15,000\mu$ を超えてひずみ硬化域に達し、ひび割れ幅が増加した状況を確認した。

以上より、鉄筋降伏後のひび割れ幅の増加には、鉄筋ひずみの最大値の増加だけでなく、ひび割れ近傍における鉄筋の降伏領域の拡大と同領域でのひずみの増加も影響することを確認した。

(2) ひび割れ幅と鉄筋ひずみの積分値との関係

ひび割れ幅を、コンクリートの弾性ひずみを無視し、ひび割れ位置の鉄筋の伸びと近傍のコンクリートからの抜

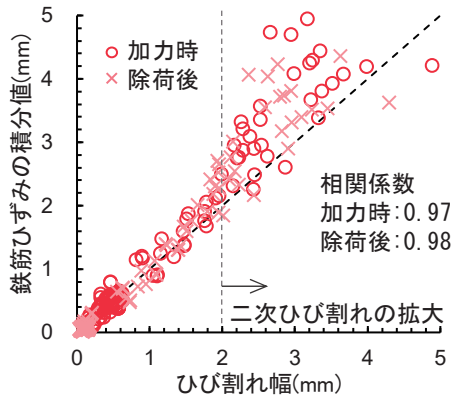


Fig.4 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの積分値の関係
(Relationship of Crack Width and Integrated Value of Rebar Strain)

出し量の和とすると、その大きさはひび割れ近傍の鉄筋ひずみを積分することで算出することができる。そこで、加力時、および除荷後における、ひび割れ近傍の鉄筋ひずみの積分値を算出し、そのひび割れ幅と比較した結果を Fig.4 に示す。ここでは、鉄筋応力度 180N/mm² 時点で発生したひび割れを対象とし、その位置は試験時に目視で観察したひび割れ図に基づいて決定した。鉄筋ひずみの積分区間は、対象とするひび割れの隣り合うひび割れとの midpoint 間とした。なお、加力に伴い二次横ひび割れや縦ひび割れが発生しているが、それらの影響は考慮せず積分区間は一定とした。また、図中には、ひび割れ幅と鉄筋ひずみの積分値を同値とした黒線（破線）と、加力時、除荷後のそれぞれの相関係数を併記した。

ひび割れ幅と鉄筋ひずみの積分値の間には、加力時、除荷後ともに相関係数 0.97, 0.98 と高い相関にあることを確認した。なお、ひび割れ幅が 2.0mm に達するまでは、ひび割れ幅と鉄筋ひずみの積分値がほぼ同値になる関係を示したが、ひび割れ幅が 2.0mm 以上の範囲では、加力時、除荷後ともにひび割れ幅に対し鉄筋ひずみの積分値が若干大きくなる傾向にあった。この要因として、ひび割れ幅が 2.0mm 以上では、鉄筋応力度 180N/mm² 以降に新たに発生した二次横ひび割れの幅の拡大が影響していると推察している。以上より、加力時および除荷後のひび割れ幅と、それぞれの時点のひび割れ近傍の鉄筋ひずみの積分値に、鉄筋が降伏した後でも高い相関関係があることが確認できた。

(3) 残留ひび割れ幅と加力時の鉄筋ひずみの関係

除荷後の残留ひび割れ幅と、除荷前の加力時に生じていたひび割れ近傍の鉄筋ひずみの積分値（「加力時の鉄筋ひずみの積分値」と称する）の関係を検証した。

Fig.5 に除荷後の残留ひび割れ幅と加力時の鉄筋ひずみの積分値との関係を示す。加力時の鉄筋ひずみの積分値の算出方法は、前項で示したとおりである。また、同図には、

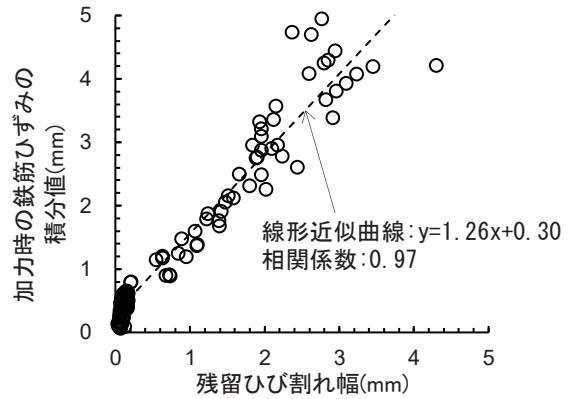


Fig.5 残留ひび割れ幅と加力時の鉄筋ひずみの積分値の関係
(Relationship of Residual Crack Width and Integrated Value of Rebar Strain Under Applied Force)

両者の相関係数と線形近似曲線を示している。

残留ひび割れ幅と加力時の鉄筋ひずみの積分値を線形近似した結果、相関係数 0.97 と両者に高い相関関係があることを確認した。このことから、残留ひび割れ幅を評価することで、除荷前の加力時にひび割れ近傍の鉄筋に生じていたひずみの大きさを評価できることが示唆された。

一方、残留ひび割れ幅が 0.4mm 以下の範囲と、それ以上の範囲では残留ひび割れ幅に対する加力時の鉄筋ひずみの積分値の増分が異なることが確認できる。残留ひび割れ幅が 0.4mm 以下の範囲では、ひび割れ位置の鉄筋が降伏していないため、加力時に鉄筋ひずみが増しても、除荷後の残留ひび割れ幅の増加は小さい。これに対して、残留ひび割れ幅が 0.4mm 以上の範囲では、ひび割れ位置の鉄筋が降伏しており除荷後に残留ひずみが生じるため、残留ひび割れ幅が加力時におけるひび割れ近傍の鉄筋ひずみの積分値に比例して増加するため、残留ひび割れ幅に対する加力時の鉄筋ひずみの積分値の増分が、ひび割れ位置の鉄筋の降伏後に変化したと考えられる。

Ⅲ. 3次元非線形 FEM による再現解析

1. 解析概要

両引き実験で確認されたひび割れ性状、鉄筋ひずみ分布を再現することを目的として、3次元非線形 FEM 解析による検討を行った。解析は、汎用解析プログラム DIANA10.5 を用いて実施した。解析モデルは Fig.6 に示すように、試験体の半断面を対象とし、鉄筋、コンクリートともにソリッド要素でモデル化し、上下対象となるように要素分割を行った。鉄筋は、節の高さ程度の要素長で、節の形状を含めてモデル化した。コンクリートについては、コンクリート表面における要素長が 10mm となるように分割した。コンクリートには回転ひび割れモデルを適用し、圧縮側と引張側の応力-ひずみ関係は Fig.7(a) に示すように、コンクリート標準示方書¹⁾に基づき設定した。鉄筋に

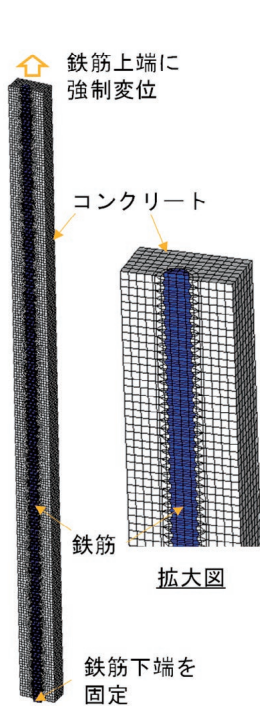


Fig.6 解析モデル
(Numerical Model)

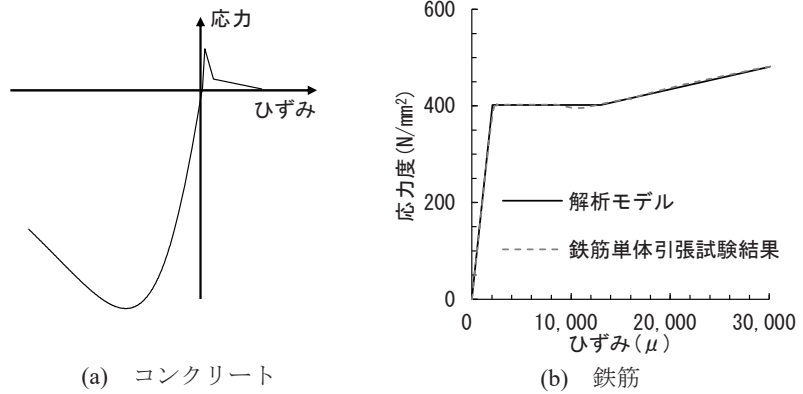


Fig.7 コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係
(Stress-Strain Relationship of Concrete and Rebar)

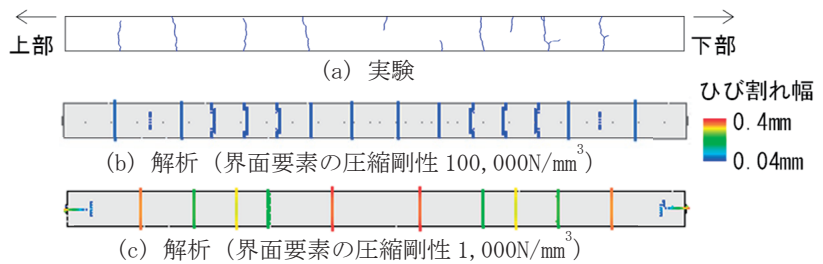


Fig.8 鉄筋応力度 180N/mm^2 時点のひび割れ図
(Crack Patterns at Rebar Stress 180N/mm^2)

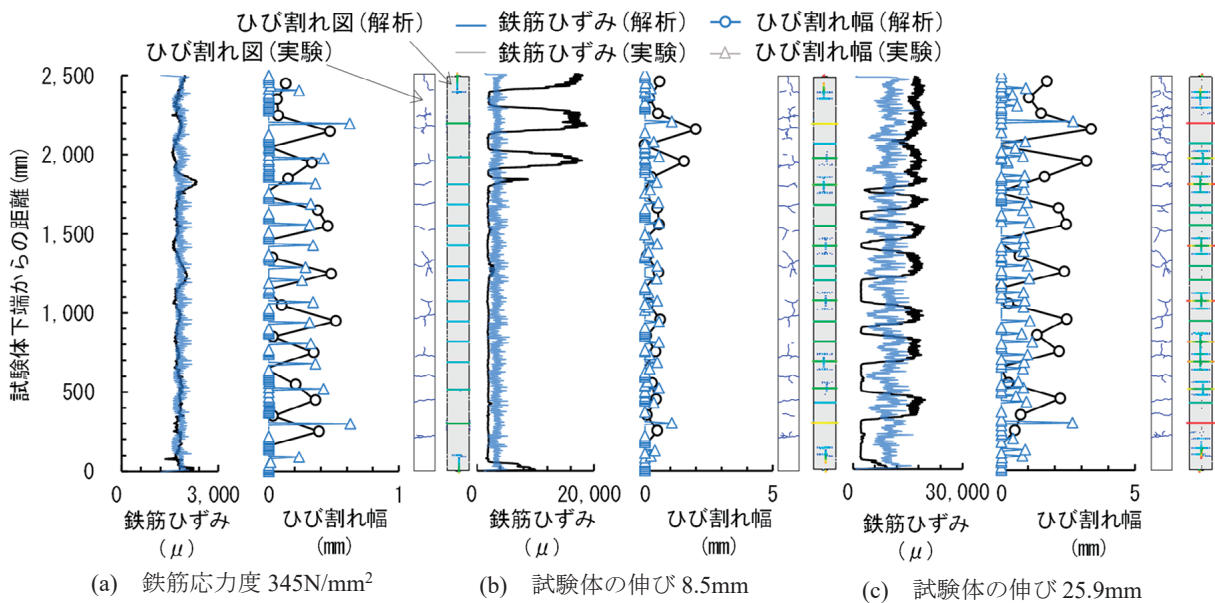


Fig.9 鉄筋ひずみとひび割れ幅分布
(Distributions of Crack Width and Rebar Strain)

は Von Mises 塑性モデルを適用し、応力-ひずみ関係は Fig.7(b)に示すように、ひずみ硬化点を考慮したトリニアモデルとした。鉄筋とコンクリートの間には、両者の接触を考慮するために界面要素を設けた。鉄筋からコンクリートが離れる方向とずれる方向の変形を拘束しないようにするため、界面要素の引張、せん断方向の剛性を十分小さな値とした。一方、コンクリートが鉄筋に押し付けられる方向となる界面要素の圧縮方向の剛性については、後述す

るように実験のひび割れ性状を再現できる大きさを設定し、その後の検討を行った。载荷は、鉄筋の片側を固定し、もう一方に一方の変位を与えることで実施した。

2. 解析結果

(1) 界面要素の設定

Fig.8 に鉄筋の引張応力度が 180N/mm^2 に達した時点における実験と、界面要素の圧縮方向の剛性が異なる2つの解析ケースのひび割れ図を示す。界面要素の圧縮剛性を

100,000N/mm³としたケースでは、実験に比べひび割れ本数が多くなったのに対し、圧縮剛性を 1,000N/mm³としたケースでは、実験で観測されたひび割れ性状と概ね一致した。鉄筋とコンクリートの界面付近、特に節と節の間では、粗骨材を含まないモルタル分となっていることや微細な空隙が生じていることなどによって、周囲のコンクリートよりも局所的に弱部となっている可能性がある。そのため、界面要素の圧縮剛性を剛となる大きさよりも小さめに設定することで、同部分における応力の伝達状況が再現され、ひび割れ性状が実験と近似したものと考える。以下では、界面要素の圧縮剛性を 1,000N/mm³とした解析結果について考察する。

(2) 鉄筋ひずみ、ひび割れ幅

Fig.9 に各ステップにおける鉄筋ひずみとひび割れ幅の分布図を示す。鉄筋が降伏する前の鉄筋応力度 345N/mm²時点では、鉄筋ひずみとひび割れ幅ともに実験と解析が精度よく一致した (Fig.9(a))。鉄筋降伏後である試験体の伸び 8.5mm 時点の実験結果では、鉄筋ひずみが 15,000 μ 程度に達するまでひび割れ位置の鉄筋ひずみが局所的に増加しているのに対し、解析結果では鉄筋ひずみの局所的な増加は見られず、ひずみが全長に亘りほぼ一定となる様子を確認した (Fig.9(b))。この時点の実験結果における鉄筋ひずみの局所的な増加は、試験体における材料の不均一性による可能性がある。一方、解析では均一な材料としてモデル化しているため、実験で確認された鉄筋の降伏直後における局所的なひずみの増加を再現できなかったものと考えられる。試験体の伸び 25.9mm 時点の実験結果では、ひび割れ位置を中心として降伏領域が拡大することで、ひび割れ幅が増加する傾向が確認された (Fig.9(c))。解析でも、ひび割れ付近を中心として降伏領域が拡大する状況と、

それに伴ってひび割れ幅が増加する傾向が示されている。このことから、材料の不均一性に起因する鉄筋ひずみのばらつきが相対的に小さくなる荷重条件においては、実験結果を概ね再現できることが確認できた。

VI. おわりに

本研究では、RC 部材の両引き実験から、RC 部材表面の残留ひび割れ幅と、コンクリート内部の鉄筋の加力時におけるひずみの積分値に高い相関があることを確認し、この関係に基づき、RC 部材の損傷度を評価できる可能性を示した。また、3次元非線形 FEM 解析によって、両引き実験で確認されたひび割れ性状や鉄筋ひずみ分布を概ね再現できることを確認した。

今後は、本論文で検討した 3次元非線形 FEM 解析によって、残留ひび割れ幅と加力時の鉄筋ひずみの関係に影響する要因を特定していくことを考えている。また、梁や柱といった RC 部材を対象として、正負交番の繰返しや地震のようなランダムかつ動的な外力の特性を考慮した上で、残留ひび割れ幅に基づく RC 部材の損傷度定量的な評価方法の検討を進めていく方針である。

参考文献

- 1) 土木学会；コンクリート標準示方書【設計編】，2017.
- 2) 井川寛隆，太田圭一，葛西時雄，山口功，村山英晶，影山和郎；OFDR を用いた長ゲージ FBG による分布計測の研究，日本機械学会論文集(A 編)，72 巻 724 号，2006，pp.102-110.
- 3) 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検討，土木学会論文報告集，第 294 号，1980，pp.85-100.

Basic Study on Damage Evaluation of Reinforced Concrete Member Based on Residual Crack Width

Takayuki Sogawa, Naoki Sogabe, Keigo Tamano and Yohei Taira

To evaluate the degree of damage of RC members subjected to flexural failure due to earthquakes, it is important to evaluate the occurrence of yielding or buckling of the rebar. Although these phenomena are related to rebar strain at the time of earthquakes, the sensors used for the evaluation must be installed directly on the rebar in concrete; moreover, continuous and dynamic measurement is required. This study focused on the residual cracks that remain on the surface after an earthquake and investigated their relationship to rebar strain under applied force. Through double-pull experiments on RC members, a high correlation was confirmed between the residual crack width and the integral of rebar strain near a crack under applied force. This indicates that the degree of damage of RC members can be evaluated on the basis of the residual cracks on surfaces. In addition, it was confirmed that cracking behavior and rebar strain could be reproduced by a three-dimensional FEM analysis.