# RC部材における残留ひび割れ幅に基づく 鉄筋ひずみの推定に関する検討

十川 貴行1・曽我部 直樹2・玉野 慶吾1・平 陽兵1

<sup>1</sup>正会員 修(工) 鹿島建設株式会社 技術研究所(〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1) <sup>2</sup>正会員 博(工) 鹿島建設株式会社 技術研究所(〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

# 1. はじめに

RC部材に地震などの大きな外力が作用し,曲げ 破壊に至る場合,曲げひび割れが生じ,引張側の軸 方向鉄筋が降伏した後,圧縮側のコンクリートの損 傷が進行することで終局に至る.終局に近い状態で は,かぶりのはく落など,外観に大きな変状が生じ るため,外力作用後の目視点検によってその損傷の 程度を把握することができるが,曲げひび割れの発 生から最大耐力付近までは,外力の発生後に残留す るひび割れの本数および幅が変化する程度の変状し か生じず,損傷の程度を定量的に評価することが困 難であった.

一方、図-1に示すように、ひび割れ幅はひび割れ 近傍の鉄筋ひずみの積分値に比例すると考えること ができ、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>でもRC部材の曲 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、外力を除荷した 後に残留するひび割れ幅も、その近傍の鉄筋に残留 するひずみと相関があると考えられる.また、図-1 に示すように、鉄筋の応力-ひずみ関係を用いるこ とで、鉄筋の残留ひずみから除荷前に生じていたひ ずみの大きさを推定できる.すなわち、残留ひび割 れ幅から除荷前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部材の損傷を定 量的に評価できる可能性がある.

そこで、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、残留ひび割れ幅と除荷前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.



#### 2. 実験概要

## 試験体の概要

試験体の概要(No.1試験体)を図-2に示す.表-1 に材料試験の結果を示す.試験体は,全長2,500mm で断面の中心にD32ネジ節鉄筋(材質SD345)を配 置したRC部材であり,かぶりの異なる2体である. No.1試験体は断面140×140mmでかぶり54mm, No.2 試験体は断面240×240mmでかぶり104mmとした.

## (2) 載荷方法

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、油圧ジャッキによって一軸の引 張力を作用させた.載荷ステップを表-2に示す.鉄 筋が降伏する前は、荷重値に基づき、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



図-2 試験体の概要(No.1試験体)

載荷と除荷を繰り返した. どちらの試験体もひび割 れ幅の最大値が約5.0mmとなった時点で載荷を終了 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, 試験体の一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、片面に電気抵抗式のひずみゲージ(ゲ ージ長2mm)を120mm間隔で設置し、もう片方には、 光ファイバセンサを設置し、ひずみを計測した.

本 実 験 で は , Optical Frequency Domain Reflectometry<sup>2)</sup>(OFDR, 光周波数領域反射計測法) という光ファイバ計測システムを採用した. ひずみ 検知部には, 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光ファイ バセンサを用い、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できる.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.なお、光ファイバセンサは、写真 -1に示すようにエポキシ系樹脂で鉄筋の表面に接着 させた.

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

表-1 材料試験結果

材料	項目	No.1 試験体	No.2 試験体
コンクリート	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	29.0	31.3
	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	24.6	25.0
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	2.72	2.60
鉄筋	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	401.9	
	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	193.4	
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	586.7	

表-2 載荷ステップ

試験体 <u>ケース</u>		載荷ステップ			
No.1 試験体	鉄筋の 降伏前	荷重 75kN(94N/mm <sup>2</sup> ), 143kN(180N/mm <sup>2</sup> ), 214kN(270N/mm <sup>2</sup> ), 274kN(345N/mm <sup>2</sup> )で載 荷,除荷を1回ずつ実施 ※括弧内はコンクリートを無視した 鉄筋の応力度			
	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 で載荷, 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)			
No.2 試験体	鉄筋の 降伏前	荷重 143kN(180N/mm <sup>2</sup> ), 214kN(270N/mm <sup>2</sup> ), 274kN(345N/mm <sup>2</sup> )で 載荷,除荷を1回ずつ実施 ※括弧内はコンクリートを無視した 鉄筋の応力度			
	鉄筋の 降伏後	取入いい割れ幅 1.7, 2.0, 2.5, 3.0, 3.2, 3.4, 4.0, 4.8mm で載荷, 除荷を 1 回ずつ 実施(ただし, 1.7, 2.0mm では 3 回繰返 しを実施)			



写真-1 鉄筋に設置した光ファイバセンサ

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.なお、 No.2試験体の光ファイバセンサは、最大ひび割れ幅 4.0mmに至る過程で破断したため、以下ではそれま



による鉄筋ひずみの計測結果の比較(No.1 試験体)

でに得られた計測結果を示す.

## 3. 実験結果

# (1) 光ファイバセンサと電気抵抗式ひずみゲージの 計測結果の比較

本実験で用いた光ファイバ計測手法によって,降 伏した範囲も含めた鉄筋ひずみが計測できているこ とを検証するため,図-3に示すように,電気抵抗式 ひずみゲージで計測したNo.1試験体の鉄筋ひずみの 結果と,光ファイバセンサで計測した同位置の鉄筋 ひずみの結果を比較した.同図には,両者の線形近 似式と決定係数も併記している.電気抵抗式ひずみ ゲージの検長と光ファイバの空間分解能が異なるこ とや,それぞれのセンサの設置位置におけるひび割 れの影響などに起因するばらつきが見られるものの, 本実験で計測を行った20,000µ程度まで両者の計測 値がほぼ一致することを確認した.このことから, 本実験で用いた光ファイバ計測手法によって,コン クリート中の鉄筋ひずみ分布を降伏した範囲を含め て評価できると考えられる.

#### (2) ひび割れ幅・鉄筋ひずみ分布

図-4と図-5に、No.1試験体、No.2試験体の各載荷 ステップにおける、加力時および除荷後のパイ型変 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荷重143kNの 結果(図-4 a),図-5 a))のほか,鉄筋が降伏した 直後としてNo.1試験体では最大ひび割れ幅1.1mmの 結果(図-4 b))を,No.2試験体では最大ひび割れ 幅1.7mmの結果(図-5 b))を示す.さらに,鉄筋の
降伏後,降伏領域が拡大している段階として,No.1
試験体では最大ひび割れ幅3.4mm,4.9mmの結果
(図-4 c),d))を,No.2試験体では最大ひび割れ
幅3.4mmの結果(図-5 c))をそれぞれ示す.

## a) 鉄筋降伏前

No.1試験体は荷重75kN時点で,No.2試験体は荷重 143kN時点で複数本のひび割れが発生した.図-4 a) と図-5 a)に示す荷重143kN時点では,No.1試験体の 最大ひび割れ間隔は269mmであり,最大ひび割れ幅 は0.33mmであった.これに対してNo.2試験体は, No.1試験体よりもかぶりが大きいため,最大ひび割 れ間隔は502mmであり,最大ひび割れ幅は0.70mm であった.

どちらの試験体も鉄筋の降伏前においては,加力 時には鉄筋ひずみがひび割れ位置で極大値となる分 布であったのに対し,除荷後にはひび割れ位置のひ ずみが低下して,全体的にほぼ平滑化された分布と なり,残留ひび割れ幅も小さかった.荷重143kN時 点では,除荷後のひび割れ位置の鉄筋ひずみは400 µ程度まで減少し,残留ひび割れ幅は,No.1試験体 では0.1mm以下で,No.2試験体では0.3mm以下とな った.

No.1試験体では荷重274kN時点から,No.2試験体では荷重214kN時点から,荷重143kN時点で発生していたひび割れのほかに新たなひび割れが複数,発生した.これは,後藤ら<sup>3)</sup>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.

## b) 鉄筋の降伏直後

鉄筋の降伏直後は、図-4 b)と図-5 b)に示すよう に、No.1試験体においては試験体下端から約 2,200mmの位置で、No.2試験隊においては試験体下 端から約1,900mm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.

#### c) 鉄筋の降伏領域の増加

鉄筋ひずみが15,000 μ程度に到達した後は,図-4 c)と図-5 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荷重143kN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が確認された. 別途実施した3体の鉄筋の単体引張試験の結果では, 9,500~14,500 μのひずみで降伏棚を超えひずみ硬化



図-5 ひび割れ幅・鉄筋ひずみ分布図(No.2 試験体)

が始まっていたことから、この時点ではひび割れ位 置の鉄筋がひずみ硬化域に入っており、ひび割れ近 傍の引張応力が増加することで降伏領域が拡大して いると考えられる. 図-4 d)に示すように、No.1試 験体の最大ひび割れ幅4.9mm時点の計測結果では、 試験体の全長に亘り鉄筋ひずみが15,000 μ を超え、 ひずみ硬化域に達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. (4) 鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係

a)ひび割れ幅とひび割れ位置の鉄筋ひずみの関係

図-6にNo.1試験体,No.2試験体の加力時および除 荷後におけるひび割れ幅と,光ファイバセンサによ って計測された各ひび割れ位置の鉄筋ひずみの関係 を示す.ここでは,荷重143kN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スケッチした ひび割れ図に基づいて決定した.また,鉄筋ひずみ は対象としたひび割れ位置に最も近い計測点の結果 を用いた.

どちらの試験体も加力時,除荷後ともに,ひび割



れ幅が 1.0~1.5mm に達するまでは,ひび割れ幅に 対しひび割れ位置の鉄筋ひずみが一定の割合で増加 した.それ以降は,ひび割れ幅に対するひび割れ位 置の鉄筋ひずみの増分が小さくなり,ひび割れ位置 の鉄筋ひずみが増加していないにも関わらず,ひび 割れ幅が大きく拡大する関係となった.これは前述 のように,ひび割れ幅が 1.5mm を超える範囲ではひ び割れ位置の鉄筋がひずみ硬化域に達したことで, 同位置を中心とした降伏領域の拡大と同領域のひず みが増加することで,ひび割れ幅や残留ひび割れ幅 が拡大しているためであると考えられる.

# b) ひび割れ幅と鉄筋ひずみの積分値の関係

前述のとおり、ひび割れ幅にはひび割れ位置の鉄 筋ひずみの大きさだけでなく、その近傍の降伏領域 と同領域のひずみ分布が影響していることが確認さ れた.そこで、それらを考慮できる指標として、ひ び割れ間における鉄筋ひずみの積分値に着目してひ び割れ幅との比較を行った.図-7に、No.1試験体、 No.2試験体の加力時、および除荷後におけるひび割 れ幅と鉄筋ひずみの積分値の関係を示す.ここでも、 荷重143kN時点で発生していたひび割れを対象とし ており,前項で示した方法で決定した各ひび割れ位 置に基づき,隣り合うひび割れとの中点間をそれぞ れのひび割れに対する鉄筋ひずみの積分区間とした. 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線と,加力時,除荷後のそ れぞれの相関係数を併記した.

どちらの試験体も加力時,除荷後ともにひび割れ 幅と鉄筋ひずみの積分値は相関係数0.94~0.98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,どちらの試 験体も,ひび割れ幅が2.0mm以上の範囲では,荷重 143kN時点で発生していたひび割れ間に,新たに発 生した二次横ひび割れの拡大が影響していると推察



している.

#### (5) 残留ひび割れ幅と除荷前鉄筋ひずみの関係

以上の検討より,加力時および除荷後のひび割れ 幅とそのひび割れ近傍の鉄筋ひずみの積分値には, ひび割れ位置の鉄筋がひずみ硬化域に達した後でも 線形の相関関係があることを確認した.そこで,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(「除荷前 鉄筋ひずみの積分値」と称する)の関係を検証した.

図-8にNo.1試験体,No.2試験体の除荷後の残留ひ び割れ幅と除荷前鉄筋ひずみの積分値との関係を示 す.除荷前鉄筋ひずみの積分値の算出方法は,前節 で示した通りである.また同図には,両者の相関係 数と線形近似曲線を示している.

残留ひび割れ幅と除荷前鉄筋ひずみの積分値を線 形近似した結果,No.1試験体の相関係数は0.97, No.2試験体の相関係数は0.94を示したことから,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, どちらの試験体も, 残留ひび割れ幅が 0.5mm以下の範囲と, それ以上の範囲では残留ひび 割れ幅に対する除荷前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0.5mm 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上昇しても,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0.5mm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時に残留ひずみが生 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. そのため,残留ひび割れ幅に対する除荷前鉄筋ひず みの積分値の増分が,ひび割れ位置の鉄筋の降伏に よって変化したと考えられる.

また,No.1試験体とNo.2試験体の線形近似曲線の 傾きが異なる要因については,かぶりによる相違や 二次横ひび割れおよび縦ひび割れの発生やその拡大 が関係していると思われる.これらの要因による影 響の解明やそれを考慮するための補正方法について は,今後の課題としたい.

# 4. まとめ

本研究では、RC部材の表面における残留ひび割 れ幅とコンクリート内部の鉄筋ひずみの相関関係を 検証することを目的として、RC部材の両引き実験 を行った.その結果、残留ひび割れ幅とひび割れ間 における除荷前鉄筋ひずみの積分値に、高い相関が あることを確認した.

今後,残留ひび割れ幅に基づいたRC部材の損傷 の定量的な評価に向けて,かぶりや鉄筋比等の各種 要因が残留ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係に及ぼす 影響や,地震のような動的かつランダムな外力の作 用による損傷に対する適用性について検証を進めて いく予定である.

#### 参考文献

- 1) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編], 2017.
- 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, pp.102-110,2006.12
- 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,pp.85-100, 1980.2