

論文 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

十川 貴行*1・曾我部 直樹*2・平 陽兵*3

要旨: 地震を受けた RC 部材において、地震後の残留ひび割れ幅と鉄筋に生じたひずみの最大値との関係が明らかになれば、地震後の部材表面の計測から定量的に損傷度を評価することが可能になる。本研究では RC 部材の両引き実験において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加力時の鉄筋ひずみの積分値に強い相関関係があることを確認した。また、鉄筋ひずみの積分区間の設定が同関係に及ぼす影響を考察し、平均ひび割れ間隔の計算値を鉄筋ひずみの積分区間とすることで残留ひび割れ幅から RC 部材の損傷度を定量的に評価できる可能性を示した。

キーワード: 残留ひび割れ幅, RC 部材, 損傷度評価, 光ファイバセンサ, 両引き実験

1. 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、また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である。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、外力が作用した後における残留ひび割れ幅と外力が作用している段階で鉄筋に生じる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。

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があり、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の鉄筋の応力-ひずみ関係²⁾に示すように、鉄筋の残留ひずみと加力時に生じていた最大ひずみの大きさには一定の関係があるため、残留ひび割れ幅と加力時に鉄筋に生じていたひずみには相関関係がある可能性が考えられる。

そこで、本研究では、RC 部材の両引き実験における鉄筋ひずみ分布を光ファイバセンサで精緻に計測、評価した上で、残留ひび割れ幅とその近傍において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。また、同検証を通じて、残留ひび割れ幅に基づく RC 部材の損傷度の評価方法について検証した。

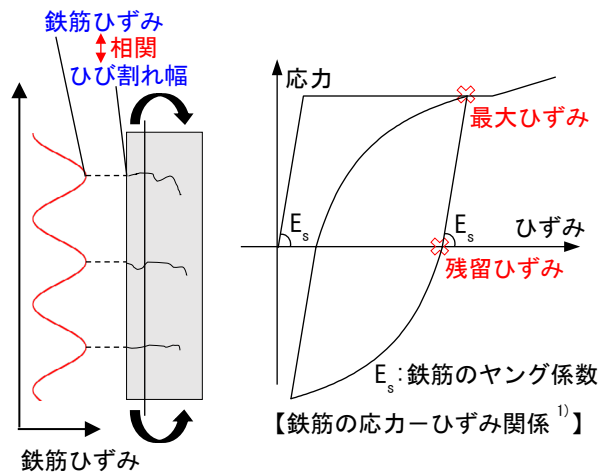


図-1 ひび割れ幅と鉄筋ひずみ、鉄筋の応力-ひずみ関係

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-2 に両引き実験における試験体の概要を、表-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 であり、断面中心に 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、一般的な RC 橋脚の軸方向鉄筋の近傍を想定して、かぶり厚が 55mm 程度となるように設定した。試験体の長さについては、各ひび割れ幅のばらつきを考慮して、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。

2.2 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。荷重ステップを表-2 に示す。鉄筋が降伏する前は、荷重と鉄筋断面積から算出した鉄筋応力度に基づき、鉄筋が降伏した後は、後述するパイ型変位計で計測

*1 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造グループ研究員 修(工) (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造グループ上席研究員 博(工) (正会員)

*3 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造グループ担当部長 修(工) (正会員)

した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。

2.3 計測項目

油圧ジャッキの荷重はロードセルによって計測し、ひび割れ幅は、試験体の片面にひび割れ間隔以下となる 100mm 間隔で全長に亘り配置したパイ型変位計（標点距離 100mm）によって計測した。以降に示すひび割れ幅の結果はパイ型変位計による計測値である。

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、光ファイバのコアに Fiber Bragg Grating (FBG) と呼ばれる回折格子が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（ひずみゲージの検長に相当）が 0.6mm、計測間隔が 0.6mm でひずみを計測することができる。光ファイバセンサは、写真-1 に示すように研磨を施した鉄筋表面にエポキシ系樹脂で接着した。

光ファイバセンサによる鉄筋ひずみの計測は、各荷重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。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの分布

図-3 に各荷重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/mm²の結果（図-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（図-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 2.0mm, 3.0mm, 4.0mm の結果（図-3(c),(d),(e)）をそれぞれ示す。

(1) 鉄筋応力度 180N/mm² 時点

鉄筋の降伏前である鉄筋応力度 180N/mm² 時点では、複数のひび割れが発生した。図-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 400 μ 程度まで減少し、残留ひび割れ幅は

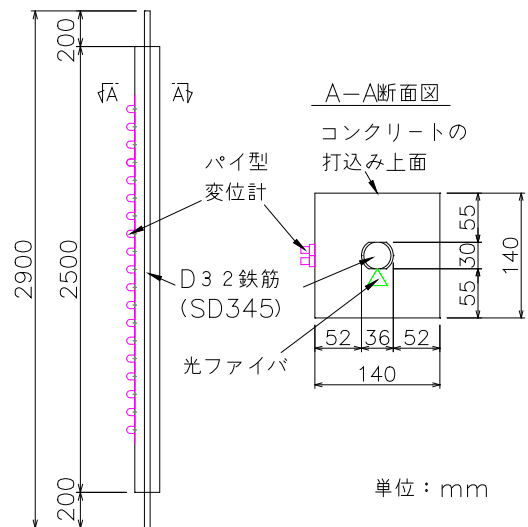


図-2 試験体概要

表-1 材料試験結果

材料	項目	
コンクリート (実験時)	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

表-2 荷重ステップ

	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

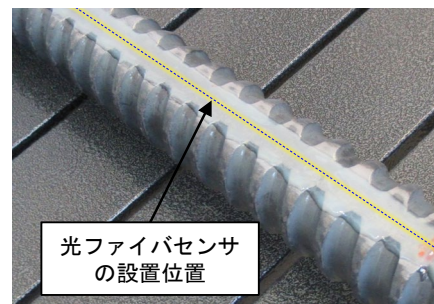


写真-1 鉄筋に設置した光ファイバ

0.1mm 以下であった。

(2) 最大ひび割れ幅 1.1mm 時点

図-3(b)に示すように、最大ひび割れ幅 1.1mm の時点では、試験体下端から約 2,200mm の位置で加力時の鉄筋ひずみが局所的に降伏ひずみ 2,079 μ を超え、15,000 μ 程度まで増加し、鉄筋が同位置で降伏したことを確認した。同位置のひび割れ幅も鉄筋ひずみの増加に伴い 1.1mm 程

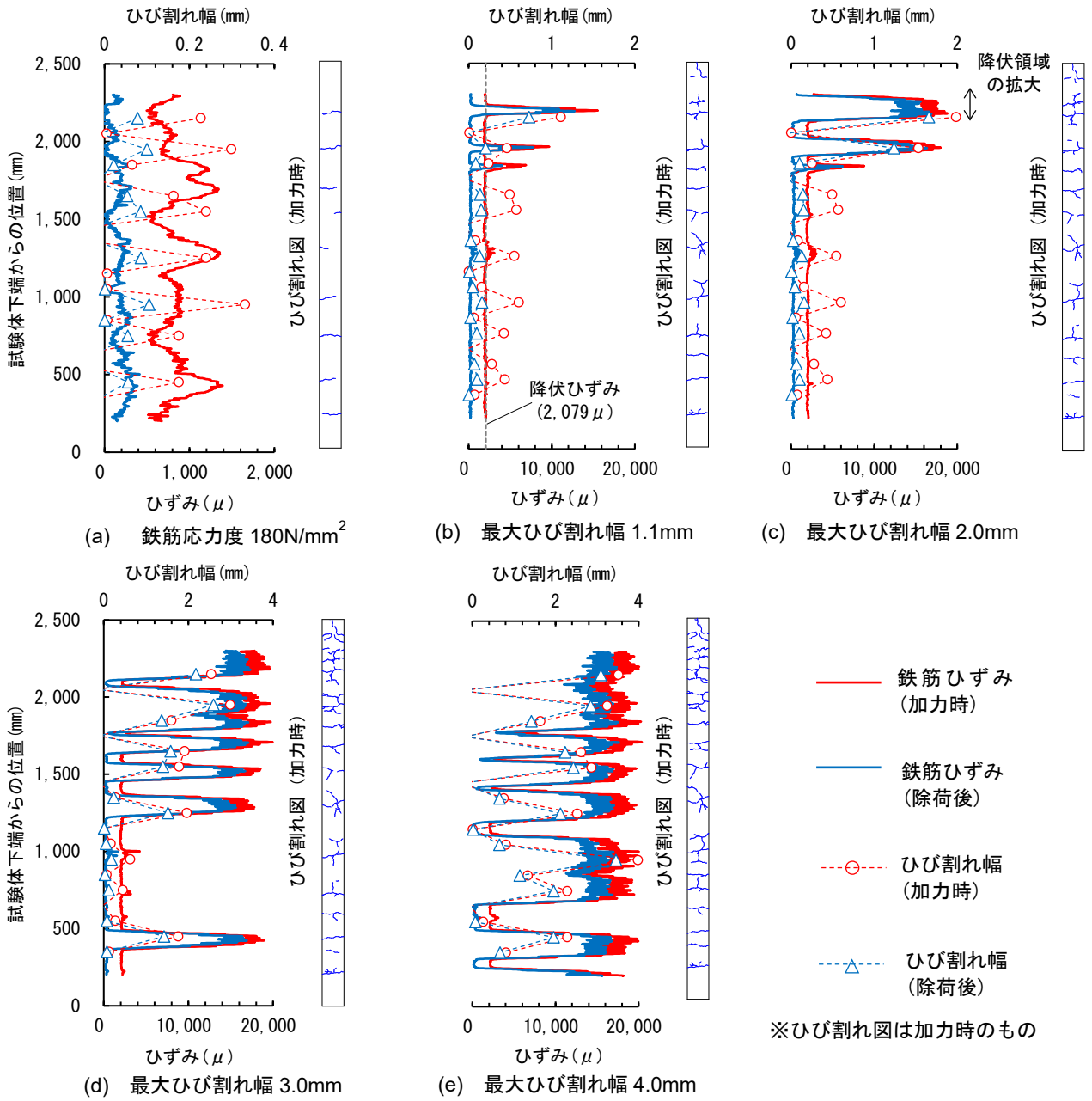


図-3 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの分布図

度まで増加した。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降伏ひずみに相当する $2,000\mu$ 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 $180\text{N}/\text{mm}^2$ 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。

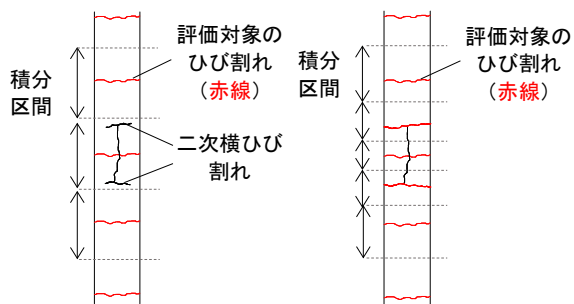
(3) 最大ひび割れ幅 2.0mm, 3.0mm, 4.0mm 時点

図-3(c)に示すように、最大ひび割れ幅 2.0mm 時点では、試験体下端から約 2,200mm 付近で、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 $180\text{N}/\text{mm}^2$ 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、図-3(c)の最大ひび割れ幅 2.0mm の時点では、ひび割れ位置の鉄筋がひずみ硬化域に入り引張応力が再度増加を始めたことで、ひび割れ位置を中心として鉄筋の降伏領域が拡大したと考えられる。

図-3(d)の最大ひび割れ幅 3.0mm 時点では、複数のひび割れ位置にて前述のように鉄筋ひずみが $15,000\mu$ を超えてひずみ硬化域に達することで、ひび割れ周囲の降伏の領域が拡大し、それに伴いひび割れ幅も 3.0mm 程度まで増加した。

図-3(e)の最大ひび割れ幅 4.0mm 時点では、降伏領域がさらに広がっており、同位置のひび割れ幅が拡大している様子を確認した。また、一部では降伏領域が二次横



(a) 二次横ひび割れが試験体の全周に亘り進展していない場合 (b) 二次横ひび割れが試験体の全周に亘り進展した場合

図-4 対象とするひび割れと積分区間の設定

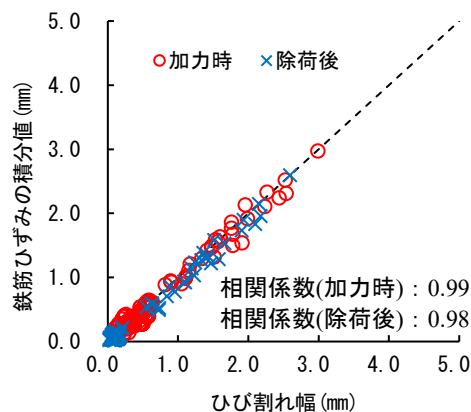
ひび割れを跨ぐ形で拡大しており、それに伴い二次ひび割れの幅も拡大した。

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。

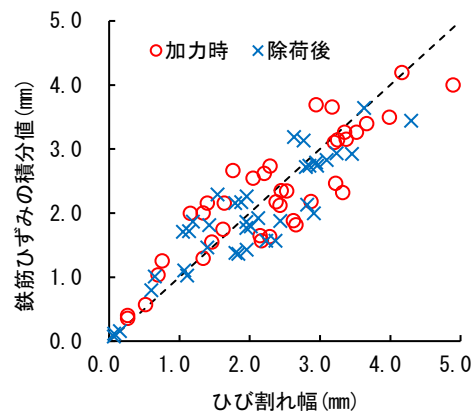
3.2 加力時および除荷後におけるひび割れ幅と鉄筋ひずみの積分値の関係

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き出し量の和とすると、ひび割れ幅はひび割れ近傍の鉄筋ひずみの積分値と同値であると考えられる。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、パイ型変形計で計測したひび割れ幅と比較した。ここでは、試験体の全周に亘り進展したひび割れを対象としており、その位置は試験時に目視観察した結果に基づき決定した。図-4に示すように鉄筋の降伏後に発生した二次横ひび割れは、発生当初には試験体の全周に亘り進展していなかったことから対象から除外しており、加力に伴い二次横ひび割れが試験体の全周に亘り進展した時点で対象に加えた。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中間間とした。

上述した設定に基づき算出したひび割れ近傍の鉄筋ひずみの積分値と同位置のひび割れ幅との関係を図-5に示す。図-5(a)には最大ひび割れ幅 3.0mm までのステップを対象にした結果を示しているが、加力時、除荷後ともにひび割れ幅と鉄筋ひずみの積分値がほぼ同値であり、相関係数 0.99, 0.98 といった高い相関にあることを確認した。一方、図-5(b)には、最大ひび割れ幅 3.4mm から 4.9mm の結果を示しているが、最大ひび割れ幅 3.0mm 時点までの結果に比べ、加力時、除荷後ともに相関係数が 0.89, 0.88 と低下した。最大ひび割れ幅 3.0mm 時点までは、鉄筋の引張応力度 180N/mm² の時点で発生していたひび割れを中心として鉄筋の降伏領域が広がることで同



(a) 最大ひび割れ幅 3.0mm のステップまでの結果



(b) 最大ひび割れ幅 3.4~4.9mm のステップまでの結果

図-5 ひび割れ幅と鉄筋ひずみの積分値の関係

ひび割れ幅も拡大しており、二次横ひび割れ幅に対する影響は小さかった。最大ひび割れ幅 3.4mm 以降では、鉄筋の降伏領域が二次横ひび割れを跨ぐ形で広がり、同二次横ひび割れ幅も拡大する傾向が確認されており、ひび割れ幅に影響する鉄筋ひずみ分布の範囲が大きく変化した可能性がある。そのため、隣り合うひび割れの中間間を積分区間として鉄筋ひずみ分布から算出した鉄筋ひずみの積分値との相関が低くなったと考えられる。

3.3 残留ひび割れ幅と加力時の鉄筋ひずみの積分値の関係

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の関係(「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。図-6に残留ひび割れ幅と加力時の鉄筋近傍の積分値との関係を示す。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、二次横ひび割れの影響が少ない最大ひび割れ幅 3.0mm 時点までの結果を対象としている。残留ひび割れ幅が 0.2mm 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 0.2mm 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、加力時の鉄筋ひずみの増加に対して残留ひび割れ幅の増加は小さい傾向にある。これに対して、残留ひび

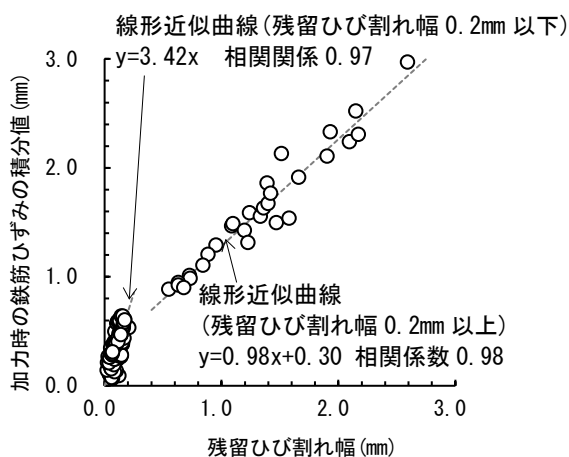


図-6 残留ひび割れ幅と
加力時の鉄筋ひずみの積分値の関係

割れ幅が 0.2mm 以上の範囲では、ひび割れ位置の鉄筋が降伏して除荷後に塑性ひずみが残留するため、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傾向がある。このことから、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がひび割れ位置近傍における鉄筋の降伏の前後で変化することが確認できた。なお、図-6には、残留ひび割れ幅が 0.2mm 以下と 0.2mm 以上の範囲のそれぞれにおける線形近似曲線と相関係数も示しているが、どちらも相関係数 0.97 、 0.98 と高い相関係数があることが確認できる。

以上より、残留ひび割れ幅が最大 2.6mm の範囲において、残留ひび割れ幅と加力時のひび割れ近傍における鉄筋ひずみの積分値に高い相関があることが確認できた。

4. 鉄筋ひずみの積分区間がひび割れ幅との関係に及ぼす影響

残留ひび割れ幅と加力時におけるその近傍の鉄筋ひずみの積分値との関係には、ひび割れに影響する範囲として設定される鉄筋ひずみの積分区間が影響することが考えられる。前述した考察では、実験で確認されたひび割れ間隔から、ひび割れ毎に積分区間を設定したが、実際のRC部材では、ばらつきを持つひび割れ間隔を個別に設定することは煩雑となる。そこで、実験における最大および平均ひび割れ間隔の実測値と、コンクリート標準示方書に基づき設定した最大および平均ひび割れ間隔の計算値を鉄筋ひずみの積分区間として設定した場合における両者の相関について考察した。

4.1 積分区間の設定

実験におけるひび割れ間隔の算定において、対象とするひび割れは図-4に示す方法で設定した。実験における最大ひび割れ間隔の実測値は全てのステップにおいて 314mm で、平均ひび割れ間隔の実測値は $185\sim 244\text{mm}$ であった。

コンクリート標準示方書¹⁾に示されているひび割れ幅の算定式は、ひび割れ間隔にひび割れ近傍の鉄筋ひずみを乗ずる形で定式化されている。趙ら⁴⁾の検討では、式(1)に示されるコンクリート標準示方書によるひび割れ間隔は、部材の最大ひび割れ間隔を示していることを明らかにしている。同式で算出された本試験体における最大ひび割れ間隔の計算値は 292mm である。

$$L = k_1 k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \quad (1)$$

ここで、 L : 最大ひび割れ間隔 (mm)、 k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す定数 (異形鉄筋の場合 1.0)、 k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数、 c : 引張鉄筋のかぶり (mm)、 c_s : 引張鉄筋の中心間隔 (mm)、 ϕ : 引張鉄筋の径 (mm) である。

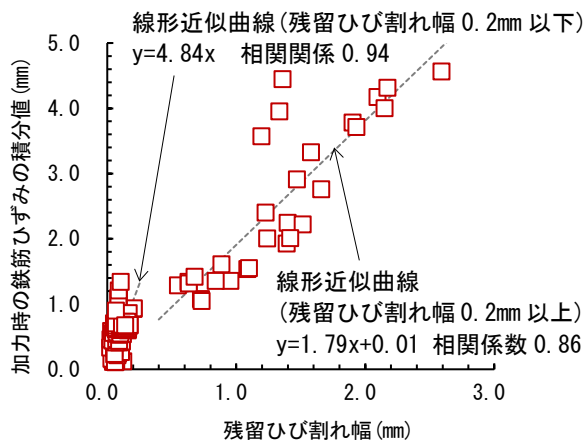
また、趙ら⁴⁾の検討では、式(1)で算出された値の $1/1.5$ が部材の平均ひび割れ間隔に相当することを明らかにしており、この知見に基づく本試験体における平均ひび割れ間隔の計算値は 195mm となる。

4.2 結果

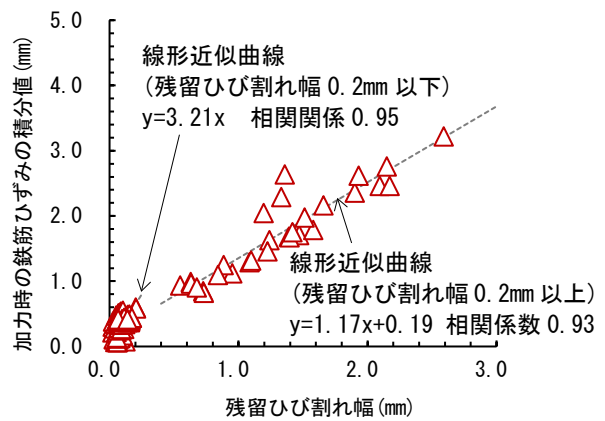
図-7に、ひび割れ位置を中心に上述した最大、平均ひび割れ間隔の実測値およびコンクリート標準示方書に基づく計算値を積分区間として算出した加力時の鉄筋ひずみの積分値と、残留ひび割れ幅との関係を示す。同図には最大ひび割れ幅 3.0mm 時点までの結果を示している。また対象とするひび割れは図-4に示す方法で設定した。

図-7(a)に、最大ひび割れ間隔の実測値を積分区間として算出した加力時の鉄筋ひずみの積分値と残留ひび割れ幅の関係を示す。同図には、残留ひび割れ幅が 0.2mm 以下と 0.2mm 以上の範囲のそれぞれにおける両者の線形近似曲線を示しているが、図-6に示す積分区間をひび割れ毎に設定して算出した結果における線形近似曲線に比べて傾きが大きかった。これは最大ひび割れ間隔を積分区間とすることで、積分区間内に複数のひび割れの影響が含まれてしまうことが要因であると考えられる。一方、図-7(b)に示す、平均ひび割れ間隔の実測値を鉄筋ひずみの積分区間とした場合における加力時の鉄筋ひずみの積分値と残留ひび割れ幅の関係は、図-7(a)に示す結果と比べて相関係数が高くなり、両者の線形近似曲線の傾きも図-6に示す結果と同等となった。

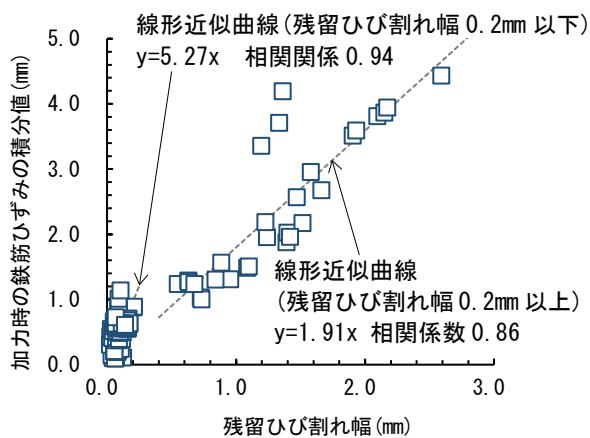
図-7(c)、(d)には、コンクリート標準示方書に基づく最大および平均ひび割れ間隔の計算値を鉄筋ひずみの積分区間とした場合の加力時の鉄筋ひずみの積分値と残留ひび割れ幅の関係を示している。こちらも実測値に基づく結果と同様に、平均ひび割れ間隔を用いた方が相関係数が高くなり、両者の線形近似曲線の傾きも図-6に示す結果と同等であることが分かる。限られた範囲での検証ではあるが、平均ひび割れ間隔の計算値を鉄筋ひずみの積分区間とすることで、ひび割れ毎に積分区間を設定



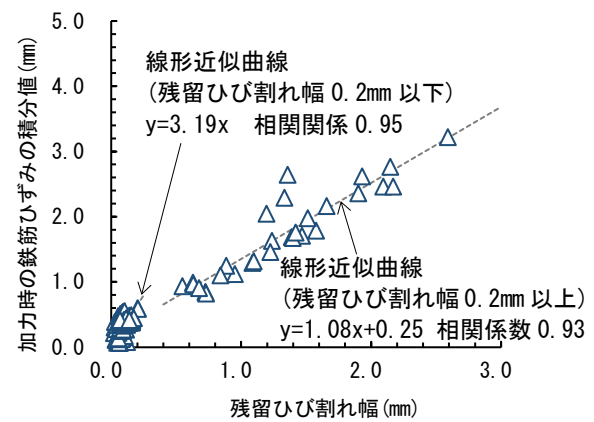
(a) 最大ひび割れ間隔の実測値 314mm を積分区間



(b) 平均ひび割れ間隔の実測値 185~244mm を積分区間



(c) 最大ひび割れ間隔の計算値 292mm を積分区間



(d) 平均ひび割れ間隔の計算値 195mm を積分区間

図-7 鉄筋ひずみの積分区間が残留ひび割れ幅と鉄筋ひずみの積分値の关系到及ぼす影響

しなくても、残留ひび割れ幅と加力時の鉄筋ひずみの積分値との間に一定の相関が得られることが確認できた。

5. まとめ

本研究では、RC 部材の両引き実験における鉄筋ひずみ分布を光ファイバで精緻に計測し、部材表面に生じるひび割れ幅と鉄筋ひずみとの関係について考察を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 両引き実験において、鉄筋が降伏するまではひび割れ位置の鉄筋ひずみが増加し、降伏後はひび割れ位置を中心として鉄筋の降伏領域が拡大することで、ひび割れ幅が増加することを確認した。
- 2) 隣り合うひび割れの中点間を積分区間として算出した加力時の鉄筋ひずみの積分値と残留ひび割れ幅の間に高い相関関係を有することを確認し、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。
- 3) コンクリート標準示方書に基づく計算値を鉄筋ひずみの積分区間とすることで、ひび割れ毎に積分区間を設定することなく、残留ひび割れ幅の結果のみから加力時の鉄筋ひずみの積分値を評価できる可能性

を示した。

今回、得られた知見は両引き実験で確認された範囲に限定されるものであり、残留ひび割れ幅と加力時の鉄筋ひずみの関係には、かぶりや鉄筋の降伏強度等も影響することが考えられる。また、地震による損傷の評価を行う場合には、繰返しの影響や最大応答経験後の震動による影響なども考慮する必要があり、これらについては、今後の課題であると考えている。

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，pp.102-110，2006
- 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
- 4) 趙唯堅，丸山久一；鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅算定式の再評価，土木学会論文集，No.490，V-23，pp.147-156，1994