

鉄筋コンクリート二次壁の損傷評価に寄与する画像解析を用いたひび割れ特性の評価

ASSESSMENT OF CRACK PROPERTY USING IMAGE ANALYSIS FOR DAMAGE ESTIMATION OF RC NON-STRUCTURAL WALL

高橋昌道 — * 1 松林美樹 — * 1
窪田凌平 — * 1 高瀬裕也 — * 2
溝口光男 — * 3

Masamichi TAKAHASHI — * 1 Miki MATSUBAYASHI — * 1
Ryohei KUBOTA — * 1 Yuya TAKASE — * 2
Mitsuo MIZOGUCHI — * 3

キーワード：
鉄筋コンクリート, 画像解析, ひび割れ幅, RC 方立壁

Keywords:
Reinforced concrete, Image analysis, Crack width, RC non-structural wall

In this paper, we developed a crack width measurement program by image analysis and carried out an actual size loading experiment of RC nonstructural wall with parameters of rebar interval and rebar ratio. As a result, it was found that the width and the slip on the cracks increased with the increase of the reinforcing bar interval, and there was no effect on the crack width due to the difference in the reinforcing bar ratio. Moreover, the crack width density distribution and the slip were measured by an image analysis.

1. はじめに

近年の日本における大規模な地震において, 新耐震基準を満たしている建物であれば構造的な被害は少ない。しかし, 二次壁などの非構造部材においては損傷被害が数多く報告され¹⁾, 建物の継続使用性に支障をきたしている。写真1に近年の二次壁の損傷被害の例を示す。写真から分かるように, 開口部に挟まれた方立壁に被害が集中している。この要因の一つとして, 設計時に部材の損傷量を正確に把握できないことが指摘される。そこで, コンクリートの力学挙動と損傷量を定量的に結びつけた, 性能設計法が必要であると考えられる。

上記の課題解決に向け, まずはRC部材における損傷量の評価手法から検討する。コンクリートの損傷指標の一つであるひび割れ幅は, 一般的にクラックスケールを用いて計測されるが, この従来の計測手法では, 局所的な損傷しか評価できないことに加え, 計測者の主観による計測値のばらつきが考えられる。近年ではデジタルカメラの発展から, 様々な分野で画像解析を用いた研究が行われるようになっており, コンクリート工学分野においても, 画像解析を用いた研究が既に幾つか見受けられる。コンクリート工学分野における, 画像解析を用いるメリットとして, 全域的な計測であることから, 従来の計測手法では得ることが難しい, もしくは不可能な分析データも得ることができることが挙げられる。

そこで著者らは, 図1に示すように, 全域的かつ定量的にひび割れ幅を計測するため, 画像解析手法を用いてひび割れ幅を計測する。本報告では, 画像解析による計測について開発・検証を行い, 鉄筋間隔および鉄筋比をパラメータとする RC 造方立壁を模擬した実大試験体4体の載荷実験を実施し, 開発した手法を用いて, 鉄筋間隔および鉄筋比の違いによるひび割れ特性について若干の考察を行いつつ, 本計測手法の有用性について検討することを目的とする。



写真1 近年の二次壁の損傷被害の例

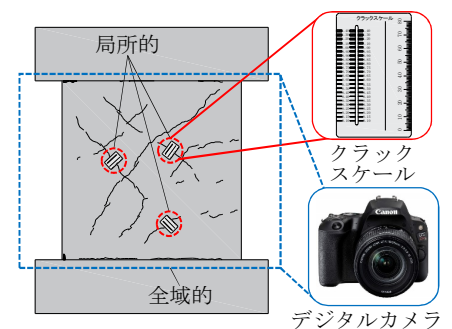


図1 従来の計測手法と画像解析による計測手法

2. 画像解析プログラムの開発

2.1 画像解析手法の概要

コンクリートを対象にした画像解析によるひび割れの計測は既に幾つか行われている。車谷ら²⁾は, 画像関連法と呼ばれる手法を用いてひび割れの進展挙動の計測・可視化について検討している。滝本ら³⁾は, 画像データ上にマスク帯を格子状に設定し, マスク帯上のひび割れ領域からひび割れ幅やひび割れ角度, ひび割れ長さを求めている。周ら⁴⁾は, ひび割れ領域の任意の外郭画素と, 隣接した外郭画素同士を結ぶ接線から接線と垂直な線で挟まれた範囲にある最短距離となる外郭画素を求め, 二点を結ぶ距離をひび割れ幅候補として計測を行っている。本報告では, 二次壁を対象としていることや, 求める損傷量の関連性から, 周らの研究を参考に, ひび割れ領域のピクセル数から計測を行う。図2に本計測手法における計測フローを示す。

2.2 画像の前処理

本プログラムでは, ひび割れを含む試験体全体の画像から, ひび割れ領域のみを抽出してひび割れ幅を計測する。そのため, 画像に前処

¹⁾ 室蘭工業大学大学院工学研究科環境創生工学系専攻 大学院生 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1)

²⁾ 室蘭工業大学大学院工学研究科もの創造系領域 准教授・博士 (工学)

³⁾ 室蘭工業大学大学院工学研究科 教授・博士 (工学)

¹⁾ Grad. Student, Division of Sustainable and Environmental Engineering, Muroran Institute of Technology

²⁾ Assoc. Prof., College of Design and Manufacturing Technology, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

³⁾ Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

理を施した後、コンクリート面に対して、ひび割れ領域を明るさの違いから抽出する。

(1) 画像の補正

画像の補正は、画像の傾きを正面に修正する射影変換に代表される幾何学的変換や、画像中の計測に必要な部分のみを切り取るトリミング、画像の輪郭を強調するアンシャープマスク、被写体の照度分布のムラを取り除くためのオープニング処理またはクローズ処理を利用したフィルタの作成、光学レンズにおいて発生する像を歪ませる収差を補正して歪みのない画像を取得するカメラキャリブレーションなど、様々なものが存在する。それに加えて、カメラの性能上、撮影面積の大きな試験体の解析を行う場合、カメラを複数台使用した撮影が求められるため、イメージの位置合わせを行うレジストレーション推定などによって、複数の画像を一つの画像に合わせる処理も求められる。本プログラムでは、解析を行う試験体の撮影状況や撮影機材に応じて、画像に適用させる補正の選択や調整を行う。

(2) ひび割れ領域の抽出

画像解析を用いたひび割れ幅の計測と同時に、画像解析を用いてコンクリート表面のひずみを計測する手法がある。ひずみの計測方法としては、シールなどの標点をコンクリート表面に添付し、標点の移動量からひずみを計測する手法⁹⁾や、コンクリートにランダム模様を付与し、特徴マッチングによりひずみを求めるデジタル画像相関法⁹⁾がある。これらを行う場合、コンクリート表面に何らかの指標となる標点などのマーキングを施すため、ひび割れ幅の計測にマーキングが影響を及ぼす。そのほかにも実験の都合上、試験体にグリッド線や、発生したひび割れにトレース線を加筆することがある。そのため、これらの計測と並行してひび割れ幅を計測する際に、マーキングやトレース線を除去する必要がある。図3にひび割れ領域抽出の例を示す。これらを除去する手法として、マーキングに赤などの鮮やかな色を用い、画像を赤・緑・青で表されるRGB色空間から、色相・彩度・明度で表すHSV色空間に変換し、図3(b)のように彩度のみを抽出することで、マーキングのみを取り出したマスクを作成できる。このマスクを、図3(a)の強度画像から差し引くことで、図3(c)のひび割れ領域のみを抽出することが可能となる。

(3) ノイズの除去

本手法では、ひび割れ領域をコンクリートとの明るさの違いから抽出するが、試験体には施工の関係上、気泡や型枠跡、色ムラなど、ひび割れ以外にもノイズが含まれる。ノイズの除去を適切に行わない場合、損傷量の計測誤差が発生してしまうため、適切にノイズを除去する必要がある。

図4にノイズマスク適用例を示す。ノイズ除去の手法は、二値化を行った後に、任意の閾値以下の面積を持つ黒色領域を除去するのが最も簡単な処理であるが、この手法では、大きな面積を持つノイズを除去しきれないこと、閾値を大きくし過ぎるとひび割れ領域まで除去されてしまうことが問題となる。そこで、載荷前の試験体の画像をノイズマスクとし、図4(a)の解析対象の画像から差し引くことで、図4(c)のように試験体に最初から存在していた気泡などの模様を取り除くことができる。この時、載荷の影響によりノイズの位置が多少変動することがあるため、図4(b)のようにノイズマスクに膨張処理を適用し、ノイズ位置の変動に影響されないように考慮した。

2.3 ひび割れ幅の計測手法

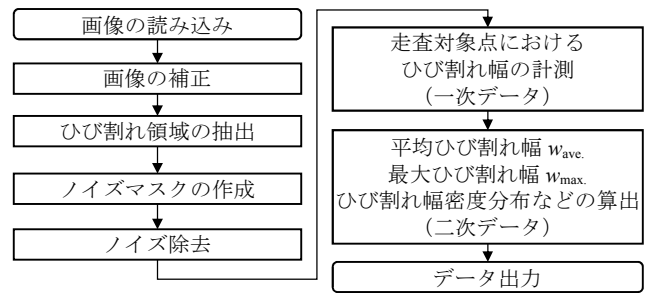


図2 計測フロー

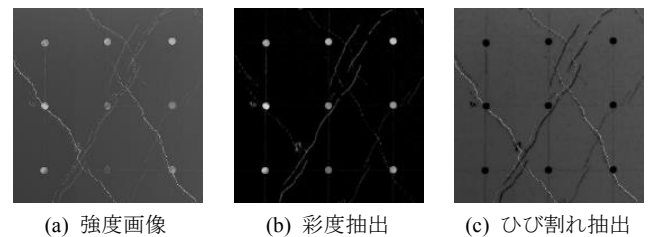


図3 彩度を用いたひび割れ領域抽出の例

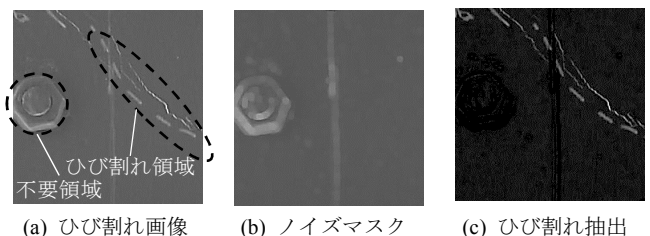


図4 ノイズマスク適用例

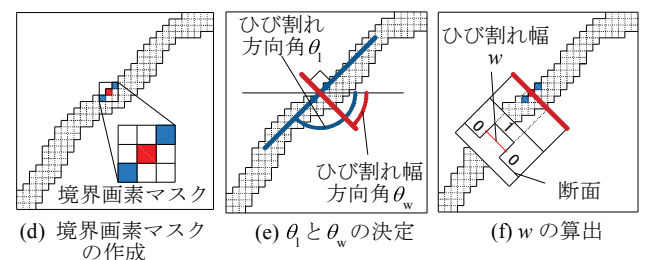
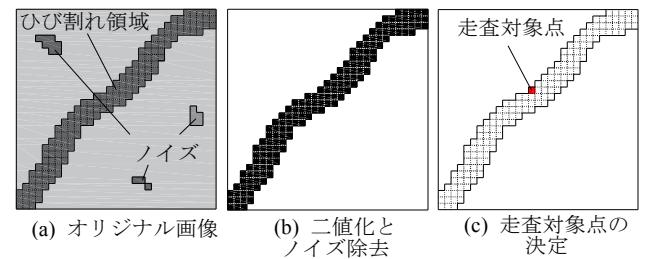


図5 画像解析によるひび割れ幅計測手法の概要

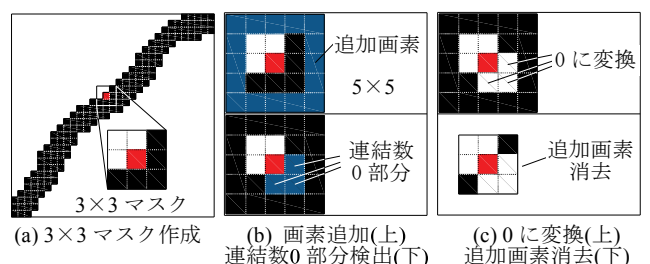


図6 隣接画素検出の流れ

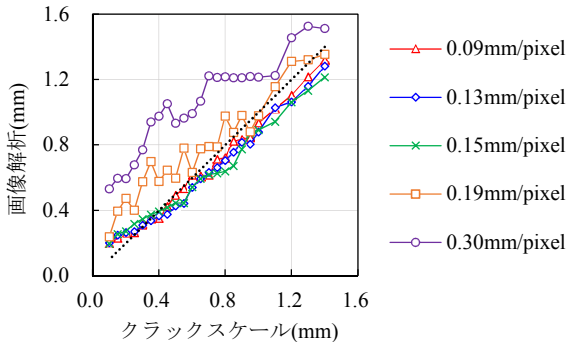


図7 キャリブレーション結果

図5に画像解析によるひび割れ幅計測手法の概要を示す。この手法では、前述した様々な処理を行い、図5(a)のオリジナル画像から図5(b)のひび割れ領域を取り出す。その後、ラスタースキャンを行い、注目画素が1かつ0から4の間で定まる連結数が1以上の時、ひび割れ領域の外郭画素と決定され、この時の注目画素を図5(c)のように走査対象点とする。尚、連結数は8近傍連結を用いている。次に、ひび割れ方向角 θ_l とひび割れ幅方向角 θ_w を算出するため、走査対象点に隣接する外郭画素を求める必要がある。隣接画素検出方法は、幾つかの手法を検討した結果、図6に示す手法が最も効率良く検出することができた。まず、図6(a)に示すように走査対象点を中心に3×3のマスクを作成し、その周囲に画素を追加すると図6(b)上になる。そして5×5のマスクから図6(b)下と図6(c)上の連結数が0の部分を取り除き、図6(c)下のように追加画素を消去することで、図5(d)の走査対象点と隣接画素だけ取得することができる。求めた隣接画素二点から、図5(e)のひび割れ方向角 θ_l とその法線方向のひび割れ幅方向角 θ_w を求める。走査対象点を中心に、図5(f)に示すように θ_w 方向のピクセル断面を求め、値が1の領域の幅と、1ピクセル当たりの単位長さ l_p からひび割れ幅 w の計測を行う。

その後、計測した全てのひび割れ幅 w から、平均ひび割れ幅 w_{ave} や最大ひび割れ幅 w_{max} を求めるほかに、新たな損傷評価手法として、ひび割れ幅密度分布図を作成する。ここで扱うひび割れ幅密度 Ω は、ひび割れ幅の存在確立であり、式(1)に示す通り、 $w=0\text{mm}$ から w_{max} までの区間の積分値が1となる関数である。

$$\int_0^{w_{max}} \Omega(w) dw = 1 \quad (1)$$

2.4 開発したプログラムのキャリブレーション

画像解析の精度は、画像データの画素数と撮影面積に依存すると推測される。そこで、 l_p を調節し、開発したプログラムによるひび割れ幅計測精度を確認するキャリブレーションを行う。これには正確な幅を持つものが必要であるため、被写体には最小値が0.1mmのクラックスケールを用いた。図7にキャリブレーション結果を示す。 l_p は、幾つかのパターンに設定した結果、凡例に示す通りとなった。横軸は、クラックスケールに記載されているひび割れ幅、縦軸は画像解析によって計測された平均ひび割れ幅であり、中央の点線に近いほど、精度良く計測される。0.30mm/pixelの場合では、細かく変動するクラックスケールの値を大まかにしか追っていないのに対し、0.09mm/pixel, 0.13mm/pixel, 0.15mm/pixelの場合では±0.1mm程度の誤差は発生しているものの、比較的良好にクラックスケールの値を追っている。この結果から画像解析によるひび割れ幅は、おおそ実

表1 各試験体パラメータ

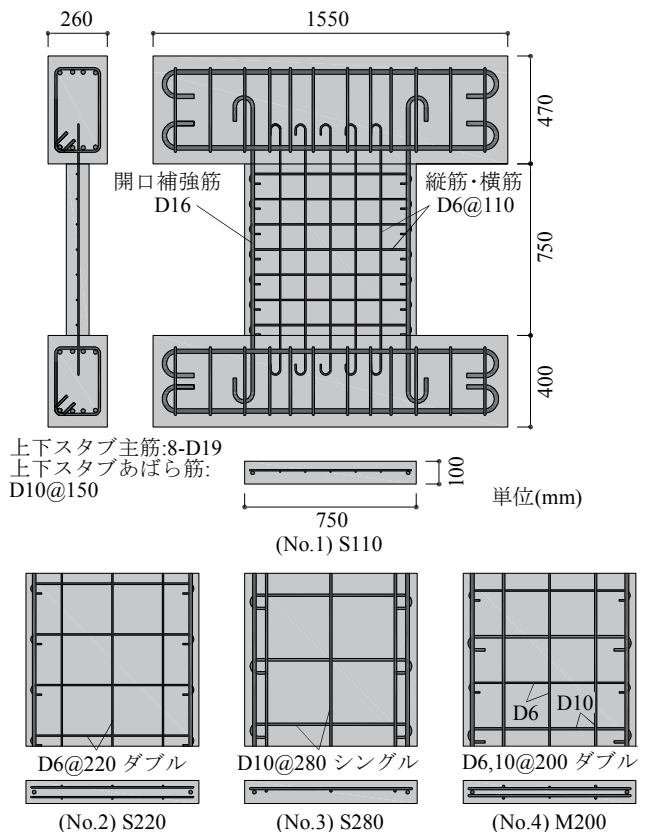
| 試験体名 | S110 | S220 | S280 | M200 |
|---------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| 壁厚(mm) | 100 | | | |
| 壁長さ(mm) | 750 | | | |
| 壁高さ(mm) | 750 | | | |
| かぶり厚さ(mm) | 36 | 20 | 40 | 20 |
| 開口補強筋 | D16(SD345) | | | |
| 壁筋 | D6@110 シングル (SD295A) | D6@220 ダブル (SD295A) | D10@280 シングル (SD295A) | D6,D10@200 ダブル (SD295A) |
| 壁筋比(%) | 0.29 | 0.29 | 0.26 | 0.52 |
| $\sigma_B(\text{N/mm}^2)$ | 27.5 | 27.0 | 25.9 | 26.8 |
| 軸圧縮力(kN) | 308 | 303 | 291 | 300 |
| | 軸応力比 0.15 | | | |

σ_B :コンクリートの圧縮強度

表2 鉄筋の材料試験結果

| 鋼種 | $\sigma_y(\text{N/mm}^2)$ | $\sigma_u(\text{N/mm}^2)$ | $E_s(\text{N/mm}^2)$ | $\epsilon_s(\%)$ |
|-------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|------------------|
| D6(SD295A) | 439 | 571 | 1.84×10^5 | 0.25 |
| D10(SD295A) | 400 | 549 | 1.72×10^5 | 0.24 |
| D16(SD345) | 387 | 580 | 1.75×10^5 | 0.24 |

σ_y :降伏強度, σ_u :引張強度, E_s :ヤング係数, ϵ_s :降伏時ひずみ



※スタブは全試験体共通であるため、S110のみ表記。

図8 試験体概要

際のひび割れ幅 $\pm l_p$ の範囲で計測されており、ひび割れ幅計測精度は l_p に依存することが改めて確認できた。

3. 実験計画

開発した手法を用いて、実際の試験体を対象にせん断荷重実験を行い、試験体に発生するひび割れ幅を計測する。

3.1 試験体の諸元

表1, 表2, および図8に, 各試験体パラメータ, 鉄筋の材料試験結果, 各試験体形状をそれぞれ示す。4体の試験体は, 開口間にある正方形のRC造方立壁を想定した実寸法となっている。コンクリート強度は24-27N/mm²程度を目標とし, 骨材は最大骨材寸法が20mmの一般的なものを使用した。本実験では鉄筋間隔および鉄筋比をパラメータとした。まず, S220を基準の配筋とし, D6@220ダブルで鉄筋比が0.29%とする。S110およびS280は, 鉄筋比がS220と同程度であり, それぞれ鉄筋間隔が異なる。S110はD6@110シングル, S280はD10@280シングルである。M200は鉄筋間隔がS220と同程度であり, D6, D10@200ダブルとし, 鉄筋比が0.52%とS220のおおよそ倍の値である。開口補強筋は全ての試験体でD16を用いる。

3.2 荷重装置と荷重計画

図9に荷重装置図を示す。本実験では, 逆対称曲げ荷重とするため, 鉛直方向の2本のアクチュエータにより, 上下スタブの平行を保持しつつ, 2本の合計軸圧縮力が目標値になるように制御する。水平方向は, 上スタブの水平変位を壁高さ750mmで除した値を部材角 R とし, $R = \pm 0.001\text{rad.}, \pm 0.002\text{rad.}, \pm 0.003\text{rad.}, \pm 0.004\text{rad.}, \pm 0.005\text{rad.}$ と R を0.001rad.ずつ増加させ, 最後に正側に押切る正負交番繰り返し漸増荷重とした。

3.3 撮影計画

(1) 撮影条件

写真2に本実験における撮影状況を示す。本実験で用いるデジタルカメラは, 有効画素数は約2420万画素(デジタルデータ上は6,000pixel×4,000pixel), センサーサイズはAPS-Cと, 一般的な性能を有している。2.4節に記したキャリブレーション実験の結果から, l_p が大きいくほど計測精度が低下するが, l_p を小さくするほど1台のカメラで撮影可能な面積は減少するため, カメラ台数を増やす必要があり, それに伴い解析の手間も増加する。そこで, カメラ台数を最低限に抑えつつ, ある程度の計測精度が期待できるように, カメラの台数を2台に設定し, l_p が0.15mm/pixel程度になるように調節した。この時の1台当たり撮影可能面積は900mm×600mmである。

また, 使用したカメラは収差補正機能が備わっているため, カメラキャリブレーションの工程は省略する。

(2) 照明

試験体に発生するひび割れを明瞭に撮影するためには, 良好な明るさが必要とされる。明るさが不十分であると, 試験体に影が発生したり, ひび割れを画像解析上判別できなくなったりすることが懸念される。そこで, 試験体の明るさを十分に保つため, 5,000lmの白色LEDライトを4台使用し, カメラ後方から試験体を照らした。

(3) 撮影スケジュール

撮影スケジュールは, せん断荷重スケジュールに合わせて, 各サイクルにおいて変形角がおおよそ $1.33 \times 10^{-4}\text{rad.}$ から $1.67 \times 10^{-4}\text{rad.}$ 変化するごとに撮影を行う。ただし, データが過大になることを避けるため, 減力時や, 既に経験した変形角においては撮影を行わず, 変形角が新規領域に達した時のみの撮影とした。そのほかにも, 各サイクルのピークに達した後のひび割れスケッチ後や, 水平荷重の正負が入れ替わる荷重が0のタイミングで撮影した。

また, カメラのリリーズは, カメラのずれや安全面, データ管理の簡便さから, カメラ本体のシャッターボタンやリモートリリーズは使

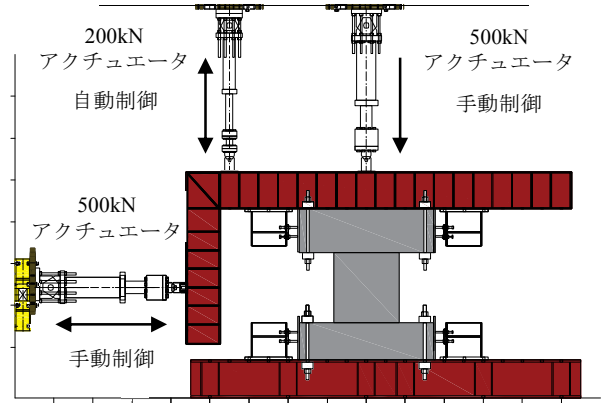


図9 荷重装置図

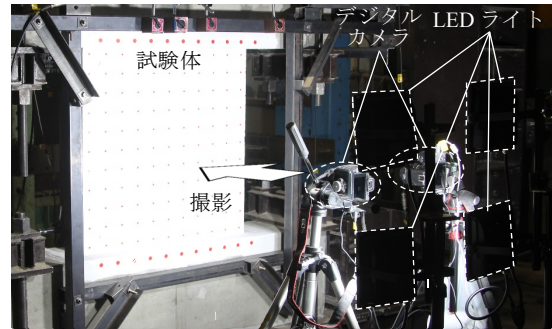


写真2 撮影状況

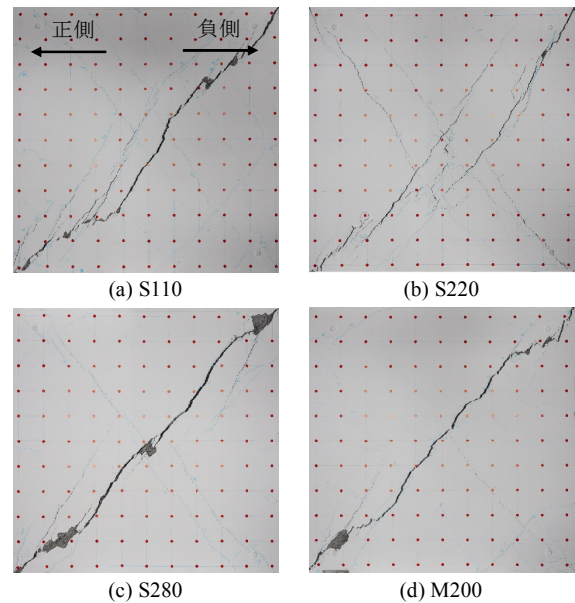


写真3 各試験体の最終破壊状況

用せず, カメラをPCとUSB接続し, PC上からプログラムによるリリーズの同期を行いつつ2台のカメラを制御した。

4. 実験結果

写真3に各試験体の最終破壊状況を示す。全ての試験体において, せん断型の破壊が観察された。

4.1 荷重変形曲線

図10に荷重変形曲線を示す。図に示す点は各試験体の最大耐力を示しており, 図中の Q_{max} , R_{max} は, それぞれ最大耐力と最大耐力時

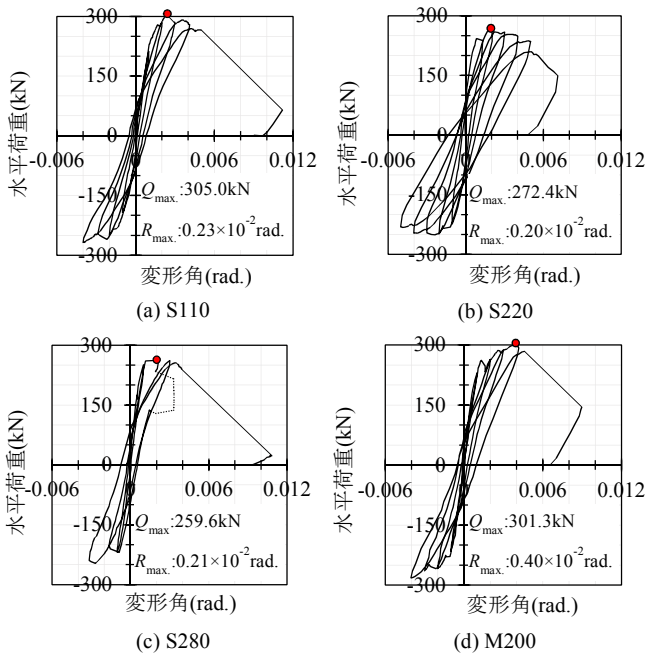


図 10 荷重変形曲線

変形角の値である。また、鉄筋間隔の狭い S110 と鉄筋比の多い M200 は最大耐力が大きく、それぞれ 305.0kN、301.3kN であり、鉄筋間隔の広い S280 は最大耐力が一番小さく、259.6kN であった。

4.2 画像解析によるひび割れ幅計測結果

図 1 1 に、本実験で得られた各载荷サイクルピーク時ひび割れ幅と、各载荷サイクルピーク後残留ひび割れ幅を示す。同図では、画像解析によって得られた平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅に加えて、従来手法であるクラックスケールによる平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の計測結果も記す。クラックスケールは、キャリブレーションのものと同タイプである。加えて、図 1 2 に変形角 0.003rad.における各試験体のひび割れ幅密度分布を示す。

4.3 ひび割れ特性に関する考察

(1) 平均ひび割れ幅

まず、図 1 1 についてクラックスケールによる計測値と画像解析による計測値の比較をする。S220 と M200 の試験体では比較的良好に双方が近い値を取っているが、S110 と S280 の試験体では良好な対応をしているとは言えない。これは、クラックスケールによる計測位置は主観により決定した代表点であるため、全域的な評価を行うことが原理上行えないからであると考えられる。そのため、クラックスケールによる計測値と画像解析値が異なることは問題にはならない。しかし、本撮影条件において、0.5mm 程度以下のひび割れ幅は、人の目ではひび割れと認識できるものの、カメラでは明瞭にひび割れを認識できない箇所が散見されるため、小さなひび割れ幅は弾かれてしまい、画像解析による平均ひび割れ幅は全体的に大きくなる可能性があるということを考える必要がある。同図において鉄筋間隔と鉄筋比の違いによるひび割れ幅への影響について着目すると、変形角が 0.003rad.のときの各試験体の画像解析による平均ひび割れ幅は、S110 は 0.44mm、S220 は 0.52mm、S280 は 0.55mm、M200 は 0.50mm であった。図 1 3 にこの関係をプロットしたものと、同様にクラックスケールによるものを参考として示す。同図より、プロットした点はほぼ直線上に並んでおり、鉄筋間隔とひび割れ幅の線形性

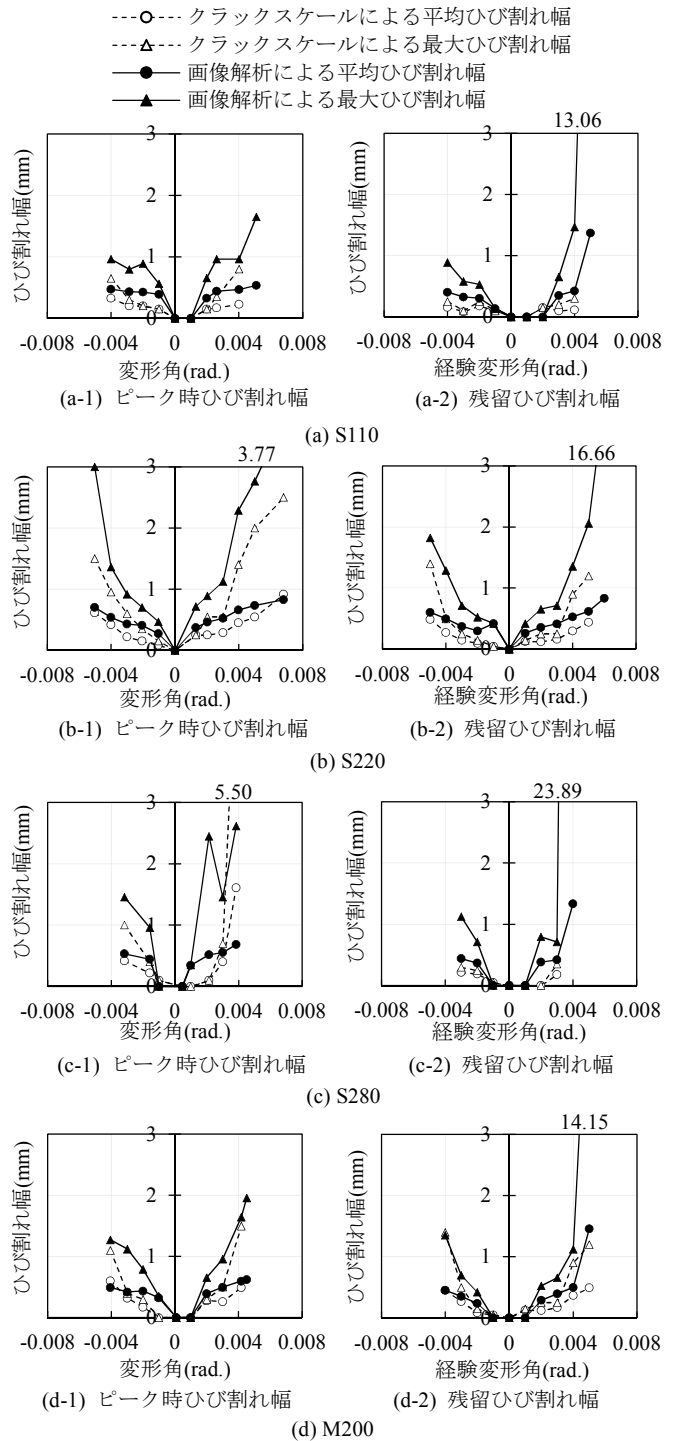


図 1 1 各载荷サイクルピーク時ひび割れ幅 (左) と各载荷サイクルピーク後残留ひび割れ幅 (右)

を表している。一方、S220 と M200 について鉄筋比によるひび割れ幅への影響は特に見られない。

(2) ひび割れ幅密度分布

図 1 2 より各試験体のひび割れ発生特性を観察すると、S110 ではひび割れ幅密度の分布が小さいひび割れ幅に比較的集中しており、0.32mm から 0.48mm のひび割れ幅が最も多く、この時のひび割れ幅密度は 2.7 程度である。それに比べて S280 では、ひび割れ幅が広く分布しており、最も多いひび割れ幅は S110 と同様であるが、この時のひび割れ幅密度は 1.5 程度と、鉄筋間隔はおおよそ 2.5 倍であるの

に対し、ひび割れ幅密度はおおよそ 0.6 倍になっている。図 1 3 (a) から分かるように、この二つの試験体の計測値の差は 0.11mm 程度しかなく、平均ひび割れ幅で見ると差はそれほど大きくないが、画像解析を用いて全域的に評価することによってこのように分布が大きく異なることが分かる。また、S220 と M200 は類似する分布となっており、S110 と S280 の中間に位置している。これらの傾向から、鉄筋間隔の相違が、ひび割れ幅の分布に影響していることが理解される。また、S220 と M200 について鉄筋比による影響は、分布にあまり変化が見られないため明らかでない。

(3) ずれと目開きの関係

図 1 4 に試験体表面に貼付した標点を利用して求めた各試験体の一部区間における変形角が 0.003rad.の時のずれと目開きの関係について示す。鉄筋比が同等の S110, S220, S280 を比較すると、ずれ δ と目開き ω の関係は、それぞれ $\delta=0.09/\omega=0.39$, $\delta=0.38/\omega=0.53$, $\delta=0.69/\omega=1.06(\text{mm})$ となっている。このことから、鉄筋間隔の狭い試験体ほど ω と δ は小さくなり、 δ と ω の関係は相関関係にある。ひび割れにより一体性が失われたコンクリートは、ひび割れ面を介して応力が伝達する(例えば7)。このような構成モデルでは、ひび割れ面におけるせん断応力と垂直応力は、 δ と ω の値から算出される。この応力は、微小なひび割れ幅の違いにより大きく異なるが、前記(2)のひび割れ幅密度分布でも述べたように、平均ひび割れ幅で見るとひび割れ幅の違いは僅かであるが、画像解析を用いることで、分布の違いを計測することが可能となった。すなわち、ひび割れ面における構成モデルを考慮することで、コンクリートの応力場を明らかにすることが可能となるが、ひび割れ発生状況と力学挙動、もしくは応力場の関連性については、今後の検討課題としたい。

5. まとめ

本報告をまとめると以下ようになる。

- 1)鉄筋間隔のひび割れ幅への影響は、変形角が 0.003rad.のときの画像解析による平均ひび割れ幅は、S110 は 0.44mm, S220 は 0.52mm, S280 は 0.55mm, M200 は 0.50mm であり、鉄筋間隔の増加に伴いひび割れ幅も線形に増加する。
- 2)鉄筋比の違いによるひび割れ幅の影響は見られなかった。
- 3)ひび割れ幅密度分布を求めることで、発生したひび割れ幅の傾向を定量的に得ることができる。
- 4)S110, S220, S280 を比較すると、変形角が 0.003rad.のときの δ - ω 関係は、それぞれ 0.09-0.39, 0.38-0.53, 0.69-1.06(mm)となっており、 δ と ω の関係は相関関係にある。

今後、著者らは追加実験を行うとともに、力学挙動とこれらの損傷指標を結びつける、定量的評価を行う予定である。

謝辞

実験に際しまして、室蘭工業大学 4 年・市山航君、加藤優志君をはじめ、多くの方にご協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1)日本建築学会：2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，2011 年
- 2)車谷麻緒，松浦遵，根本忍，呉智深：コンクリートのひび割れ進展計測のための画像解析手法に関する基礎的研究，土木学会論文集 A2, Vol.70, No.2, pp.135-144, 2014.6

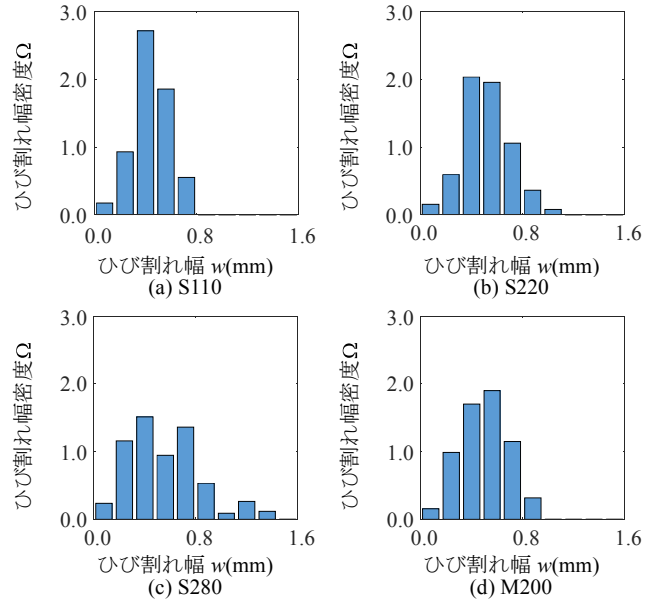


図 2 変形角 0.003rad. における各試験体のひび割れ幅密度分布

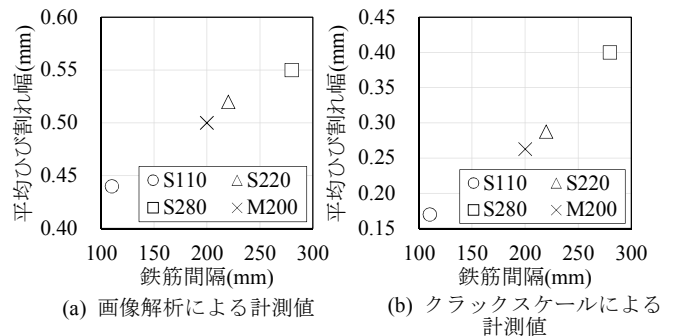


図 3 変形角が 0.003rad. の時の鉄筋間隔とひび割れ幅の関係

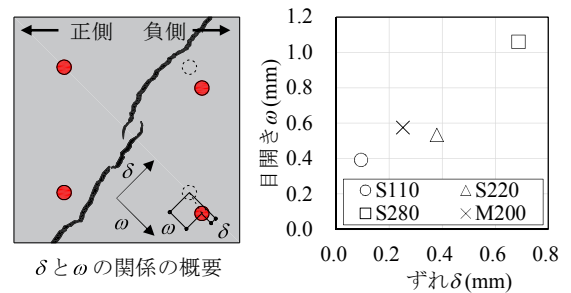


図 4 一部区間における変形角が 0.003rad. の時のずれと目開きの関係

- 3)滝本和志，長澤保紀，石井清：ひび割れデータを用いた RC 部材の損傷度評価に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol.760, No.63, pp.135-145, 2004.5
- 4)周原，高橋典之，佐藤真俊：静的加振と動的加振を受けた RC 梁部材の損傷量評価についての研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.2, pp.751-756, 2017.6
- 5)渡辺健，東広憲，三木朋広，二羽淳一郎：コンクリート構造実験を対象としたリアルタイム画像解析システムの開発，土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.94-106, 2010.3
- 6)根本結衣，高橋典之：デジタル画像相関法を用いたひずみ計測による RC 部材損傷進展過程の追跡，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.2, pp.745-750, 2017.6
- 7)李宝祿，前川宏一：接触面密度関数に基づくコンクリートひびわれ面の応力伝達構成式，コンクリート工学，Vol.26, No.1, pp.123-137, 1988.1

[2019 年 2 月 6 日原稿受理 2019 年 4 月 10 日採用決定]