

論文 画像解析によるRC部材のひび割れ幅分布特性の計測に関する研究

王 一哲*1・耳塚 友貴*1・千田 紘之*1・高橋 典之*2

要旨：鉄筋コンクリート部材の損傷評価を目的として、ひび割れ幅やひび割れ長さを画像解析により計測する方法が数多く検討されるようになってきた。この画像解像度を向上させると、詳細なひび割れ量の取得が可能になるが、かえって鮮明にノイズを記録してしまう場合やひび割れ形状の複雑さ（フラクタル性）が増して幾何学的アルゴリズムでの処理に適さなくなる可能性も高くなることが懸念される。そこで本研究では、ノイズやひび割れ領域の複雑さに対応する画像解析アルゴリズムを検討し、RC造壁部材のひび割れ幅・長さを計測した。また、計測したひび割れ量から、分解能の高いひび割れ幅分布特性を得た。

キーワード：画像解析, ひび割れ幅, 損傷量評価, 損傷計測

1. はじめに

地震の発生に伴い損傷が生じた建物の補修費用の算出や残存耐震性能の評価にあたり、ひび割れ量の定量的な評価は不可欠である。そこで近年、ひび割れ量計測作業の省力化および詳細な損傷情報の取得を目的として、画像解析技術を用いたひび割れ評価手法が提案されてきた。通常、画像処理を用いたひび割れ量の計測においては、被害を受けている構造部材の写真からひび割れ領域を抽出して、ひび割れ幅あるいはひび割れ長さを算出するが、撮影機器の高解像度化をうけて、従来法の幾何学的アルゴリズムでの処理に適さないひび割れ領域となる場合があることが分かってきた。そこで本研究では、ひび割れ量の画像計測にあたり、従来法では困難であったひび割れ形状の複雑さが増した状態にも適用可能な幾何学的アルゴリズム（コーナー検出および線形補間法）を新たに構築するとともに、RC造壁部材のひび割れ幅分解能の高いひび割れ幅分布特性データを作成した。

2. ひび割れ幅分布特性について

本研究では、ある「ひび割れ幅」となる「ひび割れ長さ」が計測範囲にわたりどれくらい分布しているかを、「ひび割れ幅分布特性」と呼び、これを計測・評価対象

とする。既往の研究でも「ひび割れ性状曲線」¹⁾あるいは「ひび割れ幅分布関数」²⁾などの呼ばれ方で検討されてきた、ひび割れ幅とひび割れ長さを組み合わせた損傷量の一つである。

本研究における画像解析を用いたひび割れ幅分布特性の評価フローを図-1に示す。評価フローの概略を説明すると、まず、ひび割れ発生前画像を用いて画像の輝度値を反転し、後述するイメージ膨張処理³⁾を行うことでイメージマスクを作成する。マスクを得た後、ひび割れ後の画像からマスク部分を差し引き、ひび割れ領域を抽出する。抽出したひび割れ領域を二値化し、ひび割れ量計測のための幾何学的アルゴリズムが適用可能な状態を作成する。しかし、ひび割れの輝度値と同程度のオブジェクトも二値化されているため、ここにはノイズが含まれている。そこで、ひび割れ領域とノイズの幾何学的特徴を考慮し、円形オブジェクト認識を用いて真円度の違いによりノイズを除去する（一次）。次に、一次ノイズ除去後のひび割れ領域二値画像から、ひび割れ幅、ひび割れ長さを幾何学的アルゴリズムにより算出する。ここで算出したひび割れ幅、ひび割れ長さは、一次ノイズ除去で取りきれなかったノイズの除去に用いることとし、ひび割れ長さとしひび割れ幅の比を考慮したノイズ除去（最終）を経て、最終的にひび割れ幅分布特性を得る。次章より上記フローの詳細を説明する。

3. ひび割れ画像処理

3.1 ひび割れ領域の抽出

ひび割れ領域抽出フローを図-2に示す。一般に、ひび割れ部は輝度値が低く、RC部材表面は比較的輝度値が高い。この輝度値の差を利用し、ひび割れ発生後の画像からひび割れ発生前の画像を差し引き、ひび割れの領域を抽出する（一般にマスクングと呼ばれる手法）。ただ

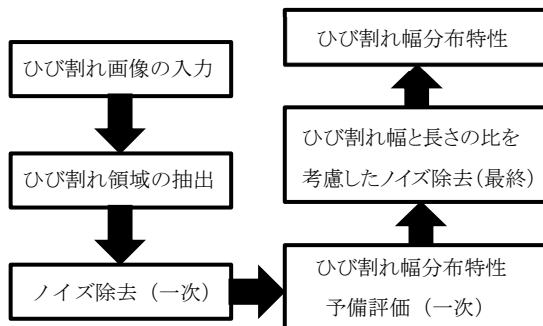


図-1 ひび割れ幅分布特性評価フロー

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博(工) (正会員)

し、ひび割れ発生前後で画像内のノイズ（非ひび割れ部で輝度値の低い部分）の位置にズレが生じることがある。そこで、ひび割れ発生前の画像にイメージ膨張処理を行ってマスクを作成する。

3.2 円形オブジェクト認識によるノイズ除去（一次）

ひび割れ領域とノイズ部分の幾何学的特徴の差として、真円度が考えられる。真円度は式(1)を用いて計算する。

$$metric = \frac{4\pi \times area}{perimeter^2} \quad (1)$$

ここに、*metric* : オブジェクトの真円度、*area* : オブジェクトの面積、*perimeter* : オブジェクトの周長である。

真円度が1に近いほど円形に近似する。一般に、ひび割れの真円度は小さく0.8を下回るものが多く、ノイズ領域は真円度が0.8を上回るものが多い。そこで、真円度の差を利用してノイズ領域を除去する。円形オブジェクト認識例を図-3に示す。

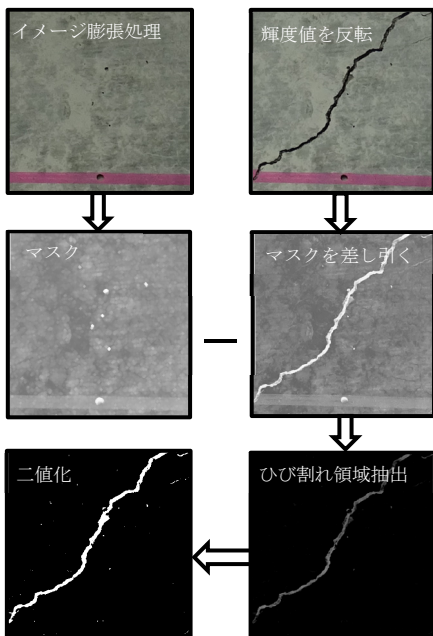


図-2 ひび割れ領域の抽出フロー

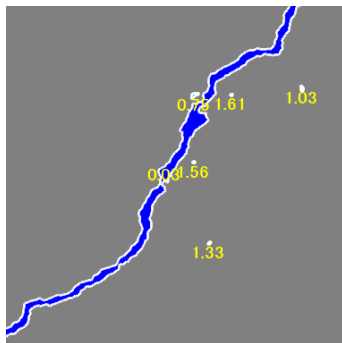


図-3 円形オブジェクト認識の結果

4. ひび割れ幅分布特性の計測

ひび割れ幅分布特性の評価フローを図-4に示す。まず、前章までのプロセスにより得られたひび割れ画像を

用いてひび割れ幅およびひび割れ長さの計測を行う。既往の研究で、高橋ら⁴⁾の計測手法はひび割れ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。しかし、この計測手法はフラクタル性の高い複雑なひび割れ形状（例えば図-5の瘤になっている部分、以下「コーナー」とする）に対して対応が難しい。

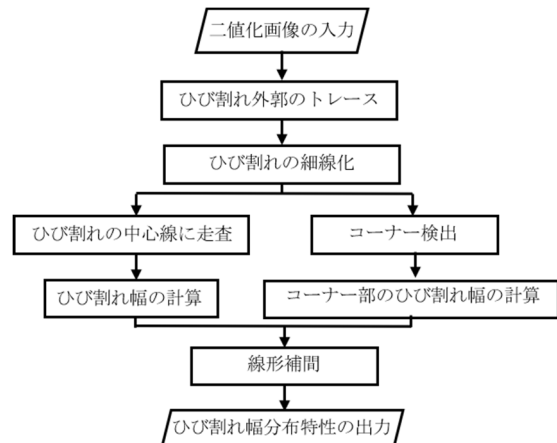


図-4 ひび割れ幅分布特性評価フロー

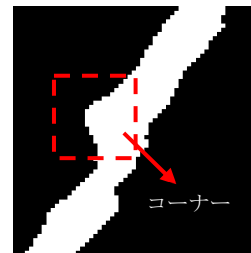


図-5 ひび割れ領域における瘤（コーナー）

本研究では以下の方法を採用する。まず、ひび割れ領域を細線化³⁾する。細線化部はひび割れ領域の中心線であり、これよりひび割れ長さを算出する。次に、細線化された中心線においてひび割れ始点と終点を定め、始点-終点間をつなぐ（ひび割れ幅分だけ離れた）2本のひび割れ外郭画素に対して、中心線上を走査してひび割れ幅を計測する（通常計測）。併せて、ひび割れ領域外郭画素からコーナーを検出し、コーナー周りの画素のひび割れ幅を別途計測する（特別計測）。詳細を下記に説明する。

(1) 細線化およびひび割れ長さの算出

一般画像処理技術³⁾に基づきL.B.Boudaoudら⁵⁾が提案した細線化アルゴリズムを用いる。一例を図-6に示す。

細線化されたひび割れ領域の中心線から、ひび割れの始点と終点を抽出する。抽出方法は、3×3サイズの正方形を作り、細線化画素全体を走査する。各走査の対象点に対して正方形の9の元素の和を求め、その和が2であればこの点を端点とする。なお、この和が4であれば、

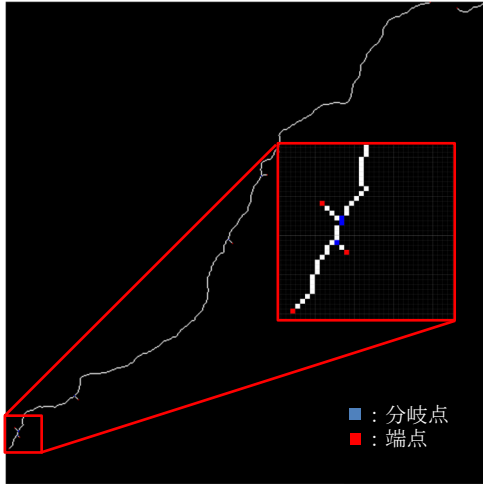


図-6 細線化と走査の結果

この点を分岐点とする。

ひび割れは幅を有しているので、細線化された結果に短い分岐線が現れることがある。分岐線長さが閾値より短い場合は、分岐したひび割れではないものとして当該部を除外し、細線化部の長さをひび割れ総長さとする。

(2) コーナー検出

本研究では、オブジェクト外郭画素の曲率から、特別にひび割れ幅の算定が必要とするコーナーを検出する。ただし、外郭画素に生じる1, 2ピクセル程度の凹凸はコーナーとしない。F.Mokhtarianら⁶⁾の方法に従い、式(2)に示すとおり、オブジェクト外郭画素にガウス関数を乗じ外郭画素を平滑化して曲率 $\kappa(u, \sigma)$ を計算する。

$$\kappa(u, \sigma) = \frac{\dot{X}(u, \sigma)\ddot{Y}(u, \sigma) - \ddot{X}(u, \sigma)\dot{Y}(u, \sigma)}{(\dot{X}(u, \sigma)^2 + \dot{Y}(u, \sigma)^2)^{1.5}} \quad (2)$$

ここに、 $\dot{X}(u, \sigma) = x(u) \otimes \dot{g}(u, \sigma)$ 、 $\ddot{X}(u, \sigma) = x(u) \otimes \ddot{g}(u, \sigma)$ 、 $\dot{Y}(u, \sigma) = y(u) \otimes \dot{g}(u, \sigma)$ 、 $\ddot{Y}(u, \sigma) = y(u) \otimes \ddot{g}(u, \sigma)$ である。 \otimes は畳み込みの演算子であり、 $g(u, \sigma)$ は標準偏差 σ を有するガウス関数である。

次に、X.C.Heら⁷⁾の提案したコーナー部が鋭角か鈍角かを分類する(最適値探索型)閾値を式(3)より求め、式(4)よりコーナー角度 $\angle C_i$ を算出し、 $\angle C_i \leq 150^\circ$ となるコーナーを選別することで、ゆるやかなコーナーは特別なひび割れ幅計算の検討対象から除外する。

$$T(u) = C \times \bar{\kappa} = 1.5 \times \frac{1}{L1 + L2 + 1} \sum_{i=u-L2}^{u+L1} \kappa(i) \quad (3)$$

ここに、 $T(u)$: 閾値、 C : 係数 ($1 < C < 2$) で本研究では $C=1.5$ とする。 $\bar{\kappa}$: 領域にある全画素の曲率平均値、 $L1$ 、 $L2$: 領域のサイズである。また、

$$\angle C_i = \left| \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Y1}{\Delta X1} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Y2}{\Delta X2} \right) \right| \quad (4)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \Delta X1 &= \frac{1}{L1} \sum_{i=u+1}^{u+L1} X(i) - X(u) \\ \Delta X2 &= \frac{1}{L2} \sum_{i=u-L2}^{u-1} X(i) - X(u) \\ \Delta Y1 &= \frac{1}{L1} \sum_{i=u+1}^{u+L1} Y(i) - Y(u) \\ \Delta Y2 &= \frac{1}{L2} \sum_{i=u-L2}^{u-1} Y(i) - Y(u) \end{aligned}$$

である。

コーナー検出結果の例を図-7に示す。

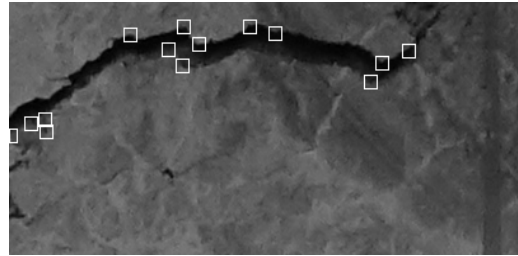


図-7 コーナー検出の結果の一例

なお、ひび割れ始端・終端が鋭いコーナーとして検出される場合もある。そこで本研究では、始点と終点までの距離を計算し、誤検出の可能性のある始端・終端部を(ひび割れ幅計算時の)検討対象コーナーから除外する。

(3) ひび割れ幅の計測

ひび割れ幅計測は、細線化で得られたひび割れ領域中心線に沿った走査による通常計測と、コーナー周りについての特別な計測との組み合わせにより実施する。

細線化で得られたひび割れ領域中心線に沿った走査による通常計測の概要を図-8に示す。まず、中心線上の走査対象点から左右 n 画素離れた点を結ぶ(本論文では $n=2\text{pixel}$)。この線分の傾きを計算し、走査対象点を通り線分と垂直な直線の式を求める。ひび割れ領域外郭画素は必ずしも垂直線の式において解とならない場合もある。このため、走査対象点を中心に、 $L \times L$ (本論文では $L=30\text{pixel}$)サイズの正方形を作成し、作成された正方形内にある外郭画素に対して式(5)を用いて画素差分を計算する。これにより、ひび割れ領域外郭画素のうち垂直線式に最も近似する画素を選び、中心線を挟む2本の外郭画素群からひび割れ幅計測対象点を定め、ひび割れ幅を計測する。

$$\text{difference} = y - y_0 - k(x - x_0) \quad (5)$$

ここに、 difference : 画素差分、 (x_0, y_0) : 走査対象点の座標、 (x, y) : 外郭画素の座標、 k : 走査対象点を通る垂直線の傾きである。

次に、コーナー周りのひび割れ幅を計測する。計測手

法の概要を図-9に示す。コーナ一点を走査対象点とし、外郭画素のうちコーナ一点から隣り合う n 画素ずつ離れた点を結び（本論文では $n=2\text{pixel}$ ）、この線分の傾きを求める。あとは、前述した通常計測手法と同様にして、コーナ部のひび割れ幅を計測する。

なお、計測された長さはピクセル単位であるため、実際のひび割れ幅に換算する際は、画像解像度に基づき 1ピクセルあたりの実長を乗じ、ひび割れ幅とする。

(4) 線形補間を用いたひび割れ幅分布特性の評価

ひび割れ幅の階級毎にひび割れ長さを求め、ひび割れ幅分布特性を得る。ひび割れ幅階級は、0.05mm 刻みで、0.10mm 以下から 2.20mm 以上までとした。

ひび割れ幅算出例を図-10に示す。近隣のひび割れ幅が同じ階級にあれば、各ひび割れ幅算出線の二等分点間の長さ l を計算し、当該ひび割れ幅を含む階級に長さ l をデータとして記録する。近隣のひび割れ幅が異なる階級の場合、式(6)の線形補間により各階級の長さを計算する。

$$li = \frac{wi - wi-1}{w2 - w1} \times l \quad (6)$$

ここに、 $w1, w2, l$: 図-10に示すひび割れ幅およびひび割れ長さ ($w1 \leq w2$)、 wi : ひび割れ幅階級 i の区間上限値 (ただし、 $wi-1 = \min(w1, w2)$ かつ $\max(wi) \leq w2$)、 li : 当該階級に対応するひび割れ長さである。

(5) ひび割れ幅と長さの比を考慮したノイズ除去

円形オブジェクト認識で取りきれなかったノイズを除去する。一つのひび割れ領域に対して、(4)で得られた各区分ひび割れ幅をひび割れ長さで加重平均をとった (1ひび割れ領域に対する) ひび割れ幅 $wave$ 、(4)で得られた各区分ひび割れ長さの和より (1ひび割れ領域に対する) ひび割れ長さの $\sum l$ を求め、式(7)により、これらの比 r を計算する。この比がある閾値以下の場合には当該領域をノイズとして除去する。

$$r = \frac{\sum l}{wave} \quad (7)$$

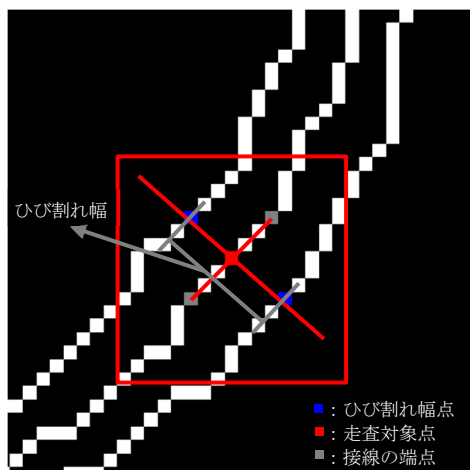


図-8 ひび割れ幅の計測の概要

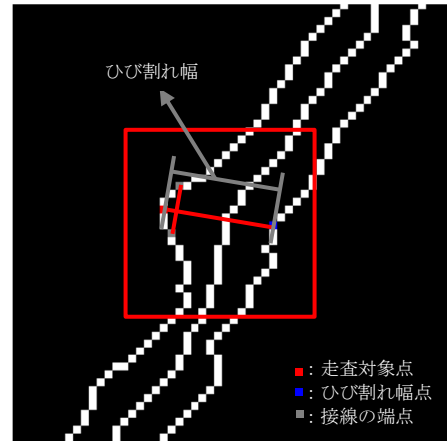


図-9 コーナ部のひび割れ幅の計測の概要

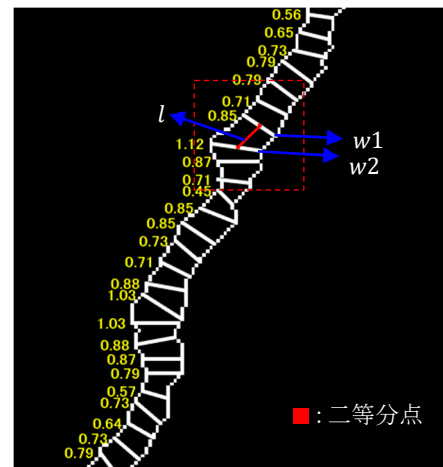


図-10 線形補間の概要

5. ひび割れ幅分布特性の評価事例

既往の RC 造壁部材実験データ⁸⁾を利用し、提案した手法によるひび割れ幅分布特性の評価事例を紹介する。検討対象とした試験体形状および配筋図を図-11に、試験体諸元を表-1にそれぞれ示す。なお、紙面の都合上、実験詳細については文献⁷⁾を参照されたい。

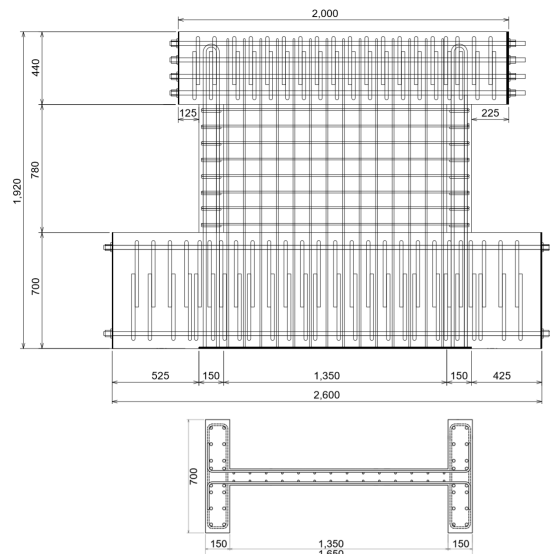


図-11 試験体形状および配筋図 (単位: mm)

表-1 試験体諸元

試験体名		WM 試験体
内法高さ		780mm
フランジ壁	B×D	700×150mm
	主筋	16-D16($p_t=2.8\%$)
	帯筋	2-D10@100($p_w=0.95\%$)
ウェブ壁	壁厚	100mm
	全長	1650mm
	壁筋	D10@100 ダブル (縦横)
M/QD		0.67
N/BD σ_B		0 (軸力なし)
コンクリート強度		35.5 MPa



図-12 +1/200 部材角の時のひび割れ状況

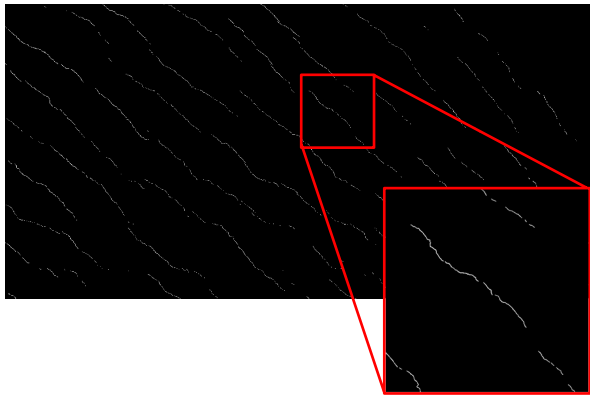


図-13 ひび割れ領域 (二値画像) 抽出結果

本論では、試験体 WM の部材角+1/200 rad 時点でのひび割れ幅分布特性について評価を試みる。損傷評価対象領域 (ウェブ壁面) の撮影画像サイズは 4000×8000 ピクセルである。損傷評価対象領域の画像を図-12 に示す。撮影時の照度均斉度の影響で二値化閾値を画角全域にわたり一定とするとノイズの増大を招くため、1000×1000 ピクセルの 32 枚の画像に分割して閾値を決定した。ただし、分割によりひび割れが切断される問題に対応するため、閾値を定めて二値化画像を作成したあとは、これらを合成し処理前の画像サイズに戻す (図-13)。

二値化画像の各ひび割れ領域に対して画像の左上から右下にむかって番号付けを行い、前章までの方法でひび割れ幅およびひび割れ長さを算出する。

番号付けされた各ひび割れ領域の最大ひび割れ幅を抽出した結果を図-14 に、ひび割れ幅分布特性を図-15 に示す。本論文で提案した手法により、各ひび割れ (領域)

の最大ひび割れ幅、ひび割れ幅分布特性など、ひび割れ量に関する詳細な情報を取得することができた。

6. 計測誤差に関する考察

画像解析による損傷量評価手法では、従来の目視計測結果との比較において誤差が生じることは不可避である。例えば、ひび割れ幅の目視計測においては、コンクリート表面の純粋なひび割れ領域境界間隔ではなく、スポットライトを用いてひび割れを接近観察し、ひび割れている領域の奥の (より影が濃くなっている) ひび割れ幅を読みとるなどの行為がなされることが多い。このような場合、画像解析で得られるひび割れ幅が、目視計測によるひび割れ幅と完全に一致しないほうがむしろ当然であるともいえる。

前章の評価事例について目視計測結果との比較をしてみると、クラックスケールを用いて実験中に目視計測 (一見してひび割れ幅が大きそうな箇所のひび割れ幅を計測した最大ひび割れ幅が 0.40mm であったのに対し、図-14 の一番大きな最大ひび割れ幅は 1.32mm, その他の各ひび割れの最大ひび割れ幅をみても概ね 0.6~0.8mm 程度であり、両者の誤差は決して小さくなかった。

そこで、本論文の画像解析手法における誤差発生要因を考えてみると、二値化閾値設定の難しさ (ひび割れている領域の奥のより影が濃くなっている部分だけを抽出するような閾値を設定することが難しいこと) が挙げられる。特に、取得画像のひび割れ領域境界が曖昧な場合 (図-16)、二値化閾値設定は極めて困難である。さらに、本論文の画像解析手法に固有の誤差発生要因として、コーナー部のひび割れ幅も細かく計算している点も挙げられる。通常、目視計測ではコーナー部のひび割れ幅は特異値として除外され、データとして記録されないが、本論文の画像解析手法では分解能の高いひび割れ幅分布特性を評価できるようにするために、当該部分も計測対象に含めていることも、両者の誤差につながったと考えられる。



図-16 曖昧なひび割れ領域境界による二値化誤差例

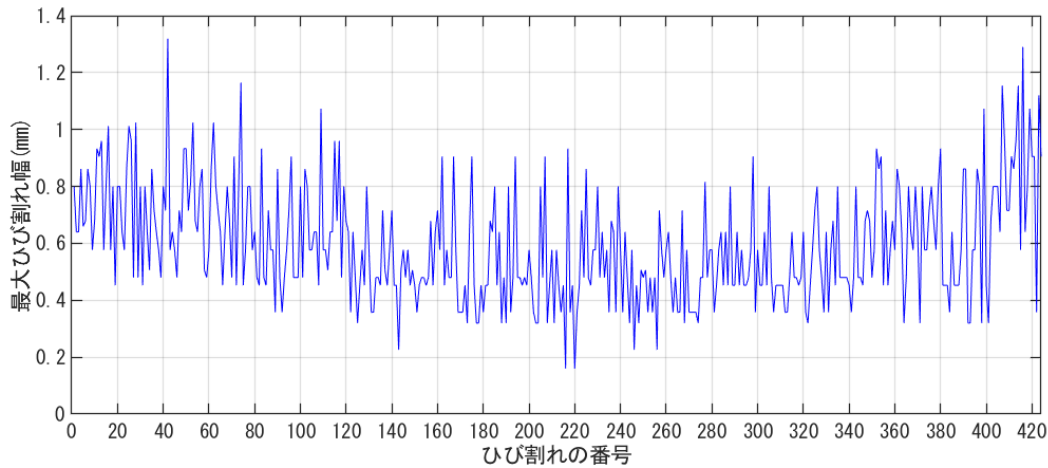


図-14 各ひび割れ領域で算出された最大ひび割れ幅

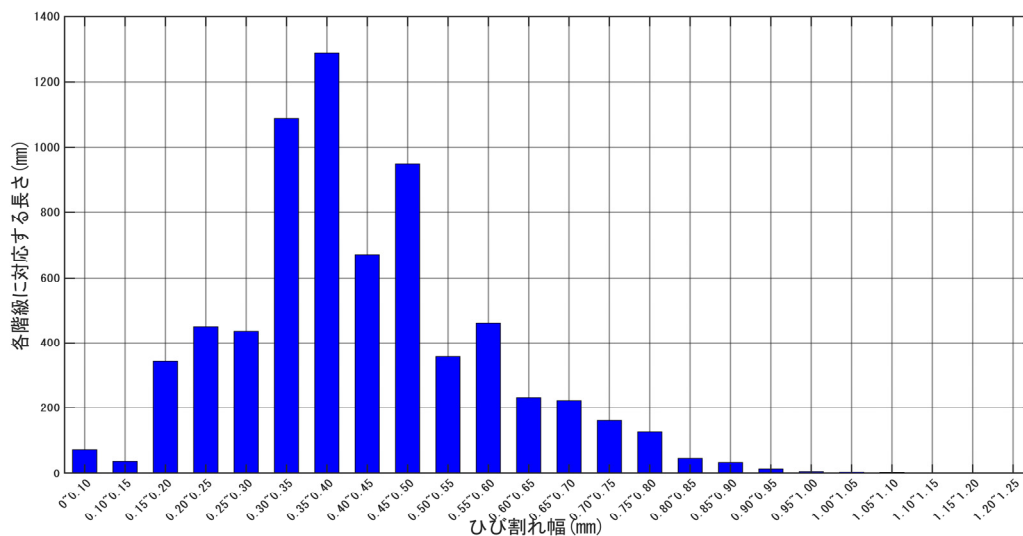


図-15 ひび割れ幅分布特性

7. まとめ

複雑なひび割れ形状にも対応可能な画像解析によるひび割れ量計測アルゴリズムを検討し、RC造壁部材を対象に分解能の高いひび割れ幅分布特性を評価した。

参考文献

- 1) 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, No.760/V-63, pp.135-145, 2004.5
- 2) 高橋典之, 中埜良昭: 複数回地震動を受ける鉄筋コンクリート構造物の損傷量推定手法に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.859-864, 2009.7
- 3) 大崎洋紘一, 神代充, 宗澤良臣, 梶原康博著: 画像認識システム学, 共立出版, 2005
- 4) 高橋絵里, 高橋典之, 中埜良昭: 鉄筋コンクリート部材の損傷量進展過程に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.931-936, 2009.7
- 5) L.B.Boudaoud, A.Sider, A.Tari : A New Thinning Algorithm for Binary Images, 3rd International conference on control, Engineering and Information Technology, pp.1-6, May.2015
- 6) F.Mokhtarian, A.K.Mackworth : A Theory of Multiscale, Curvature-Based Shape Representation for Planar Curves, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.8, pp.789-805, Aug.1992
- 7) X.C.He, N.H.C.Yung : Curvature Scale Space Corner Detector with Adaptive Threshold and Dynamic Region of Support, Proc. of the 17th International Conference on Pattern Recognition, Vol.2, pp.791-794, Aug.2004
- 8) 櫻井真人ほか: 微小変形領域における RC 造耐震壁の非線形性に関する検討(その 17) 乾燥収縮ひび割れの有無を変数とした耐震壁試験体の構造実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1153-1154, 2018.9