

論文 画像処理によるコンクリート構造物のひび割れ幅の分類

藤田 悠介*1・中村 秀明*2・浜本 義彦*3

要旨：ひび割れ幅は、コンクリートの状態を表す指標としてとても重要であるが、実際の測定に際しては、点検者の主観や技術的判断が介在し、定量的な評価が難しい。また、実際のひび割れは、連続した一本のひび割れであっても場所によってひび割れ幅は異なっており、点での測定ではひび割れ幅を正確に評価することは困難である。そこで本研究では、ひび割れ幅のある点での計測値ではなく、線として評価するため、デジタルカメラで撮影されたひび割れ画像に対して、画像処理技術を適用し、ひび割れ幅の分類を試みた。本手法を実際のひび割れに適用した結果、多少の誤差はあるが、ひび割れ幅に対してひび割れの分類が行えた。

キーワード：ひび割れ幅、デジタルカメラ、デジタル画像、画像処理、多重スケール処理

1. はじめに

コンクリートに発生するひび割れは、施工の良否や、地震後における構造物の被災度の推定、経年劣化による損傷度の推定に極めて重要な判断材料である。構造物の外観調査におけるひび割れ調査では、コンクリート表面に発生したひび割れの位置や長さ、幅などの特徴量を把握することになる。従来ほとんどの場合、このような調査は専門家である点検者がスケッチ図を作成し、代表的なひび割れ幅に関してはクラックスケールを当ててひび割れ幅を計測し、ひび割れの特徴を記すという方法が取られていた。そのため点検者の知識および経験に依存するところが多いため定量的な評価が困難であった。例えば写真-1にひび割れの一例を示すが、連続した一本のひび割れであってもひび割れ幅は場所によって異なっており、最大ひび割れ幅を測定するにしてもどの位置で測るかによってひび割れ幅は大きく異なる。

しかしながら最近では、デジタルカメラや画像処理技術の発展により、デジタル画像を用いたひび割れ計測が注目を集めており、点検者の技量に左右されない、定量的で客観的な評価が可能となりつつある^{1),2),3),4)}。例えば、庄野らは CCD カメラで撮影した画像に対して画像処理を行い、区間ごとのひび割れ幅を計測できるひび割れ幅測定器を開発している¹⁾。また、丸屋らはウェーブレット変換を用いたひび割れ抽出方法を提案しており、実用的に精度の高いひび割れ抽出を可能としている^{3),4)}。著者らも二つの前処理と二段階の抽出処理からなるひび割れ抽出方法を提案している⁵⁾。

本研究では、ひび割れを撮影したデジタル画像から、著者らの提案する画像処理技術を用いて、ひび割れを幅ごとに分類する方法についてその精度の検証を行った。従来、ひび割れ幅の計測は、線としての計測はあまり行



写真-1 ひび割れの一例

われておらず、代表的な点におけるひび割れ幅をクラックスケールあるいはひび割れ幅測定器で計測することが行われてきた。本手法は点ではなく線としてのひび割れ幅の計測（分類）が可能であり、ひび割れの特徴をより詳細に把握できる。

2. ひび割れ幅分類の方法

2.1 ひび割れ幅分類の概要

ひび割れ幅の計測限界は、検出対象となるひび割れを撮影した画像に写っているひび割れの画素数と、前処理での差分処理におけるフィルタサイズと線強調処理におけるスケールに関するパラメータとの関係により決まる。空間分解能は、カメラの画素数や撮影距離、レンズの倍率などの撮影条件から決まり、空間分解能が高いほど、細かいひび割れ幅の計測が可能である。本研究でのひび割れ幅分類のフローを図-1に示す。

2.2 ひび割れ幅分類の詳細

(1) ひび割れの撮影

現場でひび割れが発生している個所のコンクリート表面の撮影を行う。検出したいひび割れ幅に応じて、デジタルカメラとレンズの組み合わせにより画像の空間分解能を決定する。また、カメラと撮影対象の距離をレーザー距離計で計測するか、あるいは画像内に目標となる標点間隔を写し込んで撮影する。

*1 山口大学大学院 医学系研究科 応用分子生命科学系専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*2 山口大学大学院 理工学研究科 環境共生系専攻 教授 博士(工学) (正会員)

*3 山口大学大学院 医学系研究科 応用分子生命科学系専攻 教授 博士(工学)

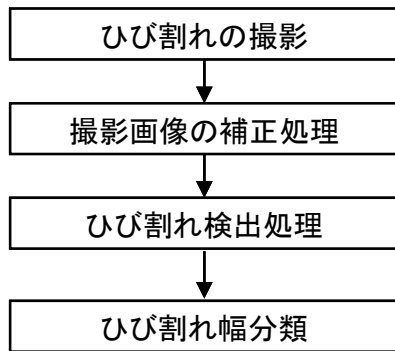


図-1 ひび割れ幅分類フロー

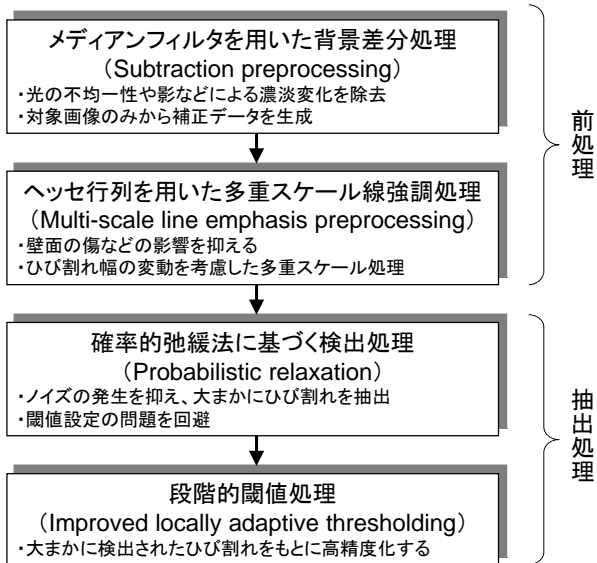


図-2 ひび割れ抽出処理

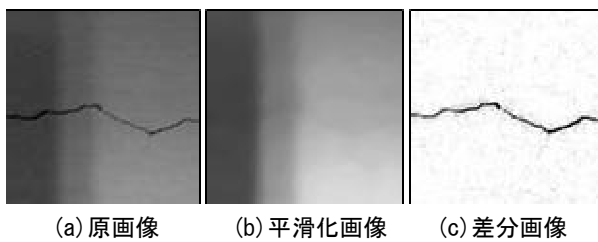


図-3 メディアンフィルタを用いた背景差分処理

(2) 補正処理

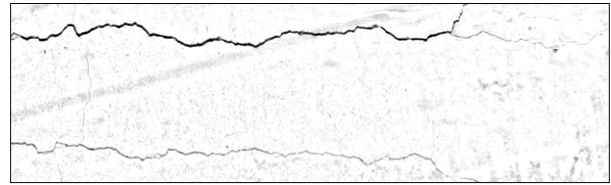
撮影されたひび割れ画像に対し、ゆがみ補正、収差補正などの補正処理により画像のひずみを補正する。

(3) ひび割れ抽出処理

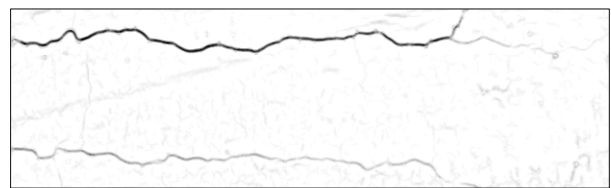
著者らは光の変動や影、あるいは壁面に汚れのある画像に対してもロバストにひび割れが抽出できるように、二つの前処理と二段階の抽出処理からなるひび割れ抽出方法を提案している⁵⁾。詳細は、文献5)にゆずるが、ここでは著者らが提案した手法について簡単に述べる。著者らが提案したひび割れ抽出法のフローを図-2に示す。この手法は、二つの前処理と二段階の抽出処理からなる方法で、それぞれの処理の特徴を以下に示す。



(a) 原画像



(b) 背景差分処理



(c) 線強調処理

図-4 ヘッセ行列を用いた多重スケール線強調処理

[メディアンフィルタを用いた背景差分処理]

ひび割れを含むコンクリート表面を撮影した画像は、光の当たり具合や影などにより濃淡変化が生じている。そこで、メディアンフィルタを用いて平滑化画像を作成し、原画像と平滑化画像の差分を取ることでひび割れを抽出する。メディアンフィルタを用いた背景差分処理の例を図-3に示す。なお、パラメータとなるフィルタサイズを調整することにより平滑化の度合いを調整できる。抽出対象となるひび割れ幅に応じてフィルタサイズを決定する。

[ヘッセ行列を用いた多重スケール線強調処理]

ヘッセ行列を用いることにより線・粒・面の構造を区別したエッジ強調が可能となり^{6),7)}、壁面の汚れなどの影響を抑制したひび割れ強調が可能となる。また、多重スケール処理^{6),8)}によりひび割れ幅の不均一性に対してもロバストな抽出が可能となる。図-4に線強調処理の例を示す。多重スケール線強調処理には、評価するスケールを決定するために、スケールの最小値、スケール間の比率およびスケール数の3つのパラメータがある。

[確率的弛緩法による抽出処理]

画像処理における弛緩法は、画像のあいまいさや部分的な誤りを低減する方法として広く知られている。確率的弛緩法^{9),10)}は、局所的な整合処理を繰り返して、ノイズを抑えた大まかなひび割れ位置や形状の抽出が可能であり、閾値などのパラメータの設定が不要である。確率的弛緩法によるひび割れ抽出の例を図-5に示す。

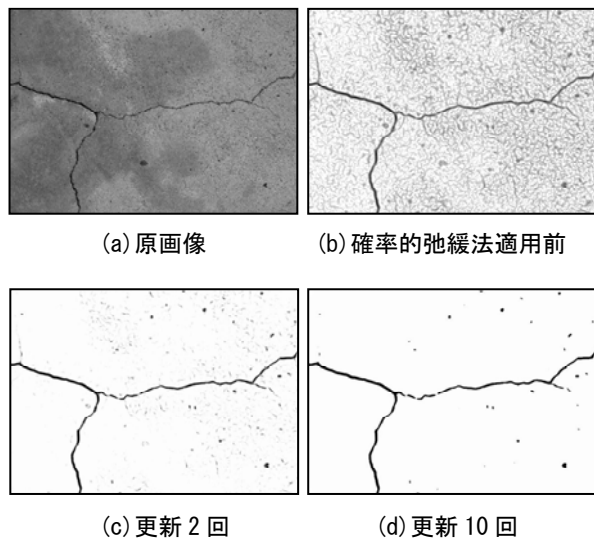


図-5 確率的弛緩法によるひび割れ抽出

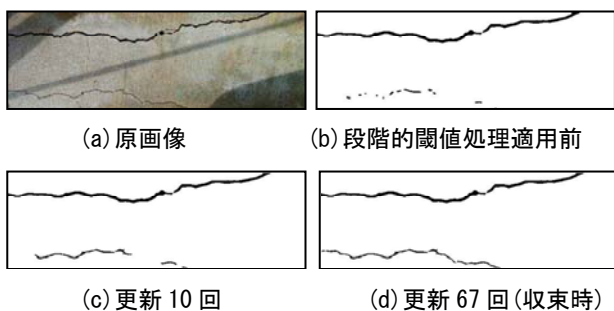


図-6 段階的閾値処理によるひび割れ抽出

[段階的閾値処理]

段階的閾値処理では、抽出された領域の周辺に対して段階的に閾値処理を施すことによりひび割れを細部まで抽出する。対象とする領域を抽出されたひび割れの周囲に限定することによりノイズの発生を抑えた抽出が可能であり、画素ごとに閾値を与えるため高精度な抽出が可能である。段階的閾値処理による抽出例を図-6に示す。

(3) ひび割れ幅分類アルゴリズム

ひび割れ抽出処理は、2つの前処理と2つの抽出処理からなる。前処理の一つである多重スケール線強調処理では、図-7に示すように2次元の濃淡変化を2つの固有値により評価し、線状構造と粒状構造と面状構造の違いを判別し、線状構造であるひび割れを強調している。この評価では、図-8に示すようにスケールを変えながら線らしさを評価する多重スケール処理とすることにより、ひび割れ幅の変動によらずひび割れを強調することを可能にしている。このとき、線状構造と判別された画素について、線らしさの評価値が最大であるスケールを調べることによりひび割れ幅を評価できる。本アルゴリズムによるひび割れ幅評価では、ひび割れの発生方向によ

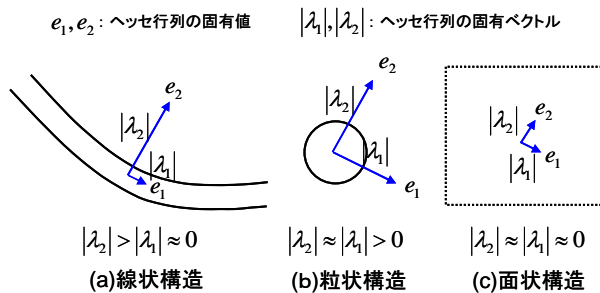


図-7 線構造の強調

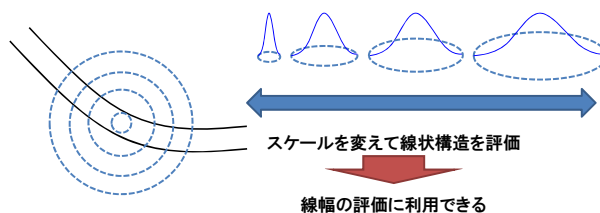


図-8 多重スケール線強調処理

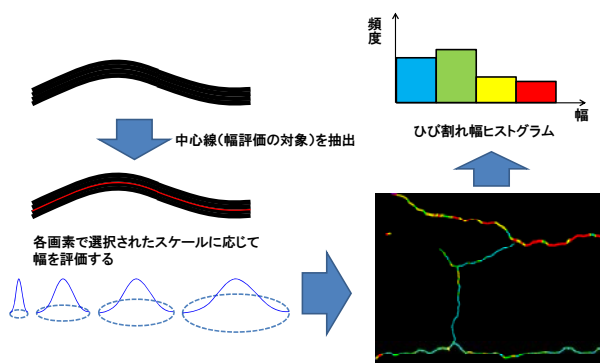


図-9 ひび割れ幅評価のイメージ

らず幅を評価することが可能である。実際の処理の手順を以下に示し、ひび割れ幅評価のイメージを図-9に示す。

[中心線の抽出]

抽出されたひび割れ領域に対して細線化処理を施し、ひび割れの中心線を抽出する。ひび割れ幅の評価は中心線上の各画素で行う。

[中心線上の画素の幅評価]

中心線上の画素の、線強調処理で選択されたスケール(1からn段階のスケール(nはスケール数))の情報は隣接する画素で不連続である。隣接する画素のスケールとの平均値により各位置での幅を評価する。

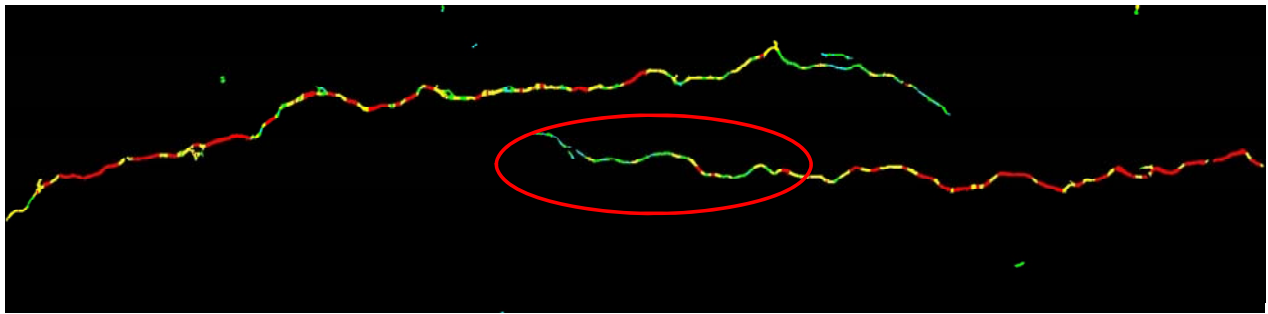
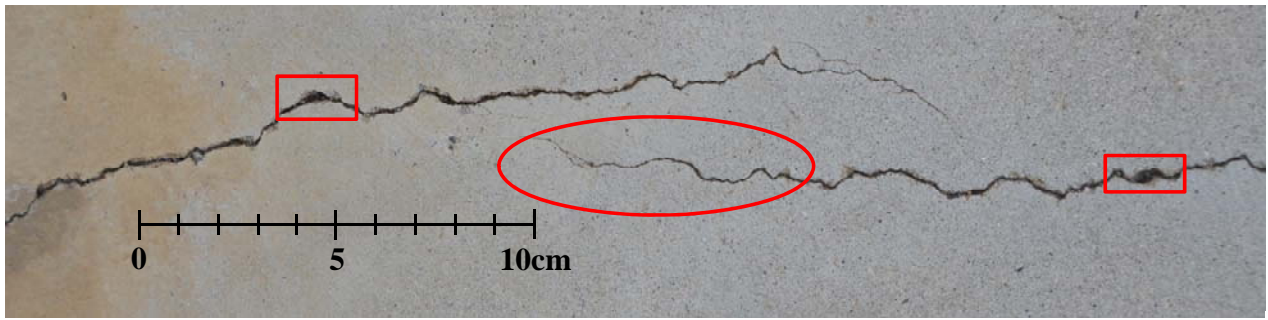
[統計量の算出]

画像全体での幅密度分布を計算する。

3. 実ひび割れへの適用性の検討

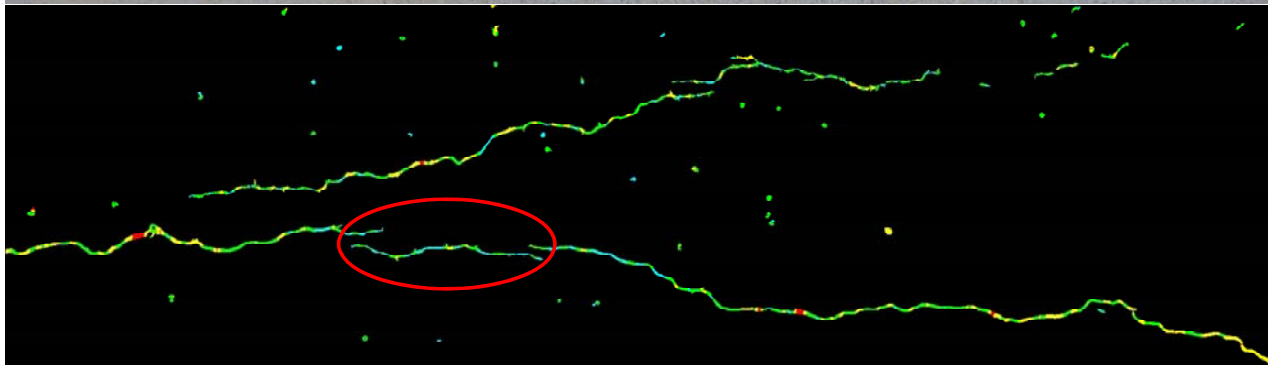
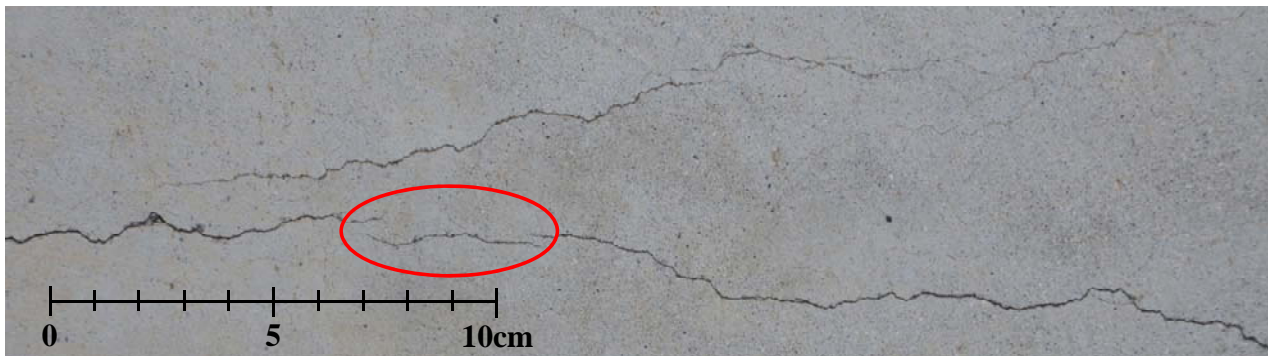
3.1 概要

本手法を用いたひび割れ幅分類の精度を検証するため、現場でひび割れ画像を撮影し、画像から分類された



青:0.2mm 以下 緑:0.2~0.35mm 黄:0.35~0.7mm 赤:0.7mm 以上

図-10 ひび割れ幅の分類結果 (比較的太いひび割れ)



青:0.2mm 以下 緑:0.2~0.35mm 黄:0.35~0.7mm 赤:0.7mm 以上

図-11 ひび割れ幅の分類結果 (比較的細いひび割れ)

ひび割れ幅と、別途マイクロスコープ (デジタル顕微鏡) で計測したひび割れ幅との比較を行った。

3.2 使用機器および撮影条件

現場でのひび割れ撮影に用いたデジタルカメラの諸元を表-1に示す。このデジタルカメラを用いて現場でのひび割れ撮影を行った。実際にひび割れ幅を測定する場合には、画像に寸法を与える必要があり、カメラと撮影

表-1 デジタルカメラ、フィルタの仕様

項目	諸元
形式	デジタル一眼レフ
撮像素子	23.6×15.6mm サイズ CMOS センサー
有効画素数	1,620 万画素
記録画素数	3,696×2,448 ピクセル
撮影感度	ISO 800
焦点距離	18~200mm
解放F値	F3.5~5.6 (12 群 16 枚)
UV Filter	390nm 以下の紫外線カット
撮影モード	プログラムオート

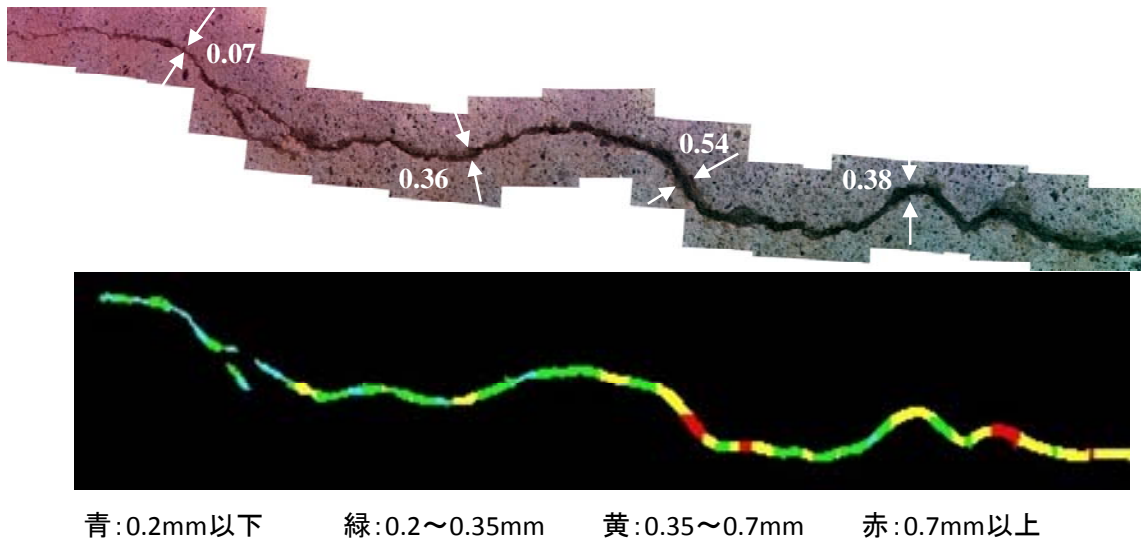


図-12 ひび割れ幅の分類結果（図-10 の丸で囲まれた部分を拡大）

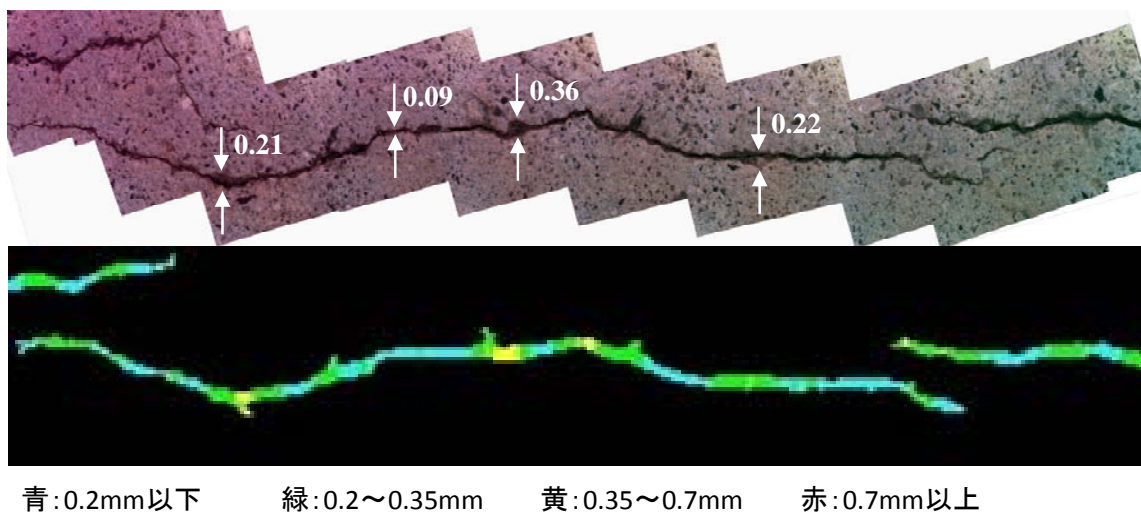


図-13 ひび割れ幅の分類結果（図-11 の丸で囲まれた部分を拡大）

表-2 使用したマイクروسコープ

項目	諸元
画像解像度	130万ピクセル
画像素子	1/4インチCMOSセンサー
倍率	50~170倍（オートフォーカス）

対象の距離をレーザー距離計で計測するか、標点間距離がわかるものを画像に写し込んで、これを基に実寸法に対する画素数を求める。ひび割れ幅は季節や時間、環境条件によって微妙に変化しているため、撮影と同時にマイクروسコープでひび割れ幅の計測を行った。使用したマイクروسコープの性能を表-2に示す。また、多重スケール線強調処理でのスケール数を実験的に4とし、ひび割れ幅を4段階に分類した。

3.3 ひび割れ幅の分類結果

ひび割れ画像の撮影は2012年1月に行い、撮影は比較的太いひび割れと、細かいひび割れに対して行った。ひび割れを撮影した原画像とひび割れの抽出および幅の

分類結果をそれぞれ図-10および図-11に示す。

図-10および図-11ともにひび割れの抽出は比較的行われている。コンクリート表面や撮影条件にもよるが細かいひび割れではひび割れ以外にコンクリート表面の空隙の穴なども抽出している。また図-10の四角で囲った部分はひび割れのエッジが欠けた部分でありひび割れ幅としては大きい箇所では、想定している幅よりも大きいため誤って複数の線として認識されている。

次にひび割れ幅の分類では、ひび割れとして抽出された全画素について、前処理の多重スケール線強調処理で最も線強度が大きかったスケールを調べ、そのスケールごとに色分けして表示されるため、ひび割れ幅は4段階に分類される。色分けでは、ひび割れ幅の小さい順に青、緑、黄、赤で色分けされている。実際のひび割れ幅がどの色に属するかは画素数やレンズの倍率、撮影距離によって決まるが、今回の撮影条件および画像処理パラメー

タでは、青が 0.2mm 以下、緑が 0.2~0.35mm、黄が 0.35~0.7mm、赤が 0.7mm 以上となっている。図-10 および図-11 を見ると、概ねひび割れの幅に応じて色分けが行われている。

実際にどの程度で色分けされているのかを詳しく見るため、図-10 および図-11 の丸で囲んだ部分を拡大し、顕微鏡で計測したひび割れ幅との比較を行った。丸で囲んだ部分を拡大したものを図-12 および図-13 に示す。

顕微鏡でのひび割れ幅の計測は、クラックスケールよりは正確ではあるが、どこからどこまでを測るのか、位置による差や個人差が生じるため、必ずしも正確な値であるとは限らないが、何回かの試行により求めたものを図-12 および図-13 の拡大原画像に記入した。場所によっては、色分けと対応してない箇所もあるが、概ねひび割れ幅と色分けは良く一致している。

本実験では画像処理パラメータの一つであるスケール数を 4 と設定し、ひび割れ幅を 4 段階に分類する実験を行ったが、パラメータを変更することにより分類数を調整することが可能である。例えば、スケール間比率を小さくし、スケール数を大きくすると、より細かく分類することが可能である。しかしながら、分類精度が低下する恐れがあるため、撮影条件とパラメータの影響について検証することが課題となる。

4. まとめ

本研究では、ひび割れ幅をある点での計測値ではなく、線として評価するため、デジタルカメラで撮影されたひび割れ画像に対して、画像処理技術を適用し、ひび割れ幅の分類を試みた。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 多重スケール線強調処理により画素ごとに 4 段階のスケールで線らしさを評価し、抽出されたひび割れ上の各画素をスケール（線らしさが最大であるスケール）によりひび割れ幅を 4 段階に分類することが可能である。
- (2) ひび割れ抽出では、ひび割れのエッジが欠けた部分でありひび割れ幅としては大きい箇所では、複数の線として誤って認識されている。
- (3) 実際のひび割れに本手法を適用し、ひび割れ幅に応じて 4 段階に分類した結果、分類されたひび割れ幅は実際のひび割れ幅と概ね一致していた。パラメータの設定により分類数を調整することが可能であるが、分類数を増加すると分類精度が低下する恐れ

があるため撮影条件とパラメータについての検証が課題である。

現在はひび割れ幅を計測する段階までには至らず、4 段階の分類までしか出来ないが、将来的にはスケールの度数や直接に画素数を計測することにより、ひび割れ幅を数値として求められるように改良を行いたい。

参考文献

- 1) 庄野 昭, 斎藤 淳: コンクリート表面のひび割れ評価方法, ハザマ研究年報, pp.1-6, 2009.
- 2) 岡林隆敏, 奥松俊博, 中村秀晃, 木場俊郎: 高解像度デジタルカメラによるコンクリートのクラック幅検出法, 長崎大学工学部研究報告第 33 巻第 61 号, pp.143-148, 2003.
- 3) 武田 均, 堀口賢一, 小山 哲, 丸屋 剛: ウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1895-1900, 2006.
- 4) 丸屋 剛, 堀口賢一, 小山 哲, 澤 健男: ウェーブレット変換を用いた床版コンクリートのひび割れ調査の実用化, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.691-696, 2007.
- 5) 藤田悠介, 中村秀明, 浜本義彦: 画像処理によるコンクリート構造物の高精度なひび割れ自動抽出, 土木学会論文集 F, Vol. 66, No. 3, pp.459-470, 2010.
- 6) Y. Sato, S. Nakajima, N. Shiraga, H. Atsumi, S. Yoshida, T. Koller, G. Gerig, and R. Kikins: Three-dimensional multi-scale line filter for segmentation and visualization of curvatures in medical images. Medical Image Analysis, Vol.2, No. 2, pp. 143-168, 1999.
- 7) 金澤 靖, 金谷健一: コンピュータビジョンのための画像の特徴点抽出, 電子情報通信学会誌, Vol. 87, No. 12, pp. 1043-1048, 2004.
- 8) 澤田 晃, 佐藤嘉伸, 木戸尚治, 田村進一: 胸部 X 線画像における肺腫瘍陰影の検出-多重解像度フィルタ エネルギー差分画像の利用と性能分析-, Medical Imaging Technology, Vol. 17. No. 1, pp. 81-91, 1999.
- 9) A. Rosenfeld, R. A. Hummel, and S. W. Zucker: Scene labeling using relaxation operation. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-6, No. 6, pp. 420-433, 1976.
- 10) 高木幹雄, 下田陽久: 新編 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 2004.