論文 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

武田 均*1・堀口 賢一*2・小山 哲*3・丸屋 剛*4

要旨:コンクリート構造物の維持管理においてひび割れ幅やひび割れパターン,ひび割れ密 度などは劣化機構の推定や,補修対策の要否判定などのために重要な情報である。本研究は, 従来のデジタル画像によるひび割れ解析技術の問題点を改善するために,ウェーブレット変 換を適用することで,解析者の主観を極力排除し,ひび割れに関する情報処理を自動化する 手法とその精度について検討したものである。

キーワード:ひび割れ,画像解析,デジタルカメラ,ウェーブレット変換,維持管理

1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理作業では,ひ び割れ,剥離剥落,遊離石灰などのコンクリー ト表面に発生する変状の点検が行われている。 この日常点検は目視観察を主体として行われて おり,変状状況をスケッチした後で変状図面の 作成や変状数量を算定する作業が行われる。そ して,専門家の判断により構造物の健全度評価 が実施される。

今後,目視点検作業に要する時間や費用の効率化を図るためには,変状状況をデジタルカメ ラで撮影して,画像解析を用いてひび割れなどの変状を抽出する技術開発が必要とされる。

従来の画像処理手法ではひび割れを抽出する ために,入力画像の輝度による二値化処理が行 われる。しかし,撮影された画像データは,照 明や日陰などの撮影条件によって撮影むらが生 じるために一様な輝度の画像を得ることが難し い。このような画像データを二値化するために は,撮影ムラを除去するための前処理が必要と なる。また,二値化処理を行う際のしきい値の 設定やどのような処理手順でどのような処理を 行うかは,画像によって個々に異なるため,画 像処理を行う解析者の主観的な判断に委ねる部 分が多い。二値化処理することにより画像の情 報量は少なくなり,後の画像処理が簡単になる 利点がある反面,256 階調の輝度情報を十分に活 用できないため,ひび割れが特定の輝度である ことが前提条件となる。また,ひび割れと同一 輝度のひび割れでない情報もひび割れとして抽 出されることが多いため,ひび割れでない箇所 を削除する処理が煩雑になる。一方,ウェーブ レット変換による方法では,通常の輝度による 二値化は行わず,画像の輝度情報を連続量とし て扱ってウェーブレット係数値による二値化画 像が得られる。そのため,ひび割れ以外のコン クリート表面の汚れやマーキング跡,ヘアーク ラック,コールドジョイントなどを特定して排 除できる。

2. 維持管理における画像解析の位置付け

鉄筋コンクリート構造物に生じるひび割れは, 構造物の劣化状態の評価において最も基本的な 情報とされている。現状行われる,日常点検, 定期点検,詳細点検,緊急点検などにおいては, ひび割れの発生状況を観察することが基本とさ れている。これは,発生したひび割れのパター ンやひび割れ幅が,鉄筋コンクリートの劣化機

*1 大成建設 技術センター土木技術研究所 主任研究員 (正会員)
*2 大成建設 技術センター土木技術研究所 副主任研究員 (正会員)
*3 篠塚研究所
*4 大成建設 技術センター土木技術研究所 主席研究員 工博 (正会員)

構と密接に関連しており,劣化原因の 推定や,構造物の健全性を評価するた めに用いられるためである¹⁾。

本研究で対象とした画像解析技術 は、図-1に示したように、調査点検 作業の効率化、変状記録の効率化、劣 化機構推定や劣化予測技術の高度化 のための新しい技術と位置づけられ ている。ここでいう効率化とは、デジ タル画像を利用することによるデー タ取得の効率化とデータ整理の効率

化を意味し,高度化とは,画像解析によって従 来行われてきた変状調査データ以上に詳細な情 報が得られることを利用して,劣化機構の判定 や,新たな劣化指標を見出すことができる可能 性を考えたものである。

3. ウェーブレット変換

3.1 ウェーブレット変換とは

ウェーブレット(wavelet)とは、"小さな波" あるいは、"さざなみ"という意味であり、局在性 を持つ波の基本単位としてウェーブレット関数 (マザーウェーブレットと呼ぶ)を用いた式(1) で表現される。ウェーブレット変換とは、この ウェーブレット関数を拡大・縮小することによ り、時間情報と周波数情報を同時に解析する方 法である。この手法は、1980年代にフランス人 Morlet によって石油探査を目的とした人工地震 波の中に含まれる不連続性を検出するために開 発された。それ以後、多くの数学者や工学者に より研究され、信号処理や画像処理の分野で盛 んに応用されている²⁾。

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{1}$$

ここに, *a* はマザーウェーブレット*w*を時間方 向に拡大・縮小するパラメータであり, 周波数 の逆数に相当する。*b* は時間のシフト量に対応し, ガウス窓の位置を示す。*a* および *b*を図-2 に模 式的に示す。

ウェーブレット変換は、入力信号f(t)とウェー



ブレット関数 $\psi_{a,b}(t)$ との内積より式(2)を用いて 求める。

$$W(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$
(2)

ウェーブレット関数は,一般に複素関数であ り内積には複素共役が用いられる。

W(a,b)は、フーリエ変換におけるフーリエ係数 に相当し、t=bにおいて信号f(t)の中に $\psi_{a,b}(t)$ の 成分がどれだけ含まれているかを表している。aが小さければ高い周波数成分、大きければ低い 周波数成分に対応する。

3.2 ウェーブレット解析のアルゴリズム

(1) 二次元ウェーブレット係数平の算出

まず,入力画像に対して Gabor 関数を用いて ウェーブレット変換を行って,2次元ウェーブレ ット係数Ψを式(3)より求める。

$$\Psi_{\theta,k}(x_0, y_0) = \frac{1}{\alpha^k} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \psi\left(\frac{x - x_0}{\alpha^k}, \frac{y - y_0}{\alpha^k}\right) dx dy$$
⁽³⁾

ここに, f(x, y)は入力画像(輝度の平面分布), (x_0, y_0) は ψ ()の着目点, a^k は ψ の拡大縮小に関する



パラメータであり,式(1)の *a* に相当する。 ψ() は式(4)で表されるマザーウェーブレット関数で あり,ここでは Gabor 関数を用いた³⁾。g()は式 (5)で表される二次元ガウス関数である。(*x*',*y*') は式(6)で表される座標(*x*,*y*)の回転角θに対する 写像である。

$$\psi_{\sigma,f,\theta}(x,y) = g(x',y') \left[\exp(i2\pi f x') - \exp\{-(2\pi f \sigma)^2\} \right]$$
(4)

$$g(x', y') = \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left\{-\frac{{x'}^2 + {y'}^2}{2\sigma^2}\right\}$$
(5)

$$\begin{pmatrix} x'\\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x\\ y \end{pmatrix}$$
(6)

ここに、fは中心周波数、 σ はガウス窓の大き さ、 θ はガボール関数における波の進行方向を 表す回転角である。

(2) 二次元ウェーブレット画像の作成

式(3)を複数の θ , k に対して適用し,着目点 ($x_{0,y_{0}}$)におけるウェーブレット係数 Ψ の累計値 $C(x_{0,y_{0}})$ を入力画像の全画素について式(7)によっ て計算する。

$$C(x_{0}, y_{0}) = \sum_{k} \sum_{\theta} |\Psi_{\theta, k}(x_{0}, y_{0})|$$
(7)

ここで得られたウェーブレット係数の累積値 を正規化した画像(ウェーブレット画像)を作 成する。

4 ひび割れの判定

4.1 二值化処理

ウェーブレット係数は、ひび割れの輝度と背 景色であるコンクリートの輝度およびひび割れ 幅によって変化することから,擬似データを用 いて,ひび割れ部とコンクリート部の輝度(濃 度)を変数としたウェーブレット係数のしきい 値(η)テーブルを作成した。ウェーブレット画像 に対して,ウェーブレット係数値とこのしきい 値との関係によってひび割れの判定を行った。

図-3に示したように、ひび割れはある有限な 幅を持っていると考えられるので,注目してい る画素におけるひび割れの判定は,式(8)に示し たように,注目画素の輝度と近傍の幾つかの画 素から求めた輝度の平均値とから,しきい値テ ーブルを用いてひび割れに関するウェーブレッ ト係数のしきい値を求め,注目画素のウェーブ レット係数からしきい値を差し引いた値が正値 であればひび割れと判定した。

$$Crack, i = \begin{cases} 1 & C(x_0, y_0) - (\eta + \varepsilon) > 0\\ 0 & C(x_0, y_0) - (\eta + \varepsilon) \le 0 \end{cases}$$
(8)

ここに、*Crack,i* はひび割れの判定値であり、1 のとき注目画素はひび割れと判定され、0のとき 非ひび割れと判定される。 $C(x_0,y_0)$ は注目画素 (x_0,y_0) におけるウェーブレット係数の累計値、 η はウェーブレット係数のしきい値、 ϵ はしきい値 の許容値であり、入力画像の画質やコンクリー ト表面の汚れを考慮した任意の値である。

ここで、画像データの品質が低い場合やコン クリートの表面状況によっては、ひび割れ以外 のノイズをある程度除去するために、しきい値 の調整が必要な場合があり、これに対応するた めに、しきい値の許容値を設定した。以上の処 理を行って、ひび割れを抽出した画像が図-4(d)











(a)入力画像

(b) ウェーブ レット係数の累積値の鳥瞰図 (c)ウェーブレット画像 図-4 画像処理の概要

に示した二値化画像である。

4.2 輪郭線追跡処理および細線化処理

ウェーブレット画像の二値化処理は、ウェー ブレット画像上の画素を個別に扱って、ひび割 れの判定を行うものであり,図-4(d)に示した ように,二値化したウェーブレット画像はコン クリート表面のテクスチュアを反映して,ひび 割れ以外の部分でもひび割れと判定されている 部分が残存している。そこで、一般的な二値化 画像処理手法である輪郭線追跡処理を二値化画 像データに適用して、さらにノイズの除去を行 った。輪郭線追跡処理とは、二値化画像を線図 化し,幾何学的な連結性を持った塊状の形状と して図形の情報を抽出する手法である。二値化 処理では点の情報を利用したのに対して、輪郭 線追跡処理では2次元的な情報を利用するとこ ろに特徴がある。図-5に示したように、二値化 画像に対して輪郭線追跡処理を行って得られた 画像(ひび割れ抽出画像)ではひび割れのみが 抽出されていることがわかる。輪郭線追跡処理 における抽出面積の値を調整することによりノ イズの除去が可能であるが、ひび割れを除去す る可能性もある。また、明らかにひび割れでは ない部分が抽出される場合もある。したがって,



ひび割れ抽出画像



(d)二值化画像

細線化画像

図-5 ひび割れ抽出処理

明らかに人間がひび割れでないと判断できるコ ンクリート打継ぎ目や型枠跡などの部分を画像 編集ソフトによりマニュアル操作で削除して, 最終的なひび割れ画像を作成した。

次に、ひび割れ長さやひび割れ計測のために、 ひび割れの中心線を連結する細線化処理を行い, さらに、ひび割れと判定された画素の幾何学的 な特徴点の抽出を行ってひび割れ長さやひび割 れ幅の計算を行う。

4.3 二値化処理のしきい値とひび割れ検出精度

ウェーブレット画像を二値化する際の許容値 *ε*の値によって、最終的に抽出されるひび割れの 精度は変化する。図-6に示したように、小さな 許容値を設定すれば二値化画像におけるノイズ は多くなるが、最終的に抽出されるひび割れは、



ウェーブレット画像 ε=300,二値化画像→ ひび割れ画像

ε=100,二値化画像→ ひび割れ画像 図-6 ひび割れ検出精度に及ぼす二値化しきい値の許容値*ε*の影響



図-7 建物躯体に発生したひび割れの解析例(60cm×40cm範囲)



図-8 画像解析によるひび割れ幅の評価結果

より細いひび割れまで検出することができる。

4.4 ひび割れの定量化

種々の劣化機構を想定した劣化の進行度の評 価,補修対策方法の検討のためのひび割れに関 する指標として,ひび割れ長さとひび割れ幅を 選定して,以下のように各指標を評価した。

(1) ひび割れ長さ

ひび割れを定量化するための処理はまず,抽 出されたひび割れ画像を細線化処理して,ひび 割れと判断された画素の集まりの中心を連ねた 線分に変換した。入力画像におけるひび割れ長 さは線分の長さを累計することによって算出し た。

(2) ひび割れ幅

次に、細線化された各々の線分に対して法線 を考えることによって、法線方向のひび割れ画 素から、ひび割れ幅を算定した。したがって、 原理的には、入力画像の解像度に応じて検出可 能な最小ひび割れ幅が決まることになる。



図-9 計測値と画像解析値の比較

5. 適用例

5.1 建物躯体に発生したひび割れの解析例

図-7 に建物躯体に発生したひび割れの解析 結果を示す。ここでは、スコープ(最小目盛り 0.05mm)による目視判定によるひび割れ幅と画 像解析による結果を比較して示した。ここで、 入力画像の分解能は0.1mm/pixelとし、画像処理 によるひび割れ幅は0.1mm 単位で評価した。

通常,ひび割れ幅は,図の入力画像に示した ように、1本とみなせるひび割れについて1箇所 の測定結果で代表することが多いが、画像解析 を適用すれば、図-8に示したように、1本のひ び割れにおけるひび割れ幅を分布として扱うこ とができる。このような詳細なひび割れの情報 は、構造物の耐久性評価の高精度化のために有 効であると考えられる。ただし、画像解析によ るひび割れ幅は画素単位で評価されるため、図 に示したように、ひび割れ幅は画像の解像度に 応じた区間として評価される。さらに、図-9に はスコープによるひび割れ幅と画像解析による



図-10 微細なひび割れの計測への適用例(発生後間もない腐食ひび割れ幅の計測)

ひび割れ幅の評価結果の相関を示した。スコー プによるひび割れ幅と画像解析によるひび割れ 幅は概ね一致しているが、この例では、画像解 析によるひび割れ幅の方が若干ひび割れ幅が大 きめに評価される場合が多かった。撮影された クラックスケールの画像と解析値とを比較した ところ、ここで採用した閾値では、ひび割れ 0.04 ~0.2mm では画像解析値の方がクラックスケー ルの実値と比較して0.05mm程大きめに、0.55mm ~0.7mm では画像解析値の方が 0.05mm 程小さ めに評価されていたことと対応していると考え られる。図に示したように、スコープによるひ び割れ幅の計測結果は、計測者によってばらつ きが生じる。画像解析による手法では、このよ うな、計測者による計測値の変動がないという 長所がある。

5.2 微細なひび割れへの適用

画像解析によるひび割れの解析の利点の一つ は、ひび割れ幅の検出精度が、画像の解像度に 依存しており、ひび割れの大きさには依存して いないことがある。したがって、図-10に示し たように、非常に微細なひび割れであっても、 拡大鏡などによって高倍率の画像が撮影できれ ば、ひび割れ幅に拠らずひび割れの解析が可能 である。図の例は、鋼材の腐食によるひび割れ の発生初期におけるひび割れ幅を試験体上で観 察したものであり、ひび割れ幅 0.032~0.035mm という微細なひび割れ幅が計測された。

6. まとめ

本研究では、ウェーブレット変換を用いた画

像解析によるひび割れの抽出,ひび割れ幅の定 量的な評価方法について検討を行った。得られ た知見を以下に示す。

- (1) ウェーブレット変換による画像解析では,画像の平面的な輝度の分布情報を加味した二値化画像を作成することができる。したがって,入力画像の輝度のばらつきの影響が低減された二値化画像が得られ,精度よくひび割れを抽出することができる。
- (2) ひび割れの抽出においては、入力画像の画質 に応じてウェーブレット係数の許容値を設 定することによって、ひび割れの抽出精度を 調整することができる。
- (3) 画像解析では、非常に微細なひび割れ幅の解 析や、ひび割れ幅の詳細な分布を調査するこ とも可能である。したがって、現在までに十 分に定量化されていない情報が得られる。今 後、このようなひび割れに関する詳細な情報 を有効に活用することが重要と考えられる。

参考文献

- (社)日本コンクリート工学協会編著:コン クリートのひび割れ調査,補修・補強指針 -2003-,2003.6
- 中野宏毅、山本鎮男、吉田靖夫著:ウェーブ レットによる信号処理と画像処理、共立出版、 pp.1-89、1999
- 中野宏毅,吉田靖夫,藤田和弘:ガボール関数を用いたカラー液晶ディスプレイのマクロ欠陥検査支援,電子情報通信学会論文誌, Vol.J80-D-II, No.3, pp.734-744, 1997.3