

# 論文 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

丸屋 剛<sup>\*1</sup>・堀口 賢一<sup>\*2</sup>・小山 哲<sup>\*3</sup>・澤 健男<sup>\*4</sup>

**要旨**：コンクリート表面に発生したひび割れの分布状態や幅，長さなどを定量的に評価する技術として，デジタルカメラにより撮影した画像を解析する方法がある。本論文は，40年間供用されているRC中空床版橋の床版下面を対象にデジタルカメラによる撮影を行い，その画像解析にウェーブレット変換技術を適用してその有効性を検証したものである。その結果，従来の画像解析技術に比べて高精度でより定量的にひび割れを評価できることが確かめられた。

**キーワード**：ひび割れ，画像解析，ウェーブレット変換，RC中空床版，デジタルカメラ

## 1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れに対する目視点検作業の時間や費用の効率化を図るため，コンクリート表面をデジタルカメラで撮影し，撮影画像を画像処理技術で解析することによりひび割れを抽出する技術が実用化されている。しかし，画像解析におけるひび割れ抽出の精度は必ずしも高いとはいえないのが現状である。この理由としては，コンクリート表面の状態，デジタルカメラの解像度などの性能，撮影条件，画像解析方法など種々考えられる。

本研究では，画像解析における精度をさらに向上させるために，新しい画像解析手法を用いてひび割れを抽出する技術の実用化を検討した。従来の画像処理では，画像データからひび割れを抽出するために輝度を用いた二値化処理が行われるが，本研究では，ウェーブレット変換をデジタル画像データに適用して二値化処理までを自動処理で行い客観的にひび割れが抽出できる手法を採用した<sup>1)</sup>。撮影は詳細なひび割れ幅の経時変化の記録及び一定幅以上のひび割れ分布の定量化を目的として2通りの方法で行った。

また，撮影日を変えた2回の撮影におけるひび割れ抽出の変動についても検討を行った。

検討の対象とした構造物は，建設後約40年経過した国道246号線中津川橋のRC中空床版橋の床版下面であり，幹線道路であるため交通量が多く，また大型車の混入率も高いため曲げひび割れが多数発生している。また，撮影対象は地上から上向きにコンクリート表面を撮影することができる構造物である。

## 2. ウェーブレット変換と画像解析

### 2.1 ウェーブレット変換について

ウェーブレット変換は周波数解析手法の一つであり，波形の局所的特性を調べる方法や画像圧縮などの分野に応用されている<sup>2)</sup>。この手法をコンクリート表面に発生しているひび割れに適用することで，撮影画像の輝度情報を周波数と方向成分に分解してひび割れの検出を行い，ひび割れの長さや幅の情報を定量化することができる。

### 2.2 画像解析の概要について

図-1の画像解析フローに示すように，本解析

\*1 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 主席研究員 工博 (正会員)

\*2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所 副主任研究員 (正会員)

\*3 (株) 篠塚研究所

\*4 国土交通省 関東地方整備局 横浜国道事務所 厚木出張所長

手法は 4 つのステップから構成されている。まず、現地で撮影した画像（撮影画像と呼ぶ）に補正処理を行い、ひび割れ画像解析をするための画像（入力画像と呼ぶ）を作成する。この入力画像を用いてひび割れ分布解析やひび割れ定量解析を行い、定量的なひび割れ評価をする。

(1) ステップ 1：現地画像撮影

デジタルカメラ、レンズ、照明機器などの機器を用いて現地で画像撮影を行う。

(2) ステップ 2：撮影画像の補正処理

撮影画像に対して下記の補正処理を行い、ひび割れ画像解析のための入力画像を作成する。

① 収差補正

広角レンズなどを用いて撮影すると外側部分で歪んだ画像となるために、この歪みを補正する処理である。

② あおり補正

被写体を斜めから撮影した画像を正面から見た画像に変換する処理である。

③ 画像合成

収差補正やあおり補正された複数の隣り合った画像をつなぎ合わせる処理である。

④ 画像の色調補正

撮影画像のひび割れ境界をシャープにする処理である。

(3) ステップ 3：ひび割れ分布解析

入力画像を用いてウェーブレット変換と二値化処理を行い、ひび割れ部分を特定した画像（二値化画像と呼ぶ）を作成する。その際、二値化画像に多くの雑音が含まれるため輪郭線追跡処理により雑音除去を行う。これら処理は全て自動で行う。

(4) ステップ 4：ひび割れ定量解析

ひび割れ分布解析で得られた二値化画像を用いて、目的に応じて以下の処理を行う。

① ひび割れ密度処理

単位面積当たりに対するひび割れ長さの割合を求める場合に行う。

② ひび割れの連続性処理

低分解能で撮影した画像で起こり易い二値化

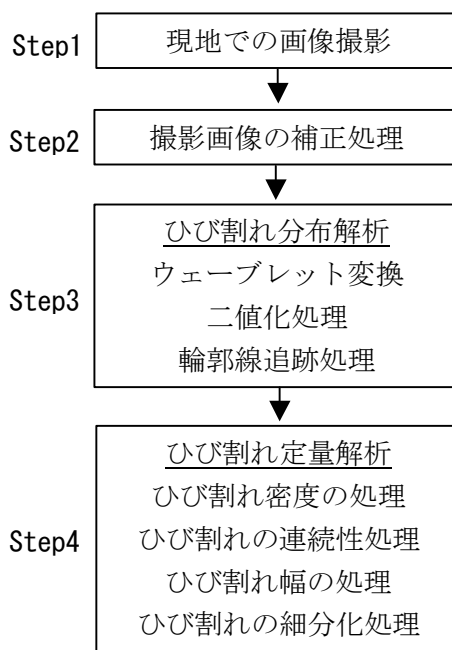


図-1 画像撮影フロー

した画像のひび割れに不連続性が生じている場合にひび割れの連結処理を行う。

③ ひび割れ幅の処理

高精度なひび割れ幅を求める場合に行う。二値化画像には打継目などの非ひび割れ部分が存在するため、画像編集ソフトによりこれらの除去を手作業で行い、ひび割れ部分のみの画像（ひび割れ画像と呼ぶ）を作成する。この画像からひび割れの幅や長さなどの情報を計算し、CAD ソフトに受け渡すためのデータや CAD 画像の作成を行う。

④ ひび割れ幅の細分化処理

ウェーブレット係数とひび割れ幅との関係を用いて、撮影画像から分解能以下の精度でひび割れ幅を求める場合に行う。

2.3 ウェーブレット変換の定式化

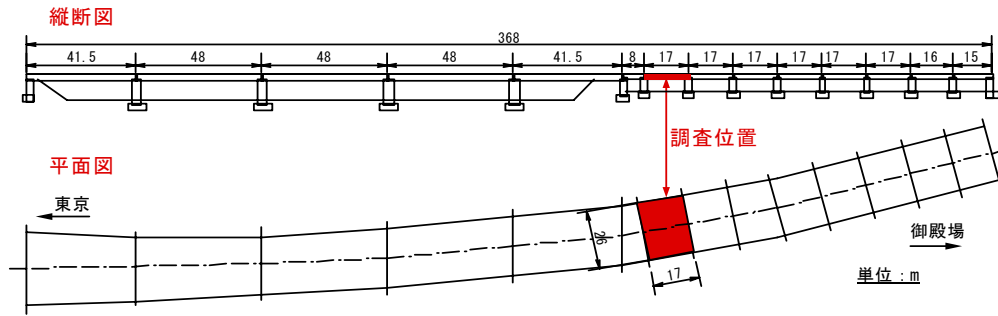
二次元ウェーブレット変換の基本式の式(1)よりウェーブレット係数  $\Psi$  を求める。

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

ここに、 $f(x, y)$ ：入力画像

$\psi$ ：マザーウェーブレット関数、

$a^k$ ： $\psi$  の拡大縮小、



図－２ 調査位置（中津川橋第7径間上下線）

$f$  : 中心周波数,

$\sigma$  : ガウス関数の大きさ,

$\theta$  : 波の進行方向を表す回転角。

また、マザーウェーブレット関数は式(2), ガウス関数は式(3), 座標回転は式(4)である。

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

$$g(x', y') = \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left\{-\frac{x'^2 + y'^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4)$$

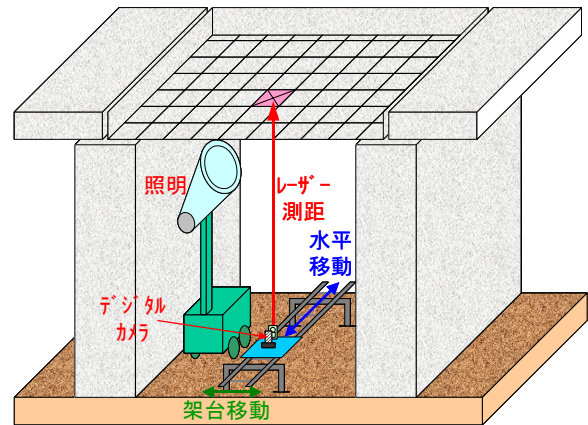


写真－1 調査範囲の外観

### 3. RC中空床版のひび割れ調査

#### 3.1 調査の概要

ウェーブレット変換を用いた画像解析を、曲げひび割れが多数発生している RC 中空床版橋の床版調査に適用した。図－2 及び写真－1 に調査対象とした中津川橋とその調査範囲を示す。中津川橋は昭和43年の竣工で、鋼5径間連続連続非合成I桁橋とRC9径間連続中空床版橋の2種類の構造形式であり、橋長は368m、幅員は12.9m～13.7mである。調査はRC中空床版の下面を対象として実施した。本調査は、被写体とカメラの焦点距離（すなわち写真1枚あたりの撮影の平面的な範囲）をパラメータとして撮影画像の分解能を設定し、ひび割れ幅の経時変化など局所的に詳細なひび割れ幅の記録が必要な場合と、一定幅以上のひび割れの長さなどある範囲におけるひび割れの全体的な分布状態やこれを定量化したひび割れ密度が必要な場合を想



図－3 ひび割れ画像の撮影方法イメージ

定して、2通りの画像分解能で撮影を行った。

#### 3.2 デジタルカメラによる撮影の方法

図－3 にひび割れ画像の撮影方法を示す。また、写真－2、写真－3 にひび割れ画像の撮影状況を示す。ひび割れ画像は、撮影対象とする区画に対してほぼ平行となるようにカメラ移動架台を組立て、この上にデジタルカメラを設置して撮影した。撮影手順を以下に示す。

① 撮影対象面にあるチョーク跡やツタなどの



写真-2 ひび割れ画像撮影状況（全景）

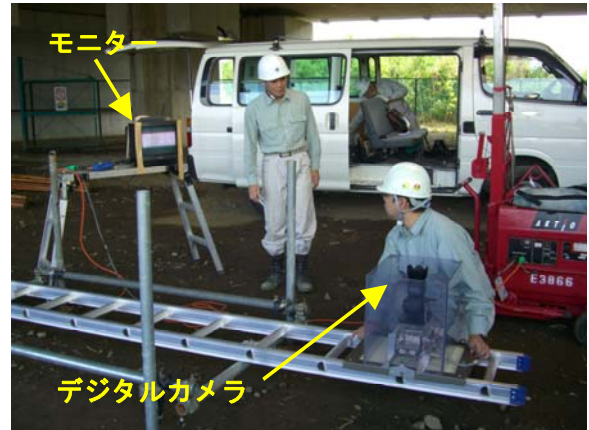


写真-3 ひび割れ画像撮影状況（拡大）

障害物を除去する。これは、ウェーブレット変換後のひび割れ抽出に影響を与えるためである。

- ② レーザー測距により、水平架台を床版と所定の距離で、可能な限り平行に設置する。
- ③ デジタルカメラを水平架台に設置する。
- ④ 照明を撮影範囲に照射し、画像をモニターで確認しながら撮影する。
- ⑤ カメラ、照明を次の撮影区画に移動する。

### 3.3 使用機材及び撮影条件

画像分解能は、0.8mm/pixel と 0.3mm/pixel の2通りとした。この分解能は、今回使用した 800万画素のデジタルカメラの場合、それぞれ 2.3m × 1.5m, 0.9m × 0.6m の範囲を撮影する場合に相当する。本調査では、分解能 0.8mm/pixel による撮影を中分解能撮影、分解能 0.3mm/pixel による

撮影を高分解能撮影とした。

## 4. ひび割れ画像解析結果

中分解能撮影画像を用いて、ひび割れ分布解析結果である二値化画像からひび割れ検出の精度と再現性およびひび割れ幅の細分化処理、高分解能撮影画像を用いてひび割れ幅の解析を行った。

### 4.1 ひび割れ検出の精度

図-4～図-6に中分解能撮影による床版パネル2箇所を合成した撮影画像、二値化画像およびひび割れ画像を示す。また、図-6のひび割れ画像上にひび割れ実測位置と実測値を示す。ひび割れ幅の検出精度の検証を行った結果、ひび割れ幅 0.1～0.15mm は撮影画像の品質により

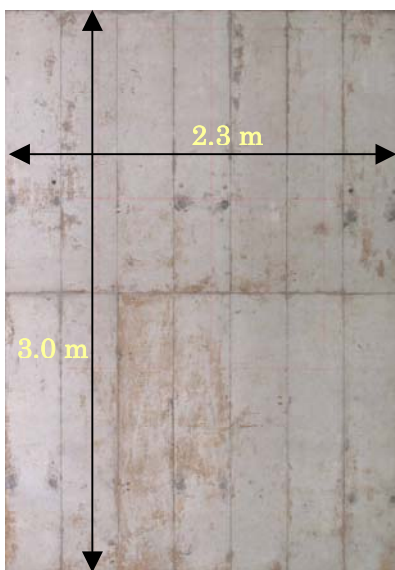


図-4 撮影画像

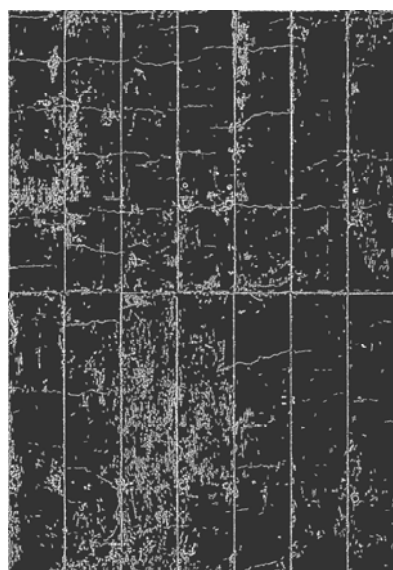


図-5 二値化画像

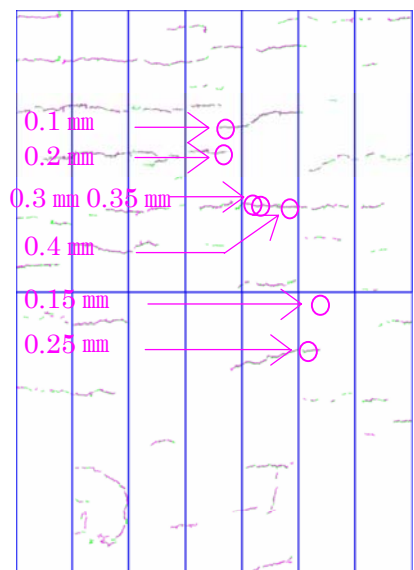


図-6 ひび割れ画像

表－１ ひび割れ分布

ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ画像 (Pixel)	比率 (%)
0-0.33	329,407	77.3
0.33-0.66	73,077	17.1
0.66-0.99	20,909	4.9
0.99-1.32	1,589	0.4
1.32-1.65	808	0.2
1.65-1.98	188	0.1
1.98-2.31	105	0.0
2.31-2.64	26	0.0
合 計	426,109	100

表－２ 再現性の誤差

床版 パネル名	二値化画像 (Pixel)		誤差 (Pixel)	変動率 (%)
	8月30日	10月12日		
U20004	361,766	393,524	31,758	8.8
U20005	372,658	368,170	-4,488	-1.2
U20006	390,541	383,842	-6,699	-1.7
U20007	687,197	581,309	-105,888	-15.4
U20008	340,679	304,016	-36,663	-10.8
U30004	438,600	466,412	27,812	6.3
U30005	436,856	407,905	-28,951	-6.6
U30006	284,239	297,716	13,477	4.7
U30007	384,633	383,914	-719	-0.2
U30008	416,738	405,372	-11,366	-2.7
合 計	4,113,907	3,992,180	-121,727	5.8

表－３ ウェーブレット係数の最大値と最小値

床版 パネル名	ひび割れ数 (Pixel)	ウェーブレット係数値	
		最大値	最小値
U20004	36,432	6,130	1,769
U20005	38,840	5,612	2,038
U20006	36,031	5,624	1,682
U20007	40,790	6,094	1,946
U20008	25,688	6,359	2,078
U30007	37,045	6,675	2,079
U30008	18,518	4,872	2,080
全体	233,344	6,675	1,682

表－４ ひび割れ幅とウェーブレット係数の対応

ひび割れ幅 (mm)	ウェーブレット係数値	
	下限値	上限値
0.1 – 0.2	1,682	2,359
0.2 – 0.3	2,395	3,109
0.3 – 0.4	3,109	3,822
0.4 – 0.5	3,822	4,535
0.5 – 0.6	4,535	5,248
0.6 – 0.7	5,248	5,962
0.7 – 0.8	5,962	6,675

検出がやや困難な場合があるが、幅 0.2mm 以上のひび割れ検出は可能であることが確認された。

また、高分解能撮影による画像からの解析値と実測値と比較した結果、幅 0.1mm 以上のひび割れ検出が可能であることが確かめられた。

なお、表－１にひび割れ数量計算より求めたひび割れ幅ごとのひび割れ分布を示すが、このようなひび割れに関する情報の定量化も可能であることを示した。

#### 4.2 ひび割れ検出の再現性

2006年8月と10月に中分解能撮影による床版パネル10箇所の撮影画像からひび割れ検出の再現性を検討した。1箇所ごとに各々5回ずつ撮影を行い、最も品質の良い撮影画像で比較した。図－6は2枚のひび割れ画像を重ね合わせたひび割れ進展図である。図中の緑色は8月、ピンク色は10月の検出されたひび割れを表している。表－2は再現性を比較したものであるが、これによれば再現性の平均誤差率は5%であること

が確かめられた。

#### 4.3 ひび割れ幅の細分化処理

撮影画像が0.8mm/pixelのような場合、分解能0.8mm以下のひび割れ幅を評価することは難しい。ウェーブレット係数とひび割れ幅の高い相関関係を利用して、ひび割れ画像のひび割れと判定されたピクセルでのウェーブレット係数の最大値と最小値を求め、ある範囲ごとに分類し細分化したひび割れ幅との関係式を求めウェーブレット係数値からひび割れ幅の推定を行った。

7箇所の床版パネルを用いて、ひび割れ解析より求めたウェーブレット係数の最大値と最小値を表－3に示す。ウェーブレット係数の最大値と最小値がひび割れ幅0.8mmと0.1mmに対応すると仮定して、ひび割れ幅を0.1mm単位に分類し線形補間によりひび割れ幅とウェーブレット係数値の対応に関する表－4を作成した。

表－5 適中率および未検出率

ひび割れ幅 (mm)	ひび割れ画像					
	適中	不適中		未検出	適中率	未検出率
		大	小			
0.05	0	0	0	4	0.0	100.0
0.10	1	1	0	5	14.3	71.4
0.15	6	6	0	6	33.3	33.3
0.20	11	1	0	2	78.6	14.3
0.25	19	0	0	0	100.0	0.0
0.30	13	0	2	0	86.7	0.0
0.35	6	0	4	0	60.0	0.0
0.40	2	0	1	0	66.7	0.0
合計	58	8	7	17	64.4	18.9

90箇所ひび割れ計測値と解析値より誤差範囲±0.1mmにおける適中率および未検出率の検討結果を表－5に示す。計測値が解析値の範囲内に入っている場合は「適中」、範囲内に入っていない場合を不適中とする。さらに、不適中で解析値の方が大きな場合は「大」、小さな場合は「小」、ひび割れを検出できない場合は「未検出」とした。分解能 0.8mm/pixel の撮影画像から0.2mm以上のひび割れ検出が可能であり、画像の品質の良否によっては0.1～0.15mmの検出も可能であることがわかった。計測値と解析値の誤差範囲±0.1mmでは適中率64.4%が得られ、誤差範囲±0.15mmでは77.8%と高い精度でひび割れ幅を評価できることが確認できた。小さなひび割れ幅では解析値は大きめ、大きなひび割れ幅では解析値は小さめの傾向を示す。

5. まとめ

- (1) デジタルカメラにより撮影したコンクリートのひび割れ画像をウェーブレット変換を用いて解析することによって、再現性のあるひび割れ抽出が可能であることがわかった。
- (2) 分解能 0.8m/pixel による撮影画像から、0.2mm以上のひび割れ検出が可能であることがわかった。
- (3) 分解能 0.3mm/pixel による撮影画像から、0.1mm以上のひび割れ検出が可能であることがわかった。

(4) 分解能 0.8mm/pixel による撮影画像の細分化処理から、誤差範囲±0.1mmでは適中率64.4%、誤差範囲±0.15mmでは77.8%と高い精度でひび割れ幅を評価できることがわかった。

(5) ウェーブレット変換による画像解析は精度がよいものの、従来の輝度による二値化の解析に比べて時間がかかるのが一般的な傾向である。また、ひび割れとみなされた汚れなどは人為的に消去せざるを得ないなど、現実的にはすべてを自動化処理するには到っていない。今後は、画像処理の自動化と高速化が課題である。

(6) 本手法をひび割れ調査に適用することにより、ひび割れ密度等を算出できるため、今後、構造物の変状の進行を定量的、客観的に評価することができ、適切で効率的な維持管理が可能になるものと考え<sup>3)</sup>。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 土木学会 : コンクリート標準示方書維持管理編 2001年制定, 2002.