

床版コンクリートのひび割れ調査への画像解析技術の適用 — ウェーブレット変換を用いたひび割れ画像解析 —

丸屋 剛*1・堀口 賢一*2・小山 哲*3・澤 健男*4

1. はじめに

橋梁やトンネルなどのコンクリート構造物は、適切な維持管理を行って、長期間にわたりその機能を果たすことが求められている。一方で、厳しい環境条件や想定した以上の荷重が作用するなどにより、ひび割れが発生することがある。構造物を適切に維持管理するためには、このようなひび割れの発生原因と発生状態、あるいは時間とともに発生量が増えていくかなど、調査に基づき健全性の診断や、対策方法などを検討する必要がある。また、近年ではライフサイクルコストを算出したうえで、経済性の観点も考慮

に入れた対策に関する評価が実施されており、ひび割れの発生状況を予測し、その結果に応じた補修・補強を選定してコストを試算することになる。

このような状況では、これまで以上にコンクリート構造物のひび割れを効率よく、高精度に調査することが要求される。さらに、劣化予測の精度を向上させ、補修・補強の数量を算出しライフサイクルコストに結びつけるためには、ひび割れ長さや幅、ひび割れ密度の算定といった定量化も必要となる。

本稿では、不連続や非定常な波形解析に有効なウェーブレット変換手法を用いたコンクリート構造物のひび割れ画

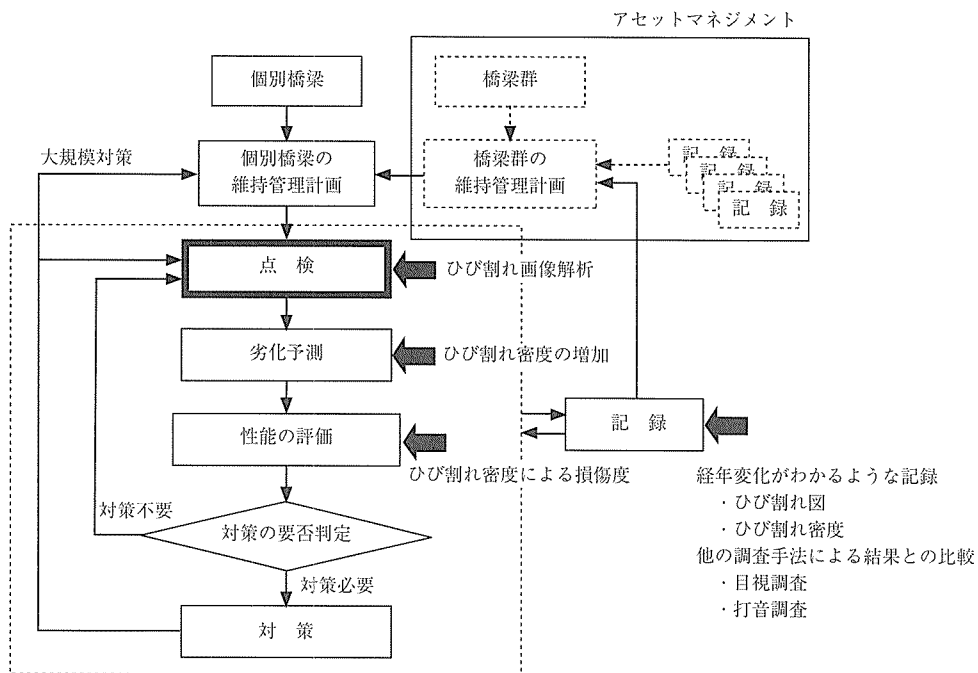
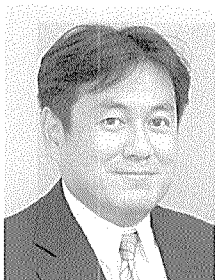


図-1 維持管理におけるひび割れ画像解析の適用



*1 Tsuyoshi MARUYA

大成建設(株)技術センター
土木技術研究所



*2 Kenichi HORIGUCHI

大成建設(株)技術センター
土木技術研究所



*3 Satoru KOYAMA

(株)篠塚研究所



*4 Takeo SAWA

国土交通省関東地方整備局
横浜国道事務所

像解析技術について述べる。本技術による画像解析は、以下の項目により構成されている。

- ① デジタルカメラによるひび割れ画像の撮影
- ② ウェーブレット変換手法によるひび割れ撮影画像のウェーブレット画像への変換
- ③ ウェーブレット画像の二値化画像への変換
- ④ 二値化画像上からひび割れのみを抽出するひび割れ抽出画像への変換
- ⑤ ひび割れ抽出画像を用いたひび割れ幅、ひび割れ長さ、ひび割れ密度としての定量化

本ひび割れ画像解析技術では、従来の画像解析技術では人手に頼らざるを得なかったひび割れ撮影画像からひび割れ抽出画像への作業をほぼ自動化できることで効率化を達成し、ひび割れ幅も高精度に計測できるようになった。また、ひび割れ抽出画像からひび割れ幅ごとに長さを集計することや、調査面積あたりのひび割れ長さ（ひび割れ密度）の算出も実施することが可能である。

本手法では、図 - 1 に示した維持管理のフローにおいてひび割れ密度を算出できるため、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、適切な維持管理を行うことが可能になるものと考えられる。

2. ひび割れ画像解析の概要

周波数解析の一手法であるウェーブレット変換を用いて、コンクリート表面に発生しているひび割れの検出を行う。ウェーブレット変換は、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を検出する方法である。本ひび割れ画像解析は、以下に示す5つの処理から構成される。

2.1 現地画像撮影

現地でひび割れの発生しているコンクリート表面の撮影（撮影画像と呼ぶ）を行う。カメラから被写体までの距離や検出したいひび割れ幅などの条件より、デジタルカメラとレンズを組み合わせることで撮影画像の空間分解能を決定する。空間分解能は撮影画像の画素に対する被写体の大きさを表す。十分な照度が得られない場所では補助照明を用いて撮影する必要がある。

2.2 撮影画像の補正処理

撮影画像に対して、以下に示すような補正処理を必要に応じて行い、ひび割れ画像解析のための画像を作成する。この画像を入力画像と呼び、図 - 2 (a) に一例を示す。

(1) あおり補正
被写体を斜めから撮影した画像に対して、正面から見た画像に変換する処理である。

(2) 収差補正
広角レンズで撮影すると外側部分でひずんだ画像となるため、このひずみを補正する処理である。

(3) 鮮鋭化補正
撮影画像の濃淡が不連続に変わる濃淡境界（エッジ）がぼやけている場合、周波数領域における高域強調フィルタを用いてエッジをシャープにする処理である。

2.3 ひび割れ検出解析

入力画像に対してウェーブレット変換を行い、ウェーブレット係数を求める。図 - 2 (b) に輝度を反転させて基準化したウェーブレット係数の画像（ウェーブレット画像と呼ぶ）を示す。次に、ウェーブレット係数を用いて二値化処理を行い、ひび割れ部分を検出した画像（二値化画像と呼ぶ）を作成する。図 - 2 (c) に二値化画像を示す。二値化画像に雑音が含まれる場合は、輪郭線追跡処理により雑音を除去する。これらひび割れ検出処理は自動で行うことができる。

2.4 ひび割れ画像の作成

ひび割れ検出解析で得られる二値化画像には、コンクリートの打継目や型枠跡などのひび割れ以外の部分が存在する。これらの部分は画像編集ソフトを用いてマニュアル作業により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。図 - 2 (d) にひび割れ画像を示す。

2.5 ひび割れ定量解析

ひび割れ画像に対して細線化処理を行い、線の太さが一画素幅の中心線から構成される画像を作成し、ひび割れ情報の定量化や図処理を行うことができる。このほかに、CADソフトに受け渡すためのdxfファイル作成、ひび割れの経年変化の追跡図作成、低分解能撮影画像に対して分解能以下のひび割れ幅を推定して度数分布や分布図を作成する処理などがある。

3. ウェーブレット変換を用いたひび割れ検出

3.1 ウェーブレット変換

ウェーブレット変換は周波数解析の一手法であり、局所的な特性を調べることができる。二次元ウェーブレット変換は、式(1)で表すことができる。 $f(x, y)$ は入力画像、 ψ

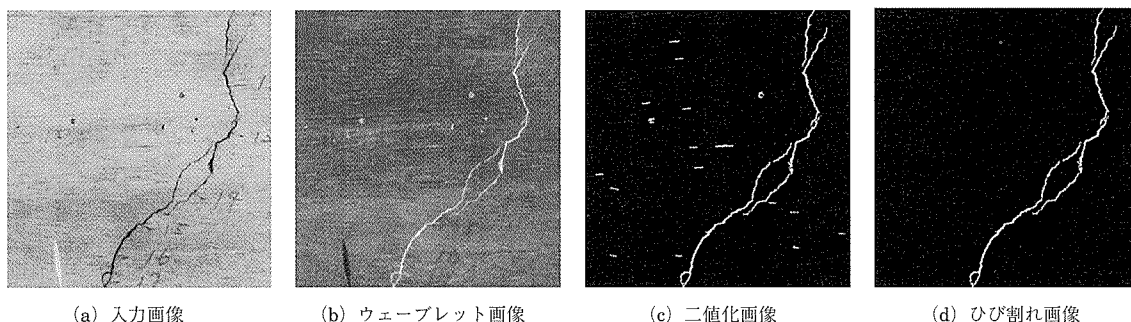


図 - 2 ひび割れ画像解析の出力例

(x, y) はマザーウェーブレットと呼ばれる関数であり、ここでは画像中に局在する周期的な波形解析に有効なガボール関数が用いられている。

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

ここで、(x, y) は二次元空間座標、(x₀, y₀) はガボール関数の (x, y) 平面上の平行移動量を表す。θ は波の進行方向と x 軸とのなす角度、a^k はガボール関数の ψ(x, y) dilation (拡大縮小) を表し、整数 k は dilation step と呼ばれるパラメータである。

ガボール関数 ψ(x, y) は三角関数をガウス窓で局在化した複素関数であり、式 (2) で表すことができる。

$$\psi(x, y) = g_{\sigma}(x', y') \exp(if_0 x') \quad (2)$$

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

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

ここで、g_σ(x, y) はガウス関数、σ はガウス関数の標準偏差、f₀ は波の周波数、(x', y') は座標系 (x, y) を角度 θ 回転させた座標系である。

3.2 特徴量

ウェーブレット係数の累計値は座標点 (x₀, y₀) における空間周波数および回転方向のガボールウェーブレットと入力画像との相関を表す複素数の絶対値として式 (5) で表せる。

$$C(x_0, y_0) = \sum_{\theta} \sum_k |\Psi_{\theta,k}(x_0, y_0)| \quad (5)$$

4. RC 中空床版のひび割れ調査

4.1 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 中空床版橋の調査に適用した。

図-3 および写真-1 に調査対象とした橋梁とその調査範囲を示す。対象とした橋梁は昭和 43 年の竣工で、鋼 5 径間連続非合成 I 桁橋と RC 9 径間連続中空床版橋の 2 種類の構造形式であり、橋長は 368 m、幅員は 12.9 m ~ 13.7 m である。今回の調査は RC 中空床版の下面を対象とした。



写真-1 調査範囲の外観

4.2 デジタルカメラによる撮影方法

図-4 にひび割れ画像の撮影方法を示す。また、写真-2, 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平行となるように架台を組み立て、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、可能なかぎり平行に設置する。撮影された画像は、あ

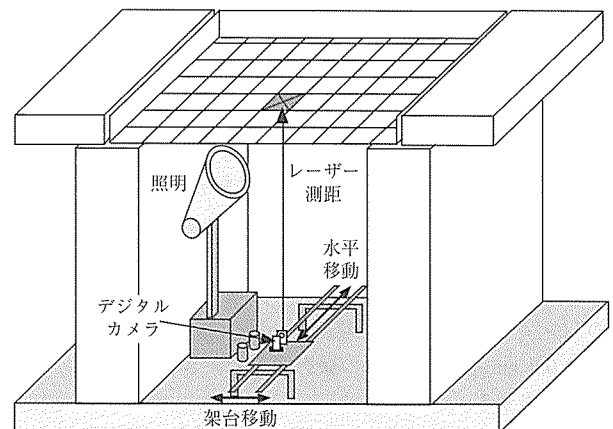


図-4 ひび割れ画像の撮影方法イメージ

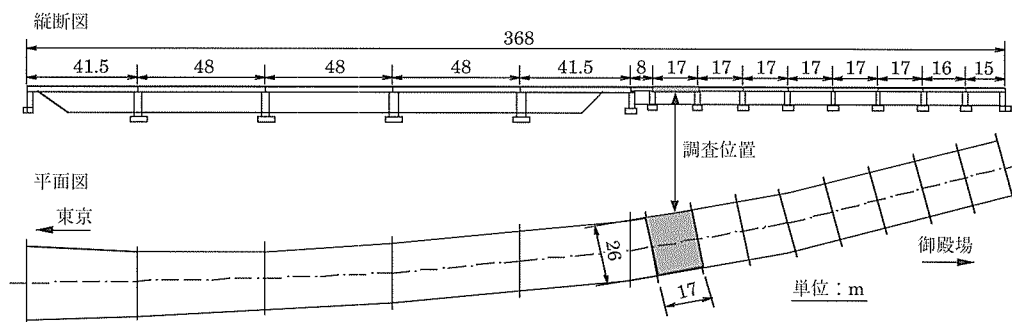


図-3 調査位置 (RC 中空床版橋第 7 径間上下線)



写真-2 ひび割れ画像撮影状況（全景）

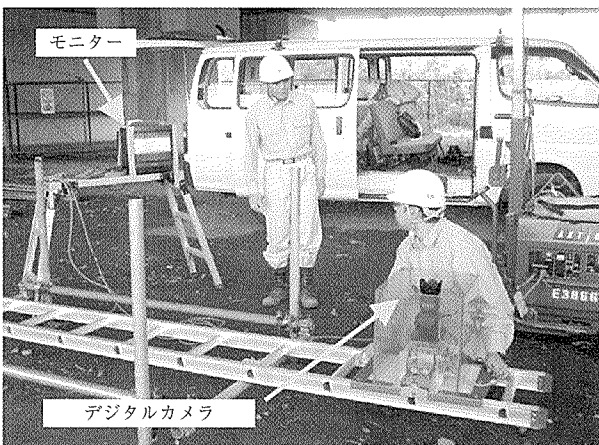


写真-3 ひび割れ画像撮影状況（拡大）

最適な撮影画像をひび割れ画像解析の入力画像とした。

5. ひび割れ画像解析結果

2006年8月と10月に撮影した2回の画像から、① ひび割れ検出の精度、② ひび割れ検出の再現性、③ 推定式に基づくひび割れ幅の推定精度について検討を行った。以下、2006年8月と10月の撮影画像をそれぞれ第2回撮影画像および第3回撮影画像と呼ぶ。

5.1 ひび割れ検出の精度

ひび割れ検出の精度は、7枚の床版パネルからランダムに測定したひび割れ幅0.1 mmから0.4 mmまでの100箇所の測定値と解析値を比較した。クラックスケールを用いて測定したひび割れ幅の値を表-1に示す。図-5～7に床

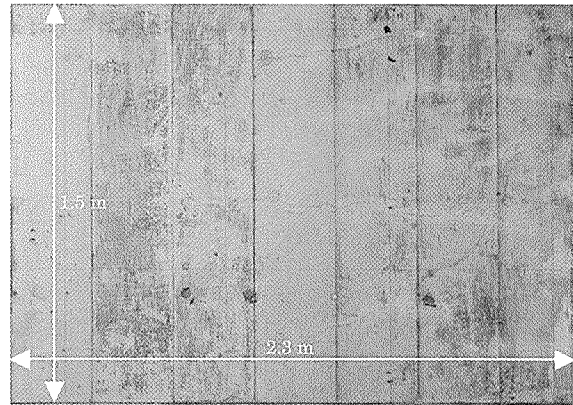


図-5 撮影画像

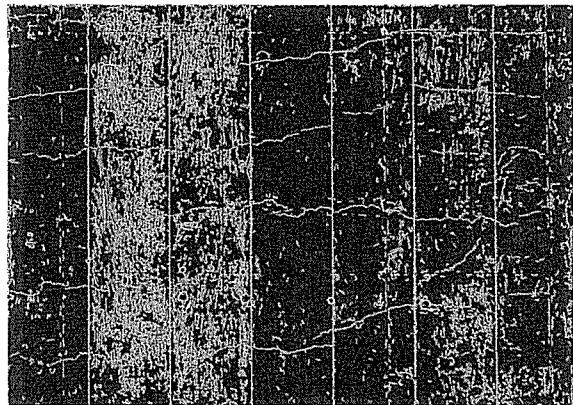


図-6 二値化画像

とであおり補正を行うので多少傾いていても問題はない。

- 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。

本調査は、750万画素デジタルカメラと焦点距離26 mmのレンズを用いて撮影距離約4 mから撮影した。空間分解能は0.8 mm/pixel、一枚の撮影画像の大きさは2.3 m × 1.5 mに相当する。

大型車の走行時に床版が振動し、撮影する際に撮影ぶれが生じるために各床版ごとに5回ずつ連続で撮影を行い、

表-1 ひび割れ幅の測定データ

ひび割れ幅 (mm)	床版パネル名							合計
	U 20004	U 20005	U 20006	U 20007	U 20008	U 30007	U 30008	
0.10	3	2	4	3	0	1	0	13
0.15	3	5	7	6	0	0	1	22
0.20	4	2	6	2	1	1	0	16
0.25	4	2	10	5	0	0	1	22
0.30	2	2	6	3	0	2	0	15
0.35	2	2	2	2	0	1	0	9
0.40	1	0	0	1	0	1	0	3
合計	19	15	35	22	1	6	2	100

表 - 2 ひび割れ検出率

ひび割れ幅 (mm)	第2回撮影画像			
	検出	未検出	検出率 (%)	未検出率 (%)
0.10	2	11	15.4	84.6
0.15	15	7	68.2	31.8
0.20	13	3	93.8	6.2
0.25	21	1		
0.30	15	0		
0.35	9	0		
0.40	3	0		
合計	78	22	78.0	22.0

ひび割れ幅 (mm)	第3回撮影画像			
	検出	未検出	検出率 (%)	未検出率 (%)
0.10	6	7	46.2	53.8
0.15	18	4	81.8	18.2
0.20	16	0	98.5	1.5
0.25	21	1		
0.30	15	0		
0.35	9	0		
0.40	3	0		
合計	88	12	88.0	12.0

版パネル U 20007 における撮影画像、二値化画像およびひび割れ画像を示す。図 - 7 のひび割れ画像は、画像編集ソフトを用いて図 - 6 の二値化画像からひび割れ部分を抽出し、輝度を反転した画像上にコンクリート型枠の表示およびひび割れ測定位置と測定値を示したものである。

表 - 2 に示すように第 2 回撮影画像では、ひび割れ幅 0.1 mm の検出率は 15.4 %、0.15 mm は 68.2 %、0.2 mm 以上は 93.8 % である。一方、第 3 回撮影画像では、ひび割れ幅 0.1 mm の検出率は 46.2 %、0.15 mm は 81.8 %、0.2 mm 以上は 98.5 % である。この結果、ひび割れ幅 0.1 ~ 0.15 mm の検出は撮影する際の撮影ぶれの程度に左右されるが、ひび割れ幅 0.2 mm 以上の検出は可能であることが確認された。

5.2 ひび割れ検出の再現性

第 2 回および第 3 回撮影画像の 10 枚の床版パネルからひび割れ検出の再現性を検討した。

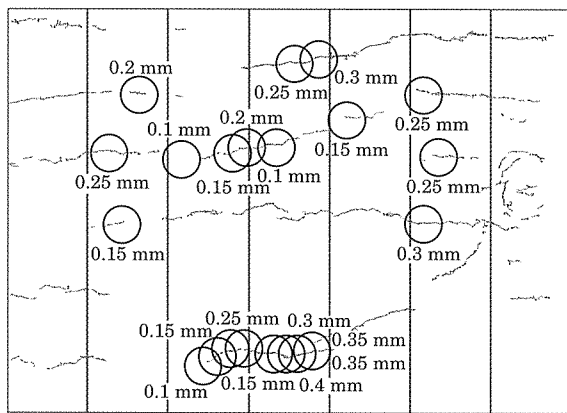


図 - 7 ひび割れ画像

図 - 8 は床版パネル U 20007 における第 2 回および第 3 回のひび割れ画像から作成したひび割れ経年変化図である。図中の緑色は第 2 回、ピンク色は第 3 回の撮影画像から検出されたひび割れを表している。再現性は表 - 3 に示すように、第 2 回と第 3 回の撮影画像からひび割れと判定された二値化画像の画素数より、誤差は第 2 回から第 3 回の二値化画像のピクセル数を引いた値の絶対値とし、また誤差率は誤差を第 2 回の二値化画像のピクセル数に対する比率より求めた。これらによれば再現性の平均誤差率は 5.8 % であることが確かめられた。

5.3 ひび割れ幅の推定

表 - 1 のひび割れ幅の測定データを用いて、ウェーブレット係数と輝度情報を説明変数とするひび割れ幅の推定式を重回帰分析により求めた。この推定式を用いて推定したひび割れ幅と測定値との精度検証を第 2 回および第 3 回撮影画像で行い、表 - 4 に示す適中率が得られた。

表 - 3 再現性の誤差

床版パネル名	二値化画像 (Pixel)		誤差 (Pixel)	誤差率 (%)
	第 2 回	第 3 回		
U 20004	361 766	393 524	31 758	8.8
U 20005	372 658	368 170	4 488	1.2
U 20006	390 541	383 842	6 699	1.7
U 20007	687 197	581 309	105 888	15.4
U 20008	340 679	304 016	36 663	10.8
U 30004	438 600	466 412	27 812	6.3
U 30005	436 856	407 905	28 951	6.6
U 30006	284 239	297 716	13 477	4.7
U 30007	384 633	383 914	719	0.2
U 30008	416 738	405 372	11 366	2.7
合計	4 113 907	3 992 180	121 727	5.8

表 - 4 適中率

ひび割れ幅 (mm)	第 2 回撮影画像				
	適中	不適中		未検出	適中率 (%)
		大	小		
0.15	12	3	0	7	54.5
0.20	13	0	0	3	81.3
0.25	20	1	0	1	90.9
0.30	14	0	1	0	93.3
0.35	8	0	1	0	88.9
0.40	2	0	1	0	66.7
合計	69	4	3	11	79.3

ひび割れ幅 (mm)	第 3 回撮影画像				
	適中	不適中		未検出	適中率 (%)
		大	小		
0.15	17	1	0	4	77.3
0.20	15	1	0	0	93.8
0.25	19	1	1	1	86.4
0.30	14	0	1	0	93.3
0.35	8	0	1	0	88.9
0.40	3	0	0	0	100.0
合計	76	3	3	5	87.4

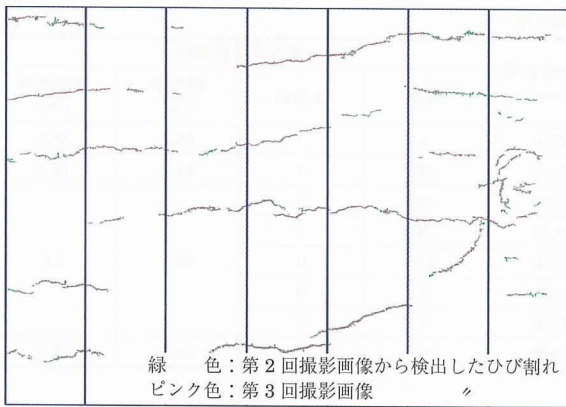


図 - 8 ひび割れ経年変化図

この結果、第2回撮影画像では適中率79.3%が得られ、第3回撮影画像では87.4%と高い精度でひび割れ幅を推定できることが確認できた。

ここで、推定値が測定値±0.05 mm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は「不適中」とし、不適中で推定値の方が測定値よりも大きい場合は「大」、小さい場合は「小」、ひび割れを検出できない場合は「未検出」とした。

次に、第3回撮影画像のひび割れ画像に対して推定した0.1 mm単位のひび割れ幅の分布図を図-9に示す。図中に

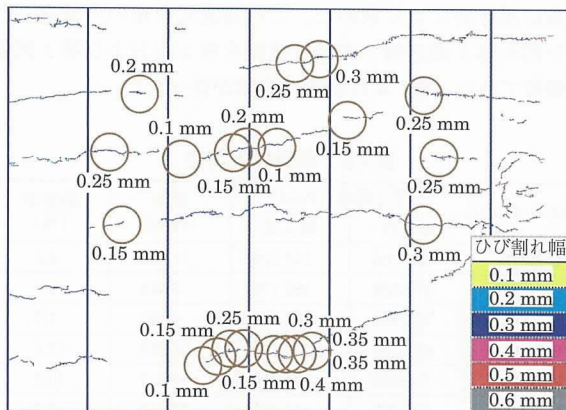


図 - 9 推定ひび割れ幅の分布図

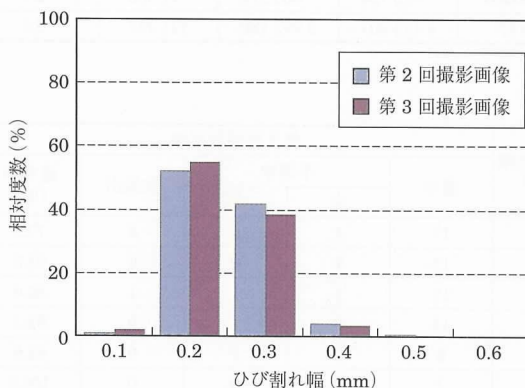


図 - 10 推定ひび割れ幅の度数分布

表示したひび割れ幅の色は凡例に示す色表示に対応しており、ひび割れ測定位置と測定値も表示している。

図-10に第2回および第3回撮影画像のひび割れ画像に対して推定した0.1 mm単位のひび割れ幅の度数分布の比較図を示す。

6. ま と め

コンクリート表面のひび割れを撮影したデジタル画像にウェーブレット変換を用いた画像解析手法を適用し、実構造物データで手法の検証を行った。これらに関して得られた結論は以下のとおりである。

- (1) デジタルカメラで撮影したひび割れ画像にウェーブレット変換を用いて画像解析することにより、再現性のあるひび割れ検出が可能であることが分かった。
- (2) 分解能0.8 mm/pixelによる撮影画像から、0.2 mm以上のひび割れ検出が可能であることが分かった。また、品質の良い撮影画像であれば、0.1～0.2 mmのひび割れ検出も可能であることが確認できた。
- (3) 分解能0.8 mm/pixelによる撮影画像から、重回帰分析で求めたひび割れ幅の推定式は、測定値±0.05 mmの精度で第2回撮影画像の適中率79.3%、第3回撮影画像の適中率87.4%と高精度でひび割れ幅を評価できることが分かった。
- (4) ウェーブレット変換による画像解析は検出精度は良いものの、従来の輝度によるひび割れ検出手法に比べて処理時間が掛かるのが一般的な傾向である。また、ひび割れと判定された汚れなどは人為的に消去せざるを得ないなど、現実的にはすべての処理を自動化するにはいたっていない。今後は、画像処理の自動化と高速化が課題としてあげられる。
- (5) 本手法をひび割れ調査に適用することにより、ひび割れ密度などを算出できるため、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する。

参 考 文 献

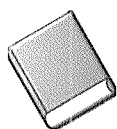
- 1) 内村俊二, 渡邊政典, 浜本義彦: 手書き文字認識のための Gabor 特徴抽出系の最適化について, 電子情報通信学会論文集, Vol.J84-D-II, No.4, pp.668-677, 2001
- 2) 浜本義彦, 政水克典, 内村俊二, 富田真吾: 手書き漢字認識のための Gabor 特徴, 電子情報通信学会論文集, Vol.J79-D-II, No.2, pp.202-209, 1996
- 3) 中野宏毅, 山本鎮男, 吉田靖夫: ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版, pp.1-89, 1999
- 4) 中野宏毅, 吉田靖夫, 藤田和弘: ガボール関数を用いたカラー液晶ディスプレイのマイクロ陥検査支援, 電子情報通信学会論文集, Vol.J80-D-II, No.3, pp.734-744, 1997
- 5) 竹村淳, 伊東正安: 局所適応形平滑化フィルタと Wavelet 変換に基づく超音波画像の領域分割, 電子情報通信学会論文集, Vol.J84-A, No.12, pp.1452-1460, 2001
- 6) 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
- 7) (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-2003-, 2003
- 8) 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, pp.1227-1546, 2004

- 9) 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.
- 10) 酒井幸市: デジタル画像処理入門, CQ 出版社, pp.50 - 100, 2002
- 11) 安居院猛, 長尾智晴: C 言語による画像処理入門, 昭晃堂, pp.59

- 63, 2002

- 12) 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

【2007年12月27日受付】



刊行物案内

プレストレストコンクリート技士試験 講習会資料

平成19年度 PC 技士試験講習会

資料のほか、過去3年間の試験問題、正解および解説が掲載されています。
現金書留または郵便普通為替にてお申込みください。

(平成19年6月)

頒布価格: 会員価格 5,000円 (別途送料500円)

: 非会員価格 6,000円 (別途送料500円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会