

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

岡林 隆敏*・奥松 俊博*
中村 秀晃**・木場 俊郎***

Concrete Crack and Width Detecting by High Resolution-Digital Devices

by

Takatoshi OKABAYASHI*, Toshihiro OKUMATSU*
Toshio Koba* and Hideaki Nakamura**

Detecting concrete crack and width reasonably and quickly, is highly evaluated as increasing the number of maintenances of infrastructure. The authors developed the total digital image processing system for detecting concrete crack and width. The system enables detecting extremely small crack width automatically with high accuracy. This paper shows the abstract of the system and the result of the test conducted to evaluate its accuracy.

1. はじめに

近年、高度経済成長期に急速に設備された建造物の多くが耐用年数を迎え、コンクリート建造物の劣化問題が顕在化しつつある。また維持管理業務の効率化を進めることが今後の課題であり、既存建造物の維持管理技術を確立することが重要である。

コンクリート建造物の健全度を診断するためには、構造体に発生する様々な変状を正確に把握することが重要である。変状の中のひとつであるひび割れは、建造物の応力状態の確認、また耐震性能の予測などの面から重要な情報となる。

ひび割れ状況を把握するため、一般的に行われている方法は、目視観測によるスケッチである。この方法は人的作業ゆえ、作業効率や必要とするひび割れの抽出の際に各担当者による個人差が生じる可能性がある。特に広範囲に広がるひび割れ状況を検出する際には、検出結果が定量化されにくいという欠点を有する。また、限られた時間でひび割れを抽出するためには、専門的かつ経験的知識を予め備えておくことが重要である。ひび割れ状況の把握と同時に、ひび割れ幅の検出

が必要であるが、幅検出方法として従来行われているのは、クラックスケール等を用いた人的作業による方法である。ひび割れ状況把握と同様に、労力を要することとなる。今後、維持管理の効率化を推進する上で、ひび割れ観測方法の改善が求められる。

デジタルカメラの低価格化、コンピュータの処理速度の向上、ハードディスク等の記憶装置の増加および高速化、また画像処理ソフトウェアの高性能化は、従来、専用のハードウェアで処理されていた画像処理を1台のパソコンで実現することを可能している。このようなデジタル画像処理技術^{1),2)}に注目し、微細ひび割れの発生状況やひび割れ幅を、高精度かつ自動的に検出することを目的とし、高解像度デジタルカメラによるひび割れ幅検出システムの開発を行った。本システムは、画像入力から画像処理に至るまでを完全にデジタル化することで、高精度かつ自動的にひび割れ幅を検出することを可能にした。システムの開発には、仮想計測器ソフトウェア LabVIEW を用いており、専用の計測器を使用しない、パソコンを中心とする安価で効率性に優れたシステムを実現した。

平成15年4月18日受理

* 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

** (株)第一技術コンサルタント (Daiichi Gijutsu Consultant Co., Ltd)

***復建調査設計(株) (Fukken Co., Ltd)

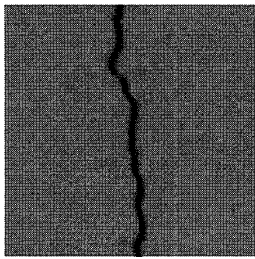


図-1 収録画像

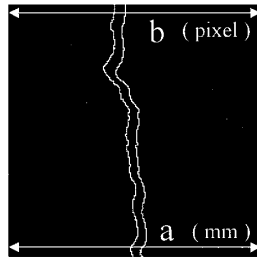


図-2 処理後の画像

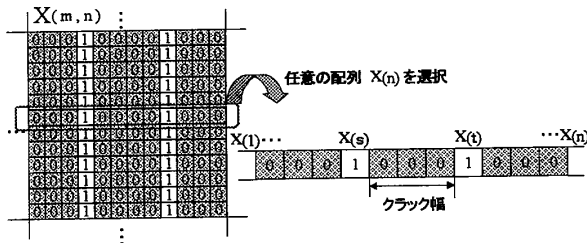


図-3 処理後の数値データ

2. ひび割れ幅検出法

2.1 ひび割れ観測のデジタル化

コンクリート構造物表面のひび割れ発生状況やひび割れ幅を観測する方法は、従来、目視による確認と、クラックゲージ等による方法が主に用いられている。目視による観測機能をデジタルカメラによる方法に置き換えることで、アナログ作業を全く介さない、終始デジタルデータのみの処理システムが実現し、作業の効率化が期待できる。また、デジタルカメラを用いることで、観測に要する時間を大幅に削減できるなどの効果がある。このように、デジタルカメラをひび割れ観測に用いることで、①収録作業の効率化、②処理作業の効率化を実現することができる。さらに高精度デジタルカメラと、本研究で開発する高精度画像処理システムにより、③測定精度の向上を図ることができる。

2.2 ひび割れ幅検出法の概要

デジタルカメラで撮影した、コンクリート構造物表面のひび割れ画像を図-1に示す。その画像を二値化処理した後、さらに細線化処理することにより、図-2のような、白黒の2色からなる画像に変換できる。白線はひび割れの端部を表している。ここで、図中に示された記号“a”は画像横(X)方向の実際の長さ(単位:mm)をあらわしており、また“b”はデジタルデータのX方向の素子(pixel)数を表している。この画像の概念をデジタル値で表現したものが、図-3の2次元配列である。図-2の黒色で示されている部分が“0”、白色で示されている部分は“1”と二値化

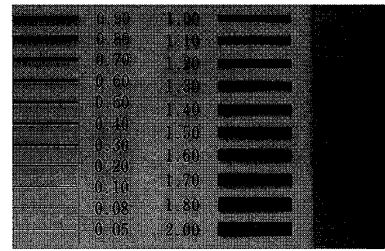
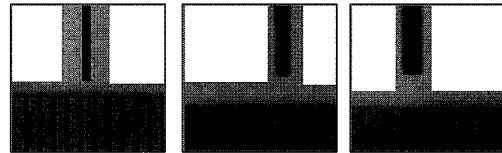


図-4 クラックスケール



a) デジタルカメラによる収録画像



b) 二値化・細線化処理後画像

図-5 クラックスケールの収録画像

されていることが分かる。任意のX方向の配列X(n)を抽出したものが、図-3右側の一次元配列である。配列X(n)から“1”の値を示す最初の箇所:X(s)と、最後の箇所:X(t)を抽出することにより、(1)式よりクラック幅のピクセル数:Pが求まる。

$$P = t - s - 1 \tag{1}$$

既知の値である画像幅:a(mm)および画像ピクセル数:b(pixel)の関係から、ひび割れ幅のピクセル数は(2)式より、長さの物理量(単位:mm)に換算される。

$$a / b \times P = y \tag{2}$$

2.3 測定精度検証方法

武田ら³⁾は、ひび割れ幅の精度を評価する際、クラックスケール上の各スケールを擬似ひび割れとし、それを規定値とすることで、デジタルカメラから検出したひび割れ幅の精度について述べている。本研究では、本手法によるひび割れ幅測定精度を、同様の評価方法を用いて検証する。

まず、クラックスケールをデジタルカメラで撮影する。クラックスケールは、図-4のような0.05mmから2.00mmまでの幅の線が描かれてある、プラスチック製の透明な板である。撮影の際、クラックスケールは白紙の上に置き、スケール部分が明確に読み取れる

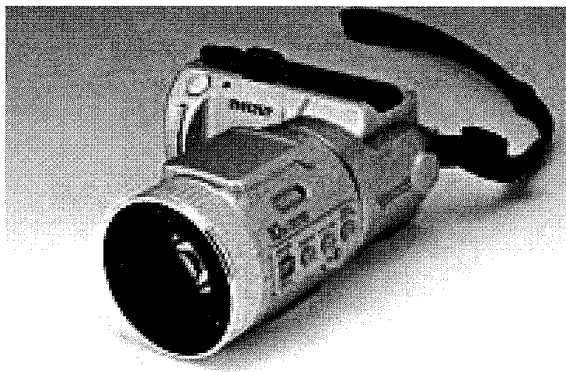


図-6 デジタルカメラ (CyberShot DSC-F505)

ようにした。また撮影画像内に定規を配置することにより、収録画像から実際の画像幅を確認できるようにした。撮影に使用したデジタルカメラは、CyberShot DSC-F505 (SONY 社製) であり、収録画素数は 211 万画素である。撮影距離は約 10cm とした。図-5 はクラックスケールの収録画像であり、a) はデジタルカメラにより収録した画像、b) は収録画像を二値化・細線化処理した画像である。画像処理を行うことにより、擬似ひび割れの端部が明確になっていることが分かる。使用したデジタルカメラの概観を図-6 に示す。

2.4 検証結果

クラックスケールに表示された 0.05mm から 2.00mm までの線 (擬似ひび割れ) を、デジタルカメラで撮影し、二値化および細線化処理して得られた結果を図-7 に示す。縦軸は画像解析により得られた値 (単位: mm) であり、横軸は、実際のクラックスケール幅 (単位: mm) である。図中にプロットされた点は、各スケールに対する解析値を表しており、本手法によって得られた解析値が、実際の値と同等であれば、各点は、図中の線 ($y = x$) 上にプロットされることになる。また解析結果の値とその精度について数値データで表したものを表-1 に示す。解析結果は、クラックスケール上の線の幅が約 1mm 以下の場合には、小さくなる傾向にあるが、1mm 以上の場合には、実際の値に対してほぼ同等であることが分かる。また 1mm 以下の場合でも 0.3mm 以下においては両者の一致が見られる。誤差の最大値は、クラックスケールの値が 0.6mm の場合であり、誤差値は 0.1mm 程度と、読み値に対して 1 割以上の誤差が生じている。誤差の原因としては、至近距離 (約 10cm) からの撮影のため、画像にゆがみが生じたことや、画像処理の際、クラック幅検出の基となる定規の幅を正確に検知できていない等の理由が考えられる。

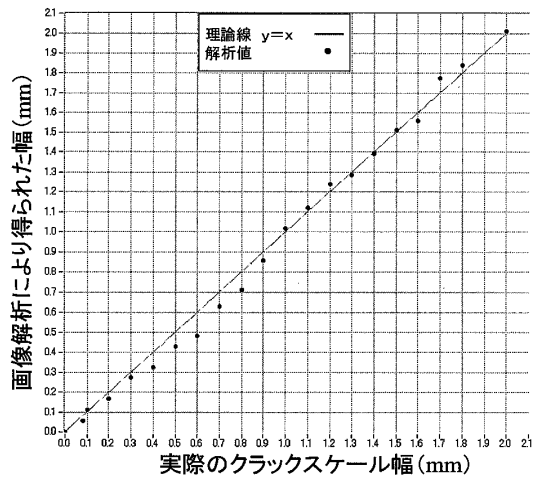


図-7 検証結果

表-1 検証結果

クラックスケール幅 (mm)	画像解析幅 (mm)	誤差 (mm)	基準幅 b (pixel)	基準幅 a (mm)	クラック幅 P (pixel)
0.08	0.054	-0.026	299	8	2
0.1	0.110	0.010	255	7	4
0.2	0.165	-0.035	254	7	6
0.3	0.273	-0.027	293	8	10
0.4	0.323	-0.077	260	7	12
0.5	0.432	-0.068	259	7	16
0.6	0.481	-0.119	262	7	18
0.7	0.629	-0.071	280	11	16
0.8	0.711	-0.089	228	18	9
0.9	0.856	-0.044	187	16	10
1.0	1.019	0.019	265	15	18
1.1	1.119	0.019	268	15	20
1.2	1.241	0.041	266	15	22
1.3	1.287	-0.013	268	15	23
1.4	1.394	-0.006	269	15	25
1.5	1.511	0.011	268	15	27
1.6	1.561	-0.039	269	15	28
1.7	1.778	0.078	270	15	32
1.8	1.840	0.040	269	15	33

しかしながら、図-7 にプロットされた点は、全体的に、精度がよく、またほぼ線形性を保っていることが分かる。一般に、ひび割れを検出する際、0.5mm 程度までのひび割れを発見することができればよいとされている。そのため、画像解析で得られたひび割れ幅は、実際のクラックスケール幅と多少の誤差はあるが、微細ひび割れを検出する上で、十分な精度を確保しており、実用上の問題はないと考えられる。

3. ひび割れ幅検出プログラムの開発

3.1 開発概要

前章では、本手法により、微細ひび割れ幅を精度よく検出していることを確認した。本章では、ひび割れ幅を自動検出するために開発したプログラムについて説明する。従来、ひび割れ状況とその幅を検出する際には、アナログ処理が必要であったが、本研究で開発するひび割れ幅検出法は、一切アナログ処理を行わな

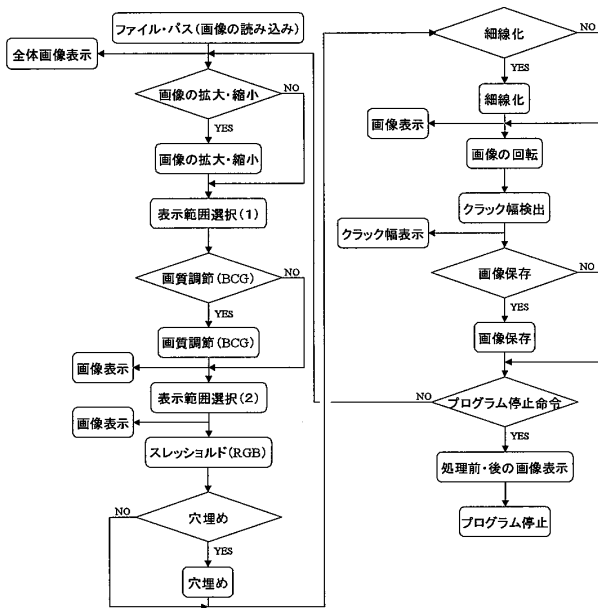


図-8 プログラムのデータ処理の流れ

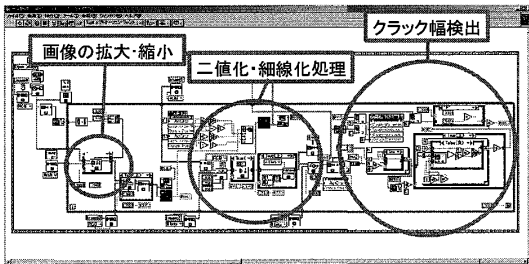


図-9 Lab VIEW によるプログラム画面

い、一貫したデジタル処理によるものである。処理の途中にアナログ処理を介する場合、画像に発生するにじみにより精度が劣化する。画像入力から処理に至るまでをデジタル化することにより、高精度かつ自動的なひび割れ幅検出を実現する。

図-8 に開発したプログラムのデータ処理の流れを示す。本研究では、高解像度デジタルカメラによるひび割れ幅検出システムを開発するためのプログラムとして、National Instrument 社の仮想計測器ソフトウェア：LabVIEW^{4),5),6)}を使用した。さらに、高レベルのマシンビジョンおよび画像処理機能を利用できる追加ソフトウェア：IMAQ Vision (同社製)を使用した。LabVIEW によるプログラム開発画面を図-9 に示す。図-10 は図-8 のフローチャートに基づいて開発したプログラムのフロントパネルである。

3.2 プログラムの概要

図-8 および図-10 におけるプログラム手順について説明する。ファイルパスを指定することによって、ひび割れ画像を選択し、パソコン画面に表示する(表

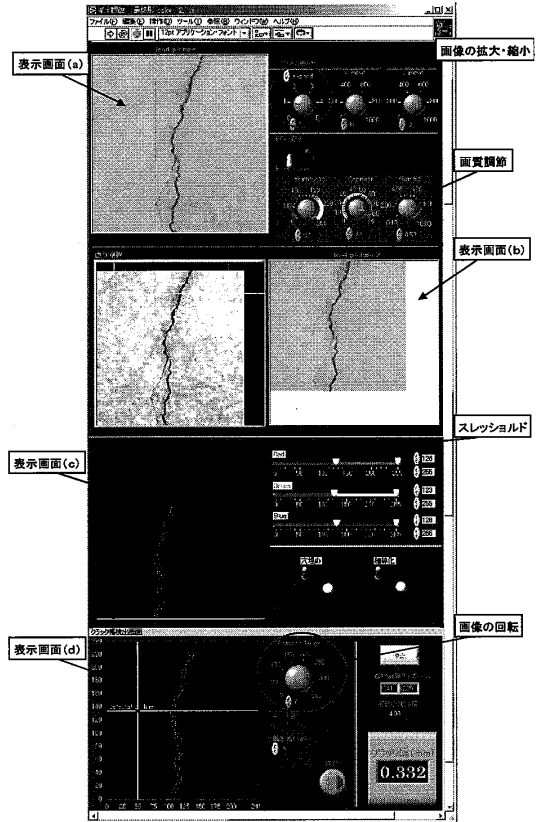


図-10 プログラム実行画面

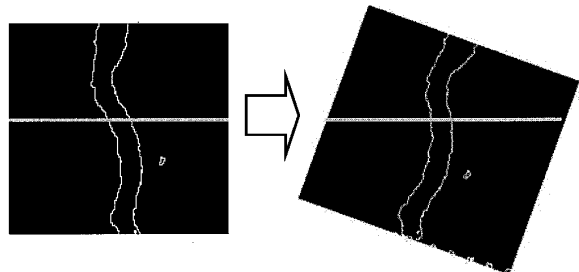


図-11 画像回転機能

示画面(a))。検出対象とするひび割れ位置を表示するために、適宜、画像の拡大・縮小および移動を行う。表示範囲を選択することによって画面の更新を行い、画像対象範囲のBCG画質調整を行う。ここでBCGとは、明るさ(B)、コントラスト(C)、ガンマ値補正(G)のことである。画像調整を終了した後(表示画面(b))、カラー画像に閾値を設定してスレッシュホールドをかけることで、カラー(RGB一括)二値化処理を行う。その後、穴埋めや細線化処理を行うことで、クラック部分を強調する(表示画面(c))。その後、ひび割れ幅を検出したい箇所に対してX軸カーソルを合わせることで(表示画面(d))、該当する箇所のひび割れ幅が表示さ

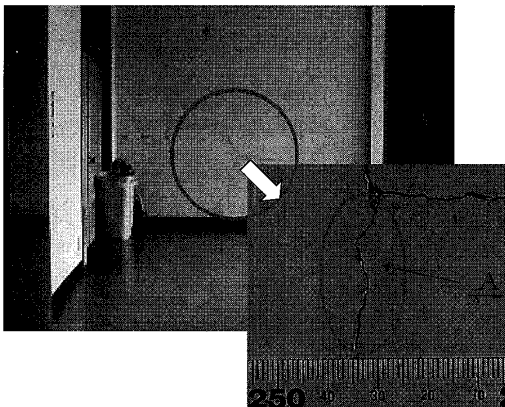


図-12 ひび割れ撮影対象

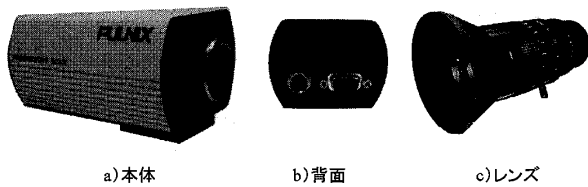


図-13 デジタルカメラおよびレンズ



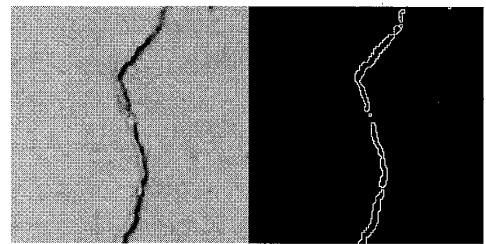
図-14 画像収録・処理システム

れる。ここで、ひび割れは通常曲線となるために、該当箇所のひび割れ表示角度によっては、正確な値とならない可能性がある。そこで、画像回転機能を付加することで、この問題に対処している。画像回転機能による表示結果を図-11に示す。これらのデータは適宜保存され、ひび割れ管理のためのデータベースを構築することができる。

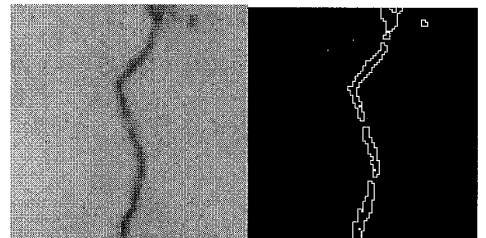
4. ひび割れ幅検出実験

4.1 実験概要

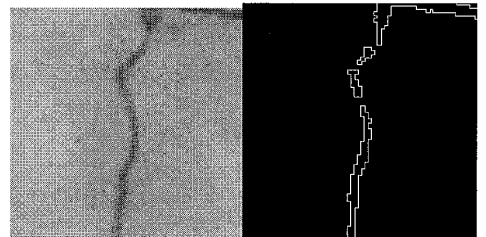
本システムのひび割れ幅検出精度と撮影距離との関係を明確にするため、コンクリート壁面のひび割れ検出実験を行った。本実験では対象とするひび割れ幅は0.4mm程度とした。撮影対象は、築後約30年経過した



(a)撮影距離 1m



(b)撮影距離 3m



(c)撮影距離 5m

図-15 A 範囲の画像

表-2 ひび割れ幅(実測値と解析値)

撮影距離 (m)	実測値	解析値	誤差	クラック幅 P (pixel)	基準幅 a (mm)	基準幅 b (pixel)
1	0.4	0.364	-0.036	4	1	11
3		0.400	0.000	4	1	10
5		0.667	0.267	6	1	9

RC 構造物の内部壁面である。その様子を図-12に示した。実験で用いたデジタルカメラおよび収録システムは、CAMERA Link に対応したデジタルカラーカメラと画像収録ボードおよび専用のカメラリンクケーブルである。CAMERA Link とは、デジタルデータの信号伝送方式やケーブル、コネクタを含めた、マシンビジョンのための新しいデジタルインターフェイスの規格である。これにより、一貫したデジタルデータ処理の実現と、ノイズの少ないデータを高速処理することが可能となる。

4.2 実験装置

画像収録システムには、CAMERA Link に対応したプログレッシブスキャンカラーカメラ：TMC-1000 (Pulnix 社製)と、画像収録ボード：PCI-1428 (National Instrument 社製)を使用した。TMC-1000 は、1 inch CCD

搭載で解像度約 100 万画素である。TMC-1000 のレンズには、マニュアルズームレンズ：V6 × 16-1.9Macro (CANON 社製) を使用した。TMC-1000 とレンズを図-13 に示した。PCI-1428 はパソコン搭載 CPU の代わりにインターレース処理と PC メモリへのコピー処理を行うために、画像転送とホストプロセッサによる計算処理が並行して行われ、画像処理性能が向上する。以上から構成される画像収録・処理システムを図-14 に示した。また、ひび割れ状況を撮影する際は、ひび割れを明確に収録するために、照明器具としてメタルハライドランプ (岩崎電気社製) と投光器 OG004008 (ODELIC 社製) を使用した。

4.3 実験結果と考察

図-12 中に示した範囲 A を 1m, 3m, 5m の距離で撮影した画像と、本システムで処理した画像を図-15 に示す。また、範囲 A 内のひび割れのある部分を対象としたひび割れ幅の実測値と、本システムで求めた解析値を表-2 に示す。撮影距離ごとの結果と考察について以下に示した。

(1) 撮影距離：1m

収録画像 (図-15 (a) 左) から、ひび割れ発生状況を詳細に捕らえられていることが分かる。また処理後の画像 (図-15 (b) 右) においても明確なひび割れ検出が行なわれていることが分かる。検出したひび割れ幅は、表-2 から分かるように、実測値と解析値との間に一割程度の誤差が生じていることが確認される。これは、実測する際に用いたクラックスケールの最小読取り間隔が 0.1mm であることから読取り分解能による差であり、解析誤差によるものではないと考えられる。

(2) 撮影距離：3m

収録画像 (図-15 (b) 左) は撮影距離 1m の場合と比べると、ひび割れ発生状況が不鮮明になっていることが分かる。それに対応して、処理後の画像 (図-15 (b) 右) は、撮影距離 1m と比較すると粗さが目立っていることが分かる。しかし、ひび割れ状況の確認を目的とする場合には十分であると思われる。検出したひび割れ幅については、表-2 から分かるように、実測値と一致した。このことから、ひび割れの検出、幅算出ともに本システムが利用可能な距離であると言える。

(3) 撮影距離：5m

収録画像 (図-15 (c) 左) は、上記 2 ケースに比べ、さらにひび割れが不鮮明であることが分かる。それに対応して、処理後の画像 (図-15 (c) 右) のひび割れ状況についても、さらに粗さが目立っている。ひび割

れ幅については、表-2 から分かるように、解析値は実測値に対し +0.267mm と、5 割以上大きい結果を示した。これは収録画像のぼやけに起因した結果である。ただし、処理後の画像からは、大よそのひび割れ形状が検出されていることから、撮影距離 5m においても、微細ひび割れに対するひび割れ形状の確認は可能であると言える。

以上の実験結果から、本システムを用いて 0.4mm 程度の微細ひび割れを検出する場合、ひび割れ幅検出に対しては、撮影距離が 3m 程度以下であれば検出可能であることが分かった。また、ひび割れ形状を確認する場合には、撮影距離が 5m 程度以下であれば、確認可能であることが分かった。

5. まとめ

本研究では、デジタル画像処理技術を用いて、コンクリート構造物のひび割れ状況、およびひび割れ幅を検出するためのシステムを構築した。本システムによるひび割れ幅検出精度の評価およびコンクリート壁面を対象とする適用実験を行った結果、その有効性を確認することができた。本研究をまとめると以下のようになる。

(1) ひび割れ幅を高精度に検出するための手法を開発した。0.5mm 程度の微細ひび割れに対しても精度よくひび割れ幅を検出することを確認した。

(2) 画像入力から処理に至るまでをデジタル化した画像処理システムを開発した。高精度かつ自動的にひび割れ幅を検出することが可能となった。

(3) 0.4mm 程度の微細ひび割れを検出する際の撮影距離は、ひび割れ幅を検出する場合は約 3m 以下、また、ひび割れ形状を確認する場合には約 5m 以下であれば、その目的を満足することが分かった。

以上より、本システムが目視検査に代わるひび割れ幅検出方法として有効であることが分かった。

参考文献

- 1) 末松良一ほか：画像処理工学，コロナ社，2000.10
- 2) 北村新三，片井修：画像と制御，朝倉書店，1991.5
- 3) 武田篤史ほか：RC 構造物のデジタル画像を用いたひび割れ計測，第 2 回 構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集，pp.29 ~ 34，2001.3
- 4) LabVIEW ユーザーマニュアル：National Instruments Corporation，2000.9
- 5) IMAQ Vision Builder チュートリアル：同上，2002.2
- 6) LabVIEW Applications and Solutions：同上，2001.7