

R C 構造物のデジタル画像を用いた ひび割れ計測 (その3)

山田 守¹・武田篤史²・大内 一¹・橋本周司³

¹工博 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-0058 東京都清瀬市下清戸4-640)

²工修 株式会社大林組 本社土木技術本部設計第一部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

³工博 早稲田大学教授 理工学部応用物理学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

Authors have developed the crack measuring system using a digital camera and image processing technology. In the previous papers, the outline of the crack measuring system was shown and measuring results was verified on test specimens. Since verification was performed on ideal conditions using experimental specimens, it is a question whether this system can apply to an actual structure with sufficient accuracy. In this paper, authors applied this system to the actual structure, and discussed about applicability.

Key Words : Crack, Digital Camera, RC Structure, Crack Detecting System, Crack Width, Image Processing Technology

1. はじめに

R C 構造物のコンクリート表面に発生するひび割れは、構造物の耐震性、材料の劣化などを診断する上できわめて重要な判断材料となる。しかしながら、ひび割れ性状の観測は、技術者による目視とスケッチなどの旧態とした手法が主流である。これらの観測で記録されたアナログデータは、コンピュータ等による定量的な分析・解析には不向きなため、診断は経験的な判断に頼らざるをえず、また、十分な考察が行われずに埋没してしまうことも多々見られる。

R C 部材の材料試験や構造試験においては、ひび割れを定量的に把握する目的で、クラックスケールやπゲージによる計測が行われることがある。これらの計測は、安価でシンプルである反面、計測点を増やすと多大な労力やコストがかかるため計測点が有限となり、ある着目する数本のひび割れについての性状を把握するのには向いているが、試験体全域を捉えるマクロな評価には不向きという欠点がある。

実務においては、収縮ひび割れ等の経時変化を記録することを目的としてデジタル画像を用いたひび割れ計測も徐々に行われるようになってきている。しかしながら、スケッチの代用として利用されているにとどまり、計測データの分析や処理についてはスデ

いないのが現状である。

著者らはこれまでに研究により、デジタル画像からひび割れを抽出するアルゴリズムを提案し、R C 柱部材の正負交番水平載荷試験に実証試験を行った。計測結果を既往の手法である目視によるスケッチと比較したほか、デジタル値として得られたひび割れデータの利用例を示し破壊性状と結び付けて考察した¹⁾。また、より精度の高いひび割れ幅の測定アルゴリズムについて提案し、既往の測定方法と比較検証した²⁾。

本論文では、著者等の提案したひび割れ抽出、及びひび割れ幅の計測手法を実構造物に試用し、鉄筋コンクリート構造物の劣化診断や耐震診断などの実務への適用可能性、および問題点を検討した結果について報告する。

2. デジタル画像を用いたひび割れ計測方法の概要

(1) ひび割れの抽出方法

著者等の開発したデジタル画像からひび割れを抽出する手順は、以下の①～⑤に示すとおりである。図-1に各処理の例を示す。

①撮影準備 室内構造実験のように可能な場合は、

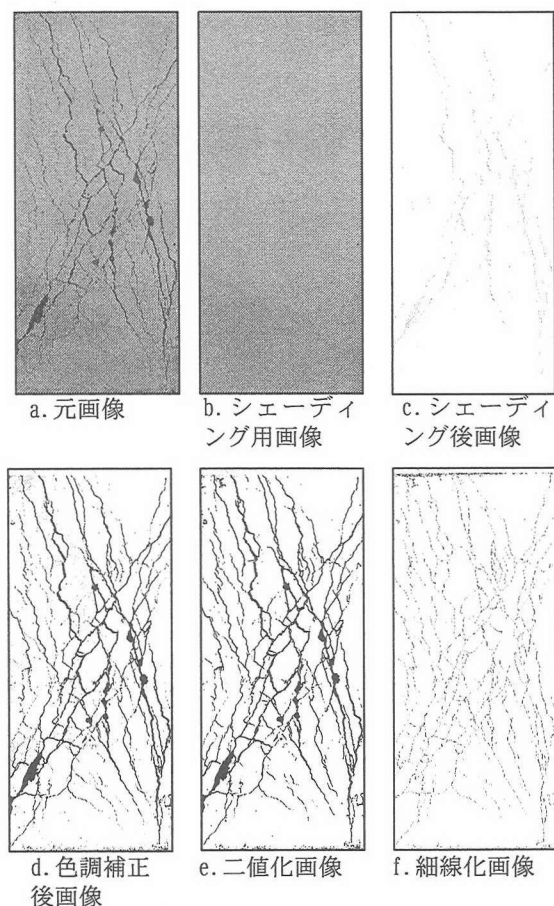


図-1 画像処理の例

試験体に白ペンキを塗っておくことが望ましい。

②撮影 デジタルカメラにより試験体の表面を撮影する(図-1 a.)。同時に、コンクリート表面にコンクリートと同色の板を置いた画像(シェーディング補正画像)も撮影する(図-1 b.)。

③画像の補正 ②により撮影した画像について、シェーディング補正(図-1 c.)および色調補正を行う(図-1 d.)。

④二値化処理 画像上においてひび割れは影として黒く写っていることを利用して、輝度で閾値を設定し、比較的太く明らかにひび割れと判定されるものを検出する。さらに、ひび割れは連続していることを利用して、再帰的にひび割れ周辺の二値化処理を行い、より細かいひび割れを走査する(図-1 e.)。

⑤細線化-数値データ化処理 ひび割れの連結性を変えない、すなわち図形が切れたり欠落部が生成されないように、線幅が1pixelとなるように中心線を抽出する細線化処理¹⁾を行う(図-1 f.)。これにより、ひび割れ面積は細線化によって削除したpixel数と細線化によって残ったpixel数で求められ、長さで除すことによってひび割れ幅の情報が得られる。

以上の処理を経て、ひび割れは始点および終点座標と幅の情報を持つ数値データとなる。

(2) ひびわれ幅の計測方法

著者等の開発したひび割れ幅の計測は、以下の①

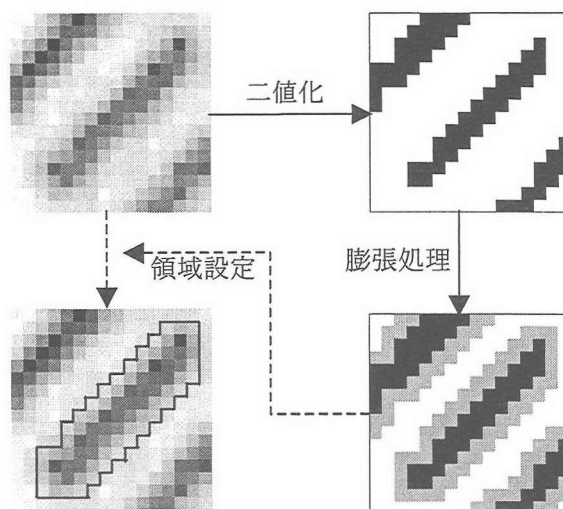


図-2 計測領域の設定

～④に示すとおりである。

①撮影した画像を二値化し、ひび割れを抽出する。
②ひび割れの境界から内外にそれぞれ1pixel以上の領域に対して、濃度の総和を求める。一方、二値化によって選ばれた領域のうち、上記の濃度の総和を求める範囲以外のpixelについては、ひび割れ部の濃度の平均値を一様に与え、同様に濃度の総和を求める。これら2つの濃度の総和の和を用いて、ひび割れ幅を表わす値とする。

③画像中にあらかじめ写し込んでおいたクラックスケールについても、同様に各画素の濃度を合計する。クラックスケール中のひび割れは幅、長さともに既知であるため、ひび割れ幅と濃度の合計の較正曲線を描くことができる。

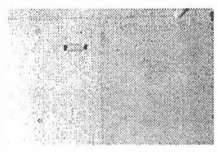
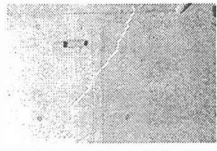
④求めたいひび割れの濃度の合計を、較正曲線と比較することにより、ひび割れ幅を計算する。

3. 実構造物への適用性検討(1)

前報までの検討は、主として屋内の施設で行われる構造試験などを対象とし、試験で得られるひび割れデータの高度化を目的として行ったものである。したがって、画像を撮影する時の照明条件、およびコンクリート表面などは理想に近い状態であり、前報までの検討は画像処理計測には好条件の下での結果といえる。しかしながら、実際のコンクリート構造物の画像を撮影する際には、影が映りこむなどして理想的な照明状態を得ることは難しいし、コンクリート表面は汚れやジャンカ、型枠痕など画像処理計測には不利となるひび割れ以外のノイズが多い。また、シェーディング用の画像を撮影しなければならないのは、実務で重要となる作業性を阻害する要因となる。

本章では、これまでに提案したひび割れ計測手法を実構造物に適用し、劣化診断や耐震診断などの実務に供することを目的として、最も問題となるノイズを除去する方法について検討を行った。

表－１ ノイズ除去の手順

処理手順	画像処理の概要	画像
①元画像	ひび割れ画像を撮影する。	
②マスキング画像の作成	明らかにひび割れと判断される部分をマスキングする。	
③壁面の汚れ除去	「①元画像」から「②ひび割れをマスキングした画像」を差引くことにより、壁面の汚れやしみを除去する。	
④背景色の変換	ひび割れを強調するために、背景色をひび割れ近傍のコンクリート壁面の色調に変換する。	
⑤二値化	二値化を行い、ひび割れの抽出を行う。	

(1) ノイズの除去方法

表－１に構造物表面のノイズを除去する手順を示す。これらの処理は汎用の画像処理ソフトウェアで行うことが出来る簡単な作業である。

(2) ひび割れ抽出結果

表－２～４に実構造物を対象にしたひび割れの抽出結果を例示する。表中の“原画像”は、600万画素（3040×2008 pixel）のデジタルカメラで撮影したものである。“未処理のまま抽出”は２章（１）で述べた著者らの提案手法に従って作成した二値化画像である。ただし、実務で使用することを考慮してシェーディング用画像を撮影せず、補正を行っていない。“ノイズ除去後に抽出”は表－１の手順に従って原画像からノイズを除去した後に作成した二値化画像である。“目視によるスケッチ”は、技術者が目視で観察し、記録したものである。

表－２に示す壁Aの撮影対象は、多数のひび割れが発生している屋内壁で、型枠痕や汚れが多く見られた。未処理のままひび割れ抽出した画像では、比較的太いひび割れは抽出できているが細いひび割れは型枠痕や照明のムラによるノイズにより鮮明に抽出できていない。ノイズを除去した後にひび割れ抽出を行った画像は、スケッチと比較しても十分な精度があると考えられる。

表－３に示す壁Bの撮影対象は、比較的良好目立つひび割れが発生している屋内壁で、作業スペースが狭く照明が設置できなかった。壁の上部に蛍光灯があり、そのため原画像の上側から下側に向かって

表－２ 壁 A のひび割れ抽出結果

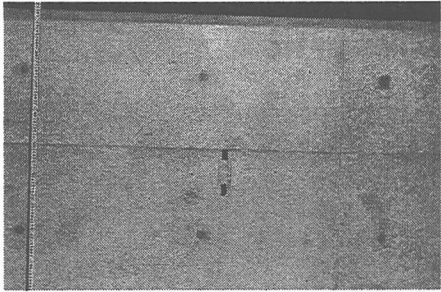
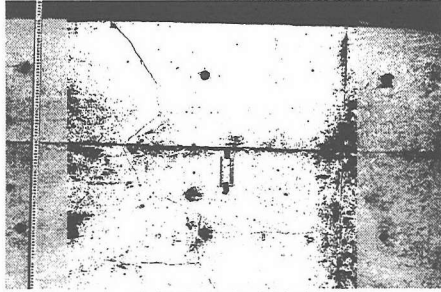
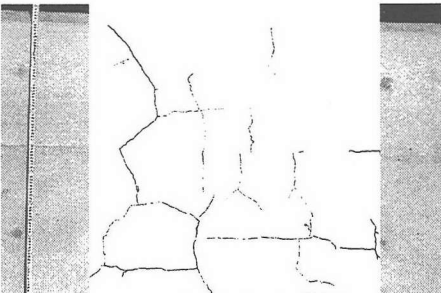
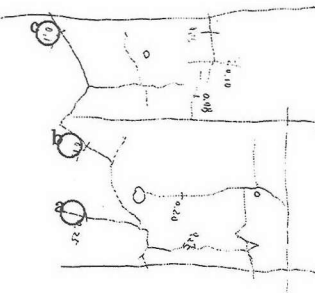
撮影場所：屋内壁 仕上げ：無し 照明条件：照明有り 照度：970 ルクス			
			
原画像		未処理のまま抽出	
			
ノイズ除去後に抽出		目視によるスケッチ	

表-3 壁Bのひび割れ抽出結果

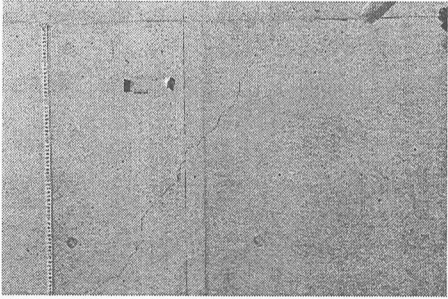
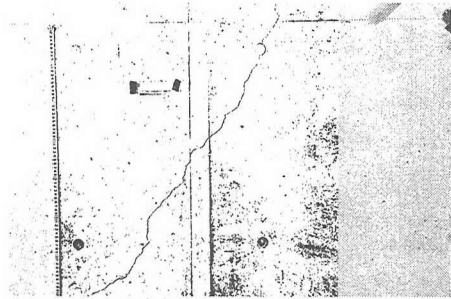
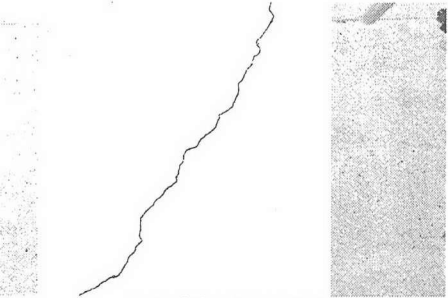
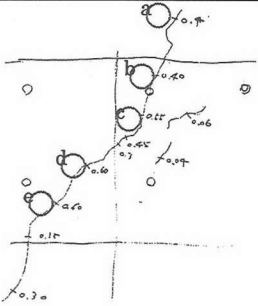
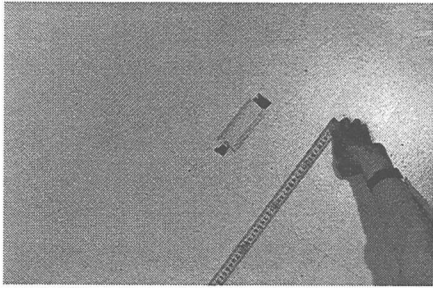
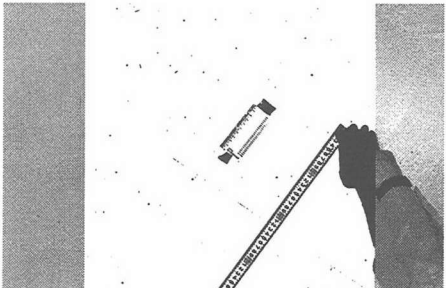
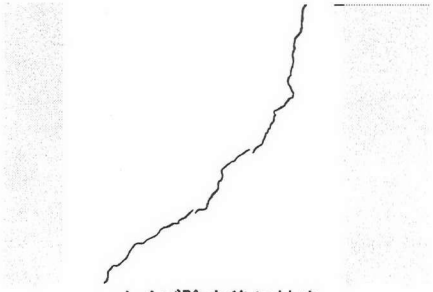
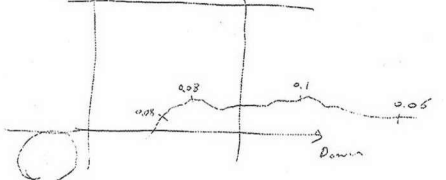
撮影場所：屋内壁 仕上げ：無し 照明条件：照明無し 照度：97ルクス	
	
原画像	未処理のまま抽出
	
ノイズ除去後に抽出	目視によるスケッチ

表-4 天井のひび割れ抽出結果

撮影場所：天井 仕上げ：ペンキ塗装 照明条件：照明有り 照度：1000ルクス	
	
原画像	未処理のまま抽出
	
ノイズ除去後に抽出	目視によるスケッチ

暗くなっている。壁には型枠痕が見られた。未処理のまま抽出した画像では、主要なひび割れは抽出できているが、型枠痕や汚れなどのノイズも残っている。ノイズ除去後に抽出した画像では目視により確認された0.04～0.06mmの微細なひび割れは抽出できなかったが、主要なひび割れは鮮明に抽出できた。表-4の撮影場所は、ペンキ塗装をしたコンクリート天井である。ペンキ塗装はひび割れ発生後に行っ

たようで、ひび割れは塗膜で覆われており、目視でも調査は困難であった。未処理のまま抽出した画像では型枠痕等残り、ひび割れは抽出できていない。ノイズ除去後に抽出した画像では、幅0.06mmの部分も鮮明に抽出できている。以上述べたように、ひび割れの抽出精度は良好で、かつ一般に使われている画像処理ソフトウェアを用いることにより、作業性は大きく損なわれていない。

表-5 壁Aのひび割れ幅計測結果

評価点	実測値 (mm)	画像処理計測 (mm)
a	0.25	0.24
b	0.15	0.12
c	0.15	0.32

表-6 壁Bのひび割れ幅計測結果

評価点	実測値 (mm)	画像処理計測 (mm)
a	0.40	0.96
b	0.55	0.83
c	0.45	0.44
d	0.60	0.68
e	0.60	0.10

(3) ひび割れ幅計測結果

表-2～4のひび割れを対象として、前報で提案した画像処理を用いたひび割れ幅計測手法を適用し、クラックスケールを用いて計測した実測値と比較した。ただし、表-4に示した天井のひび割れについては、ひび割れが塗膜で覆われているため、計測不可能となった。表-5、6にひび割れ幅の計測結果を示す。評価点は表-2、3の“目視によるスケッチ”中に英字で示す位置である。

壁Aの評価点a, bでは、提案手法による計測値は実測値とよく対応している。評価点cでは実測値に対して0.17mm大きくなっており良い対応を示していない。

壁Bでは、評価点c, dは提案手法と実測値はよく対応しているが、評価点a, b, eでは0.28～0.56mmの差が生じている。

このように評価点によって精度に差が生じた理由として、照明の位置や蛍光灯など他の光源の影響による背景輝度のムラの影響が考えられる。また、コンクリート表面のしみや汚れにより画像の明暗に不均一が生じている。それらの結果、幅測定用の較正曲線を作成した位置（クラックスケールを貼付した位置）に近い評価点は精度が良く、離れた位置の評価点は比較的精度が劣る結果となっていると推察される。構造試験や材料試験などを対象として画像処理計測を行う場合は、背景輝度のムラはシェーディング補正を行うことで対処でき、コンクリート表面のしみや汚れはペンキ塗装などの処理を施すことで対応できるが、実構造物を対象とする場合は何らかの対応策が必要と考えられる。

4. 実構造物への適用性検討（2）

前節で述べた汎用の画像処理ソフトウェアを用いるノイズ除去方法では、どうしても人間の手作業と判断に頼る部分が生じてしまう。しかしながら、ひび割れ診断の実務で発生する膨大な作業をすべてコンピュータで処理し省力化を図りたい、というニー

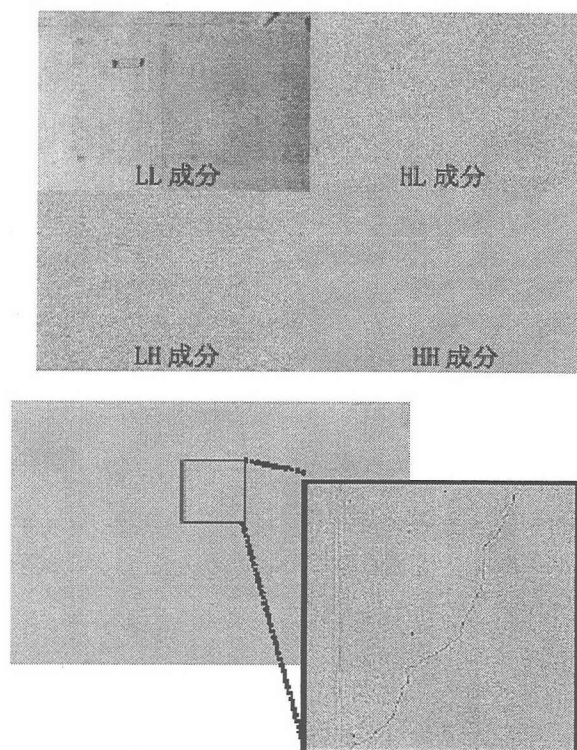


図-4 背景輝度のムラ除去後の画像（壁B）

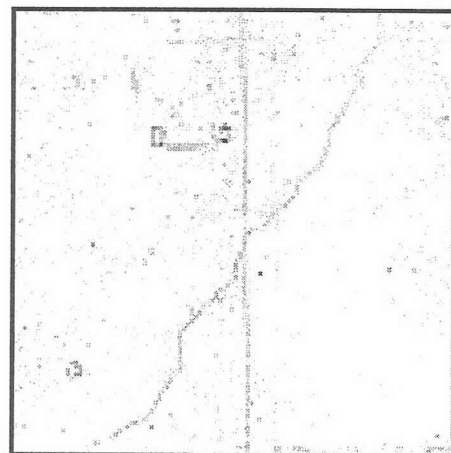


図-5 背景輝度のムラ除去後に二値化処理した画像（壁B）

ズは多い。また、シェーディング補正やコンクリート表面の処理が行えない実構造物ひびわれ幅の計測精度は、撮影した画像の背景輝度のムラに影響を受けやすいことも判った。

本章では、前述した問題点を改善するため、2次元ウェーブレット変換による多重解像度解析を用いて、照明のムラやコンクリート表面のしみや汚れなどを除去する方法を検討する。

(1) 多重解像度解析を用いたノイズ除去

背景輝度の不均一性を除去するために、2次元ウ

ウェーブレット変換による多重解像度解析を用いて、低空間周波数成分を取り除く手法を採用する。ウェーブレット変換は画像の輝度と位置の関係を2次元的にダイナミックに解析するものである。照明のムラ、コンクリート表面のしみや汚れなどは、画像の空間周波数領域では低周波成分となる場合が多い。したがって、これらの低周波成分をウェーブレット変換により分離・除去すれば、背景輝度にムラのない均一な画像が得られることになる。

図-3は、表-3に示した壁Aの原画像に対して階層レベル1のウェーブレット変換を行った結果である。低周波成分を取り除くため、この画像中の左上のLL(low-low)成分を取り除き、逆ウェーブレット変換を行うと、図-4のような背景輝度の不均一性を除去した画像を取得することができる（実際には階層レベル3の変換を用いた）。

図-4の画像を図-1に示した手順のシェーディング画像として用いることにより、図-5に示す輝度のムラを除去した二値化画像が得られる。図-5には、ひび割れの他に、型枠痕やジャンカなどの高周波成分のノイズは残っている。

(2) ひびわれ幅の計測結果

著者らの提案するひび割れ幅計測のアルゴリズムを、輝度のムラを除去した画像に適用する。前述した壁Bのひび割れ幅計測結果を表-7に示す。実測値はクラックスケールで目視計測した結果である。表中には、原画像からひび割れ幅を計算した結果を再掲している。

原画像から計測した場合は、第3章(3)で述べたように、クラックスケールに近いc点、d点で実測値と近い値を示しているものの、背景が暗いa点やb点では実測値より大きな値となり、背景の明るいe点では実測値より小さい値となっている。一方、輝度のムラを取り除いた画像からひび割れ幅を計測した場合、a～e点の全ての計測位置においてクラックスケールによる実測値に近い値をとっており、多重解像度解析を用いたノイズ除去の有効性が確認できる。

5. まとめ

著者等の開発した画像処理技術を用いたひび割れ計測システムを実構造物に適用し、その使用性について検討した。

(1) もっとも問題となるノイズ除去の方法については、一般に用いられている画像処理ソフトウェアを使用する簡便な方法、及び、多情解像度解析を用いる方法を示した。

(2) 画像処理ソフトウェアを使用する方法により実務供しうる精度でひび割れの抽出が可能であることを示した。しかしながら、ひび割れ幅の計測精度

表-7 輝度ムラ除去後の壁Bひび割れ幅計測結果

評価点	実測値 (mm)	画像処理計測	
		原画像で計測 (mm)	輝度ムラ除去 後に計測 (mm)
a	0.40	0.96	0.36
b	0.55	0.83	0.58
c	0.45	0.44	0.43
d	0.60	0.68	0.61
e	0.60	0.10	0.66

は撮影画像の状況に影響を受けることが多く、照明やコンクリート表面の状態などに注意が必要である。

(3) ウェーブレット変換による多重解像度分析を用いる方法では、輝度のムラに起因する低周波成分のノイズ除去のプロセス全てをコンピュータにより行うことが可能で、ひび割れ幅の計測精度も良好である。しかし、実用に供するには検証例を増やすことが必要と思われる。

謝辞：本研究の遂行にあたり早稲田大学大学院理工学部伊藤厚史氏、大林組佐藤立氏に多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 武田 篤史, 山田 守, 大内 一, 橋本周司: R C 構造物のデジタル画像を用いたひびわれ計測, 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
- 2) 武田 篤史, 山田 守, 大内 一, 橋本周司: R C 構造物のデジタル画像を用いたひびわれ計測(その2), 第3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.35~40, 2002.02