

論文 RC 構造実験におけるひび割れ計測の適用

武田 篤史^{*1}・山田 守^{*2}・大内 一^{*3}

要旨：ひびわれ計測データの高度情報化を目的として、デジタルカメラと画像処理技術を用いたひびわれ計測技術の開発を行なった。本論文では、ひびわれ計測手法の概要を示した後、計測手法の検証を行った。その結果、抽出可能なひび割れ幅、および画像解析によって得られたひび割れと実際のひび割れ幅との関係がわかった。さらに、RC柱部材の正負交番水平載荷試験における適用を行い、既往の手法であるスケッチと比較し、本計測手法の特徴を把握した後、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。

キーワード：ひび割れ計測、デジタル画像、画像処理、RC 構造物、損傷評価

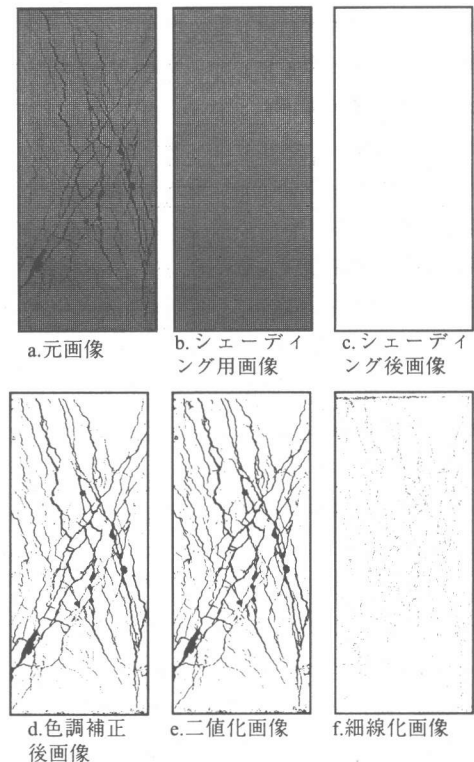
1. はじめに

RC 構造物の耐震性、材料の劣化などを推定する上で、コンクリート表面に発生するひびわれは、きわめて重要な判断材料となる。現実には、震災後の被災度診断は、主にひび割れ性状から判断している。しかしながら、ひびわれ性状の観測は、目視、スケッチなどの手法が主流であり、これらの測定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、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。

これらの背景のもと、著者らは、ひびわれ計測データの高度情報化を目的として、デジタルカメラとコンピュータ画像処理技術を用いたひびわれ計測技術の開発を行った。本論文では、ひびわれ計測手法の概要と、計測システムの検証について示す。さらに、RC柱部材の正負交番水平載荷試験における適用を行い、既往の手法であ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。

2. ひび割れ計測手法

ひびわれの計測は以下の手順で行われる。図一1に各処理の例を示す。この例に用いた写真は4.において記す実験によって得られたもの



図一1 画像処理の例

*1 (株)大林組 技術研究所 土木耐震構造研究室

*2 (株)大林組 技術研究所 建築振動制御研究室 副主任研究員

*3 (株)大林組 技術研究所 土木耐震構造研究室 室長

工修 (正会員)

工博

工博 (正会員)

である(case-A,+4 σ_y ピーク時).

①撮影 デジタルカメラにより RC 構造物の表面を撮影する (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.).

②画像の補正 ①により撮影した画像について, シェーディング補正および色調補正を行う. シェーディング補正はひび割れ画像からシェーディング補正画像を引くことにより, 影の映り込みや輝度のむらを除去するものである (図-1 c.). 色調補正は, 後述する二値化をスムーズにするため, ひび割れ部と健全部の輝度の差が大きくなるように調整する (図-1 d.).

③二値化処理 画像上においてひびわ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われと判定されるものを検出する. さらに, ひびわれは連続していることを利用して, 再帰的にひびわ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.).

④細線化—数値データ化処理 ③で得られた二値化画像は, 単なるひびわれ画素を示しただけのものであり, スケッチの代用とはなるが, 定量的な解析には不便である. そこで, ひび割れの連結性を変えないように, 線幅が 1pixel である中心線を抽出する細線化処理¹⁾を行う (図-1 f.). この結果, ひび割れは始点および終点の座標と幅の情報を持つ数値データとなる.

3. ひび割れ計測手法の検証

3.1 検証方法

コンクリート表面にクラックスケールを置き, コンクリートおよびクラックスケールを撮影した. クラックスケールは, 0.04mm から 1.40mm までの幅の線が引いてある透明な板であり, この線を疑似ひび割れとして, 本ひび割れ計測手法を検証しようとするものである.

撮影条件は後述する RC の水平載荷試験と同様とし, レンズの収差による影響を考慮し, 画

表-1 抽出可能なひび割れ幅

画面上の 位置	端部			中央		
	縦	横	斜め	縦	横	斜め
(mm)	0.04	0.06	0.04	0.08	0.06	0.06
(pixel)	0.10	0.16	0.10	0.21	0.16	0.16

面上の端部と中央で撮影した. また, デジタル画像の pixel の配列が格子状であることを考慮し, 疑似ひび割れの向きは, それぞれ画像に対し, 縦・横・斜め (約 45°) の 3 通りとした.

なお, 本撮影条件では 1pixel=0.38mm(1mm=2.62 pixel)であった.

3.2 抽出可能なひび割れ幅

二値化処理において, ひび割れと認識されて抽出された疑似ひび割れのうち, もっとも細い線幅を表-1 に示す.

いずれのケースにおいても 0.08mm のひび割れは抽出することができた. 本計測手法で抽出可能であった 0.08mm は 0.21pixel に相当し, よい抽出性能であるといえる. 実際に使用する場合は, 必要精度を決めて, 画角を調整して撮影することになる.

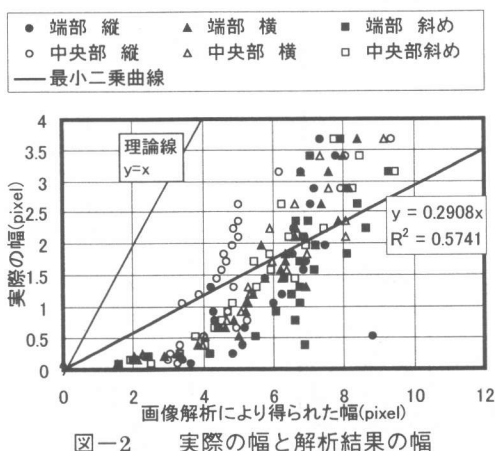
画像上の位置に関しては, 端部のほうがやや良い抽出性能であった. これは, 一般に各種収差は補正を行っても比較的端部のほうで大きくなるため, 端部では太く映り, 結果的に抽出性能が良くなったものと思われる.

ひび割れの向きについては, 縦や横に対して, 斜めのひび割れが比較的良好に抽出できることがわかる. これは, 同じ幅のひび割れでも, 正方形の pixel 内を辺に平行に通るより, 対角方向に通るほうが, 距離が長くなり, その結果 1pixel 内に占めるひび割れの面積の割合が多くなり, 抽出しやすくなるものと思われる.

3.3 ひび割れ幅について

本計測手法によって得られたひび割れ幅と, 実際のひび割れ幅を画角と画素数から計算したピクセル幅の関係を図-2 に示す.

デジタルカメラによって実物とまったく同じ画像が取れたとすると, 図に点線で示す $y=x$ の



直線状に分布するはずである。しかし、解析によって得られた幅は、実際の幅の $3.45(=1/0.29)$ 倍程度であった。

この理由としては、①一般にカメラの画素と、出力画像の画素は1対1で対応しているわけではなく、1pixelの大きさのものは、周囲の数pixelの範囲に影響を与える。②本ひび割れ計測手法においては、ひび割れ幅は、ひび割れの pixel 数を細線化後の長さで割ることによって出しているが、ひび割れ長さは細線化の際に多少短くなり、結果的に、解析ではひび割れ幅が大きく出力される。ということが考えられる。

幅が大きいひび割れが理論線に近づいてくるとも、この理由に沿って考えると合理的である。

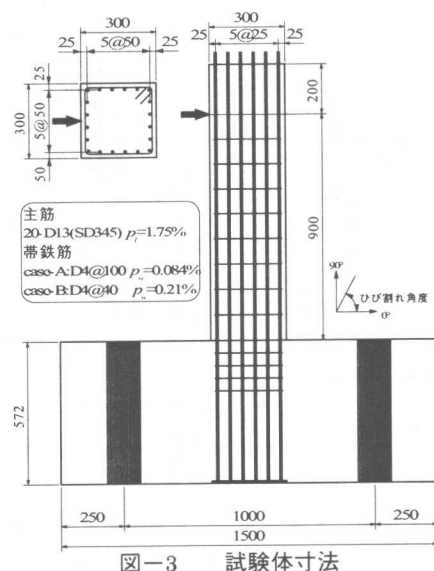
この結果より、現在の段階においては、必ずしも定量的な解析が行えるとは言えないが、実際の幅と解析により得られた幅にはほぼ1:1の対応があり、今後、キャリブレーションにより定量的な解析が可能になると考えられる。

4. 実験における試用

RC柱部材の正負交番繰返し水平載荷実験において、本ひび割れ計測手法を試用をした。

4.1 試験体と実験方法

試験体は2体とし、いずれも実構造物のスケールモデルとはせずに、曲げ降伏後にせん断ひび割れが開いて耐力が降下する様に設計した。これら2体は比較が行いやすいように、帯鉄筋



量のみをパラメーターとし、その他の諸元は等しくなるようにした。試験体の寸法を図-3に示す。

載荷装置は、軸力を導入せずに、図-3 矢印位置が中心となるように串型ジャッキを用いて水平に載荷した。

載荷は、降伏変位 δ_y の整数倍でそれぞれ正負1回づつ正負交番繰返し載荷とした。なお、降伏変位 δ_y は最外縁の引張鉄筋が降伏ひずみに達した点とした。

4.2 ひび割れ計測の方法

計測には、600万画素(2008×3040)のデジタルカメラを用いた。試験体には、あらかじめ白色の塗料を塗布し、ひび割れが抽出しやすくした。

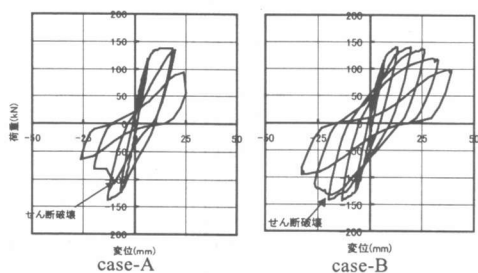
撮影は、各サイクルのピーク時とその後の荷重が0に戻った点を基本に行った。

4.3 試験体の破壊性状

4.5に示すひび割れ計測の結果では、ひび割れデータを破壊性状と結び付けて考察する。そこで、本節において試験体の破壊性状を示す。

試験体の荷重変位関係を図-4に示す。

case-A (帯鉄筋=少), case-B (帯鉄筋=多)とも曲げ降伏が先行した。case-Aは、 $-3\delta_y$ に向かう際に $-1.5\delta_y$ 程度の変位の時に脆性的にせん断破壊し、大きく耐力が減少するとともに変位



図一4 荷重変位関係

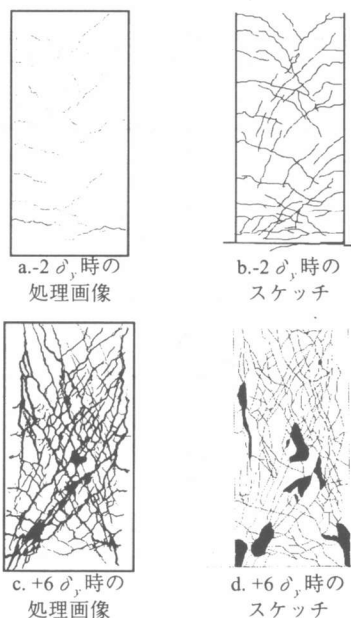
が流れた. case-B は $-4\delta_y$ に向かう際に $-3\delta_y$ 程度から荷重が落ち始め, せん断ひび割れに起因する耐力低下とは思われるものの, 徐々に耐力が低下していった.

4.4 目視によるスケッチと本計測手法の比較

図一5 に本計測手法による二値化処理画像と, 目視によって行ったスケッチ図の比較を示す. 試験体は case-B である. 図中 a, c. はそれぞれ $-2\delta_y$, $+6\delta_y$ のピーク時とその直前の反対方向载荷時($+2\delta_y$, $-5\delta_y$)のピーク時に撮影した画像をそれぞれ処理したものを重ねたものである. b, d. は, それぞれ $-2\delta_y$, $+6\delta_y$ まで, 各サイクルの正負のピーク毎に目視によりスケッチを上書きしていったもので, 閉じているひび割れについても記載されたままである.

a. と b. を比較した場合, スケッチのほうが多くのひび割れを確認できているものの, c. と d. を比較すると, 本手法のほうが多くのひび割れを確認できている. これは, 本手法の2 値化処理アルゴリズムはひび割れが疎の場合は検出能力が落ちること, c. のようにひび割れが非常に多くなると目視によって確実にひび割れをスケッチすることは難しいこと, が原因である. しかし, どちらのケースにおいても, 特に塑性ヒンジ領域に見られるようなひび割れ密度の高いところでは, スケッチは確実性に欠けるとともに正確さに欠けている. また, すべての線が同様の太さであるため, 例えば, d. のスケッチから支配的なひび割れを判断するためには, 工学的な知識が必要となる.

スケッチにおいては閉じたひび割れを消して



図一5 処理画像とスケッチの比較

いくことは実務上困難であるが, 実際には反対方向载荷時に入ったひび割れは閉じているものと, 開いたままのものがある. 本システムはひび割れの幅がわかると共に, ある幅以下に閉じたひび割れについては抽出しないため, ひび割れが開いたり閉じたりする現象を追跡するには, 適していると言える.

4.5 ひび割れ計測結果の利用

(1) ひび割れ量と塑性率の関係

図一6 にそれぞれのケースのひび割れ量－塑性率関係を荷重－変位関係のスケルトンカーブとともに示す. 横軸は, 負方向载荷時の塑性率とした. ひび割れ量は, ひび割れと認識された pixel 数とし, そのひび割れ角度(図一3 に示す通り, 0° は水平, 90° は垂直)によって3 通りを示す. ここで, $-90^\circ \sim 0^\circ$ までのひび割れに関しては, 正方向载荷時に生じたものと考え, グラフ上からは省いている.

両ケースとも耐力低下が始まる2 つ前のサイクルまではほとんどひび割れが増加せず, その後耐力低下の一つ前のサイクルに向けて徐々に増加し, せん断破壊により耐力が低下した時にはさらに大きな傾きでひび割れが増加している.

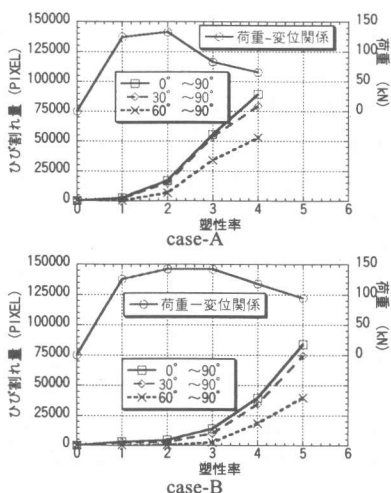


図-6 ひび割れ量－塑性率関係

これは、最初の曲げが卓越した段階ではほとんどひび割れが増えず、変位が進んでせん断が卓越した段階に移行すると、ひび割れが増加し始め、最終的には耐力低下の原因となるせん断破壊に至ると言うことを示している。

本試験体は、両者ともせん断ひび割れが広がって耐力の減少に至ったため、せん断ひび割れ（30°～90°または 60°～90°のひび割れ）において、特徴的な挙動が予想された。しかし、0°～90°のひび割れと比し、特徴の大きな違いはなかった。

(2) ひび割れ角度について

図-7 にそれぞれのケースの平均ひび割れ角度－塑性率関係を荷重－変位関係のスケルトンカーブとともに示す。平均ひび割れ角度は、各ひび割れの角度に pixel 数（幅×長さ）で重みをつけて平均したものであり、塑性率は負方向載荷時としている。塑性率 1 の時は、両ケースとも 40°程度ではほぼ同様の角度であるが、case-A はその後すぐに急激に上昇し、せん断破壊時に 60°程度に達しその後は変化しない。case-B は最大耐力時（塑性率 3）までの曲げが卓越する段階では、ほとんど角度が一定である。その後耐力減少が始まることによって急激に角度が大きくなっている。また、せん断破壊後は両ケースともほとんど平均ひび割れ角度が変化しないこ

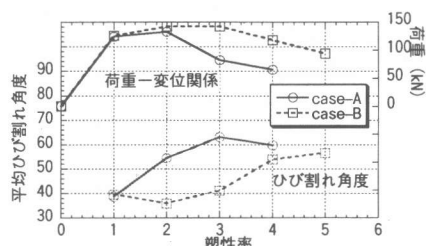


図-7 平均ひび割れ角度－塑性率

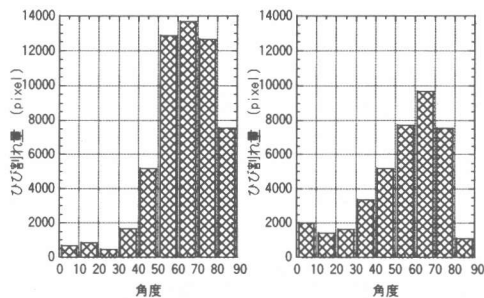


図-8 ひび割れ量のヒストグラム

表-2 せん断ひび割れ角度

試験体	コンクリート標準示方	鈴木ら	本試験結果
case-A	45°	80°	60～70°
case-B	45°	71°	60～70°

とが分かる。

図-8 に両ケースのせん断破壊直後における角度毎のひび割れ量をヒストグラムにして示す。case-A, case-B とも 60°～70°のひび割れが最も多いことがわかる。この角度は、もっとも支配的なひび割れの角度と見る事ができるため、せん断ひび割れの角度とみなして問題ないと思われる。本実験のように軸力を導入していない試験体は多数のせん断ひび割れが生じ、せん断ひび割れ角度を限定することは困難であるが、本計測手法により定量的にある範囲内に推測することができる。

せん断ひび割れ角度については、コンクリート標準示方書²⁾では一定と仮定しており、また鈴木ら³⁾はエネルギー的考察から算定法を提案している。表-2 にこれらのせん断ひび割れ角度を本実験結果とともに示す。表-2 より、それぞれ大きな違いがあり、必ずしもその推定法は明らかでないことがわかる。一方で、トラス理論に基づいて帯鉄筋の負担するせん断耐力を

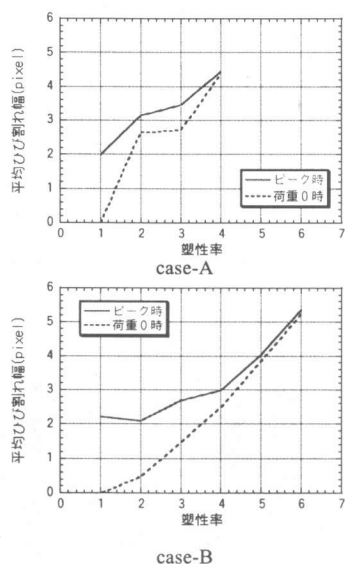


図-9 平均ひび割れ幅

求める場合は、せん断ひび割れ角度の重要性は周知の事実である。

今後、本計測手法によって定量的にせん断ひび割れ角度を把握し、その推定法を構築することが可能と思われる。

(3)平均ひび割れ幅

図-9 に、両試験体の正方向載荷時の平均ひび割れ幅の推移を、ピーク時とその後除荷して荷重が0になった時（残留ひび割れ）の2通りについて示す。平均ひび割れ幅は、ピーク時は、0°~90°（正加力時に入るひび割れ）のひび割れ量をひび割れ長さで除したものとした。荷重0時については、荷重0時の0°~90°のひび割れ量をピーク時のひび割れ長さで除した。これは、ピーク時と荷重0時で比較する場合、除荷によって閉じて見えなくなったひび割れについても、ひび割れ幅0としてカウントするのが合理的であるためである。

両ケースとも、塑性率と共に、ひび割れ幅が広がっており、特に、せん断破壊後のひび割れ幅の増加が顕著である。

残留ひび割れ幅は、塑性率の小さいときには、ピーク時に比べて小さく、塑性率が大きくなると、ピーク時の値に近づいてくる。これは、塑性率が小さいときには、曲げひび割れが支配的

であり、モーメントによる引張応力がなくなることにより自重により圧縮状態となりひび割れが閉じやすいが、塑性率が大きくなると、せん断ひび割れが支配的になり、ひび割れを閉じさせようとする力が働かず、比較的大きな残留ひび割れが生じることに起因すると思われる。

5.まとめ

本研究内容のまとめを示す。

- (1)ひびわれ計測の省力化とひびわれ計測データの高度情報化を目的として、デジタルカメラとコンピュータ画像処理技術を用いたひびわれ計測技術の開発を行なった。
- (2)計測手法の検証を行った。その結果、0.21pixel程度の幅のひび割れを抽出可能なこと、画像解析によって得られたひび割れ幅は実際の幅に対して3.5倍程度であることがわかった。校正が今後必要となる。
- (3)RC柱部材の正負交番水平載荷試験において、スケッチ画像と本計測手法の比較を行った。その結果、ひび割れが少ない場合において微細なひび割れを確認する能力においては目視によるスケッチに及ばないが、ひび割れ位置、角度、幅などの情報の正確性、ひび割れ開閉の認識、に関してはスケッチよりも優れていることがわかった。
- (4)RC柱部材の正負交番水平載荷試験において、本計測手法を適用し、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。

参考文献

- 1) Hilditch, C.J.: Linear Skeletons from Square Cupboards, Machine Intelligence4, University Press, Edinburgh, pp. 403-420, 1969.
- 2) (社)土木学会：コンクリート標準示方書，設計編，1996.3
- 3) 鈴木基行，姜錫和，尾坂芳夫：曲げ・せん断および軸力を受けるRC部材の耐力間の相関関係に関する解析適研究，土木学会論文集，No.426/V-14, pp. 193-202, 1991.