

# RC構造物のデジタル画像を用いた ひび割れ計測(その2)

武田 篤史<sup>1</sup>・山田 守<sup>2</sup>・大内 一<sup>2</sup>・橋本 周司<sup>3</sup>

<sup>1</sup>工修 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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup> 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)

The cracks occurred on the surface of RC structure are a very important key to diagnose seismic performance of a structure or the material fatigue. But, cracks data is not necessarily used effectively. This is mainly because usually crack analysis by viewing and sketching is unsuitable for the quantitative analysis by computer and crack inspection depends on experience of crack engineers. Then authors have developed the crack detecting system using a digital camera and image processing technology. In the previous paper, the outline of the crack detecting system was shown and the measurement system was verified. However, as a result, it turned out that measurement of crack width is imperfect. This paper shows the measuring technique of crack width with higher accuracy and the case examples of this measurement technique.

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

## 1. はじめに

RC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、材料の劣化などを推定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、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。

RCの構造実験においては、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ゲージによる計測も行われている。これらの手法は、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、構造物全体に着目して評価するのには向いていない。

実務においては、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。これらの多くは、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行われている。したがって、計測データの分析や処理については、デジタル画像の長所を生かした十分な検討は行われていないのが現状である。

著者らは前報<sup>1)</sup>において、ひび割れ計測手法の概要と、計測システムの検証結果について示した。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。その結果、ある程度のひび割れまでは抽出可能なこと、ひび割れ幅の測定において不完全であることがわかった。

本論文では、より精度の高いひび割れ幅の測定法について提案し、前報の方法と合わせて比較検証した。また、本計測の適用例について示した。

## 2. 前報<sup>1)</sup>におけるひび割れ計測の方法

### (1) 前報の計測方法について

前報に示した、ひび割れの計測は以下の手順である。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、構造物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.)。

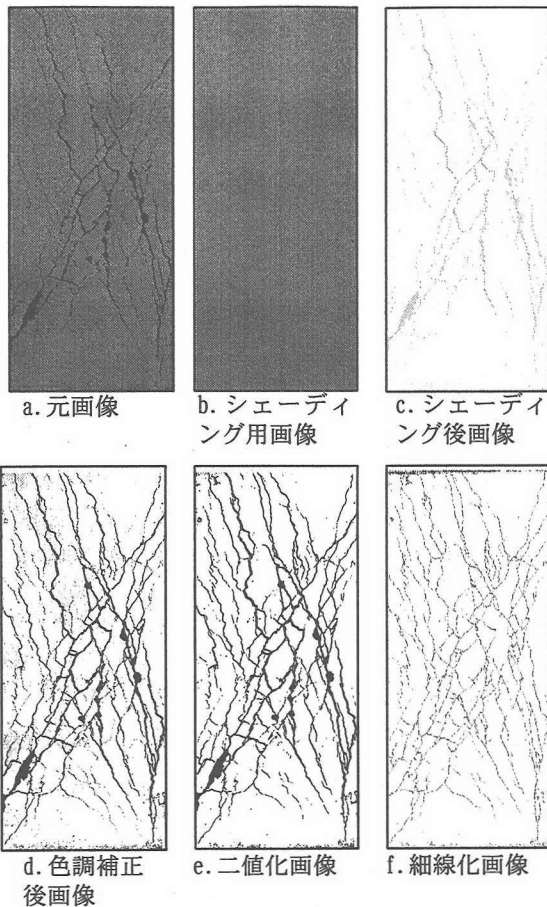


図-1 画像処理の例

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穴が生成しないように、線幅が1pixelとなるように中心線を抽出する細線化処理<sup>1)</sup>を行う(図-1 f.). この時、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数となり、長さで除すことによってひび割れ幅となす。つまり、黒画素数の計上による方法といえる。この処理を経て、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) 黒画素数の計上により得られたひび割れ幅の問題点

黒画素数の計上の方法で得られたひび割れ幅は、以下の問題点を持つ。①ひび割れ幅はpixel単位の精度となる。幅を求める実際の作業上においては、あるひび割れ領域について面積(pixel数)を求め、長さで割ることによって幅とするため、出力は

pixelの実数倍であるものの、実質的にはpixel単位の精度で計測を行っている。②通常、カラーデジタルカメラでは、1pixelの大きさのものは少なくとも隣接する4または8pixelにも影響する。これは、各々のCCDにはRGBまたはCMYKのフィルターがついており1色しか計測できないにもかかわらず、CCDと同数のpixelの画像を出力するために行っている補完が原因である。しかし、二値化の際に閾値以下の輝度のpixelは全てひび割れと判断されるため、隣接するpixelの影響で輝度が小さくなったpixelもひび割れと判断される可能性がある。逆に、ひび割れ位置であっても、補完の結果隣接する輝度の高いpixelの影響で輝度が閾値より大きくなり、ひび割れと認識されない場合がある。この事は、ひび割れの境界において顕著に表れ、ひび割れ幅の精度を落とす原因となる。③高精度のオートフォーカス等を用いても、カメラの焦点を厳密に併せることは困難であり、焦点が多少ずれることは避け得ない。このような場合、ひび割れ幅は薄く太く撮影されることになり、②と同様に、ピンぼけの影響がひび割れ幅として出力されることになる。

## 3. ひび割れ幅計測方法の改善

2. (2)に示した問題点を改善するため、サブピクセル法を用いたひび割れ幅の計測方法を新たに2手法提案し、黒画素数計上の方法と合わせて比較、検証を行った。ここで、求めたいものはひび割れ幅ではあるが、実際にはひび割れ面積を求めた後にひび割れ長さで除すことになる。これは、ひび割れの長さについては、数十pixel以上あるのが普通であり、数十pixelの端部において数pixelの誤差が発生したとしても、誤差の割合は幅に比して充分小さいためである。また、データとして重要なのは、ローカルな幅よりは、そのひび割れを代表できる幅として、平均ひび割れ幅であるためである。

### (1) 濃度の総和による方法

#### a) 計測方法

2.に示す方法にしたがって二値化を行い、ひび割れ領域を判定し、その範囲と外周1pixel以上の領域について、各画素の濃度を合計する。その手順を図-2に示す。一般に、焦点の大きなずれがない場合、2. (2)②の補完が原因となる誤差は、外周の領域は1pixelで良いと思われるが、焦点がずれている場合は、外周の領域を大きくすることで対応が可能となる。ここで、濃度とは、輝度値の反対にあたるものとし、ひび割れ以外のコンクリート表面も完全な白でないことから、以下のように定義する。

$$d = (2^n - 1) - bt + b_0 \quad (1)$$

ここに、

$d$ : 濃度

$n$ : 画像のbit数で、通常の画像は8

$b$ : 輝度

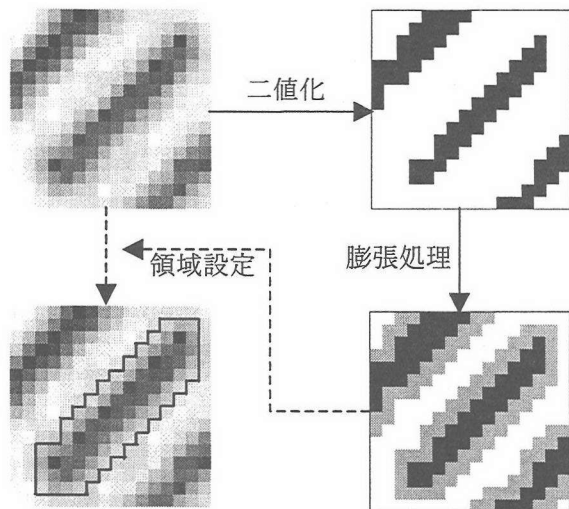


図-2 計測領域の設定

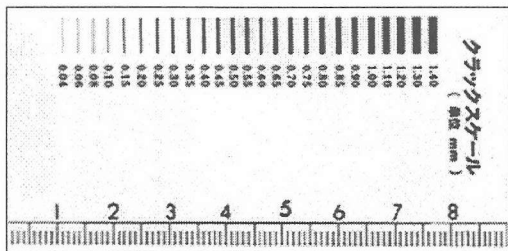


図-3 クラックスケール

$b_a$ : コンクリート表面の輝度

一方で、画像中にあらかじめ写し込んでおいた図-3に示すようなクラックスケール中のひび割れについても、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、ひび割れ面積と濃度の合計の較正曲線を描くことができる。

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、ひび割れ面積を求める。

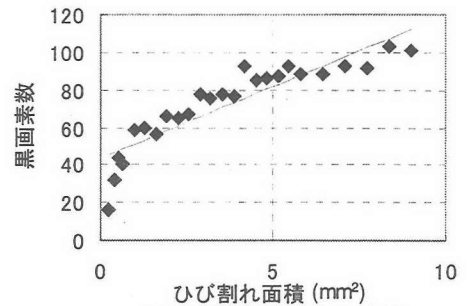
#### b) 較正曲線の例

図-4に a. 前報の黒画素数を計上する方法とb. 濃度の総和による方法のそれぞれについて、較正曲線の例を示す。本ケースにおいては、クラックスケールは、図-3に示すように0.04mmから1.40mmまでの幅の線が引いてある透明な板を用いている。また、1pixel=0.38mm(1mm=2.62 pixel)であった。各ひび割れの長さは全て一定であるため、横軸の面積はひび割れ幅に比例する。

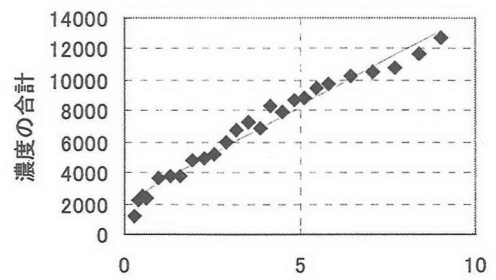
a. 黒画素数を計上する方法は特にひび割れ幅が小さいところで直線から大きく外れ、精度の良い計測が不可能であることがわかる。一方で、b. 濃度の総和による方法では、微小なひび割れも含め、線形になっていることがわかる。

#### c) 本方法の問題点

b. の較正曲線は、クラックスケールを撮影したものであるため、太いひび割れでも色調が一様であり、問題なく計測が可能であった。しかし、図-5に示すような剥落や非常に太いひび割れを考慮した場合、



a. 黒画素数を計上する方法



b. 輝度の総和による方法

図-4 クラックスケールを用いた較正曲線の例

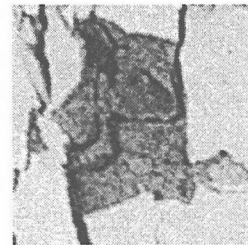


図-5 色調が単一ではない場合の例

そのひび割れ中の色調は単一ではなく、誤差を生じることが予想される。

## (2) 黒画素数と濃度の総和の併用

### a) 計測方法

(1)c) に示した濃度の総和を求める方法の欠点を補うため、黒画素数と濃度の総和の2つの方法を併用する方法を考案した。

計測方法は以下の通りである。他の方法と同様に二値化した後、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、ひび割れ面積を表わす値とする。この濃度の総和を、mm単位に直す方法は、他の方法と同様にクラックスケールの画像より較正曲線を求め、照らし合わせることにより行う。

なお、本方法によって得られる較正曲線は、(1)に示した濃度の総和による方法で得られるものと、ほぼ同様になる。これは、前述の通りクラックスケール上のひび割れがほぼ全て一様な色をしているた

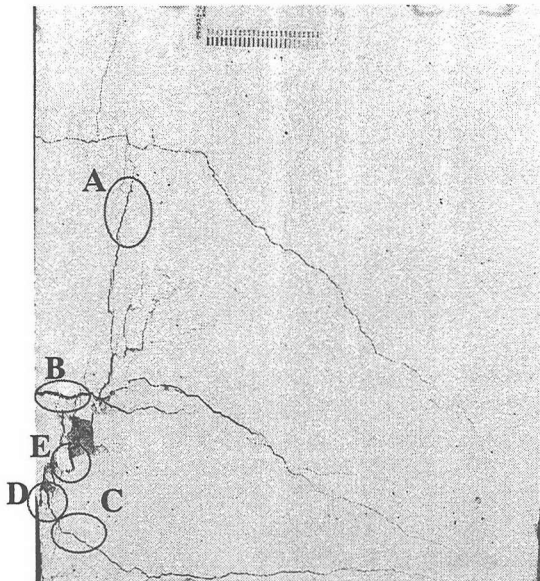


図-6 試験計測に用いた画像と試験領域

表-1 各方法の比較

	実測値	方法1	方法2	方法3
A	0.30	0.18	0.32	0.31
B	2.0	2.08	1.72	2.03
C	0.40	0.28	0.37	0.37
D	1.5	1.69	1.24	1.43
E	1.00	0.96	0.99	1.00

単位:mm

めである。

#### b) 本方法の特徴

本方法は、ひび割れの周辺部については、濃度の総和より求める方法に基づいており、中心部については黒画素数を計上する方法を用いている。これは、太いひび割れに対しては大きな誤差は生じないが細いひび割れに対しては非常に精度の悪くなる黒画素数計上の方法と、色調が不均一な太いひび割れに対して大きな誤差を生じる可能性があるが細いひび割れに対しては良い精度が得られる濃度の総和の方法の、それぞれ良いところを用いたことになり、様々なひび割れに対して良い精度の計測が行えるはずである。

#### (3) 各方法の比較

前報に示した黒画素数を計上する方法（方法1）、濃度の総和による方法（方法2）、黒画素数と濃度の総和による方法（方法3）の3通りについて計測結果を比較した。実測値については、当該ひび割れ中の平均的な幅を持つと思われる局所に対して、小さいひび割れに対してはクラックスケールを、大きいひび割れに対しては金尺を用いて実測したものである。

比較に用いた画像と、比較したひび割れの位置についてを図-6に示す。撮影条件は、1pixel=0.26mmで、撮影範囲は、幅約400mm×高さ約530mmである。計測したひび割れは、3.に示した通り面積で計測

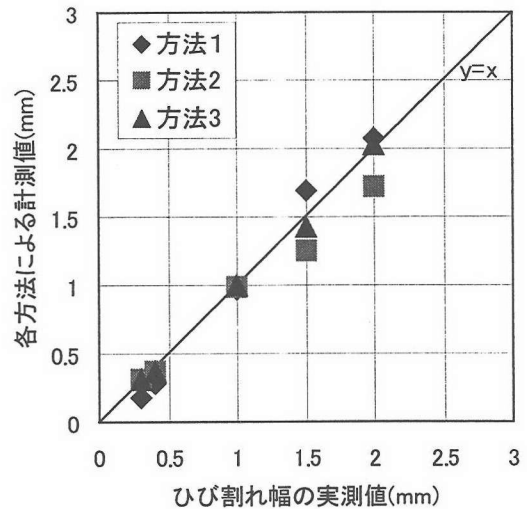


図-7 各方法による計測値と実測値の関係

されているため、長さで除すことによってひび割れ幅に直している。一つのひび割れの長さは、7~40mm程度としている。

表-1、図-7に比較の結果を示す。方法1の結果を見ると、細いひび割れに対しては精度が悪く太いひび割れに対しては比較的精度が良くなっており、2.に示す方法1の特徴を表わす結果となっている。方法2の結果は、方法1と逆に、細いひび割れに対しては良い精度であるが太いひび割れに対して精度が悪くなっており、2.に示す方法2の特徴に適合している。方法3の結果は、いずれの測定個所においてももっとも実測値に近く、方法3の有利性が検証された。

#### (4) 今後の課題

現状では、ある特定のひび割れに対し、手動で抜き出した後に計測を行っている。アルゴリズムとしては他の方法に比し有利性が確認され、また実用上十分な精度であるが、画像全体に対して容易に計測ができるようにシステム化をしなければ実用的ではない。マニュアル操作を極力減らしシステム化を行うためには、ひび割れ分岐点の対応や較正曲線を取り込む方法、ひび割れの形状が起因となる誤差の解決等、新たな課題が生じるが、今後は、本ひび割れ幅計測方法を含めたシステム化を行い、構造実験等に用いて行く予定である。

#### 4. 本計測の適用例

本計測手法を用いて、構造実験におけるひび割れ計測を行った例を示す。ただし、3.に示した方法はシステム化が終了していないため、本章で用いるひび割れ幅は黒画素数計上の方法によって求められたものである。よって、ひび割れ幅、面積についてはすべてpixel単位で示す。なお、本章に示す実験は倉本ら<sup>34)</sup>の実験データを用いたのであるが、本論文では適用例を示して本計測手法の有効性を示すことを目的としている。実験内容の詳細については参考

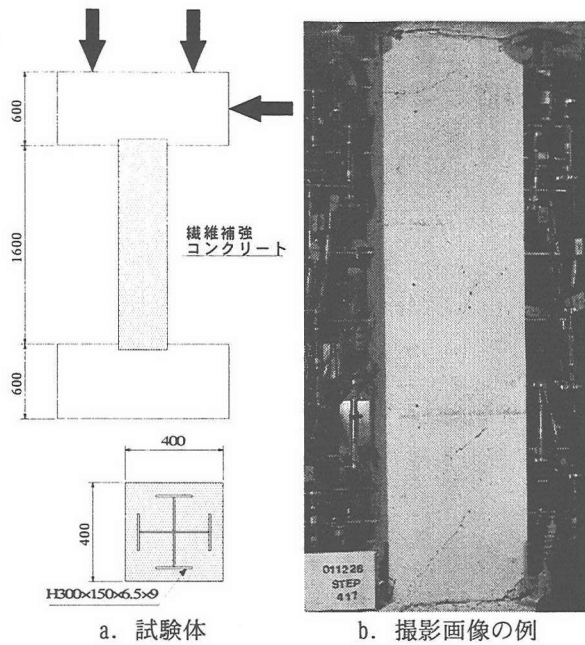


図-8 試験概要

文献を参照されたい。

(1) 繊維補強SC構造の水平載荷実験<sup>3)</sup>

a) 実験概要

適用した実験は、試験体が2体であり、ビニロン繊維補強量を1%のもの(VF1)と、2%のもの(VF2)であった。試験体の寸法は図-8 a. に示す通りであった。

載荷は、軸力(1100kN)下での逆対称加力であり、2回づつ正負交番繰り返し載荷であった。各サイクルのピーク変位は部材角2%までは0.5%づつの増加であり、その後は1%づつの増加であった。

撮影画像の例を図-8 b. に示す。撮影は600万画素のデジタルカメラにより行われ、400mm×1600mmの範囲を撮影対象とした。なお、1pixel=0.60mmとなる。

b) ひび割れ量について

図-9にひび割れ量-部材角の関係を示す。横軸の部材角は正方向載荷時とした。ひび割れ量は、ピーク時とその残留をとり、ひび割れ角度が0°~90°までのひび割れと認識されたpixel数とした。-90°~0°までのひび割れは、負方向載荷時においてひび割れが発生したものと考え、グラフ上からは省いている。

どちらの試験体とも残留ひび割れ量がピーク時のひび割れ量より少なくなっており、本システムにより、閉じているひび割れについての計測が可能になったと言える。

また、補強量の増加に伴い、ひび割れ量が減少していることがわかる。しかし、同様の形状の試験体で同様の変位であれば、本来ひび割れ量はほぼ等しくなるはずである。これは、VF1に対してVF2試験体ではひび割れが分散し、結果的に本計測システムによってひび割れとして抽出できないひび割れが増え、ひび割れ量が減ったように見えるものと思われる。

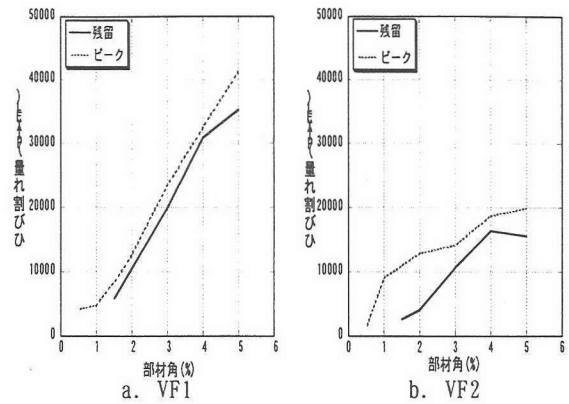


図-9 ひび割れ量-部材角関係

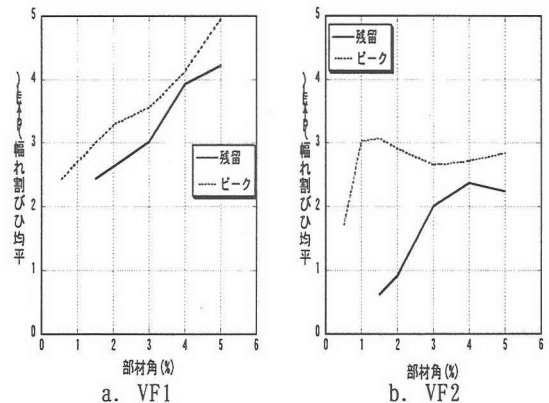


図-10 平均ひび割れ幅-部材角関係

る。なお、本システムにおいて抽出可能なひび割れは、0.21pixelであることが確認されている<sup>2)</sup>ため、本ケースにおいては0.05mm程度となる。

c) 平均ひび割れ幅

図-10に、試験体の正方向載荷時の平均ひび割れ幅の推移を、ピーク時と荷重が0時の残留の2つを示す。平均ひび割れ幅は、ピーク時、残留それぞれの0°~90°のひび割れ量を、ピーク時のひび割れ長さで除した。残留の平均ひび割れについても、ピーク時のひび割れ長さで除したのは、ピーク時と比較する場合に、除荷により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とカウントするのが合理的であるためである。

VF1の試験体では、部材角の増加に伴い、ピーク時、残留時ともに、ほぼ一定の割合でひび割れ幅が広がっているのがわかる。しかし、VF2の試験体では、ピーク時のひび割れ幅が、部材角1%の時に3pixel程度になった後は、ほとんど変化していない。これは、VF2試験体では繊維による拘束が大きいことによりひび割れ分散が進み、ある程度以上のひび割れを生じないということであると思われる。

(2) ピロティ構造の仮動的載荷実験<sup>4)</sup>

a) 実験概要

適用した実験は、試験体が1階にピロティ構造を持つ12階建て建築物の1,2階部分であり、3階以上の応答により入力される地震力を2階天井位置に鉛直力および水平力として入力するPsuedo Dynamics実験であった。試験体の寸法、形状を図-11に示す。

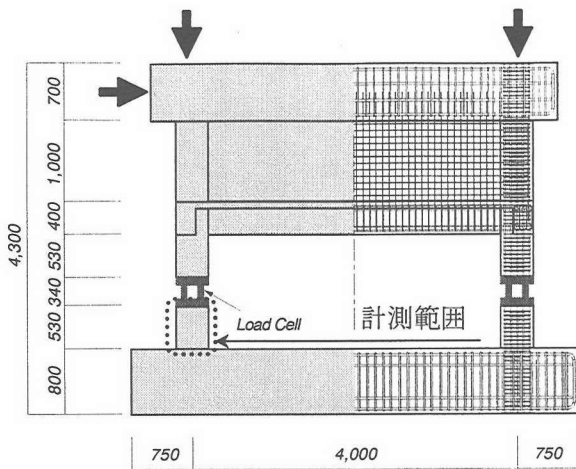


図-11 試験体と計測範囲

入力地震波は、Elcentro地震波を最大速度25kine, 50kineにしたものと、JMA地震波の原波であった。

撮影範囲は、図-11に示す400mm×530mmの範囲とし、撮影画像の例としては、図-6が当てはまる。撮影は600万画素のデジタルカメラにより行われ、1pixel=0.26mmとなる。

#### b) ひび割れ量・平均ひび割れ幅

図-12にひび割れ量-入力地震波関係を、図-13に平均ひび割れ幅-入力地震波関係を示す。ひび割れ量・平均ひび割れ幅は前節と同様の定義であり、ピーク時のみをプロットした。横軸は入力地震波である。

地震波が大きくなるにつれ、ひび割れ量、ひび割れ幅とも増加がみられ、特にElc50とJMAの間では急激に増加し、試験体の損傷が大きくなることがわかる。

本論文では、適用例をあげることを目的としているため、地震動と損傷の関係については多くは考察していない。しかし、図-12,13のようなグラフの横軸を、地震動のもつ破壊性能（例えば最大加速度やスペクトル強さ）とすることにより、地震動と損傷の関係を明らかにすることが可能である。この関係は、地震発生確率等と合わせることで、ライフサイクルコストの算定等に役立たせることができる。

## 5. まとめ

本研究内容のまとめを示す。

- (1) ひび割れ幅の計測に関し、前報で示した黒画素数の計上の方法のほか、濃度の総和の方法と、黒画素数と濃度の総和の併用による方法を提案した。
- (2) 3つの方法に対し実ひび割れを用いて検証を行った。その結果、各方法の特徴は理論通りであり、黒画素数と濃度の総和の併用による方法が最も良い精度が得られた。
- (3) デジタルカメラを用いたひび割れ計測の適用例

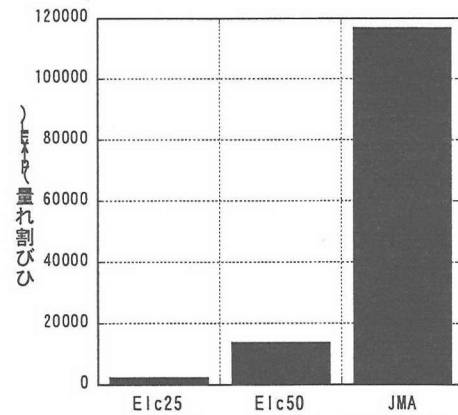


図-12 ひび割れ量-入力地震波関係

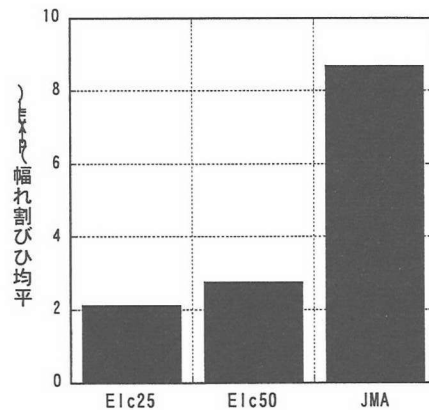


図-13 平均ひび割れ幅-入力地震波関係

として2実験に用い、本計測手法の有用性を示した。

謝辞：豊橋技術科学大学工学教育国際協力研究センター倉本洋助教授のグループには4章の「繊維補強SC構造の水平載荷実験」および「ピロティ構造の仮動的載荷実験」の実験データを提供して頂き、また助言を頂きました。また、豊橋技術科学大学4年生樺野篤基君には多大な協力を頂きました。関係各位に深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 武田篤史, 山田守, 大内一, 橋本周司: 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.
- 2) 武田篤史, 山田守, 大内一: RC構造実験におけるひび割れ計測の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.23 No.3, pp.1177-1182, 2001.
- 3) 足立智弘, 倉本洋, 川崎清彦: 繊維補強コンクリートを用いた鉄骨コンクリート合成構造柱の構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, 2002.(投稿中)
- 4) 春田孝浩, 倉本洋, 松本和行, 楠浩一: 12層鉄筋コンクリート造ピロティ建築物のサブストラクチャー仮動的実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, 2002.(投稿中)