

R C 構造物のデジタル画像を用いた ひび割れ計測 (その4)

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 been developing the crack detecting system for RC structures using a digital camera and image processing technology. This paper shows the result of the re-verification on the experiment conducted in the past, in order to prove the advantage of the developed measuring system.

Furthermore, FEM analysis was carried out in order to compare with measuring results by developed measuring system. It was shown that the developed system was useful not only to analysis of an experiment but also improvements of numerical analysis tools.

Key Words : Crack, Digital Camera, RC Structure, Crack Detecting System, Lateral Loading Test

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われは、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。

近年、パーソナルコンピュータやデジタルカメラの高性能化および低廉化が飛躍的に進んだこと、わが国の高度成長期に建設された土木・建築構造物の劣化が表面化してきたことなどから、デジタル画像をコンピュータ処理することによりひび割れを検出する研究が行われるようになった¹⁾²⁾³⁾。しかし、これらの研究は端緒についたばかりで、実用化するには計測精度や使用性など解決すべき問題が多い。

著者等はデジタルカメラによりコンクリート表面を撮影し、これを画像処理することによりひび割れをデジタルデータ化する研究開発を行ってきた。既報⁴⁾⁵⁾⁶⁾では画像データからひび割れを抽出する方法、ひび割れ幅の高精度な計測方法、コンクリート表面のしみや汚れなどのノイズ除去方法を報告した。また、開発したひび割れ計測システムの精度検証のためにRC柱部材の正負交番繰返し水平載荷実験を

実施しており、得られたひび割れ計測データを用いた分析処理例を示し、構造物の破壊性状と結びつけた考察を行った。しかしながらこの分析処理は、ひび割れ幅の計測を画素単位で計測しているため、工学的な考察を行うには不十分な状態であった。

本論文では、著者等が開発したひび割れ計測システムで得られるデータの有効性を示すことを主目的とし、以下の項目を実施した内容について報告する。

①平成12年度に実施したRC柱正負交番繰返し載加実験のひび割れ計測データについて、開発済みの最新技術を適用して再評価を行う。

②実験の非線形FEM解析を実施し、ひび割れの計測データを用いてFEM解析結果を評価・検討する。

2. デジタル画像を用いたひび割れ計測手法

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、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.)。

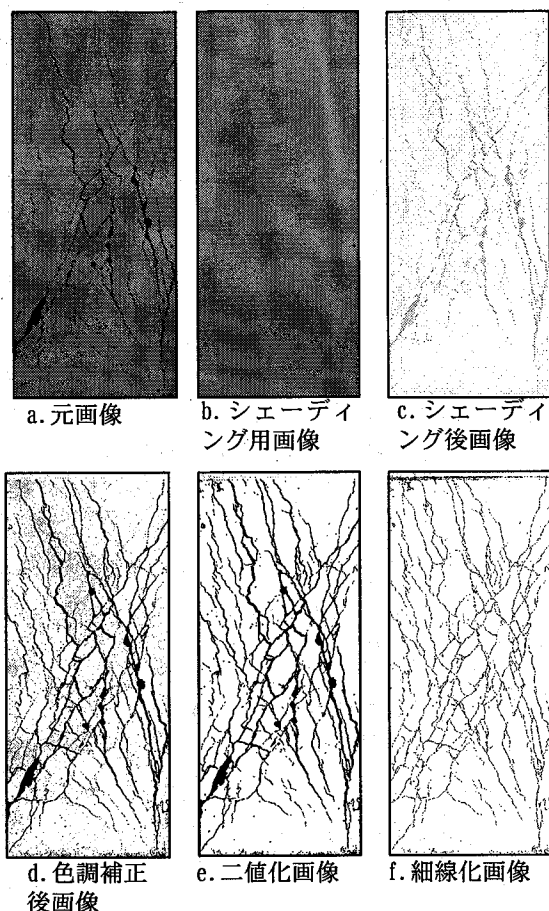


図-1 画像処理の例

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①～④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図-2に示すように、ひび割れの境界から内外にそれぞれ1pixel以上のひび割れ幅計測領域を設定し、

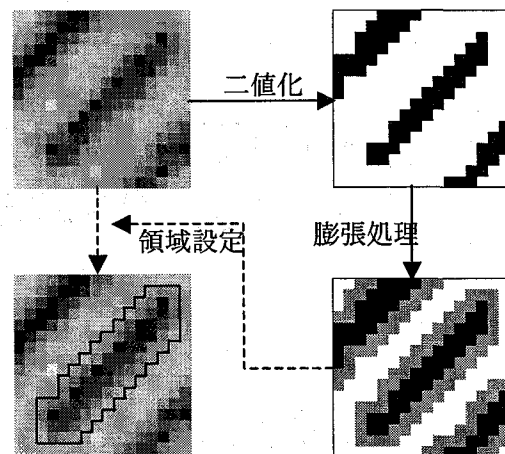


図-2 計測領域の設定

濃度の総和を求める。一方、二値化によって得られ

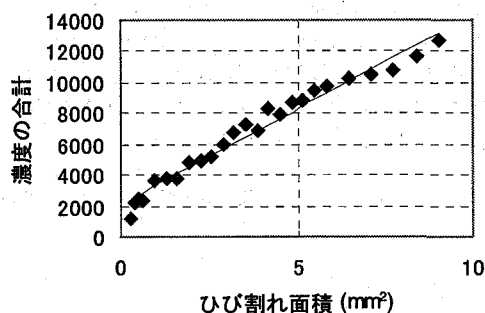


図-3 校正曲線

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樣に与え、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、ひび割れ面積と濃度の合計の図-3に示す校正曲線を描くことができる。この時、カメラと撮影対象の位置関係および画角に変化が無い場合は、クラックスケールは必ずしもひび割れ計測時に毎回撮影する必要は無い。計測時に日照の影響などで照明条件が変化した場合、各画像の輝度を規準化する画像処理を行うことにより精度が向上する。

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

3. 構造実験ひび割れデータの分析

著者等は平成12年度研究開発により、本ひび割れ計測システムの精度検証のためのRC柱部材の正負交番繰返し水平載荷実験を実施した。また、この実験からデジタル値として得られたひび割れ計測データを用いた分析処理例を示した。しかし、これ

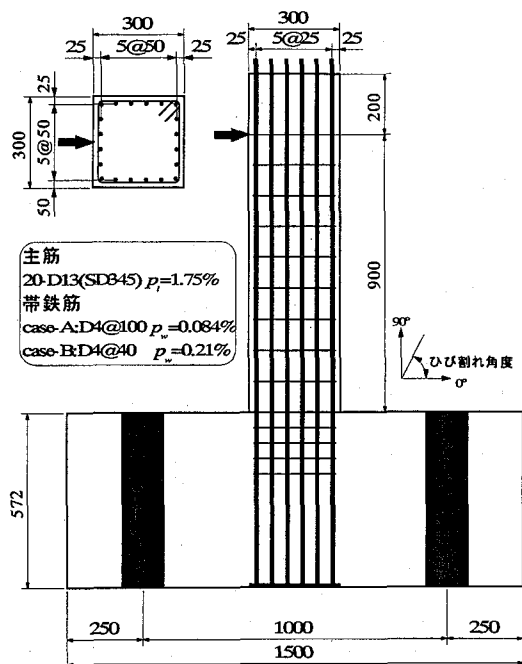


図-4 試験体寸法

らの分析処理は、ひび割れ幅の計測を画素単位で計測しており、十分な工学的考察が行えない状態であった。本論文では、著者等の提案するひび割れ幅計測手法を用いて、平成12年度に実施した実験の再評価を行う。

(1) 構造実験の概要

平成12年度のに実施した構造実験の概要を述べる。試験体は2体で、いずれも実構造物のスケールモデルとはせず、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-4に示す。載荷装置は、軸力を導入せずに、図-4の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回ずつ正負交番繰り返し載荷とした。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。

(2) ひび割れ計測

計測には、キヤノン製デジタルカメラEOS-D6000 (2008×3040=600万画素)を用いた。試験体には、あらかじめ白色の塗料を塗布し、コンクリート表面の色むらやジャンカおよび気泡などの影響を出来るだけ取り除き、ひび割れが抽出しやすくした。カメラは試験体から1.7m程度離れた点に固定し、試験体は照明により1000~2000lux程度の明るさにした。

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。

(3) 試験体の破壊性状

ひび割れ計測データと構造実験の結果とを結び付

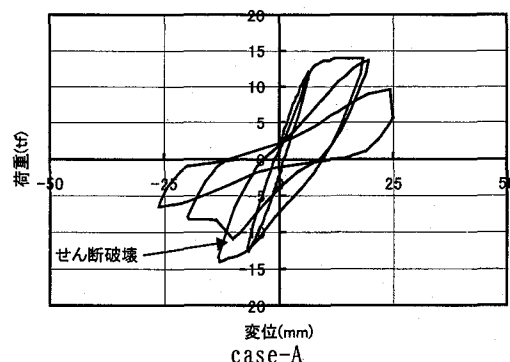


図-5 荷重変位関係

けて考察するため、まず本節において試験体の破壊性状を示すこととする。

case-A (帯鉄筋=少), case-B (帯鉄筋=多)とも曲げ降伏が先行している。case-Aは、 $-3\delta_y$ の載加中に $-1.5\delta_y$ 程度の変位の時に脆性的にせん断破壊し、 $4\delta_y$ (塑性率4) のサイクルでは大きく耐力が減少するとともに変位が増大した。一方、case-Bは $-4\delta_y$ の載加中に $-3\delta_y$ 程度から荷重が下がり始め、ひび割れが多数発生するとともに徐々に耐力が低下していった。

本報告では、明白なせん断破壊を示したcase-Aを対象として以降の考察を進める。case-Aの荷重変位関係を図-5に示す。

(3) ひび割れ抽出結果

せん断破壊直後の撮影した画像から作成した二値化画像を図-6に示す。目視と本計測システムのひび割れ図を比較して、以下の特徴があることが判っている⁴⁾。

- ①目視によるスケッチは、各サイクルの正負のピーク毎に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ている。開いているひび割れだけをスケッチとすることは通常では非常に困難な作業となる。
- ②本計測システムでは、その時点で開いているものだけ抽出し、ひび割れが閉じて幅小さいものは抽出されない。
- ③目視によるスケッチは、載加が進みひび割れが複

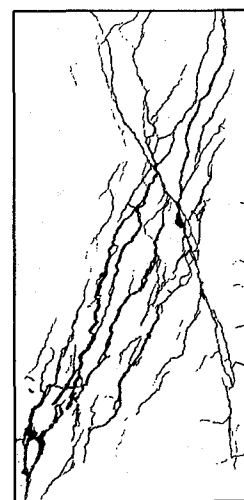


図-6 せん断破壊直後の2値化画像(case-A)

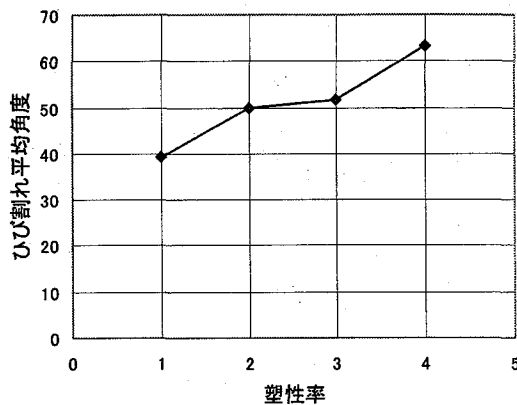


図-7 ひび割れ平均角度と塑性率

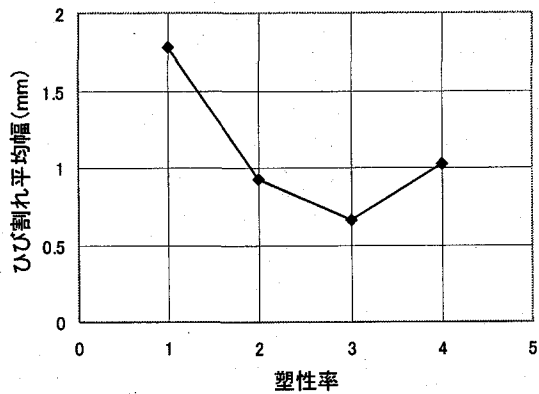


図-8 ひび割れ平均幅と塑性率

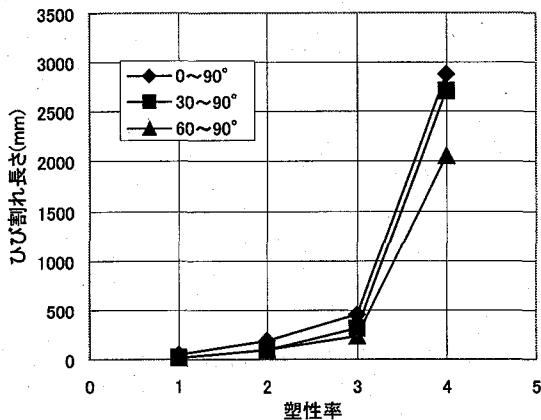


図-9 ひび割れ長さとの塑性率

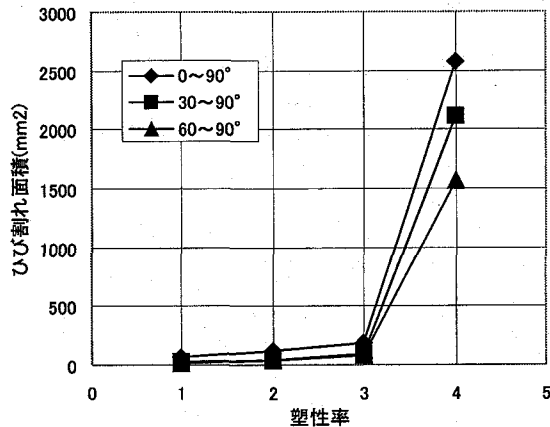


図-10 ひび割れ面積との塑性率

雑になってくると、正確さが劣ってくる傾向にある。

(5) ひび割れ計測結果の利用

ひび割れ画像データを2章で述べた方法で数値データとし、従来の計測方法では困難であった分析を行う。図-7~10にひび割れと塑性率の関係を示す。図-7はひび割れの平均角度、図-8は平均幅、図-9はひび割れの総延長、図-10はひび割れの総面積とそれぞれ塑性率との関係を示したものである。これらは正方向載加の+1 δy 、+2 δy 、+3 δy 、+4 δy のピーク時に撮影した画像データを処理したものである。図-9、10ではひび割れを0°~90°、30°~90°、60°~90°に分けてプロットしている。ここで、0°が水平のひび割れ、90°が垂直なひび割れである。マイナス方向のひび割れは負方向の載加時に発生したひび割れと考え、データから差し引いてプロットしてある。

図-7を見ると、塑性率が大きくなるに従い、ひび割れ角度が大きくなり塑性率4ではひび割れの平均角度は60°を超えている。これは、塑性率1のあたりでは曲げひび割れが卓越しているに対し、塑性率が大きくなるに従いせん断ひび割れの成分が卓越しているためである。

図-8を見ると、塑性率1で平均ひび割れ幅は最も

大きく、その後、塑性率が大きくなるに従い平均ひび割れ幅は減少し、破壊に近づくとき再度平均ひび割れ幅は大きくなっている。塑性率1では、ひび割れの発生量は少ないが比較的幅の広い曲げひび割れがヒンジ領域に発生している状態と考えられる。次に、比較的幅の小さい曲げひび割れが分散して発生し始め、またせん断ひび割れも多数発生し始める。すなわち、幅の小さいひび割れが多数発生している状況で、平均ひび割れ幅は小さい値となったと考えられる。さらに塑性率が大きくなると、破壊を引き起こすせん断ひび割れが大きく開き始めることにより、試験体の平均ひび割れ幅は再度大きくなったと考えられる。

図-9と10を見ると、塑性率が3から4になったことにより、ひび割れ総延長、ひび割れ総面積とも急激に増加している。また、0°~90°、30°~90°、60°~90°のプロットを比較すると、60°~90°の成分が急激に増加している。本試験体のようなせん断破壊型の構造部材の場合、60°~90°ひび割れ長さ、あるいはひび割れ面積を損傷指標とすることが有効であると考えられる。一般的なひび割れ計測では、ひび割れの面積を算定することは困難であるため、60°~90°のひび割れ長さを損傷指標として用いることが実用的と考えられる。

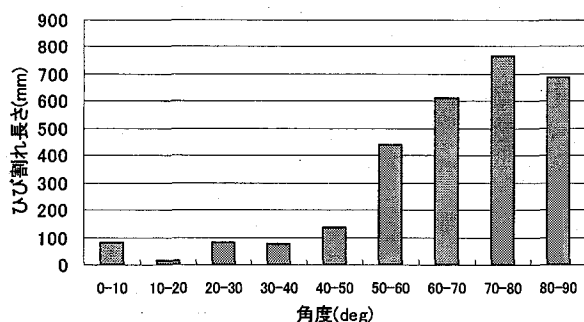


図-11 角度毎のひび割れ長さ

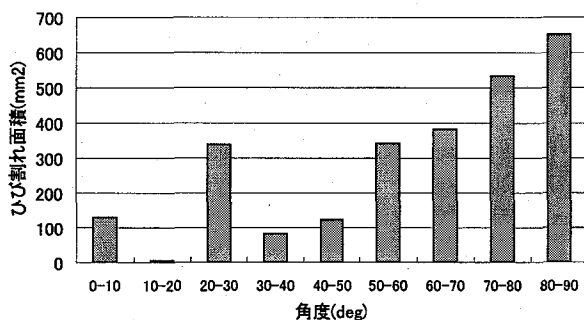


図-12 角度毎のひび割れ面積

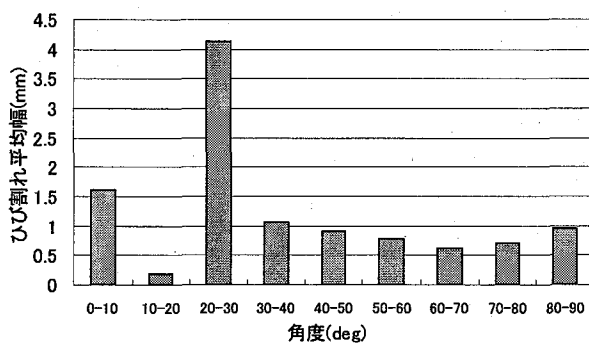


図-13 角度毎のひび割れ平均幅

図-11～13に、破壊後 (+4 δy) の画像データからひび割れ角度毎に、ひび割れ長さ、ひび割れ面積、平均ひび割れ幅を集計した結果を示す。図-13を見ると、20～30° のひび割れが幅約4mmと最も大きい。しかし、図-11を見れば20～30° のひび割れは総延長が100mm程度であり、局所的なひび割れであることが判る。図12, 13では50° 以上のひび割れ長さ、および面積が0～50° までのひび割れに比べて明らかに多いことが判る。すなわち本試験体では、50～90° の角度を持った幅0.5～1.0mm程度のひび割れが破壊と結びつく重要なひび割れ、と考えることが出来る。これは図-9, 10の考察とも一致している。

4. 非線形FEM解析との比較

本計測システムで得られるデジタルデータは、ひFEM解析の結果などと直接かつ定量的に比較するこ

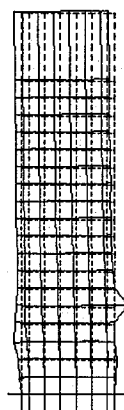


図-14 変形図

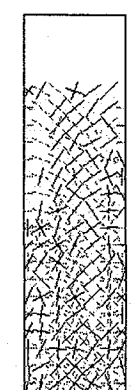


図-15 ひび割れ図

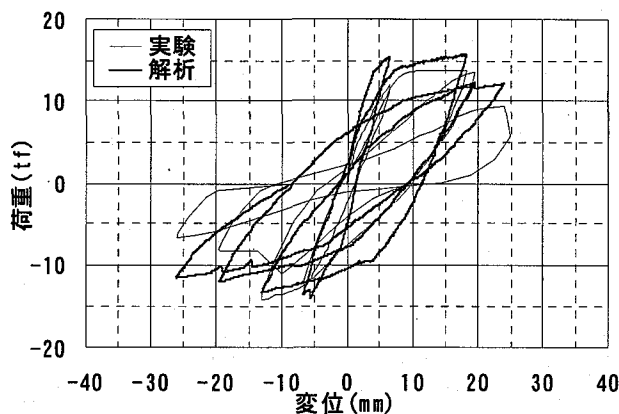


図-16 荷重-変位関係

とが出来ると利点がある。本章では、両者を結びつけて考察する例を挙げることを主目的として、3章で述べた構造実験の非線形FEM解析を実施した。

(1) 非線形FEM解析の概要

実験の荷重条件を忠実にシミュレーションするため、正負交番繰り返し載加として解析した。ひび割れは分散ひび割れ (Smeared Crack) モデルとし、1つのコンクリート要素につき8方向のひび割れまで再現できるMulti Crackモデルである。

解析概要として、図-14に変形図、図-15にひび割れ図を示す。また、解析で得られた荷重-変位関係を実験値と比較したものを図-16に示す。これらより、ここで示した非線形FEMで3章に示した実験を概ね再現できていると考えられる。本論文では、開発したひび割れ計測システムで得られたデータの有効な利用方法を示すことを目的としているので、FEM解析の精度等に関する詳細な考察は省略することとする。

(2) 非線形FEM解析とひび割れ計測データの比較

図-17に塑性率と平均ひび割れ角度の関係を示す。0～90° のひび割れは負方向の載加で発生したと考え、データから除いている。図-18にひび割れ量と塑性率の関係を示す。ひび割れ量として、発生し

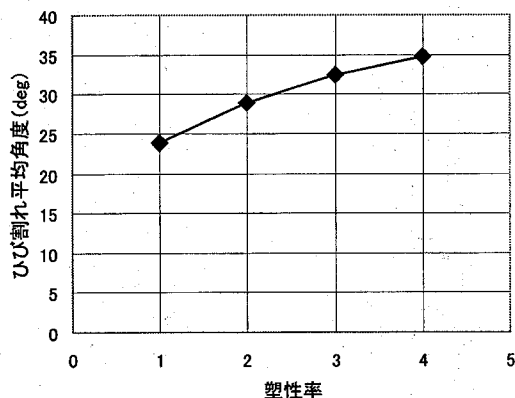


図-17 ひび割れ平均角度と塑性率

たひび割れの本数とし縦軸に示した。

図-17は、実験のひび割れ計測結果から得られた図-8と比較することができる。また、図-18は図-9~11と比較することが出来る。図-17は図-8と比べて平均角度が小さく、破壊に至った塑性率4の時点でも35度にとどまっている。図-18では、図-9, 10に見られた縦方向(60~90°)のひび割れの増加のような破壊に結びつく明らかな兆候は読み取れない。実験では主要なひび割れが発生した後、応力の再配分と微細なひび割れの発生を繰り返し、最終的には破壊に至る。一方、FEM解析では曲げやせん断に起因する水平ひび割れや斜めひび割れのような主要なひび割れは再現できているが、2次, 3次的に多数発生する縦ひび割れは再現できていないと考えられる。

以上述べたように、非線形FEM解析で得られた荷重-変位関係やひび割れ図などを実験結果と比較するだけよりも、本計測システムで得られるひび割れデータを用いることにより解析結果の妥当性について詳細な検討が可能となる。

5. まとめ

本報告では、著者等が開発したひび割れ計測システムで得られるデータの有効性を示すため、平成12年度に実施したRC柱正負交番繰り返し載加実験のひび割れ計測データについて、開発済みの最新技術を適用して再評価を実施した。また、実験の非線形FEM解析を実施し、ひび割れの計測データとFEM解析結果を比較検討した。以下に成果を要約する。

(1)デジタルカメラによるひび割れ計測データを画像処理することにより、試験体の全荷重段階に亘る連続的・面的なひび割れ特性情報(方向性, 幅, 開閉)が得られた。これらと試験体の挙動から、本試験体の場合は60~90°のひび割れ長さを指標にすることにより損傷度が把握できることを示した。

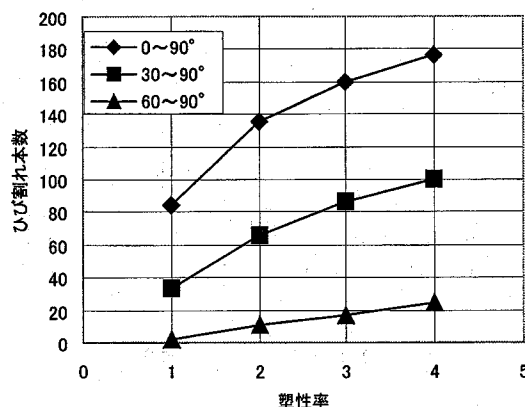


図-18 ひび割れ本数と塑性率

(2)非線形FEM解析は荷重-変位関係やひび割れ図を見る限り実験を良好に再現していたが、2次, 3次的に発生する縦ひび割れを再現できていない。画像ひび割れデータを用いれば非線形FEM解析の妥当性について詳細な検討が可能となる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、早稲田大学理工学部伊藤厚史氏、大林組田中秀樹氏、大林組佐藤立氏に多大な協力を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1)西川貴文他：画像解析によるクラック検出の自動処理への一試行，土木学会第57回年次学術講演会，V-194，2002.9
- 2)西川貴文他：画像解析によるクラック検出・計測の自動処理化，土木学会第58回年次学術講演会，V-417，2003.9
- 3)溝口信夫他：デジタル画像によるコンクリートひび割れ検出方の研究，日本建築学会2002年度大会梗概集，A-2，PP.491~492，2002.
- 4)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
- 5)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
- 6)山田 守，武田篤史，大内 一，橋本周司：RC構造物のデジタル画像を用いたひびわれ計測(その3)，第4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.19~24，2003.02