

画像計測及び非線形FEMによるRC構造物のひび割れ性状評価

穴 吹 拓 也 佐々木 智 大
米 澤 健 次

Cracking State of RC Structure Evaluated by Image Measurement and Non-linear FEM

Takuya Anabuki Tomohiro Sasaki
Kenji Yonezawa

Abstract

The maximum crack width is frequently used as a damage indicator for reinforced concrete (RC) structures during and after an earthquake. The authors propose to use the crack area derived from the image measurement or non-linear finite element analysis for the evaluation of the damage to RC structures. Therefore, the cyclic loading experiments of RC walls were conducted, and the crack width of the wall was measured using a crack scale and image measurement. The experimental results showed that the image measurement was effective to capture the cracking state of a wall, and there was a correlation between the crack width/area and drift angle. In comparison, the analytical results exhibited that the wall crack area could be evaluated by the wall area increment.

概 要

地震時または地震後のRC構造物の損傷を評価する手法として、従来から最大ひび割れ幅に着目した評価が行われてきたが、本論文では、更なる評価指標としてひび割れ面積を用いることを提案した。これらのひび割れ性状を定量的に評価する手法が求められる。本論文では、画像計測や非線形FEM解析によるひび割れ性状の評価精度を検証するため、RC造耐震壁の静的繰返し加力実験を行い、ひび割れに関するデータを取得した。クラックスケールを用いたひび割れ観察や画像計測を行い、画像計測によるひび割れ幅の計測精度について検証するとともに、壁の変形とひび割れ幅・面積の相関性について考察した。また、分散ひび割れモデルを適用したFEM解析結果から、壁の面積の増分を算定することで、壁のひび割れ面積を評価できることを示した。

1. はじめに

原子力施設のRC造建屋においては、地震後の耐漏洩機能、負圧維持機能等の評価が求められており、これら機能の評価指標としては、残留ひび割れ幅等が定められている¹⁾。しかしながら、気密・水密性の評価として漏洩量を推定するためには特定のひび割れの最大値だけではなく、ひび割れの総量を評価する必要があると考えられる。そこで、評価指標として、従来の最大ひび割れ幅の他に、構造物全体でひび割れの幅と長さを集計して求めるひび割れ面積に着目した。

地震後のRC構造物のひび割れ幅やひび割れ面積等を人手により調査することは多大な労力と時間を必要とする。従って、ひび割れ性状を即座に可視化し、定量的に評価できる手法を確立することは、原子力施設の安全性確保のために非常に有用である。

そこで、本論文では、RC造耐震壁試験体を用いた静的繰返し加力実験を行い、ひび割れに関するデータを取得すると共に、3次元画像変位計測と非線形FEMの2つの手法の適用性を検討した。

ステレオカメラを用いた3次元画像変位計測(以下、画像計測と称する)は、物体表面の変位やひずみの分布を求める手法である。本研究では、ひずみの分布に基づきひ

び割れ幅等の測定を行い、RC構造物のひび割れ性状を視覚的かつ定量的に評価することを試みた。

非線形FEM解析は、建物の安全性を評価するツールとして用いられる手法である。構造物の形状を詳細にモデル化し、加力による応力やひずみの集中位置を視覚的に捉えることが容易であり、ひび割れ性状を評価することにも有効と考えられる。一方で、RC構造物のFEM解析で広く用いられる分散ひび割れモデルは、要素ごとの平均的なひずみに基づいているため、ひび割れの幅や長さを直接評価することができない。この問題に対して、FEM解析による構造物の変形状態からひび割れ状況を推定する手法を考案した。

本論文では、実験から得られた耐震壁のひび割れ性状より、特にひび割れ幅とひび割れ面積に注目し、壁の変形との相関性について述べ、更に、画像計測及び非線形FEM解析によるこれらの評価精度について述べる。

2. RC造耐震壁のひび割れ評価

2.1 RC造耐震壁試験体

Table 1に試験体諸元を、Fig. 1に試験体形状を示す。試験体は上下にスタブを有する両側柱付きRC造耐震壁2体とし、縮尺は実大の1/3程度とした。試験変数は壁筋比で

あり、配筋ピッチを変えて、試験体No.1は1.0%、No.2は0.5%とした。壁と両側柱の芯は一致させ、壁横筋は柱内に直線定着(定着長さ30d)させた。壁縦筋は基礎スタブ底面において鉄板に溶接して固定し、加力スタブには直線定着(定着長さ50d)させた。Table 2にコンクリートの調合を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、試験体縮尺に合わせて粗骨材の最大寸法は9mmとした。Table 3にコンクリートの材料試験結果を、Table 4に鉄筋の引張試験結果を示す。

2.2 加力方法

Photo 1に加力装置を示す。両側柱の上部にはそれぞれ146kNの柱軸力を加えた。柱軸力はNo.1のコンクリート圧縮強度に対して軸力比を0.1として算定し、No.2にも同じ柱軸力を与えた。柱軸力を一定に保持した状態で、加力スタブの高さ中央位置に正負交番漸増の水平力を載荷した。加力中は壁脚部に対する水平力載荷位置の水平方向相対変位より変形角を算定し、0.1%、0.15%、0.2%、0.25%で正負繰返し載荷(0.2%は2回、その他は1回)を行った後、正方向に単調載荷を行った。

2.3 ひび割れ幅の計測

ひび割れを目視観察しやすくするため、壁及び柱の表面を白ペンキで塗装した。更に、Fig. 2に示すように、100mm間隔のメッシュを描画し、ひび割れがメッシュと交差した位置でひび割れ幅を計測した。ひび割れ幅はPhoto 2に示すクラックスケールを用いて計測した。目視観察面では画像計測を行うことはできなかったため、目視観察した壁の裏側の面で画像計測を実施した。本実験においては、壁面の表と裏でひび割れの間隔や分布領域に大きな違いはなかった。画像計測の詳細は3章で述べる。ひび割れ幅の計測は、初ひび割れ発生時、繰返し載荷における各変形ピーク時、各ピークからの除荷時、変形角+0.3%到達時において実施した。

加力前に壁面を観察したところ、No.1には下から3番目の水平メッシュ近傍に、No.2には下から4番目の水平メッシュと左から5番目の鉛直メッシュの近傍に、それぞれ乾燥収縮によるひび割れが生じていた。このひび割れは水平加力により生じたものではないため、ひび割れ幅は計測しなかった。

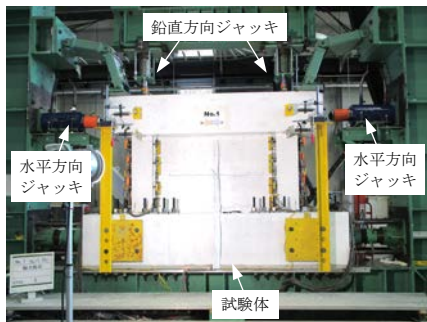


Photo 1 加力装置
Loading Equipment

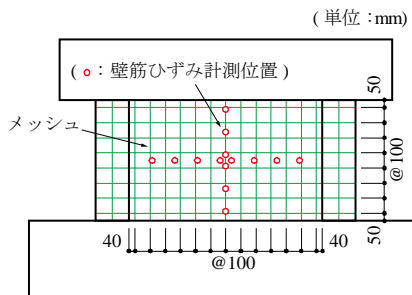


Fig. 2 試験体メッシュ
Drawing Mesh on Specimen

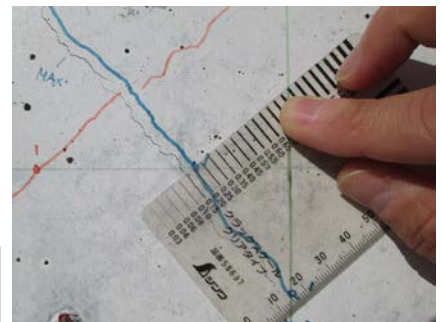


Photo 2 クラックスケール
Crack Scale

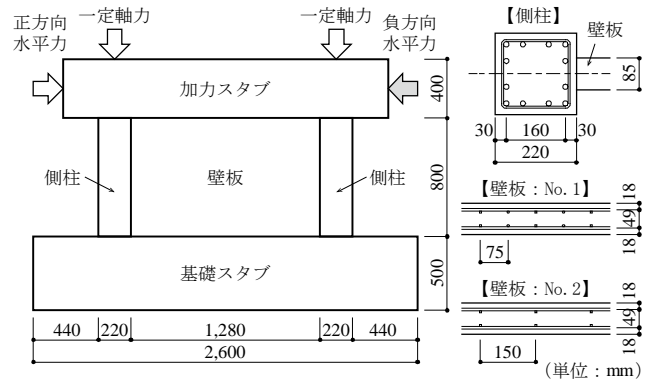


Fig. 1 試験体形状
Configuration of Specimens

Table 1 試験体諸元
Specification of Specimens

試験体		No.1	No.2
壁板	壁厚	85mm	
	壁筋 (縦横共通)	2-D6@75 ($p_s = 0.99\%$)	2-D6@150 ($p_s = 0.50\%$)
側柱	寸法	220mm×220mm	
	主筋	12-D13 ($p_g = 3.14\%$)	
	帯筋	2-D6@50 ($p_w = 0.58\%$)	

Table 2 コンクリートの調合
Mix Proportion of Concrete

セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
296	183	814	948	2.96

(単位: kg/m³, 水セメント比: 62%, 混和材: AE減水剤)

Table 3 コンクリートの材料試験結果
Material Properties of Concrete

試験体	材令 (日)	ヤング係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
No.1	42	2.12×10^4	30.1	2.95
No.2	56	2.13×10^4	31.6	2.79

Table 4 鉄筋の引張試験結果
Material Properties of Reinforcing Bar

径	鋼種	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
D6	SD345	1.89×10^5	373	550	23.1
D13	SD390	1.95×10^5	426	619	19.0

2.4 実験結果

2.4.1 荷重－変形関係 Fig. 3に水平荷重－変形角関係を示す。初ひび割れ発生点は壁の斜めひび割れを最初に目視確認した時点を表す。また、壁筋の降伏点は、耐震壁の中央に設置した壁縦横筋に150mm間隔で貼付したひずみゲージ(Fig. 2参照)のいずれかが最初に降伏ひずみに達した時点を表す。

両試験体とも、初ひび割れは変形角±0.02%近傍で発生した。その後、変形の増大に伴い壁のひび割れが増大し、剛性が低下した。No.1は変形角0.25%の繰返しを終えるまで壁筋が降伏せず、最終の単調荷重において、変形角+0.5%近傍で壁の横筋と縦筋が共に降伏した。変形角が+0.6%を超えたところで水平荷重が1,200kNに達し、試験装置の荷重能力を超えたため、加力を終了した。No.2は変形角-0.18%近傍で壁縦筋が降伏した。また、最終単調荷重において、変形角+0.5%を超えたところで壁横筋が降伏し、変形角+0.6%近傍で最大荷重に至った。

2.4.2 ひび割れ状況 Fig. 4に変形角+0.3%における壁と柱のひび割れ状況を示す。黒線は正方向加力時、赤線は負方向加力時のひび割れを表す。壁の左右端部でひび割れ線が途切れているのは、柱に設置した変位計の陰に隠れてしまい観察できなかったためである。

両試験体とも、初ひび割れは壁左右端の上から3～4番目のメッシュ近傍から斜め下方向に延びるひび割れであった。壁筋量が多く配筋ピッチが小さいNo.1は、No.2に比べて、ひび割れの間隔が小さく、多数のひび割れが発生した。これは、鉄筋コンクリートに関して一般的に認識される傾向と一致する結果であった。

2.4.3 最大ひび割れ幅 Fig. 5に最大ひび割れ幅－変形角関係を示す。左のグラフは各変形サイクルのピーク時、右のグラフは除荷時に計測した残留ひび割れ幅を表し、凡例は左右のグラフで共通である。ピーク時の最大ひび割れ幅は、壁板のせん断変形角の増大に対して概ね線形に増大した。また、発生初期のひび割れ幅は両試験体で概ね同等であったが、各変形ピーク時の最大ひび割れ幅は、壁筋の配筋ピッチが大きく、配筋量が少ない試験体No.2の方が大きかった。Fig. 6に一例として変形角+0.2%の1回目ピークにおけるひび割れの分類を示す。

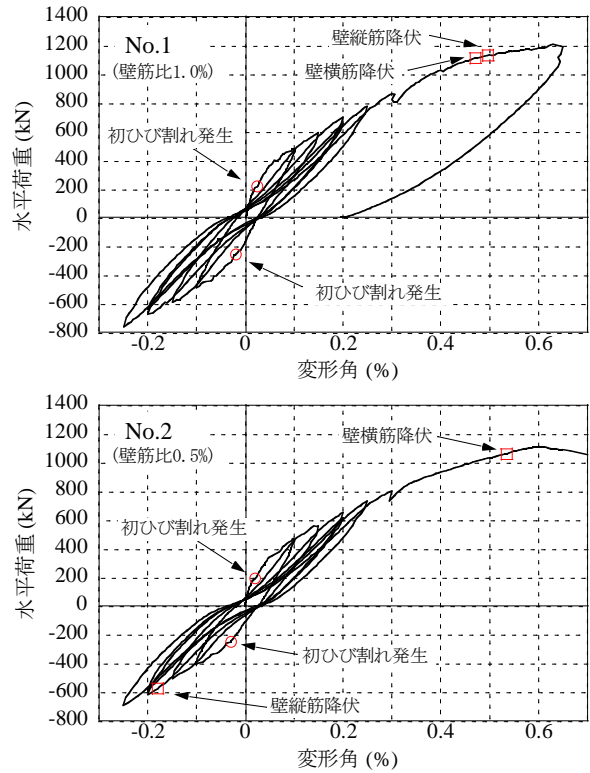


Fig. 3 水平荷重－変形角関係

Horizontal Load - Drift Angle Relationships

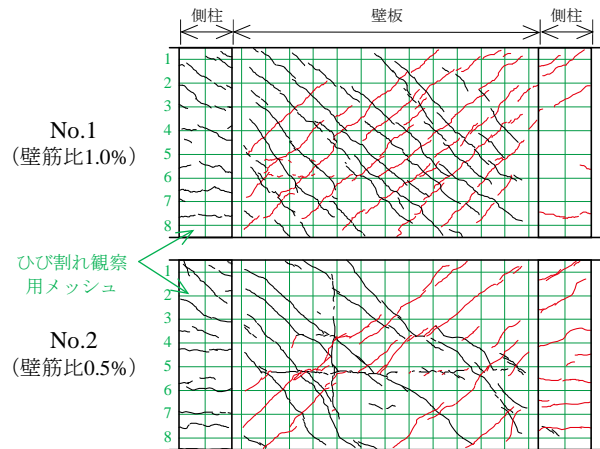


Fig. 4 変形角+0.3%におけるひび割れ状況

Crack Sketches at Drift Angle +0.3%

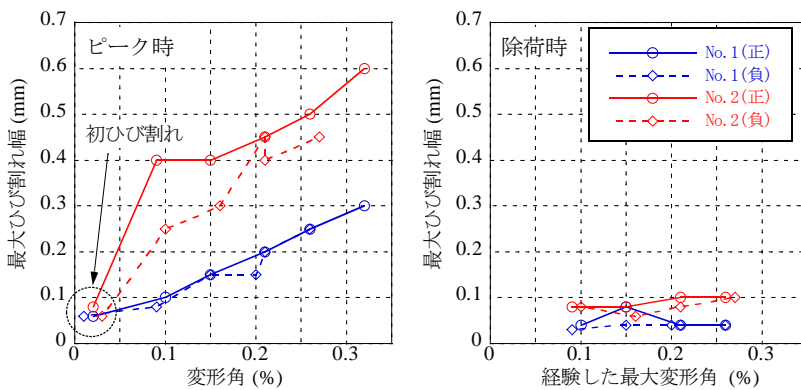


Fig. 5 最大ひび割れ幅－変形角関係

Maximum Crack Width - Drift Angle Relationships

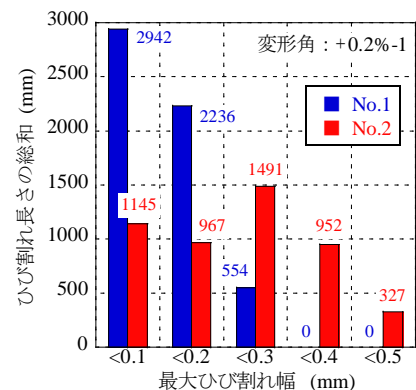


Fig. 6 ひび割れの分類

Crack Grouping

横軸は1本のひび割れの中で最大のひび割れ幅の大きさで分類し、縦軸は分類された各ひび割れの長さを合計した値であり、変位計に隠れて観察できなかった部分は含めていない。ひび割れ長さの総合計は、No.1が5,732mm、No.2が4,882mmであった。No.1は幅が0.2mm未満のひび割れが90%程度を占めていた。一方、No.2はNo.1に比べてひび割れの本数は少ないが、ひび割れ幅は大きかった。この傾向により、No.1よりもNo.2の方がひび割れ位置で鉄筋ひずみが集中し、早期に降伏したと考えられる。

除荷時の最大ひび割れ幅はいずれも0.1mm以下であり、経験した最大変形角の大きさとの相関性は殆ど見られなかった。これは、Fig. 3に示すように、本試験体においては、変形角±0.25%までの繰返し載荷による残留変形が概ね0.03%~0.04%と一定であったためと考えられる。

2.4.4 ひび割れ面積 Fig. 7にひび割れ面積算定 の概念を示す。最初に、壁板に生じた1本のひび割れの面積 (A_{cr})を次式により求めた。

$$A_{cr} = \sum \left(L_{i \rightarrow i+1} \times \frac{w_i + w_{i+1}}{2} \right) \quad (i=S, 1, 2, \dots, E-1) \quad (1)$$

ここで、 $L_{i \rightarrow i+1}$ は*i*点から*i+1*点の間のひび割れ長さ(mm)であり、2点間の直線距離ではなく、ひび割れをトレースした多点折れ線の軌跡の長さとした。 w_i は*i*点で計測したひび割れ幅(mm)、 w_S 、 w_E は始点、終点のひび割れ幅(mm)であり、最も近い計測点のひび割れ幅(Fig. 7の例では、 $w_S = w_1$ 、 $w_E = w_4$)とした。これは、3章に後述するよう

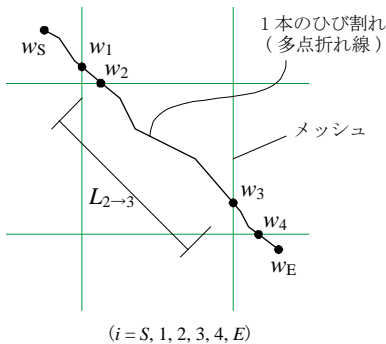


Fig. 7 ひび割れ面積の算定
Calculation of Crack Area

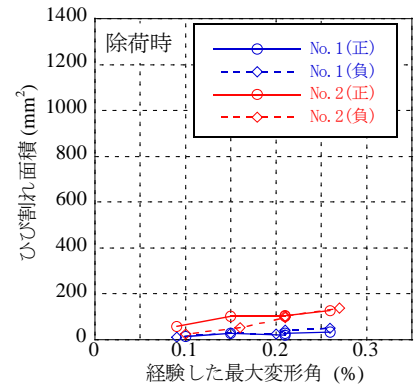
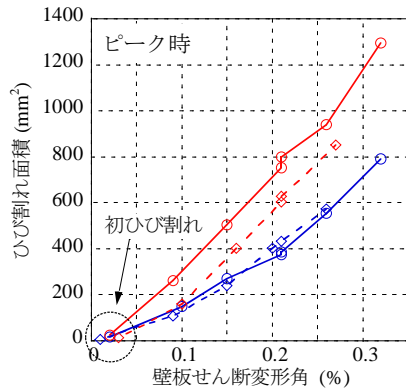


Fig. 8 ひび割れ面積-変形角関係
Crack Area - Drift Angle Relationships

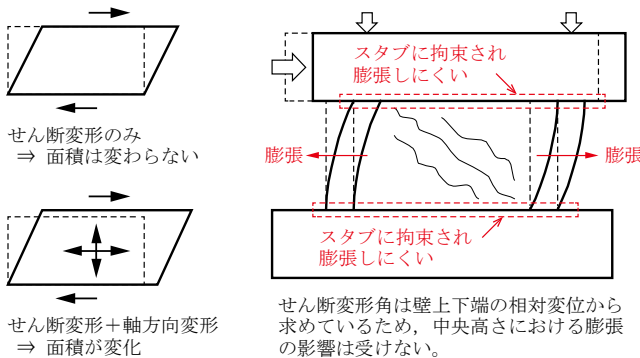


Fig. 9 面積の増大要因
Factor of Wall Area Increment

に、画像計測結果(Fig. 14)においてひび割れ端部のひび割れ幅が中央と同程度の大きさであったことによる。側柱を除いた壁板部分の全ひび割れについて A_{cr} を算定して合計したものを、以下ひび割れ面積と称する。なお、計測したひび割れ幅が、本実験で使ったクラックスケールの最小目盛り0.03mmよりも小さかった場合は、 $w_i = 0$ mmとした。

Fig. 8にひび割れ面積-変形角関係を示す。ピーク時のひび割れ面積は変形角の増大に対して概ね線形に増大し、No.1よりもNo.2の方が面積が大きい傾向があった。一方、除荷時のひび割れ面積は、最大ひび割れ幅と同様に、経験した最大変形角の大きさとの相関性が殆ど見られなかった。

ここで、同一変形時においてNo.1に比べてNo.2のひび割れ面積が大きかった理由について考察した。耐震壁のひび割れが増加すると、壁板の面積がその分増大すると考えられることから、耐震壁の面積の増大要因について考えることとした。Fig. 9に示すように、板にせん断変形のみが生じている場合は板の面積に変化はないが、軸方向変形が加わると面積は変化する。壁の上下端はスタブにより拘束されることから、No.1とNo.2で壁の鉛直方向の伸び、または、壁の中央高さにおける横方向の膨張に差があったものと推定できる。

Fig. 10に各試験体の壁内法高さにおける鉛直方向変位の比較を示す。No.1とNo.2の鉛直方向変位は、負加力側では0.1mm程度の差であったが、正加力側では変形角

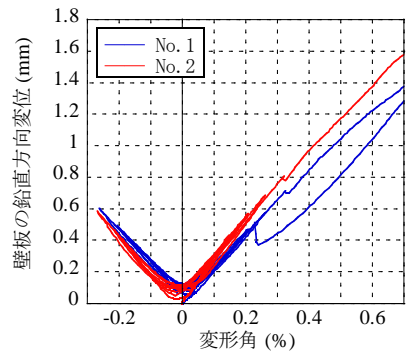


Fig. 10 壁板の鉛直方向変位
Vertical Displacement of Walls

が大きくなる程, No.2の伸びの方が大きくなった。一方, もう一つの要因である横方向の膨張については本実験の計測データからは評価できなかった。以上のように, ひび割れ面積に差を生じた理由について定量的に根拠を示すことはできなかったが, 鉛直方向の変形も横方向の膨張も, 壁筋量が多いNo.1の方がより強く拘束されるため, No.1の方がひび割れ面積が小さくなったと考えられる。

3. 画像計測によるひび割れ評価

3.1 評価手法

本実験では, ステレオカメラを用いて対象となる壁面を撮影し, 得られた2枚の画像に対してデジタル画像相関法に基づいて物体表面の3次元変位及びひずみを評価した²⁾。Fig. 11に画像計測の概念を示す。

デジタル画像相関法は, 変形前と変形後の2枚の画像を比較し, 変形前の任意の点を中心とした20ピクセル程度の小領域が, 変形後にどの位置にあるかを探し出し, 任意の点の移動量を求める手法である。小領域の輝度情報を表す関数を定義し, 変形前後の関数の近似性を表す相関係数を求め, これが最大となる点を探すことから画像相関法と呼ばれる。任意の点について変形後の位置を適切に求めるためには, 任意の点を中心とした小領域の輝度情報が, 対象物表面の他の点として見つからないようにする必要がある。そこで, 実験に先立ち, 画像計測を行う壁面にランダムな模様を塗布した。

画像全体の変位を求めた後, ある任意の点(測定点)とその周囲の変位情報から, 測定点と周囲の点を含む領域の平均的なひずみを求める。このときの平均化する長さに関するパラメータとして特性長さがあり, ひずみゲージのゲージ長に相当するパラメータである。更に, 特性長さ l と, ひび割れに直交する方向のひずみ ε を用いて, ひび割れ幅 w_{cr} を次式で評価する。

$$w_{cr} = \varepsilon \times l \quad (2)$$

ここで, ひび割れに直交する方向のひずみは, コンクリートの変形を含まず, 全てひび割れの目開きによって生じたものと仮定した。また, ひび割れに沿う方向のずれ変位は無視して, ひび割れに直交する方向のひずみと引張主ひずみが一致すると仮定した。本実験では, 特性長さが6mm程度となるようにひずみ算定領域を決めた。

本論文では, 試験体No.2の計測結果について述べる。

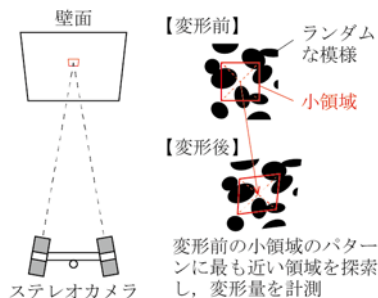


Fig. 11 画像計測
Image Measurement

3.2 計測結果

3.2.1 主ひずみ分布 Fig. 12に引張主ひずみ分布を示す。Fig. 4と正載荷時のひび割れ方向が異なるのは, 壁の裏面において画像計測を実施したことによる。変形角+0.02%でひび割れが発生し, ひび割れ上の主ひずみが急激に増加した。変形角+0.2%になると, さらに損傷が進展し, ひび割れ本数や幅が増加した。いずれのひび割れ上の主ひずみも数%を超える非常に大きな値になった。今回の実験で設定した特性長さ6mmの場合, 0.1mmのひび割れ幅が, 16,000 μ ものひずみになって表れる。そのため, ひび割れ線上のひずみは非常に大きい。

3.2.2 ひび割れ幅分布 Fig. 13に画像計測による主ひずみから求めたひび割れ幅の分布と目視観察によるひび割れスケッチの比較を示す。スケッチは正側加力時の線を左右反転し, 画像計測の図と並べて比較できるようにした。画像計測において, 赤色から緑色の範囲で示される部分は, 目視観察によるひび割れ位置とよく一致した。Fig. 14に変形角0.02%のときに生じた1本のひび割れ(Fig. 13に破線で囲んだひび割れ)について, 画像計測及び目視観察によるひび割れ幅の分布を示す。横軸はひび割れの右上端部を0とし, この点からのひび割れ線の長さをとった。折れ線は画像計測によるひび割れ幅, ●及び▲のプロットは目視観察したひび割れ幅を表す。変形角0.02%において, 画像計測によるひび割れ幅は, 概ね0.05~0.1mm程度の範囲にあり, 目視観察と同程度の大きさであった。ひび割れ幅の分布をみると, ややひび割れの中央部が大きいものの, 端部との差は小さい。変形角0.2%になると, 最大ひび割れ幅は0.5mmを超え, 端部から約200mm, 約400mm, 約500mmの位置にピークが確認でき, 目視観察したひび割れ幅の分布傾向を良好に表した。これらのことから, 画像計測はRC構造物のひび割れの分布やひび割れ幅の大きさを視覚的かつ定量的に評価可能な手法であると言える。

Fig. 15に画像計測による最大ひび割れ幅—変形角関係を示す。画像計測による最大ひび割れ幅は目視観察による値よりも大きい傾向があった。これは画像計測の方が目視観察よりも高密度にデータを取得していることや, ひび割れ幅算定の基となる主ひずみにひび割れに沿う方向のずれが含まれることが影響したためと考えられる。ピーク時の最大ひび割れ幅は変形角の増加に伴い概ね線形で増加した。除荷時の最大ひび割れ幅は, 変形角0.1%

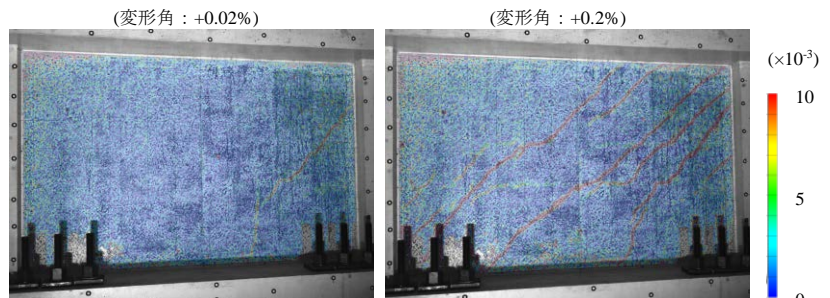


Fig. 12 画像計測による引張主ひずみ分布(試験体No.2)
Measured Tensile Principal Strain (Specimen No.2)

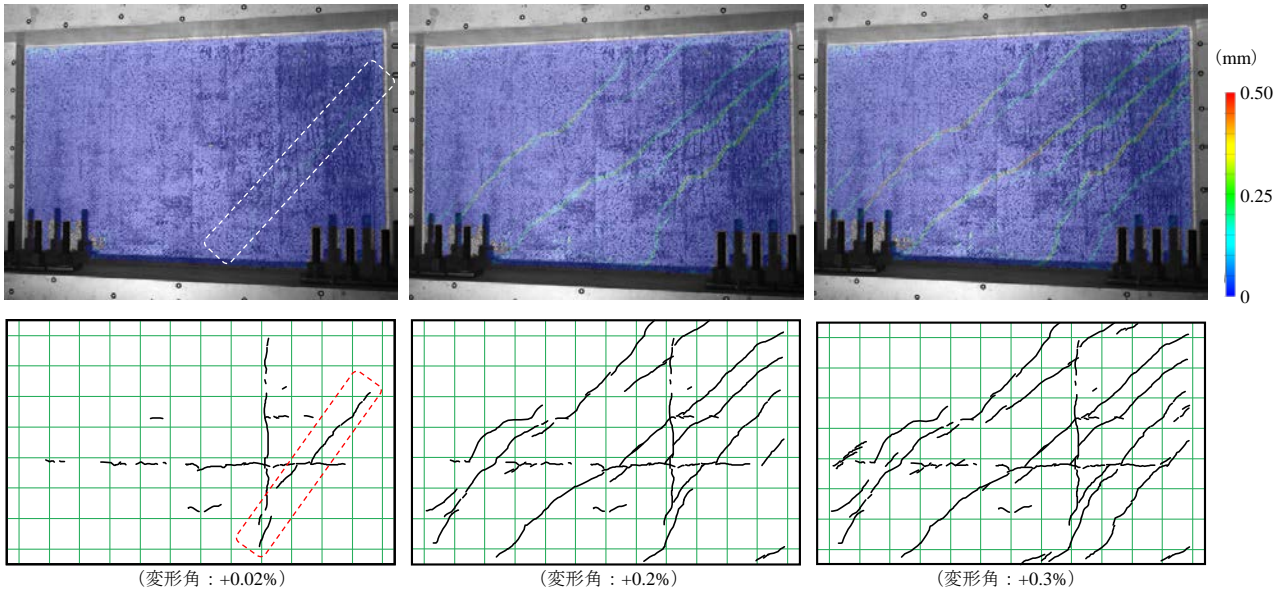


Fig. 13 画像計測によるひび割れ幅分布と目視観察によるスケッチの比較(試験体No.2)
Comparisons of Measured Crack Distribution and Crack Sketch (Specimen No.2)

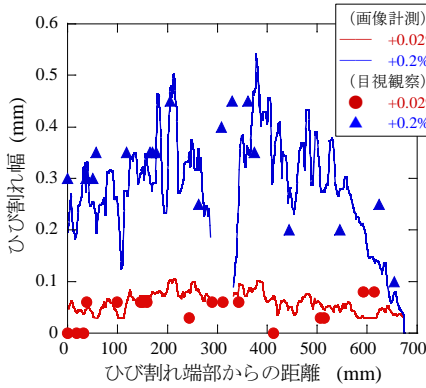


Fig. 14 ひび割れ幅分布
Measured Crack Width Distributions

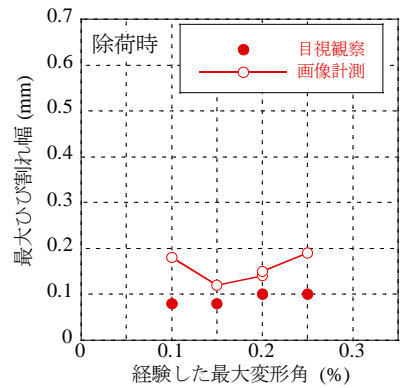
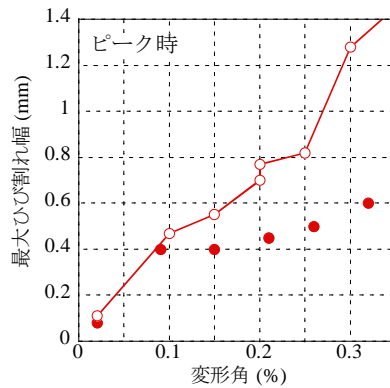


Fig. 15 画像計測による最大ひび割れ幅-変形角関係
Measured Maximum Crack Width - Drift Angle Relationships

で大きな値を示したことを除けば概ね線形で増加した。

3.2.3 ひび割れ面積と壁板面積の増分 Fig. 16に、壁板の全ひび割れについてひび割れ幅と端部からの線分長さの関係を積分して求めた面積(ひび割れ面積)を示す。ここで、画像計測は目視観察よりも高密度にデータを取得しており、1つのひび割れにおけるひび割れ幅の計測点数は大きく異なるが、面積算定方法の概念は式(1)と同様である。ピーク時、除荷時のいずれのひび割れ面積も変形角と概ね線形の関係があることがわかる。このことから、変形を受けた後に耐震壁に生じたひび割れからひび割れ面積を求めることができれば、その耐震壁の損傷状況や経験した最大変形角などが推定できる可能性があるといえる。

耐震壁のひび割れが増加すると、壁板の面積がその分増大すると考えられる。そこで、画像計測結果により求められた変位を用いて壁板面積の増分を評価した結果をFig. 16に併せて示した。壁板面積の増分は、図中の写真に示すように、アンカーボルトで隠れた部分を除いた領域で求めた。対象とした領域の面積は、全体の70%であ

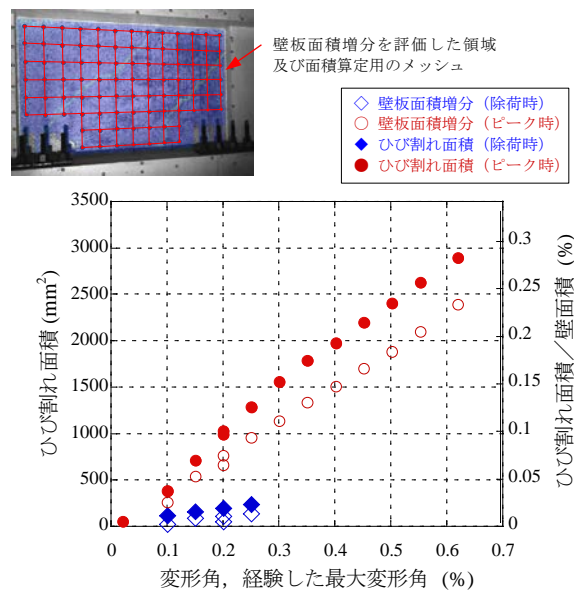


Fig. 16 ひび割れ面積と壁板面積増分の比較
Comparisons of Crack Area and Wall Area Increment

る。Fig. 16によれば、壁板面積の増分は、ひび割れ面積と同様に変形角と線形の関係がみられる。ただし、ひび割れ面積よりやや小さく、ひび割れ面積に対して、壁板面積増分は75～83%の値となった。壁板面積増分の評価を全体の70%で求めていることを考慮すれば、ひび割れ面積は壁板面積増分で概ね評価できていると考えられる。

4. 非線形FEM解析によるひび割れ評価

4.1 解析モデル

本実験を対象とした有限要素解析を実施し、実験と解析で損傷過程を比較した後に、解析結果からひび割れ面積を評価する方法について考察した。

Fig. 17に解析モデルの要素分割を示す。解析モデルは対称条件を考慮して壁厚方向の1/2をモデル化した3次元モデルとした。コンクリートは六面体要素、柱主筋は線材要素、壁筋及び柱帯筋は埋込み鉄筋でモデル化した。コンクリートと柱主筋の間にはばね要素を挿入し、付着すべり特性を考慮した。

Fig. 18にコンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ関係の概念を示す。材料モデルの選定はNaganumaらの研究³⁾を参考とした。コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性体とし、非直交分散ひび割れモデルを用いて、多方向に生じるひび割れを考慮した。圧縮側応力-ひずみ関係は修正Ahmadモデルにより表し、ひび割れ後の圧縮強度低減を考慮した。コンクリート破壊基準はOttosenの4パラメータモデルにより表し、最大圧縮強度到達後はNakamuraらの圧縮破壊エネルギーに基づく軟化勾配⁴⁾を定義した。引張側応力-ひずみ関係はひび割れ強度まで線形とし、ひび割れ後の特性及びひび割れ面におけるせん断伝達特性はNaganumaらのモデルにより表した。鉄筋の応力-ひずみ関係は完全弾塑性モデルにより表した。繰返し応力下の履歴特性にはCiampiらのモデルを適用した。柱主筋の付着強度は靱性指針⁵⁾に則り算定した付着信頼強度とし、強度時のすべり量は1.0mmと仮定した。

底面全体で全方向の節点変位を拘束し、対称軸上の切断面において壁厚方向の節点変位を拘束した。実験と同様に、柱上部に軸力を载荷した後、加力スタブ中央高さにおいて、強制変位による正負交番载荷を行った。本解析では、乾燥収縮による初期ひずみは考慮しなかった。

4.2 解析結果

4.2.1 荷重-変形関係 Fig. 19に実験とFEM解析の荷重-変形関係の比較を示す。解析は、負側加力において実験よりも荷重がやや高かったが、荷重-変形関係の骨格曲線については、FEM解析により実験結果を精度良く再現できた。

4.2.2 耐震壁のひび割れ分布状況 Fig. 20に変形角0.2%(1回目)における耐震壁のひび割れ状況に関する実験とFEM解析の比較を示す。分散ひび割れモデルを用いた場合、壁の要素全体にひび割れが生じるため、実験

のようにひび割れ間隔の違いが明確に表れない。これに対処するため、例えば引張主ひずみの分布を確認するなど、ひび割れ幅が大きい領域を定性的に把握しているのが現状である。なお、分散ひび割れモデルを用いてひび割れ幅を算定する手法をSatoらが提案⁶⁾しており、そのような手法を用いた場合、実験結果をどの程度の精度で表せるかを確認することは今後の課題である。

4.2.3 壁板面積の増分 Fig. 21に目視観察及び画像計測によるひび割れ面積とFEM解析による壁板面積増分の比較を示す。FEM解析による壁板面積増分は、軸力载荷後の壁板面積を基準として、変形後の節点座標から算定したものであり、No.1よりもNo.2の方がやや大きい、同程度の値であった。また、壁の変形の増大に対して概ね線形に増大しており、ひび割れ面積の増大傾向と一致した。No.1の目視観察によるひび割れ面積のみ値が小さいが、それ以外の面積については概ね同程度の値であった。これらのことから、分散ひび割れモデルのようにひび割れ幅を直接評価することができない場合でも、変形後の要素面積からひび割れ性状を定量的に評価できると考えられる。

以上のように、これまで目視観察により評価してきたRC構造物のひび割れ性状は、画像計測やFEM解析といった手法によっても同様に評価できることがわかった。これらの手法はひび割れ性状を短時間で把握するのに有用である。今後これらの評価手法の精度をより高めるためには、更に実験データを蓄積し、検証する必要がある。

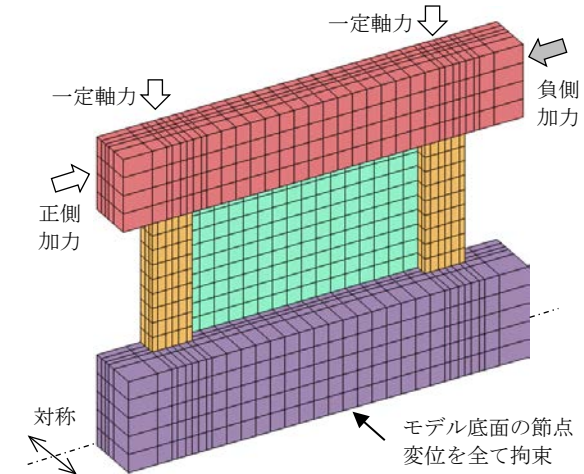


Fig. 17 解析モデル
FEM Analysis Model

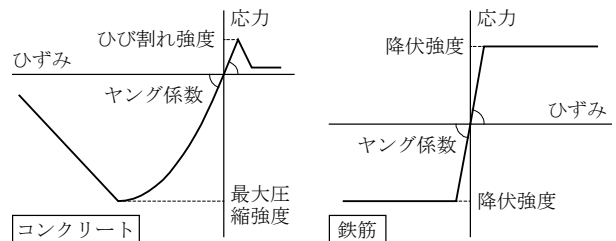


Fig. 18 コンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ関係
Stress - Strain Relationships for Concrete and Reinforcing Bar

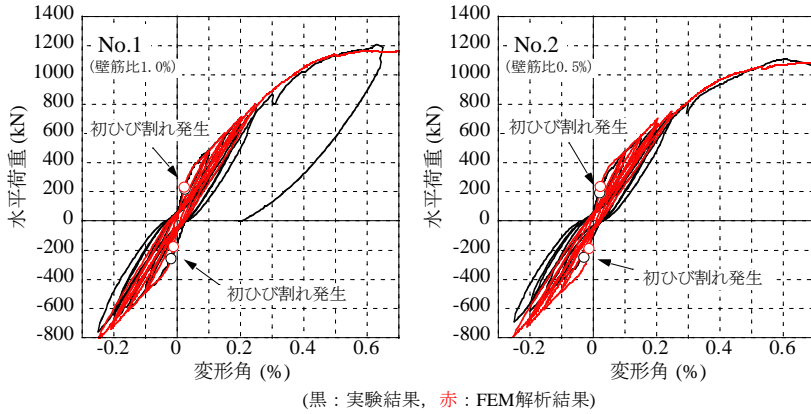


Fig. 19 荷重-変形関係の比較
Horizontal Load - Drift Angle Relationships
Derived from Experiment and FEM Analysis

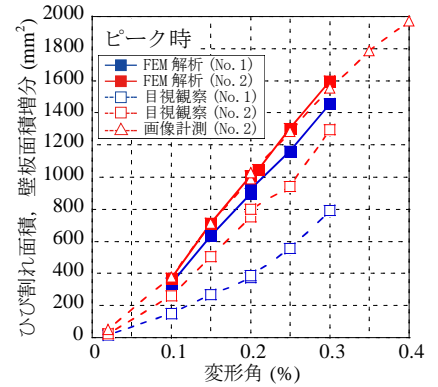


Fig. 21 ひび割れ面積と壁板面積増分
Comparisons of Crack Area and
Wall Area Increment

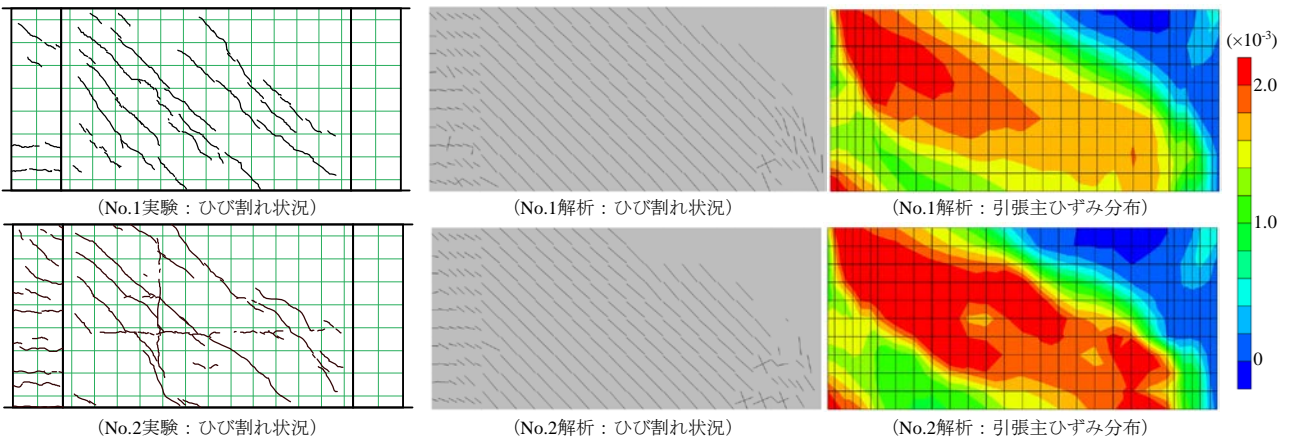


Fig. 20 変形角+0.2%のひび割れ状況に関する実験結果とFEM解析の比較
Comparisons of Experiment and FEM Analysis about Crack Distribution (Drift Angle +0.2%)

5. まとめ

RC造耐震壁の静的加力実験を実施し、耐震壁のひび割れ性状を得るとともに、画像計測及び非線形FEM解析を実施し評価した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 壁板に生じる最大ひび割れ幅やひび割れ面積は、壁板のせん断変形角の増大に対して概ね線形に増大する傾向を確認した。
- 2) 画像計測により、耐震壁のひび割れの分布やひび割れ幅の大きさを視覚的かつ定量的に評価できた。
- 3) 分散ひび割れモデルを用いたFEM解析は、ひび割れ幅やひび割れ間隔は直接評価できないものの、変形後の要素の面積増分から構造物に生じたひび割れの面積を推定できる可能性を示した。

なお、非線形FEMをひび割れ性状の評価に活用するためには、解析時間や解析精度に関する課題がある。今後も継続的に解析ソフトの改良と検証に取り組みたい。

謝辞

本研究の実施にあたり、日本大学の長沼一洋教授より貴重なご意見を賜りました。ここにお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説，2015.12
- 2) 宮下進太郎：画像相関法に基づく3D動的変形計測システムARAMIS，軽金属溶接，Vol.56，No.5，pp.28-31，2018
- 3) K. Naganuma, et. al.: Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model Using Three-dimensional Finite Element Method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 586, 2004.8
- 4) H. Nakamura and T. Higai: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol. 2, pp. 259-272, 1999.10
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999
- 6) Y. Sato and K. Naganuma: Discrete-Like Crack Simulation of Reinforced Concrete Incorporated with Analytical Solution of Cyclic Bond Model, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 140, Issue 3, 2014.