

論文 鉄筋コンクリート部材の損傷量進展過程に関する実験的研究

高橋 絵里^{*1}・高橋 典之^{*2}・中埜 良昭^{*3}

要旨：鉄筋コンクリート部材の静的破壊実験を行い，クラックスケール，デジタルノギス，デジタルカメラ接写，CCD スキャナの4種類の方法でひび割れ幅・長さを計測した。計測によって取得したひび割れに関する定量的なデータを用いて，鉄筋コンクリート構造部材の損傷量進展過程について考察した。載荷ピーク時，ピークからの除荷時，小振幅経験後の除荷時（原点近傍時）の各変形状態でひび割れ量を計測した結果，同一サイクルのピーク時，除荷時，原点近傍時における最大ひび割れ幅を比で表すと，大变形（±1/100 サイクル以降）時では概ね一定であった。

キーワード：鉄筋コンクリート，最大ひび割れ幅，ひび割れ総長さ，損傷計測方法

1. はじめに

鉄筋コンクリート建築構造物には，供用期間中の様々な外力作用によりひび割れなどの損傷が表出する。現行の建築基準法における性能設計の考え方では，建築物の供用期間に極めて稀に発生する外力作用に対して建築構造物に損傷が生じることは免れないが，その損傷は，居住者の安全性が保証され，居住者が安全に退避できることが可能な程度に抑えられることが求められる。すなわち性能設計においては，設計段階で外力作用に対する損傷量を推定できることが求められる。

そこで本研究では，鉄筋コンクリート構造物の損傷量としてひび割れ幅，ひび割れ長さに着目し，鉄筋コンクリート部材の静的載荷実験において，4種類の損傷量計測手法により，ひび割れ幅，ひび割れ長さをひび割れに関する定量的情報（以下，ひび割れ量と称する）として取得した。本論文では，計測手法の比較とともに，同実験から得られたひび割れに関する定量的なデータを用いて，鉄筋コンクリート構造部材の損傷量進展過程について考察する。

2. 試験体計画

2.1 実験パラメータ

試験体は，主に曲げひび割れの進展過程に着目した曲げ破壊試験体（F-1 試験体）と主にせん断ひび割れの進展過程に着目したせん断破壊試験体（S-1 試験体）の2体である。本実験では，試験体の幾何学的形状を同一にし，材料強度のみをパラメータに異なる破壊形式の試験体を計画することで，幾何学的モデルを用いた損傷量評価手法の開発¹⁾に必要な基礎データの取得を目指す。材料諸元を表-1に示す。

2.2 試験体概要

試験体は，約 1/3 スケールの縮小試験体で，部材断面

200mm×240mm，危険断面から反曲点位置までの部材高さ 850mm，および，その他の幾何学的形状（主筋径・本数，せん断補強筋径・間隔，かぶり厚）はすべて同一である。図-1に試験体の部材寸法と配筋詳細を示す。ひび割れの計測作業を容易にするため，部材脚部の試験体面とスタブ上部が同一平面になる形状とした。

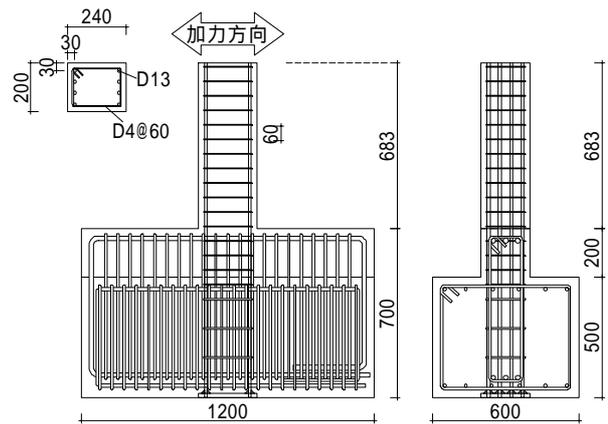


図-1 試験体詳細 (単位: mm)

表-1 材料諸元

| 試験体名 | コンクリート強度 (N/mm ²) | 主筋・引張鉄筋比 | 主筋降伏強度 (N/mm ²) | せん断補強筋・せん断補強筋比 | せん断補強筋降伏強度 (N/mm ²) |
|---------|-------------------------------|----------|-----------------------------|----------------|---------------------------------|
| F-1 試験体 | 35 | 8-D13 | 351 | D4@60 | 385 |
| S-1 試験体 | 26 | 0.0121 | 902 | 0.0022 | 385 |

3. 載荷計画

3.1 載荷の基本計画

図-2に載荷装置図を，図-3に載荷履歴を示す。水平一方向に変形角（=試験体頂部変形を試験体高さ（683mm）で除した値とする）が±1/500, 1/250, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/37.5, 1/25rad になるまで正負交番

*1 三井住友建設 設計本部 修(工) (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 助教 博(工) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所 教授 工博 (正会員)

載荷を行った。ただし $\pm 1/50\text{rad}$ のみ 2 サイクル載荷した。最後に $+1/10\text{rad}$ まで片押しして、載荷を終了した。ひび割れの計測手法が 4 通りあるため、実験期間が長期間になることが予想されたので、作業の合間に新しいひび割れの進展や拡幅が起こらないよう、本実験では軸力を導入しないこととした。

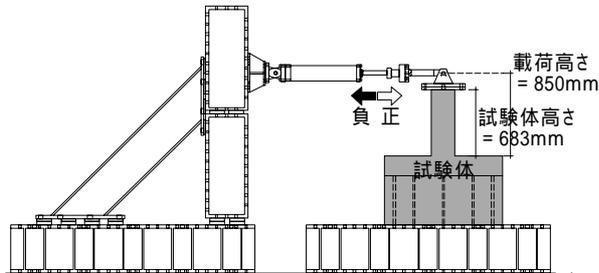


図 - 2 載荷装置図

3.2 地震応答終了時の部材角の仮定

被災度区分判定²⁾においては、3 体の擬似動の実験結果³⁾に基づき、ピークから除荷したときの最大残留ひび割れ幅と、その後の小振幅を経た地震応答終了時の最大残留ひび割れ幅とが概ね等しいとされている。しかし、文献³⁾のほかに、ピークから除荷したときのひび割れ幅と地震応答終了時のひび割れ幅との関係について詳細に調査した実験はこれまで殆ど無いことから、本実験では、載荷ピーク時(厳密には、ひび割れ計測中にひび割れが進展・拡幅しないようピークからわずかに除荷した状態)、除荷時に加え、原点近傍時(荷重・変位共に概ねゼロとなる状態)を地震応答終了時に起こり得る部材の変形状態の 1 つと仮定し、それぞれの時点でひび割れ量の計測を実施することとした。ひび割れ計測点の概念図を図 - 4 に示す。除荷後に原点を目指すために経験させる小振幅の大きさは、各試験体のひび割れ点、降伏点を略算式⁴⁾により求め、復元力特性にトリリニア型を、履歴則に除荷剛性低下指数を 0.4 とした Takeda モデルを仮定して算定した。算定結果より定めた小振幅の大きさを図 - 3 中に併記した。大まかな仮定に基づく履歴モデ

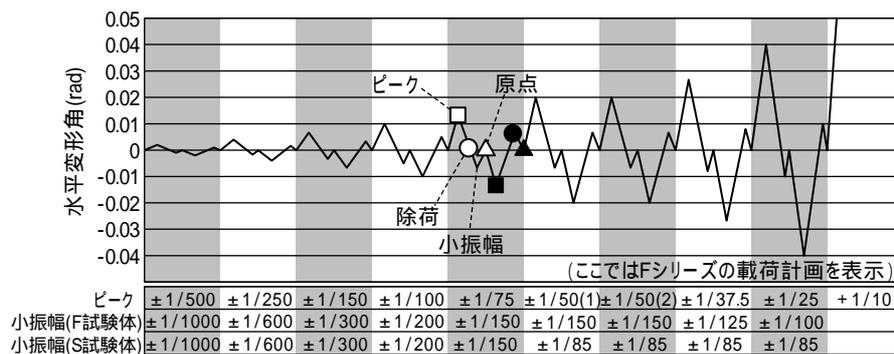


図 - 3 載荷履歴

ルを用いて小振幅の大きさを定めているので、実験時には原点に戻らない場合が予想されるが、本実験では原点を厳密に目指すのではなく、計画した小振幅後の除荷点を原点近傍として、ひび割れ量を計測することとした。

4. ひび割れ計測方法

4.1 ひび割れの分類

本研究では、材軸と $75^\circ \sim 90^\circ$ の角度で進展するひび割れを曲げひび割れに分類し、 $15^\circ \sim 75^\circ$ の角度で進展するひび割れをせん断ひび割れにそれぞれ分類した。

4.2 ひび割れ計測方法

本実験では次の 4 種類の計測方法を用いて、試験体せい面に生じたひび割れ量の計測を行った。(写真 - 1)



写真 - 1 各計測方法によるひび割れ計測の様子

(1) クラックスケールによるひび割れ幅計測

最も簡便なひび割れ幅計測方法であるが、計測作業者の習熟度および視覚感覚に基づく計測誤差が含まれると予想される。本実験では同一のクラックスケールを用いた 3 名の作業者による計測を実施した。最小計測単位は 0.03mm である。

全ての曲げひび割れおよびせん断ひび割れを計測対

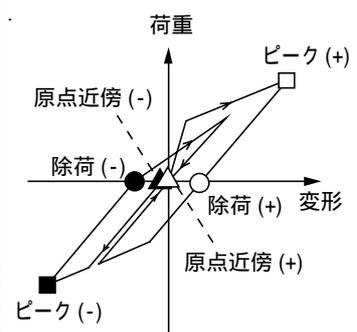


図 - 4 ひび割れ計測点概念図

象とし、計測位置を図 - 5(a)のように定めた。

(2) デジタルノギスによるひび割れ幅計測

ノギスによって計測したひび割れ幅をデジマチック出力によって計測用PCに直接送信する計測方法である。計測作業者の視覚の誤差に加えて、ノギス进行操作する手の誤差も含まれ、計測作業者による計測結果のばらつきがクラックスケール以上に大きいと考えられる。本実験では、計測作業者を同一人物に限定して計測を実施した。最小計測単位は0.01mmである。

クラックスケールによる計測と同様、全ての曲げひび割れおよびせん断ひび割れを計測対象とし、計測位置は図 - 5(a)に示す通りとした。

(3) デジタルカメラによるひび割れ幅計測

ひび割れ長さ、ひび割れ角度の記録を目的とした試験体全景の広角撮影と、ひび割れ幅の計測を目的としたマクロ撮影（接写）を実施した。通常、デジタルカメラを用いたマクロ撮影においては、図 - 6 に示す5mm方眼画像のように樽型歪曲収差を示す。糸巻型補正で歪曲収差の解消も可能であるが、局所画像をひび割れ角度の計測に用いるわけではないので、本実験では補正前の画像を用いてひび割れ幅を計測した。本実験で用いたマクロ撮影用デジタルカメラによる最小計測単位は1pixel = 0.01302mmである。

マクロ撮影の対象は、曲げひび割れおよびせん断ひび割れについてそれぞれひび割れ幅が最大となるひび割れで（ひび割れ幅が最大となる箇所を1つに絞れない場合は複数の候補を撮影）、撮影位置は図 - 5(b)に示す通りである。撮影後、4.3節に後述する画像解析により、ひび割れ幅を求める。

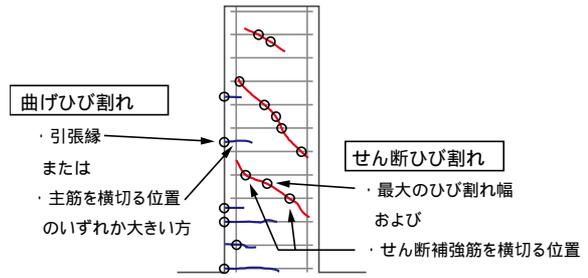
(4) CCD スキャナによるひび割れ量計測

市販のスキャナの読み取り方式には CCD 方式と CIS 方式があるが、CIS 方式は被写界深度が極めて浅く、かぶりコンクリートの浮き上がりなどが予想される試験体のひび割れ画像取得には不向きである。そこで、本実験では CCD 方式のスキャナを用いて試験体表面の画像情報を取得した。スキャナで取得した画像はデジタルカメラのような歪曲収差が生じない一方、高精度の情報取得には膨大なデータ容量が必要になるという問題点がある。本実験では読み取り解像度を1270dpi（最小計測単位1pixel = 0.02mm）と定めてひび割れ画像を取得した。

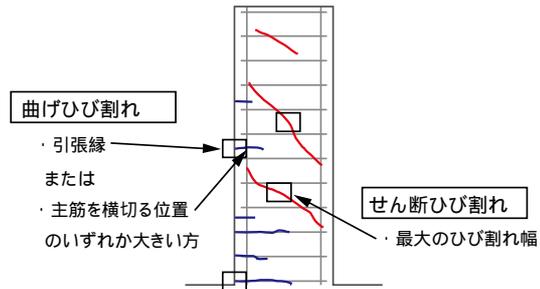
CCD スキャナによる計測対象は、試験体全域に生じた角度に依らない全ひび割れ量とした。画像取得後、4.3節に後述する画像解析により、最大ひび割れ幅、ひび割れ総長さを算出する。

4.3 画像処理方法

画像処理は以下の手順で行った。図 - 7 にデジタルカメラ接写画像の画像処理結果の一例を示す。



(a)クラックスケールおよびデジタルノギスによるひび割れ幅計測位置



(b)デジタルカメラ接写によるひび割れ幅計測位置
図 - 5 ひび割れ計測位置

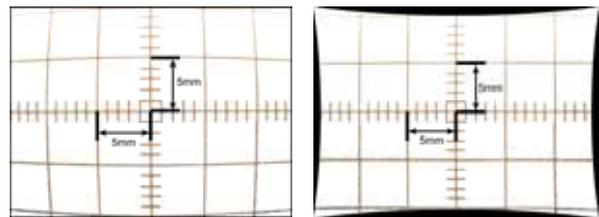


図 - 6 デジタルカメラ接写で生じる樽型歪曲収差とその補正例

[STEP1]

演算処理におけるメモリ容量確保のため、元画像をトリミングまたは分割して画像処理を行う。具体的には、デジタルカメラ接写では画角中央（全画素の1/4）をトリミングし（図 - 7(a)）、CCD スキャナでは取得画像を8分割して画像処理を行う。

[STEP2]

試験体表面には、主筋・せん断補強筋の配筋を示す線と発生したひび割れをなぞった線が書き込まれているため、それらを消去する（図 - 7(b)）。

[STEP3]

二値化処理により背景（地）と認知図形（図）に分類する（図 - 7(c)）。

[STEP4]

図の部分の面積が、ある閾値より小さい領域、および図の部分の形状が試験体表面の豆穴のように円形に近い領域をノイズとみなし、除去する（図 - 7(d)）。

[STEP5-1]

最大ひび割れ幅を算出する。図 - 8 にひび割れ幅算出

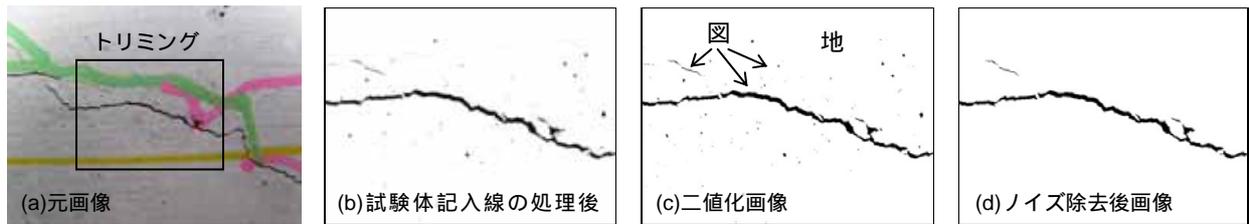


図 - 7 画像処理（デジタルカメラ接写画像）の例

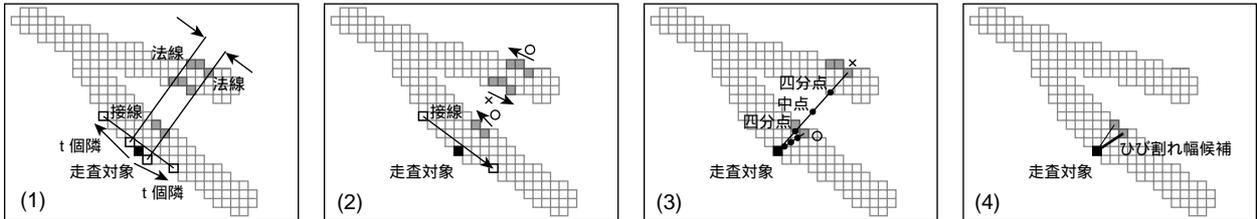


図 - 8 ひび割れ幅算出手順の概念図

手順の概念図を示す。走査対象点から指定の画素数離れた画素同士を結んだ線を接線とする。走査対象点の隣接点を通る接線と垂直な線（法線）で挟まれた範囲にあるひび割れ領域の外郭画素を選択する（図 - 8(1)）。ひび割れ領域の外郭を時計回りに走査し、接線ベクトルと向きが $180^\circ \pm$ 誤差の範囲にある外郭画素を候補点として抽出する（図 - 8(2)）。さらに、走査対象点と候補点の中間点、四分点がひび割れ領域に含まれる画素を抽出する（図 - 8(3)）。以上の条件を満たす点と走査対象点を結ぶ線分のうち、その距離が最小のものをひび割れ幅候補とする（図 - 8(4)）。ひび割れ領域の外郭画素全てを走査対象点として同様の処理を行い、ひび割れ幅候補のうち最大値をその画像の最大ひび割れ幅とする。ただし、ひび割れ幅がひび割れ領域に外接する矩形の長辺の長さの $1/4$ 以下となる条件を定めることによりひび割れの始端・終端を結ぶ線分などが最大ひび割れ幅と誤認されないようにした。

[STEP5-2]

ひび割れ総長さを算出する（スキャナ画像のみ）。ひび割れ長さは各ひび割れ領域の外郭長さの $1/2$ とし、その総和をひび割れ総長さとした。

5. 実験結果

5.1 破壊性状および荷重変形関係

図 - 9 に各試験体の荷重 - 変形関係および $\pm 1/25$ サイクル終了時の破壊状況を示す。

[F-1 試験体]

+1/500 サイクル途中で初期剛性が低下し、同サイクル中に曲げひび割れが発生した。その後、試験体脚部を中心に曲げひび割れおよび曲げせん断ひび割れが進展した。図 - 9(a)右側に示した破壊状況で試験体上部に見られるひび割れの多くは試験体製作時に生じた乾燥収縮

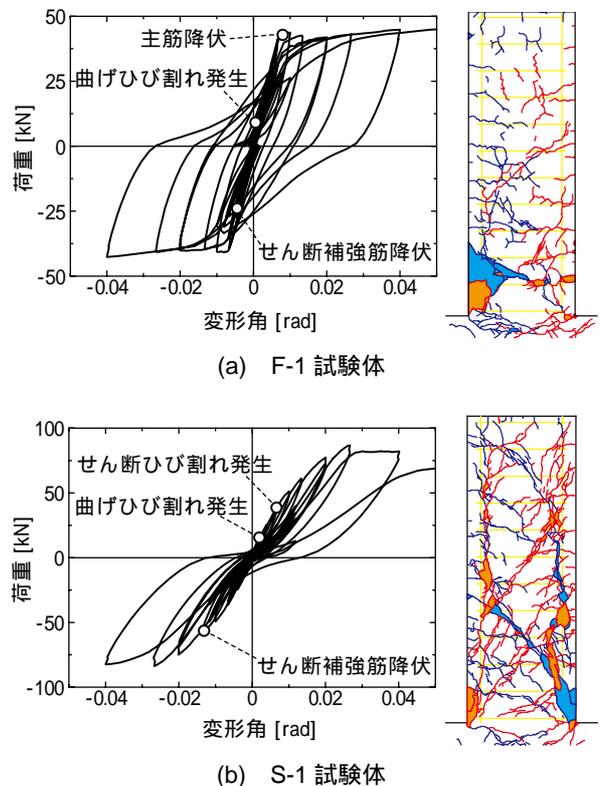


図 - 9 荷重 - 変形関係および破壊状況

ひび割れであり、載荷過程で進展することはなかった。+1/100 サイクル途中で引張側主筋が降伏し、剛性低下した。曲げ降伏後も耐力低下の小さい安定した紡錘形のループを描いたが、2回目の-1/50 サイクル途中でせん断補強筋が降伏してからスリップ性状が表れ始めた。

[S-1 試験体]

+1/500 サイクル途中で初期剛性が低下し、同サイクル中に曲げひび割れが発生した。+1/100 サイクルピーク時に試験体中央に明瞭なせん断ひび割れが発生し、その後せん断ひび割れが進展した。-1/75 サイクル途中でせん断補強筋が降伏するまでは除荷時残留変位が極めて小さ

い原点指向型の履歴を示し、せん断補強筋降伏後は力の向きが反転すると同時に大きくスリップする履歴を示した。+1/37.5 サイクル以降、せん断ひび割れから付着割裂ひび割れが試験体全域へと伸展した。高強度鉄筋を使用した主筋は明瞭な降伏を示さず、最大耐力を示した±1/37.5のサイクル以降は、耐力が徐々に低下した。

5.2 計測方法によるひび割れ幅計測結果の比較

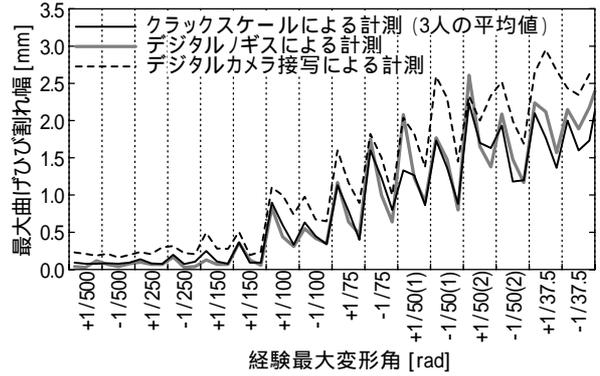
クラックスケール、デジタルノギス、デジタルカメラ接写の各方法で計測されたひび割れ幅の例として、F-1試験体における最大曲げひび割れ幅の計測結果を図-10(a)に、S-1試験体における最大せん断ひび割れ幅の計測結果を図-10(b)に示す。デジタルカメラ接写によって計測された最大曲げひび割れ幅および最大せん断ひび割れ幅は、目視(クラックスケールおよびデジタルノギス)による計測値より大きく計測される傾向にあった。これは二値画像を用いた計測法に起こり得る固有の誤差と考えられる。すなわち、二値化における閾値の設定により、目視では区別できた試験体表面の僅かな剥離や汚れとその奥のひび割れとが、二値画像では区別できずに全てひび割れとして認識してしまう問題が現れたものと考えられる。

5.3 部材角とひび割れ幅の関係

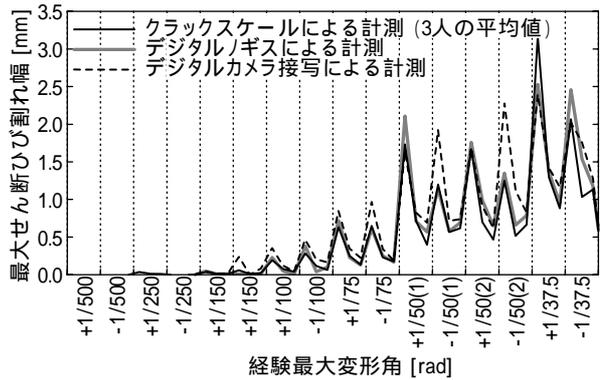
図-11にクラックスケールで計測した最大曲げひび割れ幅および最大せん断ひび割れ幅(3名の作業者が各々最大ひび割れ幅と判断し計測した値の平均値)をプロットした。F-1試験体は終始曲げひび割れが支配的であり、曲げ降伏した±1/100サイクルで曲げひび割れ幅が急増している。S-1試験体は、明瞭なせん断ひび割れが表出した±1/100サイクル以降、せん断ひび割れ幅の増大が顕著である。同一サイクルのピーク時・除荷時・原点近傍時を比較すると、ピーク時のひび割れ幅が最大となり、以下除荷時のひび割れ幅、原点近傍時のひび割れ幅の順に小さくなる。F-1試験体では、部材が曲げ降伏する±1/100サイクル以降、除荷時のひび割れ幅と原点近傍時のひび割れ幅との差が大きいが、S-1試験体は除荷時の残留変位が小さく、ひび割れが急激に閉じるため、除荷時と原点近傍時のひび割れ幅に大きな差はなかった。また、±1/100サイクル以降、各試験体ごとの最大曲げひび割れ幅および最大せん断ひび割れ幅を、ピーク時・除荷時・原点近傍時の比で表すと、概ね一定であった。±1/100サイクル以降のひび割れについて、ピーク時のひび割れ幅を100%とした時の除荷時および原点近傍時のひび割れ幅の割合をプロットすると、図-12のように分布した。このとき、ピーク時・除荷時・原点近傍時のひび割れ幅の比の平均を求めると、

[F-1試験体]

$$\max W_{f,PEAK} = 1.2 \max W_{f,UNLOAD} = 1.8 \max W_{f,ZERO} \quad (1)$$

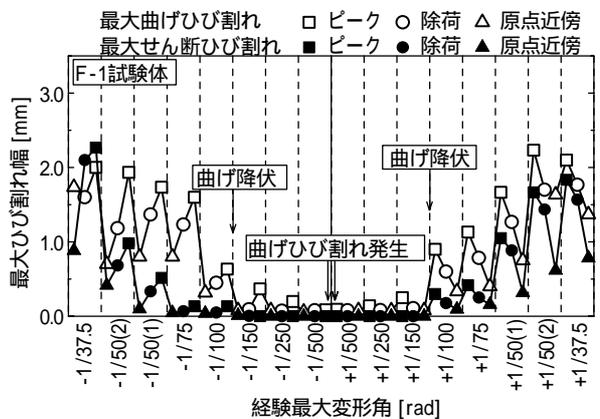


(a) F-1試験体の最大曲げひび割れ幅計測結果

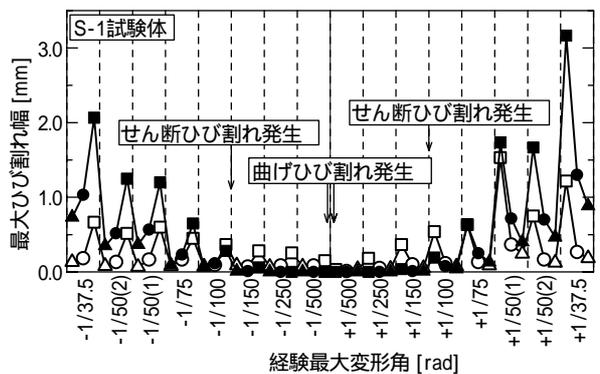


(b) S-1試験体の最大せん断ひび割れ幅計測結果

図-10 各手法によるひび割れ幅計測結果



(a) F-1試験体



(b) S-1試験体

図-11 最大ひび割れ幅の推移

$$\max W_{s,PEAK}=1.4\max W_{s,UNLOAD}=2.8\max W_{s,ZERO} \quad (2)$$

[S-1試験体]

$$\max W_{f,PEAK}=3.7\max W_{f,UNLOAD}=5.9\max W_{f,ZERO} \quad (3)$$

$$\max W_{s,PEAK}=2.2\max W_{s,UNLOAD}=3.8\max W_{s,ZERO} \quad (4)$$

と表せる。ここで、 $\max W_f$ ：最大曲げひび割れ， $\max W_s$ ：最大せん断ひび割れ， $PEAK$ ：ピーク時， $UNLOAD$ ：除荷時， $ZERO$ ：原点近傍時を表す。ただし本実験では軸力を導入しておらず，軸力を導入した場合に上記の関係は変わる可能性がある。

5.4 部材角とひび割れ総長さの関係

図 - 13 に CCD スキャナにより計測されたひび割れ総長さの推移を太線で示す。

F-1 試験体では，変形角の増加に伴うひび割れ総長さの変化はあまり見られず，所々，スパイク状にひび割れ総長さが急増する箇所がある。これは，スキャナと試験体表面とが完全に密着せず，相対的に暗い部分が画像に含まれたためにノイズを除去しきれず，本来背景（地）とすべき数多くの微小領域をひび割れ領域（図）として計測してしまったためと考えられる。

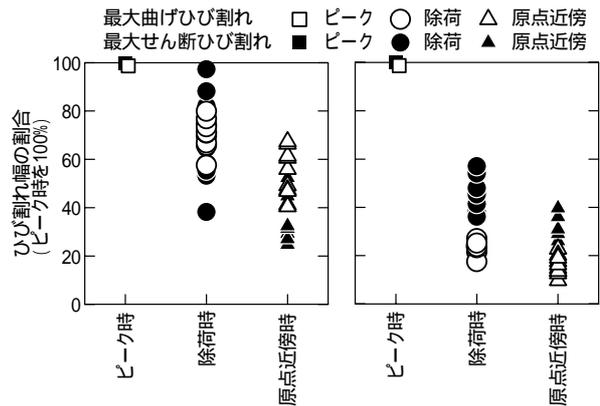
一方，S-1 試験体では，変形角の増加に伴ってひび割れ総長さが増大している。同一サイクルのピーク時・除荷時・原点近傍時に着目すると，ピーク時でひび割れ総長さが最大となり，除荷時，原点近傍時の順に減少している。これは閉じたひび割れをひび割れとして認識しなかったことによるものと考えられる。

図 - 13 にひび割れ図を画像処理して求めたひび割れ総長さの推移を細線で示す。ひび割れ図では，閉じたひび割れも明記されており，正側載荷時の負側ひび割れなどスキャナによる計測では含まれなかったひび割れ長さが含まれている。スキャナによって計測されたひび割れ総長さと比較すると，S-1 試験体のピーク時の計測では一定して約 2.2 倍のひび割れ総長さが計測された。

6. まとめ

鉄筋コンクリート部材の静的破壊実験を行い，4 種類の方法でひび割れ幅・長さを計測した。実験から得られたひび割れに関する定量的なデータを用いて，鉄筋コンクリート構造物の損傷量進展過程に関する以下の知見を得た。

- (1) 画像処理を用いてひび割れ幅を計測する場合，目視によるひび割れ幅計測値より大きく計測される傾向にあり，従来のクラックスケールで計測された計測値と整合するか確認が必要である。
- (2) 最大ひび割れ幅はピーク時，除荷時，原点近傍時の順に小さくなり，大变形（±1/100 サイクル以降）時では，ピーク時・除荷時・原点近傍時の最大ひび割れ幅を比で表すと概ね一定であった。



(a)F-1 試験体 (b)S-1 試験体

図 - 12 除荷時および原点近傍時のひび割れ幅の割合

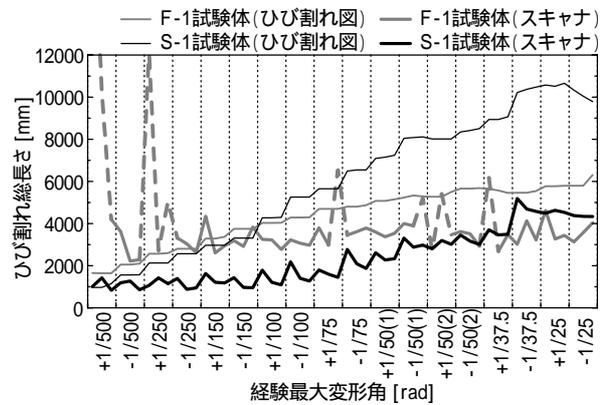


図 - 13 ひび割れ総長さ（スキャナによる計測）の推移

(3) ひび割れ総長さについては，せん断破壊先行試験体では変形角に伴い増加したが，曲げ破壊先行試験体はそれほど増加が見られなかった。

参考文献

- 1) 高橋典之，中埜良昭：複数回地震動を受ける鉄筋コンクリート構造物の損傷量推定手法に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1027-1032，2008.7
- 2) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，日本建築防災協会，1998.1
- 3) 康大彦ほか：サブストラクチャー擬似動的実験による震災 RC 造建築物の残存耐震性能の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1093-1098，2002.6
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，日本建築学会，pp.320-327，1999.8
- 5) 河村博之，浜田公也：ひび割れの数量化表示法とその適応性について，日本建築学会論文報告集，No.318，pp.1-8，1982.8