

平成 21 年 4 月 21 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007 年度～2008 年度

課題番号：19760380

研究課題名（和文）鉄筋コンクリート柱部材の地震時ひび割れ量進展過程における動的効果の解明

研究課題名（英文）A Study on Crack Propagation of R/C members under Earthquakes

研究代表者

高橋 典之（TAKAHASHI NORIYUKI）

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：60401270

研究成果の概要：鉄筋コンクリート構造部材の地震時挙動を想定した非線形変位履歴を経験する静的載荷実験を実施し、損傷量（ひび割れ幅、ひび割れ長さ、ひび割れ角度など）測定手法について測定精度・速度に関する実験データを収集するとともに、地震応答を想定した非線形変位履歴に応じて損傷量の進展過程を推定する手法を開発し、実験データを用いた検証を行った。また、損傷量計測に動画を用いた場合の解像度と計測有効精度の関係について検討した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,700,000	0	1,700,000
2008 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	480,000	3,780,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料，鉄筋コンクリート，ひび割れ量，耐震性能，修復性能

1. 研究開始当初の背景

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事象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。また、既存建築構造物においても、外力作用を受けて損傷した際に継続使用可能か否かを判断

するため、損傷量を評価することは不可欠である。特に広域災害においては、損傷量を精確かつ迅速に評価できれば、罹災証明などの発行手続きを促進し、一刻も早い被災者の生活復旧支援に役立つものと考えられ、鉄筋コンクリート建築構造物の損傷量評価はこれまで以上に社会的要求の高い技術になっている。

近年デジタルカメラなどに使われる CCD の普及に伴い、画像処理を用いたひび割れ計測技術の開発が盛んに行われている。そこで本研究では、鉄筋コンクリート部材の簡易な静的載荷実験を計画し、一般的に用いられてきたクラックスケールによる損傷量（ひび割

れ幅)測定手法のほか、デジタルノギスを用いた損傷量(ひび割れ幅)測定手法、画像処理技術を用いた損傷量測定手法について、測定対象(ひび割れ幅、ひび割れ長さ、ひび割れ量、ひび割れ角度など)・測定精度・測定者による測定精度のばらつき・測定の迅速さに着目し、各損傷量測定手法の比較・検討を行う。この検討結果を、動的載荷実験における損傷量計測装置の開発に向けた基礎的データとして活用する。

2. 研究の目的

これまで、研究代表者は、鉄筋コンクリート建築構造物を対象に、既往の損傷指標に対して「修復費用関数」をあてがうことで修復性能を修復費用として定量的に評価する方法について検討を行ってきた。本研究では、修復費用関数の算出根拠となる補修の必要な損傷量をひび割れ幅とひび割れ長さを組合せた量(ひび割れ量)と定め、本研究において実施した鉄筋コンクリート部材の静的載荷実験結果を用いて、幾何学的なひび割れ-部材変形モデルに基づくひび割れ量推定手法の検証を行うことを目的とする。また本実験データを参考に、損傷量計測に動画を用いた場合の解像度と計測有効精度の関係について考察する。

3. 研究の方法

(1) 試験体計画

試験体は、幾何学的形状は同一で、材料強度のみが異なる曲げ破壊試験体(F-1試験体)とせん断破壊試験体(S-1試験体)の2体を計画した。材料諸元を表1に示す。

表1 試験体材料諸元

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

(2) 試験体概要

両試験体は、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、試験体面とスタブ上部が同一平面になる形状とした。

(3) 載荷の基本計画

図2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載荷を行い、最後に+1/10radまで片押しして載荷を終了した。

ただし、本実験では、載荷ピーク時、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

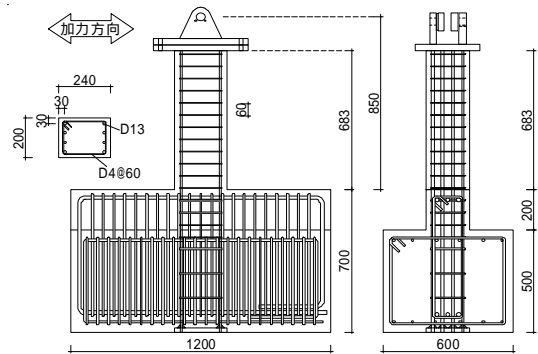


図1 試験体詳細

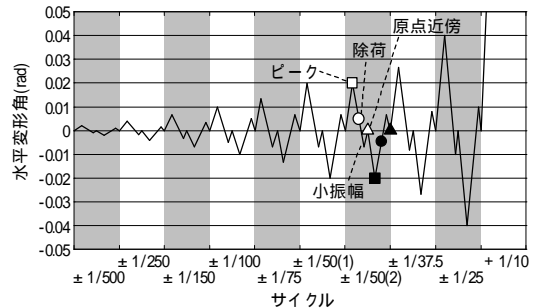


図2 載荷履歴

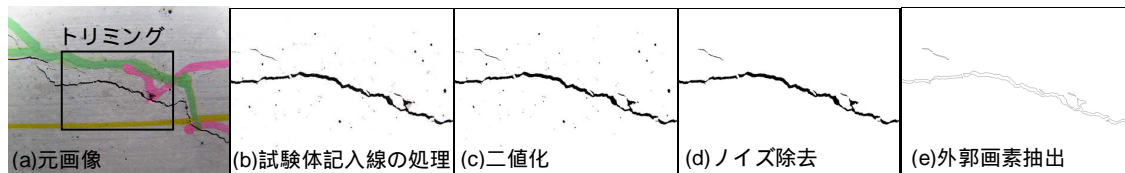


図3 画像処理(デジタルカメラ接写画像)の例

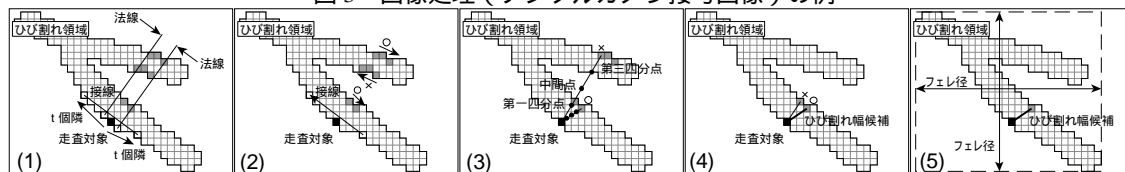


図4 ひび割れ幅算出手順の概念図

得る部材の変形状態の一つと仮定し、正負交番载荷の途中で小振幅をはさむことで原点近傍時の再現を試みた。これは、ピークから除荷したときの最大残留ひび割れ幅と地震応答終了時の最大残留ひび割れ幅との関係の詳細に調査すべく実施した载荷計画である。また、作業の間に新しいひび割れの進展や拡幅が生じないように、本実験では軸力を導入しなかった。

(4) 画像処理

図3に画像処理の例を示す。演算処理におけるメモリ容量確保のため、取得画像をトリミングまたは分割する。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3(a)), CCD スキャナでは取得画像を8分割する。

画像の分割後、各ひび割れ領域において、次の手順でひび割れ幅を計測する。すなわちひび割れ領域の外郭画素を走査対象点(図4の)とし、走査対象点から前後に指定の画素数(t 個)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ひび割れ幅計測対象候補点(図4の)であり、以下、候補点と称す)として抽出する(図4(1))。ひび割れ領域の外郭を時計回りに走査したときに、接線ベクトルと向きが $180^\circ \pm$ 許容誤差となる接線を有する候補点を選別する(図4(2))。次に、走査対象点と候補点の中間点、第一および第三四分点が全てひび割れ領域内に含まれる候補点を選別する(図4(3))。以上の条件を満たす候補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4(4))。以上の処理をひび割れ領域の外郭画素全てに行い、その画像の最大ひび割れ幅を決定する。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(最大フェレ径)の1/4以下とする制約条件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する(図4(5))。

外郭画素の抽出結果を用いて、ひび割れ長さを各ひび割れ領域の外郭長さの1/2と定め算出し、その総和をひび割れ総長さとした。

4. 研究成果

(1) 破壊性状および荷重変形関係

図5に各試験体の荷重 - 変形関係および±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、曲げひび割れが確認された。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。+1/100 サイクル途中で引張側主筋が降伏し、曲げ降伏後は耐力低下の小さい安定した紡錘形ループを描いた。

[S-1 試験体]

+1/500 サイクル途中で初期剛性が低下し、曲げひび割れが確認された。+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原点指向型の履歴を示し、せん断補強筋降伏後はスリップする履歴を示した。+1/37.5 サイクル以降、付着割裂ひび割れが試験体全域へと進展した。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。

(2) 各計測方法による最大ひび割れ幅計測結果の比較

図6にクラックスケール、デジタルノギス、デジタルカメラ接写、CCD スキャナを用いた各計測方法で計測された最大ひび割れ幅を示す。計測されたひび割れ幅の中で最も大きいひび割れ幅を比較した。画像処理を用いて計測された最大ひび割れ幅は、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。これはカラー画像の二値化において、目視では区別できたひび割れ領域近傍の僅かな剥離や汚れと真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されたためである。特に CCD スキャナで取得した画像から算出した最大ひび割れ幅は、所々スパイク状にひび割れ幅が急増する箇所があるが、これは、スキャナと試験体表面とが完全に密着しなかった場合に生じる陰影ノイズを除去しきれなかったためである。

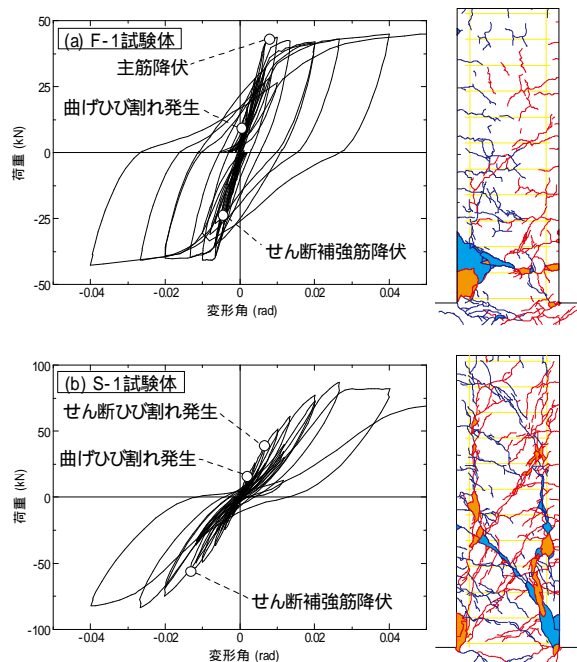


図5 荷重 - 変形関係および破壊状況

(3) 部材角と最大ひび割れ幅の関係

図7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人の平均値)の推移を示す。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 $\pm 1/100$ サイクルで最大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 $\pm 1/100$ サイクル以降、最大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、ピーク時の最大ひび割れ幅が最大となり、以下除荷時、原点近傍時の順に小さくなった。F-1試験体では、部材が曲げ降伏する $\pm 1/100$ サイクル以降、除荷時の最大ひび割れ幅と原点近傍時の最大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最大ひび割れ幅に大きな差はなかった。各試験体の最大曲げひび割れ幅および最大せん断ひび割れ幅のピーク時・除荷時・原点近傍時の関係を、除荷時・原点近傍時の最大ひび割れ幅に対するピーク時の最大ひび割れ幅の比として

$$\max W_{PEAK} = \alpha \max W_{UNLOAD} = \beta \max W_{ZERO} \dots (1)$$
と表すとき、 $\pm 1/100$ サイクル以降の α, β の平均値 μ_α, μ_β および標準偏差 $\sigma_\alpha, \sigma_\beta$ は表2のようになる。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。

(4) 最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の関係

図8に最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の比の推移を示す。最大ひび割れ幅はクラックスケールで計測したひび割れ幅の最大値(3人の平均値)を、平均ひび割れ幅はCCDスキャナで取得した画像から算出した値を用いた。また、図中にはCEB-FIP Code 1978による平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の関係を示した。

図8より、除荷時・原点近傍時の最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の比は、CEB-FIP Code 1978に示された関係に概ね当てはまるが、ピーク時における最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の比はそれより著しく大きい。すなわち、ピーク時には最大ひび割れ幅となるひび割れが主に開く(そのひび割れに変形が集中する)傾向にあることが分かる。

(5) 部材角とひび割れ総長さの関係

図9にCCDスキャナで取得した画像から算出したひび割れ総長さ、および、実験時にスケッチしたひび割れ図から算出したひび割れ総長さの推移を示す。

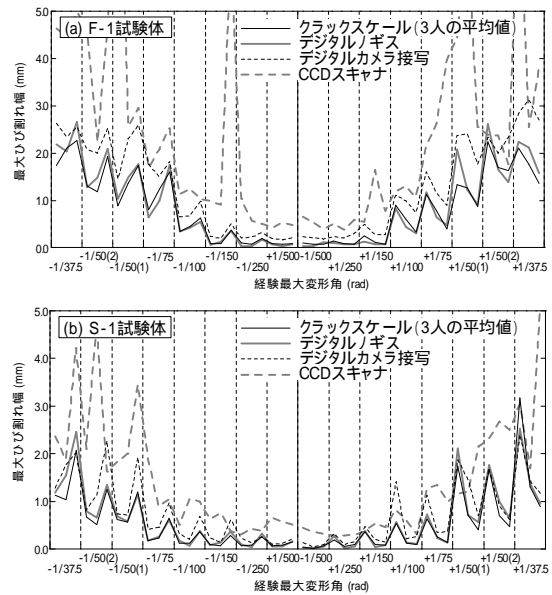


図6 計測方法別の最大ひび割れ幅計測結果の比較

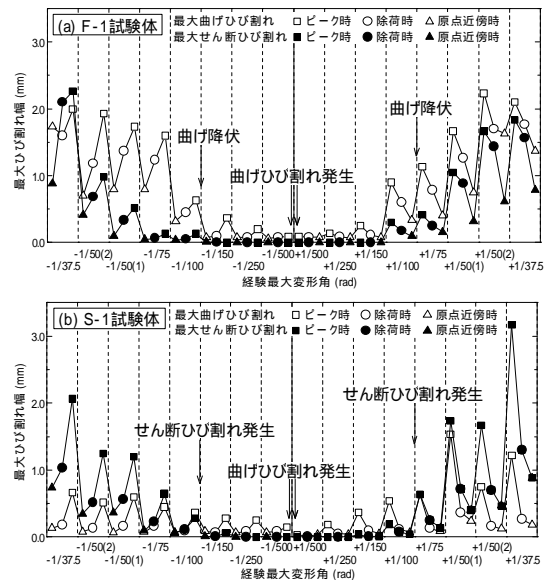


図7 最大ひび割れ幅の推移

表2 最大ひび割れ幅の比の平均値 μ と標準偏差 σ

		μ_α	σ_α	μ_β	σ_β
F-1 試験体	$\max W_f$	1.3	0.16	2.0	0.56
	$\max W_s$	1.6	0.46	3.1	0.85
S-1 試験体	$\max W_f$	4.0	0.60	6.5	1.13
	$\max W_s$	2.4	0.21	4.2	1.11

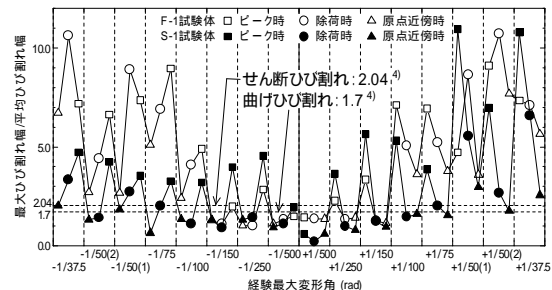


図8 最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の比の推移

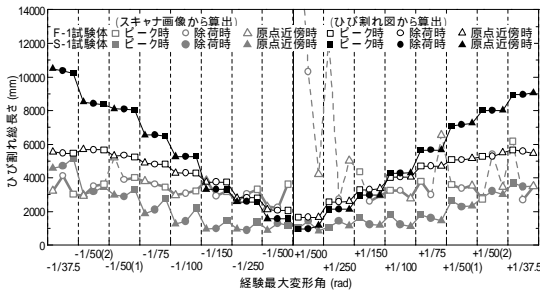


図9 ひび割れ総長さの推移

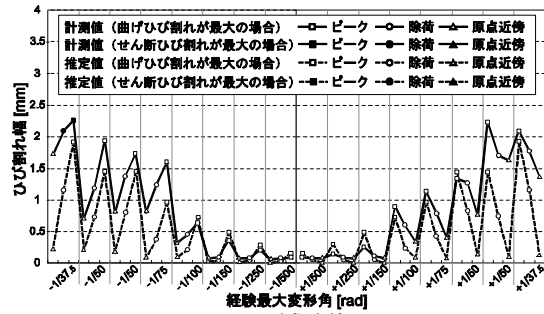
F-1 試験体では変形角の増加に対し、新たなひび割れが発生するのではなく、既にある曲げひび割れの拡幅が主に生じていたため、ひび割れ総長さの増加が比較的小さい。ただしスキャナ画像を用いて求めたひび割れ総長さは、最大ひび割れ幅の計測値と同様、除去しきれないノイズの影響で所々スパイク状に長さが急増する箇所がある(図9の点線)。一方S-1 試験体では、変形角の増加に伴って新たなせん断ひび割れが発生し、さらに+1/37.5 サイクル以降は付着割裂ひび割れが進展したためひび割れ総長さが増大した。

スキャナ画像を用いて求めたひび割れ総長さは、同一サイクルの場合、ピーク時で最大となり、除荷時、原点近傍時の順に減少する。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。一方、ひび割れ図から算出したひび割れ総長さは閉じたひび割れを含むため、除荷時、原点近傍時にひび割れ総長さが減少することはなかった。また、载荷の向きに応じて閉じるひび割れも含むため、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ピーク時において約 2.2 倍のひび割れ総長さが計測された。

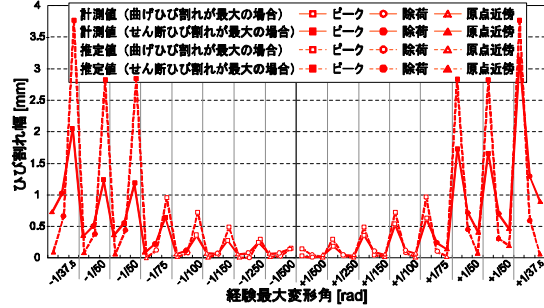
(6) ひび割れ量の推定

最大ひび割れ幅の推定

本研究で開発中の、幾何学的ひび割れモデルを用いたひび割れ量推定手法^[1]を用いて、変位履歴および曲げ成分比(全体変形のうち曲げ変形成分が占める割合)を実験結果とあわせて推定した最大ひび割れ幅および最大ひび割れ幅計測値の部材角ごとの推移を図10に示す。図10より、F-1 試験体では、変位履歴から推定されるひび割れ幅推定値と計測値が概ね近似するが、S-1 試験体では、ピーク時のせん断ひび割れ幅推定値は計測値より大きく、除荷時、原点近傍時の推定値は計測値より小さい。これは、せん断ひび割れ幅に対して仮定したせん断ずれ量がピーク時でやや過小評価、除荷時でやや過大評価になっているためと考えられる。



(a) F-1 試験体



(b) S-1 試験体

図10 最大ひび割れ幅計測値と推定値の比較

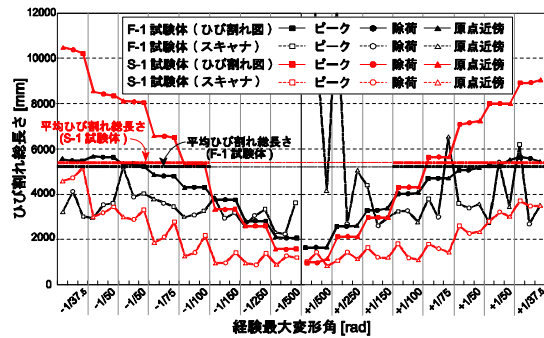


図11 ひび割れ総長さの推定値と実測値の比較

ひび割れ総長さの推定

平均ひび割れ総長さはひび割れ定常状態(これ以上新たなひび割れが発生しない状態)にあるひび割れ長さの総和として得られるものであり、経験部材角によらず、試験体が一つに定まればその値も一意に定まる。この平均ひび割れ総長さを、ひび割れ総長さを求める際の上限とする妥当性について、F-1 および S-1 試験体を対象に検討する。両試験体の平均ひび割れ総長さを求め図9のひび割れ総長さグラフに重ねると図11を得る。図11より、F-1 試験体では平均ひび割れ総長さをひび割れ総長さの上限として考えても概ね妥当であると言えるが、S-1 試験体では±1/75[rad]以降、平均ひび割れ総長さよりもひび割れ総長さが大きくなる。本モデルでは付着割裂ひび割れの進展をひび割れ総長さに考慮していないため、ひび割れ総長さを過小評価したと考えられる。

(7) 動画解像度とひび割れ量の読み取り精度

市販のビデオカメラによって撮影された動画の解像度は、NTSC規格で720×480pixel、Full HD規格で1920×1080pixelである。フレームレートは通常29.97fpsであり、プログレッシブ撮影の場合60fps、それ以上のフレームレート撮影にはハイスピードカメラが必要であるがハイスピードカメラの解像度は一般的に小さい。

2003年に実施された金子らの実験(金子洋ら:動的繰返し载荷を受ける鉄筋コンクリート片持ち梁の変形能に及ぼす载荷速度とせん断力の影響,コンクリート工学協会年次論文集,Vol.26,No.2,pp.313-318,2004)において本研究の試験体と幾何学的条件が類似しているD9試験体(動的载荷)の動画記録を用いて,動的载荷における損傷量計測手法の可能性について検討した。金子らの実験の動画記録は,NTSC規格/29.97fpsフレームレートで撮影されている。これを用いて,1フレーム分のデータを静止画として取り出し,画像処理によってひび割れを認知できるか検証するとともに,NTSCおよびFull HDレベルの解像度に圧縮した本研究のS-1試験体正面写真を用いた画像処理によるひび割れの認知レベルと比較する。金子らの実験の動画記録では試験区間全景が画角に収まるよう撮影されており,1pixelがおよそ1.8mmに相当する解像度である。S-1試験体正面写真のNTSCレベル解像度では1pixelがおよそ1.4mm,Full HDレベル解像度では1pixelがおよそ0.54mmである。検証画像が対象とした部材角は,金子らの実験で0.015radサイクルピーク本研究S-1試験体で1/75(=0.0133rad)サイクルピークである。ピーク時部材角が両者で異なっているが,金子らの実験の0.015radサイクルでの载荷速度は100mm/secであり29.97fps撮影の場合0.0128~0.015radのいずれかの状態の部材角が静止画として抽出されることから,ここでは両者を概ね等しい部材角であると考えた。

画像処理の結果,NTSCレベルの解像度では最大ひび割れ幅を示した部分でさえもひび割れを検出することはできず,Full HDレベルの解像度でようやく最大ひび割れ幅を示した部分のひび割れを(ひび割れ幅が1pixel程度で)検出することが出来た。ちなみに,S-1試験体の1/75ピーク時の最大せん断ひび割れ幅は0.65mmであり,ひび割れ幅が画像の解像度(D9試験体画像1pixel 1.8mm,S-1試験体NTSCレベル解像度画像1pixel 1.4mm,Full HDレベル解像度画像1pixel 0.54mm)以上にならないと,画像処理に際して明瞭なひび割れとして検出されないことを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文](計3件)

- [1]高橋典之,高橋絵里,中埜良昭:鉄筋コンクリート部材のひび割れ量推定モデルの検証,コンクリート工学年次論文集,Vol.31,(掲載予定),2009,査読有
- [2]高橋絵里,高橋典之,中埜良昭: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,コンクリート工学年次論文集,Vol.31,(掲載予定),2009,査読有
- [3]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,査読有

[学会発表](計6件)

- [1]高橋絵里,高橋典之,中埜良昭:鉄筋コンクリート部材のひび割れ量進展過程に関する実験的研究 その4 ひび割れ量進展過程の分析,日本建築学会大会学術講演梗概集,C-2,(掲載予定),2009,査読無
- [2]高橋典之,高橋絵里,中埜良昭:鉄筋コンクリート部材のひび割れ量進展過程に関する実験的研究 その5 表面仕上げによるひび割れ量への影響,日本建築学会大会学術講演梗概集,C-2,(掲載予定),2009,査読無
- [3]Takahashi, N. and Nakano, Y.: Impact of R/C Building Components on its Seismic Reparability Due to the Life Cycle Economic Loss, Proceedings of the Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering, Paper ID 10-0022, 2008, 査読無
- [4]高橋典之,高橋絵里,中埜良昭:鉄筋コンクリート部材のひび割れ量進展過程に関する実験的研究 その1 試験体および载荷計画,日本建築学会大会学術講演梗概集,C-2,pp.499-500,2008,査読無
- [5]高橋絵里,高橋典之,中埜良昭:鉄筋コンクリート部材のひび割れ量進展過程に関する実験的研究 その2 ひび割れ量計測方法,日本建築学会大会学術講演梗概集,C-2,pp.501-502,2008,査読無
- [6]高橋絵里,高橋典之,中埜良昭:鉄筋コンクリート部材のひび割れ量進展過程に関する実験的研究 その3 実験結果,日本地震工学会大会2008梗概集 pp.42-43,2008,査読無

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋 典之 (TAKAHASHI NORIYUKI)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号:60401270