

論文 破壊モードが異なる鉄筋コンクリート柱部材の画像計測に基づく 損傷評価

田嶋 和樹^{*1}・白井 伸明^{*2}・石森 昭行^{*3}

要旨：破壊モードの異なる 2 体の RC 柱部材を対象にして、軸力支持限界まで静的に正負交番水平載荷を実施し、その損傷過程をスキャナおよびデジタルカメラで記録した。これらの記録に基づいて画像計測を行い、供試体の変形成分を曲げ、せん断および回転成分に分離する手法を構築するとともに、ひび割れ幅から各変形成分を評価する手法も構築した。また、ひび割れ幅に基づく損傷評価手法について検討し、破壊モードに対応した合計残留ひび割れ幅を計測することにより、耐震性能低下係数の評価が可能であることを確認した。さらに、合計残留ひび割れ幅と載荷時の合計ひび割れ幅の間に相関性があることも確認した。

キーワード：鉄筋コンクリート、柱、ひび割れ、画像計測、損傷評価

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の損傷評価手法は、「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説」（以下、耐震性能評価指針）¹⁾や「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説」（以下、耐震診断基準）²⁾のように、設計段階または既存の建物を対象とする場合と「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」（以下、被災度区分判定基準）³⁾のように被災した建物を対象とする場合に大別される。耐震性能評価指針および被災度区分判定基準では、「ひび割れ幅」を部材の損傷状態を評価するための 1 つの判断項目としているが、現状においてひび割れ幅と部材損傷を関係付けるための実験データが不足していることは否めない。既往の研究では、スケッチや写真撮影によってひび割れが記録されているのみであり、ひび割れを定量的に評価することを意図していない場合が多く、ひび割れ幅と部材損傷を関係付けるには不十分である。

大久保⁴⁾は、ひび割れをデジタル量に変換して活用する方法を検討しており、ひび割れを本数、位置、長さおよびひび割れ幅等の数値で扱うことにより、強度・変形レベルや破壊性状に影響を及ぼす力学的諸要因等と関連させてひび割れ性状の定量的検討が可能となると述べている。しかし、20 年以上経た現在においても、地震損傷評価の観点からひび割れの定量的評価が十分に行なわれているとは言い難い。このような現状を打破するために、筆者らは RC 部材供試体を対象としたひび割れ、特にひび割れ幅の簡易で高精度な計測手法の開発を継続している⁵⁾。

本研究では、破壊モードの異なる 2 体の RC 柱部材を

対象にして、軸力支持限界まで静的に正負交番水平載荷を実施し、その損傷過程をスキャナおよびデジタルカメラで記録した。また、これらの記録を整理し、供試体の変形を曲げ、せん断および回転成分に分離するとともに、画像計測によって求めたひび割れ幅から各変形成分を評価する手法を構築した。さらに、ひび割れ幅に基づく損傷評価手法についても検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体

図-1 に供試体概要を示す。表-1 に供試体緒元を示す。供試体寸法は実寸法の 1/3 スケールである。本試験では、中層 RC 造建物の最下層中柱を想定している。供試体の破壊モードは 2 種類を想定し、曲げ降伏後にせん断破壊を起こす BS 供試体（せん断余裕度：1.05）およびせん断破壊を起こす S 供試体（せん断余裕度：0.79）を 1 体ずつ製作した。供試体には定軸力を作用させており、軸力比は BS 供試体で 0.15、S 供試体で 0.20 である。

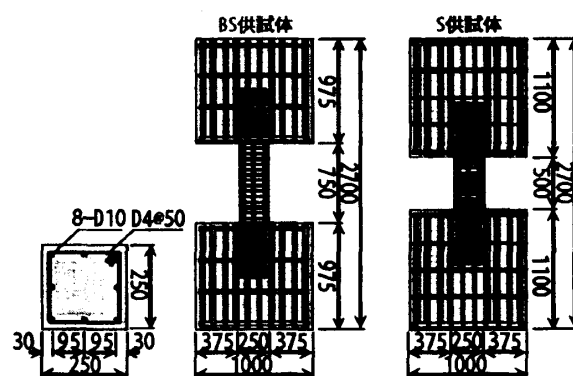


図-1 供試体概要

*1 日本大学 理工学部建築学科助教 工博（正会員）

*2 日本大学 理工学部建築学科教授 工博（正会員）

*3 鹿島建設（株） 工修

表-1 供試体緒元

供試体 名称	主筋	せん断 補強筋	定軸力 N (kN)	軸力比 η
BS	8-D10 (SD345)	D4@50 (SD345)	250	0.15
S	$P_t: 0.34\%$	$P_w: 0.22\%$	325	0.20

コンクリートは普通コンクリートであり、設計基準強度 (F_c) を 26N/mm^2 とした。鉄筋は、主筋に SD345 相当の D10 を用い、せん断補強筋には SD345 相当の D6 を用いた。引張鉄筋比は 0.34% 、せん断補強筋比は 0.22% である。表-2 にコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を示す。

2.2 載荷装置および測定方法

図-2 に載荷装置全体図を示す。供試体の上下に設けた加力用のスタブを反力床に固定したベースおよび加力用 L 字ビームに PC 鋼棒で圧着し、鉛直および水平方向に追従する機構とした。水平加力は反力壁に取り付けたアクチュエータ (400 kN) を使用し、加力用 L 字ビームを介して供試体に逆対称曲げとなる正負繰返しせん断力を作用させた。また、アクチュエータの水平加力による加力 L 字ビームの回転を防ぐため、パンタグラフを設けた。軸力は、鉛直方向に取り付けた 2 機の軸力用アクチュエータ (400 kN) を用い、上下のスタブに回転が生じないように定軸力を作用させた。

荷重は、水平方向および鉛直方向のアクチュエータに組み込まれたロードセルを用いて検力した。変位は、供試体に取り付けた測定治具を用いて測定しており、水平方向の変位はレーザー変位計を用いて上下スタブ間の相対変位を測定し、軸方向の伸縮量は巻取変位計により測定した。

表-2 材料試験結果

コンクリート		鉄筋 (上段: D10, 下段: D4)	
圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (kN/mm ²)
26.05	2.99×10^4	401 365	2.03×10^5 1.72×10^5

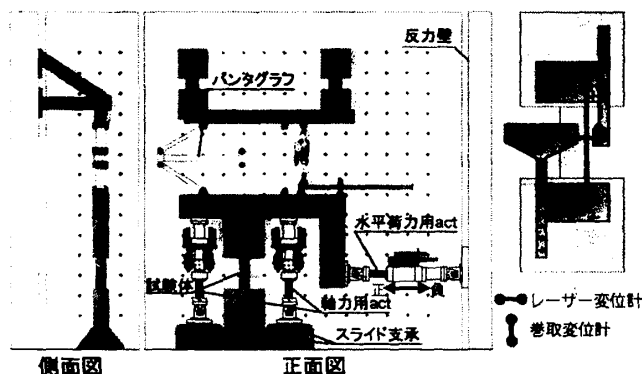


図-2 載荷装置全体図

2.3 加力スケジュールおよび画像取得のタイミング

図-3 に加力スケジュールと画像取得のタイミングを示す。BS 供試体では、部材角 $\pm 0.13\%$ (1 mm) の増分変位を順次与え、軸力保持能力の喪失を目標にして加力を行った。S 供試体では、 $\pm 0.2\%$ (1 mm) の増分変位により BS 供試体と同様の繰返し載荷を行った。なお、小振幅では 2 回の正負繰返し載荷を行い、層間変形角 $\pm 2\%$ 以降は 1 サイクルの繰返しとした。

デジタルカメラを用いた供試体表面の画像取得は、変形前 (初期状態)、各サイクルのピーク地点と除荷点 (図中の○印) およびその間 4 点 (図中の●印) において実施した。また、各サイクルのピーク点と除荷点では、スキャナによる画像取得も行った。

2.4 デジタルカメラによる画像取得方法

本研究では、筆者らが従来から用いているスキャナの他に、デジタルカメラによる画像取得を行った。主として、スキャナはひび割れ幅の計測⁵⁾に用い、デジタルカメラは、供試体の全体的な状況の撮影に使用した。

スキャナの場合、供試体表面をスキャンして画像を取得するのが特徴であり、それに係る準備や操作は極めて容易である。一方、デジタルカメラの場合、供試体から離れた場所から画像を取得するため、カメラの設置位置など十分に検討する必要がある。今回の実験では、設置角度による誤差を除去するため、カメラは供試体表面中央に対して上下左右方向に角度を持たないように設置した。カメラと被写体である供試体表面中央との距離は、実験に伴う作業スペースを確保するため、 1510 mm とした。また、被写体の幅は、載荷に伴う供試体の変形量を考慮して 400 mm とした。ここで重要な点は、カメラの焦点距離である。図-4 に焦点距離の算出法⁷⁾を示す。デジタルカメラ内の CCD (Charge Coupled Device Image Sensor) とレンズ間の距離である焦点距離 f は、CCD 面の長さ L_{CCD} 、撮影対象となる被写体の幅 L 、および被写体までの距離 H から次式によって算出される。今回使用したデジタルカメラの L_{CCD} は 7.2 mm であるため、焦点距離は 27.18 mm に設定した。

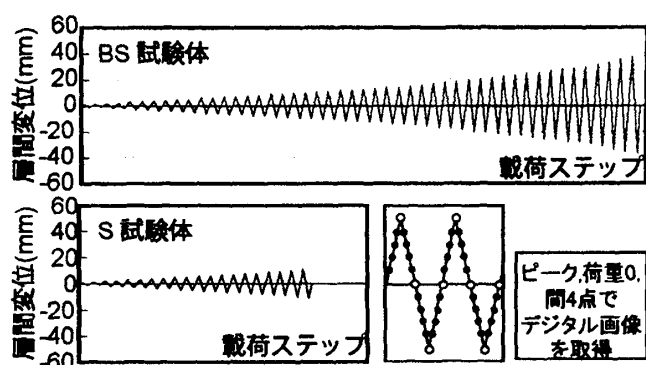


図-3 加力スケジュールおよび画像取得タイミング

$$f = \frac{L_{CCD}}{L} H \quad (1)$$

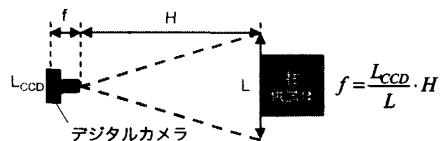


図-4 デジタルカメラの焦点距離の算出

3. 実験結果

図-5 に水平荷重 (P) 一部材角 (R) 関係を示す。BS 供試体では、R=0.2%の時に柱脚に曲げひび割れが発生し、R=0.5%の時に主筋の引張降伏が起こり柱頭に曲げせん断ひび割れが発生した。その後、主筋の圧縮降伏 (R=0.7%)、帯筋の降伏 (R=0.9%) が起こり、付着割れひび割れが柱頭に発生した。正負ともに R=1.4%の時に最大耐力に達しており、正側で 120.2 kN、負側で -121.7 kN であった。最大耐力到達後は緩やかな耐力低下を示し、R=3.0%の時に柱頭のかぶりコンクリートが崩れ落ちた。

S 供試体では、R=0.4%の時に柱脚および柱頭にせん断ひび割れが発生した。最大耐力は正側で 174.3 kN (R=0.6%)、負側で -170.8 kN (R=-0.5%) であった。また、R=0.5%の時に帯筋が降伏し、続いて部材全長に渡るせん断ひび割れが発生した (R=-0.6%)。その後、急激な耐力低下を示し、R=1.0%で主筋が圧縮降伏した。R=2.0%の時にかぶりコンクリートが剥落し、R=2.2%のサイクルの途中で急激な耐力低下と同時に軸力支持限界に至ったため、実験を終了した。

4. 画像計測に基づく変形成成分分離

本研究では、レハノラ⁸⁾の概念を参考にし、供試体表面にプロットした測定点に基づいて、実験により測定した水平変形 (δ) をせん断変形成分 (δ_{shear})、曲げ変形成分 (δ_{flex}) および主筋の抜け出しや柱端部の圧縮変形に伴う回転変形成分 (δ_{slp}) に分離する (図-6)。

4.1 せん断変形成分 (δ_{shear}) の算出方法

図-7 に δ_{shear} 計測時の測定点位置および計測 1 区間の測定点間距離に基づくせん断変形成分算定モデルを示す。なお、計測区間は、BS 供試体で 3 つ、S 供試体で 2 つであり、これはデジタルカメラの撮影範囲に基づいている。 δ_{shear} は、前田らの研究⁹⁾を参考にして、次式に示すように変形前後の対角線の相対変位から 1 区間あたりのせん断変形成分 (δ_s) を算出し、各区間の δ_s 値を合計することによって算出する。

$$\delta_{shear} = \frac{\Delta_{24} - \Delta_{13}}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

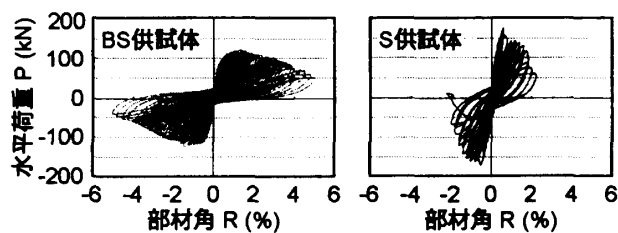


図-5 水平荷重 (P) 一部材角 (R) 関係

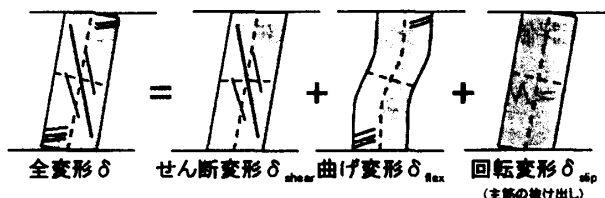


図-6 変形成成分分離の概念図

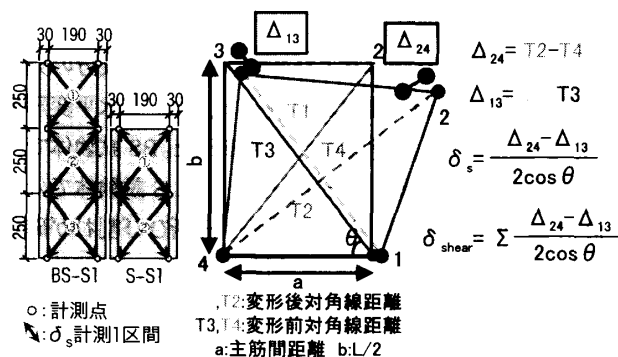


図-7 せん断変形成分算定モデル

4.2 回転変形成分 (δ_{slp}) の算出方法

本研究では、図-8 に示すように、実験時において柱脚 (柱頭) に生じたひび割れ幅の合計値 ΣW_{cb} (ΣW_{ct}) は①柱脚 (柱頭) の曲げによる主筋の伸び量 ΔL_{fb} (ΔL_{ft}) と②スタブからの主筋の抜け出し量 ΔL_{sb} (ΔL_{st}) の和によって表されると考える。主筋の抜け出しによる回転変形成分 δ_{slp} を求めるためには ΔL_{sb} を求める必要があるが、 ΣW_{cb} はデジタルカメラを用いた画像計測により評価可能であるため、ここでは ΔL_{fb} の算出法について検討する。

本研究では、主筋の抜け出しが生じていない柱の変形状態 ($\Delta L_{sb}=0$) を想定し、単純化のために塑性ヒンジ領域内に含まれる鉄筋に生じた歪によりひび割れ ΣW_{cb} が生じると考える。これにより、ヒンジ領域内に含まれる主筋に貼付した 2 つの歪ゲージの測定値に基づいて、次式により ΔL_{fb} を算出することができる。

$$\Delta L_{fb} = \varepsilon_{b1} \cdot y + \varepsilon_{b2} \cdot (l_p - y) \quad (3)$$

ここで、 ε_{b1} , ε_{b2} : ヒンジ領域内に含まれる主筋に貼付された歪ゲージの測定値、 y : 歪ゲージ貼付間隔、 l_p : ヒンジ領域長さ¹⁰⁾であり、次式によって算出する。

$$l_p = 0.5(M/QD)d \quad (4)$$

ここで、 M/QD ：せん断スパン比、 d ：有効せい。

本研究では、最終的に、図-9に示すように δ_{slip} を次式によって算出する。

$$\delta_{shear} = \frac{\Delta L_{sb} - \Delta L_{fb}}{2(d-x)} L \quad (5)$$

ここで、柱端の主筋抜け出し量は上下端の値 (ΔL_{fb} , ΔL_{sb}) の平均値を評価した。なお、中立軸深さ (x) は耐震性能評価指針¹⁾に基づいて次式により算出した。

$$x = N / 0.85b\sigma_B \quad (6)$$

また、中立軸深さを一定としているが、これは単純化のためであり、実験において早期に柱頭・柱脚部にひび割れが確認されたことから妥当であると考えられる。

4.3 変形成成分分離結果

図-10にBS試験体およびS試験体の変形成成分の分離結果を示す。なお、曲げ変形成分 δ_{flex} は、全水平変形量 δ から δ_{shear} と δ_{slip} を差し引いて評価した。BS試験体では終始 δ_{slip} の割合が多くなっている。一方、S試験体では、最初 δ_{flex} の割合が多いが、顕著なせん断ひび割れが確認された $R=0.6\%$ 以降は δ_{shear} の割合が増加し、最終的には約8割を占める結果となった。

5. ひび割れ幅に基づく変形成成分の推定

5.1 ひび割れ幅の定義

図-11に本研究におけるひび割れ幅の定義を示す。せん断ひび割れに関しては、ひび割れ直交方向の幅をせん断ひび割れ幅 W_s とし、主筋間範囲に発生したせん断ひび割れの最大幅を最大せん断ひび割れ幅 $max W_s$ 、各せん断ひび割れの最大幅の合計を合計せん断ひび割れ幅 ΣW_s とする。一方、曲げひび割れ幅に関しては、断面の最外縁におけるひび割れ幅を W_f とし、全曲げひび割れの最大幅を最大曲げひび割れ幅 $max W_f$ 、各曲げひび割れの最大幅の合計を合計曲げひび割れ幅 ΣW_f と定義した。

5.2 せん断ひび割れ幅に基づくせん断変形成成分の推定

耐震性能評価指針¹⁾で提案されているせん断ひび割れ幅に基づくせん断変形の推定モデルでは、剛体がせん断ひび割れ方向の直交方向に変位すると仮定しており、 ΣW_s と δ_{shear} の関係を次式で表している。

$$\delta_{shear} = \Sigma W_s \cdot \cos \theta \quad (7)$$

ここで、 θ ：最も卓越したせん断ひび割れの角度である。一方、筆者ら¹¹⁾は図-12に示すモデルを提案している。提案モデルでは、最も卓越したせん断ひび割れが発生している長方形領域に、せん断スパン内のすべてのせん断ひび割れを集約した一本のせん断ひび割れを仮定する。

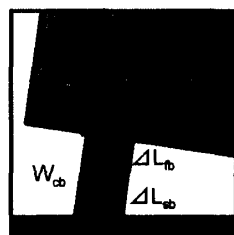


図-8 柱下端に生じたひび割れ幅の概念

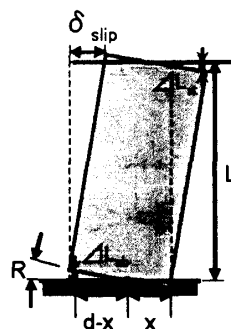


図-9 δ_{slip} の算出方法

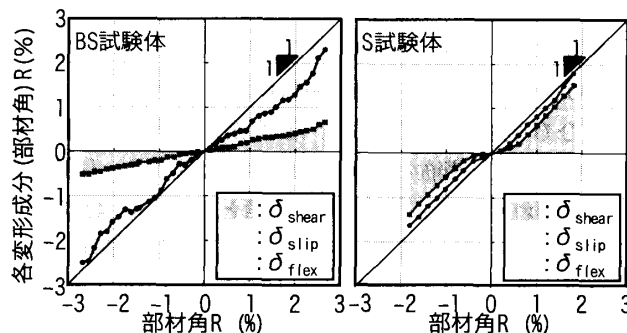


図-10 変形成成分分離結果

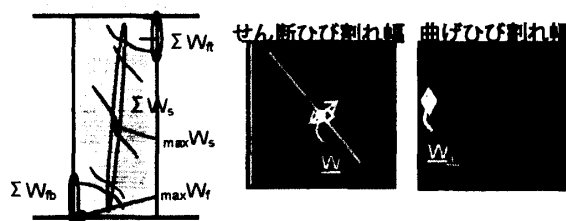


図-11 本研究におけるひび割れ幅の定義

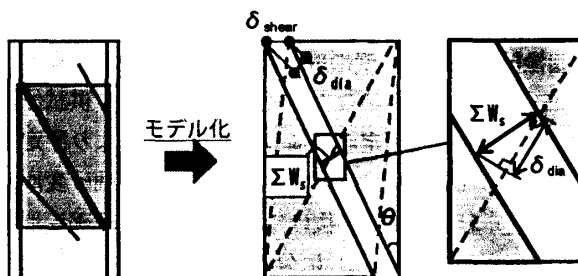


図-12 提案モデルの概念図

せん断ひび割れ幅の増大に伴う対角線の伸び (δ_{dia}) からせん断変形成分 δ_{shear} を推定する本手法では、最終的に次式が導かれる。

$$\delta_{shear} = \frac{2\Sigma W_s}{\sqrt{\tan^2 \theta + 1}} \quad (8)$$

図-13に、BS供試体およびS供試体に関して、実験から評価したせん断変形成分（実験値）と ΣW_s から求めたせん断変形成分の比較を示す。本実験では、評価対象のひび割れ幅以外に、反対方向載荷時に生じたひび割

れ幅が残留しているのが観測された。しかし、指針モデル、提案モデルとも一方向の載荷で生じたひび割れのみの評価である。そこで、図-14に示すように、提案モデルによる δ_{shear} 推定値から反対方向載荷時に生じたひび割れによる δ_{shear} 推定値を差し引くことで正負繰り返し載荷の影響を考慮したモデルを提案する（修正提案モデル）。その結果、両供試体において実験値を良好に模擬する結果となった。

5.3 曲げひび割れ幅に基づく曲げ変形成分の推定

耐震性能評価指針では、ひび割れの開きによる曲げ変形機構を仮定し、次式によって ΣW_f から δ_{flex} を評価している。

$$\delta_{flex} = \frac{\Sigma W_f}{(D-x)} L \quad (9)$$

ここで、D：柱せい、x：中立軸深さ、L：内法スパンである。なお、除荷時は $x = 0$ mm とする。

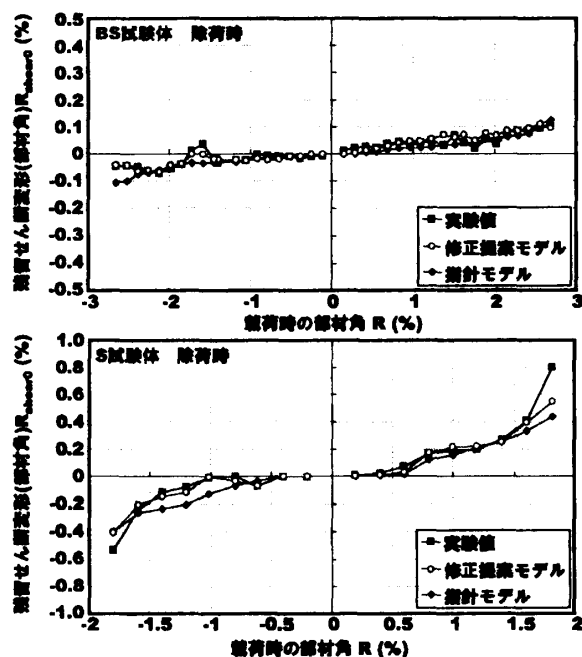


図-13 せん断変形成分の推定モデルの検証

評価するひび割れとは、反対方向の載荷時に生じたひび割れ幅が残留

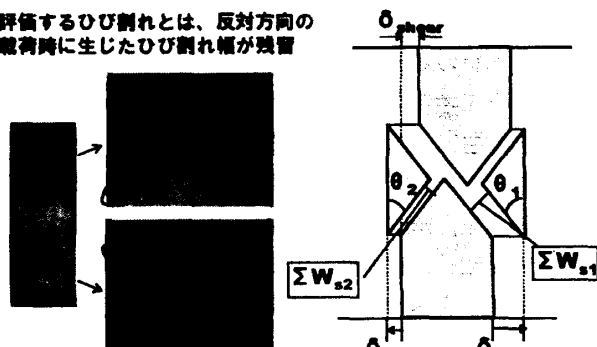


図-14 正負繰り返し載荷の影響を考慮したモデル

図-15に、BS供試体を対象として、実験から評価した曲げ変形成分（実験値）と ΣW_f から計算した曲げ変形成分（指針モデル）および正負繰り返し載荷の影響を考慮するために反対側の残留曲げひび割れ幅の影響を考慮した値（修正指針モデル）の比較を示す。せん断変形成分の場合と同様に、正負繰り返し載荷の影響を考慮することにより、残留曲げ変形を推定できた。

6. ひび割れ幅に基づく損傷評価法の検討

図-16にBS供試体およびS供試体に関して評価した合計残留ひび割れ幅（ ΣW_{f0} , ΣW_{s0} ）と耐震性能低下係数（ η ）の関係を示す。なお、 η は実験から得られた各供試体の荷重-変形関係から消費エネルギー（ E_f ）と残余エネルギー吸収能力（ E_r ）を評価して算出した。図より、BS供試体の場合は ΣW_{f0} 値、S供試体の場合は ΣW_{s0} 値と η の間に相関性が確認できる。これは、地震被害を受けたRC造柱において、破壊モードに対応した残留合計ひび割れ幅を計測することにより、概ね残余耐震性能を推定可能であることを示している。

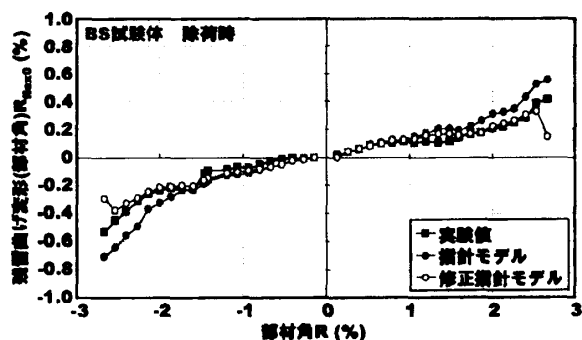


図-15 曲げ変形成分の推定モデルの検証

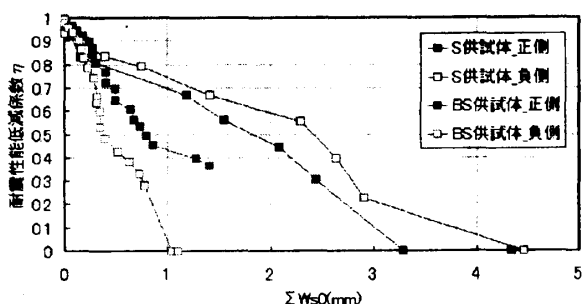
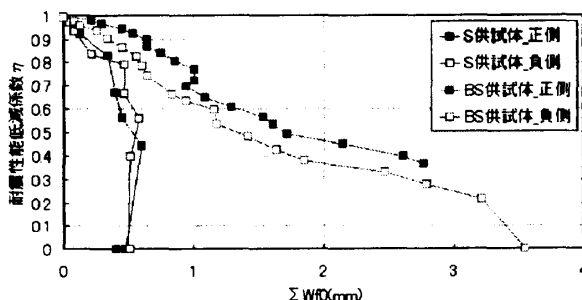


図-16 合計残留ひび割れ幅（ ΣW_{f0} , ΣW_{s0} ）- η 関係

合計残留ひび割れ幅から η を評価して残余耐震性能を評価する場合、損傷前の状態に対する損傷後の性能低下度合いが求められるのみであり、物理量である E_c や E_r の評価は困難である。合計残留ひび割れ幅からこれらの値を評価するためには、部材の復元力特性を仮定するとともに、部材が経験した最大変形量を推定する必要がある。本研究では、すでに合計ひび割れ幅に基づいた変形推定法を構築しているため、残留ひび割れ幅と荷重作用時のひび割れ幅の関係性を求めることができれば、①合計残留ひび割れ幅 → ②荷重作用時のひび割れ幅の合計値 → ③荷重作用時の変形量の順番で部材が経験した最大変形量を推定できる。

図-17にBS供試体およびS供試体において評価した合計残留ひび割れ幅と荷重作用時のひび割れ幅の合計値の関係を示す。S供試体の場合、せん断ひび割れと曲げひび割れに共通して、合計残留ひび割れ幅と荷重作用時のひび割れ幅の合計値の間に線形関係が成立しており、その関係性は図中の傾きのとおりである。一方、BS供試体の場合も両者の間に相関性が認められ、最大荷重到達以前と以後で傾きが異なる二直線で両者の関係を模擬できた。曲げ・せん断ともに、最大荷重到達までは約4倍、最大荷重到達後は約2倍することで合計残留ひび割れ幅から載荷時の合計ひび割れ幅が推測される結果となった。

7. まとめ

- (1) デジタルカメラを用いた画像計測に基づき、柱部材の変形成分を分離する手法を構築した。
- (2) ひび割れ幅に基づいて、柱部材の変形成分を評価する手法を構築した。除荷時においては、残留ひび割れ幅の評価に注意が必要である。

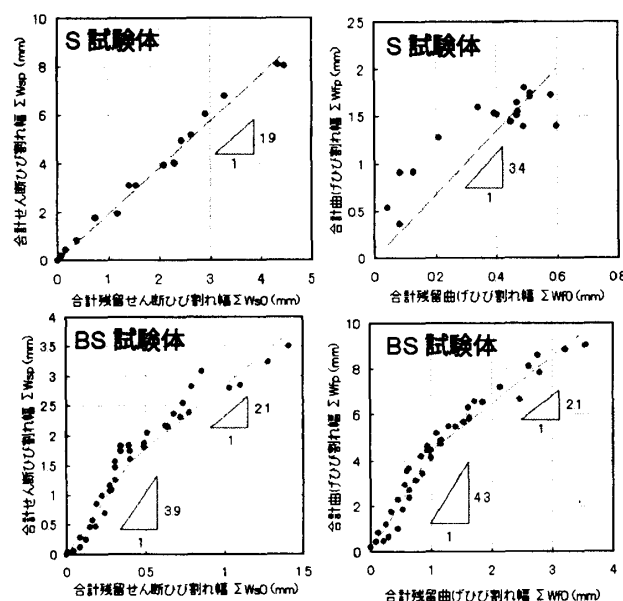


図-17 載荷時および除荷時の合計ひび割れ幅の関係

- (3) 破壊モードに対応した残留合計ひび割れ幅を計測することにより、柱部材の残余耐震性能を評価できる。
- (4) 合計残留ひび割れ幅と載荷時合計ひび割れ幅の間には、供試体の破壊モードによる違いはあるが、相関性が確認できた。

謝辞

本研究の一部は文科省学術フロンティア推進事業（日本大学理工学部）：研究課題「環境・防災都市に関する研究（研究代表者：石丸辰治）」の一環として実施したものであり、一部は科学研究費補助金（基盤研究(C) 代表者：白井伸明）および日本大学学術研究助成金（奨励研究、代表者：田嶋和樹）の助成を受けて行われたものである。また、研究の遂行にあたり、日本大学理工学部の安達洋教授、中西三和教授および横浜国立大学の田才見教授、楠浩一准教授より多くの助言を受けた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説，2004.1
- 2) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説，2001.10
- 3) 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，2001.9
- 4) 大久保全陸：ひび割れに関する実験資料の整理・利用方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.16，pp.425-428，1984
- 5) 田嶋和樹，白井伸明，渡部憲：コンクリートのひび割れ幅の計測と予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.145-150
- 6) 中村隆大，田嶋和樹，白井伸明：曲げ破壊する RC 梁部材のひび割れ計測結果に基づく損傷評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.325-330
- 7) 村木宏和，田中成典，古田均：デジカメ活用によるデジタル測量入門，森北出版，
- 8) レハノベルナルド，安達洋，白井伸明，中西三和：高軸力及び変動軸力を受ける鉄筋コンクリート造柱の変形性状，日本建築学会構造系論文集，No.467，pp.93-104，1995
- 9) 前田匡樹，有蘭祐介，幸村信行：鉄筋コンクリート梁部材の変形評価法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.2，pp.861-866
- 10) 吉岡研三，岡田恒男，武田寿一：鉄筋コンクリート柱の変形性能向上に関する研究，日本建築学会論文報告集，No.282，pp.37-45，1979
- 11) 石森昭行，杉太地，田嶋和樹，白井伸明：スキャナを用いた変位およびひび割れ幅計測結果に基づく RC 部材の損傷評価，日本建築学会学術講演梗概集，2007