

論文 局所損傷の実測値に基づく RC 建造物の全体損傷評価

西尾 淳*¹・田嶋 和樹*²・白井 伸明*³

要旨： RC 建造物の局所損傷と全体損傷の關係に着目し、既報の RC 造柱ならび十字型架構の実験を再検証した。その結果、RC 造柱においては、ひび割れ幅（曲げ，せん断）を用いて塑性率や耐力低下率などの全体応答を推定できることを示した。また，十字型架構においては，構成部材である梁端部の応力中心間距離の減少が架構全体の耐力低下に顕著な影響を与えており，その減少傾向が実測可能な剥落領域長さの変化と關係性が高いことを示した。

キーワード： 局所損傷，全体損傷，損傷評価，ひび割れ幅，剥落領域長さ，画像計測

1. はじめに

国内では，損傷評価手法として「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説」¹⁾（以下，耐震性能評価指針）や「既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準・同解説」²⁾（以下，耐震診断基準）および「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」³⁾（以下，被災度区分判定基準）等の規基準が整備されている。一方，海外でも PEER が提案する建造物の性能評価に関する方法論⁴⁾の中で，損傷評価が経済的な損失評価に至るまでの重要なステップとして位置付けられている。

従来の損傷評価手法⁵⁾⁶⁾の多くは，構造物全体の損傷を層の損傷に基づいて決定し，層の損傷を部材の損傷に基づいて決定する。これは，局所損傷と全体損傷の考え方に基づいている。しかし，従来の損傷評価法においては，局所損傷と全体損傷の關係に関する検討が十分でない。

部材の損傷評価に関しては，既往の研究の多くは Park⁷⁾の手法に代表されるように，塑性率やエネルギー吸収能力に基づいて行われている。これらは部材全体の応答値であり，これらの応答値に影響を及ぼす局所的な損傷については十分な議論が行われていない。耐震性能評価指針や被災度区分判定基準にはひび割れ幅が計測可能な局所損傷として導入され，部材の耐震性能低下係数や損傷度との關係が導かれている。しかし，せん断破壊が生じる部材に関する検討が不足している状況である。

一方，層の損傷を部材損傷に基づいて評価する場合，層の損傷が全体損傷，部材の損傷が局所損傷となる。この場合，部材損傷の重み付き平均を用いたり，損傷度ごとに部材の比率を求め，それに応じて層の損傷を定める手法が提案されている。しかし，重み付けの方法や比率の決定方法など検討すべき点が多く残されている。

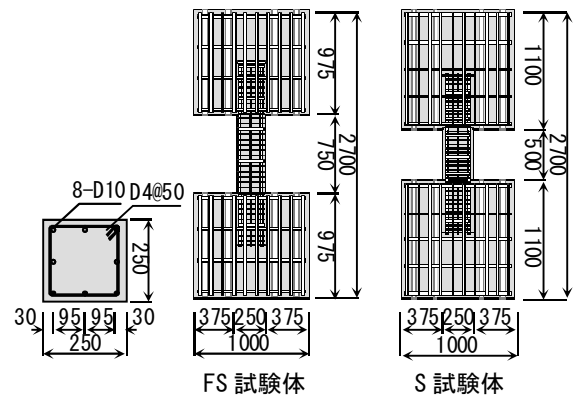
本研究では，局所損傷が全体損傷に及ぼす影響に関するケーススタディとして，既報の RC 造柱⁸⁾および十字

型架構⁹⁾の実験を損傷評価の観点から再検証する。特に，実測可能な局所損傷であるひび割れ等に着目し，それらが部材および層の損傷に及ぼす影響について検討する。

2. 部材の局所損傷と全体応答の關係

2.1 実験概要

ここでは，既報の RC 造柱の静的正負交番水平載荷実験⁸⁾を再検証する。図-1 に試験体概要を示す。試験体の破壊モードは，曲げ降伏後にせん断破壊を起こす FS 試験体およびせん断破壊を起こす S 試験体である。図-2 に水平荷重一部材角關係を示す。また，試験体の損傷状況を図-3 に示す。FS 試験体では，部材角 $R=0.2\%$ 時



試験体名称	主筋	せん断補強筋	定軸力(kN)	軸力比
FS	8-D10 (SD345)	D4@50 (SD345)	325	0.20
S	$P_t: 0.15\%$	$P_w: 0.22\%$	250	0.15

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

図-1 試験体概要

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科助教 (正会員)

*3 日本大学 理工学部建築学科教授 (正会員)

に部材端部に曲げひび割れが発生した。 $R=0.5\%$ 時には主筋の引張降伏が起り、柱頭柱脚部に曲げせん断ひび割れが発生した。その後、せん断ひび割れが拡大し、 $R=0.9\%$ 時にせん断補強筋が降伏して最大耐力を迎えた。その後、緩やかな耐力低下を示し、終局に至った。一方、S試験体では、 $R=0.4\%$ 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 $R=0.6\%$ 、負側で $R=-0.5\%$ であった。 $R=0.5\%$ 時にはせん断補強筋が降伏し、部材全長に渡るせん断ひび割れが発生した。その後、急激な耐力低下を示し、軸力支持限界に至った。

また、実験中は、スキャナおよびデジタルカメラを用いて試験体の破壊状況の画像を取得した。なお、高解像度の画像が取得できるスキャナはひび割れ幅の計測に用い、デジタルカメラは試験体の変形成分(曲げ、せん断)を算出するために使用した。なお、デジタルカメラは、設置角度による誤差を除去するため、試験体表面中央に対してカメラが上下左右方向に角度を持たないように設置し、試験体を定点観測した。

図-4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の最大幅をせん断ひび割れ幅 W_s とし、各せん断ひび割れ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の最大幅を W_f とし、各曲げひび割れ幅の合計を合計曲げひび割れ幅 ΣW_f と定義した。これ以降、 ΣW_s をせん断ひび割れ幅、 ΣW_f を曲げひび割れ幅と呼ぶことにする。

試験体の変形成分の算出においては、試験体表面にプロットした測定点に基づいて、実験より測定した水平変形(δ)をせん断変形成分(δ_{shear})と曲げ変形成分(δ_{flex})に分離する。図-5に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、FS試験体が3区間、S試験体が2区間であり、これはデジタルカメラの撮影範囲に基づいている。このモデルを利用して、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 δ_{shear} を算出する。一方、曲

げ変形成分(δ_{flex})は水平変形(δ)からせん断変形成分(δ_{shear})を差し引くことで算出した。

2.2 FS試験体における局所損傷と全体応答の関係

曲げ降伏後にせん断破壊するFS試験体の全体応答に影響を及ぼす局所損傷として、曲げひび割れ、せん断ひび割れ、曲げ変形成分、せん断変形成分を考える。なお、ひび割れ幅に関しては、残留ひび割れ幅と載荷時ひび割れ幅が考えられるが、図-6に示すように両者の間には良好な関係性が認められるため、ここでは載荷時ひび割れ幅を用いることにする。また、各ひび割れ幅と変形成分の関係(図-7)も同じく良好な関係性が見られるため、

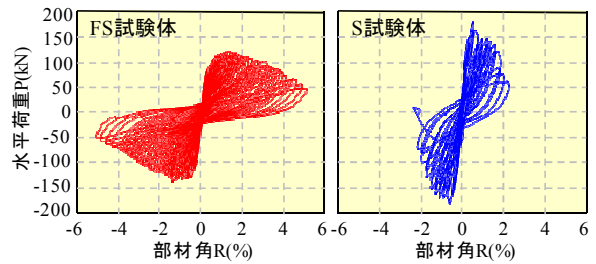
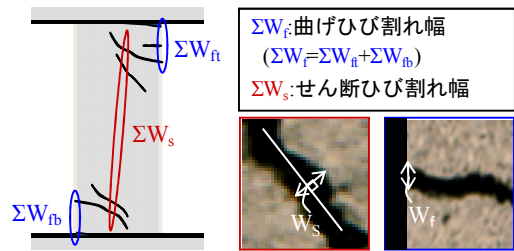


図-2 水平荷重一部材角関係



せん断ひび割れ幅 曲げひび割れ幅

図-4 ひび割れ幅の定義

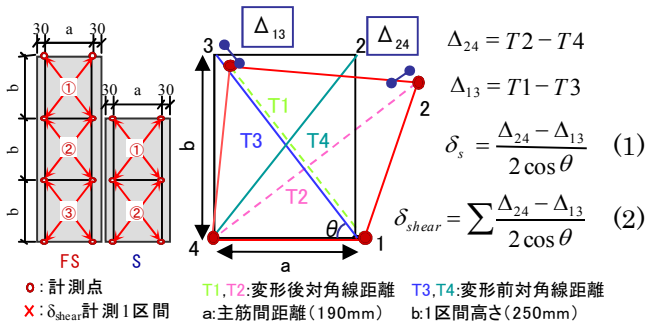


図-5 せん断変形成分算出モデル

FS試験体	部材角(%)					S試験体			
	0.3	0.5	0.9	1.3	5.0	0.4	0.6	0.8	2.2
損傷状況									
	柱頭・柱脚に曲げひび割れ	主筋の降伏 曲げせん断ひび割れ	せん断補強筋の降伏	最大耐力	最終破壊状況	柱頭柱脚にせん断ひび割れ	最大耐力 せん断補強筋の降伏	せん断ひび割れ	最終破壊状況

図-3 試験体の損傷状況

載荷時のひび割れ幅に着目して全体損傷との関係について検討を進めることにする。

一方、全体応答としては、部材角、規準化塑性率($(\mu_u - \mu) / \mu_u$)、耐力低下率(Q_i / Q_{max})、剛性低下率(K_i / K)、耐震性能低下係数 η を取り上げる。ここで、 μ ：塑性率(=最大応答変形/降伏時変形)、 μ_u ：終局塑性率(=終局変形/降伏時変形)、 Q_i ：せん断力、 Q_{max} ：最大耐力、 K_i ：再負荷時剛性、 K ：初期剛性である。なお、塑性率を規準化した理由は、異なる破壊モードを有する部材に対して同等の評価を行うためである。また、本研究では便宜的に終局変形を最大耐力後に4割まで耐力低下した点($R=5.0\%$)と設定した。

図-8に曲げひび割れ幅と各全体応答との関係を示す。いずれの全体応答も、曲げひび割れ幅と高い関係性が確認できる。部材角、規準化塑性率および耐震性能低下係数は直線で、耐力低下率は2次関数で、剛性低下率は対数曲線で近似が可能である。また、正側と負側の相違もないことから、曲げひび割れ幅を計測することにより、柱の全体応答を予測できる可能性がある。特に、部材角や塑性率といった変形応答を予測できることは、層の応答を予測する上でも有意である。しかし、ひび割れ幅と全体応答の関係は静的繰返し実験結果を基に算出しているため、今後は地震動のような正負非対称な損傷を受けた場合の検討が必要である。

図-9にせん断ひび割れ幅と各全体応答との関係を示す。曲げひび割れ幅同様、いずれの全体応答もせん断ひび割れ幅と高い関係性が確認できる。また、耐力低下率や耐震性能低下係数においては、せん断補強筋の降伏と対応するせん断ひび割れ幅1.5mm近辺で低下度合いが一時的に顕著になるとともに、正側と負側の傾向が異なり始めている。

2.3 S試験体における局所損傷と全体応答の関係

せん断破壊を起こすS試験体の局所損傷としては、せん断ひび割れ幅、せん断変形成分を考える。FS試験体と同様に、残留せん断ひび割れ幅-載荷時せん断ひび割れ幅関係および載荷時せん断ひび割れ幅-せん断変形成分関係には高い関係性が確認されたため、載荷時せん断ひび割れ幅に着目する。一方、全体応答(損傷)は、FS試験体と同じとする。また、S試験体では塑性率(=最大応答変形/最大耐力時の変形)、終局塑性率(=終局変形/最大耐力時の変形)とした。なお、終局変形は軸力保持限界時の変形($R=2.2\%$)を終局変形と設定しており、FS試験体と同様に最大耐力後に4割まで耐力低下した点である。

図-10にせん断ひび割れ幅と各全体応答との関係を示す。FS試験体同様、せん断ひび割れ幅と全体応答の関係性は高く、部材角、規準化塑性率および耐震性能低下係数は概ね直線で、剛性低下率は対数曲線で、耐力低下

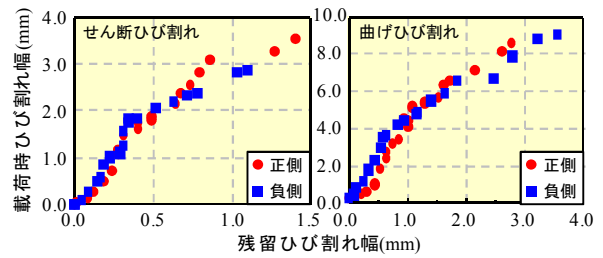


図-6 載荷時ひび割れ幅-残留ひび割れ幅関係

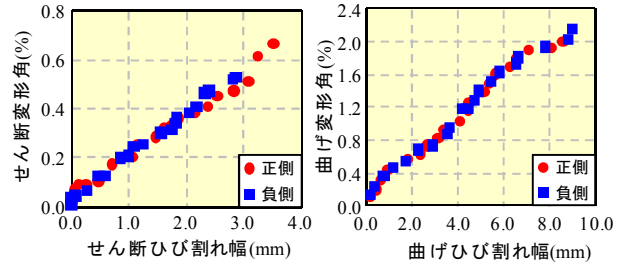


図-7 載荷時ひび割れ幅-変形成分関係

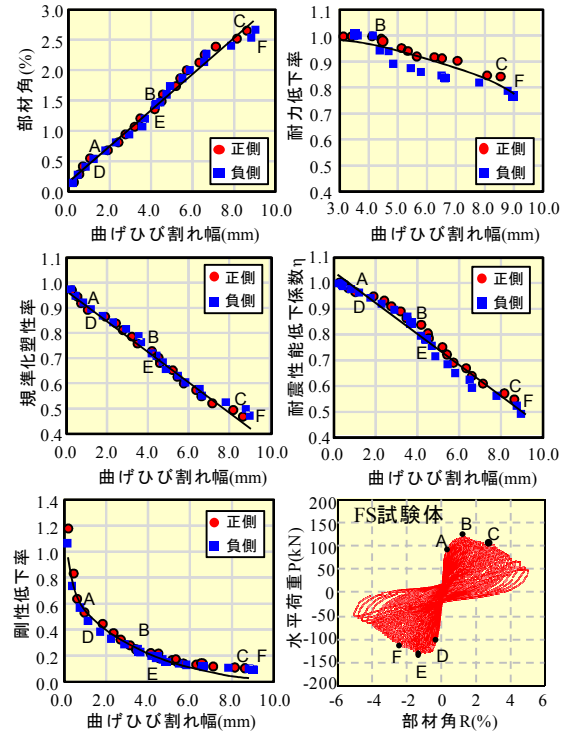


図-8 曲げひび割れ幅-全体応答関係

率は2次関数で近似が可能である。

2.4 FS試験体とS試験体の比較・考察

破壊モードが異なる2体の試験体に対して、曲げひび割れ幅およびせん断ひび割れ幅を局所損傷として設定すれば、部材の全体応答を推定可能であることが確認できた。このことは、例えば被災した建物において、柱の曲げおよびせん断ひび割れ幅を計測することにより、概ねその残余性能を評価できる可能性を示しており、損傷評価においてひび割れ幅を利用することの妥当性が確認できる。また、せん断ひび割れ幅と全体応答(損傷)の関係は、若干のバラつきは認められるものの、剛性低下率を除けば破壊モードによらず評価式を統一できる可能性が高いと考えられる。

3. 部材損傷と層の応答の関係

3.1 実験概要

ここでは、既報の RC 造柱梁接合部実験⁹⁾を梁-柱-接合部パネルからなる十字型架構の実験として再検証し、層の応答と部材損傷の関係について検討する。

図-11 に試験体概要を示す。試験体は無偏心柱梁接合部試験体であり、梁に載荷する方式で正負繰返し載荷実験を行った。また、スキャナおよびデジタルカメラを用いて試験体の破壊状況の画像を取得し、ひび割れ幅および接合部パネルのせん断変形を算出した。

図-12 に層せん断力-層間変形角の関係、図-13 に試験体の損傷状況を示す。層間変形角 $R = \pm 0.2\%$ 時に梁に数本の曲げひび割れが発生し、 $R = \pm 0.4\%$ 時に接合部にせん断ひび割れが発生した。その後、接合部せん断補強筋の降伏 ($R = +0.8\%$)、梁主筋の引張降伏 ($R = +1.3\%$) が起こった。また、 $R = \pm 2.0\%$ で梁端部における圧壊が発生した。正負ともに $R = 2.0\%$ にて最大耐力に達しており、正側で 147kN、負側で -139kN であった。最大耐力到達後は緩やかな耐力低下を示し、正負ともに主要な接合部せん断ひび割れが拡幅し、柱部分にまで進展した。梁端部における圧壊も進展し、同時に剥落が発生した。破壊モードは曲げ降伏後の接合部せん断破壊 (BJ モード) であると考えられる。

3.2 十字型架構の各部の損傷

柱、梁、接合部パネルによって構成される十字型架構において、各部材の損傷が架構の全体応答に及ぼす影響を検討する。ここでは、特に架構の全体応答として耐力低下率に着目する。

3.2.1 梁の損傷

図-14 に梁に作用するせん断力-部材角関係を示す。梁は最大耐力に到達した後、緩やかな耐力低下を示している。これは、塩原ら¹⁰⁾が指摘しているように、接合部内の梁主筋の付着劣化によって圧縮側主筋の引張転化が起こり、梁端部での応力中心間距離が減少することに起因していると考えられる。このことは、筆者らの既往の研究¹¹⁾においても、FEM 解析によって確認されている。実験結果より次式を用いて応力中心間距離を求めた。

$$J = M_b / (\sum a_t \cdot \sigma_s) \quad (1)$$

ここで、 M_b : 梁危険断面位置のモーメント、 a_t : 梁主筋断面積、 σ_s : 梁主筋応力度である。梁主筋応力度は、すべての梁主筋危険断面位置に貼付したひずみゲージの値を Ciampi モデル¹²⁾によって応力変換し求めた。図-15 に実験結果から求めた梁端部の応力中心間距離の変化を示すが、変形の増大に伴って減少する傾向が確認できる。また、応力中心間距離と梁の耐力低下率には高い関係性が確認できる (図-16)

しかし、このような梁端部における応力中心間距離の

変化を実際に求めることは困難である。そこで、応力中心間距離に置き換えることが可能な関係性の高い局所損傷を検討する。図-17 に応力中心間距離-梁端部における剥落領域長さ関係を示す。剥落領域長さは、梁端部の圧壊に伴ってかぶりコンクリートが剥落した領域における梁せい方向の長さを計測したものである。両者の

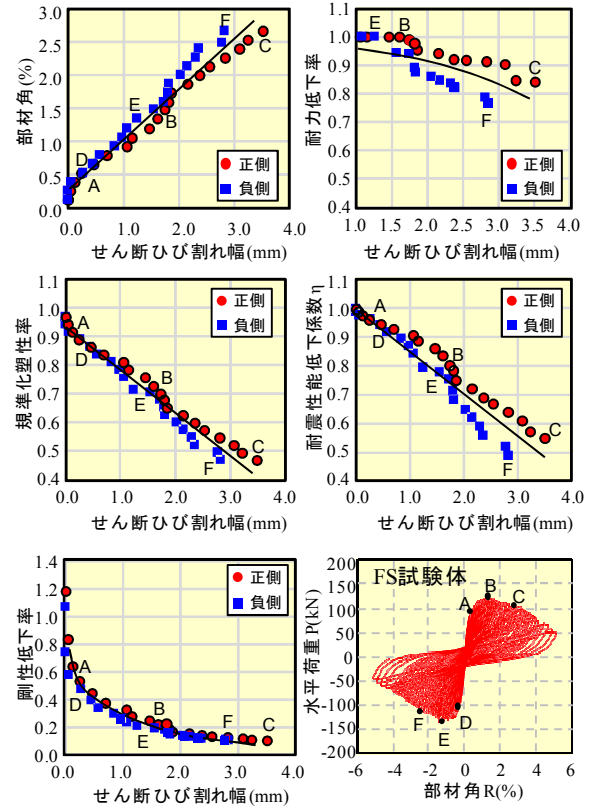


図-9 せん断ひび割れ幅-全体応答関係

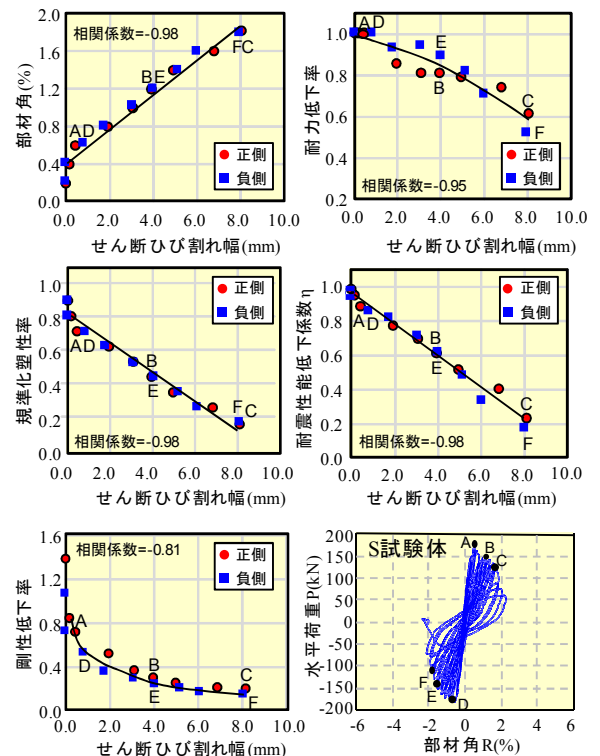


図-10 せん断ひび割れ幅-全体応答関係

関係性は高く、応力中心間距離の変化を剥落領域長さの変化に置き換えても、耐力低下率との関係を良好に表現することができた(図-18)。

3.2.2 柱の損傷

図-19 に柱に作用するせん断力-層間変形角関係を示す。梁同様、最大耐力後に緩やかな耐力低下が確認されるが、柱の上下でやや異なる傾向が確認できる。柱には、曲げひび割れや、接合部パネルに生じたせん断ひび割れが進展した縦ひび割れが発生した。図-20 にこの縦ひび割れ幅と柱の耐力低下率の関係を示す。概ね両者は対応しているが、関係性が高いとは言い難い。また、柱の主筋や帯筋が降伏しておらず、明確なせん断ひび割れが生じていないことから考察すると、柱に見られる耐力低下は、梁の耐力低下に伴って入力されるせん断力が減少したことが原因であると考えられる。

3.2.3 接合部パネルの損傷

接合部パネルの損傷を評価するにあたり、接合部せん断力と接合部せん断変形角の関係を求める。既報⁹⁾の通り、以下の式を用いて接合部せん断力の評価した。

$$V_j = \sum a_i \sigma_s + \sum a'_i \sigma'_s - V_c \quad (2)$$

ここで、 a_i, a'_i : 梁上端および下端主筋の断面積、 σ_s, σ'_s : 梁主筋引張応力度、 V_c : 層せん断力である。一方、接合部せん断変形角は図-5 に示したせん断変形算定モデルを利用し、試験体表面にプロットした測定点に基づいて、変形前後の計測区間の対角線の相対変位を画像計測より求めて算出した。図-21 に接合部せん断力-接合部せん断変形角関係を示す。接合部パネルにおいては耐力低下が生じていないことが確認できる。最も顕著にせん断ひび割れが発生した接合部パネルにおいて耐力低下が確認されないということは、ひび割れ幅を損傷評価に適用する際の注意点を与えていると考えられる。すなわち、RC 構造物の表面に現れるひび割れは、損傷に対して有意なものだけではないことを示しており、損傷評価の際には有意なひび割れを特定する手段が必要であると考えられる。

3.2.4 十字型架構の損傷評価に関する考察

十字型架構の各部(梁、柱および接合部パネル)の損傷を検討した結果、十字型架構の耐力低下に関しては梁

の影響が顕著であると考えられる。このことは、図-22 に示す梁端の剥落領域長さ-十字型架構の耐力低下率関係を見ても明らかである。

今回の検証結果は、十字型架構という限られた範囲の

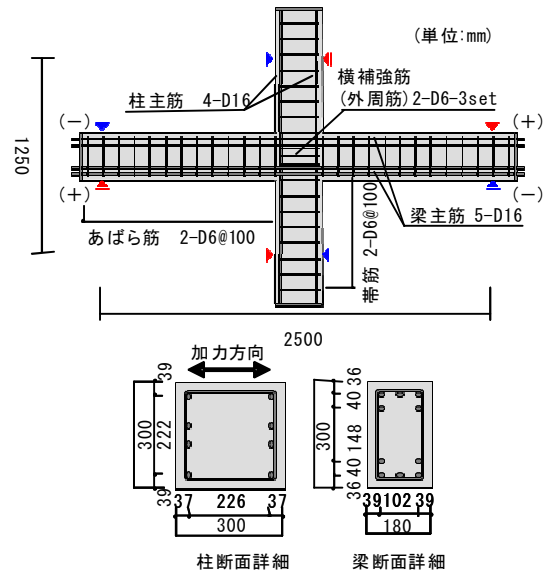


図-11 試験体概要

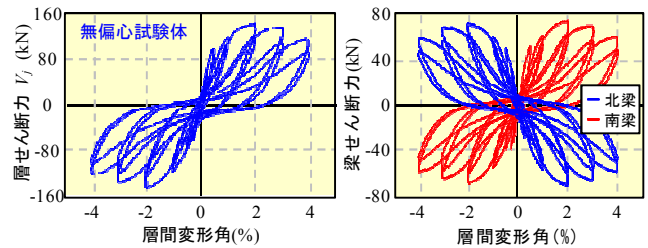


図-12 層せん断力-層間変形角関係

図-14 梁せん断力-層間変形角関係

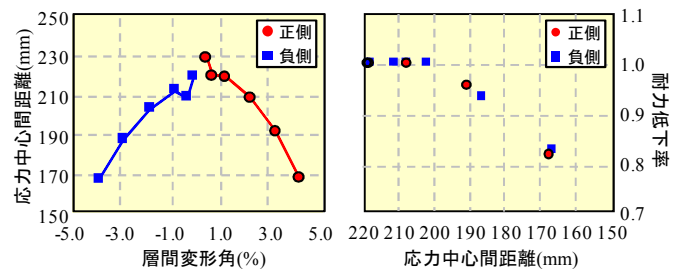


図-15 応力中心間距離の変化

図-16 耐力低下率-応力中心間距離関係

層間変形角 (%)	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
損傷状況					
	パネル部にせん断ひび割れ	接合部せん断補強筋の降伏	梁端で圧壊最大耐力	かぶりコンクリートの剥落	最終破壊状況

図-13 試験体の損傷状況

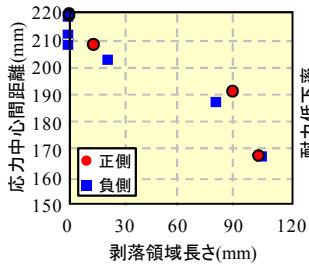


図-17 剥落領域長さ－
応力中心間距離関係

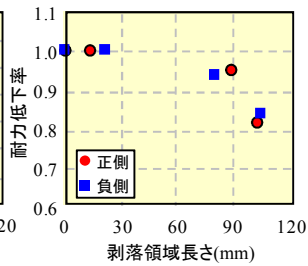


図-18 剥落領域長さ－
耐力低下率関係

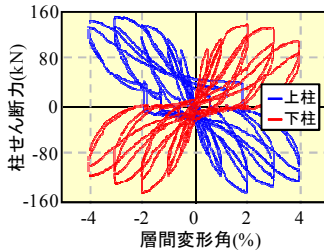


図-19 柱せん断力－層
間変形角関係

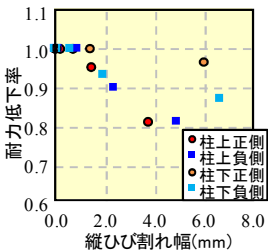


図-20 耐力低下率－縦
ひび割れ幅関係

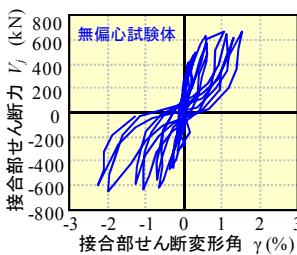


図-21 接合部せん断力
－せん断変形角関係

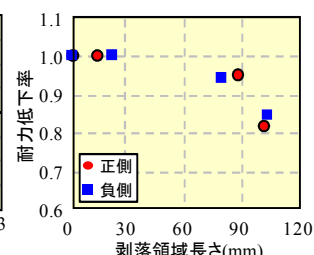


図-22 十字型架構の耐
力低下率－剥落領域長さ
関係

結果ではあるが、有意な局所損傷を評価することにより架構全体の応答を評価できることを示している。したがって、部材や層の損傷は、様々な局所損傷を平均的に評価するのではなく、部材や層の損傷に顕著な影響を及ぼす局所損傷を抽出し、その影響度合いに応じて適切な重み付け手法を検討する必要がある。また、今回の検討においては、計測可能な局所損傷に基づいて損傷量と応答の検討に重点を置いたが、地震入力の影響に対する考察も必要不可欠である。今後は、多層構造物において地震入力－応答－損傷量の関係に着目し、部材－層－構造物全体の損傷の関係性について検討する必要がある。

4. まとめ

- (1) 曲げ降伏後のせん断破壊型およびせん断破壊型のRC柱においては、ひび割れ幅(曲げ, せん断)を用いて塑性率や耐力低下率などの全体応答を推定できる
- (2) 曲げ降伏後にせん断破壊する十字型架構においては、梁端部の応力中心間距離の減少が架構全体の耐力低下に顕著な影響を与え、その減少傾向は実測可

能な剥落領域長さの変化と関係性が高い。

- (3) 今後、部材や層の損傷に影響を及ぼす局所損傷を抽出する手法ならびにその影響度合いに応じて適切な重み付けを行う手法を確立する必要がある。

謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金(基盤研究(C) 代表者: 白井伸明)の助成を受けて行われたものである。

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) Krawinkler H., Porter K., et al. : Van Nuys Hotel Building Testbed Report : Exercising Seismic Performance Assessment, PEER Report 2005/11, 2005.10
- 5) 田嶋和樹：鉄筋コンクリート部材を対象とした地震損傷評価に関する研究の動向, コンクリート工学, Vol.45, No.4, pp.45-50, 2007
- 6) 田嶋和樹：鉄筋コンクリート構造物全体を対象とした地震損傷評価に関する研究の動向, コンクリート工学, Vol.46, No.2, pp.77-82, 2008
- 7) Park, Y.-J., Ang, A.H.-S. : Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.4, pp722-739, 1985.4
- 8) 田嶋和樹, 白井伸明, 石森昭行：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.169-174
- 9) 尾崎英介, 西尾淳, 田嶋和樹, 白井伸明：画像計測に基づくRC造柱梁接合部の損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.301-306
- 10) 楠原文雄, 塩原等：接合部破壊が先行するRC柱はり接合部の接合部せん断力と接合部破壊の因果関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, 1997
- 11) 三島隆路, 尾崎竜太郎, 森泉和人, 白井伸明：RC造柱・梁接合部の破壊モードと変形状に関する2-Dおよび3-D解析(その1, その2, その3), 日本建築学会学術講演梗概集, 2003
- 12) Ciampi, V., Eligehausen, R., Bertero, V.V. and Popov, E.p. : Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars under Generalized Excitation. Report No.UCB/EERC-82/83, University of California, Berkeley, 1982