

# 論文 曲げ降伏先行型耐震壁の危険断面応力計測に基づく力学的弱点の抽出

廣瀬 泰三<sup>\*1</sup>・真田 靖士<sup>\*2</sup>・Botirjon YORKINOV<sup>\*1</sup>

**要旨:** 本研究では、曲げ降伏先行型の鉄筋コンクリート造耐震壁を対象に、危険断面に作用するせん断応力を計測することを目的として、本構造の静的破壊実験を実施した。本実験では、連層耐震壁の脚部を模擬した縮尺 3/10 の従来型の試験体と試験部分の構造詳細が同一且つ危険断面の局所的な応力を計測できるような基礎を 3 分割した試験体を計画した。高い曲げ剛性を確保し得る新たな力の計測システムを開発するとともに、実験結果に基づいて本システムを用いた力の計測手法の妥当性を確認した。試験体危険断面のせん断応力を評価した結果、圧縮側柱脚の近傍に応力が集中することを実験的に確認し、本構造の力学的弱点を指摘した。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート, 耐震壁, 静的実験, 応力計測, せん断力負担, 構造弱点

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）造は非線形性、不均質性が強い為、部材内部の力の応答は理論的、解析的に推定されたものに過ぎず、実験的には解明されていない。今日では性能評価を前提とした構造設計体系への移行を背景に、建物を構成する部材あるいは部分架構の負担する力を計測しようという実験研究が実施されるようになった（例えば 1)~3)。しかし、力の計測は変位やひずみ度の計測に比べて技術的に遙かに困難であり、未だ完成された方法が存在するわけではない。

こうした背景の下、本研究では現行構造規定に基づく RC 造耐震壁を対象に、部材の内部を伝達される応力を直接計測することで構造上の弱点の抽出を図る。本稿では、応力計測のため新たに開発した力の計測システムおよびその検証結果について報告し、本システムにより計測した耐震壁の危険断面における平面的な力の負担について報告する。

## 2. 試験体

### 2.1 基準試験体

本研究の対象は、現行の構造規定に基づく 3 層程度の RC 造建物を構成する連層耐震壁である。実験対象はその 1 階部分を抜き出した縮尺 3/10 の試験体（以下、基準試験体と称す）である。図-1 に試験体の平面図、立面図および配筋図を、表-1 に試験体詳細を示す。また、表-2 に材料試験結果を示す。計画時のコンクリート強度は 24.0MPa、鉄筋強度は 295.0MPa である。

### 2.2 基礎分割試験体

基準試験体の危険断面を伝達される応力を計測するため、図-2 に示す基礎スタブを 3 分割した試験体（以下、基礎分割試験体と称す）を計画した。本試験体の試験部分および上部スタブの構造詳細は基準試験体と同一で

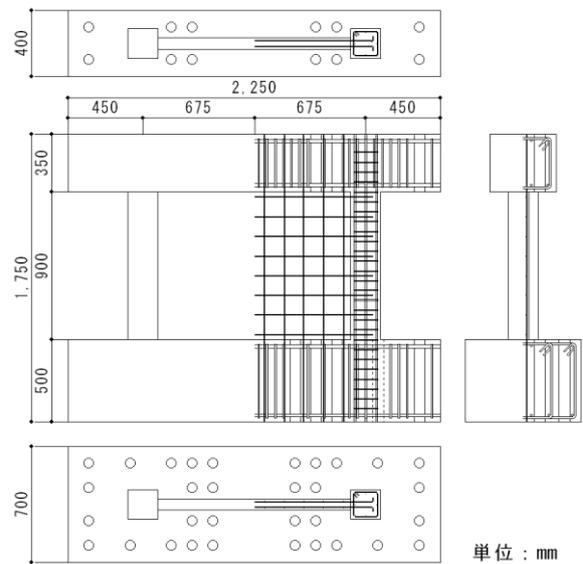


図-1 基準試験体の平面図, 立面図, 配筋図

表-1 試験体詳細

柱	断面	180×180mm
	主筋	8-D10
壁	補強筋	D4@60 ( $\rho_w=0.24\%$ )
	厚さ	70mm
	縦横筋	D4@120ダブル ( $\rho_s=0.31\%$ )

表-2 材料試験結果（上：コンクリート，下：鉄筋）

試験体	材齢 (日)	$\sigma_B$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)
基準	48	22.3	2.2
基礎分割	64	23.8	2.4

鉄筋種	$E_s$ (GPa)	$f_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ ( $\mu$ )	$f_t$ (MPa)
D10	184	352	1913	492
D4	164	383	2335	537

\*1 豊橋技術科学大学大学院 建設工学専攻 (正会員)

\*2 豊橋技術科学大学 建設工学系准教授 博(工) (正会員)

ある。分割した基礎下に図-3 に示す形状の荷重計測を目的に製作した鋼製センサー（以下、応力計測用ロードセルと称す）を設置することにより試験体危険断面における応力計測が可能な詳細とした。応力計測用ロードセルの校正方法および結果については 3.3 節において詳述する。図-2 では上記のロードセルの設置方法を併せて示した。同図より、ロードセルは試験体両端の基礎下のみ鋼製治具を介して設置し、中央の基礎上の応力は後述する水平載荷装置に組み込まれた圧縮引張型ロードセルによる全作用せん断力から両端基礎上の応力（応力計測用ロードセルの測定値）を差し引くことにより計測する計画とした。すなわち、試験体中央の基礎は鋼製治具を介して載荷装置に直接固定した。本試験体の材料試験結果は表-2 に示す通りである。

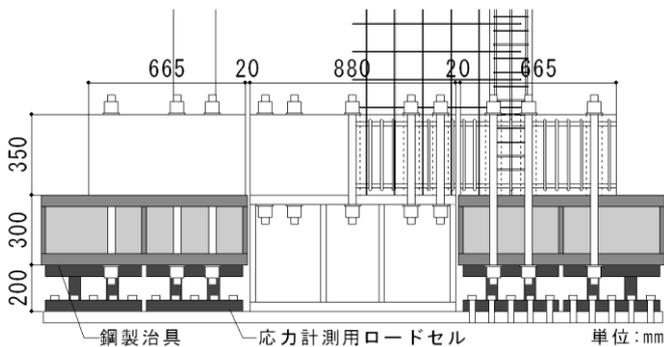


図-2 基礎分割試験体の立面図および配筋図

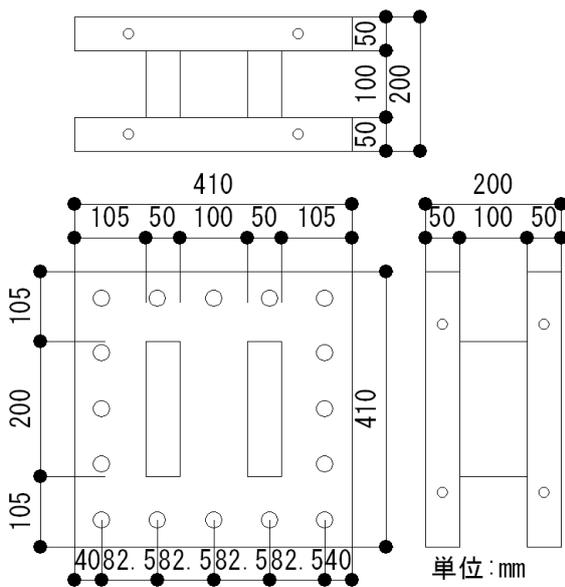


図-3 応力計測用ロードセル詳細

### 3. 実験方法

#### 3.1 変位とひずみ度の計測方法

基準試験体と基礎分割試験体の変位計測位置を図-4 に示す。同図中、片矢印は絶対変位、両矢印は相対変位、アルファベットは制御に用いた変位をそれぞれ指す。とくに水平変位は絶対変位として計測したため、a から b を差し引いた値を試験体を代表する水平相対変位とした。同図中の基礎分割試験体の図には基準試験体に追加した変位計測位置のみを示している。鉄筋のひずみ度は柱主筋、帯筋、壁のせん断補強筋に計 53 枚のひずみゲージを貼り測定した。

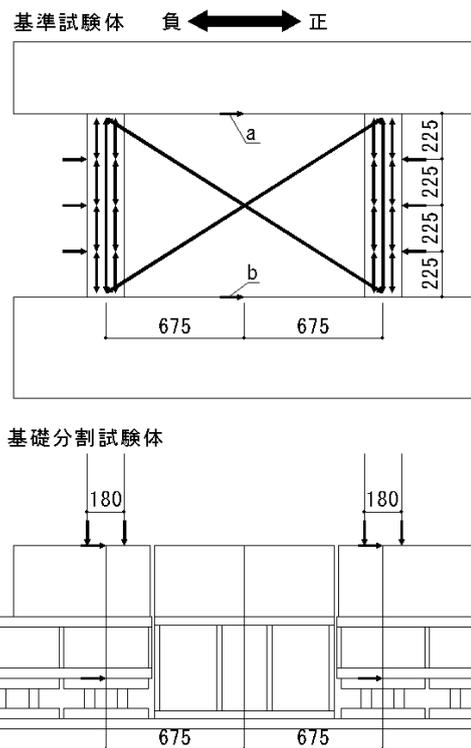


図-4 変位計測位置

#### 3.2 載荷方法

載荷装置の概要を図-5 に示す。鉛直方向への載荷は反力フレームに鉛直に取り付けた 2 台のオイルジャッキ（各 2000kN）、水平方向への載荷は反力壁に取り付けたオイルジャッキ（1000kN）を用いて行った。載荷方法は計 300kN の定軸力載荷下での、水平方向への静的な正負交番繰り返し載荷とした。水平載荷は原則として変形角 1/800 まで正負各 1 回、変形角 1/400, 1/200, 1/100, 1/50 まで正負各 2 回ずつ繰り返した。ただし、本実験で用いた試験体は連層耐震壁の 1 層を想定したため、せん断スパン比が常に 1.2 となるように各ジャッキを制御した。具体的には、各載荷ステップで図-5 中の水平ジャッキにより水平力載荷後に、2 台の鉛直ジャッキにより水平力の増減に比例する曲げ戻しモーメントを作用した（2 台の合計軸力は常に一定）。

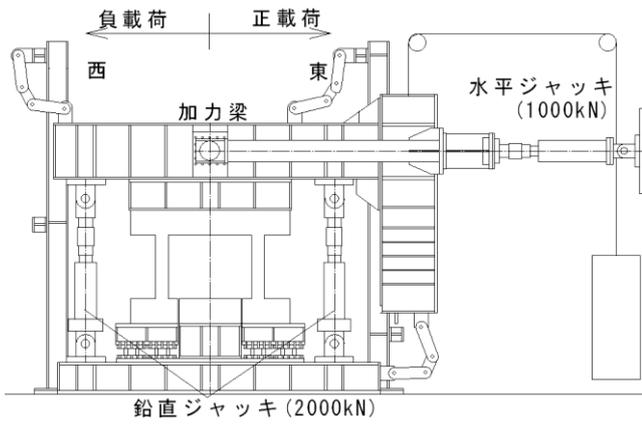


図-5 荷装置

### 3.3 応力の計測方法

試験体危険断面の応力を計測するため、図-6 に示す応力計測システムを開発した。図-3 の応力計測用ロードセルを並列し、両者の上下端を剛強な鋼製治具により緊結した。この詳細は応力計測システムに高い曲げ剛性を確保することを目的としている。同図にはせん断剛性、軸方向剛性および曲げ剛性の略算値を併せて示した。ロードセル間を緊結する治具の剛性が十分剛強であるとの仮定の下では、ロードセル間隔の2乗に比例して曲げ剛性を増大させる計画が可能となる。本研究では、耐震壁の実験に先行して上記の通り開発した計測システムの校正試験を実施した。本試験の概要を図-7 に示す。荷方法は、定軸力荷下における水平力 200kN までの正負交番繰り返し荷である。実験パラメータとして4通りの軸力レベル (200, 100, 0, -200kN) と、2通りの水平力荷高さ (1000, 2000mm) を設定し、計8サイクルの荷を行った。これらの軸力レベルおよび水平力荷高さは、耐震壁の実験で応力計測システムに作用すると予想されるせん断力、軸力、モーメントのレベルに概ね相当するように計画した。校正試験では荷装置から入力される水平力を解と考へ、応力計測システムに

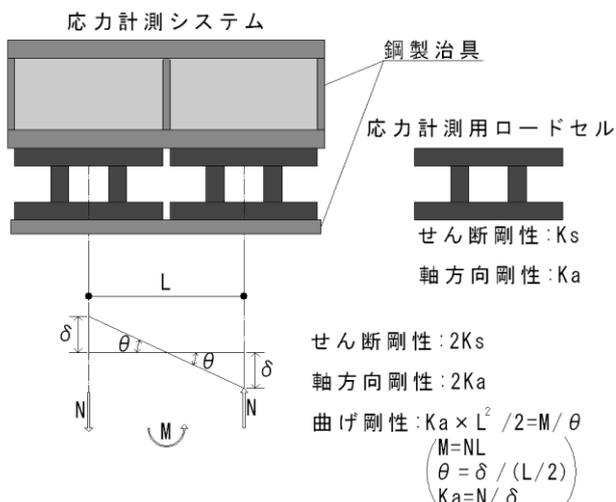


図-6 応力計測システム概要

組み込んだロードセルに貼付したひずみゲージの校正係数を最小自乗近似法を用いて取得した。すなわち本稿ではせん断力に関する校正のみを実施した。全荷パターンを通しての計測値に基づく校正結果を図-8 に示す。試験より得られた水平力とひずみ度の関係は軸力レベル、水平力荷高さに関わらずおよそ線形を維持し、その校正係数は 0.278kN/μ であった。

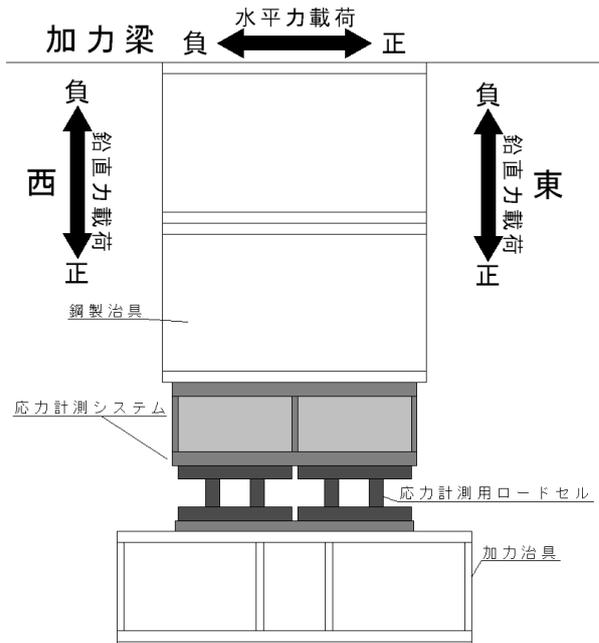


図-7 校正試験概要図

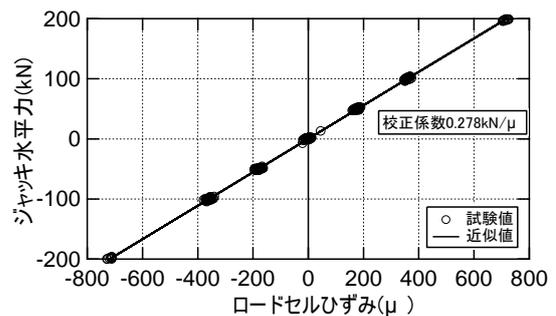


図-8 校正試験結果

## 4. 実験結果

### 4.1 応力計測方法の検証

基礎分割試験体の応力計測より得られる危険断面の応力状態について議論するため、はじめに基礎を分割した影響の有無を基準試験体との比較を通して検証する。

#### (1) 破壊経過の比較

表-3 に破壊経過および図-9 に両試験体の終局域 (R=1/100rad.) でのひび割れ状況を示す。表-3 より、両試験体は柱の初期の損傷を除き、概ね同様の破壊経過

表-3 破壊経過

サイクル(rad.)	基準試験体		基礎分割試験体	
	柱	壁	柱	壁
初期ひび割れ		下部スタブを固定時に壁パネルの西側上部隅角部に斜めひび割れ発生 壁パネルと下部スタブの境界に沿った水平ひび割れ発生		上部スタブを固定時に壁パネルと上部スタブに沿った水平ひび割れ発生
1/800	正載荷ピーク時、引張側柱脚部に初期曲げひび割れ発生 負載荷時、引張側柱脚部および中央部に曲げひび割れ発生	初期せん断ひび割れ発生	負載荷時、引張側柱頭部(壁パネルのせん断ひび割れの延長上)にせん断ひび割れ発生	初期せん断ひび割れ発生
1/400	引張側柱に帯筋に沿った曲げひび割れが顕著に発生 初主筋が降伏	せん断ひび割れが増加	引張側柱に帯筋に沿った曲げひび割れが顕著に発生 初主筋が降伏	せん断ひび割れが増加
1/200	引張側柱の曲げひび割れが増加 圧縮側柱脚部にせん断ひび割れ発生 正載荷ピーク時、コンクリートの圧壊を確認	せん断ひび割れが増加 縦筋が初降伏	引張側柱の曲げひび割れが増加 圧縮側柱脚部にせん断ひび割れ発生 負載荷ピーク時、コンクリートの圧壊を確認	せん断ひび割れが増加 縦筋が初降伏
1/100	圧縮側柱脚部がせん断破壊 1サイクル終了後に加力終了	壁パネル隅角部でコンクリート圧壊 柱のせん断破壊後、脚部の水平ひび割れに沿うせん断すべり破壊	圧縮側柱脚部がせん断により顕著に損傷	壁パネル脚部に微細なひび割れが顕著に発生 壁パネル隅角部でコンクリート圧壊
1/50			圧縮側柱脚部がせん断破壊 1サイクル終了後に加力終了	柱のせん断破壊後、脚部の水平ひび割れに沿うせん断すべり破壊

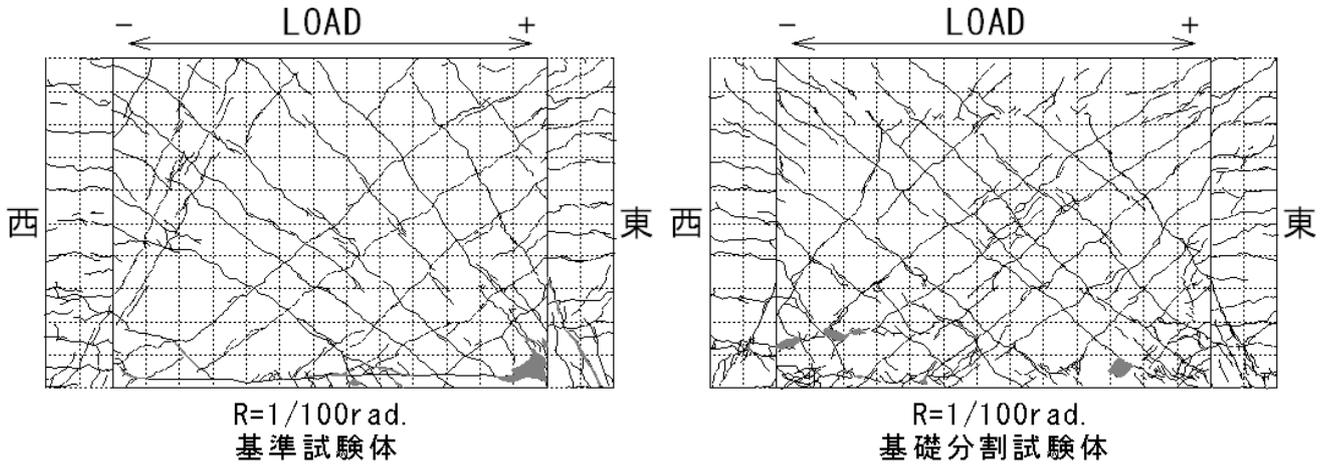


図-9 終局域でのひび割れ状況

を示した。また終局域でのひび割れ状況から両試験体のひび割れパターンもおよそ同様の傾向であったことがわかる。両試験体は当初の計画通り、曲げ降伏後に圧縮側柱脚部においてせん断破壊することにより終局に達し、柱のせん断破壊後は壁脚部の水平ひび割れに沿う滑りが卓越した。

(2) 荷重変形関係の比較

両試験体の荷重変形関係を曲げ強度およびせん断強度の計算値<sup>4)</sup>と併せて図-10に示す。

基準試験体は、R=1/800rad.正載荷ピーク時に壁パネルに初期せん断ひび割れ、引張側柱に初期曲げひび割れがおよそ同時に発生して剛性低下した。R=1/200rad.正載荷時にひずみ度を計測した主筋の約8割が降伏、また壁パネル引張側の縦筋が降伏し、大きく剛性低下を示したことから、曲げ降伏機構を形成したと考えられる。またR=1/200rad.正載荷ピーク時には最大耐力352kNを記録した。その後、R=1/100rad.正載荷ピーク直前で圧縮側

柱が脚部でせん断破壊するとともに変形が部材角0.0138rad.まで急激に進み、最大変形時には最大耐力の約50%まで耐力低下した。

基礎分割試験体では、R=1/800rad.正載荷ピーク時に壁パネルに初期せん断ひび割れが発生すると同時に剛性低下した。R=1/200rad.正載荷時には引張側柱のひずみ度を計測したすべての主筋および壁パネル引張側の縦筋が降伏し、再度の剛性低下を示したことから、曲げ降伏したと考えられる。その後、R=1/100rad.加力途中で最大耐力354kNを記録した。本試験体は基準試験体と異なり、R=1/100rad.のサイクルでは終局に至らず、続くR=1/50rad.のサイクル途中、およそR=1/100rad.に達したときに圧縮側柱が脚部でせん断破壊するとともに耐力が急激に低下した。

両試験体ともに計画通りに曲げ降伏先行後のせん断破壊となり、概ね同等の性能が得られた。ただし、先述の通り、基準試験体ではR=1/100rad.のサイクルで耐力低

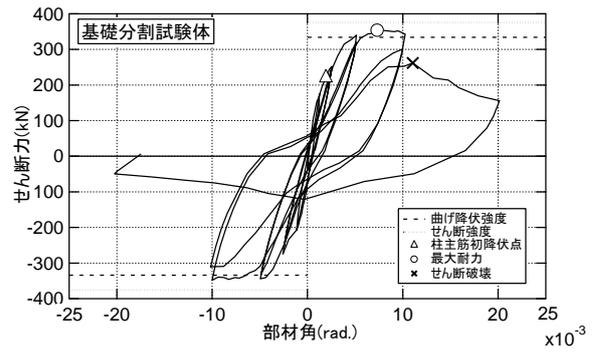
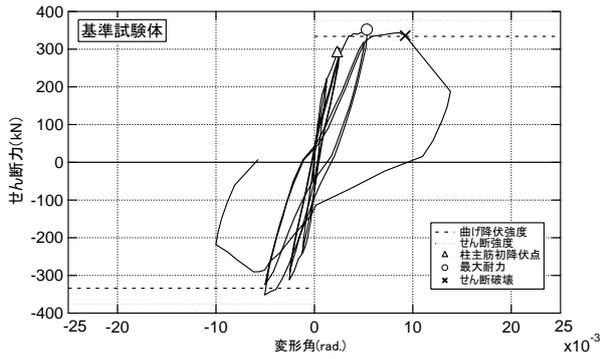


図-10 荷重変形関係

下が生じたのに対し、基礎分割試験体は  $R=1/50\text{rad}$  のサイクルまで耐力を維持し変形性能に違いが見られた。これは実験時のコンクリート強度の差が影響した結果と解釈した。

(3) 最大ひび割れ幅の比較

図-11 に両試験体がせん断破壊するまでの各サイクルピーク時における部材角と曲げおよびせん断ひび割れ幅の最大値の関係を比較して示す。全載荷過程を通じて、最大曲げひび割れ幅は引張側柱で、最大せん断ひび割れ幅は壁パネルで観察された。同一変形レベルで比較すると、両試験体のひび割れ幅はおおよそ同程度で際立った差は確認されなかった。

以上の実験結果より、基礎分割試験体は基準試験体の破壊経過および破壊機構を概ね再現しており、基礎周辺の構造詳細が試験体性能に大きく影響することはなかったと判断される。

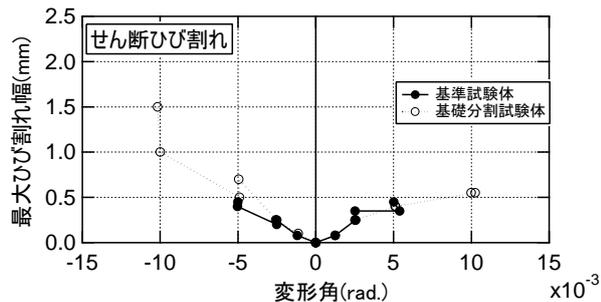
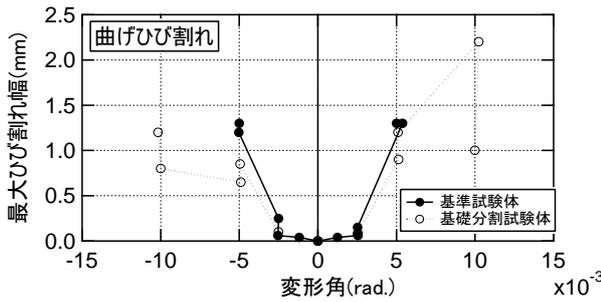


図-11 ピーク時最大ひび割れ幅の比較

(4) 基礎分割試験体の基礎の固定度

最後に補足的に、基礎分割試験体の基礎を分割したことによる影響を基礎の固定度の観点から考察する。図-

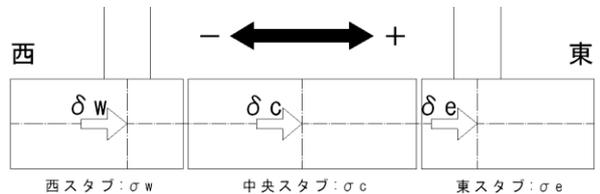
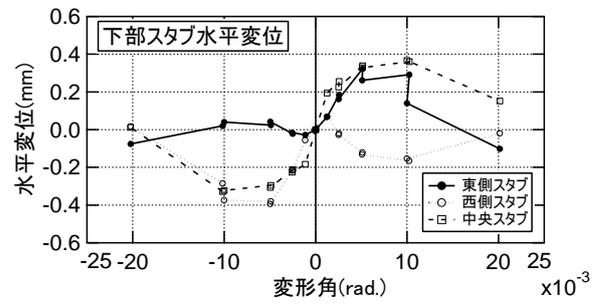


図-12 ピーク時の各基礎の水平変位

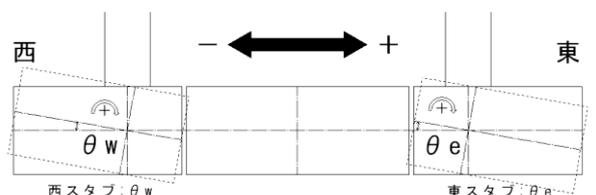
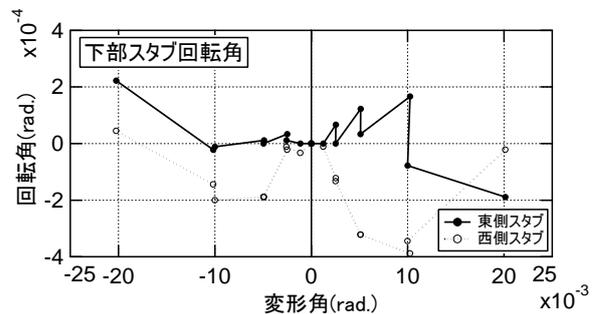


図-13 ピーク時の両端部基礎の回転角

12 に基礎分割試験体の各サイクルピーク時における各基礎の水平変位、図-13 に両端部の基礎の回転角をそれぞれ示す。ここで、変位および回転角は図-4 に示した下部スタブ危険断面位置に設けた各変位計による計測値に基づいて算出した。図-12 より、圧縮側および中央の基礎の変位は部材角が大きくなるに連れ増加したが、その絶対値は 0.4mm 未満と比較的小さかった。引張側の基礎の変形が小さい結果は、後述の入力せん断力の大きさとも整合する。また図-13 より、両端スタブの回転角は最大でも  $4 \times 10^{-4}$  rad. と非常に小さく、試験体に与えた部材角より十分小さかった。よって基礎の分割が試験体性能に大きく影響せず、両試験体はおよそ同様の破壊性状を示したものと判断される。

#### 4.2 力学的弱点の抽出

基礎分割試験体の基礎下に配した応力計測システムによる力の計測結果から、耐震壁危険断面に局部的に作用するせん断力について検討する。各サイクルピーク時における東側柱（正載荷時には圧縮側柱，負載荷時には引張側柱となり，詳細は図-5 参照）の柱脚近傍でのせん断力負担割合（耐震壁に入力される全せん断力に対する東側柱の危険断面近傍に作用するせん断力の割合）を図-14 に示す。圧縮側柱近傍でのせん断力負担割合は、変形が大きくなるに従って増加し、試験体が曲げ降伏した  $R=1/200$ rad. から  $R=1/100$ rad. にかけて全入力力の 7 割から 8 割を負担していることがわかる。また、その後耐震壁がせん断破壊した  $R=1/50$ rad. ピーク時では、圧縮側柱の負担せん断力が大幅に低下しており、同柱のせん断耐力の喪失過程を捉えることができた。一方、引張側柱近傍ではほとんどせん断力を負担していないことから、純引張に近い応力状態であったことがうかがえる。すなわち、本実験で計測したせん断応力の観点からは、本構造では圧縮側柱脚部が水平力に対する主要な抵抗要素であり、また同時に、力学的な一つの弱点であると考えられる。当該箇所を重点的に補強することで本構造の性能は合理的に改善できると予測される。尚、本研究では既

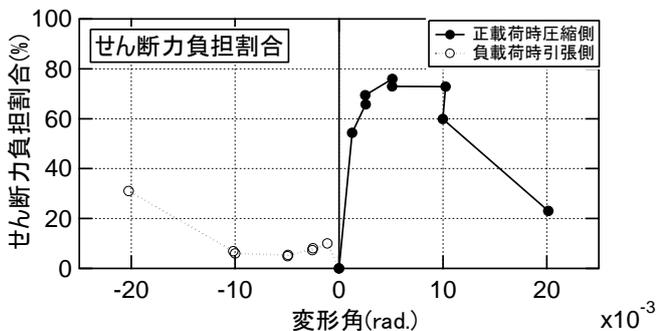


図-14 東側柱脚近傍におけるせん断力負担割合

に耐震壁脚部を局部的に補強した場合の性能向上効果に関する研究にも着手しているが、この結果については稿を改めて報告させていただく。

#### 5.まとめ

曲げ降伏先行型の RC 造耐震壁を対象に、危険断面における局所的なせん断応力を計測することを目的に、新しい力の計測システムを開発した。基礎の形状をパラメータとした 2 体の耐震壁試験体について静的繰り返し載荷実験を行った。その結果、1) 局所的な力を計測するため基礎を分割した試験体は、剛な基礎スタブを有する従来型の試験体の破壊性状を概ね再現できること、2) 耐震壁の圧縮側柱近傍でのせん断力負担割合は、変形が大きくなるに従って増加し、試験体の曲げ降伏後は全入力力の 7 割から 8 割を負担することを確認した。この結果は本構造では圧縮側柱脚部が力学的な構造弱点であることを示唆しており、今後引き続き、弱点を重点的に補強することで耐震性能を合理的に改善する方法について検討する。

#### 謝辞

本論文で報告した実験は、文部科学省科学研究費補助金若手研究(A)「局所的な力の応答に基づく耐震壁フレーム構造の破壊過程の解明」(課題番号: 16686033) および財団法人立松財団技術研究助成「新しい耐震技術の性能検証を目的とする力の計測システムの開発と利用」による助成の下に実施した。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 中塚善博, 倉本洋, 顧建華, 壁谷澤寿海: 6 層鉄筋コンクリート造ピロティ建築物のサブストラクチャー仮動的実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.31-36, 2000.6
- 2) Bechtoula, H., Sakashita, M., Kono, S. and Watanabe, F.: Seismic Performance of Frame under Large Cyclic Deformation and Axial Load Variation, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol. 26, No. 2, pp. 523-528, June 2004
- 3) 真田靖士, 村瀬正樹, 壁谷澤寿海: 鉄筋コンクリート造耐震壁の局所せん断力・軸力の計測実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp. 451-456, 2005.6
- 4) 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 年改訂版, 2001.10