# 論文 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

真田 靖士\*1·村瀬 正樹\*2·壁谷澤 寿海\*3

要旨:鉄筋コンクリート造耐震壁を対象に危険断面位置のおける局所的なせん断力・軸力を 計測することを目的として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 1/3 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力を 計測できるよう基礎を4分割した試験体を計画した。実験結果より,力の計測手法の妥当性 を確認するとともに,本実験の試験体では終局時に圧縮側柱近傍で全せん断力の7割程度を 負担することなどを示した。

キーワード:RC,耐震壁,静的実験,力の計測,せん断力負担,軸力負担,ひび割れ幅

#### 1. はじめに

一方,近年では建築物を構成する部材や部分 架構が負担する力を計測する実験研究が一部の 研究者らにより始められている<sup>例えば,4),5)</sup>。部材 内部の力(応力)計測を目的とする研究も僅か ながら報告されるようになった<sup>6)</sup>。しかし,力の 計測技術そのものが未だ研究段階にあり,一般 的な方法が広く提示されるには至っていないの が現状である。 上記を背景にして,本研究では曲げ降伏とほ ぼ同時にせん断破壊する RC 造耐震壁を対象に, その破壊過程を解明することを目的として静的 破壊実験を実施した。とくに危険断面位置での 局所的なせん断力・軸力を計測するため,従来 用いられてきた試験区間の上下を剛なスタブで 拘束する試験体に加え,基礎を分割して局所的 な力を計測できる詳細とした計 2 体の試験体を 計画した。本稿では,耐震壁の力の計測方法と 検証結果,平面的な力の負担やその推移などに ついて報告する。

### 2. 試験体

#### 2.1 基準試験体

本研究の対象として 1970 年以前に建設された 6 層程度の RC 造建物を構成する連層耐震壁を想 定した。実験対象は 1 階部分を抜き出した縮尺 1/3 の試験体 (以下,基準試験体と称す)である。 曲げ降伏とほぼ同時にせん断破壊するように計 画した。図-1 に試験体の平面図,立面図および 配筋図を,表-1 に試験体の詳細を示す。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 23.5MPa,鉄筋強度は柱主筋が 343.2MPa, 柱補強筋,壁筋が 294.2MPa である。

\*1 東京大学 地震研究所地震火山災害部門助手 博(工) (正会員)
\*2 東京大学 工学系研究科建築学専攻大学院生 (正会員)
\*3 東京大学 地震研究所地震火山災害部門教授 工博 (正会員)



図-1 基準試験体の平面図, 立面図, 配筋図

表 1	計論	休詳細
1 1	1 日八同大	147 日十 小山

柱	断面	250×250mm
	主筋	16-D10
	補強筋	D4@100 (p <sub>w</sub> =0.10%)
壁	厚さ	80mm
	縦横筋	D4@130 ダブル (ps=0.25%)

## 表-2 材料試験結果

(a) コンクリート					
試験体	材齢	$E_{c}^{*2}$	σ <sub>B</sub> <sup>**3</sup>	ε B <sup>¾4</sup>	$\sigma_{t}^{*5}$
	(日)	(Gpa)	(MPa)	( µ )	(MPa)
基準 <sup>※1</sup>	41	24.7	22.4	1590	1.70
基礎分割※1	52	25.6	24.5	1765	2.08
※1:3供試体の平均値, ※2:ヤング係数, ※3:					
⊢縮強度 ※4・圧縮強度時歪 ※5・引張強度					

(b)鉄筋

鉄筋種	E <sub>s</sub> <sup>**3</sup>	$f_{y}^{*4}$	<sup>*5</sup> ع	$f_t^{*6}$
	(Gpa)	(MPa)	( µ )	(MPa)
D10 <sup>%1</sup>	172	398	2440	557
D4 <sup>%2</sup>	159	340	4140	560

※1:3供試体の平均値, ※2:2供試体の平均値 (1供試体の試験値を得ることができなかった),
※3:ヤング係数, ※4:降伏強度(D4は0.2%オフセット値), ※5:降伏歪(D4は0.2%オフセット値), ※6:引張強度

# 2.2 局所せん断力・軸力を計測する試験体

耐震壁の危険断面位置における局所的な力を 計測するため、従来型の基準試験体に加えて、 基礎スタブを4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 と同一である。分割した基礎下に水平力と鉛直 力を計測可能な2分力ロードセル(文献1)の実 験で製作された特注計器)をPC鋼棒により緊結 して設置し,せん断力と軸力を4成分ずつ計測 した。図-2に基礎分割試験体の脚部の立面図, 配筋図をロードセルの設置状況とともに示す。 図-3にはロードセルの詳細を示す。本試験体の 材料試験結果は表-2に示した通りである。







## 3. 実験方法

### 3.1 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。基礎分割試験体では基礎が独立 に変形できるため側柱脚部の変位を計測した。 同図中,片矢印は絶対変位,両矢印は相対変位, アルファベットは後述する制御に用いた変位を それぞれ指す。



基礎分割試験体



## 3.2 載荷方法

載荷装置には東京大学地震研究所の耐震実験 装置を用いた。実験装置の概要を図-5に示す。 載荷方法は水平方向に静的な正負交番繰り返し 載荷,鉛直方向に定軸力載荷である。水平載荷 は原則として変形角 1/400, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100 まで正負各 1 回ずつ繰り返した。鉛直載荷 は計 600kN の軸力を維持した。ただし,本実験 で用いた試験体は連層耐震壁の 1 層を想定して いるため,せん断スパン比が常に 1 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)。



4. 基準試験体の実験結果

## 4.1 破壊経過

基準試験体の破壊経過を表-3 にまとめて示 す。また,最終破壊状況を図-6に示す。

サイクル	変形 (mm)	荷重 (kN)	破壊経過
	(IIIII)		
+1/400	1.1	296	せん断ひび割れ発生
	3.5	539	壁横筋が初降伏
-1/400	-3.5	-624	ピーク時に引張側柱に曲
			げひび割れを多数観察
+1/300	4.6	613	側柱主筋が初降伏
-1/200	-7.0	-721	最大荷重
	-7.1	-688	ピークに到達後,僅かに除
			荷して載荷を停止したが、
			その後せん断破壊

表-3 破壊経過(基準試験体)





#### 4.2 荷重一変形関係

図-7 に基準試験体の荷重-変形関係を示す。 変形角-1/200 へ向かう載荷中に僅かにスリップ する傾向を示したが,全体としてエネルギー消 費に優れる紡錘形の荷重-変形関係を呈した。 また,同図には,**表-2**の材料試験結果に基づく 曲げ降伏強度および終局強度指針<sup>7)</sup>によるせん 断強度の計算値を併せて示した。基準試験体の 最大耐力は曲げ降伏強度の計算値を若干上回っ たものの,その後まもなくせん断破壊しており, 計画時の破壊形式を実現できたことを確認した。



## 4.3 ひび割れ幅

図-8 に各サイクルのピーク時と除荷時にお ける最大ひび割れ幅の推移を示す。ただし,同 図の横軸はピーク時の変形角を示している。全 破壊過程を通して最大ひび割れ幅は壁パネル部 分で観測された。-1/200 のサイクルではピークに 到達後,載荷停止中にせん断破壊したことから (表-3),ひび割れが拡幅し始める直前のひび 割れ幅(2.0mm)が計測されたことになる。ピー ク時のひび割れ幅に対する除荷時のひび割れ幅 の割合は 1/4~1/3 程度であった。



## 5. 力の計測結果の検証および考察

## 5.1 実験結果の比較

続いて,耐震壁危険断面の局所的な力を計測 できるよう計画した基礎分割試験体の妥当性を 検証するため,前章の基準試験体の実験結果と 比較する。 図-9(a)に両試験体の荷重-変形関係を比較 して示す。ただし,基礎分割試験体では実験時 にロードセル下のプレート(図-2)と加力装置 の基礎(図-5)を境に試験体が剛体回転してい たことが判明したため,この影響を差し引いた 水平変位を用いている(剛体回転はロードセル 設置用プレートと加力装置基礎の結合ボルトの 剛性不足により生じ,実験時には回転の影響を 含む水平変位により制御したため,3.2節で示し た各サイクルの目標変位を若干下回る)。



同図より、基礎分割試験体は基準試験体に比 べて剛性が大幅に低下していることがわかる。 これは基礎分割試験体の水平変位の代表値とし て実験時に「上部水平変位一両側柱の柱脚位置 の水平変位の平均値(図-4中,a-(b+c)/2)」 を用いたことに起因すると考えられる。基礎分 割試験体では基礎がそれぞれ独立に変形できる ため、試験体の相対変位を明確に定義できない という本質的な問題は解決できないが、一般に、 せん断破壊する RC 造部材では圧縮側の変形が 部材全体の性能に対し支配的であることから (後述する耐震壁面内の力の分布からも妥当と 考える),基礎分割試験体の相対変位として「上 部水平変位-圧縮側柱の柱脚位置の水平変位

(図-4中,正側加力では a-b,負側加力では a -c)」を用いることを試みた。修正後の結果を 図-9(b)に示す。基礎分割試験体では、基礎と ロードセルを緊結する際,危険断面にひび割れ を生じた部位が存在したため(図-2中,右から 2つ目の基礎上であり,試験体製作時の施工誤差 により当該基礎の底面がその他3つの基礎底面 と同一平面上になかったことに起因する),初期 剛性が低下している。しかし,初降伏点や降伏 点割線剛性,せん断破壊点は基準試験体と概ね 一致することが確認できる。基礎分割試験体は とくに正側で基準試験体の変形性能を上回り, 負側でせん断破壊に至るまでの繰り返し回数も 多いが,これらは両者のコンクリート特性の差

(表-2(a))に起因すると考えられる。また, 基礎分割試験体の復元力特性は原点付近で折れ 点が見られるが,これは前述した水平変位の定 義による加力の正負が入れ替わる点であり,左 右の側柱柱脚間に残留変形が生じていることを 意味する。一方,図-10には両試験体の各サイ クルピーク時における部材角と最大ひび割れ幅 の関係を比較して示した。基礎分割試験体が基 準試験体を僅かに下回るものの,両者の対応は 概ね良好であることがわかる。さらに,図-11 には基礎分割試験体の最終破壊状況を示したが, ひび割れパターンや損傷の大きい箇所が図-6 の基準試験体とよく対応することが確認できる。 以上より,基礎分割試験体は基準試験体の破壊 過程,破壊機構を概ね再現していると判断した。





図-11 最終破壊状況(基礎分割試験体)

#### 5.2 局所的な力の分布とその推移

基礎分割試験体の基礎下に配したロードセル による力の計測結果から, 耐震壁面内に局所的 に作用する力について検討する。図-12 に各サ イクル正側ピーク時における危険断面位置での せん断力の負担割合(耐震壁に入力される全せ ん断力に対する 4 分割された危険断面に作用す るせん断力の各割合)とその推移を示す。変形 が大きくなるに従って圧縮側柱近傍のせん断力 負担割合が増加し、最大変形時には全入力の約7 割を負担していることがわかる。 圧縮側の2つ の基礎に着目すると、その割合は最大で9割を 超える。一方、引張側柱近傍ではほとんどせん 断力を負担しておらず、純引張に近い応力状態 となっていることが伺える。本実験の試験体は 比較的早期にせん断破壊するよう計画したが, 曲げ降伏が先行し優れた靭性能を発揮する壁の 場合、上記の傾向はさらに強くなり、圧縮側柱 近傍での負担割合が増加することが予想される。 上記の結果は, RC 造耐震壁の性能を改善しよう とする場合、とくに圧縮側柱脚部の取扱に留意 すべきであることを示唆している。尚、筆者ら は本稿で示した基準試験体と同一の試験体に対 し補強を施した場合の実験も既に実施しており, 側柱脚部の補強方法の違いが補強後の耐震性能, とりわけ変形性能に大きく影響することを確認 しているが、本実験については稿を改めて報告 する。



図-13 に両外端のロードセルにより計測され た各サイクル正側ピーク時における圧縮・引張 側柱近傍に作用する軸力の推移を示す。ただし, 変形角0のときの軸力は軸力導入時の値であり, また,引張軸力を正として示した。図-2および 表-1,2より,引張側柱近傍のすべての鉄筋が 降伏したと仮定した場合の引張軸力が約 460kN と算定されるのに対し,実験より得られた最大 引張軸力が 485.3kN であったことから, 引張側 柱近傍はおよそ純引張状態にあることがわかる。 この結果は柱主筋の歪の実験結果とも整合する。 一方, 圧縮側柱近傍の最大圧縮軸力は 860.0kN を記録しており、壁が負担する全軸力 600kN を 大きく上回ることは勿論のこと、引張側柱と壁 パネルの全鉄筋が降伏することを想定した場合 に局所的に作用し得る最大軸力の計算値約 1160kNの7割以上の軸力を負担していることが 確認できる。



#### 6. まとめ

RC 造耐震壁を対象に危険断面位置における 局所的なせん断力・軸力の分布や損傷に伴うそ れらの推移を実験的に解明することを目的に, 基礎の形状をパラメータとした 2 体の耐震壁試 験体の静的破壊実験を実施した。その結果,① 耐震壁脚部の局所的な力を計測するため基礎を 分割した試験体の破壊性状は、従来型の剛な基 礎スタブを有する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には変形 が大きくなるに従ってせん断力が集中し、耐力 低下点付近では全入力の約7割を負担すること を確認した。すなわち、耐震壁の性能改善には 圧縮側柱脚部の重点的な補強が効果的であると 考えられる。筆者らは、この点についても既に 補強試験体を用いた実験により検証しているが, 本実験の詳細・結果については稿を改めて報告 させていただく。

#### 謝辞

本研究は、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,研究代表者:真 田靖士)による助成を受けた。また、本実験で用いたロ ードセルは建築研究所構造研究グループより拝借した 他,試験体製作、実験実施には東京大学地震研究所壁谷 澤研究室各位の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

#### 参考文献

- 真田靖士,壁谷澤寿海,倉本洋,福田俊文,松本和 行,奈良岡誠也,平田昌宏,加藤敦,小川信行:耐 震壁を有する鉄筋コンクリート造ピロティ建物の 動的実験,構造工学論文集,Vol.47B, pp.511-520, 2001.3
- 真田靖士,壁谷澤寿海,倉本洋:耐震壁を有する RC 造ピロティ構造の動的実験に関する解析的検討,コ ンクリート工学年次論文集,Vol.23, No.3, pp.37-42, 2001.6
- 3) 真田靖士,壁谷澤寿海,倉本洋,中埜良昭:耐震壁 を有する RC 造ピロティ建物の入力と終局限界性能 の評価,コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.31-36, 2002.6
- pp.31-36, 2002.6
  4) 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
- 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
- 6) 塩屋晋一,黒木康博,大迫亘:力学的対称性を利用 するコンクリート内部の圧縮応力分布の測定,日本 建築学会構造系論文集,No.586, pp.155-162, 2004.12
- 建築学会構造系論文集, No.586, pp.155-162, 2004.12 7) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度 型耐震設計指針・同解説, 1990.11