# 論文 千鳥開口を有する RC 造連層耐震壁のせん断耐力評価に関する研究

土井公人\*1·坂下雅信\*2·河野進\*3·田中仁史\*4

要旨:本研究では,開口周比が0.4前後で開口が多層に渡って千鳥配置された連層耐震壁の静的載荷実験を行い,開口の位置および大きさが耐震壁のせん断抵抗機構に与える影響を把握した。また FEM 解析により,実験で得られた復元力特性の包絡線の形状や破壊性状の特徴を模擬することができた。さらに同解析モデルを用いて開口の位置・形状を変数としたパラメトリック解析を行い,偏在開口が耐震壁のせん断耐力に与える影響を評価した。

キーワード: 連層耐震壁, 千鳥開口, 開口周比, 低減率, せん断耐力, FEM 解析

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下 RC と略記)造建物の主要な 耐震要素として採用される耐震壁は建築設計上の要求 により開口を有する場合が多い。無開口耐震壁に関して は、耐震要素として有効な設計手法がすでに確立されて いる<sup>1)</sup>。有開口耐震壁は、建築学会の規準<sup>2)</sup>(以下, RC 規準)および防災協会耐震診断基準<sup>3)</sup>においては開口周 比に応じて強度や剛性を低減することにより、無開口耐 震壁に準じた扱いがなされている。開口周比を考慮した 耐力低減率は、開口の大きさが一定であれば開口位置に 無関係にせん断耐力が決定できるので実用式としては 簡便である。但し, RC 規準<sup>2)</sup>では開口周比が 0.4 を超え る壁については耐震壁として扱うことができず、ラーメ ン解法によって応力を求め、梁および柱に準じて断面算 定を行うことが定められている。

しかし,開口周比が 0.4 を上回る耐震壁が既存建物に は多く存在し,耐震壁の耐震性能を評価する上で問題と なっている。文献 2)では開口周比が 0.4 を超えても安全 率を確保できる場合もあることが示されている。実験を 通じた確認作業を行うことで,開口周比 0.4 をこえる有 開口壁についてもせん断耐力評価が可能となるものと 考えられる。一方で,有開口耐震壁の水平耐力の評価方 法に関する研究は過去に行われている。開口面積が等し くても開口の形状,位置の相違により水平耐力が異なる ことが指摘されており,抵抗機構に基づいた評価方法が 必要と考えられる。

そこで本研究では,前報<sup>4)</sup>に引き続き開口周比が 0.4 前後で開口が多層に渡って千鳥配置された RC 造耐震壁 のせん断性状の把握を目的として載荷実験を行った。ま た,試験体の FEM 解析を実施し,実験の履歴特性の再 現およびせん断耐力の予測を行うことで解析精度を確

\*1 京都大学 工学研究科建築学専攻 修士課程 (正会員)
\*2 京都大学 工学研究科 助教・博士(工学) (正会員)
\*3 京都大学 工学研究科 准教授・Ph.D. (正会員)
\*4 京都大学 防災研究所 教授・Ph.D. (正会員)

認した。さらに同解析モデルを用いて開口の位置・形状 を変数としたパラメトリック解析を行い,開口が耐震壁 のせん断耐力に与える影響を評価した。

表-1 試験体の壁板の断面と配筋

試験体	S2	S3	L5	L6		
$\sqrt{h_0 l_0 / h l}$	0.30	0.30	0.46	0.46		
$l_0 / l$	0.16	0.16	0.30	0.30		
$h_0 / h$	0.73	0.73	0.91	0.91		
壁厚	80mm					
壁筋(縦·横)	D6@100千鳥(SD295A)ps=0.4%					
開口補強筋(縦)	2-D13					
開口補強筋(横)	3-D10 2-D10					

表-2 試験体の部材断面と配筋

部材	断面(mm)	主筋	主筋比	帯筋	帯筋比
側柱(共通)	$300 \times 300$	8-D19	2.55%	2-¢10@75	0.63%
梁(共通)	200 × 300	2-D13	0.47%	2-D6@100	0.32%

表-3 使用材料の力学的特性

#### (a) 鉄筋

呼び径	D6	D10	D13	D19	D25	φ10
鉄筋種		SD295/	4	SD	345	KSS785
降伏強度(MPa)	425	367	361	371	374	924
引張強度(MPa)	529	513	518	575	548	1103
ヤング係数(GPa)	188	183	183	184	193	188
* カ 10の降伏強度は0.2%のオフセット値である					小値である	

↓10の降伏強度は0.2%のオフセット値である。

(b) コンクリート							
試験体名	S2	S3	L5	L6			
圧縮強度(MPa)	33.1	32.8	37.2	36.9			
割裂強度(MPa)	2.67	2.50	1.96	2.94			
ヤング係数(GPa)	24.1	24.6	25.8	28.5			

### 2. 実験概要

# 2.1 試験体概要

想定建物は6層の連層耐震壁を有するRC造建物とし, その最下層3層の1スパンを40%スケールでモデル化し た偏在開口付き連層耐震壁である。実験変数は文献2)よ り求めた等価開口周比 $\eta$ および開口位置である。



1000kNジャ 1000kN32 Nw 2000kNジャッキ N Q  $\overline{\mathbf{0}}$ . 400 5250 3350 350 三分力計 350 西 東 +載荷方向 図-2 載荷装置

試験体は開口が千鳥配置された試験体 S2 (η=0.30), L5 (η=0.46),中央開口のS3 (η=0.30),千鳥開口と中 央開口の中間にあたり,開口の1辺がスパン中央に一致 する試験体 L6 (η=0.46)の計4体である。図-1に試 験体の寸法および配筋を示す。

試験体の設計方法については、文献 2)に従い、すべて の試験体で曲げ降伏に先行してせん断破壊するよう、耐 震壁の曲げ耐力時せん断力がせん断耐力を上回ること を確認した。なお、耐震壁のせん断耐力は文献 1)より求 めた無開ロ耐震壁のせん断耐力に、文献 2)による開口低 減率を乗じることで算出した。また、載荷梁による耐震 壁の拘束効果を緩和するため第3層を設けた。但し、載 荷装置の制約から3層目は1・2層目の半分の高さとし た。開口横の独立柱については、柱に長期軸力が作用し、 柱上下端が曲げ降伏する場合のおよそ75%のせん断力 に対して柱がせん断破壊しない程度の補強筋を配して いる。試験体の断面や各部材の配筋詳細を表-1、表-2 に、鉄筋およびコンクリートの力学的特性を表-3に示 す。

# 2.2 載荷装置

載荷装置を図-2 に示す。水平方向加力は東側方向への載荷を正方向と定義し、全体変形角を制御する変位制 御型静的正負交番繰返漸増載荷である。ただし、ここでは3階梁高さ中央位置での水平変位を基礎上面からの高 さ2650mmで除した変形角を全体変形角(以後R)とし て定義する。水平方向載荷は100kNで1回、R=0.05%、 0.1%、0.25%、0.5%、0.75%、1.0%、1.5%、2.0%で各2 回ずつ正負両方向に繰り返した後, R=4.0%となるまで正 方向に単調加力したところで終了した。鉛直方向載荷は, モーメント反曲点を基礎上面から 2500mm の位置とし, せん断スパン比が 1.0 となるよう, 柱の長期軸力 400kN をもとに, 東西の鉛直ジャッキを制御し, 曲げモーメン トを加えた。東西それぞれの柱に作用させる軸力は式(1) および式(2)に示す変動軸力であり, 水平荷重 Q の関数で ある。

$$N_W = +0.42Q + 400kN$$
(1)  

$$N_F = -0.42Q + 400kN$$
(2)

#### 3. 損傷の進展状況

図-3 に各試験体の最大耐力に到達したサイクルの除 荷時におけるひび割れ状況を示す。実線はひび割れを, 塗りつぶし部分は剥落箇所を示す。また,図-4 に各試 験体の水平荷重一全体変形角関係を,表-4 に最大耐力 及びその時の全体変形角を示す。

各試験体とも、R=0.05%サイクルで開口周囲の壁板に せん断ひび割れが発生し、剛性が低下した。その後、枠 梁をまたぐようなせん断ひび割れが増加しながら、壁板 全体にひび割れが進展し、最大耐力にはおよそ R=0.5% で到達した。

開口が千鳥配置された試験体 S2 および L5 では正方向 載荷において、R=0.5%から 0.75%で2 階壁板がせん断ひ び割れに沿ってずれ、急激な耐力低下が生じた。負方向 では1 階開口上部のせん断ひび割れが大きく開き、試験 体 L5 ではひび割れに沿ったずれが生じ、急激に耐力が 低下した。これらの試験体では正方向に比べ、負方向の



最大耐力が小さくなる傾向が見られた。これは,負方向 載荷においては載荷梁から基礎梁にかけて形成される コンクリートの圧縮ストラットが,1 階壁板西側に位置 する開口によって形成されにくくなることが原因とし て考えられる。

中央開口の試験体 S3 および,中央開口と千鳥開口の 中間にあたる試験体 L6 では 2 階梁スパン中央にせん断 ひび割れが多く発生し,最大耐力に到達する前の段階で 損傷が非常に大きくなった。そのため,東西の壁板が独 立して変形し,開口が千鳥配置された試験体に見られた ようなせん断ひび割れに沿った壁板のずれは早期には 見られなかった。水平耐力については,中央開口の試験 体 S3 では載荷方向による違いはほとんど見られなかっ たが,試験体 L6 では他の試験体と異なり,正方向より も負方向の方で最大耐力が大きくなった。これは,正方 向載荷では 2 階梁スパン中央に損傷が集中したために, 壁板のコンクリート圧縮束及び鉄筋によるトラス機構 が有効にきかなかった一方で,負方向載荷では 2 階梁主 筋が引張材として機能することで壁板による抵抗機構

# 4. 有限要素法を用いた解析モデルの構築

## 4.1 解析モデル

2 次元有限要素法プログラム WCOMD<sup>5)</sup>を用いた数値 解析を行い,非線形荷重増分解析を実施した。

要素分割図を図-5に示す。壁板は200mm×200mmを 基本グリッドとして分割し、各要素を9つのガウス点を 持つ8節点平面要素とした。柱および梁については柱主 筋・梁主筋の位置と要素の重心が一致するよう、柱は





100mm×200mm,梁は200mm×60mmおよび200mm× 180mmの分割とした。各部材の鉄筋は実験と同じ鉄筋比 となるよう要素全体に一様に配置した。開口補強筋等の 斜め方向の補強筋については縦横方向の鉄筋量に換算 して配置した。また、断面の大きさが極端に変化する壁 と柱梁の境には鉄筋コンクリートジョイント要素(以下 RC ジョイント要素)を組みこみ、要素間での開きやず れ、鉄筋の抜け出しを考慮した。

境界条件は基礎底面のすべての節点をピン支持とし, 加力は実験と同様に式(1),式(2)を満足する等価な力を載 荷梁に図-5のように作用させ,載荷梁左右の水平変位 を制御した。また,繰り返し載荷とすると解の収束性が 悪くなったため,本解析では単調加力とした。解析の終 了条件については,ひび割れ直行方向の最大引張歪,ひ び割れに平行な方向の最大圧縮歪もしくは最大せん断 歪が10%に達した時点を破壊と定義し,いずれかの要素 が破壊した時点で解析を終了している。

解析で用いた材料モデルを図-6に示す。WCOMDに 導入されたコンクリートの材料モデルは前川・岡村モデ ル<sup>6</sup>である。 圧縮側の履歴則は弾塑性破壊構成則に従い, 引張側の履歴はひび割れ以後コンクリートが引張力の 一部を負担する Tension-stiffness 則に従う。詳細は文献 6)を参照されたい。ただし、本研究では単調加力として 解析を行ったため、この履歴モデルの一部のみを用いる こととなる。鉄筋のモデルはコンクリートに埋め込まれ た鉄筋とコンクリートの引張応力負担を考慮したトリ リニアモデル<sup>7)</sup>である。ひび割れ発生後のひび割れ間の 鉄筋応力分布を三角関数に仮定し、コンクリートの Tension-stiffening と組み合わせることにより,鉄筋の平 均応力一平均ひずみ関係を導いている。これにより鉄筋 の降伏はひび割れ位置で最初に生じ, 平均応力--平均ひ ずみ関係において,非線形性が現れるときの鉄筋の平均 応力は鉄筋単体の降伏強度よりも低いことが取り込ま れている。





### 4.2 解析結果

各試験体の解析結果を表-4 および図-4 に,また, 開口が千鳥配置された試験体 S2 についての解析結果を 図-7 に示す。なお、図-7(c)は耐震壁の損傷の程度を 表し,濃く塗りつぶされている要素(破線で囲んだ部分) は解析終了時に破壊した箇所である。表-4 および図-4 より,正方向載荷では試験体 S2 については水平耐力を 精度よく評価できているものの,その他の試験体につい ては解析結果が実験結果をやや過大評価する傾向が見 られ,試験体 S3 で最大10%実験値を解析値が上回った。 負方向載荷では,試験体4体全てにおいて解析結果が実 験結果を過大評価する結果となった。これは載荷実験で は,正方向で先に最大耐力を迎えるために,正方向加力 時に受けたせん断ひび割れ等の損傷の影響を受けた状 態で負方向の最大耐力を迎え,単調載荷時の水平耐力よ り低くなる可能性があることが原因として考えられる。

耐震壁の損傷予測については、図-7(b)より、正方向 では最大耐力時に2階壁板の壁横筋が、負方向では1階 開口と2階開口の間、および1階開口上部の壁横筋が降 伏しており、これらの領域で変形が大きく進んだことを 示している。これは3章で示した、せん断ひび割れのず れが生じた位置と一致しており、試験体 S2 の載荷方向 による損傷状況の差異を模擬できたといえる。

## 5. せん断耐力に与える開口の影響予測

#### 5.1 解析概要

前報<sup>4)</sup>で行った,有開口試験体についての FEM 解析に 加え,4章では、今回載荷実験を行った試験体について FEM 解析モデルを用いることで包絡線をある程度予測 できた。そこで本章では開口位置及び大きさを変数とし たパラメトリック解析を行い、開口がせん断耐力に与え る影響について検証を行った。

解析変数とする開口位置のパターンおよび寸法を図 -8 および表-5,試験体配筋を表-6 に示す。試験体は 計7体で,開口の大きさはS(η=0.30)およびL(η=0.46) の2種類(試験体名の1文字目を表す),開口の位置に ついては,開口が縦一列に配置されたもの(A),千鳥配 置されたもの(B),千鳥配置と中央開口の中間にあたる もの(C)の3種類(試験体名の2文字目を表す)とし た。さらに,無開口の試験体Nを比較用に用意した。階 高,スパン,柱・梁の断面寸法および壁厚は載荷実験を 行った試験体と同一である。開口補強筋以外の鉄筋につ いては各部材の鉄筋比を実験試験体と同一とし,開口補 強筋は RC 規準<sup>2)</sup>にしたがって配筋した。材料特性は4 章に示した材料モデルを用い,全ての解析対象試験体で コンクリート圧縮強度は 30MPa,鉄筋の降伏強度は 345MPaとした。



表--5 解析試験体変数一覧

試験体		Ν	SA	SB	SC	LA	LB	LC		
スケー	スケール			40%						
部材断	部材断面		柱:300×300 梁:200×300 壁厚:80							
開口寸法		-	400 × 800 750 × 1			i0 × 10	00			
開口周	開口周比			0.30	30 0.46					
学会低	学会低減率		0.70	0.70	0.70	0.54	0.54	0.54		
小野低減率	正方向	1.00	0.84	0.84	0.74	0.70	0.70	0.62		
(1階)	負方向	1.00	0.84	0.77	0.72	0.70	0.64	0.58		
小野低減率 (2階)	正方向	1.00	0.77	0.77	0.72	0.64	0.64	0.58		
	負方向	1.00	0.77	0.84	0.74	0.64	0.70	0.62		
							. (単有			

(単位:mm)

表-6 解析試験体配筋一覧

部材名	種類	鉄筋比
柱	主筋	2.55%
(300mm × 300mm)	せん断補強筋	0.63%
梁 (200mm X 200mm)	上段筋	0.47%
	下段筋	0.47%
(20011111 × 30011111)	せん断補強筋	0.32%
壁板	縦補強筋	0.40%
(80mm)	横補強筋	0.40%

#### 5.2 せん断耐力比較

解析結果を図-10に示す。なお,各試験体の水平耐力 を無開口試験体 Nの水平耐力で除した値β(以下,FEM 耐力低減率)で示している。また,耐力低減率を既往の 設計法として用いられる RC 規準<sup>2)</sup>における耐力低減率 および小野ら提案の耐力低減率<sup>8</sup>と比較することにより, 開口による耐力低減率を用いた評価法の妥当性につい て検証を行った。

 RC 規準<sup>2</sup>における開口低減率(以下,学会低減率 と略記)

等価開口周比 η から計算される開口低減率 r によって 強度を低減させた。

$$r = 1 - \eta, \qquad \eta = \max\left\{\sqrt{\frac{h_o \cdot l_o}{h \cdot l}}, \frac{l_o}{l}\right\}$$
(3)

小野ら提案の低減率<sup>8)</sup>(以下,小野低減率と略記)
 せん断耐力の減少は,圧力場を形成する壁板の面積和
 ΣAeの大きさに影響される。

$$r_u = \sqrt{\sum A_e / hl} \tag{4}$$

ΣA<sub>e</sub>: 壁板の斜めひび割れ傾斜角を 45°とした場合の, 圧力場を形成する壁板の領域の面積和(図 -9参照), hl: 壁板の面積



図-10より,解析値は正負どちらの方向に載荷した場 合においても,開口が大きくなるにつれて耐力が低くな っている。正方向載荷時には開口が中央に寄るにつれて 耐力が低下する一方,負方向載荷時には開口位置を変化 させても水平耐力に大きな変化は生じなかった。

耐力低減率による耐力評価は解析結果を安全側に評 価できているが、学会低減率では解析値を大幅に過小評 価する傾向があり、解析結果と対応しているとは言い難 い。小野低減率は開口の大きさおよび位置により異なる 値をとるため、第1層と2層の耐震壁で異なる低減率と なるが、図-10より、1階耐震壁での小野低減率を用い た場合は解析結果の傾向をよくとらえている。ただし、 この低減率は単層耐震壁を対象とした考え方に基づい ているため、複数の傾斜角を持つ圧縮束が形成される連 層耐震壁を対象とした評価法を整備する必要がある。

## 6. 結論

等価開口周比が 0.4 前後で開口が偏在および多層に渡 る RC 造耐震壁の静的載荷実験を行い,そのせん断性状 を把握,FEM 解析により復元力特性およびせん断耐力予 測を行った。また,開口位置・大きさを変数としたパラ メトリック解析を行い,開口のせん断耐力に与える影響 を検証した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 開口が千鳥配置された試験体では載荷方向によって破壊性状および水平耐力に差が見られ, 脆性的な 挙動を示した。開口が中央に寄った試験体では2階 梁スパン中央に損傷が集中し, 千鳥開口の試験体に 見られたせん断ひび割れに沿った壁板のずれや急 激な耐力低下は早期には見られなかった。
- 実験での包絡線・破壊性状を,FEM 解析を用いて 模擬した。水平耐力については実験値をやや過大評 価する傾向が見られたが,載荷実験で観測された破 壊性状に関しては FEM 解析により模擬することが できた。
- 開口位置・大きさを変数としたパラメトリック解析 を行い,開口のせん断耐力に与える影響を検証した。
   開口が大きくなるほど水平耐力は小さくなり,開口 位置の相違により載荷方向による耐力差に違いが 見られた。

# 謝辞

本研究の一部は,国土交通省平成 21 年度「建築基準 整備促進補助金事業」プログラムによるものである。こ こに謝意を表する。

### 参考文献

- 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造物の靭性保証 型耐震設計指針・同解説,1999
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同 解説,1999
- 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
- 4) 土井公人,坂下雅信他:開口が偏在する RC 造連層 耐震壁のせん断性状に関する研究,コンクリート工 学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.421-426, 2009
- 5) 株式会社フォーラムエイト: UC-win/WCOMD Ver. 2 電子マニュアル, 2006.11
- 前川宏一,福浦尚之:疑似直交2方向ひび割れを有 する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築, 土木学会論文集, No.634, V-45, pp.157-176, 1999.11
- 7) 岡村甫,前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形解析 と構成則,技報堂出版,1991.5
- 8) 小野正行:大きな開口を有する開口壁の弾塑性性状 に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文報 告集, Vol.17, No.2, pp.541-546, 1995