

論文 複数開口を有する RC 造有開口耐震壁の静的載荷実験

鈴木健太^{*1}・秋田知芳^{*2}・松井智哉^{*3}・倉本洋^{*4}

要旨:本研究では等価開口周比を同一とした RC 造有開口耐震壁 3 体について、開口の形状、位置、個数をパラメータとした静的載荷実験を実施し、破壊性状、履歴特性、変形状およびせん断耐力等の構造特性を比較検討した。その結果、同一等価開口周比であっても開口数および開口位置の違いにより、耐力、変形性能および破壊性状に顕著な差異が認められることを明らかにした。また、既往のせん断耐力評価式によって安全側に評価できることを示した。

キーワード: 有開口耐震壁, 静的載荷実験, 複数開口, 開口位置

1. はじめに

有開口耐震壁のせん断強度の算定に関して、日本建築学会・RC 規準¹⁾では等価開口周比 ($\sqrt{h_0 l_0 / hl}$, h_0, l_0 : 開口部の高さおよび長さ, h, l : 壁板周辺の梁および柱中心間距離) を用いる算定法が示されている。しかし、この方法では等価開口周比が一定であれば開口の形状や位置によらず同一のせん断強度計算値を与えることになる。一方、実際の地震被害や構造実験結果を見るかぎり、有開口耐震壁の破壊状況は複雑であり、特に複数開口を有する場合などは、耐震性能の定量的な把握が未だ困難な状況にあると言ってよい。

そこで本研究では、複数開口を有する RC 造耐震壁の評価法の精度向上に向けて、有開口耐震壁の静的載荷実験を実施することにより、有開口耐震壁の破壊メカニズム、耐力および変形性能を把握することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 試験体

実験に用いた試験体は 6 層程度の鉄筋コンクリート (RC) 造建築物における連層耐震壁の下層部を想定したものであり、実大の約 1/3 スケ-

ルのもの 3 体である。実験変数には開口数と開口位置を選択した。すなわち、等価開口周比をほぼ 0.4 とし、図-1 に示すように、開口数が各層 1 個ずつの試験体 1 体 (試験体 WO1) および各層 2 個ずつで、開口位置が異なる試験体 2 体 (試験体 WO2 および WO3) を計画した。試験体 WO1 の配筋状況を一例として図-2 に示す。耐震壁は壁内法高さが 800mm、内法長さが

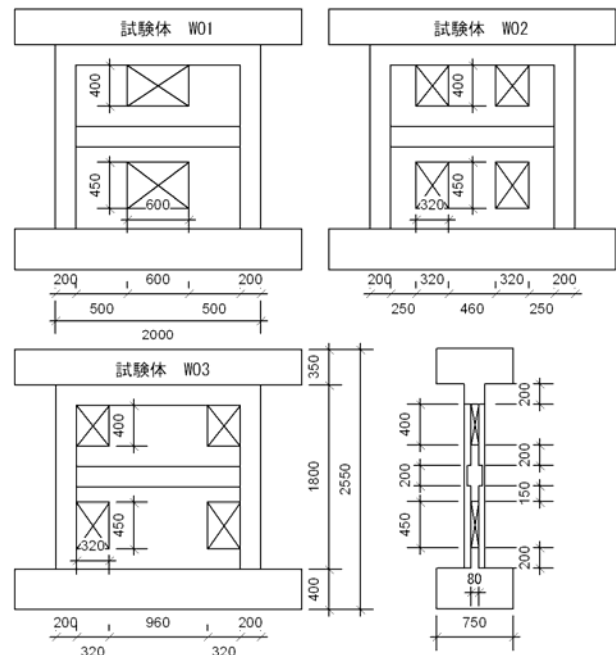


図-1 試験体形状

*1 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科機械・構造システム工学専攻 修士 (工学) (正会員)

*3 豊橋技術科学大学 工学部建設工学系助教 博士 (工学) (正会員)

*4 豊橋技術科学大学 工学部建設工学系准教授 博士 (工学) (正会員)

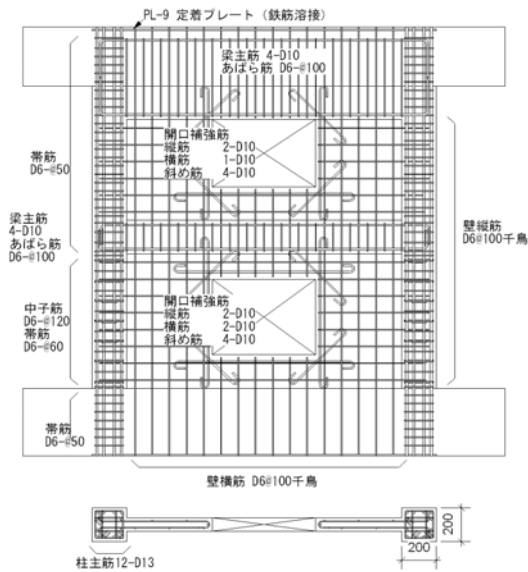


図-2 配筋図

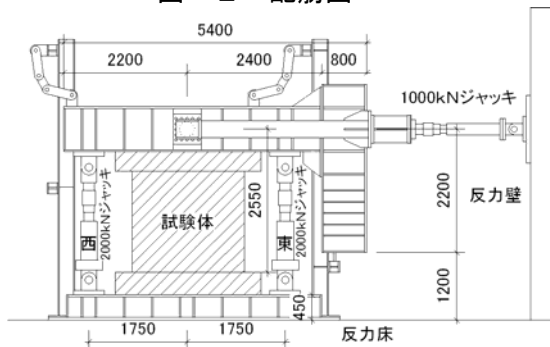


図-3 荷装置

1,600mm および壁厚が 80mm であり、側柱断面は 200mm 角である。また、壁梁の幅およびせいは 150mm および 200mm である。表-1 に各試験体の部材断面詳細を示す。表-2 に鉄筋およびコンクリートの材料特性を示す。使用したコンクリートは呼び強度 21N/mm^2 (実験時の目標圧縮強度 27N/mm^2 と設定) である。コンクリートの打設は、基礎スタブ、壁部1層(2層梁上端レベルまで)、壁部2層および上部スタブの3回に分けて行った。1層部のコンクリートが目標強度に比べて2割程度上回る結果となっている。

使用した鉄筋は SD295A の D6 (壁筋、柱・梁横補強筋) と D10 (梁主筋、開口補強筋)、SD390 の D13 (柱主筋、スタブ幅止筋)、および SD345 の D25 (スタブ筋) である。

2.2 荷方法

荷装置を図-3 に示す。試験体は反力フレ

表-1 部材断面詳細

	1階		2階	
	柱	200×200		
主筋	12-D13 ($p_g=3.8\%$)			
帯筋	2-D6@60 ($p_w=0.53\%$)		2-D6@50 ($p_w=0.64\%$)	
副帯筋	2-D6@120 ($p_w=0.27\%$)		-	
梁	150×200			
主筋	4-D10 ($p_t=0.54\%$)			
帯筋	2-D6@100 ($p_w=0.42\%$)			
壁厚	80			
壁	D6@100 ($p_g=0.4\%$)			
開口補強筋	D10 (縦、横、斜め)			

単位: mm

※ $F_c=27\text{N/mm}^2$ 柱主筋 (SD390) その他 (SD295A)

※破壊モード: せん断破壊型(せん断スパン比: 1.38)

表-2 材料特性

鉄筋 種別・使用部位	降伏点 (N/mm^2)	ヤング係数 ^{※1} (kN/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	
				D6 (SD295A) 壁・柱・梁補強筋
D10 (SD295A) 梁主筋・開口補強筋	327	153	439	
D13 (SD390) 柱主筋	422	173	562	
コンクリート				
	WO1	WO2	WO3	
σ_B (N/mm^2)	1層壁部	32.9(38) ^{※2}	34.7(49)	34.9(44)
	2層壁部	29.7(29)	29.5(40)	28.6(35)

※1公称断面積を用いた

※2コンクリート材料特性の()は材齢日を示す

表-3 荷計画

部材角 R (rad.)	変位 δ (mm)	サイクル(回)	
		WO1-WO3	WO2
1/1600	1.25	1	1
1/800	2.5	1	1
1/400	5	2	2
1/200	10	2	2
1/133	15	2	2
1/100	20	2	2
1/67	30	2	2
1/50	40	1	2
1/33	60	正方向のみ	1
1/20	20	正方向のみ	正方向のみ

ームに PC 鋼棒で固定し、水平力の正負繰り返し荷は反力壁に取り付けたオイルジャッキ (1,000kN) によって行った。さらに、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 2,000kN) により、軸力比 ($N/bD\sigma_B$) で 0.2 に相当する 442kN を試験体に作用させると同時に、せん断スパン比が 1.38 となるように作用せん断力に対応させて付加モーメントを作用させた²⁾。実験では試験体頂部の水平変位 (δ) を計測高さ ($H=2,000\text{mm}$) で除した部材角 $R=\delta/H$ で制御し、表-3 に示す荷計画に従って荷した。

2.3 測定方法

計測変位は、上部スタブおよび側柱での水平変位、側柱を 5 分割した軸方向変位、壁内の梁および壁板の部分変位である。鉄筋のひずみは柱主筋、帯筋、壁のせん断補強筋および梁主筋の主要な位置に貼付したひずみゲージにより測定した。変位測定位置の一例を図-4 に示す。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

図-5に全試験体の $R=1/67rad.$ の载荷サイクル終了時におけるひび割れ破壊状況を示す。

試験体 WO1 では $R=1/1,600rad.$ のサイクルで袖壁にせん断ひび割れ、側柱に曲げひび割れが生じた。 $R=1/133rad.$ で1層西側袖壁から2層東側袖壁と1層東側袖壁から2層西側袖壁にかけてせん断ひび割れが大きく拡幅するとともに最大耐力に達した。 $R=1/100rad.$ のサイクルでは、2層袖壁で圧壊が進行し、1層袖壁でコンクリートの剥落がみられるようになった。 $R=1/67rad.$ のサイクルでは、2層側柱のせん断ひび割れが増加し、2層袖壁の損傷がさらに進行した。最終的に $R=1/33rad.$ のサイクルで2層側柱がせん断破壊し、载荷を終了した。

試験体 WO2 では試験体 WO1 と同様に $R=1/1600rad.$ のサイクルで開口周辺、側柱に初期ひび割れが発生した。 $R=1/800$ から $1/200rad.$ のサイクルにかけて耐震壁全体にひび割れが発生および伸展していった。また、2階梁の上下開口近傍において曲げひび割れが多数発生した。正側の最大耐力を記録した $R=1/133rad.$ において各層の中央壁板のせん断ひび割れおよび2階梁の曲げひび割れが拡幅した。 $R=1/100rad.$ のサイクルで各層の中央壁板がせん断破壊した。続いて $R=1/67rad.$ のサイクルで袖壁が圧壊に至り、2階梁の西側端部で曲げひび割れが大きく拡幅した。このとき中央壁板および袖壁と比べて側柱の損

傷は軽微であった。その後、 $R=1/20rad.$ まで柱は破壊に至らず、2階梁端部の曲げ降伏を伴い $R=1/67rad.$ のサイクル以降においてフレーム的な挙動を示した。

一方、試験体 WO3 では $R=1/1,600rad.$ のサイクルで開口周辺に初期ひび割れの発生が確認されたが、試験体 WO1 および WO2 に比べて側柱の曲げひび割れの発生は顕著ではなかった。 $R=1/400rad.$ のサイクルで側柱の全長にわたり曲げひび割れが発生した。また、2層側柱では、開口部位置においてせん断ひび割れが発生した。 $R=1/133rad.$ サイクルで最大耐力に達し、2層壁板において圧壊の兆候とともに、せん断ひび割れに沿ってコンクリートの剥落が確認できた。その後 $R=1/100rad.$ で2層壁板が圧壊し、 $R=1/67rad.$ で2層側柱のせん断破壊を生じた。

以上のように破壊形式は各試験体ともにせん断破壊型となったが、開口位置および開口数の違いにより破壊状況に差異が認められた。

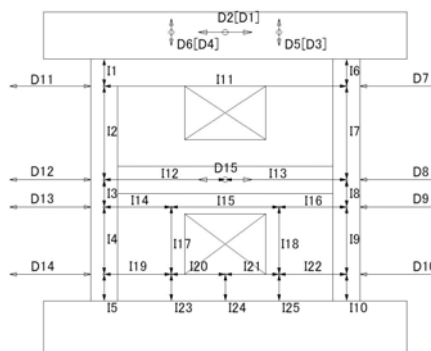


図-4 変位計測位置 (試験体 WO1)

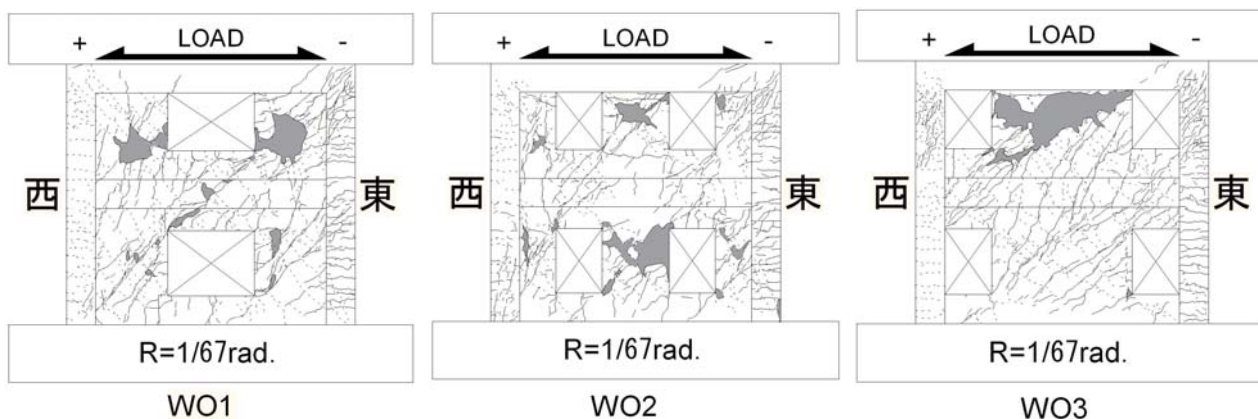


図-5 ひび割れ破壊状況 ($R=1/67rad.$)

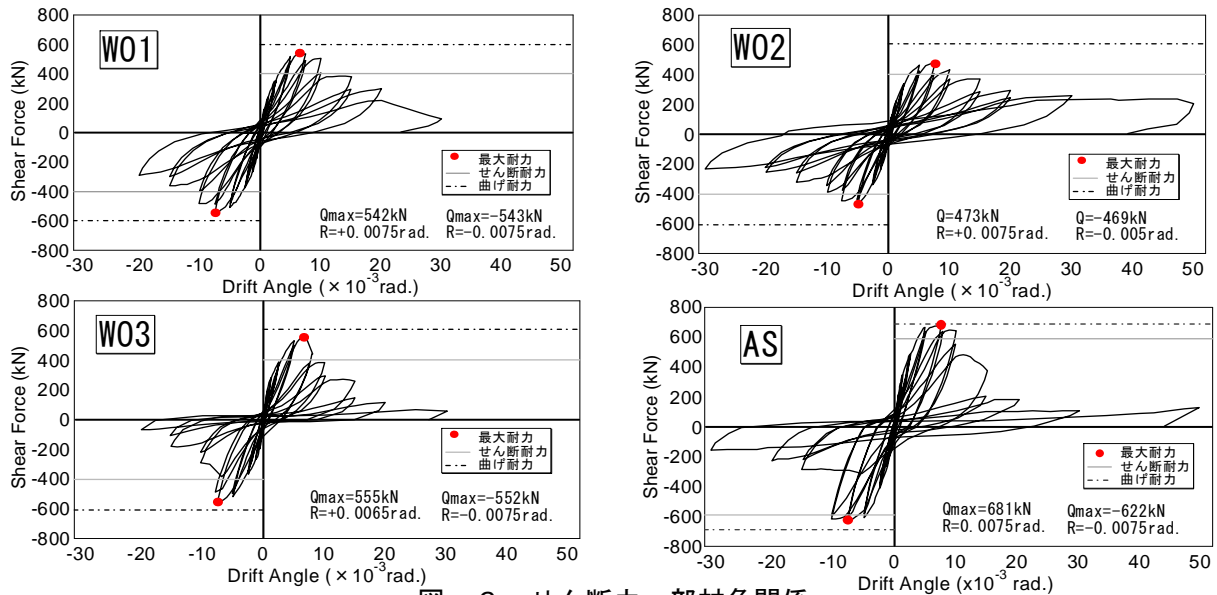


図-6 せん断力一部材角関係

3.2 履歴特性

各試験体のせん断力一部材角関係を曲げ強度、せん断強度算定値とともに図-6に示す。耐力算定結果および実験結果を表-4に示す。曲げ強度 (Q_{mu}) は (式(1))³⁾ によって、またせん断強度 (Q_{su}) は (式(2))³⁾ および低減率 γ ¹⁾ を乗じることによって求めた。ただし複数開口を設ける試験体の低減率は、耐震診断基準⁴⁾ を参考に全開口断面積の和を用いて算定した。なお、同図には比較のため形状・寸法および材料強度等がほぼ同じである無開口耐震壁²⁾ (試験体 AS) の結果も示す。

$$Q_{mu} = (a_i \cdot \sigma_y \cdot l_w + 0.5a_w \cdot \sigma_{wy} \cdot l_w + 0.5N \cdot l_w) / h_w \quad (1)$$

$$Q_{su} = \left[\frac{0.068 p_{fc}^{0.23} \cdot (F_c + 18)}{\sqrt{M/(Q \cdot D) + 0.12}} + 0.85 \sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh}} + 0.1\sigma_0 \right] \cdot t_e \cdot j \quad (2)$$

ここで h_w : 想定する高さ その他の記号 : 参考文献参照

初期剛性はわずかに違いがみられ試験体 W02、試験体 W01、試験体 W03 の順に大きくなっている。最大耐力は試験体 W01 および W03 がほぼ同等な値を記録しているが、試験体 W01 は $R=1/133rad$ 。ピーク時に最大耐力に達しているのに対し、試験体 W03 は $R=1/133rad$ より小さい変形レベルで最大耐力に達しており、その後急激に耐力が低下した。試験体 W02 の最大耐力は、他の有開口耐震壁と比べると小さい値になっている。

表-4 耐力算定値および実験結果

試験体	計算値		実験値 (exp)		exp/ Q_{mu}	exp/ Q_{su}
	Q_{mu}	$Q_{su} \times \gamma$	正載荷	負載荷		
W01	597	400	542	-543	0.91	1.36
W02	607	402	473	-469	0.78	1.18
W03	607	403	555	-552	0.91	1.38
AS	686	591	681	-622	0.99	1.15

※耐力算定におけるコンクリート強度は一層壁部の値を用いた 単位(kN)

$R=1/67rad$ 。での各試験体の耐力保持率 (最大耐力に対する任意の変形時におけるせん断耐力の比率) は、試験体 W01 が 70%、試験体 W02 が 78%、試験体 W03 が 46% となり、試験体 W03 は靱性の乏しい挙動を示した。試験体 W02 は $R=1/20rad$ 。まで 50% 程度の耐力保持率を有しており、エネルギー吸収能力の大きな履歴性状を示した。

各有開口耐震壁の最大耐力は、計算による曲げ耐力に達していないのに対して、無開口耐震壁の最大耐力は計算値とほぼ一致している。一方、計算によるせん断耐力と実験値の比率 (exp/ Q_{su}) は、試験体 W01 が 1.36、試験体 W02 が 1.18、試験体 W03 は 1.38 となり、安全側の評価ではあるが、計算値が実験値を過小評価する結果となった。

3.3 累積消費エネルギー

各試験体の累積消費エネルギーを各サイクルの正負載荷終了時ごとにプロットしたものを図-7に示す。消費エネルギーは各サイクルにおける履歴曲線の面積として算定した。

各試験体とも、 $R=1/200\text{rad}$.のサイクルまでは消費エネルギーがほぼ同じであるが、最大耐力を記録した $R=1/133\text{rad}$.のサイクルからは試験体によって消費エネルギーに違いがみられるようになった。特に、 $R=1/67\text{rad}$.のサイクルでは、試験体 $WO3$ のエネルギー吸収量が他の試験体と比較して約 $2/3$ 程度となっている。この原因は、試験体 $WO3$ で最大耐力時に急激な耐力低下が生じたためである。

3.4 変形性能

(1) 脚部変形

各試験体における変位およびひずみ計測位置を図-8に示す。各試験体の $R=1/400$, $1/200$ および $1/133\text{rad}$.の第1サイクル目の正載荷ピーク時の壁および側柱の脚部の軸方向変形分布(正側:引張, 負側:圧縮)を図-9に示す。

試験体 AS および開口を有する試験体 $WO1$, $WO2$ および $WO3$ は西側柱が圧縮側となり東側柱は引張側となった。各試験体の $R=1/133\text{rad}$.における変形量を比較すると、圧縮側となる西側柱はすべての試験体で 1mm 未満となっており大

きな違いはないものの、引張側となる東側柱は試験体 AS の変形量が 4mm 程度あるのに対して、有開口壁の試験体 $WO1$, $WO2$ および $WO3$ では、 1mm 程度の変形量であり顕著な違いが生じた。

試験体 $WO1$ では左右の袖壁において、それぞれ西側が圧縮側および東側が引張側に変形する挙動を示し、個々の壁が独立に回転変形を生じ

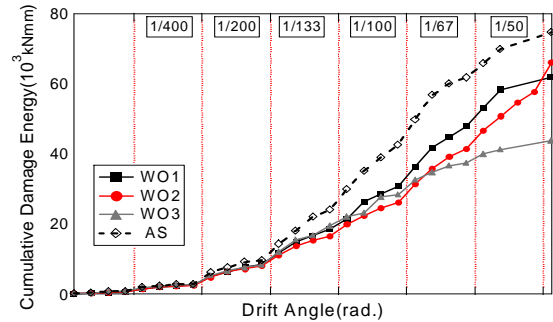


図-7 累積消費エネルギー

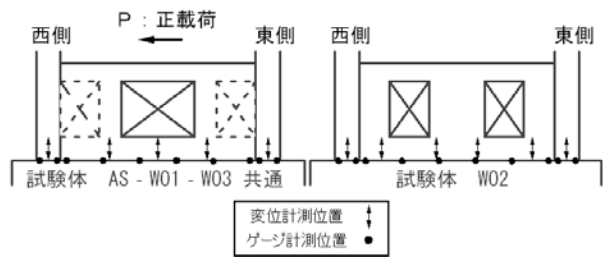


図-8 変位およびひずみの計測位置

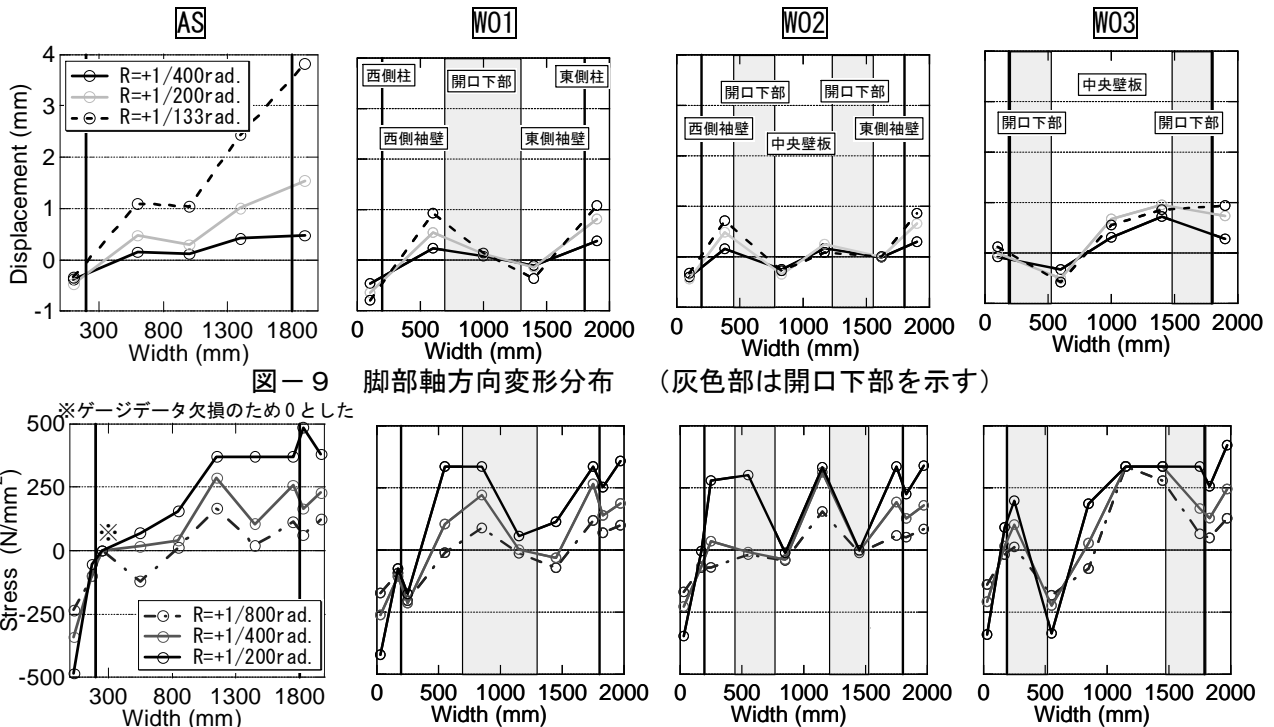


図-9 脚部軸方向変形分布

(灰色部は開口下部を示す)

試験体 AS : 鉄筋降伏強度 柱主筋 485kN/mm^2 壁筋 371kN/mm^2

試験体 $WO1 \cdot WO2 \cdot WO3$: 鉄筋降伏強度 柱主筋 422kN/mm^2 壁筋 336kN/mm^2

図-10 脚部応力分布 (灰色部は開口下部を示す)

ていることが見てとれる。複数開口を有する試験体 WO2 および WO3 も変形量に差があるものの同様の傾向を示した。

以上より、無開口の場合と有開口の場合とでは脚部の変形に顕著な差が現れることがわかった。また、開口数および開口位置の違いによっても耐震壁脚部の変形挙動が異なることが確認できた。

(2) 脚部応力分布

東西柱主筋（外側主筋・内側主筋）および壁縦筋の $R=1/800$, $1/400$ および $1/200\text{rad.}$ の載荷サイクルにおける第 1 サイクル目の正載荷ピーク時での壁および側柱の脚部における鉄筋の応力分布（正側：引張，負側：圧縮）を図-10に示す。応力は鉄筋の履歴特性をバイリニアと仮定し、ひずみゲージ測定値を用いて計算した。

各試験体の応力分布は、載荷が進むにつれて西側柱が圧縮側で東側柱が引張側となり、脚部変形と同様な分布を示した。試験体 AS, WO1 および WO2 の壁部では応力が引張側に増大するが、試験体 WO3 は中央壁板西側において応力が圧縮側に増大する傾向を示した。開口を有する試験体 WO1, WO2 および WO3 の袖壁付柱、中央壁板および側柱の応力分布（開口下部以外）を見ると、いずれにおいても西側に比べて東側の引張応力が大きく、それぞれの部分が開口領域を挟んで独立に曲げモーメントを負担していることが認められる。それに対し、無開口の試験体 AS における応力分布は、西側から東側に向かって引張応力が漸増しており、壁脚部全体でモーメントを負担しているといえる。

以上より、開口を有する試験体 WO1, WO2 および WO3 の壁脚部の変形および応力分布は試験体 AS と異なる挙動を示し、またそれらの分布形状から、試験体 WO1, WO2 および WO3 では、脚部の負担するモーメントが試験体 AS に比べて小さくなると推測される。さらに、各有開口耐震壁においても開口位置によって応力伝達経路が変わることから、脚部で負担するモーメ

ントに差異が生じるため、耐震壁の破壊メカニズム、耐力および変形性能に影響を与えているものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、同一等価開口周比を有する有開口連層耐震壁 3 体の開口位置、個数をパラメータとした静的載荷実験を実施した。その結果以下のことを明らかにした。

- 1) 開口の条件により異なる破壊性状を示すとともに、最大耐力、耐力低下の過程および変形性状に顕著な違いがみられた。
- 2) 等価開口周比を用いた有開口耐震壁のせん断終局強度の算定は、安全側の評価となるが、その予測精度は十分とは言い難い。
- 3) 耐力低下の過程に違いがあることから、試験体 WO3 は試験体 WO1 および WO2 と比べてエネルギー吸収性能の乏しい挙動を示した。
- 4) 無開口耐震壁と比較して、有開口耐震壁では壁脚部の軸方向変形分布および応力分布が異なるため、壁脚部の負担モーメントが小さくなる傾向にある。
- 5) 有開口耐震壁では、開口数および開口位置により応力伝達経路が異なるため、耐震壁の破壊メカニズム、耐力および変形性能に影響を及ぼす。

謝辞

本研究は文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」の「振動台活用による建造物の耐震性向上研究」の分担研究として行われたものである。関係各位に記して感謝の意を表します。

参考論文

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造構造計算規準・同解説，1999.11
- 2) 秋田知芳，倉本洋，松井智哉，壁谷澤寿海：静的載荷実験に基づく RC 造耐震壁の復元力特性のモデル化，構造工学論文集，Vol.51B, pp.415-426, 2005.3
- 3) 国土交通建築研究所：2001 年版 建築物構造関係技術基準解説書，工学図書株式会社，2001.3
- 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