

## 論文 鉛直接合部と開口を有するRC造耐震壁に関する実験的研究

濱田 聡<sup>\*1</sup>・和泉 信之<sup>\*2</sup>・菊田 繁美<sup>\*3</sup>・千葉 脩<sup>\*4</sup>

**要旨**：アウトフレーム形式の中高層RC造集合住宅では、住戸間の耐震壁には、避難用の開口が柱際に設けられる。また、プレキャスト耐震壁などでは、開口近くに鉛直接合部が設けられることがある。そのため、鉛直接合部と開口を有するRC造耐震壁を対象として、3層1スパンの連層耐震壁模型試験体の静的水平載荷実験を行った。その結果から、鉛直接合部の有無、付帯柱に近接した開口の有無、付帯梁の梁型の有無に着目して、せん断破壊型耐震壁の破壊性状、最大耐力、変形性能などを評価し、実用的な知見を得た。

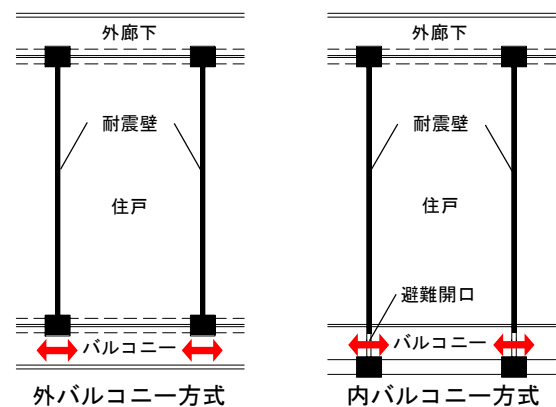
**キーワード**：RC造耐震壁、鉛直接合部、水平載荷実験、せん断耐力、復元力特性

## 1. はじめに

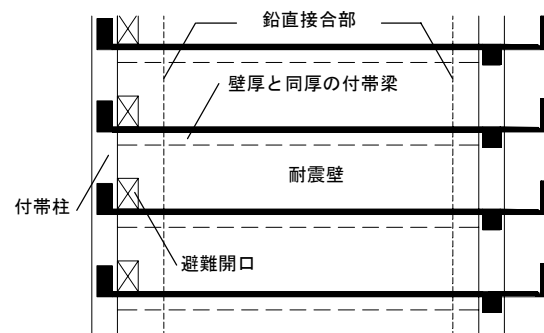
最近、スケルトン・インフィル住宅を目指して、アウトフレーム形式の中高層RC造集合住宅が建設されている。これらの標準的な構造形式は、桁行方向がラーメン構造、張間方向が連層耐震壁構造である。図-1に示すように、南側の骨組を外周部に設けるアウトフレーム形式では、内バルコニーとなる。そのため、住戸間の耐震壁には、避難用の開口が柱際に設けられることが多い。一方、プレキャスト工法、あるいは小工区分割による施工の合理化を図るには、耐震壁に鉛直接合部を設け、さらに、壁上下の付帯梁を壁厚と同じ幅とした梁型の無い有開口連層耐震壁とすることが求められる。このような形式の住宅の戸境壁を対象とした、付帯柱に近接した開口を有する梁型の無いRC造連層耐震壁の構造実験は、実施されていない。さらに、開口に近接して鉛直接合部を設けた有開口連層耐震壁に関する研究も、報告されていない。

そのため、第一段階として、本研究では、鉛直接合部と開口を有するRC造耐震壁のせん断耐力を評価するため、耐震壁模型試験体の水平載荷実験を行う。鉛直接合部の有無、付帯柱に

近接した開口部の有無、付帯梁の梁型の有無に着目して、せん断破壊型耐震壁の破壊性状、最大耐力、変形性能などについて検討する。



(a) アウトフレーム形式の略伏図



(b) 鉛直接合部と開口を有する連層耐震壁

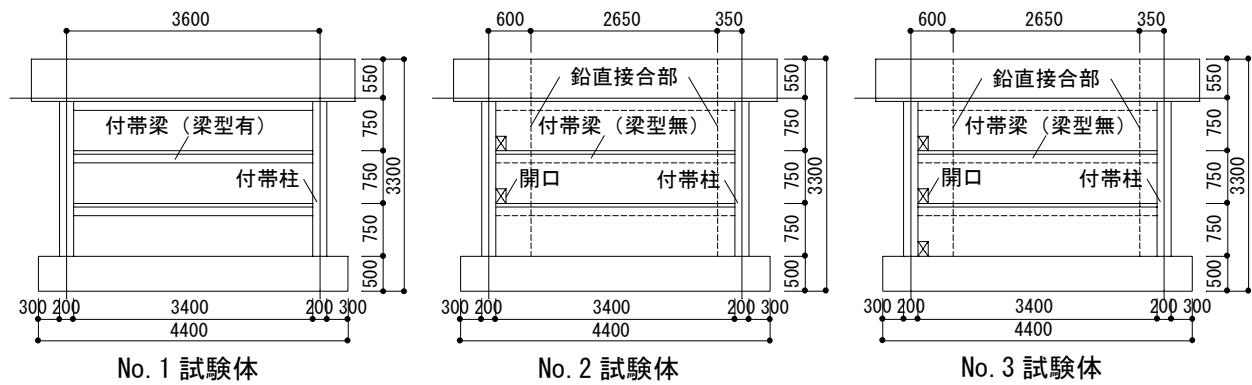
図-1 アウトフレーム形式の集合住宅の例

\*1 戸田建設（株）構造設計部 工修 （正会員）

\*2 戸田建設（株）構造設計部主管 博（工）（正会員）

\*3 戸田建設（株）技術研究所 工修 （正会員）

\*4 戸田建設（株）技術研究所所長 工修 （正会員）



図—2 3層1スパン試験体概要

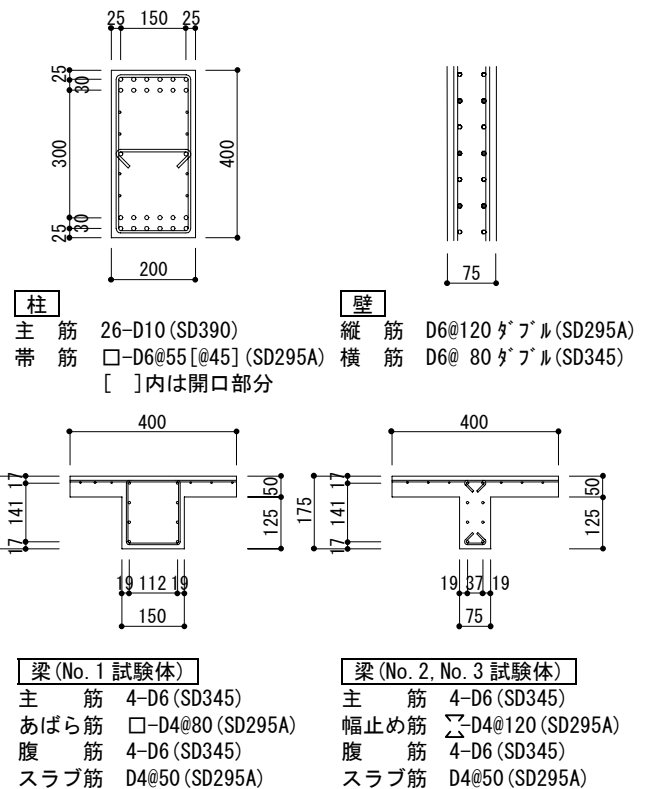
## 2. 実験概要

### 2.1 実験計画

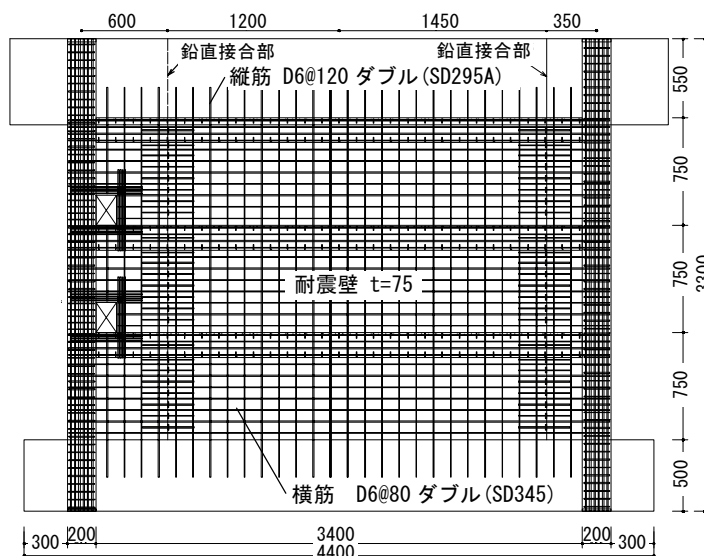
本実験では、鉛直接合部と開口を有し、せん断破壊が先行する RC 造連層耐震壁を対象として、耐震壁模型試験体の静的水平載荷実験を行う。試験体は、鉛直接合部、開口および梁型の有無を要因として計画する。なお、鉛直接合部と開口を有し、曲げ降伏が先行する連層耐震壁の変形性能の評価は、今後の課題としたい。

### 2.2 試験体概要

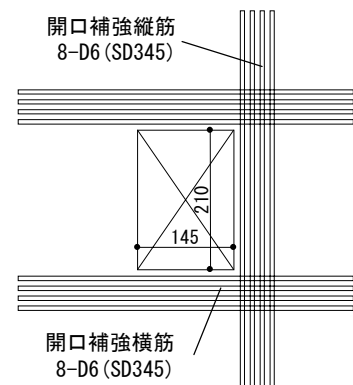
試験体は、図—2に示す実大の約 1/4 縮尺の 3 層 1 スパンの連層耐震壁模型試験体 3 体である。No.1 試験体は、一般の集合住宅における標準的な連層耐震壁を想定し、梁型の有る無開口の一体打ち耐震壁である。一方、No.2 試験体および No.3 試験体は、鉛直接合部と開口を有する



図—4 耐震壁詳細図



図—3 No.2 試験体配筋詳細



図—5 耐震壁開口補強詳細

梁型の無い耐震壁である。No.2 試験体は、全層に鉛直接合部が有り、2 層と 3 層に開口を有するが、1 層には開口が無い。一方、No.3 試験体は、全層に鉛直接合部が有り、開口を有する。

耐震壁の壁筋は、各試験体とも共通で、縦筋比 0.71%、横筋比が 1.07%であり、比較的配筋量が多い。配筋詳細の例として No.2 試験体を図—3 に示す。また、付帯柱の配筋は耐震壁の曲げ降伏が先行しないように補強している（図—4）。No.2 試験体および No.3 試験体の付帯梁は、壁厚と同じ幅の梁である。耐震壁開口まわりの補強筋は、RC 規準<sup>1)</sup>の補強規定を満足するように配筋している（図—5）。耐震壁の鉛直接合部は、左右の付帯柱横に 2 箇所有り、せん断伝達強度<sup>4)</sup>時の水平力がせん断耐力<sup>3)</sup>を上回るように、シヤーキー、あるいは補強筋を設ける（図—6）。No.3 試験体の右側鉛直接合部は、接合部の挙動比較のため、シヤーキーを無くし、他の接合部のせん断伝達強度<sup>4)</sup>を上回るように、補強筋量を増加している。試験体の材料試験結果を表—1 に示す。

## 2.3 荷重方法および荷重履歴

試験体の水平方向荷重は、図—7 に示すように試験体両側に設置した 2 台のジャッキによる正負繰返し漸増加力とする（図—8）。

軸力は、試験体の上部のジャッキにより、柱断面積に対してコンクリート圧縮強度の約 0.2 倍に相当する一定軸力を荷重する。

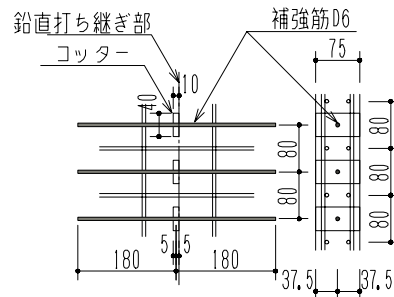
表—1 材料試験結果

コンクリート		ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )
No. 1		27300	37.3	2.99
No. 2	壁	26100	33.1	2.87
	柱	27300	38.2	2.89
No. 3	壁	27300	34.9	2.65
	柱	30500	42.2	3.20

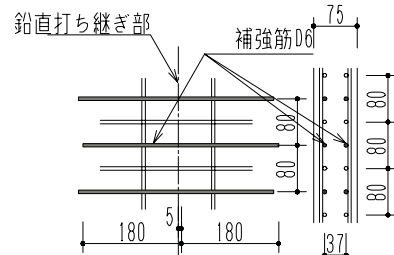
  

鉄筋	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D10 (SD390)	184000	427	579
D6 (SD345)*	166000	349	487
D6 (SD295A)*	154000	323	423
D4 (SD295A)*	206000	379	578

\*：0.2%オフセット法による降伏強度

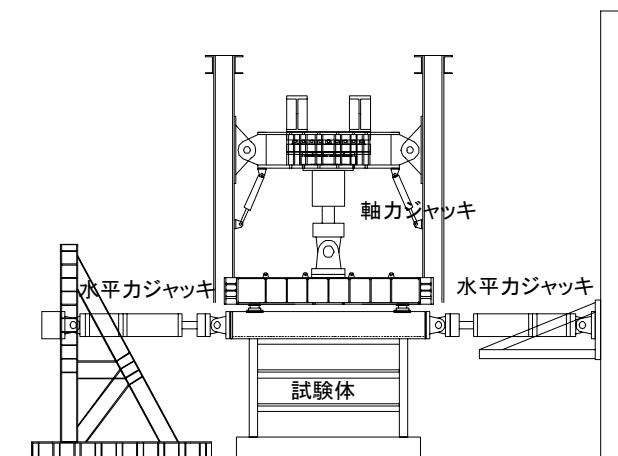


No. 2 試験体両側、No. 3 試験体左側鉛直接合部  
(a) シヤーキー+補強筋の鉛直接合部

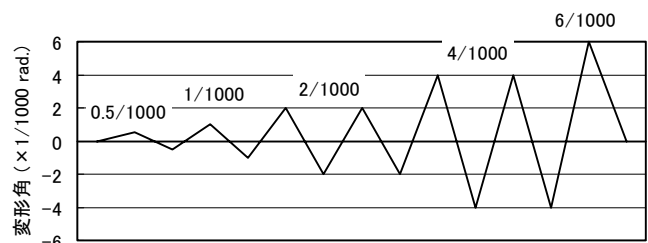


No. 3 試験体右側鉛直接合部  
(b) 補強筋のみの鉛直接合部

図—6 耐震壁鉛直接合部詳細



図—7 試験体の荷重方法



図—8 荷重スケジュール

## 3. 実験結果

### 3.1 実験経過

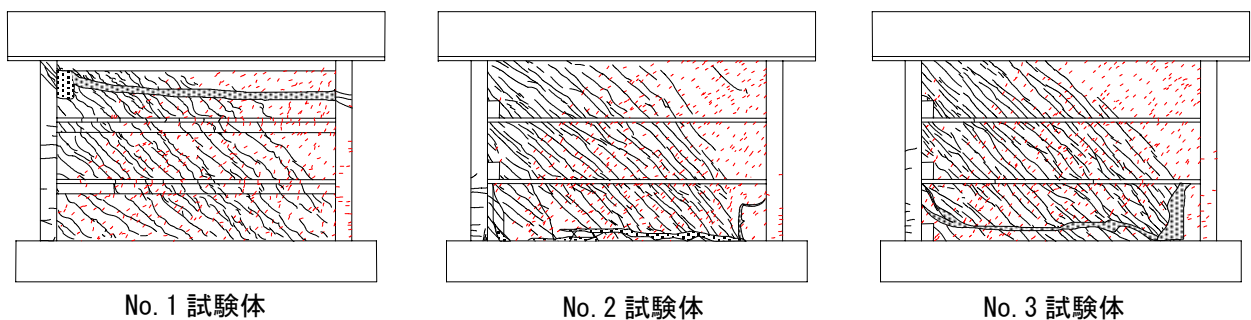
実験終了時におけるひび割れ状況を図—9 に示す。各試験体とも水平変形角が 0.5/1000rad. において壁面に約 45 度方向のせん断ひび割れ、

1/1000rad.において柱脚部に曲げひび割れが発生し、4/1000rad.までにせん断ひび割れが壁面全体に伸展した。その後、各試験体とも水平変形角が 5/1000rad.付近でせん断破壊した。破壊モードは、No.1 試験体が3層のせん断すべり破壊、No.2 試験体および No.3 試験体が1層のせん断すべり破壊であった。No.2 試験体および No.3 試験体の壁の鉛直接合部は、最大耐力に至るまで大きなずれや開きは見られなかった。また、いずれの試験体においても、せん断ひび割れの伸展状況は同様な傾向を示しており、梁型の有無による影響は見られなかった。各サイクルの

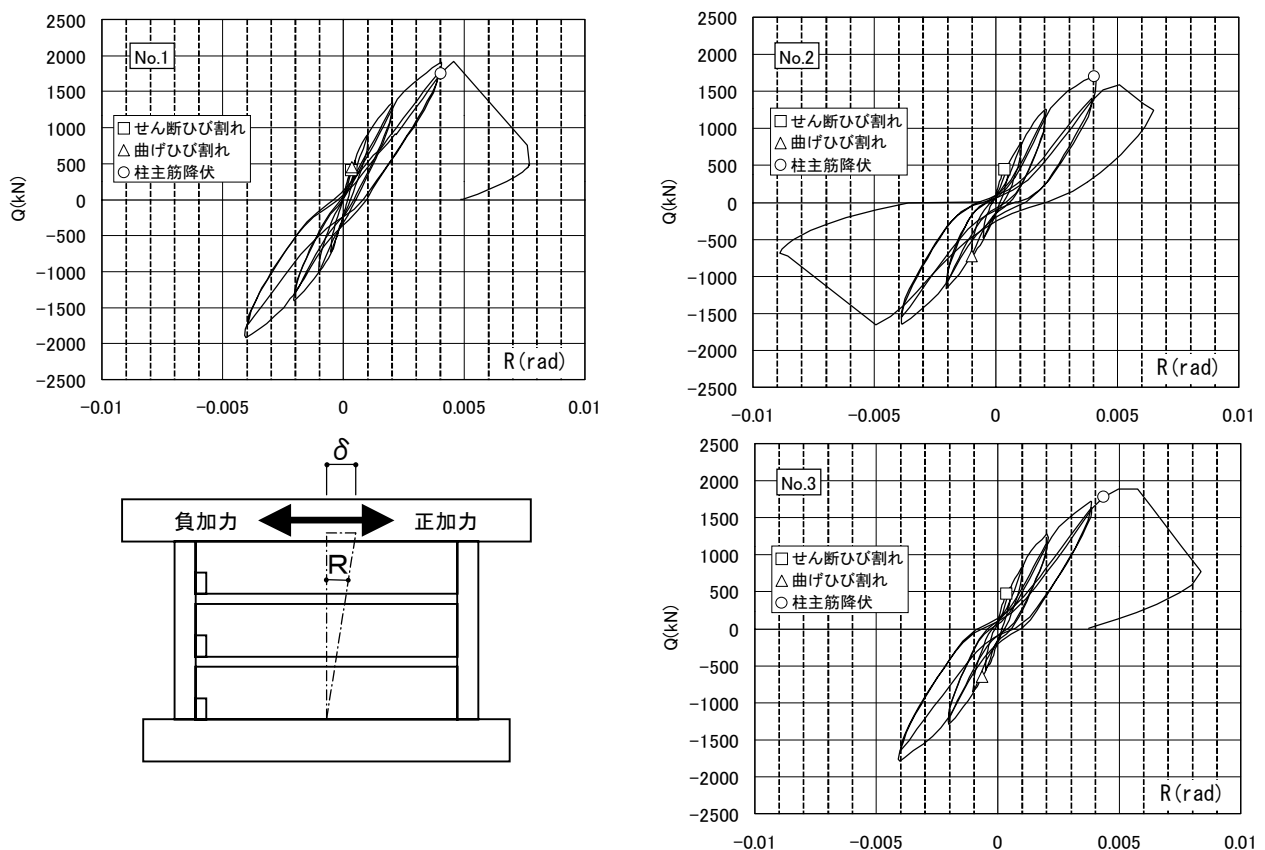
ピーク時における壁面の最大せん断ひび割れ幅は、水平変形角が 1/1000rad.で 0.08mm, 2/1000rad.で 0.2mm, 4/1000rad.で 0.4mm であった。水平力を除荷した後の最大残留せん断ひび割れは、水平変形角が 2/1000rad.までは完全に閉じており、4/1000rad.においても、ひび割れ幅が 0.06mm と小さかった。

### 3.2 水平力—水平変形角関係

各試験体の水平力—水平変形角関係を図—10に示す。各試験体とも水平変形角が 4/1000rad.までは耐力が上昇し続けた。引張側最外縁の柱主筋が降伏した後、水平変形角が 5/1000rad.近



図—9 実験終了時のひび割れ状況



図—10 水平力—水平変形関係

傍でせん断破壊により耐力が低下した。履歴性状は、鉛直接合部および開口の無い No.1 試験体に比べて、いずれも有する No.2 試験体および No.3 試験体では、水平変形角 2/1000rad.の 2 サイクル目以降でスリップ性状が見られた。

#### 4. 実験結果の考察

##### 4.1 荷重—変形関係と破壊形式

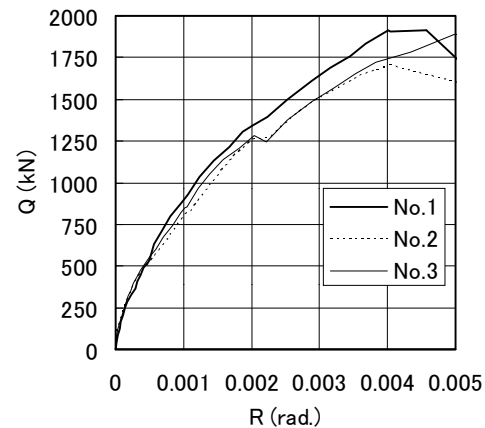
水平力—水平変形関係の包絡線の比較を図—11 に示す。包絡線は、水平変形角が 2/1000rad.程度まではほぼ同様な傾向を示したが、それ以降は No.1 試験体に比べて No.2 試験体および No.3 試験体の荷重が若干低くなった。これは、No.2 試験体および No.3 試験体の履歴ループがスリップ性状を示したためと考えられる。

##### 4.2 せん断耐力の評価

各試験体の諸強度について実験値と計算値の比較を表—2 に示す。曲げひび割れ強度の実験値は計算値<sup>1)</sup>の 0.58～0.89、せん断ひび割れ強度の実験値は計算値<sup>2)</sup>の 0.74～0.88 であり、実験値は計算値に比べて小さい。

いずれの試験体とも破壊モードは壁部のせん断破壊であり、実験時の最大耐力はせん断耐力の計算値を上回った。

有開口耐震壁のせん断耐力は、開口の位置等の影響を受けるとされているが、現状の設計では、各層ごとに梁型の有る無開口耐震壁のせん断耐力に許容耐力上の開口による耐力低減率( $\gamma$ )<sup>1)</sup>を乗じたものが準用されている<sup>3)</sup>。本実験における最大耐力は、開口の影響を耐力低減率 $\gamma$ で考慮した場合、文献3)におけるせん断強度 min 式による表—2 中の計算値(A)<sup>3)</sup>に対して 1.44～1.54 倍、せん断強度 mean 式による表—2 中の計算値(B)<sup>3)</sup>に対して 1.20～1.35 倍であり、両式は実験値を安全側に評価できる。本実験の範囲では、上記両式による鉛直接合部と開口を有し、梁型の無い試験体のせん断耐力の計算値は、実験値に対して標準的な無開口試験体とほぼ同等に安全側の評価ができる。なお、参考として、開口の影響を無視して、RC 靱性保証指



図—11 水平力—水平変形関係の包絡線

表—2 実験値と計算値の比較

		No. 1	No. 2	No. 3
曲げひび割れ強度時水平力 (kN)	実験値	448	697	643
	計算値*1 (実験/計算)	772 (0.58)	784 (0.89)	834 (0.77)
せん断ひび割れ強度 (kN)	実験値	402	445	476
	計算値*2 (実験/計算)	546 (0.74)	523 (0.85)	544 (0.88)
最大耐力 (kN)	実験値(正方向)	1915	1702	1890
	実験値(負方向)	1917	1652	1788
せん断耐力 (kN)	計算値(A)*3 (実験/計算)	1310 (1.46)	1151 (1.44)	1160 (1.54)
	計算値(B)*4 (実験/計算)	1592 (1.20)	1390 (1.22)	1402 (1.35)
	計算値(C)*5 (実験/計算)	1738 (1.10)	1625 (1.05)	1671 (1.13)
曲げ耐力時水平力 (kN)	計算値*6	2661	2684	2774
鉛直接合部耐力時水平力 (kN)	計算値*7 (実験/計算)	— —	1540 (1.11)	1560 (1.21)

\*1:  $Q_c = (1.8\sqrt{\sigma_B + \sigma_0}) \cdot Z_e/h$

\*2:  $V_c = \tau_{scr} \cdot t_w \cdot l_w / \chi_w$

\*3:  $Q_{su} = (0.053 \cdot p_{te}^{0.23} (\sigma_B + 180) / (M / (Q \cdot l) + 0.12) + 2.7(p_w \cdot \sigma_{wy})^{0.5} + 0.1 \cdot \sigma_0 t_e \cdot j \cdot \gamma$

開口低減率:  $\gamma = \min(\gamma_1, \gamma_2)$

$\gamma_1 = 1 - l/l_0, \gamma_2 = 1 - (h_0 \cdot l_0 / h \cdot l)^{0.5}$

\*4:  $Q_{su} = (0.068 \cdot p_{te}^{0.23} (\sigma_B + 180) / (M / (Q \cdot l) + 0.12) + 2.7(p_w \cdot \sigma_{wy})^{0.5} + 0.1 \cdot \sigma_0 t_e \cdot j \cdot \gamma$

\*4, \*5 の式中、文献3)では、 $1 \leq M / (Q \cdot l) \leq 3$  であるが、表中の計算値は、 $M / (Q \cdot l) = 0.66$  として算定。

\*5:  $V_u = t_w \cdot l_{wb} \cdot p_s \cdot \sigma_{sy} \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w \cdot l_{wa} \cdot \nu \cdot \sigma_B / 2$

\*6:  $Q_u = M_u / h, M_u = (a_t \cdot \sigma_y \cdot l_w + 0.5 \cdot a_w \cdot \sigma_{wy} \cdot l_w \cdot 0.5N \cdot l_w)$

\*7:  $Q_u = Q_{DV} \cdot l_w / h, Q_{DV} = 0.1 \sigma_B \cdot A_{sc} + \sigma_y \sum A_v$

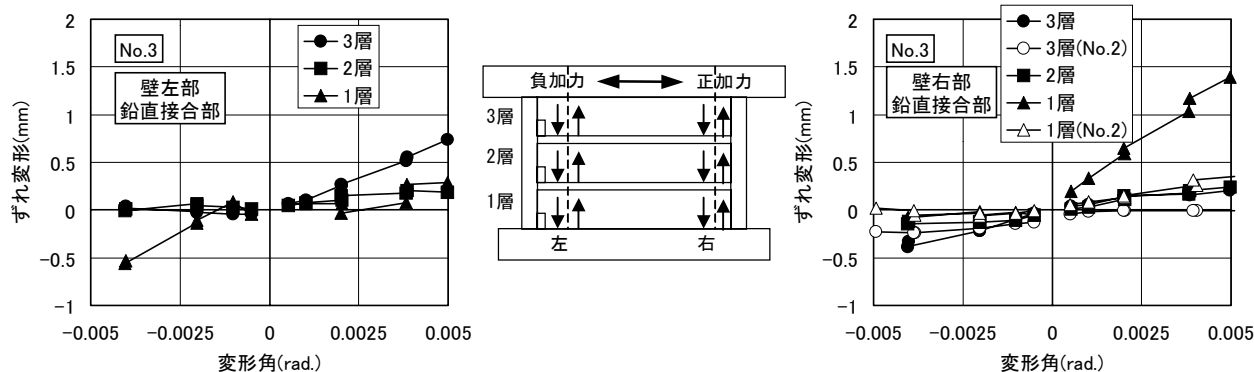
\*2, \*5: 式中記号は文献2)による。

\*3, \*4: 式中記号は文献3)による。

\*7: 式中記号は文献4)による。

針式<sup>2)</sup>を適用した場合、実験値は、計算値(C)に対して、1.05～1.13 倍である。

また、最大耐力の実験値は、シヤーキーと鉄筋のダウエル強度を考慮した鉛直接合部のせん



図—12 No. 3 試験体の鉛直接合部の変形

断伝達耐力<sup>4)</sup>時の水平力の計算値に比べて, 1.11～1.21 倍である。

### 4. 3 鉛直接合部の変形

No.3 試験体の各サイクルピーク時における各層の鉛直接合部のずれ変形を図—12 に示す。正方向加力においては鉛直接合部の左側 3 層と右側 1 層のずれ変形が, 変形角の増大に伴い大きい。負方向加力では逆に左側 1 層部と右側 3 層部のずれ変形が大きい。これは壁面に形成された圧縮ストラットの方向に一致しており, 45 度方向に生じた圧縮ストラットの鉛直成分により, ずれ変形が増大したものと考えられる。

壁右側の鉛直接合部において, 補強筋とシヤークーのある No.2 試験体と補強筋のみの No.3 試験体を比較すると, 正方向加力において No.3 試験体のずれ変形の方が大きいことから, シヤークーがずれ変形の抑制に効果があると考えられる。なお, 鉛直接合部のずれ変形は, シヤークーがない No.3 試験体の右側 1 層が大きい, 他の層は比較的小さく, 3 層全体のずれ破壊は生じていないと判断される。

## 5. 結論

これまでのせん断破壊型連層耐震壁の実験から得られた実用的な知見を以下に述べる。

- (1) 標準的な無開口試験体および鉛直接合部と開口を有する試験体は, 水平変形角が約 4/1000rad.までは耐力が増加し, 水平変形角が約 5/1000rad.においてせん断破壊により耐力が低下した。

- (2) 各試験体のせん断耐力の実験値は, 柱際の開口の影響を開口に対する低減率で考慮した文献 3)のせん断強度  $\min$  式による計算値に対して 1.44～1.54, せん断強度  $\text{mean}$  式による計算値に対して 1.20～1.35 であり, 各計算式は実験値を安全側に評価できた。
- (3) 上記の計算式による鉛直接合部と開口を有する試験体のせん断耐力の計算値は, 実験値に対して標準的な無開口試験体とほぼ同等の安全率を示した。
- (4) 本実験の範囲では, 鉛直接合部の有無, 梁型の有無による最大耐力および破壊性状に及ぼす顕著な影響は見られなかった。
- (5) 鉛直接合部のシヤークーは, ずれ変形を抑制する効果が認められた。なお, 本実験では, シヤークーのせん断伝達強度をダウエル鉄筋で補強した鉛直接合部のずれ破壊は, 最大耐力に至るまで生じなかった。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算標準・同解説, pp.218-241, 1999
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, pp.208-240, 1999
- 3) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), pp.401-403, 1990
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所ほか：壁式ラーメン鉄筋コンクリート造設計施工指針, pp.53-85, 2003