

論文 RC 造連層有開口壁の静加力実験

野田浩志*1・杉下陽一*1・加藤大介*2

要旨：有開口壁を有するRC造建物の性能評価型耐震設計法を確立するための資料を得ることを目的として、脚部曲げ降伏で設計された連層のRC造有開口壁の静加力実験を行った。試験体は2体で、連層壁の下層部2層を模擬し、片持ちばり型加力を行った。開口は中央開口で開口周比0.3と0.4である。

キーワード：鉄筋コンクリート造 連層耐震壁 開口 曲げ降伏 静加力実験

1. 序

本研究は、連層耐震壁の設計法に関わる各問題点の内、開口がある連層耐震壁の問題点に着目し、その弾塑性挙動を実験的に把握するものである。現設計法では開口壁は開口の大きさに従いそのせん断強度を低減させる方法を用いている。この方法は簡便ではあるが、実際の力の流れを反映させているとはいえず、開口周囲の補強筋の配筋も終局強度の観点からは合理的に定まらないなどの問題点も多い。特に、せん断破壊型の1層耐震壁の実験結果との対応は悪くないが、曲げ降伏する連層耐震壁の靱性設計に適用するとなると疑問が残る。筆者らは文献[1,2]で有開口耐震壁のせん断実験を行い、文献[3]で新たな連層有開口耐震壁の耐震設計法の考え方を提案している。2章でその考え方を示す。

2. 文献[3]による連層有開口壁の設計法

図-1に示すように、開口壁を開口左右の袖壁付柱(図中斜線部分)と開口上下の垂壁・腰壁付梁(図中点影部分)の各耐震要素に分離して骨組と考え、それぞれについてせん断および曲げ設計する。左右の袖壁のせん断設計は文献[4]のトラス機構とアーチ機構による和とした無開口耐震壁用の塑性理論式により行う。また、その変形能はコンクリート強度の有効係数と変形能の関係を文献[4]で示された無開口耐震壁と同じと考えて各層ごとに適用して評価する。この方法によると、それぞれの要素は作用する応力を評価して、曲げとせん断に対して配筋するので、開口周囲の縦横の補強筋もこの過程で合理的な評価が可能となる。また、層間のせん断力の伝達も梁の主筋などで確保する手順も明快となる。しかしながら、既往の研究では考え方を提案したにすぎず、実際に実験等で確認したのは、「1層のせん断破壊型有開口耐震壁において、そのせん断強度が両側の袖壁付き柱の強度の和で評価できる」ことだけである。そこで、

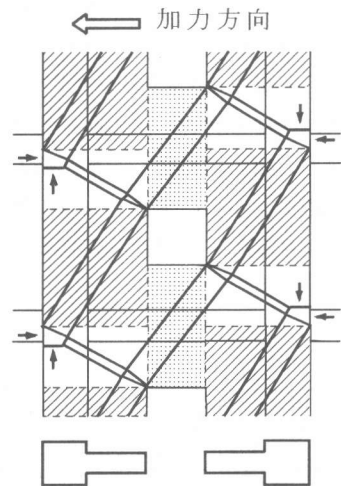


図. 1 耐震壁に作用する応力

*1 新潟大学大学院 工学部建設学科、(正会員)

*2 新潟大学助教授 工学部建設学科、工博(正会員)

本研究ではこの有開口壁をいくつかの耐震要素に分離して靱性設計する方法を確立するために、曲げ降伏する連層有開口壁の挙動を実験的に評価することを目的とする。

3. 実験概要

3. 1 試験体 試験体は2体で、いずれも連層有開口耐震壁の下部2層を対象とし、2層1スパンモデルに縮小したが、加力は3層部分に相当する試験体上部の剛な梁に与えている。実験パラメータは開口周比と開口周囲に入る開口補強筋の種類である。試験体WNO1では開口周比を0.3とし、試験体WNO2では開口周比をRC規準において耐震壁として扱える最大値の0.4とした。表-1(a)(b)(c)に試験体の諸元を示す。表-1(a)は柱型の断面と配筋、表-1(b)は壁板の断面と配筋、表-1(c)は梁型の断面と配筋である。以下に各補強筋の配筋の考え方の概要を示す。柱・梁主筋及び壁縦横補強筋は現実的な配筋として試験体2体で共通に設定した。ただし、柱主筋は確実に曲げ降伏させるためにやや少なめである。開口周囲の縦横補強筋は、曲げ降伏時の開口左右の袖壁付柱と開口上下の垂壁・腰壁付梁の応力に対し、これらの部材の曲げ強度が上回るように設定した。次に、これらの部材のせん断強度も同様に曲げ降伏時の応力に対し上回ることを確認したが、各試験体の1階部分でせん断強度が不足した結果となった。そこで、開口周比0.4の試験体WNO2では開口周囲の縦横補強筋の代わりに斜め筋補強筋を配筋して、せん断補強を行った。また、開口周比0.3の試験体WNO1では開口周囲の横補強筋を、梁の曲げ筋としてだけではなく、開口横のせん断補強筋として評価するために、左右に延長し左右の側柱内に定着した。さらに、1階部分の柱の帯筋は柱脚部

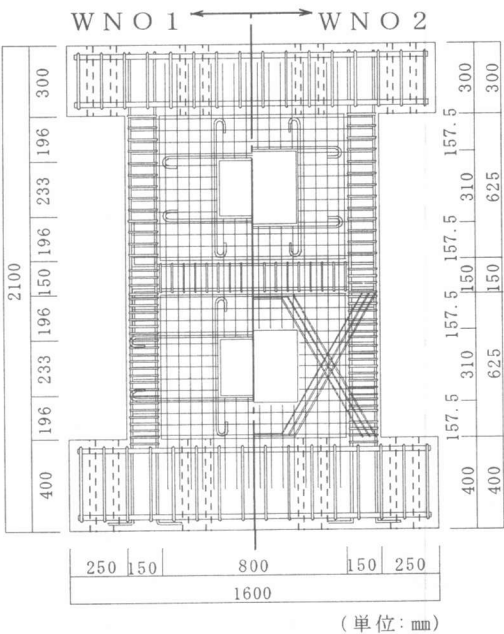


図.2 試験体配筋図

表-1 試験体の諸元

(a) 試験体の柱部分断面と配筋

試験体	断面	主筋	全主筋比	帯筋(1層部分)	帯筋比	帯筋(2層部分)	帯筋比
共通	150mm×150mm	4-D10	0.0127	2-D6-@30	0.0142	D6-@50	0.0085

(b) 試験体の壁部分の断面と配筋

試験体	開口周比	壁厚	壁筋	壁筋比	開口補強(1層部分)	開口補強(2層部分)
WNO1	0.3	75mm	2-φ4-@50	0.0069	4-D10 #型	4-D10 #型
WNO2	0.4				12-D6 X型	4-D10 #型

(c) 試験体の梁部分の断面と配筋

試験体	断面	主筋	全主筋比	あばら筋	あばら筋比
共通	150mm×150mm	4-D10	0.0127	2-D6-@50	0.0142

でのせん断破壊で壁としての耐力が決まることを防止するために、2- $\phi 6\text{-}\textcircled{30}$ としてコンクリートを十分拘束した。なお、壁板は $\phi 4$ 鉄筋をダブルで使用したが、交点を溶接し溶接金網として使用した。また、幅止め筋($\phi 4$)も使用している。図-2に試験体配筋図を示す。また、試験体の鉄筋およびコンクリートの材料特性を表2(a)(b)に示す。

3. 2 载荷および測定計画 载荷は図-3に示すような片持ち柱形式の加力である。軸力は試験体左右の2台のジャッキによりそれぞれが常に74 kNの圧縮力を保つようにし、試験体には148kNの軸力を加えるようにした。また水平荷重は上部の剛な梁の上にH型钢を載せその芯に両端ピン支持のジャッキにより左右交番の片押しによる水平力を加えることにより与えた。载荷点は壁脚から190 cmの高さとし、载荷履歴は载荷点での部材角で1/400、1/200、1/100、1/67、1/50、1/25をそれぞれ2回ずつ载荷し、各試験体の最大耐力の70%の低下まで载荷するものとした。測定は加力点の水平変位(この値を試験体の水平変位とした)の他に、各部分の水平変位、曲げ変形、及び鉄筋の歪について行った。ここで、曲げ変形は左右柱の側面を20cm間隔で7分割し、その軸方向変形より求めた。

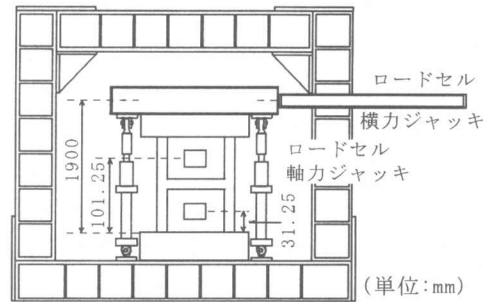


図.3 加力装置図

表-2 材料の性質

(a) 鉄筋引張試験の測定結果

鉄筋の種類	降伏強度(MPa)	引張強度(MPa)
$\phi 4$	530	560
D 6	317	478
D 10	330	469

(b) コンクリートの性質

試験体名	WNO1	WNO2
圧縮強度(MPa)	24.9	27.2
圧縮強度歪(μ)	2187	2417
ヤング係数($10^4 \times \text{MPa}$)	2.23	2.34

4. 実験結果

4. 1 破壊経過 図-4(a)(b)に各試験体の部材角が1/100rad時、及び载荷終了時でのひび割れ図を示す。試験体はいずれも正負の1サイクル(部材角1/400)において柱脚部の曲げひび割れ、開口隅角部から初期せん断ひび割れが観察された。3サイクル(部材角1/200)で1層部の柱及び壁に曲げひび割れが数多く生じ、一部のコンクリートが剥落した。試験体WNO2では7サイクル(部材角1/67)で柱脚部分でコンクリートが剥離・剥落し、柱主筋が露出した。以降基礎面と壁面とのひび割れ幅が増大し、9サイクル(部材角1/50)では試験体WNO1で右側の柱脚のコンクリートが剥落したところから柱主筋のキンキングが観察された。最終サイクル(部材角1/50)では、試験体WNO1は1階部分でのせん断ひび割れが顕著に見られ、試験体WNO2では試験体WNO1に比べ、2層部分でのせん断ひび割れが多く見られた。またいずれの試験体でも最終的には基礎面での曲げひび割れが顕著となり、左右の柱脚での圧壊および壁筋の破断により耐力が低下した。

4. 2 水平荷重と部材角変形 図-5に各試験体の水平荷重-全体変形部材角曲線を、図-6に各試験体の水平荷重-曲げ変形部材角曲線を加力点での測定による部材角で比較して示す。図-5、図-6より全体的にみてせん断変形より曲げ変形のほうが先行していることが分かる。図-5では各試験体とも正の5サイクル(部材角1/67rad)のほぼ最大変形時に最大耐力を示しており、部材角1/100radを越えても耐力は上がりピーク以後の耐力もそれほど急激な低下を見せず両試験体とも

極めて良好な変形能であったことが判る。履歴ループも両試験体とも変形レベルの増大にともない逆S字型のスリップ性状が顕著となった。2つの試験体を比較してみると最大耐力でもその後の耐力低下でもそれほど大きな変化は見られないが8サイクル以後からピークに向かうまでの耐力が開口周比の小さな試験体WNO1よりも開口周比の大きなWNO2の方が低下しているのが判る。図-6は曲げ変形による部材角を示したもののだが、試験体WNO1では加力点での曲げ変形による部材角は全体変形による部材角の正方向でほぼ90%、負方向でほぼ78%の成分であった。試験体WNO2の曲げ変形部材角は正方向でほぼ80%、負方向でほぼ88%の曲げ変形成分であった。

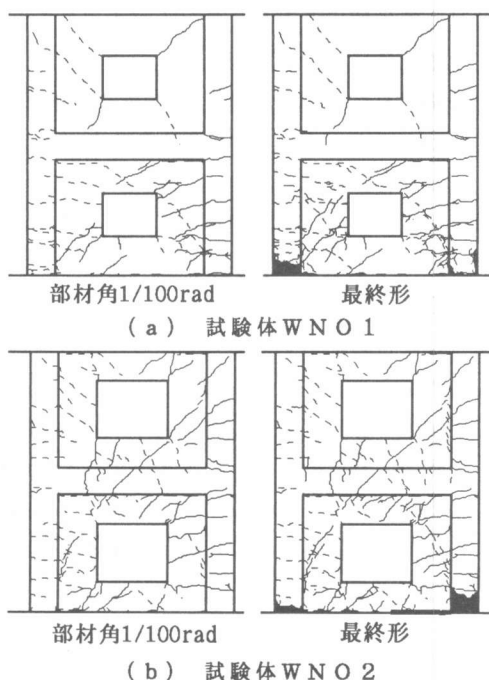


図.4 ひび割れ図

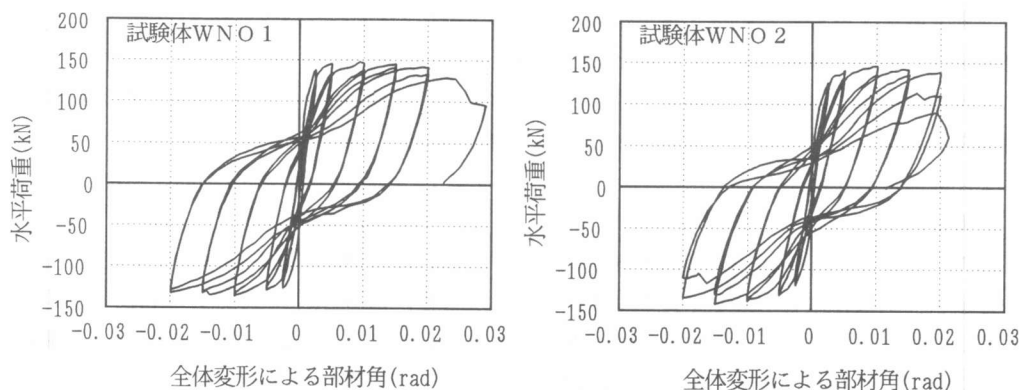


図.5 水平荷重－全体変形部材角曲線

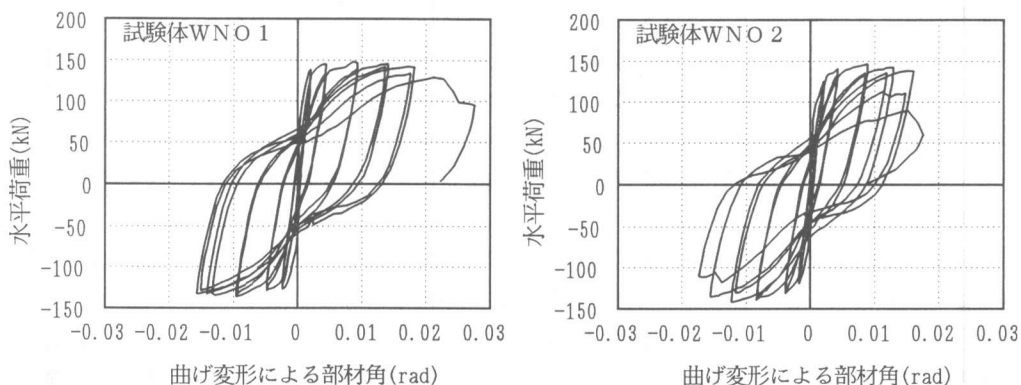


図.6 水平荷重－曲げ変形部材角曲線

5. 実験結果の検討

5. 1 最大耐力と変形能の検討

表-3に各試験体の主筋降伏時耐力と最大耐力および変形能の一覧を示す。ここで、変形能の実験値は包絡線上で復元力が最大耐力の80%に低下した時の変形とするのが一般的であるが、80%以外の点を用いてデータを整理する場合もあるので、ここでは最大耐力の95%と90%に低下した点についても示した。なお、正負でデータがある場合には小さい方とし、また、変形は全体変形と曲げ変形について1層、2層、加力点について示した。両試験体ともに最大耐力時からの耐力低下が顕著に見られず、最大耐力の95%に低下したのは10サイクルに入ってからなので、最大耐力の90%、80%に低下した点は柱主筋もしくは壁縦筋の破直前あるいは破断後であった。柱の主筋降伏点は柱脚部分に添付した歪ゲージが降伏した点とした。試験体WNO1とWNO2を比較すると、ほぼ同程度であったが、最大せん断力と変形能はわずかに試験体WNO1の方が上回っていた。

5. 2 計算値との比較

表-4, 5に各試験体の1, 2層部分における左右の袖壁のせん断強度の計算値を示す。比較のために実験値と曲げ強度時のせん断力の略算値も示した。せん断強度式は(i)広沢式：1層部分のみのせん断強度を広沢式で計算して開口低減率を用いたもの、(ii)無開口式：1層部分のみの無開口せん断強度を学会指針[4]により計算して開口低減率を用いたもの、(iii)有開口式：文献[3]により左右の袖壁の強度の和としたもの（本例の場合は圧縮側袖壁がせん断強度、引張側袖壁が曲げ強度で決まる）、の3通り考えた。なお、有開口式で用いる袖壁高さは引張側が壁上面から開口下面、圧縮側が開口上面から壁脚までとし（図-1参照）、非ヒンジ領域の式を用いた。さらに、試験体WNO1の1階では開口周囲の横補強筋を側柱に定着したので、これを袖壁の等価な壁横筋として考慮した。一方、表-6は各試験体の開口の上の梁の曲げ強度とせん断強度を比較したものであるが、比較のために文献[3]で示した曲げ強度時の梁せん断力の推定値（設計用応力）も示した。いずれのケースでも、試験体WNO2では斜め筋の効果を圧縮および引張側も考慮して算入した。なお、文献[3]で示した考え方および3. 1節で示した試験体の設計は、(iii)の

表-3 各層における測定結果

試験体名：WNO1		主筋 降伏時	最大 耐力時	最大耐力 の95%時	最大耐力 の90%時	最大耐力 の80%時
せん断力 (kN)		132	147	140	132	118
1層	全体部材角(rad)	0.0022	0.0086	0.0208	0.0222	0.0264
	全体変形 (mm)	1.54	6.01	14.6	15.6	18.5
	曲げ変形角(rad)	0.0014	0.0071	0.0153	0.0149	0.0210
	曲げ変形 (mm)	0.99	4.96	10.7	10.4	14.7
2層	全体部材角(rad)	0.0025	0.0090	0.0193	0.0184	0.0258
	全体変形 (mm)	3.74	13.3	28.4	27.1	38.0
	曲げ変形角(rad)	0.0020	0.0083	0.0176	0.0170	0.0237
	曲げ変形 (mm)	2.89	12.2	26.0	25.1	35.0
加力点	全体部材角(rad)	0.0027	0.0092	0.0201	0.0201	0.0258
	全体変形 (mm)	5.07	17.5	38.1	38.1	49.1
	曲げ変形角(rad)	0.0021	0.0086	0.0182	0.0175	0.0243
	曲げ変形 (mm)	4.00	16.3	34.6	33.3	46.2
試験体名：WNO2		主筋 降伏	最大 耐力時	最大耐力 の95%時	最大耐力 の90%時	最大耐力 の80%時
せん断力 (kN)		124	146	139	131	117
1層	全体部材角(rad)	0.0024	0.0099	0.0239	0.0238	0.0227
	全体変形 (mm)	1.65	6.93	16.7	16.7	15.9
	曲げ変形角(rad)	0.0015	0.0073	0.0135	0.0134	0.0091
	曲げ変形 (mm)	1.04	5.12	9.47	9.40	6.37
2層	全体部材角(rad)	0.0029	0.0115	0.0236	0.0234	0.0200
	全体変形 (mm)	4.33	17.0	34.9	34.5	29.5
	曲げ変形角(rad)	0.0020	0.0085	0.0155	0.0154	0.0110
	曲げ変形 (mm)	2.89	12.6	22.9	22.7	16.2
加力点	全体部材角(rad)	0.0025	0.0101	0.0200	0.0198	0.0163
	全体変形 (mm)	4.79	19.2	38.0	37.6	31.0
	曲げ変形角(rad)	0.0021	0.0089	0.0160	0.0158	0.0113
	曲げ変形 (mm)	3.95	16.9	30.4	30.1	21.4

有開口式と表-6で示した梁の値に基づいて行っている。なお、表-7には1層部分を対象に有開口式を使って、コンクリートの有効強度の係数を低下させていったときに、せん断強度が曲げ強度時のせん断力になるときの対応する保証変形角 R_u （すなわち変形能計算値）および最大耐力の80%に低下したときと定義した変形能実験値も示した。1層の袖壁の強度式を比較すると、広沢式、無開口式に比べ、有開口式は小さい値となった。これは引張側の袖壁には引張軸力が作用するので曲げ強度が小さくなるからである。この値を実験の挙動と比べると、広沢式、無開口式は実験値のせん断力を大きく上回り、変形能が高かった実験結果と対応する。しかしながら、有開口式は実験値とほぼ同程度の強度となり、表-7の変形能をみてもわかるように、変形能が高かった実験結果には対応しない結果となった。すなわち、文献 [3] で示した考え方は安全側すぎる可能性があるといえる。

6. まとめと今後の課題

(1)曲げ降伏するように設計した有開口連層耐震壁の静加力実験を行った結果、変形能にすぐれた挙動が得られた。

(2)有開口連層耐震壁を開口左右の袖壁と開口上値下の梁に分けて考えた場合の袖壁の強度は実験値とほぼ同程度の強度となり、変形能が高かった実験結果には対応しない結果となった。すなわち、文献 [3] で示した考え方は安全側すぎる可能性があるといえる。

(3)今後、連層耐震壁の強度および変形能をより定量的に評価していく必要があるが、本報告で示したような強度式を1層部分のみに適用する方法ではなく、連層壁の全体を評価する必要がある。

[参考文献]

- [1] 加藤大介、石塚正浩：鉄筋コンクリート造有開口壁のせん断補強法に関する研究、第10回コンクリート工学年次論文報告集10-3、1988年、pp. 403-408、
- [2] 加藤大介、村上幸靖：鉄筋コンクリート造有開口壁のせん断補強法およびせん断耐力評価に関する実験的研究、第11回コンクリート工学年次論文報告集11-2、1989、pp. 573-578、
- [3] 加藤大介、壁谷沢寿海、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート造有開口壁の耐震設計法、コンクリート工学論文集、Vol. 2、No. 2、1991年、pp. 143-152
- [4] 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、日本建築学会

表-4 1層部分の強度計算値（単位:kN）

試験体名	WNO1	WNO2
せん断力実験値	147	146
曲げ強度時のせん断力計算値（略算値）	137	137
広沢式	無開口せん断強度	284
	開口低減率	0.7
	斜め筋負担分	0
	せん断強度	199
無開口式	無開口せん断強度	414
	開口低減率	0.7
	斜め筋負担分	0
	せん断強度	290
有開口式	引張側袖壁曲げ強度	7.9
	圧縮側袖壁せん断強度	149
	斜め筋負担分	0
	せん断強度	157

表-5 2層部分の強度計算値（単位:kN）

試験体名	WNO1	WNO2
有開口式	引張側袖壁曲げ強度	7.9
	圧縮側袖壁せん断強度	136
	斜め筋負担分	0
	せん断強度	144

表-6 梁の強度計算値（単位:kN）

試験体名	WNO1	WNO2
梁	設計用応力	125
	せん断強度	218
	曲げ強度時せん断力	375

表-7 変形能計算値
（一層部分対象 有開口式）

試験体名	WNO1	WNO2
実験値(rad)	0.026	0.023
計算値(rad)	0.006	0.014

（実験値は1層部分対象、80%に低下した点）
（計算値は1層部分対象、有開口式）