

論文

[2073] 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

正会員 ○ 加藤大介 (新潟大学工学部)
石塚正浩 (清水建設(株))

1. まえがき

連層耐震壁を有する鉄筋コンクリート(以下RC)造において靱性設計をする場合には耐震壁は最下階脚部の曲げ降伏により崩壊形を形成することが必要である。しかしながら、耐震壁は一般に開口を有することが多いためにそのせん断耐力は無開口の耐震壁に比べ大きく低下し、一般的な配筋を有する有開口耐震壁を用いて曲げ降伏形を実現させるのは困難である。一方、開口補強法としては、日本建築学会RC規準により開口が存在することにより生じる縁応力や斜め引っ張り応力に対して縦、横及び斜め筋により補強する方法が示されているが、これらの補強筋はせん断耐力には寄与せず、開口の変形を抑制することに効果があることが指摘されている[1]。そこで、本論文では、開口を有する連層耐震壁において曲げ降伏形を実現させることを念頭におき、せん断耐力を有効に上昇させるせん断補強法を開発することを目的に、開口横のせん断補強法としてX型筋とH型筋を用いた耐震壁のせん断破壊実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体 試験体は開口補強筋と開口横のせん断補強筋のみを変化させその他は共通として4体を作製した。対象建物は3~4階(階高 3.6m、スパン 5.4m、柱型 60cmx60cm、はり型 30cmx60cm)建物の最下層とし、シアスパン比は弾塑性漸増载荷解析における終局時のシアスパン比 0.8 とした。また、開口周比はRC規準において耐震壁として扱える最大値の 0.4 (せん断耐力に対する開口低減率 $\gamma=0.6$)とした。試験体は 1/4 スケールの1層1スパンモデルに縮小したが、上部のはりは、連層耐震壁であることと、片押し形式の载荷においてなるべく一様な分布荷重を加えることの2点を考慮し、高い剛性を持たせた。

表1(a)(b)に試験体の概要を示す。また、図1に試験体 W0-8X6 と W0-A8/16 の配筋図を示す。表1(a)は柱型の断面と配筋であるが、主筋は壁の曲げ耐力を上昇させ、耐震壁が確実にせん断破壊するように SD55 の D10 を 8本配筋した。また、柱の下半分の帯筋は柱脚部の圧縮破壊や直接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、3- $\phi 6-\text{@}45$ としてコンクリートを

表1(a) 試験体の柱部分の断面と配筋

試験体	断面	主筋	主筋比	帯筋(下半分)	帯筋比	帯筋(上半分)	帯筋比
共通	15cmx15cm	8-D10(SD55)	2.54%	3- $\phi 6-\text{@}45$	1.25%	2- $\phi 6-\text{@}45$	0.84%

(b)試験体の壁部分の断面と配筋

試験体	開口周比	壁筋	壁厚	壁筋比	開口補強	斜め筋(58度)	斜筋等価壁筋比
W0-A	0.4 (共通)	2-D4- $\text{@}75$ (共通)	8.3cm	0.45%	4-D10(SD30)	-	-
W0-8X6			8.2cm	0.46%	-	8-D6-X型	0.20%
W0-8X10			8.5cm	0.44%	-	8-D10(SD30)-X型	0.44%
W0-A8/16			8.0cm	0.46%	4-D10(SD30)	8-D6-H型	0.46%

十分拘束した。表1(b)は壁板の断面と配筋であるが、配筋詳細を実際の建物に近づけるために壁筋としてD4鉄筋を使用した。幅止め筋はφ4を用いた。また、壁厚は7.5cm、壁筋比を0.5%として設計したが、施工誤差により壁厚がばらついたので壁厚としては実測値を用いた。

実験パラメータは既往の開口補強筋の有無と開口横のせん断補強筋の種類である。試験体W0-AはRC規準に従って既往の開口横の補強筋として開口4辺にD10を1本ずつ計4本配筋したものの、試験体W0-8X6は既往の開口補強筋の代わりにせん断補強筋として左右の開口横にD6を4本ずつ計8本X型筋として配筋したものである。なお、試験体W0-8X6のX型筋の総断面積は試験体W0-Aの開口補強筋と同程度とした。試験体W0-8X10は左右の開口横補強筋として試験体W0-8X6の約2倍に相当するD10を4本ずつ計8本X型筋として配筋したものである。試験体W0-A8N6は試験体W0-8X6と同じ開口横補強筋量であるが、左右の開口横で1方向にまとめハ型になるように配筋したものである。このとき、ハ型筋はダブルとなるので2-φ2.6-@75の帯筋によりコンクリートを拘束した。いずれの開口横補強筋も開口部上面と下面位置を危険断面として定着長さを取っており、また、基礎あるいは上部のほうには定着していない。なお、ハ型筋は正負のいずれの载荷においても引っ張り力が卓越する側の開口横で引っ張りに働く斜め筋を、圧縮力が卓越する側の開口横で圧縮に働く斜め補強筋を配筋することにより斜め筋をより有効に働かせることを目的にしたものである。また、各開口横で1方向であるため施工が楽になり、さらに、容易に斜め筋に帯筋が巻けるためにコンクリートを拘束することができ圧縮ストラットの最大軸力およびそのときの歪を増大させ、壁のせん断耐力を上昇させることが期待できる、等の利点がある。表1(b)に以下の式で求めた斜め筋の等価壁筋比を示した。

$$P_{wd} = (\sum a d \cdot \cos \theta) / (b \cdot l \cdot r)$$

ここで、 $\sum a d$ は斜め筋全断面積、 θ は水平面からの角度、 b は壁厚、 l は柱芯間距離である。

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。

2.2 载荷および測定計画 载荷装置を図2に示す。载荷は、壁中央部に上部固定下部ローラー支持のジャッキにより18tonfの軸力を加えたのち、上部はり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行った。载荷点は壁脚から120cmの高さとし、载荷履歴は部材角で1/400

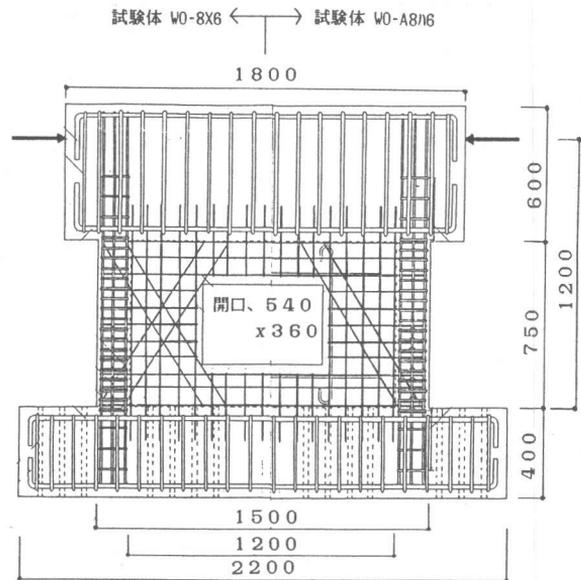


図1 試験体配筋図

表2(a)コンクリートの性質

圧縮強度	434 (kg/cm ²)
圧縮強度歪	2940 (micro)
引張強度	38 (kg/cm ²)

(b)鉄筋の性質

鉄筋の種類	σ_y (t/cm ²)	ϵ_y (micro)
D10(SD55)	5.46	2750
D10(SD30)	3.56	1820
D6	4.31	2580
D4	3.05	1590
φ6	5.51	4600

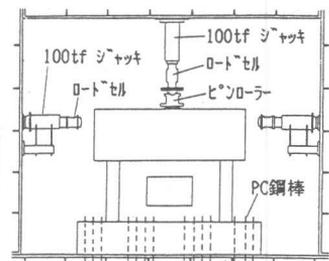


図2 载荷装置図

1/200、1/100 をそれぞれ2回ずつ載荷した後に正方向で 1/50 まで載荷するものとした。

測定は左右の加力点の水平変位（この平均を試験体の水平変位とした）の他に、図8に示すような各部分の変形、および、鉄筋の歪について行った。

3. 実験結果

3.1 破壊経過 図3(a)~(d)に各試験体の正方向で最大耐力を記録したサイクルの最大変位時および載荷終了時でのひび割れ図を示す。いずれの試験体も正負の1サイクル（部材角1/400）において柱脚部の曲げひび割れ、開口隅角部からのひび割れおよび開口横パネルのせん断ひび割れが観察された。また、試験体 W0-8X10 では開口上下部分、試験体 W0-A8N6 では開口上部に斜め筋の定着終了部のひび割れが生じた。3サイクル（部材角1/200）ではいずれの試験体も壁パネルのせん断ひび割れが柱頭および柱脚に進展しており、また、柱主筋の一部が柱脚で引っ張り降伏歪に達している。5サイクル（部材角1/100）では試験体 W0-A では左右の開口横と柱脚部が激しく圧壊し、試験体 W0-A8N6 では左右の壁パネル脚部および柱脚部に圧壊を生じ、試験体 W0-8X6 では開口隅角部で圧壊の兆候がみられた。

最終サイクル（部材角1/50）ではいずれの試験体も開口横のせん断破壊による変形が支配的であったが、試験体 W0-8X10 では開口上下部分の、W0-A8N6 では開口上部の斜め筋の定着終了部のひび割れ幅も顕著であった。この2体は開口横のせん断ひび割れを横切る斜め筋の量が試験体 W0-8X6 の約

2倍であるため、開口横を避けて開口上下にひび割れが分散したと考えられる。

3.2 荷重と変形

図4(a)~(d)に各試験体の荷重-変形曲線を示す。各試験体とも部材角 1/400 の繰り返しでは過去の最大応答点を指向する復元力特性を示したが、部材角 1/200 以後の繰り返し

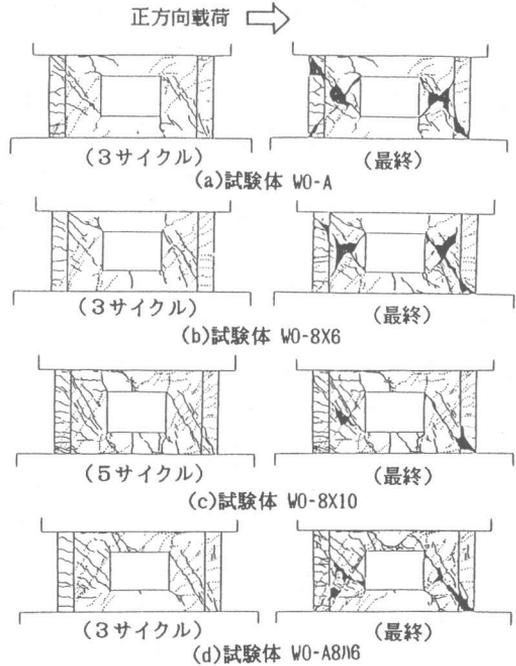


図3 ひび割れ図

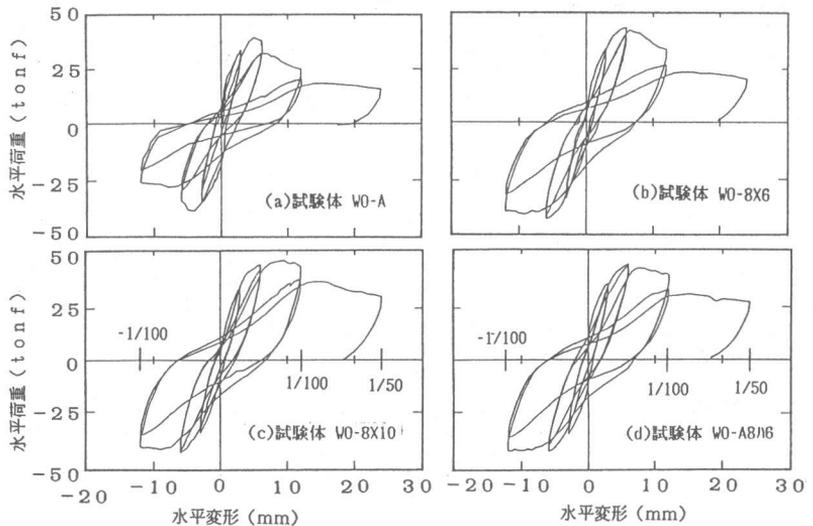


図4 荷重-変形曲線

しでは過去の最大応答点の耐力の 80% 程度の点を指向し、履歴ループ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。正方向载荷時の包絡線を比較して図5に示す。また、表3に各試験体の主筋降伏時、最大耐力時および耐力が最大耐力の 80% に低下した時の変形を示す。各変形での耐力を比較すると、斜め筋が無い試験体 W0-A が最大耐力以後の耐力低下が大きいのに対し、斜め筋のある試験体は耐力低下が少なく、特に斜め筋量の多い試験体 W0-8X10 は部材角 1/100 までほとんど耐力低下を生じず最も良好な靱性能を示した。また、同一斜め筋量の試験体を比較すると、ハ型に配筋した試験体 W0-A8ハ6の方が試験体 W0-8X6 より靱性能があった。これを表3に示した耐力が最大耐力の 80% になる変位の主筋降伏時の変形に対する比率で定義される靱性率で比較すると、試験体 W0-8X10 が 3.11 で最も大きく、斜め筋のない試験体 W0-A が 1.4 で最も小さかった。各試験体で靱性能が異なった理由としてはひび割れの入り方も影響しているため、エネルギー吸収能も比較した。図6は、各サイクルでの履歴エネルギーを比較したものである。斜め筋のあるものは試験体 W0-A に比べ最大耐力以後は履歴エネルギーが明らかに多いが、斜め筋の量や配筋法の影響が顕著となるのは部材角 1/100~1/50 のサイクルになってからである。従って、試験体 W0-8X10 と W0-A8ハ6 が部材角 1/200~1/100 で耐力の低下が少ないのはひび割れが分散した結果と考えられる。

図8に示した柱の軸方向変形より求めた壁の曲げ変形は最大耐力時で 9~20% 程度であり少なかった。

4. 実験結果の検討

4.1 最大耐力と斜め筋の効果の検討 表4に最大耐力の計算値と実験値を比較して示す。計算式は、曲げ耐力は終局強度略算式を、せん断耐力 Q_{su} は、斜め筋を無視し無開口として求まる広沢によるせん断耐力 Q_s [2] に開口低減率 γ を乗じたものに、斜め筋の効果を算入した以下の式で求めた。

$$Q_{su} = \gamma \cdot Q_s + \sum(ad \cdot \sigma_y) \cdot \cos \theta$$

ここで、 σ_y は斜め筋の降伏応力度、 $\sum ad$ は斜め筋全断面積、 θ は水平

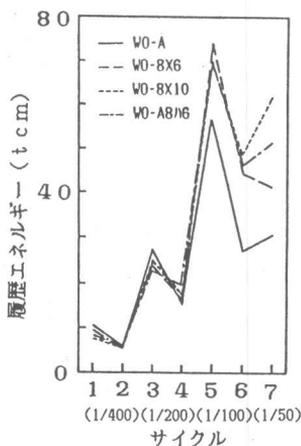


図6 履歴エネルギー

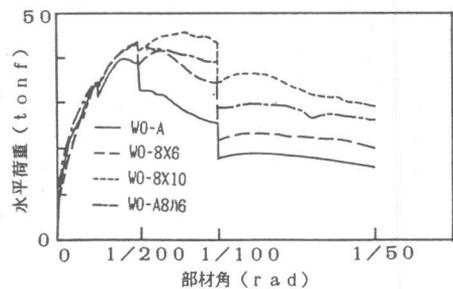


図5 包絡線の比較

表3 変形能の比較

試験体名		W0-A	W0-8X6	W0-8X10	W0-A8ハ6
主筋降伏時	荷重(t)	39.9	42.4	41.5	40.0
	変形(mm)	5.0	5.0	4.7	4.3
最大耐力時	荷重(t)	39.9	43.6	45.7	43.6
	変形(mm)	5.0	6.0	9.6	6.0
	部材角(rad)	1/240	1/200	1/125	1/200
最大耐力の80%耐力時	荷重(t)	31.9	34.9	36.6	34.9
	変形(mm)	7.0	11.0	14.6	12.0
	部材角(rad)	1/171	1/109	1/82	1/100
	靱性率	1.40	2.20	3.11	2.79

表4 最大耐力の計算値と実験値

試験体名		W0-A	W0-8X6	W0-8X10	W0-A8ハ6	
計算値	曲げ耐力時せん断力(t)	52.8				
	せん断力	斜め筋以外(t)	33.2	33.0	33.7	32.6
		斜め筋の寄与(t)	0.0	5.8	10.8	5.8
		せん断耐力(t)	33.2	38.8	44.4	38.4
W0-Aからの増分(t)	0	5.6	11.2	5.2		
実験値	最大耐力(t)	39.9	43.6	45.7	43.6	
	W0-Aからの増分(t)	0.0	3.7	5.8	3.7	
【実験値/計算値】		(-)	(0.66)	(0.52)	(0.71)	

面からの角度であるが、斜め筋は引っ張りおよび圧縮両方に有効であると考えた。パネルⅡ
 なお、本実験の場合コンクリート強度が広沢式の適用範囲を僅かに越えているが、この影響は無視した。表4のせん断耐力の計算値には斜め筋以外のせん断耐力と斜め筋の寄与分を分けて示してある。

最大耐力を比較すると、実験値は計算値の103~120%であり、斜め筋量が少ないほど実験値が高くなる傾向がみられたが、これは後述するように斜め筋の効果が約半分しか実験値の耐力に現れていないからである。斜め筋の効果は、斜め筋のせん断耐力の寄与分の計

算値と各試験体の最大耐力の実験値の試験体 W0-A からの増分を比較すればよいが、本実験では壁厚がそれぞれ異なるので、計算値においても各試験体のせん断耐力の試験体 W0-A からの増分を求め、これと実験値を比較した。この結果、実験値における斜め筋の効果は計算値に対して、試験体 W0-8X6、W0-8X10、W0-A8H6 で、それぞれ 66%、52%、71% であった。斜め筋は引っ張り力を受ける場合にはほぼ 100% 有効であると考えられることから、圧縮力を受ける場合の斜め筋の効果はせん断耐力に対しては余り無かったと言える。

4.2 補強筋の応力 本節では最大耐力時における壁横筋と斜め筋の応力を推定し、最大耐力に対する効果を検討する。壁横筋は歪ゲージを集中的に添付したパネルⅠにおいて破壊面を横切るものを対象にした(図7)。すなわち、正方向載荷においては破壊面Pの、負方向載荷においては破壊面Nの近傍に添付した歪ゲージの値から応力を算出し、1本当りの平均を求め、破壊面を横切る全ての横補強筋の本数を乗じて横補強筋による引っ張り力とした。また、斜め筋は壁面高さ方向の中央を通る水平面位置での歪ゲージの値より同様に求めた。ただし、斜め筋の応力はその水平方向成分とした。なお、補強筋の応力は鉄筋の応力度-歪関係を完全弾塑性復元力特性にモデル化し実際に実験で得られた歪の履歴を与えることにより求めた。

表5に最大耐力時のせん断補強筋の応力を、加力側の開口横部分(引っ張り力が卓越する側)と非加力側の開口横部分(圧縮力が卓越する側)別に、さらに、斜め筋については引っ張りおよび圧縮を受けるもの別に示す。()内は補強筋が降伏する場合に対する比であるが、多くのせん断補強筋がほぼ降伏レベルに達していることが分かる。壁横筋については斜め筋のある試験体の横筋の応力が斜め筋のない試験体 W0-A に比べ低くなる傾向がみられたが、斜め筋量との相関はなかった。斜め筋については加力側の開口横部分では引っ張り力の方が圧縮力より、非加力側の開口横部分では圧縮力のほうが引っ張り力より、それぞれ、大きくなる傾向があった。両方の開口横部分の和を考えると斜め筋の応力は引っ張り力を受ける方が圧縮力を受けるものに比べやや大

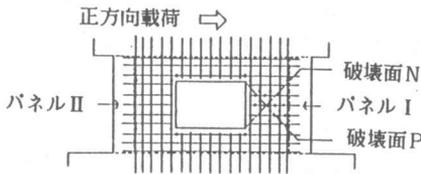


図7 パネルの破壊面

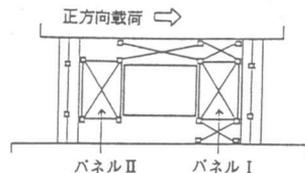


図8 パネルの変形測定位置

表5 補強筋の応力

試験体名		W0-A	W0-8X6	W0-8X10	W0-A8H6
壁筋	引張り力	2.14(100%)	1.53(71%)	1.97(92%)	0.50(23%)
	加力側壁 非加力側壁	1.93(90%)	2.11(99%)	1.95(91%)	1.97(92%)
	中計	4.07(95%)	3.64(85%)	3.92(92%)	2.47(58%)
斜め筋	引張り力	-	1.36(93%)	2.40(90%)	2.93(100%)
	加力側壁 非加力側壁	-	0.77(53%)	2.66(99%)	-
	小計	-	2.14(73%)	5.06(94%)	2.93(100%)
	圧縮力	-	0.74(51%)	1.97(74%)	-
	加力側壁 非加力側壁	-	1.37(94%)	2.63(98%)	2.64(90%)
小計	-	2.11(72%)	4.60(86%)	2.64(90%)	
中計		-	4.25(73%)	9.66(90%)	5.57(95%)
大計		4.07(95%)	7.89(78%)	13.6(91%)	8.04(80%)

[単位はtonf、()内は補強筋が降伏する場合に対する比]

きい。斜め筋の引っ張り
と圧縮の両方の応力がせ
ん断耐力の上昇に寄与す
ると考えると、その効果
は試験体 W0-8X6、W0-8X
10、W0-A8H6 でそれぞれ
73%、90%、95% となり、
実験結果を上回ることに
なる。圧縮を受ける斜め
筋が降伏レベルまで達し
ているのに耐力への寄与
が少ない理由としては、

表6 壁板の平均せん断応力

試験体名		W0-A	W0-8X6	W0-8X10	W0-A8H6
平均せん断応力実験値(kg/cm ²)		59	66	66	67
パ ネ ル I	圧縮主歪度(micro)	2067	2241	2160	2239
	引張主歪度(micro)	3410	2317	3118	5417
	主歪の角度(rad)	42	46	49	37
	圧縮主応力度(kg/cm ²)	331	383	348	287
	引張主応力度(kg/cm ²)	21	23	21	19
平均せん断応力度(kg/cm ²)		175	203	183	147
パ ネ ル II	圧縮主歪度(micro)	3188	42	1093	863
	引張主歪度(micro)	3799	7630	2784	3037
	主歪の角度(rad)	56	44	45	49
	圧縮主応力度(kg/cm ²)	348	7	234	189
	引張主応力度(kg/cm ²)	20	17	22	22
平均せん断応力度(kg/cm ²)		170	12	128	104

その分コンクリートの圧縮ストラットの面積が減少しているためと考えられる。

4.3 コンクリートの応力 Collins & Vecchio [3] により提案されたひび割れコンクリートの平均応力度-平均歪度関係を用いて、開口横のパネルIとIIで測定した各変形からコンクリートの応力を求めた結果を表6に示す。結果を見ると壁の平均せん断応力度は圧縮が卓越するパネルIの方がパネルIIに比べ高くなっていることがわかるが、いずれも実験値と比較すると計算値はかなり高い。この理由は、実験ではひび割れ本数が少なく一様なひび割れを仮定した仮定に合わないこと、および、コンクリート強度が高いためにコンクリートの平均応力度-平均歪度関係がCollinsらの提案式と異なっている可能性があること、等が考えられる。

5. 結論

せん断耐力を有効に上昇させるせん断補強法を開発することを目的に、開口横のせん断補強法としてX型筋とH型筋を用いた耐震壁のせん断破壊実験を行い以下の結論を得た。

(1) 実験値における斜め筋の最大耐力に対する効果は引っ張りと圧縮に有効だとした計算値に対して、52%~71%であり、圧縮力を受ける斜め筋の効果はせん断耐力に対しては余り無かった。しかし、このとき、圧縮を受ける斜め筋は降伏レベルまで達しており、耐力への寄与が少ない理由としては、その分コンクリートの圧縮ストラットの面積が減少しているためと考えられる。

(2) 斜め筋は靱性能を改善するのに有効であった。しかし、斜め筋量を増加させると、引っ張り斜め筋による耐力の上昇と耐力低下の減少は期待できるが、定着端でのひび割れにより、履歴エネルギーの増加は部材角 1/100~1/50 程度の変形にならないと期待できない恐れがある。

(3) 斜め筋をH型に配筋したものは、X型に配筋したものと同等以上の耐力と靱性能を示した。しかし、本実験では壁のコンクリートの拘束がまだ不十分で、それによる耐力上昇はなかった。

【謝辞】 本研究は文部省科学研究費補助金・試験研究(1)(課題番号:62850103、研究代表者:東京大学青山博之教授)により行った。また、D10(SD55)鉄筋は神戸製鋼所(株)より提供を受け、D4鉄筋は奥村組(株)より手配して頂いた。ここに関係各位に謝意を表します。

【参考文献】(1)あべ木、他:「有開口鉄筋コンクリート耐震壁の変形と耐力について」、日本建築学会論文報告集第293号、昭和55年、pp69-83、(2)広沢:「既往の鉄筋コンクリート造耐震壁に関する実験資料とその解析」、建築研究所資料、No.6、1975 (3)Vecchio,F.J., and Collins ,M.p., "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear",ACI Journal,V.83,No.2,Mar.-Apr.,1986,pp219-231