

論文 側柱を補強した偏在開口をもつ耐震壁の強度と変形

小野正行^{*1}・江崎文也^{*2}

要旨: 側柱に補強が無い場合と補強を行った場合の偏在開口をもつ耐震壁の実物の約1/3の試験体を用いて、載荷速度が0.02cm/secの場合について、正負交番繰り返し水平力載荷による実験を行った。その結果、壁板に発生する斜めひび割れ傾斜角、最大強度時の変形、最大強度、等価粘性減衰定数等に側柱の補強の影響が認められた。また、側柱に補強が有る無しに関わらずせん断変形はほぼ同じであり、同一変位での繰り返しによる剛性と強度低下は極めて小さい。最大強度は、著者提案の耐力低減率と無開口耐震壁の最大強度が精度よく評価される算定式を用いれば、実用上十分な精度で評価されることを示した。

キーワード: 耐震壁、偏在開口、破壊性状、強度、変形

1.はじめに

中央開口をもつ耐震壁について、多くの実験的および解析的研究が蓄積されている。筆者らも壁板の圧力場を形成する面積を考慮した耐力低減率を提案し、有用な成果を得ている^{1)~2)}。しかし、出入り口のような偏在開口をもつ耐震壁については、多用されているにも関わらず扱った研究は少ない^{3)~4)}。著者らの既往の実験研究¹⁾では、開口横の壁板のスリップ破壊と両柱脚部の斜めひび割れが顕著になり、載荷方向に関係なく急激な強度低下をすることにより脆性的な破壊性状を示した。

本研究は、これらを考慮して、両柱脚部を鋼板で補強した場合（以後、鋼管補強とする）と補強なしの場合の実験を行い、その強度と変形性能等について比較検討を行ったものである。

2. 実験計画

2.1 試験体の形状・寸法・配筋

表-1、図-1に試験体の形状・寸法および配筋を示す。壁筋は鋼管補強部も柱に定着をしている。試験体名には、FWt-{\-E-Rの記号を付

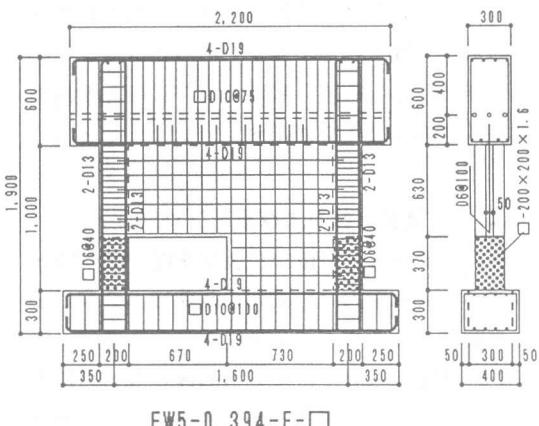


図-1 試験体形状および配筋

表-1 試験体の形状・寸法・配筋・開口寸法

試験体	柱断面 b×D (cm×cm)	はり断面 b×D (cm×cm)	柱 はり 主筋	帶筋・肋筋・钢管 径-間隔 (mm)	P _w (%)	壁厚 (cm)	壁 筋 径-間隔 (mm)	P _s (%)	開口寸法 h _o ×l _o (cm×cm)
FW5-0.394-E	20×20	30×60	4-D13	D6-@40	0.8	5.0	D6-@100	0.64	37×67
FW5-0.394-E-□				D10-@75	0.63				
				□-200×200×1.6					

* 1 近畿大学教授 九州工学部建築学科 (正会員)

* 2 九州共立大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

表-2 使用材料の機械的性質

1) コンクリート

試験体	σ_b	σ_t	打設日
FW5-0.394-E			
FW5-0.394-E-□	23.9	2.11	980917

σ_b : シリンダー圧縮強度 MPa
 σ_t : 引張強度(割裂強度) MPa

2) 鉄筋および鋼板

種別	σ_y	ϵ_y	σ_u
D6	406.5	0.206	545.8
D13	332.3	0.192	486.9
□-200×200×1.6	274.4	0.177	335.5

σ_y : 降伏強度 MPa σ_t : 引張強度 MPa
 ϵ_y : 降伏ひずみ (%)

けて示している。Fは付帯ラーメン、Wは壁板、tは壁厚、 δ は開口周比($\sqrt{h_0 l_0} / h$)、 $h_0 = 37\text{cm}$ 、 $l_0 = 67\text{cm}$ 、 $h = 100\text{cm}$ 、 $l = 160\text{cm}$)、Eは偏在開口、Rは補強方法(□-200×200×1.6)を表している。試験体作製は、基礎ばかりのコンクリート打設後2時間程において耐震壁部を打ち継いだ。

試験体と同一条件で養生を行ったシリンダーの圧縮と引張(割裂)強度および鉄筋と鋼板の機械的性質を表-2に示す。

2.2 載荷方法および載荷プログラム

載荷装置および変位測定装置を図-2、図-3に示す。水平力と鉛直力の載荷は、コンピュータ制御によるアクチュエータ3台を用いて行った。試験体への正負水平力の繰り返しの載荷は、試験体の両柱頭部にそれぞれ196kNの鉛直力を載荷した後、基礎上端から120cm(加力点高さ)位置の剛な上部ばかりに埋め込まれたパイプに通したPC鋼棒を介して行った。水平力の繰り返し載荷を行っている間中、絶えず両柱頭部に載荷した鉛直力196kNが保持されるように制御した。水平力の載荷方法は、変位制御であり、同一変位で2サイクルの正負交番漸増繰り返し加力である。その載荷速度は0.02cm/secである。図-4に、その載荷プログラムを示す。図中のRは、層間変形角R{= δ / h }、 δ : 上部

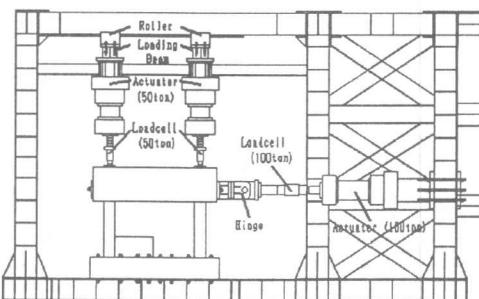
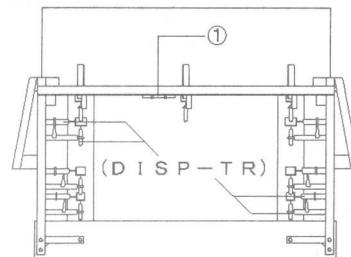


図-2 載荷装置



① : 水平変位制御用変位計

図-3 変位測定装置

中央での水平変位、h : 基礎上端より上部はり下端までの高さ(h=100cm)を示す。

2.3 測定方法

水平荷重は、アクチュエータ先端に取り付けたロードセルにて測定した。図-3に示すように、試験体の曲げ変形や付帯ラーメンの変形を求めるために試験体の基礎ばかりに固定した変位測定用フレームに取り付けた高感度変位計により試験体各部の変位を測定した。側柱脚部位置での主筋および鋼管にひずみゲージを貼付し、鉄筋や钢管のひずみを測定した。水平荷重、変位、柱主筋および钢管のひずみ測定値は動ひずみ測定器に0.2secのサンプリング間隔で取り込んだ。ひび割れの記録は、目視によるスケッチ、写真撮影およびビデオカメラ撮影によった。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ性状および破壊性状

実験終了時のひび割れと破壊状況を図-4に

示す。従来の載荷実験より載荷速度が早いので壁板に発生する初期ひび割れの層間変形角 R は正確ではなく、近似的な値である。

両試験体とも 3 サイクル目 ($R=0.1\%$) の約 $R=0.06\%$ (約 30sec 前後) 前後で壁板に斜めひび割れの発生が認められた。以後、変位の増大に伴い、柱の水平ひび割れの発生や壁板の斜めひび割れが数を増し伸展し、壁板の斜めひび割れが柱に伸展したが、開口横の壁板のスリップ圧縮破壊により最大強度に達した。

正方向載荷の最大強度付近での FW5-0.394-E 試験体の壁板の斜めひび割れは、曲げ引張側壁板で約 55 度、曲げ圧縮側壁板では約 45 度の傾斜角で発生している。また、FW5-0.394-E-□ 試験体の壁板の斜めひび割れは、曲げ引張側壁板で約 65 度、曲げ圧縮側壁板では約 45 度の傾斜角で

発生している。負方向載荷の最大強度付近での両試験体の壁板の斜めひび割れは、共に約 45 度の傾斜角で発生している。最大強度以降は、壁板の破壊、柱頭柱脚部での圧縮破壊、開口横の両側柱の斜めひび割れ幅の拡大および開口上部壁板と柱接合部でのひび割れ幅の拡大と鉛直方向への伸展が顕著になった。

3.2 水平荷重-変形曲線

[FW5-0.394-E] : $R = 0.4\%$ 付近で最大強度に達し、正方向載荷よりも負方向載荷の方が強度が大きくなっています。最大強度近傍の荷重を保持することなく、急激な強度低下を示す水平荷重-変形曲線である。破壊モードは、せん断破壊モードである。

[FW5-0.394-E-□] : $R = 0.5\%$ 付近で最大強度

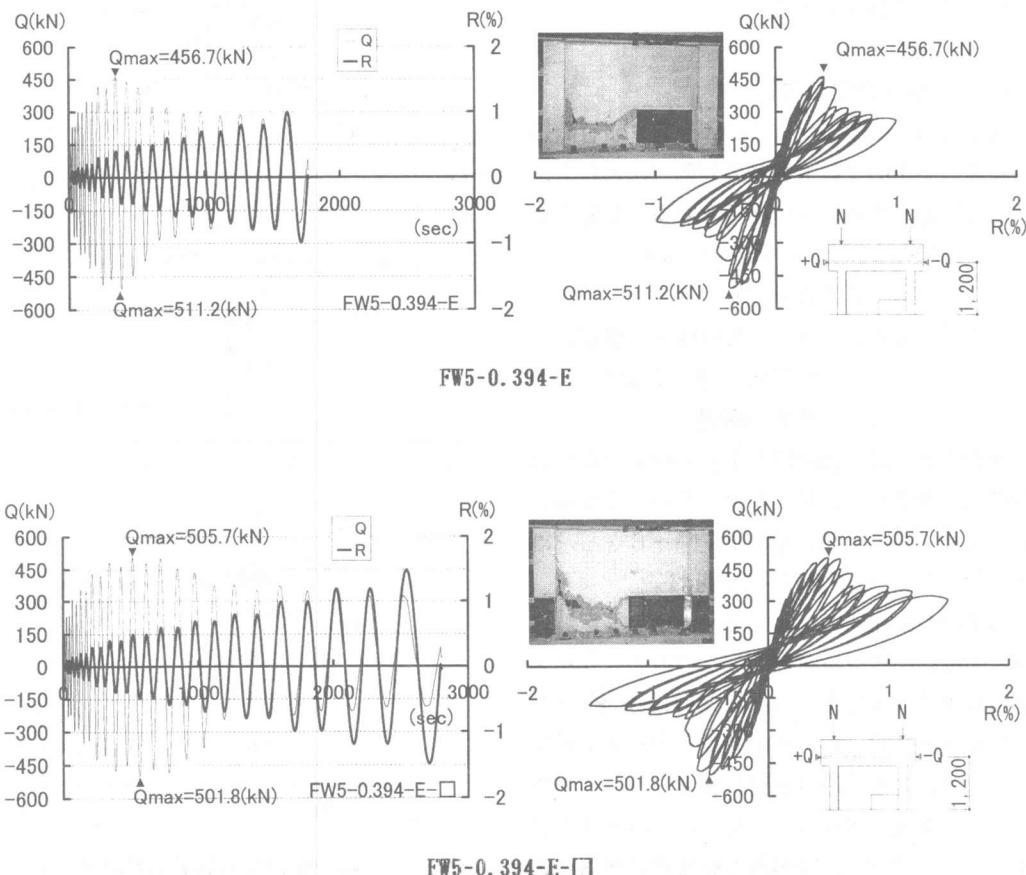


図-4 載荷プログラムと実験終了後のひび割れと破壊状況および水平荷重-変形曲線

度に達し、正方向と負方向載荷の最大強度はほぼ同じであり、 $R = 0.6\%$ 付近まで最大強度近傍の荷重を保持し、負方向載荷よりも正方向載荷の方が緩やかな強度低下を示す水平荷重一変形曲線である。破壊モードは、せん断破壊モードと考えられる。

3.3 剛性および強度低下

図-5に同一変位での繰り返し載荷の影響による剛性 K_{e1} 、 K_{e2} および強度低下 U_s を示す。

$$1 \text{ サイクル目の剛性: } K_{e1} = Q_{1c}/\delta$$

$$2 \text{ サイクル目の剛性: } K_{e2} = Q_{2c}/\delta$$

$$\text{強度低下: } U_s = Q_{2c}/Q_{1c}$$

$$Q_{1c}: 1 \text{ サイクル目の最大荷重}$$

$$Q_{2c}: 2 \text{ サイクル目の最大荷重}$$

$$\delta: 1, 2 \text{ サイクル時での同一変位}$$

両試験体の繰り返し載荷の影響による剛性と強度の低下は極めて小さい。

3.4 最大強度の検討

著者らは、小開口から大開口を有する有開口耐震壁の実用的な最大強度の評価方法として、圧力場を形成する壁板の面積を考慮した耐力低減率 r_u を次式のように提案している¹⁾。

$$r_u = \sqrt{\sum A_e / hT}$$

ただし、 $\sum A_e$: 圧力場を形成する壁板の面積和（図-6 参照）

hT : 壁板の面積

本論では、最大強度時の壁板の斜めひび割れ傾斜角を考慮して、最大強度に寄与する壁板の面積を図-6 のように求めた。図-6 から求めた耐力低減率 r_u の値を表-3 に示す。

本実験の偏在開口を有する耐震壁の算定値の最大強度は、著者らが提案した壁板のスリップ破壊による最大強度 Q_{uws} ⁵⁾ と耐力低減率 r_u を用いて検討を行った。その結果を表-3 に示す。

本論では、無開口耐震壁の実験を行っていないので、正確な評価はできないが、表-3 に示すように、著者ら提案の耐力低減率と無開口耐震壁の最大強度を精度良く算定される評価式を

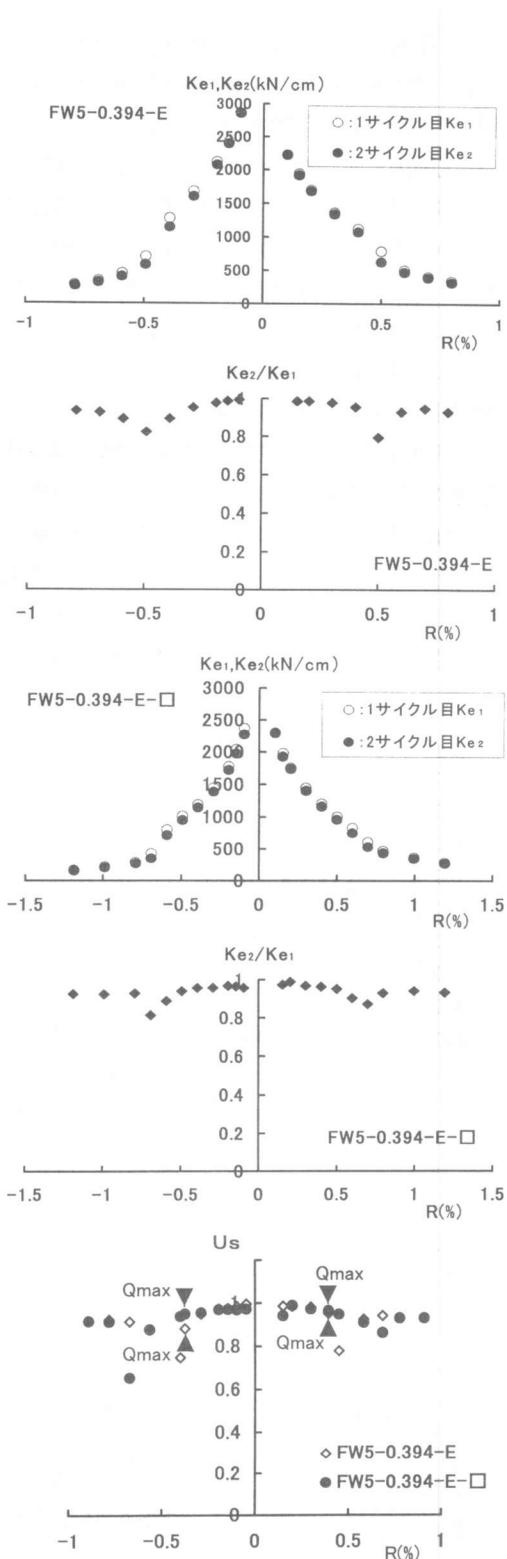


図-5 同一変位での繰り返し載荷の影響による剛性 K_e と強度低下 U_s

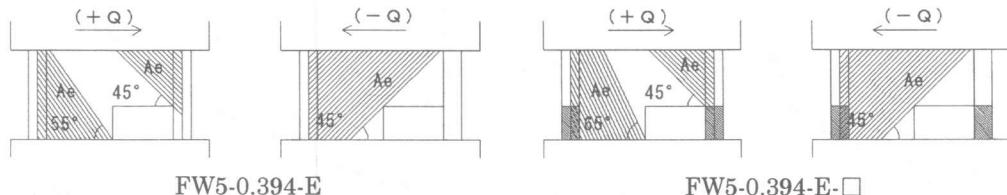


図-6 本実験の圧力場を形成する壁板の領域

表-3 最大強度の検討結果一覧

試験体	Q_{UWS}	Q_{Uex}	Γ_u	$Q_{Uex}/\Gamma_u \cdot Q_{UWS}$
FW5-0.394-E	659.5	+ 456.7 - 511.2	+ 0.676 - 0.775	1.024 1.000
FW5-0.394-E-□	659.5	+ 505.7 - 501.8	+ 0.735 - 0.775	1.043 0.982

注) Q_{UWS} : 無開口耐震壁の水平耐力⁵⁾ (KN), Q_{Uex} : 実験水平耐力 (KN)
+ : 正方向載荷, - : 負方向載荷, Γ_u : 耐力低減率

用いることにより実用上十分な精度で、その最大強度が評価されると考えられる。

3.5 せん断変形 δ_s の検討

図-7に、両試験体のはり中央における水平変位 δ とせん断変形 δ_s との比 δ_s/δ を示す。

δ_s は両側柱の鉛直変位から曲げ変形 δ_b を求め、 $(\delta - \delta_b)$ より求めた。両試験体のせん断変形はほぼ同じであり、同一変位での繰り返しによる顕著な影響は認められない。

3.6 等価粘性減衰定数 heq の検討

図-8に、各サイクルにおける等価粘性減衰

定数 heq と層間変形角 R の関係を示す。

等価粘性減衰定数 heq には、同一変位での繰り返し載荷の影響が認められ、2回目のサイクルの方が小さい。また、側柱部の補強の影響も認められる。

4. 結び

側柱に補強が無い場合と補強をした場合の偏在開口をもつ耐震壁について実験を行い、検討を行った結果、以下のことが知れた。

①: 最大強度付近の曲げ引張側壁板の斜めひび割れ傾斜角は、側柱の補強によって大きくなる。これは柱の拘束効果の影響と考えられ、

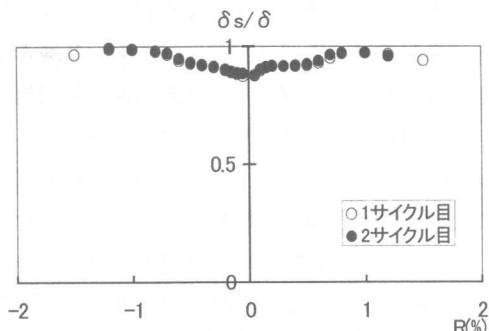
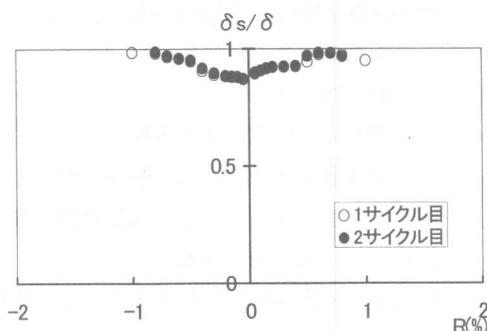


図-7 せん断変形 δ_s と水平変位 δ との比 (δ_s/δ)と層間変形角 R との関係

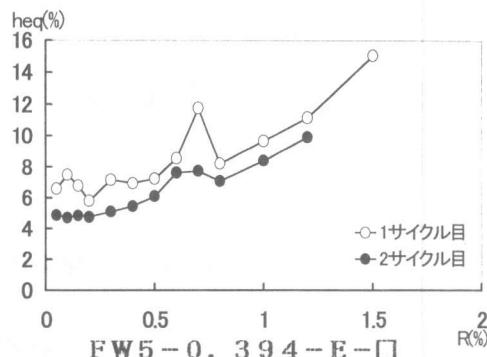
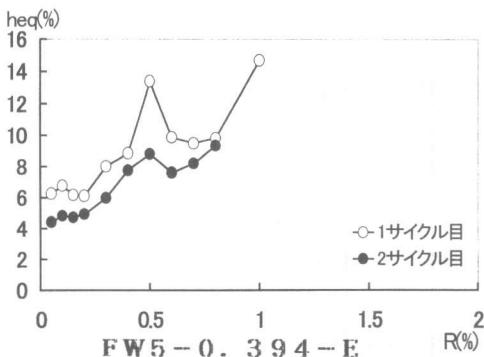


図-8 等価粘性減衰定数heqと層間変形角Rとの関係

圧力場を形成する壁板の面積が大きくなる。

- ②：最大強度に達するする層間変形角は、柱の補強により若干大きくなり、同一変位での繰り返し載荷による剛性と強度低下は極め小さい。
- ③：最大強度は、側柱に補強が無い場合は、載荷方向で異なる。これは圧力場を形成する壁板の面積が異なるためである。側柱に補強を行った場合には、載荷方向に関係なく圧力場を形成する壁板の面積がほぼ同じになることから、最大強度がほぼ同じになると考えられる。
- ④：最大強度は、精度よく算定される無開口耐震壁の評価式と耐力低減率 r_v を用いて十分な精度で評価されると考えられる。
- ⑤：側柱に補強が有る無しに関わらず、せん断

【参考文献】

- 1) 小野正行・徳広育夫：「鉄筋コンクリート造耐震壁の開口の影響による耐力低減率の提案」、日本建築学会構造系論文報告集、第435、1992年5月、pp. 119~129.
- 2) Masayuki Ono : Experimental Study on Elasto-Plastic Behavior of Reinforced Concrete Framed Shear Walls with a Large Opening. Trans. of the JCI, Vol. 17, pp. 381~388, 1995.
- 3) 加藤大介・村上幸靖：「鉄筋コンクリート造有開口耐震壁のせん断補強およびせん断

変形はほぼ同じであり、同一変位での繰り返しによる顕著な影響は認められない。

- ⑥：等価粘性減衰定数には、同一変位での繰り返し載荷の影響が認められ、2回目のサイクルの方が小さく、側柱部の補強の影響も認められる。

以上、側柱を補強した効果が認められたが、今後、補強の有無によって壁板の斜めひび割れ傾斜角が変わることや最大強度の評価方法についての検討が必要である。

〔謝辞〕

本報告をまとめるにあたり、九州共立大学および近畿大学の卒論生の協力をいただいた。また、鋼管の作製では、九州共立大学工学部建築学科技能員栗山哲生、花田憲一の各氏にお世話になった。ここに、深く感謝いたします。

耐力評価に関する実験的研究」、コンクリート工学年次論文報告集、11-2、pp. 573~579、1989

- 4) 竹原雅夫・望月洵・飯田正敏・村本肇：「大きな偏在開口をもつ耐震壁の強度と変形」、コンクリート工学年次論文報告集、17-2、pp. 535~540、1995
- 5) 江崎文也・富井政英・光山裕朗：せん断破壊を起こす連層耐震壁の水平耐力に及ぼす鉛直荷重の影響に関する研究、大会学術講演梗概集、pp. 529~530、1983.10