

論文

[2201] 鉄筋コンクリート造縦長開口耐震壁の水平耐力の評価に関する研究

小野正行*1・徳広育夫*2・倉富和義*3

1. はじめに

著者は、壁板の斜めひび割れが水平軸に対して45°に発生するものとして、圧力場を形成する壁板の面積を求め、その面積を考慮した開口の影響による耐力低減率を無開口耐震壁の水平耐力に乗じることにより、単数や複数の矩形開口を有する耐震壁の水平耐力が実用上十分な精度で評価されることを示した[1]。本報告では、壁筋比と付帯ラメーンの拘束が同じである縦長開口（袖壁を有する縦方向に細長い開口）の位置の異なる試験体により繰り返し水平加力実験を行い、圧力場を形成する壁板の面積を考慮した耐力低減率の考え方を適用して、本実験および既往の実験結果の水平耐力との適合性について検討を行ったものである。

2. 実験計画

2.1 試験体および材料の機械的性質

試験体は、柱の中心間距離 $l = 160\text{cm}$ 、基礎上端からはり中心までの距離 $h = 115\text{cm}$ 、壁板の厚さ t が 5cm の無開口壁板と縦長開口壁板を有する1層1スパンの実物大の約1/3の試験体である。付帯ラメーンの断面形状は、壁板が圧縮破壊を起こすまで水平せん断力の増大に耐えられ、付帯ラメーンが急激なせん断破壊をしないように、RC規準18条の付帯ラメーンの断面形状に関する推奨条件[2]を満足しているものである。縦長開口を有する試験体の形状・寸法および配筋を図-1に示す。表-1に、試験体の柱・はりの断面寸法や配筋、壁板の配筋および開口寸法を示す。試験体名にはFWt- ξ -Aの記号を付け、Fは付帯ラメーン、Wは壁板、tは壁板の厚さ、 ξ は開口周比($\sqrt{h_0 l_0 / h l}$)、Aは壁板

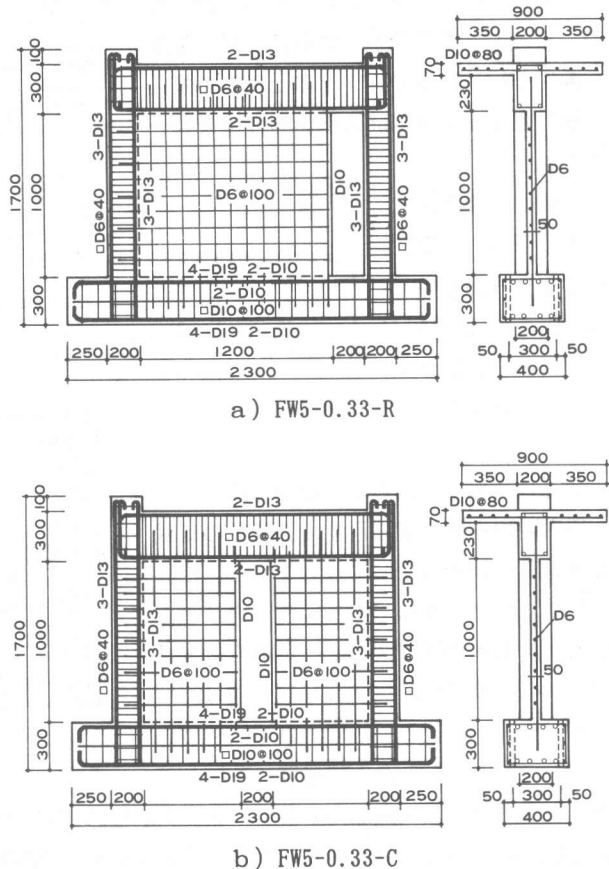


図-1 縦長開口を有する試験体の形状・寸法および配筋 (単位: mm)

*1 近畿大学教授 九州工学部建築学科 (正会員)
 *2 鹿児島大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)
 *3 久留米工業大学助手 工学部建築設備工学科

表-1 試験体の形状・寸法と配筋

試験体	柱・はり					壁				
	柱断面 B×D cm×cm	はり断面 B×D cm×cm	柱 主筋	はり 主筋	帯筋・肋筋		壁厚 cm	壁筋		開口寸法 h _o × l _o cm×cm
					径-間隔	P _w %		径-間隔	P _s %	
FW5-0.00								D6-@100	0.64	
FW5-0.33-R	20×20	20×30	6-D13	4-D13	D6-@40	0.8	5	D6-@100	0.64	100×20
FW5-0.33-C								開口補強筋 タテ筋 D10		100×20

内での開口の位置（R：右側、C：中央部）を表している。

試験体製作は、基礎ばり部分のコンクリート打設後2時間ほどにおいて耐震壁部のコンクリートを打ち継いだ。試験体打設ごとにシリンダーを採取し、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）強度および鉄筋の機械的性質を表-2に示す。

表-2 使用材料の機械的性質

試験体	コンクリート		鉄筋	
	圧縮強度 σ _b kg/cm ²	引張強度 σ _t kg/cm ²	降伏強度 σ _y kg/cm ²	引張強度 σ _u kg/cm ²
FW5-0.00	304	27.5		
FW5-0.33-R	273	20.8	D6 3870 D10 3850 D13 3440	D6 5380 D10 5540 D13 5250
FW5-0.33-C	252	22.3		

試験体は型枠脱形後実験当日まで室内養生を行ったものである。表-3にコンクリート（レデーミクストコンクリート）の調査を示す。

表-3 コンクリートの調査表

粗骨材最大寸法 mm	スランプ cm	水セメント比 %	単位水量 kg/cm ³	セメント kg/cm ³	細骨材 kg/cm ³	粗骨材 kg/cm ³	混和剤 cc/m ³	空気量 %
15	21	63	212	337	939	814	674	4.0

2.2 加力方法および測定方法

加力装置を図-2に示す。試験体の基礎部分はP C鋼棒によって反力フレームに固定した。加力方法はアクチュエータ3台を用い、試験体の両柱頭部に一定鉛直荷重（柱一本につき20ton = (0.164 ~ 0.198) · B · D · σ_B、B：柱幅、D：柱せい、σ_B：コンクリートの圧縮強度）を加えた

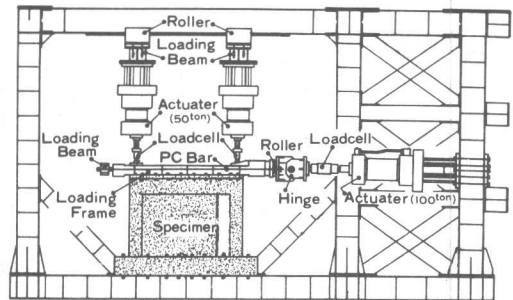


図-2 加力装置

後、水平力は柱頭一点加力でなく、スラブからの等分布加力になるようにスラブ上下面にボルト締めした水平力導入フレームと水平力導入フレームの両側に配置したP C鋼棒に正負交番加力とした。水平力の加力方法は、変位制御で一変位振幅一サイクルの正負交番漸増繰返し加力である。荷重の検出はアクチュエータ先端に取り付けられたロードセルを用いた。水平変位ははり材軸線上のはり中央での変位を高感度型変位計により検出した。荷重と変位の測定値はパソコンを通してフロッピーディスクに記録を行った。ひび割れの記録は目視によるスケッチと写真撮影によった。

3. 実験結果

本実験における試験体の荷重-変形曲線および実験終了後の写真を図-3に示す。

荷重-変形曲線の縦軸は水平荷重 Q を実験最大荷重の絶対値 $|Q_{max}|$ で割った値であり、横軸ははり材軸線上のはり中央での水平変位 δ を柱脚よりはり材軸線までの高さ h (115cm) で割った層間変形角 R ($=\delta/h$) である。

以下に、各試験体のひび割れ発生状況および破壊性状の特徴を示す。

無開口耐震壁FW5-0.00の試験体は、層間変形角 $R=0.26 \times 10^{-3}$ rad 付近で壁板に初斜めひび割れが発生した。以後、変位振幅の増大につれて、壁板内には数多くの斜めひび割れ、柱には水平ひび割れが発生した。続いて、壁板の斜めひび割れが柱およびはりに伸展したが、はり下近傍の壁板がスリップ圧縮破壊することにより、層間変形角 $R=7.0 \times 10^{-3}$ rad 付近で水平耐力に達した。水平耐力以後は、壁板コンクリートの落下が起り、柱頭部がせん断破壊をして最終に至った。

開口の偏在しているFW5-0.33-Rの試験体は、層間変形角 $R=0.17 \times 10^{-3}$ rad 付近で壁板に斜めひび割れ、層間変形角 $R=0.26 \times 10^{-3}$ rad 付近で壁板下部付近に曲げせん断ひび割れが発生した。以後、変位振幅の増大につれて、柱の水平ひび割れや壁板の斜めひび割れが数を増し伸展した。続いて、壁板の斜めひび割れが柱およびはりに伸展したが、はり下近傍の壁板がスリップ圧縮破壊することにより、正側加力 (RQ) では層間変形角 $R=7.0 \times 10^{-3}$ rad 付近で、負側加力 (LQ) では層間変形角 $R=6.0 \times 10^{-3}$ rad 付近で水平耐力に達した。水平耐力以後は、壁板コンクリートの落下が起り、柱頭部がせん断破壊をして最終に至った。

開口が中央にあるFW5-0.33-Cの試験体は、層間変形角 $R=0.26 \times 10^{-3}$ rad 付近で壁板に斜めひび割れが発生し、層間変形角 $R=0.52 \times 10^{-3}$ rad 付近で壁板下部付近に曲げせん断ひび割れが発生した。以後、変位振幅の増大につれて、柱の水平ひび割れや壁板の斜めひび割れが数を増し伸

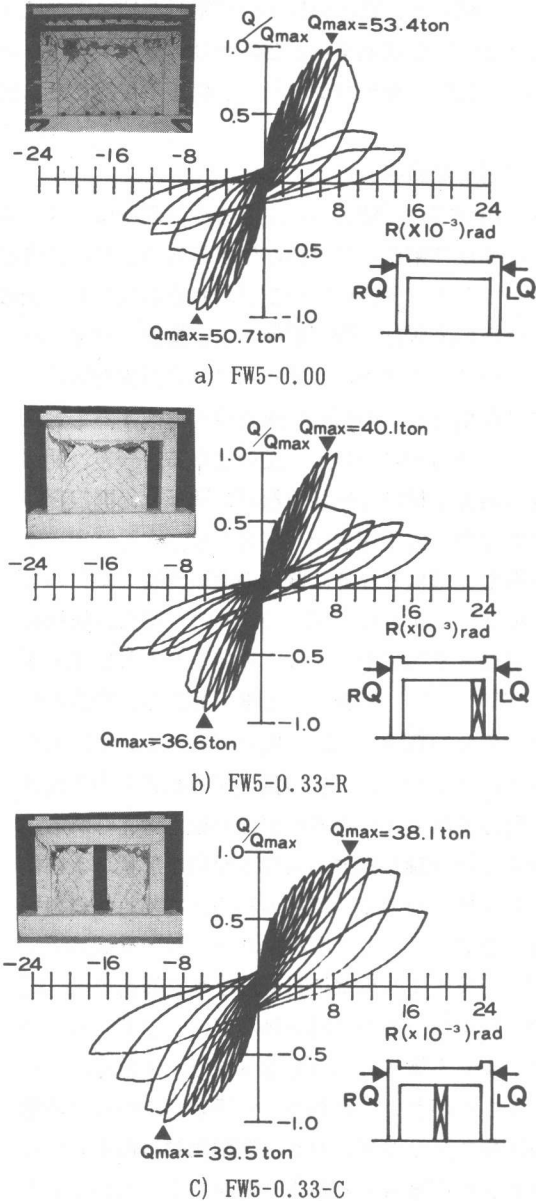


図-3 水平荷重-変形曲線および実験終了後の写真
 RQ : 正側加力 LQ : 負側加力

展した。続いて、壁板の斜めひび割れが柱およびはりに伸展したが、はり下近傍や柱近傍の壁板がスリップ圧縮破壊することにより、層間変形角 $R = 10 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 付近で水平耐力に達した。水平耐力以後は、壁板コンクリートの落下が起り、柱頭部がせん断破壊をして最終に至った。

4. 耐力低減率 r_u

有開口耐震壁の壁板内に生ずるひび割れは、図-4に示すように、斜張力による開口隅角部に生ずる初ひび割れAと壁板に生ずる斜めひび割れBがあり、過去の震害例や既往の実験例に見ることができる。壁板に斜めひび割れBが発生した後は、壁板はひび割れ幅の増大により膨張する。壁板の膨張は、周辺架構および壁筋で拘束され、FEM解析による主応力度分布の例[3]にも示されているように、図-4に示す斜線を付けた領域(面積 A_e)の壁板が圧力場を形成することになり、水平耐力に寄与する壁板となる。一方、開口を含む斜線を付けていない領域の壁板は、開口部が自由端のために不完全圧力場となり、水平耐力に寄与し得ない壁板となる。既往の実験資料[1]およびFEM解析によれば、壁板の斜めひび割れは場所によつては水平軸に対して 45° に発生するとは限らず、ほぼ $50^\circ \sim 60^\circ$ に発生する場所もある。壁板の斜めひび割れ傾斜角(主応力度方向の角度)が場所によって異なるのは、壁板の負担する軸方向力の大きさや開口形状および位置などの影響と考えられる。実際の建物は軸方向力の大きさや開口形状および位置などが様々なので、壁板の斜めひび割れ傾斜角を正確に予測することは困難である。単数や複数の矩形開口を有する耐震壁の斜めひび割れ傾斜角は、既往の実験資料や過去の震害例などのひび割れ状況から 45° よりも極端に小さくなったり、大きくなったりすることがないことから、水平耐力に寄与する壁板の面積 A_e は壁板の斜めひび割れ傾斜角を 45° としたときの面積 A_e とあまり変わらないものである[1]。したがって、単数や複数の矩形開口を有する耐震壁では、 A_e の算定の簡便さと実用性を考慮して、壁板の斜めひび割れは場所に関係なく、水平軸に対して 45° に発生するものとした。開口の存在によって、耐震壁の水平耐力は減少するのであるが、その減少は圧力場を形成する壁板の面積和 ΣA_e に影響されると考えて、開口の影響による耐力低減率 r_u を次式のように提案した[1]。

$$r_u = \sqrt{\Sigma A_e / h I} \quad (1)$$

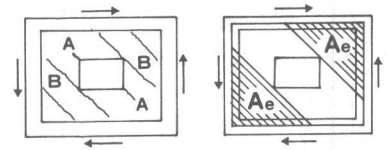


図-4 有開口耐震壁の典型的なひび割れと圧力場を形成する壁板の領域 (A_e)

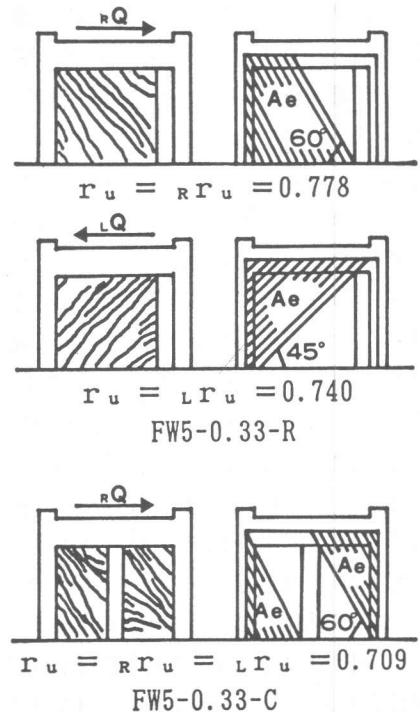


図-5 水平耐力時の壁板の斜めひび割れ発生状況と圧力場を形成する壁板の領域(面積 A_e)および耐力低減率 r_u の値

本実験や既往の実験資料〔4〕の縦長開口耐震壁の斜めひび割れ傾斜角は、図-5に示すように（本実験）、単数や複数の矩形開口を有する耐震壁と同様、場所によつては水平軸に対して45°に発生するとは限らない。縦長開口耐震壁の水平耐力に寄与する壁板の面積 A_e は、単数や複数の矩形開口を有する耐震壁と同じように求めると、かなり異なったものになる。したがって、縦長開口耐震壁では、図-5に示した壁板の斜めひび割れ発生状況（水平耐力時）や既往の実験資料のひび割れ発生状況を考慮して、水平耐力に寄与する壁板の面積 A_e を次のように求めた。

①：開口が偏在している場合（FW5-0.33-R）、正側加力（ RQ ）時には下部開口隅角部から圧縮応力の作用する方向に60°に引かれた傾斜線と柱、はり中心線で囲まれる領域、負側加力（ LQ ）時には上部開口隅角部から圧縮応力の作用する方向に45°に引かれた傾斜線と柱、はり中心線で囲まれる領域とした。②：開口が中央にある場合（FW5-0.33-C）、曲げ引張側壁板では、柱、はり中心線の交点から下部開口隅角部に傾斜線（圧縮応力の作用する方向）を引き、その傾斜線と柱中心線で囲まれる領域、また、曲げ圧縮側壁板では、上部開口隅角部から圧縮応力の作用する方向に60°に引かれた傾斜線と柱、はり中心線で囲まれる領域とした。

図-5に本実験の圧力場を形成する壁板の領域（ A_e ）と耐力低減率 r_u の値を示す。開口が偏在すると加力方向で A_e の大きさが異なるので、 r_u は正側加力方向の耐力低減率 Rr_u と負側加力方向の耐力低減率 Lr_u の値をもつことになる。既往の実験資料の耐力低減率 r_u の値は表-5に示す。

表-4 LQ_{uex}/RQ_{uex} と Lr_u/Rr_u の値の比較

試験体	$\frac{RQ_{uex}}{LQ_{uex}}$ (ton)	$\frac{Rr_u}{Lr_u}$	$\frac{LQ_{uex}}{RQ_{uex}}$	$\frac{Lr_u}{Rr_u}$
FW5-0.33-R	40.10 36.60	0.778 0.740	0.913	0.951

5. 耐力低減率 r_u の検証

表-4に、正側と負側加力方向で圧力場を形成する壁板の面積 A_e の異なるFW5-0.33-R試験体の正側と負側加力方向の実験値の水平耐力 RQ_{uex} と LQ_{uex} の比の値と正側と負側加力方向の耐力低減率 Rr_u と Lr_u の比の値の比較を示す。表-4は、コンクリート強度等の材料定数の影響が全くない完全に無次元化されたものであり、正側と負側加力方向の水平耐力の比 LQ_{uex}/RQ_{uex} の値は、正側と負側加力方向の耐力低減率の比 Lr_u/Rr_u の値にほぼ一致している。このように、開口が偏在すると加力方向で水平耐力が異なり、開口の影響による耐力低減率 r_u は、圧力場を形成する壁板の面積 A_e に依存していると言える。

6. 水平耐力の検討

本実験と既往の実験資料〔4〕の無開口耐震壁は、壁板のスリップ圧縮破壊が先行して水平耐力に達していることから、無開口耐震壁の水平耐力 Q_{uo} の算定式として、富井・江崎のスリップ耐方式〔5〕を用いた。本実験と既往の実験資料の無開口耐震壁の算定値の水平耐力 Q_{uo} 実験値の水平耐力 Q_{uex} の比の値を表-5に示す。表-5から富井・江崎のスリップ耐方式は実験値との適合性が良いと言える。既往の無開口耐震壁の水平耐力の Q_{uo} と式（1）による耐力低減率 r_u および比較のためにRC規準の耐力低減率 r 〔2〕を用いて、本実験と既往の実験資料の縦長開口耐震壁の実験値の水平耐力と算定値の水平耐力の比の値および平均値、標準偏差、変動係数の値の比較を表-5に示す。また、図-6には、縦長開口耐震壁の実験値の水平耐力と算定値の水平耐力の関係を示す。平均値、標準偏差、変動係数の値から式（1）による水平耐力の算定値

表-5 実験値の水平耐力 (Q_{uex}) と算定値の水平耐力 ($r_u \cdot Q_{uo}$, $r \cdot Q_{uo}$) の比較

試馬体		実験値の 水平耐力	無開口耐震 壁の算定値 の水平耐力	耐力低減率		実験値と算定値 の水平耐力の比	
				r_u	r (r_1, r_2)	$\frac{Q_{uex}}{r_u \cdot Q_{uo}}$	$\frac{Q_{uex}}{r \cdot Q_{uo}}$
本 実 験	FW5-0.00 (R)	53.40	50.88	1.000	1.000	1.050	1.050
	FW5-0.00 (L)	50.70	50.88	1.000	1.000	0.996	0.996
	FW5-0.33-R (R)	40.10	49.13	0.778	0.670*1	1.049	1.218
	FW5-0.33-R (L)	36.60	49.13	0.740	0.670*1	1.007	1.112
	FW5-0.33-C (R)	38.10	47.89	0.709	0.670*1	1.122	1.187
	FW5-0.33-C (L)	39.50	47.89	0.709	0.670*1	1.163	1.231
文 献 (4)	W4 (R)	31.80	33.10	1.000	1.000	0.961	0.961
	W4 (L)	31.80	33.10	1.000	1.000	0.961	0.961
	V33 (R)	19.75	24.40	0.767	0.530*1	1.055	1.527
	V33 (L)	15.25	24.40	0.727	0.530*1	0.860	1.179
	V34 (R)	25.05	32.34	0.767	0.530*1	1.010	1.461
	V34 (L)	20.70	32.34	0.727	0.530*1	0.880	1.208
縦長開口耐震壁の平均標準偏差係数						1.018	1.265
縦長開口耐震壁の変動係数						0.099	0.137
縦長開口耐震壁の変動係数						0.097	0.108

(R) : 正側加力 (L) : 負側加力 $Q_{uo} = (2.4\sqrt{F_c} + 3400 \cdot P_s) t l$ [5] * 1 : r_2
 W4 : 無開口耐震壁 V33, V34 の開口周比 : 0.47

は、RC規準の r による水平耐力の算定値よりも実験値との適合性が良いと言える。

7. 結び

縦長開口耐震壁の試験体により、繰り返し水平加力実験を行い、著者提案の耐力低減率の妥当性を検証した。さらに、その耐力低減率を本実験や既往の実験結果に適用し、RC規準の耐力低減率と比較している。その結果、無開口耐震壁の水平耐力を精度良く算定される式を用いれば、著者提案の耐力低減率による水平耐力の算定値は、実用上十分な精度で算定されることを示した。式(1)は、圧力場の形成がなされる比較的小さな開口に適用され、壁板のスリップ圧縮破壊により水平耐力に達する耐震壁に限定されるものである。なお、本報告の壁板の斜めひび割れ傾斜角の決め方は、実際の設計にも適用されると考えられるが、本報告の縦長開口耐震壁は形状が限られているので、耐震壁の形状の検討が必要である。

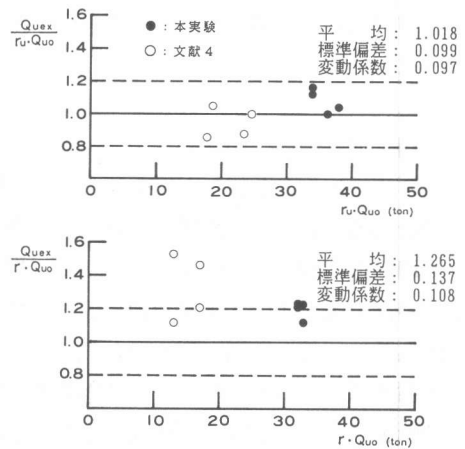


図-6 実験値の水平耐力 Q_{uex} と算定値の水平耐力 $r_u \cdot Q_{uo}$, $r \cdot Q_{uo}$ の関係

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、No. 435、pp. 119-129、1992-5
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1988
- 3) 佐藤稔雄・白井伸明・関 紀明：鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究(その28) FE M による有開口壁の強度の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 289-290、1986-8
- 4) 河口俊郎ほか：鉄筋コンクリート縦開口壁の耐震性能に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1909-1910、1984-10
- 5) 富井政英・江崎文也：鉄筋コンクリート耐震壁の水平耐力に関する研究(その1 壁板のスリップ破壊によって支配される水平耐力)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1587-1588、1981-9