

論文 袖壁を有する架構の弾塑性性状に関する実験的研究

古賀俊誠^{*1}・小野正行^{*2}

要旨：大きな開口を有する袖壁付き架構の実験を行っている。その結果、1) 破壊モードは中央に開口を有する場合には曲げ破壊モード、開口が偏在する場合には、開口の大きさによりせん断破壊モードと曲げ破壊モードを示す。2) 水平耐力は圧力場を形成する壁板の面積を考慮した耐力低減率を用いて、実用上十分な精度で評価できる、などを明らかにした。

キーワード：開口、袖壁、破壊モード、圧力場、耐力低減率、水平耐力

1. はじめに

袖壁を有する架構については、設計上多用されているにも関わらず扱った研究は少ない。河口らは、実験により耐震性能について報告しているが、水平耐力の評価については言及していない〔1〕。武田らは、袖壁付き柱の曲げ耐力計算値に耐力増大率を乗じる評価方法を試みている〔2〕。著者は開口周比が0.4以下について、圧力場を形成する壁板の面積を考慮した耐力低減率を用いた水平耐力評価を試み、よい成果を得ているが適用例が少ない〔3〕、また望月らは、マクロモデルによる弾塑性解析を用いた水平耐力と変形評価を試み、よい成果を得ている〔4〕。本研究は、開口周比が0.4以上の袖壁を有する架構の試験体の実験から破壊性状の把握および本実験と既往の実験から水平耐力の評価を目的としている。水平耐力の評価については、著者提案の耐力低減率〔5〕とRC規準の耐力低減率〔6〕を用いて検討を行ったものである。

2. 実験計画

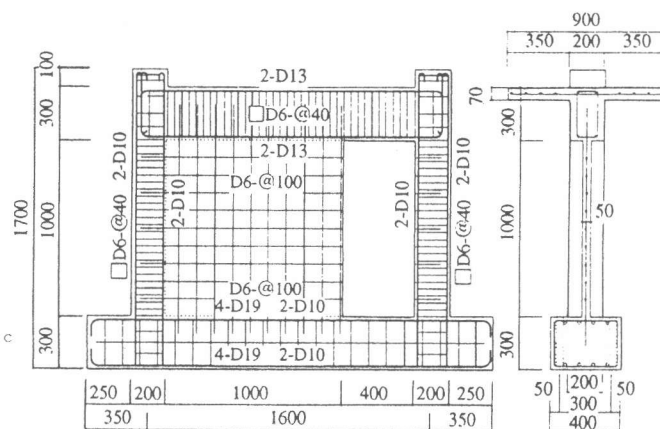
2.1 試験体および材料の機械的性質

試験体は、1層1スパンの実物大の約1/3の試験体である。付帯ラーメンの断面形状は、RC規準18条の付帯ラーメンの断面形状に関する推奨条件〔6〕を満足しているものである。開口を有する試験体の形状・寸法および配筋を図-1、表-1に示す。試験体名にはFWt- ξ -Aの記号を付け、Fは付帯ラーメン、Wは壁板、tは壁板の厚さ、 ξ は開口周比（ $=\sqrt{h_o l_o / h l}$ 、 h_o 、 l_o ：開口部の高さおよび長さ、 h 、 l ：耐震壁の高さおよびスパン）、Aは壁板内での

位置（R：右側、C：中央部）を表している。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-1に示す。

*1 工学院大学大学院 工学研究科建築学専攻、（正会員）

*2 近畿大学教授 九州工学部建築学科、（正会員）



FW5-0.466-R（単位：mm）

図-1 試験体の形状・寸法・配筋

表－1 試験体の形状・寸法と配筋および材料の機械的性質

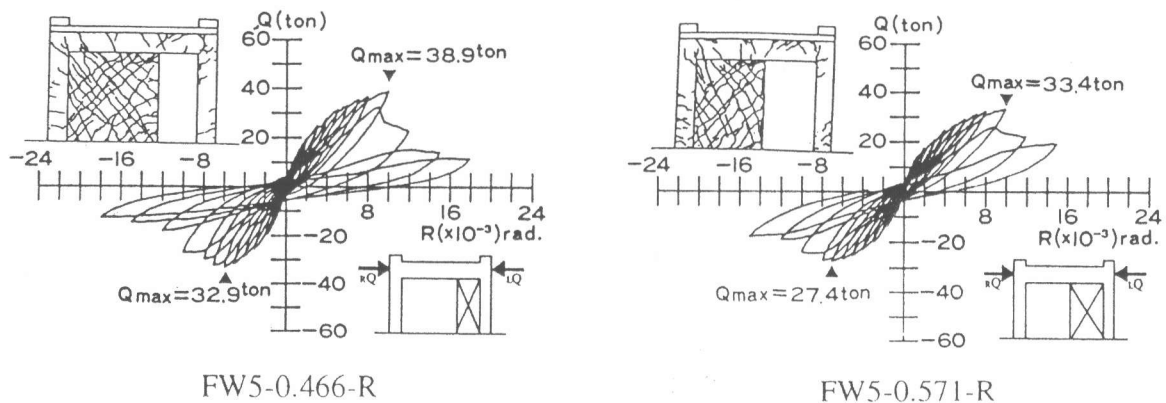
試験体	柱・はり					壁			コンクリート		鉄筋	
	柱断面	はり断面	柱	はり	帯筋・肋筋	壁厚	壁筋	開口寸法	圧縮強度	引張強度	降伏強度	引張強度
	B×D cm×cm	B×D cm×cm	主筋	主筋	径・間隔 P _w %	cm	径・間隔 P _s %	h _o ×l _o	σ_c kg×cm	σ_t kg×cm	σ_y kg×cm	σ_u kg×cm
FW5-0.00	20×20	20×30	D6-D13	D4-D13	D6-@40 0.8	5	D6-@100 0.64	—	304	27.5	D6 3870	D6 5380
FW5-0.466-R								100×40	275	28.0		
FW5-0.571-R								100×60	257	22.6		
FW5-0.737-R								100×100	213	21.9	D10 3850	D10 5540
FW5-0.466-C								100×40	239	23.8		
FW5-0.571-C								100×60	241	19.7		
F-1.00									168	18.9		

2. 2 加力方法および測定方法

加力はアクチュエーター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20 ton）を加えた後、水平力は柱頭一点加力ではなく、スラブからの等分布加力とし、その加力は、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〔3〕。各試験体の変位は、柱、はりの材軸線と直角方向および材軸線方向の変位（鉛直変位（11点）と水平変位（11点））を高感度型変位計により検出した〔5〕。水平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. ひび割れ性状と破壊性状

本実験における試験体の水平荷重－変形曲線と水平耐力時のひび割れ状況を図－2 a）、2 b）に示す（FW5-0.00, F-1.00試験体は文献〔10〕参照）。水平荷重－変形曲線の縦軸は水平荷重Q、横軸は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までの高さh（115cm）で割った層間変形角R（ $=\delta/h$ ）である。図－2中の Q_{max} は、正側と負側加力における最大水平荷重を示す。以下に、各試験体のひび割れ発生状況や破壊性状およびQ－R曲線の特徴を示す。偏在開口の試験体のFW5-0.466-Rは、 $R=0.17\times10^{-3}$ rad. 付近、FW5-0.571-Rは、 $R=0.26\times10^{-3}$ rad. 付近、FW5-0.737-Rは、 $R=0.7\times10^{-3}$ rad. 付近で壁板に斜めひび割れが発生した。以後、



図－2 a) 水平荷重－変形曲線および水平耐力時のひび割れ状況

変形の増大につれて、壁板内の斜めひび割れが増し、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、FW5-0.446-RとFW5-0.571-Rは、正側加力では $R=10 \times 10^{-3}$ rad. 付近、負側加力では $R=(6 \sim 7) \times 10^{-3}$ rad. 付近ではり下近傍の壁板がスリップ圧縮破壊することにより水平耐力に達した。水平耐力以後は、急激な耐力低下を示す $Q-R$ 曲線であり、破壊モードはせん断破壊モードである。FW5-0.737-Rは、正側、負側加力とも $R=$

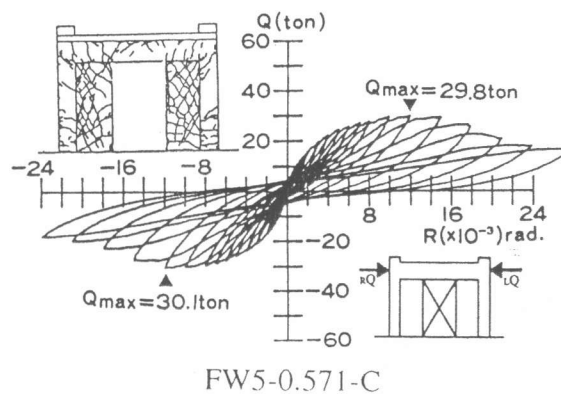
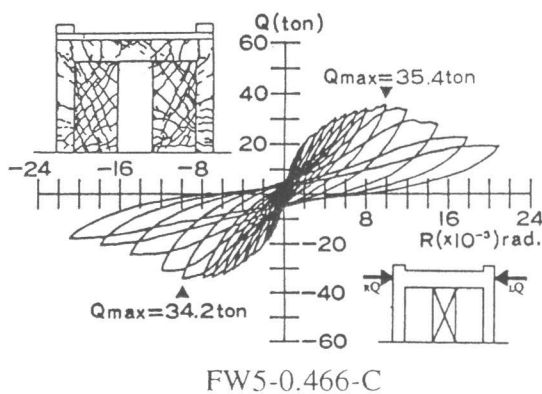
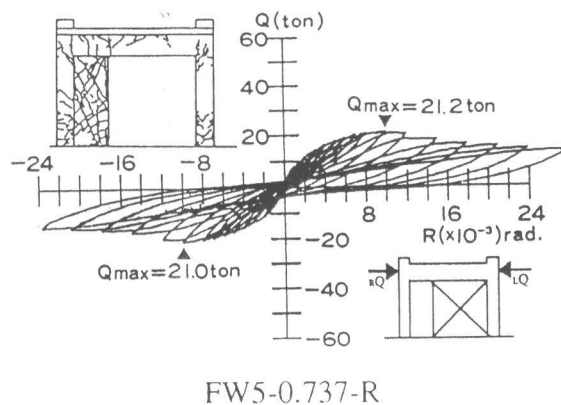


図-2b) 水平荷重-変形曲線および水平耐力時のひび割れ状況

10×10^{-3} rad. 付近で壁板のスリップ圧縮破壊やはり下壁板と壁板脚部の圧壊および柱脚の圧壊により水平耐力に達した。水平耐力以後は緩やかな耐力低下を示す $Q-R$ 曲線であり、破壊モードは曲げ破壊モードである。中央開口の試験体FW5-0.466-Cは、 $R=0.17 \times 10^{-3}$ rad. 付近、FW5-0.571-Cは、 $R=0.26 \times 10^{-3}$ rad. 付近で壁板に斜めひび割れが発生した。以後、偏在開口と同じひび割れ伸展状況を示し、FW5-0.466-Cは、壁板のスリップ圧縮破壊により $R=10 \times 10^{-3}$ rad. 付近で、FW5-0.571-Cは、壁板のスリップ圧縮破壊やはり下壁板と壁板脚部の圧壊および柱脚部の圧壊により $R=12 \times 10^{-3}$ rad. 付近で水平耐力に達した。破壊モードは、FW5-0.737-Rと同じ曲げ破壊モードである。なお、せん断破壊モードとは、水平耐力に達した後平滑域を形成することなく耐力低下を示し、 $R_b < (5 \sim 10) \times 10^{-3}$ rad. 程度のもの、曲げ破壊モードとは水平耐力に達した後大きな平滑域を形成し、 $R_b \geq 10 \times 10^{-3}$ rad. 程度のものをいう。ここで、 R_b は $0.8 Q_{max}$ の水平線と $Q-R$ 曲線の包絡線との交点のうち大きいほうの層間変形角である。

4. 開口の影響による耐力低減率 r_v

著者は、開口を有する耐震壁の水平耐力はRC規準の耐力低減率に採用されているような開口の大きさではなく、圧力場を形成する壁板の面積和 ΣA_e の大きさに影響されると考えて、開口の影響による耐力低減率 r_v を次式のように提案した[5]。

$$r_v = \sqrt{\Sigma A_e / h l} \quad (1)$$

文献5)では、垂れ壁や腰壁のない袖壁のみを有する開口については検討が残されていた。そこで、袖壁のみを有する開口も耐力低減率は(1)式により算定する。しかし、文献5)のような ΣAe の算定方法ではなく、本実験や既往の実験資料の壁板の斜めひび割れ発生状況および ΣAe の算定の簡便さと実用性を考慮することにより、次のように ΣAe を算定することにした。

1) 偏在開口の場合 図-3に示すように、正側加力(RQ)では、下部開口隅角部から左端応力の作用する方向 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)では、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て算定する。

2) 中央開口の場合 図-3に示すように、曲げ引張り側壁板では、柱、はり中心線の交点から圧縮応力の作用する方向に下部開口隅角部に引かれた傾斜線と柱中心線とで囲まれる領域、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て算定する。本実験と既往の実験資料の耐力低減率 r_v の値を表-2に示す。なお、開口が偏在すると加力方向で ΣAe の大きさが異なるので、 r_v は正側加力(RQ)の耐力低減率 r_{Rv} と負側加力(LQ)の耐力低減率 r_{Lv} の値を持つことになる。

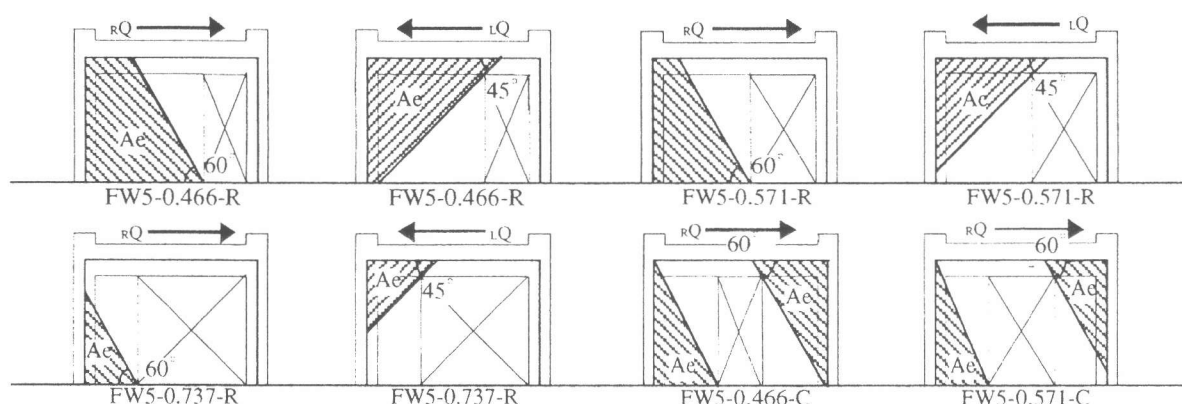


図-3 本実験の圧力場を形成する壁板の領域(面積 Ae)

5. 耐力低減率 r_v の検証

文献5)では無開口耐震壁と有開口耐震壁の面積膨張率の比は、水平耐力近傍になると耐力低減率 r_v の値にほぼ等しくなることを示したが、本実験の中央に開口を有する試験体もその関係はほぼ等しくなり、図-3に示した斜線を付けた領域の壁板が圧力場を形成し、その面積和 ΣAe が水平耐力に寄与していると言える。開口が偏在する場合には、図-3に示すように、正側と負側加力で壁板からの圧縮力を受けるはりの長さが異なる。そのため、上に述べた面積膨張率の比が耐力低減率 r_v の値に等しくならなくなることになる。そこで、各試験体の曲げ引張り側柱の伸び ε を図-4に示す。図-4によれば、圧力場を形成する壁板の面積が大きいほど柱の伸びが大きい。無開口耐震壁FW5-0.00の水平耐力時($R=7 \times 10^{-3}$ rad.)の曲げ引張り側柱の伸び ε_0 と開口が偏在する試験体の水平耐力近傍の曲げ引張り側柱の伸び ε_f の比 $\varepsilon_f/\varepsilon_0$ と耐力低減率 r_v の関係を図-5に示した。図-5に示すように、 $\varepsilon_f/\varepsilon_0$ は水平耐力近傍で耐力低減率 $r_v (=r_{Rv}, r_{Lv})$ にほぼ等しくなる。以上の検討から、図-3に示した斜線を付けた領域の壁板が圧力場を形成し、その面積和 ΣAe が水平耐力に寄与していると言える。したがって、(1)式の耐力低減率 r_v は、開口周比が0.4以上の袖壁を有する架構の水平耐力を評価するのに妥当なものと言える。

6. 水平耐力の検討

既往の無開口耐震壁の水平耐力 Q_{u0} の算定式と式 (1) による耐力低減率 r_u および比較のために RC 規準の耐力低減率を用いて、本研究と既往の実験資料の実験値の水平耐力 Q_{uex} と算定値の水平耐力 $r_u \cdot Q_{u0}$ 、 $r \cdot Q_{u0}$ との適合性について検討を行う。無開口耐震壁の水平耐力 Q_{u0} の算定式として、富井・江崎のスリップ耐力式 Q_{u01} [7]、広沢式 Q_{u02} [8]、およびマクロモデルによる望月式 Q_{u03} [9] の 3 式を用いた。既往の実験資料の選定にあたっては、軸力が作用し、試験体の縮尺が小さいもの、および実験資料の諸元が無開口耐震壁と同一のものを選定した。文献 1) の実験資料の Q_{u03} の算定は、算定式の条件に適合していないことから除いた。表-2 中に、本実験と既往の実験資料の無開口耐震壁の Q_{uex} と 3 式による Q_{u0} の比 Q_{uex}/Q_{u0} の値を示しているが、いずれの算定式も実験値の値を精度よく捉えている。本実験と既往の実験資料の Q_{uex} と $r_u \cdot Q_{u0}$ 、 $r \cdot Q_{u0}$ の比 $Q_{uex}/r_u \cdot Q_{u0}$ 、 $Q_{uex}/r \cdot Q_{u0}$ の値およ

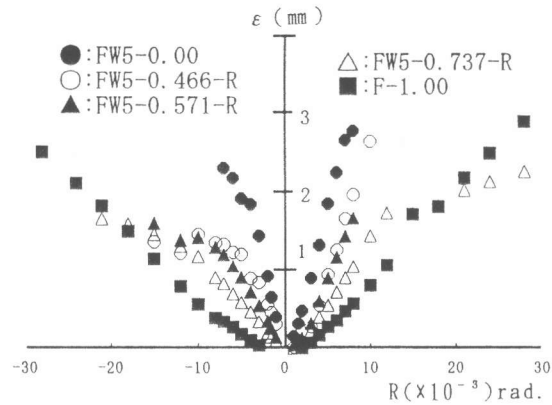
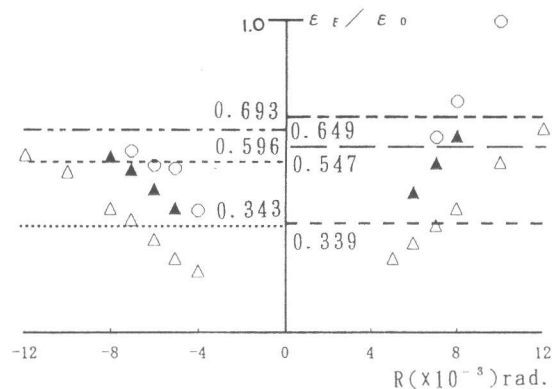


図-4 各試験体の曲げ引張り側柱の伸び



○:FW5-0.466-R ($r_{ru}=0.693$, $l_{ru}=0.649$)
▲:FW5-0.571-R ($r_{ru}=0.596$, $l_{ru}=0.547$)
△:FW5-0.737-R ($r_{ru}=0.343$, $l_{ru}=0.339$)

図-5 $\varepsilon\varepsilon/\varepsilon_0$ と耐力低減率 r_u の関係

表-2 実験値の水平耐力 Q_{uex} と算定値の水平耐力 Q_{u0} の比 Q_{uex}/Q_{u0} の値の比較

試 験 体	実験値の 水平耐力 (ton)	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					
		Q_{u01} (ton)	Q_{u02} (ton)	Q_{u03} (ton)	r_u	r (r_1, r_2)	Q_{uex} $r_u \cdot Q_{u01}$	Q_{uex} $r \cdot Q_{u01}$	Q_{uex} $r_u \cdot Q_{u02}$	Q_{uex} $r \cdot Q_{u02}$	Q_{uex} $r_u \cdot Q_{u03}$	Q_{uex} $r \cdot Q_{u03}$	
		Q_{u01} (ton)	Q_{u02} (ton)	Q_{u03} (ton)	r_u	r (r_1, r_2)	Q_{uex} $r_u \cdot Q_{u01}$	Q_{uex} $r \cdot Q_{u01}$	Q_{uex} $r_u \cdot Q_{u02}$	Q_{uex} $r \cdot Q_{u02}$	Q_{uex} $r_u \cdot Q_{u03}$	Q_{uex} $r \cdot Q_{u03}$	
FW5-0.00 *2 (R)	53.40	50.88	53.49	62.14	1.000	1.000	1.050	1.050	0.998	0.998	0.816	0.916	
FW5-0.00 *2 (L)	50.70	50.88	53.49	62.14	1.000	1.000	0.996	0.996	0.948	0.948	0.859	0.859	
FW5-0.466-R (R)	38.90	49.24	52.81	60.08	0.693	0.534 ^{*1}	1.141	1.479	1.064	1.379	0.934	1.212	
FW5-0.466-R (L)	32.90	49.24	52.81	60.08	0.649	0.534 ^{*1}	1.030	1.251	0.960	1.166	0.847	1.025	
FW5-0.571-R (R)	33.40	48.19	51.36	58.65	0.596	0.429 ^{*1}	1.163	1.616	1.091	1.516	0.956	1.327	
FW5-0.571-R (L)	27.40	48.19	51.36	58.65	0.547	0.429 ^{*1}	1.039	1.325	0.975	1.243	0.854	1.089	
FW5-0.737-R (R)	21.20	45.43	47.82	54.11	0.343	0.263 ^{*1}	1.361	1.774	1.293	1.686	1.143	1.490	
FW5-0.737-R (L)	21.00	45.43	47.82	54.11	0.339	0.263 ^{*1}	1.363	1.757	1.295	1.670	1.145	1.476	
FW5-0.466-C	35.40	47.09	49.92	56.86	0.640	0.534 ^{*1}	1.175	1.408	1.108	1.328	0.973	1.166	
FW5-0.571-C	30.10	47.21	50.08	57.06	0.564	0.429 ^{*1}	1.130	1.486	1.066	1.401	0.935	1.230	
V4 * ^{*3}	31.80	33.10	37.15	—	1.000	1.000	0.961	0.961	0.856	0.856	—	—	
V22 * ^{*3} (R)	9.95	16.36	28.46	—	0.581	0.370 ^{*1}	1.009	1.644	0.602	0.945	—	—	
V22 * ^{*3} (L)	10.50	16.36	28.46	—	0.530	0.370 ^{*1}	1.211	1.735	0.696	0.997	—	—	
V23 * ^{*3} (R)	15.18	24.34	31.71	—	0.581	0.370 ^{*1}	1.073	1.686	0.824	1.294	—	—	
V23 * ^{*3} (L)	13.00	24.34	31.71	—	0.530	0.370 ^{*1}	1.008	1.444	0.774	1.108	—	—	
V24 * ^{*3} (R)	20.35	32.34	37.15	—	0.581	0.370 ^{*1}	1.083	1.701	0.943	1.480	—	—	
V24 * ^{*3} (L)	12.65	32.34	37.15	—	0.530	0.370 ^{*1}	0.738	1.057	0.642	0.920	—	—	
V33 * ^{*3} (R)	19.75	24.40	31.78	—	0.767	0.582 ^{*1}	1.055	1.391	0.810	1.068	—	—	
V33 * ^{*3} (L)	15.25	24.40	31.78	—	0.727	0.582 ^{*1}	0.860	1.074	0.660	0.824	—	—	
V34 * ^{*3} (R)	25.00	32.34	37.15	—	0.767	0.582 ^{*1}	1.010	1.331	0.879	1.158	—	—	
V34 * ^{*3} (L)	20.70	32.34	37.15	—	0.727	0.582 ^{*1}	0.880	1.100	0.766	0.957	—	—	
s _{sw} * ^{*4}	20.10	18.17	19.08	22.50	1.000	1.000	1.106	1.106	1.053	1.053	0.893	0.893	
s _{S1.6} * ^{*4}	13.80	20.27	21.46	24.37	0.606	0.505 ^{*1}	1.123	1.348	1.061	1.273	0.934	1.121	
s _{S1.6} * ^{*4}	11.70	20.52	21.80	24.59	0.436	0.300 ^{*1}	1.308	1.900	1.231	1.789	1.091	1.586	
平 均							1.084	1.447	0.941	1.246	0.958	1.217	
開口を有する試験体の標準偏差							0.141	0.253	0.196	0.266	0.087	0.216	
変動係数							0.130	0.175	0.209	0.213	0.091	0.177	

注) (R) 正側加力 (L) 負側加力 *1: r_u *2: 文献 1) *3: 文献 1) *4: 文献 2) 参照

びその平均、標準偏差、変動係数の値の比較を表-2に示す。表-2に示した Q_{uex} と $r_u \cdot Q_{u0}$ の関係の一例を図-6に示す。全試験体の $Q_{uex}/r_u \cdot Q_{u0}$ の平均値、標準偏差および変動係数の値から、耐力低減率 r_u による水平耐力の算定値 $r_u \cdot Q_{u0}$ は、RC規準の耐力低減率 r による水平耐力の算定値 $r \cdot Q_{u0}$ よりも実験値 Q_{uex} との適合性がよいと言える。

7. 結び

- 1) 壁板中央に開口を有する場合には、曲げ破壊モード、開口が偏在する場合には、開口周比が0.6以下ではせん断破壊モード、0.7以上では曲げ破壊モードを示す。
- 2) 無開口耐震壁の水平耐力が精度よく算定される式を用いれば、開口周比が0.4以上の袖壁を有する架構の水平耐力は、(1)式を用いて実用上十分な精度で算定される。

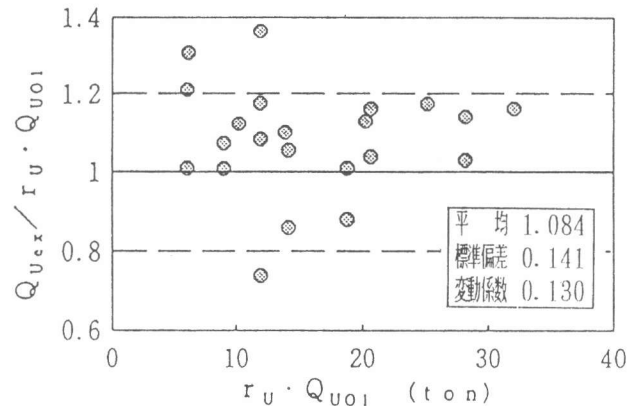


図-6 Q_{uex} と $r_u \cdot Q_{u0}$ の関係

謝辞：本論文をまとめるにあたり、工学院大学教授望月洵博士に無開口耐震壁の水平耐力の解析のご協力を頂いた。さらに、元工学院大学大学院生村本肇氏（現大林組）と近畿大学元卒論生一同の協力を得た。ここに深く感謝します。

参考文献：1) 河口俊朗・野村設郎・土田伸：鉄筋コンクリート縦長開口壁の耐震性能に関する研究、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1909～1910、1984.10 2) 武田寛・小原雅樹・荒川卓：鉄筋コンクリート造雑壁付き柱の耐力及び変形性状に関する実験的研究（その3）、日本建築学会学術講演梗概集、pp.397～398、1986.8 3) 小野正行・徳広育夫・倉富和義：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、1993、pp.1191～1196 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、Vol.17、No.2、1995、pp.535～540 5) 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号、1992.5、pp.119～128 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1988 7) 富井政英・江崎文也：鉄筋コンクリート造耐震壁の水平耐力に関する研究（その1スリップ破壊によって支配される水平耐力）、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1587～1588、1981.9 8) 広沢雅也・秋山友秋・白石基植：鉄筋コンクリート造耐震壁耐震性に関する総合研究、日本建築学会学術講演梗概集、pp.1173～1174、1975.9 9) 望月洵・小野里憲一：連層耐震壁の簡略化せん断強度式、第8回日本地震工学シンポジウム、pp.1245～1249、1990.12 10) 小野正行：大きな開口を有する開口壁の断塑性性状に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、1995、pp.541～546