



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	壁板の開口寸法 $h_o \times l_o$ cm×cm	コンクリート		鉄筋		《共通事項》 柱断面 : $B \times D = 20 \times 20$ (cm) 主筋 : 6-D13 $P_g = 1.905$ % はり断面 : $B \times D = 20 \times 30$ (cm) 主筋 : 4-D13 $P_g = 0.847$ % 帯筋比 : $P_w = 0.8$ % (D6 -@40) 肋筋比 : $P_w = 0.8$ % (D6 -@40) 壁厚 : $t = 5$ (cm) 壁筋比 : $P_s = 0.64$ % (D6 -@100)
		圧縮強度 $\sigma_c$ kg/cm <sup>2</sup>	引張強度 $\sigma_t$ kg/cm <sup>2</sup>	降伏強度 $\sigma_v$ kg/cm <sup>2</sup>	引張強度 $\sigma_u$ kg/cm <sup>2</sup>	
FW5-0.000	—	304	27.5			
FW5-0.414	47×67	243	26.3	D6 3870	D6 5380	
FW5-0.519	57×87	197	20.8	D10 3850	D10 5540	
FW5-0.594	67×97	259	30.6	D13 3440	D13 5250	
F-1.00	—	168	18.9			

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に示す。表-1には、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- $\xi$ 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、 $\xi$ は開口周比を表している。試験体打設ごとにシリンドーを採取し、試験体と同一条件で養生を行ったシリンドーの圧縮と引張（割裂）強度および鉄筋の機械的性質を表-1に示す。試験体は型枠脱型後実験当日まで室内養生を行ったものである。

## 2.2 加力方法および測定方法

加力装置および変位測定装置を図-2、3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20 ton =  $(0.164 \sim 0.298) \cdot B \cdot D \cdot \sigma_c$ , B:柱幅, D:柱せい,  $\sigma_c$ :コンクリートの圧縮強度}を加えた後、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（基礎上端からスラブ上端までの高さは130cm, スラブの厚さは7cm）にボルト締めした加力フレームと加力フレームの両側に配置したP C鋼棒による正負交番加力（基礎上端からP C鋼棒の中心までの高さは139cm）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。各試験体の面積膨張を

求めるために柱、はりの材軸線と直角方向および材軸線方向の変位（各測定点の鉛直変位と水平変位）を高感度型変位計により検出した。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-4に示す。水

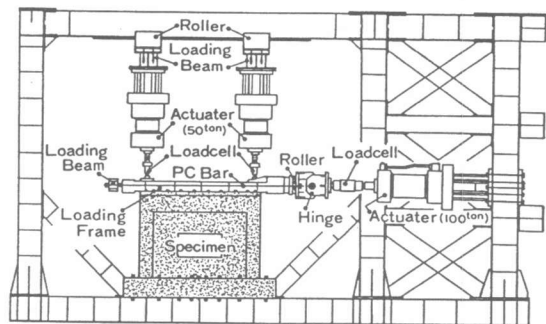


図-2 加力装置

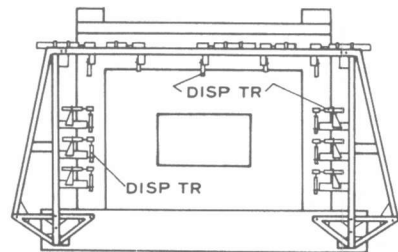


図-3 変位測定装置

平荷重-変形曲線の縦軸は水平荷重  $Q$  であり、横軸ははり材軸線上のはり中央での水平変位  $\delta$  を柱脚よりはり材軸線までの高さ  $h$  (115 cm) で割った層間変形角  $R$  ( $= \delta / h$ ) である。図-4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水平荷重-変形曲線の特徴を示す。

[FW5-0.00] 試験体 : 層間変形角  $R = 0.26 \times 10^{-3} \text{rad}$ . 付近で壁板に斜めひび割れが

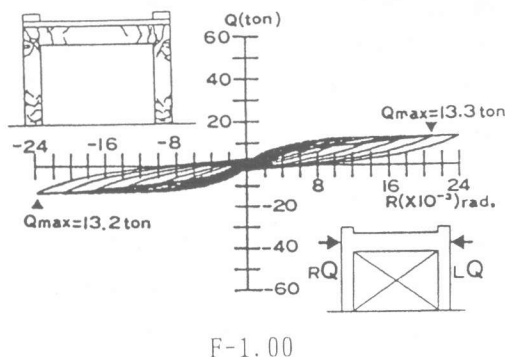
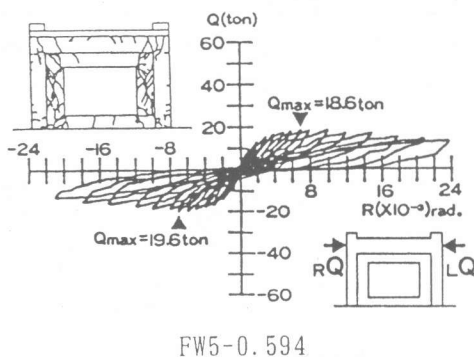
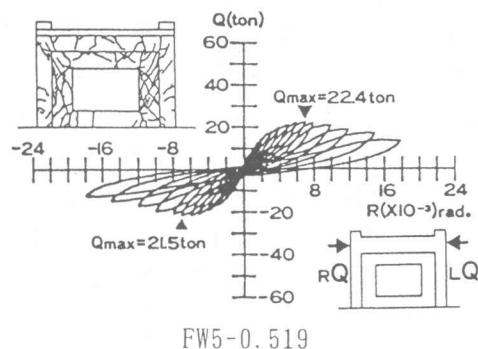
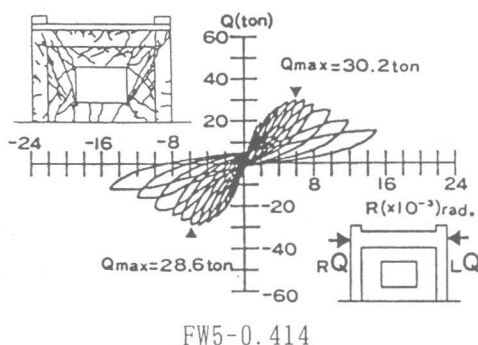
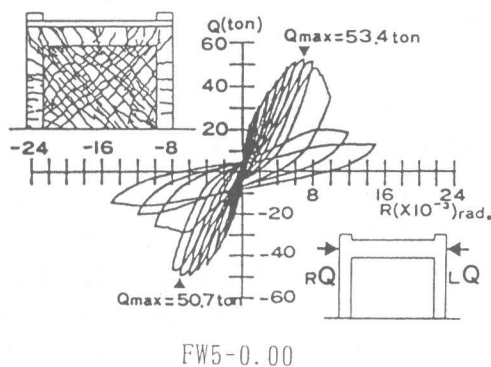


図-4 水平荷重-変形曲線と水平耐力時のひび割れ状況 ( RQ : 正側加力、 LQ : 負側加力)

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、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  $R = 7.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ . 付近で水平耐力に達した。水平耐力以後は、急激な耐力低下を示す水平荷重-変形曲線であり、破壊モードはせん断破壊モード [3] である。

[FW5-0.414] 試験体 : 斜張力によるひび割れが開口隅角部に極めて初期に発生し、層間変形角  $R = 0.26 \times 10^{-3} \text{rad}$ . 付近で開口横壁板に斜め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、開口隅角部の圧縮破壊や壁板のスリップ圧縮破壊により  $R$

=  $6.0 \times 10^{-3}$  rad. 付近で水平耐力に達した。水平耐力時の壁板の斜めひび割れ傾斜角は曲げ引張側壁板では水平軸に対してほぼ  $60^\circ$ 、曲げ圧縮側壁板ではほぼ  $45^\circ$  である。水平耐力以後は、急激な耐力低下を示す水平荷重-変形曲線であり、破壊モードはせん断破壊モードである。

[FW5-0.519] 試験体 : 壁板には層間変形角  $R = 0.17 \times 10^{-3}$  rad. 付近で開口隅角部からはり下まで鉛直ひび割れが発生し、 $R = 0.5 \times 10^{-3}$  rad. 付近で斜めひび割れが発生した。はりには  $R = 0.8 \times 10^{-3}$  rad. 付近で鉛直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、開口隅角部の圧縮破壊や壁板のスリップ圧縮破壊により  $R = 7.0 \times 10^{-3}$  rad. 付近で水平耐力に達した。水平耐力時の壁板の斜めひび割れ傾斜角は [FW5-0.414] 試験体とほぼ同じである。水平耐力以後は、緩やかな耐力低下を示す水平荷重-変形曲線であり、破壊モードは曲げ破壊モード [3] である。

[FW5-0.594] 試験体 : 壁板には層間変形角  $R = 0.25 \times 10^{-3}$  rad. 付近で開口隅角部からはり下まで鉛直ひび割れが発生し、 $R = 0.8 \times 10^{-3}$  rad. 付近で下部の開口隅角部から水平ひび割れが発生した。壁板の斜めひび割れは  $R = 2.0 \times 10^{-3}$  rad. 付近で発生した。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頭部に伸展したが、壁板のスリップ圧縮破壊により  $R = 7.0 \times 10^{-3}$  rad. 付近で水平耐力に達した。水平耐力時の壁板の斜めひび割れ傾斜角は水平軸に対してほぼ  $60^\circ$  である。水平耐力以後は、水平耐力近傍の荷重を保持しながら、大きな変形性状を示す水平荷重-変形曲線であり、破壊モードは曲げ破壊モードである。

[F-1.00] 試験体 : はり端に鉛直ひび割れ、柱脚、柱頭の順に水平ひび割れが発生した。以後、変位振幅の増大につれて、柱脚、柱頭部に斜めひび割れが発生した。続いて、はり、柱の接合隅角部の圧縮破壊および柱脚部の圧縮破壊が始まり水平耐力に達した。水平荷重-変形曲線は、水平耐力近傍の荷重を保持したまま、大きな変形性能を示すものであり、破壊モードは曲げ破壊モードである。

#### 4. 面積膨張

図-5に、水平耐力付近までの正側加力時の付帯ラーメンの変形例を示す。各層間変形角  $R$  の時の付帯ラーメンの変形図の面積 ( $A_R$ ) を求め、その面積から無加力時の試験体の面積 ( $A_0 = h \times l$ ) を差し引いた面積 ( $A_R - A_0$ ) を面積膨張 ( $\Delta A_R$ ) とし、 $\Delta A_R / A_0$  を各  $R$  の時の面積膨張率  $\Phi$  とする。正側加力時の面積膨張率  $\Phi$  と  $R$  の関係を図-6に示す。図-6によれば、[FW5-0.00] 試験体

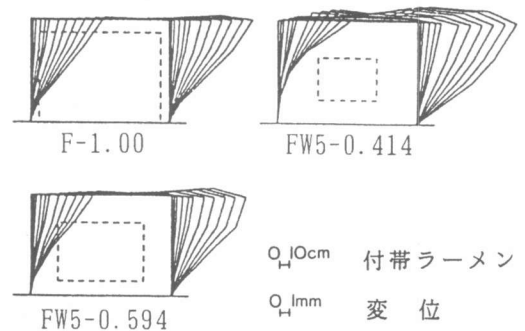


図-5 付帯ラーメンの変形

の面積膨張が一番大きく、[F-1.00] 試験体は面積膨張を起こしていない。一般に、水平力を受ける耐震壁は壁板に斜めひび割れが発生し、そのひび割れ幅の増大により面積膨張を起こす。壁板の膨張は周辺架構および壁筋で拘束され、壁板は斜め方向圧縮力を受けることになり、圧力場を形成する。この面積膨張が耐震壁の水平耐力に大きく寄与することは、既に、理論的研究 [4] や実験的研究 [1, 5] で認められている。すなわち、周辺架構が強剛であれば、圧力場を形

成する壁板の圧縮破壊によって水平耐力が支配され、壁板の方が強剛であれば、周辺架構がせん断破壊を起こすことになる。

図-6から、開口周比が0.6程度の[FW5-0.594]試験体もまた面積膨張を起こしているので、圧力場を形成する壁板が存在しているといえる。

5. 耐力低減率  $r_u$

開口の存在により、水平耐力は減少するが、その減少は圧力場を形成する壁板の面積和  $\Sigma Ae$  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を次式のように提案した [1]。

$$r_u = \sqrt{\Sigma Ae / hI} \quad (1)$$

図-4に示した水平耐力時の壁板の斜めひび割れ発生状況と実用性を考慮して、水平耐力に寄与する壁板の面積  $Ae$  を次のように求めた。図-7に示すように、曲げ引張側壁板では、下部開口隅角部から柱、はり中心線の交点に傾斜線（圧縮応力の作用する方向）を引き、その傾斜線と柱中心線とで囲まれる領域、また、曲げ圧縮側壁板では、上部開口隅角部から45°に引かれた傾斜線（圧縮応力の

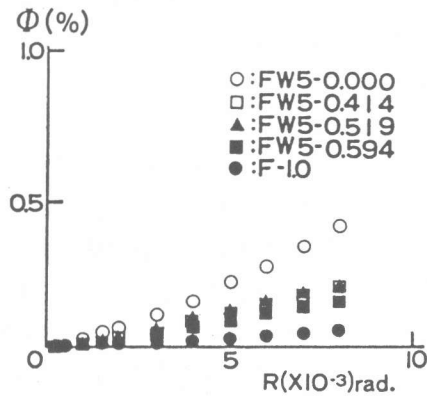


図-6 正側加力時の  $\Phi$  と R の関係

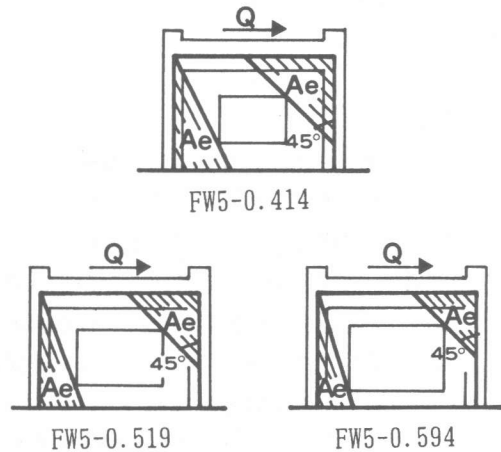


図-7 圧力場を形成する壁板の領域 ( $Ae$ )

表-2 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

試験体	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	
	$Q_{uex}$ (ton)	$Q_{uo}$ (ton)	$r_u$	$r$ ( $r_1, r_2$ )	$\frac{Q_{uex}}{r_u \cdot Q_{uo}}$	$\frac{Q_{uex}}{r \cdot Q_{uo}}$
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
FW5-0.414 (R)	30.20	47.30	0.632	0.581 <sup>*1</sup>	1.010	1.099
FW5-0.414 (L)	28.60	47.30	0.632	0.581 <sup>*1</sup>	0.957	1.041
FW5-0.519 (R)	22.40	44.40	0.534	0.456 <sup>*1</sup>	0.945	1.106
FW5-0.519 (L)	21.50	44.40	0.534	0.456 <sup>*1</sup>	0.907	1.062
FW5-0.594 (R)	18.60	48.30	0.472	0.394 <sup>*1</sup>	0.816	0.977
FW5-0.594 (L)	19.80	48.30	0.472	0.394 <sup>*1</sup>	0.868	1.040
					0.917	1.054
					0.063	0.043
					0.069	0.041

(R) : 正側加力 (L) : 負側加力  $Q_{uo} = (2.4\sqrt{F_c} + 3400 \cdot P_s) t l$  \*1 :  $r_2$

作用する方向)と柱、はり中心線で囲まれる領域とした。各試験体の耐力低減率 $r_u$ とRC規準の耐力低減率 $r$ は表-2に示す。

## 6. 水平耐力の検討

無開口耐震壁 [FW5-0.00] 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・江崎のスリップ耐力式 [6] を用いた。無開口耐震壁 [FW5-0.00] の算定値の水平耐力 $Q_{uo}$ と実験値の水平耐力 $Q_{uex}$  の比の値を表-2に示す。表-2から富井・江崎のスリップ耐力式は実験値との適合性が良いといえる。

無開口耐震壁の水平耐力 $Q_{uo}$ と式(1)の耐力低減率 $r_u$  およびRC規準の耐力低減率 $r$ を用いて、本試験体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-2に示す。式(1)の $r_u$ とRC規準の $r$ による水平耐力の算定値は、平均値、標準偏差、変動係数の値から実験値との適合性が良いといえる。なお、式(1)およびRC規準の耐力低減率は、純ラーメン試験体 [F-1.00] の水平耐力の評価には適用されないものである。

## 7. 結び

無開口耐震壁やラーメンとしての取り扱いをするのが適当とされている開口壁および純ラーメンの試験体により繰返し水平加力実験を行ない、ひび割れ性状、破壊性状、変形状、面積膨張および水平耐力の評価について検討を行った結果、以下のことが知れた。

- (1) 曲げ引張側壁板における斜めひび割れの傾斜は、開口が大きくなるにつれて大きくなる傾向にある。曲げ圧縮側壁板における斜めひび割れの傾斜は、開口周比が0.5程度までは $45^\circ$ の傾斜であるが、開口周比が0.6程度になるとほぼ $60^\circ$ の傾斜になり、大きくなる。
- (2) 開口周比が0.5以上になると、破壊モードと変形状は純ラーメン的の性状を示すが、開口周比が0.6程度になっても面積膨張を起こし、圧力場を形成する領域がある。
- (3) 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、開口周比が0.4~0.6までの開口壁の水平耐力は、著者提案の式(1)またはRC規準の耐力低減率を用いて、実用上十分な精度で算定される。

## 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) 小野正行：有開口耐震壁の破壊性状におよぼすパラメータの影響、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、pp.283-284、1994・9
- 4) 坪井善勝・富井政英：直交異方性弾性版理論による鉄筋コンクリート壁の亀裂発生後に於ける剪断抵抗の解析、建築学会論文集、第48号、pp.26-39、昭和29年3月
- 5) 望月重：鉄筋コンクリート壁体の亀裂発生後の架構拘束の実験(1層1はり間の場合)、日本建築学会論文報告集、第249号、pp.13-23、昭和51年11月
- 6) 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