

論文

[2090] 複数開口を有する鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する実験的研究

正会員○小野正行 (近畿大学九州工学部)

正会員 徳広育夫 (鹿児島大学工学部)

1. まえがき

耐震壁は設計上の制約により開口を有する場合が多いにもかかわらず、開口を有する耐震壁の弾塑性性状は無開口耐震壁ほど明らかにされていない。現行の鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (以後RC規準と略記) の開口の影響による耐力低減率<sup>1)</sup>は、開口位置に無関係にその水平耐力が算定され、しかも、複数開口を有する場合には、その開口の大きさの取り扱い方に苦慮しているのが現状である。

従って、本研究では、壁筋比と付帯ラーメンの拘束が同じで、図-1に示すような複数開口が壁板中央部や偏在した有開口耐震壁の試験体により繰り返し水平加力実験を行ない、

- 1) 複数開口がひび割れ性状や変形性状に及ぼす影響
- 2) 著者提案の開口の大きさおよび位置によつて異なる圧力場を形成する面積を考慮した耐力低減率<sup>2), 3)</sup>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なった。

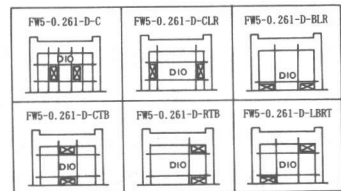


図-1 試験体の開口一覧および開口補強 (補強筋 D10)

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  $5\text{cm}$  の複数開口壁板およびはり両側に厚さ  $7\text{cm}$  のスラブを有する 1 層 1 スパンの実物大の約  $1/3$  の試験体で、その形状・寸法および配筋の一例を図-2 (各試験体の開口補強は図-1 参照) に示す。表-1 に、試験体の柱・はりの断面寸法、壁板の配筋、開口寸法を示す。試験体名には FWt- $\xi$ -D-P 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 ( $\sqrt{2h_o l_o / h l}$ )、D は複数開口、P は開口の位置 (C : 中央部、CLR : 中央左部、BLR : 左下部、CTB : 中央上部、RTB : 右上部、LBRT : 左下部右上部) を表わしている。

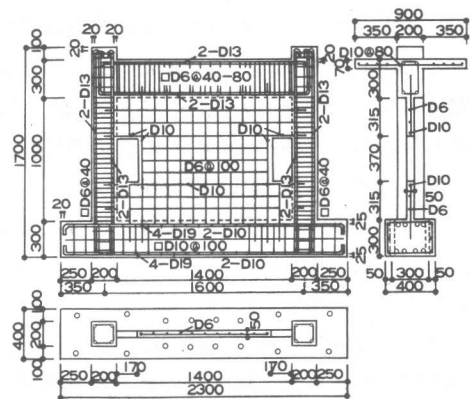


図-2 試験体の形状・寸法および配筋 (FW5-0.261-D-CLR) 単位: mm

表-1 に使用材料の機械的性質を、表-2 にコンクリートの調合を示す。

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-3、4に示す。加力方法はコンピュータ制御によるアクチュエータ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  $20\text{ton} = (0.1490 \sim 0.227) \cdot B \cdot D \cdot F_c$ 、 $B$ : 柱幅、 $D$ : 柱せい、 $F_c$ : コンクリートの圧縮強度} を加えた後、柱頭一点加力でな

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			帯筋・肋筋		壁厚 cm	壁筋		開口寸法 $h_o \times l_o$ cm × cm	位置	コンクリート		鉄筋	
	柱断面 B × D cm × cm	はり断面 B × D cm × cm	主筋	径-間隔 P <sub>w</sub> %	P <sub>w</sub> %		径-間隔 P <sub>s</sub> %	圧縮強度 F <sub>c</sub> kg/cm <sup>2</sup>			引張強度 F <sub>t</sub> kg/cm <sup>2</sup>	降伏強度 σ <sub>y</sub> kg/cm <sup>2</sup>	引張強度 σ <sub>u</sub> kg/cm <sup>2</sup>	
FW5-0.261-D-C	20×20	20×30	4-D13	D6-@40-80	0.4~0.8	5	D6-@100	0.64	37×17	中央	312*	29.3	D6 3870	D6 5380
FW5-0.261-D-CLR										中央右左	220	18.9		
FW5-0.261-D-BLR										右下左	275	21.0		
FW5-0.261-D-CTB										中央上下	275	21.0		
FW5-0.261-D-RTB										右上下	220	18.9		
FW5-0.261-D-LBRT										左下右上	255	23.6		

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PC鋼棒により正負交番の水平力を加えた。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。ただし、本実験の初期の段階では図-3に示すアクチュエータを保有していなかったため、表-1のF<sub>c</sub>欄の\*印を付けている試験体は2台のオイルジャッキにより水平力を加力した。また、両柱頭部に加える一定鉛直荷重もオイルジャッキにより加力した(文献3参照)。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。各試験体の全体曲げ変形やせん断変形を求めるために、柱、はりの材軸線方向と直角方向の変位(鉛直変位と水平変位)を変位計により検出した。これらの変位計は基礎ばりにボルトで固定された変位測定フレームに取り付けられている。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. 変形性状に関する検討

#### 3.1 ひび割れ性状および破壊性状

本実験における各試験体の荷重-変形曲線および実験終了後の写真を図-5(a)~(f)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<sub>max</sub>|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(=δ/h)である。

各試験体とも、斜張力によるひび割れが開口隅角部に発生し、R=(0.26~0.34)×10<sup>-3</sup>radで開口横や開口間の壁板にせん断初ひび割れが発生した。その時の荷重をQ<sub>cr</sub>=k・t・l・F<sub>c</sub>で示すと、k=0.028~0.043であつた。以後、変形が増大するにつれて柱に水平ひび割れや壁板のせん断ひび割れが増加進展した。続いて壁板のせん断ひび割れが柱およびはりに進展したが、開口隅角部や開口横および開口間の壁板が圧縮破壊することによりR=(6~7)×10<sup>-3</sup>radで最大耐力に達した。各試験体とも、開口隅角部に斜張力によるひび割れが極めて初期に発生したが、この

表-2 コンクリートの調査表

スランプ (cm)	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	セメント (kg/m <sup>3</sup> )	細骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材 (kg/m <sup>3</sup> )	混和剤 (cc/m <sup>3</sup> )
21	63	212	337	939	814	674

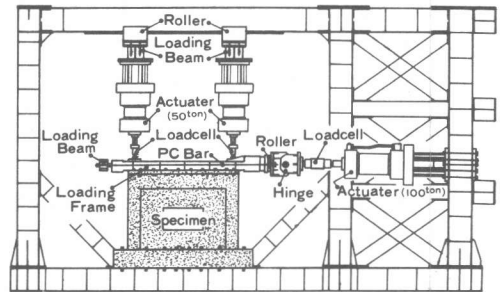


図-3 加力装置

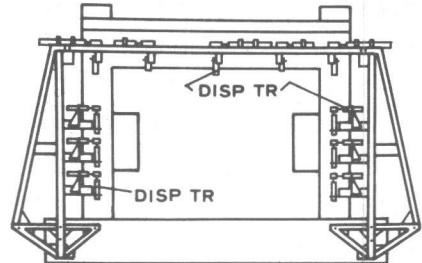


図-4 変位測定装置

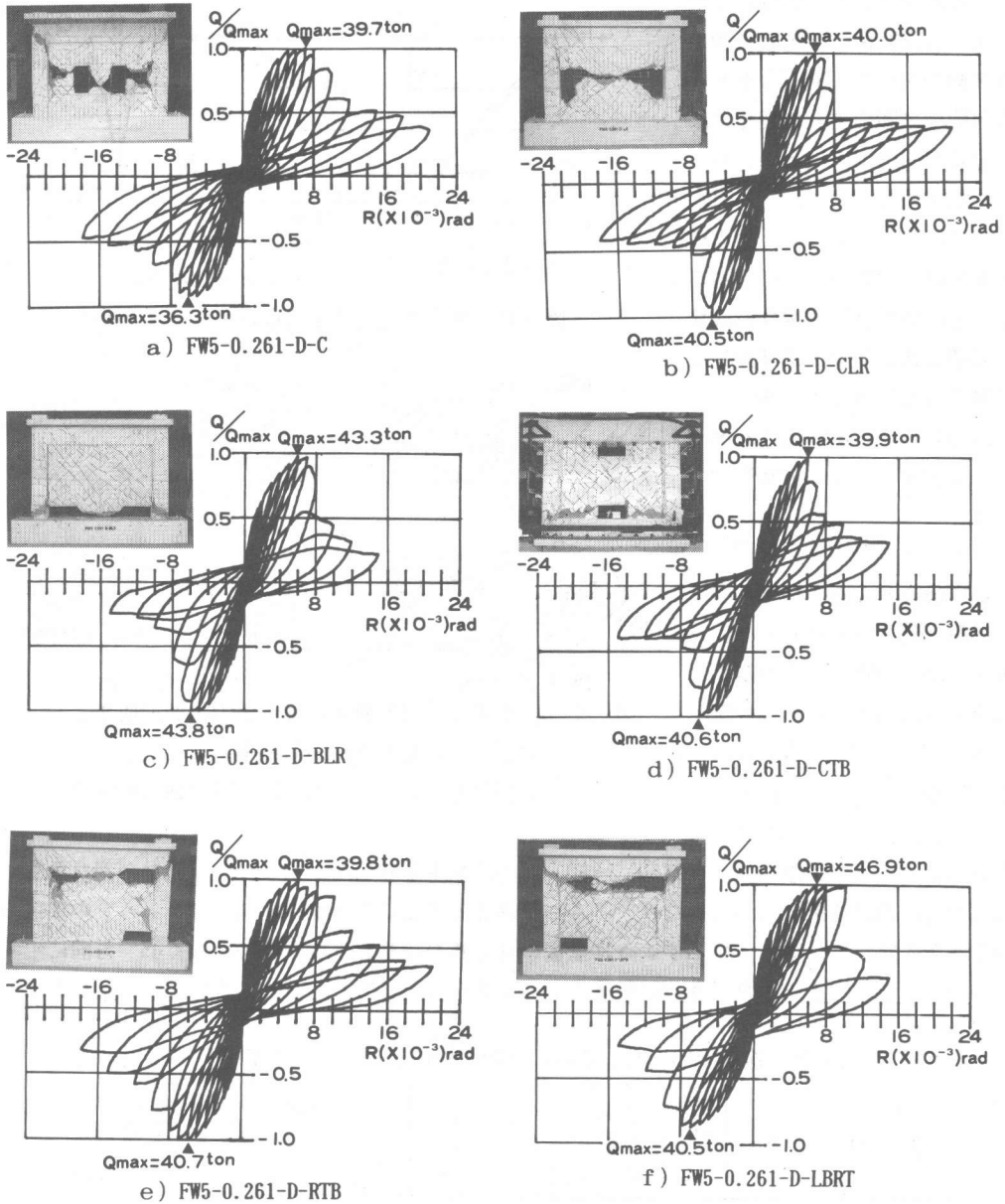


図-5 水平荷重-変形曲線

ひび割れ幅は最大耐力時でもあまり拡大せず、これが直接の破壊原因とはならず、開口隅角部や開口横および開口間の壁板が圧縮破壊することにより耐力が支配された。

### 3. 2 せん断変形と曲げ変形

測定された柱の鉛直変位を用いて、測定位置(図-4参照)での全体曲げ変形 $\delta_B$ を求めた。はりではり中央の水平変位 $\delta$ 、左右の柱の間では左右の柱の水平変位の平均の水平変位から各測定位置での $\delta_B$ を差し引くことによりせん断変形 $\delta_s$ を求めた。 $\delta$ と $\delta_s$ および $\delta_B$ との比と層間変形角 $R$ の関係の一例を図-6に示す。図-6中の ${}_RQ$ は正側加力、 ${}_LQ$ は負側加力を示す。

せん断ひび割れが明確になった後、各試験体の変形は8割から9割程がせん断変形であり、複数開口の開口位置の変化による顕著な相違はないといえる。

#### 4. 水平耐力の検討

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面積 $\Sigma Ae$  (図-7参照)に影響されると考えて、著者は開口の影響による耐力低減率 $r_u$ を次式のように提案<sup>2), 3)</sup>した。

$$r_u = \sqrt{\Sigma Ae / hI}$$

本実験のせん断ひび割れ発生状況 (層間変形角 $R = 4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ の時)と圧力場を形成する面積 $\Sigma Ae$ の代表例を図-7に示す。壁板のせん断ひび割れは、図-7に示すように、場所によつては45°

方向に発生するとは限らず、ほぼ50°~60°方向に発生する場所がある。せん断ひび割れ角度は軸力および開口位置によつて異なり、 $\Sigma Ae$ が異なることになるが、本論では、 $\Sigma Ae$ の算定の簡便さを考慮して、図-7に示すように壁板のせん断ひび割れは場所に関係なく45°方向に生ずるものとして $r_u$ を求めた (他の試験体の $r_u$ は表-3を参照)。図-7中の $R r_u$ は正側加力

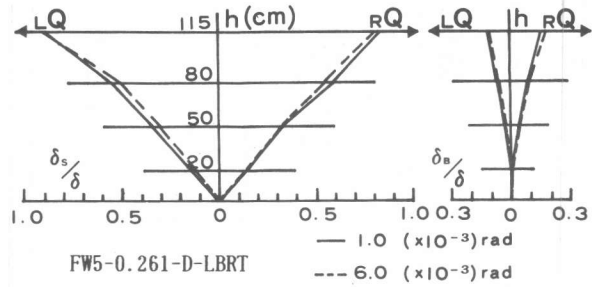


図-6 せん断変形 $\delta_s$ と曲げ変形 $\delta_b$ の割合

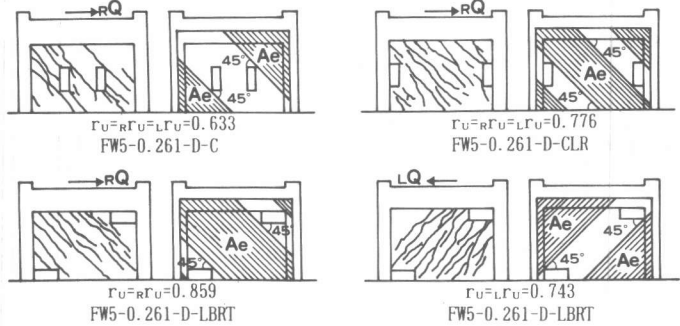


図-7 せん断ひび割れ発生状況と圧力場を形成する面積 $\Sigma Ae$ および耐力低減率 $r_u$  ( $R r_u$ : 正側加力、 $L r_u$ : 負側加力時の耐力低減率)

表-3 複数開口を有する耐震壁の実験値と算定値の水平耐力の比

参考文献	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		複数開口を有する耐震壁の実験値と算定値の水平耐力の比			
		$Q_{uex}$ (ton)	$Q_{u01}$ (ton)	$Q_{u02}$ (ton)	$r_u$	$r$	$\frac{Q_{uex}}{r_u \cdot Q_{u01}}$	$\frac{Q_{uex}}{r \cdot Q_{u01}}$	$\frac{Q_{uex}}{r_u \cdot Q_{u02}}$	$\frac{Q_{uex}}{r \cdot Q_{u02}}$	
本実験	FW5-0.261-D-C	39.70	51.32	52.26	0.633	0.739	1.222	1.047	1.200	1.028	
	FW5-0.261-D-CLR	40.50	45.89	45.51	0.776	0.739	1.137	1.194	1.147	1.204	
	FW5-0.261-D-BLR	43.80	49.20	49.50	0.745	0.538	1.195	1.655	1.188	1.645	
	FW5-0.261-D-CTB	40.60	49.20	49.50	0.667	0.739	1.237	1.117	1.230	1.110	
	FW5-0.261-D-RTB (R)	39.80	45.89	45.51	0.715	0.739	1.212	1.174	1.223	1.183	
	FW5-0.261-D-RTB (L)	40.70	45.89	45.51	0.753	0.739	1.178	1.200	1.188	1.210	
	FW5-0.261-D-LBRT (R)	46.90	48.07	48.07	0.859	0.538	1.136	1.813	1.136	1.813	
	FW5-0.261-D-LBRT (L)	40.50	48.07	48.07	0.743	0.538	1.134	1.566	1.134	1.566	
4) 5)	No. 8	27.20	58.57	60.49	0.550	0.636	0.844	0.730	0.818	0.707	
	No. 14	24.80	55.11	56.42	0.568	0.636	0.792	0.708	0.774	0.691	
	No. 20	33.80	58.57	60.49	0.594	0.636	0.972	0.907	0.941	0.878	
6)	SDC-3	87.00	126.30	115.90	0.636	0.600	1.083	1.148	1.180	1.251	
	SDV-3	113.10	127.30	117.60	0.689	0.717	1.289	1.239	1.396	1.341	
						平均	1.110	1.192	1.120	1.202	
						標準偏差	0.146	0.316	0.167	0.325	
						変動係数	13.153	26.510	14.911	27.038	

注) (R): 正側加力  $r$  はRC規準の耐力低減率  
(L): 負側加力  $r = \min(1 - 2l_o / 1.1 - \sqrt{2h_o l_o / hI})$  で算定

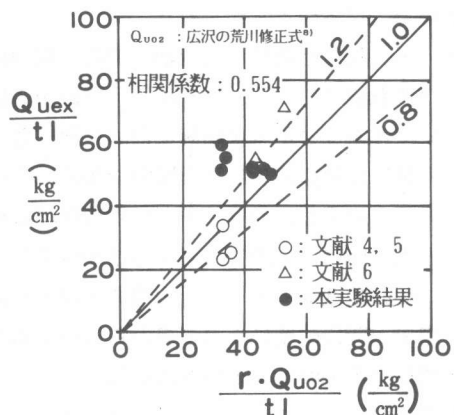
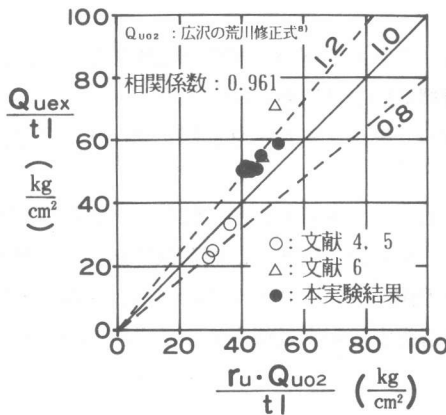
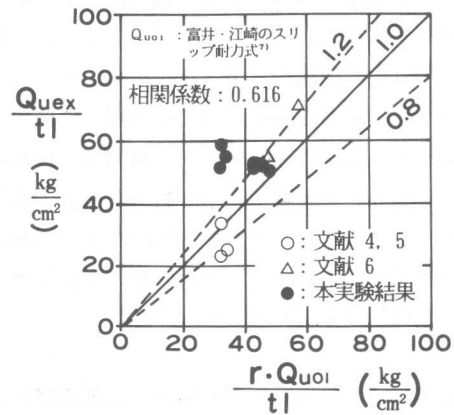
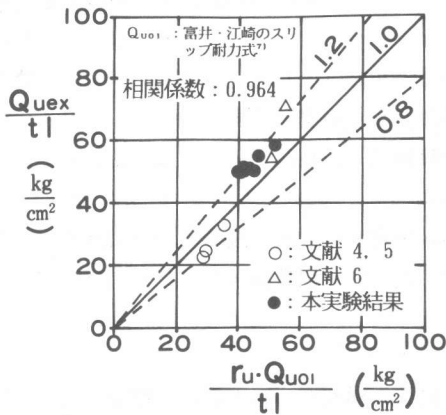


図-8 複数開口を有する耐震壁の算定値の水平耐力  $r_u \cdot Q_{u01}$  ,  $r \cdot Q_{u01}$  ,  $r_u \cdot Q_{u02}$  ,  $r \cdot Q_{u02}$  と実験値の水平耐力  $Q_{uex}$  の関係

( $r_Q$ ) 時、 $L_r u$  は負側加力 ( $LQ$ ) 時の耐力低減率とし、開口が偏在すると加力方向によつて異なることになる。既往の無開口耐震壁の水平耐力算定式と著者提案の耐力低減率  $r_u$  および RC 規準の耐力低減率  $r$  を用いて本実験と既往の実験資料<sup>4), 5), 6)</sup>の複数開口を有する耐震壁の水平耐力の検討を試みる。既往の実験資料は本実験と同じ非対称加力の資料であり、開口周比が 0.4 以下の資料である。

無開口耐震壁の水平耐力算定式としては、下記に示す式を用いた。

- 1) 富井・江崎のスリップ耐力式<sup>7)</sup>

$$Q_{u01} = (2.4 \sqrt{F_c} + 3400 P_{s, \min}) t l$$

- 2) 広沢が提案した修正荒川式<sup>8)</sup>

$$Q_{u02} = \{0.0679 \cdot P_{te}^{0.23} (180 + F_c) / \sqrt{M/QD} + 0.12 + 2.7 \sqrt{P_{se} \cdot \sigma_{sy}} + 0.1 \sigma_0\} b e j$$

無開口耐震壁の水平耐力に関する富井・江崎のスリップ耐力式による算定結果  $Q_{u01}$  と広沢が提案した修正荒川式による算定結果  $Q_{u02}$  と著者提案の耐力低減率  $r_u$  および RC 規準の耐力低減率  $r$  {本論では、 $r = \min(1 - 2l_0 / l, 1 - \sqrt{2h_0 l_0 / h l})$  で算定} を用いて求めた複数開口

を有する耐震壁の水平耐力の算定値  $r_u \cdot Q_{u01}$  ,  $r \cdot Q_{u01}$  ,  $r_u \cdot Q_{u02}$  ,  $r \cdot Q_{u02}$  と実験値の水平耐力  $Q_{uex}$  の比  $Q_{uex} / r_u \cdot Q_{u01}$  ,  $Q_{uex} / r \cdot Q_{u01}$  ,  $Q_{uex} / r_u \cdot Q_{u02}$  ,  $Q_{uex} / r \cdot Q_{u02}$  の比較を表-3に示す。表-3において、記号 (R) は正側加力、(L) は負側加力を示し、加力方向によつて圧力場を形成する面積が異なる耐震壁である。

図-8に、複数開口を有する耐震壁の水平耐力の算定値  $r_u \cdot Q_{u01}$  ,  $r \cdot Q_{u01}$  ,  $r_u \cdot Q_{u02}$  ,  $r \cdot Q_{u02}$  と実験値の水平耐力  $Q_{uex}$  の関係を示す。

表-3と図-8より、複数開口を有する耐震壁の水平耐力は、RC規準の耐力低減率  $r$  よりも著者提案の耐力低減  $r_u$  を用いた方が実験値との対応がよい (標準偏差0.316 および0.325 に対して0.146 および0.167)。

## 5. 結 び

複数開口が壁板中央部や偏在した耐震壁の試験体により繰り返し水平加力実験を行ない、ひび割れ性状や変形性状および著者提案の耐力低減率の適合性を既往の実験資料を含めて検討を行なった結果、以下のことが知れた。

- (1) 単一開口と同様、開口隅角部に斜張力によるひび割れが極めて初期に発生したが、このひび割れ幅の拡大はあまりなく、これが直接の破壊原因とはならなかった。
- (2) せん断ひび割れが明確になった後、各試験体の変形は8割から9割程がせん断変形であり、開口位置の変化による顕著な相違はない。
- (3) RC規準の耐力低減率  $r$  を複数開口に適用する場合、設計者の工学的判断により複数開口を単一開口に置換える等の方法が取られているために開口位置には無関係であるが、著者提案の耐力低減率  $r_u$  は圧力場を形成する面積を考慮していることから、同じ大きさの複数開口でも開口位置によつて異なるものである。著者提案の耐力低減率  $r_u$  は汎用性があり、実験値の水平耐力とよい対応を示した。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1988
- 2) 徳広育夫・小野正行：鉄筋コンクリート造耐震壁の開口の影響による低減率  $r$ ，日本建築学会九州支部研究報告，第27号，昭和58年3月，PP.193~196
- 3) 徳広育夫・小野正行：偏在開口を有する耐震壁の弾塑性性状に関する実験的研究，コンクリート工学協会，コンクリート工学年次論文報告，9-2，1987
- 4) 野村設郎・他：鉄筋コンクリート造耐震壁の復元力特性に関する研究，(その2) 開口を有する耐震壁の基礎的実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和57年10月，PP.1419~1420
- 5) 野村設郎・他：鉄筋コンクリート造耐震壁の復元力特性に関する研究，(その4) 開口を有する耐震壁の基礎的実験Ⅱ，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和57年10月，PP.2011~2012
- 6) 建屋の復元力特性に関する研究委員会：建屋の復元力特性に関する研究，(その13) 開口を有する耐震壁の実験，建築研究振興協会，昭和61年6月，PP.258~261
- 7) 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つ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，昭和56年9月，PP.1481~1482
- 8) 広沢雅也・他：鉄筋コンクリート造耐震壁の耐震性能に関する総合研究，(その2) 既往の実験結果に関する解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和50年10月，PP.1173~1174