高配筋耐震壁の復元力特性に及ぼす開口の影響

その1 水平加力実験

EFFECT OF OPENINGS ON THE LOAD-DEFLECTION CHARACTERISTICS
OF A HEAVILY REINFORCED CONCRETE SHEAR WALL—Part 1 : Discussion upon the empirical results of a series of heavily
reinforced concrete shear walls with openings—

佐藤和英*, 東浦 章*, 久保哲夫**, 渡部 丹***

Kazuhide SATO, Akira HIGASHIURA, Tetsuo KUBO and Makoto WATABE

We have conducted a series of empirical studies to examine effect of openings placed within a wall panel such as for penetration upon the load-deflection characteristics of a shear wall. The major purpose of the study is to examine effect of openings within a wall panel upon structural properties of a heavily reinforced concrete shear wall such as the ultimate strength, ductility capacity and load-deflection hysteresis characteristics.

Herein this paper, we discuss the experimental results obtained during a series of empirical studies. We examine in detail the effect of the size, location, shape and number of openings positioned within a wall panel on the variation of structural properties of a shear wall.

We have summarized the results obtained from a set of significant data during the experimental studies as follows :

1. Location of an opening within a wall panel will determine a possible failure mode of the shear wall. When an opening is positioned at the bottom of a wall panel, the failure mode of the wall is a sliding shear failure at the bottom of the panel. When not, the failure mode is a compressive shear failure along the diagonal direction of the wall.
2. When an opening is positioned at the bottom of a wall panel, the observed ductility capacity is inferior to that obtained in a wall with an opening in the middle height of the wall.

Based upon the empirical results, we propose an analytical formula to evaluate the shear strength of a wall having various types of openings within a wall panel, by use of which we can estimate the ultimate strength of a heavily reinforced concrete shear wall taking openings within a wall panel into consideration.

Keywords : heavily reinforced concrete, shear wall, open, shear strength, load-deflection characteristic

1. はじめに

原子炉施設構造物では、その主たる耐震要素部材として鉄筋コンクリート（以下 RC とする）造耐震壁が数多く用いられている。一般に、これらの耐震壁には、普通の RC 造構造物の建築物での耐震壁と比較すると、配筋される鉄筋の密度が高く、機器の搬入や配管の設置等の事情により大きさ、形状などが多様な開口が設けられている。これらの高配筋の耐震壁は、大きな強度が期待できることに加え、その変形能も大きいものとされる優

れた耐震部材であると考えられる。近年になり、一般の RC 造建築物においては、高層化、大規模化に伴って構造躯体の計画を明快にすることを目的として性能の優れた高配筋の耐震壁を積極的に活用しようとする動向が見られるようになってきている。これらの耐震壁についても、その計画上、開口を設けることが必要とされる。壁に設けられる開口については、壁の耐力、変形能、破壊性状に大きく影響を及ぼすものと考えられてはいるが、開口の位置、数、形状などがどのような影響を及ぼすか

本論文は、日本建築学会大会学術講演会、日本コンクリート工学年次報告会および国際原子炉構造力学会議（SMiRT）に報告したものをまとめたものである。

* 佐藤工業（株）中央技術研究所・工修

** 名古屋工業大学 助教授・工博

*** 東京都立大学 教授・工博

Sato Kogyo Co. Ltd., M. Eng.

Associate Prof. of Nagoya Inst. Technology, Dr. Eng.

Prof. of Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng.

を定量化することについてはまだ不明である。このような耐震壁は、かなり厳しい応力性状となっても弾塑性全域にわたって安定した地震応答性状を示すとともに、十分な耐力を有することが要求される。このため、高配筋耐震壁における補強筋量や軸力等についての検討だけでなく、耐力的に影響の大きい開口についても詳しく検討しておく必要があると思われる。

開口を有する RC 造耐震壁に関する研究は、数多くの研究者により報告されている。坂¹⁾および大沢²⁾は開口の位置・大きさと剛性低下率やせん断抵抗との関係について検討し、富井は一連の研究^{3)~5)}から等価開口周比による負担せん断力の低減率を提案した。徳広ら^{6),7)}は、開口の形状の違いや位置の偏りを変数に、等価開口周比に対するせん断剛性や最大耐力の低下率について検討し、その関係は圧力場を形成する面積が変化するため一義的に求められないとしている。山田らは開口の大きさと位置について実験や解析による一連の研究^{8),9)}を行い、抵抗機構をせん断抵抗要素であるコンクリートブレースと周辺フレームを考慮した曲げ抵抗要素で表現することを試みた。原子炉建屋に関連して、梅村ら^{10),11)}は、ボックス壁と I 型断面をした壁の開口の位置と形状について実験を行い、ひび割れ強度や靱性に及ぼす影響について検討している。青山ら^{12),13)}は、補強筋量の多い耐震壁の開口形状と開口周囲の補強方法について実験によって検討し、開口を有する壁の終局強度は学会の RC 構造計算規準・同解説（以下 RC 規準とする）の開口による低減率を無開口壁の強度に乗じて表せるとしている。吉崎ら^{14),15)}は、多数の小開口を持つ耐震壁において、開口の配置、寸法、間隔、壁筋比、開口間 X 補強の有無等が強度や変形性状に与える影響を実験的に調べた。その結果、曲げ補強筋のダボ効果、X 補強の効果を加え、多数の小開口を持つ壁の終局せん断強度算定式を提案している。

本論文では、これらの多くの研究成果を踏まえて、開口に関し、開口の大きさ、位置、個数、形状（長方形と円形）を構造因子とした水平加力実験により、それらの因子が耐震壁の復元力特性に及ぼす影響を明らかにする^{16)~18)}。これにより、より合理的な耐震設計を行うために、開口の影響を評価する方法を提案しようとするものである。また既往の実験結果との比較検討を容易にするために、実験時における影響因子と考えられる荷重履歴、鉛直力載荷方法、柱への梁筋の定着方法およびコンクリート強度についても実験的な検討を加える。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の基本的な形状を図-1 に示す。試験体は 1 層 1 スパンの側柱付き耐震壁で、側柱の中心間距離 (L) は

図-1 試験体の形状 (SSC-3)

表-1 試験体と各開口因子の関係

試験体名	試験体形状	開口因子				軸力 載形 荷式	荷重 履歴	梁定 筋着 方法	コン クリ ート 強度
		周比	位置	形状	個数				
SSC 1 2		●							
SSC 1 3		●	●	●	●	SSC 3 N	SSC 3 M	SSC 3 C	
SSC 1 4		●							
SSL 1 3			●						
SSE 1 3			●						
SDC 1 3			●	●	●				
RSC 1 3				●	●				RSC 3 C
RDC 1 3				●	●				
SDV 1 3			●		●				
WALL		●						WALL M	
OPEN		●							

* : この試験体については文献23参照

試験体の記号

実験的な影響因子 M : 単調漸増載荷、N : 柱集中載荷、
 C : コンクリート強度が梁主筋の定着方法
 等価開口周比の小数点以下ひとけた数値
 開口の位置 C : 中央・横並び、L : 下部、E : 下偏り、V : 縦並び
 開口の数 S : 単数、D : 複数
 開口の形 S : 長方形、R : 円形

200 cm、基礎スラブの上端から梁上端までの高さは 135 cm、側柱の中心間距離に対する加力中心までの高さ (h) の割合（シアースパン比）は 0.6 である。壁の厚さは 8 cm、柱、梁の断面はそれぞれ 30×30 cm である。

1) 試験体の種類、配筋

試験体数は合計 15 体で、構造的な影響因子である開口因子と、既往の実験との比較を目的とした実験的な影響因子について検討する。開口因子すべての組み合わせについて検討するには必要試験体数が多数になることから、ここでは基本的と考える因子のみを取り上げた。採

表-2 試験体一覧とコンクリートの材料特性

試験体名	開口				柱	梁	壁	開口補強筋			コンクリート材料特性		
	周比	位置	数	形				斜め	鉛直	水平	圧縮強度 kg/㎠	ヤング係数 10 ⁵ kg/㎠	
SSC-2	0.2	中央	1	長方形	300mm	300mm	t=80mm 縦横補 強筋共 D6	2-D10	2-D10	2-D10 2-D6	250	2.16	
SSC-3	0.3				中央下	x300mm		x300mm	2-D10	2-D10	4-D10 2-D6	254	2.04
SSC-3C						主筋		主筋				273	1.84
SSC-3M						4-D16		上下共				245	1.75
SSC-3N						2-D10		4-D22				259	1.68
SSL-3						pg=1.04%		pt=1.98%				252	2.04
SSE-3	下隅					250		2.10					
SSC-4	0.4	中央	2	円形	フープ筋	スター	φ67	2-D10	4-D10	6-D10	248	2.08	
SDC-3	0.28				D10 φ67	ラップ筋	ダブル	2-D10	2-D10	6-D10	257	1.98	
SDV-3					pw=0.71%	D13 φ50	ps=	2-D10	4-D10	2-D10	265	1.67	
RSC-3	0.3				1	pw=1.69%	1.20%	3-D10	2-D10	4-D10	285	1.77	
RSC-3C								2-D6		374	2.31		
RDC-3								2-D10	2-D10	4-D10 4-D6	346	2.23	
WALL-M	0.0	---	-	---				--	--	--	235	1.75	
OPEN	1.0	---	-	---	---	---	---	--	--	--	342	2.13

図-2 配筋状況 (SDV-3)

用した開口因子は、開口の大きさ、個数、位置および形状の4つで、各因子の変数は、開口の大きさが等価開口周比で0.2, 0.3, 0.4の4つ（壁のない架構を参考に加え、この場合の等価開口周比は1.0とした。）、個数では単数と複数の2通り、位置の偏りでは中央、下、下隅の3通り、および形状では長方形と円形の2通りである。また実験的な影響因子としては荷重履歴、鉛直力荷重方法およびコンクリート強度の3つを取り、荷重履歴では繰返しと単調漸増加力について、鉛直力荷重方法が梁等分布と柱集中荷重について、およびコンクリート強度が実験時の目標強度 (F_c) で240 kg/cm²と360 kg/cm²を採り挙げた。さらに、梁主筋の定着を柱内へ折曲げてとった場合、この定着長さが開口高さ位置に達することから、定着方法について柱内に折曲げて定着する方法と、柱梁接合部内でU字型に折曲げて定着する方法とを検討する。各影響因子の組み合わせを表-1に示す。

試験体の壁のせん断補強筋比 (P_s) は縦横筋共1.2%とし、開口周囲の補強はRC規準に準じて行った。耐震壁の側柱の主筋比 (P_g) は1.04%, 帯筋 (P_w) は0.71%, 梁の主筋比 (P_l) は1.98%, あばら筋 (P_w) は1.69

表-3 鉄筋の力学的特性

試験体名	呼び名	降伏点 kg/cm ²	引張強さ kg/cm ²	ヤング係数 ×10 ⁵ kg/cm ²
SSC-2, SSC-3	D-6	4066	5357	2.00
SSC-4, SSE-3	D-10	4033	5468	1.88
SDC-3, SSL-3	D-13	4191	6113	1.97
RDC-3, RSC-3	D-16	3877	5937	2.29
OPEN	D-22	3974	5966	2.10
WALL-M	D-6	4152	5421	1.97
SSC-3C	D-10	3967	5811	2.10
SSC-3M	D-13	4233	5958	2.15
SSC-3N	D-16	4423	5985	2.20
SDV-3	D-22	4514	6232	2.09
RSC-3C				

%である。配筋の一例を図-2に、因子の組み合わせによる試験体の一覧を表-2に示す。

2) コンクリートと鉄筋の力学的性質

コンクリートは、実験時の目標強度で240 kg/cm²および360 kg/cm²となるように打設時期に応じて調合設計した、最大粒径10 mm以下の豆砂利コンクリートである。鋼製型枠を用いてコンクリートを縦打ちし、打ち継ぎのないように連続打設した。壁のせん断補強筋にはSD 35相当のD6を、開口周囲の補強筋、柱と梁の主筋およびそのせん断補強筋にはSD 35のD10, D13, D16およびD22を用いた。使用材料の試験結果を表-2, 3に示す。

2.2 実験方法

1) 加力方法

加力装置の概要を図-3に示す。試験体へ加える水平力は、反力壁と反力フレームにそれぞれ設置した2台のサーボ型アクチュエータを用い、加力用鉄骨梁を介して耐震壁上部の梁に等分に荷重されるようにした。鉛直力は、試験体の水平変形に追従して移動する機構を有している鉛直力荷重用フレームに取付けられているサーボ型アクチュエータによって加えられ、実験中は一定軸力を

図-3 加力装置概要

保持するように制御され、すべての試験体共通に 63.2 ton 加えた（この値を試験体の全断面積で除した応力度は、 20 kg/cm^2 となる）。試験体名 SSC-3M および WALL-M を除き、荷重履歴は漸増変位の正負繰返し加力とした。実験に用いた水平加力スケジュールを表-4 に示す。加力は、梁の加力点高さの水平変位 (δ) を用いた部材角 ($R = \delta/h$) で制御した。

2) 計測および観察方法

試験体に加力した水平力および鉛直力の測定には、アクチュエータ先端に設けられたロードセルを用いた。試験体各部の変位および鉄筋とコンクリートのひずみの計測位置を図-4 に示す。試験体各部の変位の計測には電気式変位計を用いた。壁のコンクリート面、側柱主筋および壁のせん断補強のひずみは、ワイヤーストレイン

表-4 水平加力スケジュール

サイクル		*1	*2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
R ($\times 10^{-3}$)		0.25	0.5	1.0		2.0		1.0		4.0			2.0	
14	15	16	17	*）それ以下でひび割れが生じた場合は ひび割れ発生部材角としてよい。										
6.0	8.0	10.0	** 最終	**）正側に単調漸増荷重し、水平荷重が 最大耐力の 1/2 の時。										

ゲージ (WSG) を図に示した位置に貼付して検出した。ひび割れの進展状況とひび割れ幅の観察は、加力サイクルの正負変位ピークと荷重 0 の時に行った。加力制御と各測定値の収録は、コンピュータ・オンライン・システムを用いて自動的に行った。

図-4 ひずみと変位の計測位置

表-5 諸荷重一覧

	SSC-2	SSC-3	SSC-3C	SSC-3M	SSC-3N	SSL-3	SSE-3	SSC-4	SDC-3	SDV-3	RSC-3	RSC-3C	RDC-3	WALL-M	OPEN
初期剛性 (ton/cm)	863	519	580	627	622	732	713	469	662	581	591	788	695	911	159
壁せん断初ひび割れ 荷重 (ton)	41.9	27.2	26.4	24.0	12.1	32.5	26.9	25.2	31.5	33.1	30.0	30.0	30.1	24.0	—
柱主筋降伏荷重 (ton)	98.9	97.3	89.7	102.2	87.1	100.3	94.3	63.4	—	93.8	92.1	78.0	74.7	103.6	29.2
壁板のコンクリート 圧壊荷重 (ton)	107.8	105.7	99.6	102.4	100.7	119.6	108.0	76.6	86.8	110.5	103.7	118.3	94.3	44.2	—
最大耐力 (ton)	109.2	105.7	106.6	112.0	103.8	119.6	108.0 *1	86.5	87.0	113.1	111.3	118.3	94.8	149.8	41.1

*1 : 正側荷重 *2 : 負側荷重 *3 : 柱主筋は実験終了まで降伏しなかった。 *4 : 柱・梁で構成される線材として算出

図—5 最終のひび割れ状態

図—6(a) 荷重-変形関係の包絡線の比較

図—6(b) 荷重-変形関係の包絡線の比較

(A) SSC-3, SSC-3M

(B) WALL-M, WALL

図—7 平均せん断応力度/ $\sqrt{\sigma_B}$ と変形の関係

口隅角部からのひび割れの進展は顕著ではなかった。試験体名 SSC-3N は、SSC-3 よりひび割れ本数はやや多く、その幅は平均すると小さいことが認められたが、最大耐力や変形性状に大きな違いは認められなかった。

コンクリート強度が異なっても (RSC-3, RSC-3C; C は Concrete Strength $F_c = 360 \text{ kg/cm}^2$)、最大耐力時の部材角には差はなく、コンクリート強度は変形能に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

梁主筋の定着方法の差異がひび割れ発生状況や破壊モードに及ぼす影響は認められなかった。

3.2 水平荷重と変形の関係

各試験体の水平荷重と変形の関係から得られた包絡線を、本研究でとった4つの影響因子について比較した例を図—6に示す。開口が大きくなると初期剛性および最大耐力は小さくなる傾向が認められる。開口の位置の違いによる最大耐力時の変形の差は少ないが、位置が偏ると最大耐力後の耐力低下が著しい。開口の形状が異なっても最大耐力時の変形および最大耐力に達した後の耐力低下は認められない。単数開口で最大耐力時の変形は、 $R = 6.0 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ で、複数開口で横配置のものは約

3. 実験結果

3.1 破壊経過

実験結果一覧を表—5に、実験終了時の試験体 (SSC-2, SSC-3, SDC-3, SSE-3) のひび割れ状況を図—5に示す。ひび割れの発生順と発生箇所はおおむね、①部材角 ($R = 0.25 \sim 0.51 \times 10^{-3} \text{ rad.}$) で壁板にせん断ひび割れ発生、② $R = 1.0 \sim 2.0 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ で側柱に曲げひび割れ発生、③最大耐力は、SSL-3とSSE-3が $R = 5.95 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ でせん断圧縮滑り破壊、④他の試験体は $R = 4.00 \sim 10.32 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ でせん断圧縮破壊となった。

鉛直力を柱集中载荷とした SSC-3N を除き、せん断初ひび割れは開口隅角部からやや離れた位置に発生し開

図-8 鉄筋のひずみ分布 (SSC-3)

図-9 最大耐力と等価開口周比

4.0×10^{-3} rad. であった。また、複数開口で縦配置のものは、横配置のものより最大耐力時の変形が約 1.7 倍大きかった。

荷重履歴の違いを比較したものを図-7 に示す。縦軸には、全試験体共通に水平荷重を壁水平断面積（柱芯間距離 $L \times$ 壁厚 t ）で除して求められる平均せん断応力度 τ をコンクリートの圧縮強度 σ_b (kg/cm²) の平方根で除した値を、横軸には変形を示す。無開口、開口の試験体とも、繰返し加力、単調加力の荷重履歴によらず最大耐力に至るまでほぼ等しい包絡線を示し、最大耐力以降では、繰返し加力による試験体の方の耐力低下が著しい。 $\tau/\sqrt{\sigma_b}$ の最大値は、単調漸増載荷の方が 7 % 程度大きい。

3.3 鉄筋のひずみ

鉄筋に貼付された WSG によって計測されたひずみ分布の例を図-8 に示す。この図から、壁の開口横の縦筋のひずみは、他の部分より大きくなる傾向が認められる。複数開口で横配置の SDC-3 と開口が最も大きい SSC-4 を除き、最大耐力に達する前に引張り側柱主筋

図-10 最大耐力の実験値と計算値の比較

が降伏し、それ以後の変位を増加した繰返しで壁筋および開口補強筋が降伏した。すべての試験体において、壁の横筋は最大耐力に達するとほぼ同時に降伏した。複数開口で縦配置の SDC-3 V では、開口間の横筋のひずみは最大耐力に至るまで 50μ 以下であり、他の部位に比べて小さかった。

3.4 開口因子と最大せん断耐力

各試験体の最大せん断応力度を比較したものを図-9 に示す。縦軸には最大せん断応力度 τ_u を σ_b の平方根で除した値を、横軸には等価開口周比を示す。この図から分かるように、応力度を算出する際の断面積は全試験体共通にとられており、最大せん断耐力は開口が大きくなると比例的に小さくなる。中央部開口で単数の場合より、開口が同じ大きさでも下部に偏った場合の最大せん断耐力は 15~20 % 大きく、開口が複数の場合は約 15 % 小さい。

各試験体の最大せん断力と既往の計算式¹⁹⁾によって算出された値とを比較したものを図-10 に示す。縦軸には実験による最大耐力を、横軸には計算値を示す。開口による低減率は学会の RC 規準に準じ、複数開口の場合の低減率は 2 つの開口面積の和から求めた。単数で中央部開口の場合は、どの試験体も実験値は計算値を中心に ± 20 % の範囲にばらついた。開口が下部に偏った場合は実験値が計算値に対して 22~27 % の差があり、横に並んだ複数開口の場合ではその差は 11~12 % であった。

4. 開口因子を考慮した最大せん断耐力の推定式

前章の結果から、等価開口周比のみによって表される最大せん断耐力に関する低減率は、開口の位置や数の違いによる影響を評価しているとはいえない。そこで、本章では開口の大きさに加えて、開口の位置や数の影響を

図—11(a) 壁板コンクリートのひずみ分布 (SSC-3)

図—11(b) 壁板コンクリートのひずみ分布 (SSC-2)

図—11(c) 壁板コンクリートのひずみ分布 (SSE-3)

図—11(d) 壁板コンクリートのひずみ分布 (SDV-3)

適切に考慮できるような最大せん断耐力の推定方法について述べる。

4.1 最大せん断耐力の推定式の基本的な表現

本研究では、軸力を負担する高配筋耐震壁を対象としていることを考慮して、基本的な表現として採用する最大せん断耐力の推定式は、耐力決定の主因子であると考えられる補強筋量、シャースパン比、鉄筋強度、コンクリート強度、および軸力の影響に関して考慮されていることが必要となる。そこで本研究で提案する推定式は、高配筋耐震壁を対象とした千葉らの研究²⁰⁾によって上記の因子を考慮して提案されている以下の計算式の表現を適用する。式中の τ_c は耐震壁の形状やコンクリート強

図—12 L' の算定方法 図—13 τ_c と有効シャースパン比の関係

度を, τ_s は補強筋の効果を, τ_0 は軸力の影響を表している。

$$Q_u = (\tau_c + \tau_s + \tau_0) t \cdot L \quad (1)$$

$$\tau_c = 2.7 \sqrt{\sigma_B} (1.9 - 1.5 M/QL) \quad (2)$$

$$\tau_s = P_w \cdot s \sigma_y / 2 \quad (3)$$

$$\tau_0 = \sigma_0 \quad (4)$$

ここで、

Q_u : 最大せん断耐力

t : 壁厚さ

L : 柱芯間距離

σ_B : コンクリートの圧縮強度

P_w : 壁補強筋量

M/QL : シャースパン比

$s \sigma_y$: 補強鉄筋降伏強度

σ_0 : 軸応力度

なお、式の適用範囲は次のとおりである。

$$0.4 \leq M/QL \leq 0.8, \quad 0 \leq \sigma_0 \leq 40 \text{ (kg/cm}^2\text{)},$$

$$P_w \cdot s \sigma_y \leq 6.0 \sqrt{\sigma_B}$$

4.2 開口因子と最大せん断耐力の推定式

ひび割れ発生状況や図—11 に示す壁板のひずみ分布から、開口因子の違いによって壁板の各部分に作用している力の流れに大きな差があることが認められる。このような実験結果をふまえて、壁板の中で最大耐力に寄与すると考えられる部分を、図—12 に示すハッチ部のように仮定する。このハッチ部の面積の和から、同右図で示したように有効スパン L' を算出した。この有効スパン

図一七 等価粘性減衰定数

図一八 スリップ剛性率

0.25~0.35×10⁻³ rad. 程度であった。この値は既往の耐震壁に関する研究で示された値とほぼ一致する。

2) 最大せん断耐力点

最大せん断耐力時の強度を $\sqrt{\sigma_B}$ で除した値とせん断変形の関係を図一16に示す。各試験体ともせん断破壊をしており、その時のせん断変形は部材角で3.5~5.0×10⁻³ rad. であった。

以上のことから、開口因子のうち、開口の大きさや位置の違いが、初ひび割れ点の変形や最大せん断耐力点の変形に及ぼす影響は少ないと判断される。

5.2 履歴ループ

1) 等価粘性減衰定数(h_e)

制御変位点ごとに第3サイクル目の等価粘性減衰定数(h_e)とせん断変形部材角との関係を図一17に示す。図中には、せん断変形部材角6.0×10⁻³ rad. で分けられる2本の直線で近似した場合の相関係数 r を併せて示した。図から明らかなように、全試験体とも共通して最大耐力以前と以後では異なる傾向を示した。最大耐力以

後では、壁のない試験体 (OPEN) と似た傾向を示し、壁の破壊に伴い周辺フレームの影響が大きくなることが分かる。最大耐力以前では、無開口耐震壁と同程度の値となり開口の影響は少ない。

2) スリップ剛性率(K_s)

制御変位点ごとに第3サイクル目のスリップ剛性率(K_s)とせん断変形部材角との関係を、図一17にならいう図一18に示す。各試験体とも、 K_s は変形の増大に伴い直線的に減少し、部材角がおおよそ6×10⁻³ rad. 以後は増減は少なくなる傾向を示した。

6. まとめ

開口を有する高配筋耐震壁に関し、開口の大きさ、位置、個数、および形状の開口に関する4つの構造的因子と、試験体加力の荷重履歴、鉛直載荷方法、梁主筋の定着方法およびコンクリート強度の実験的な事象に関する4つの影響因子の計8つの因子について実験的な検討を加えた。その結果をとりまとめると、得られた結論として次の3点が挙げられる。

1) 開口を有する高配筋耐震壁の最大せん断耐力は、壁板の耐力に寄与する領域から有効スパン(L)を求め、これを既往の提案式に対応するように整理した式を用いることにより、精度良く算出することができる。

2) 実験的な影響因子である荷重履歴、鉛直載荷方法、および梁主筋の定着方法の3つは、最大耐力に至るまで弾塑性挙動に大きな影響を及ぼしていないことが認められた。コンクリート強度の違いは、最大耐力を $\sqrt{\sigma_B}$ で基準化することによりその違いが考慮できることが認められる。

3) せん断変形による等価粘性減衰定数およびスリップ剛性率は、変形部材角を変数とする直線式でおおむね表現できる。

謝 辞

本研究は、(社)建築研究振興協会の『建屋の復元力特性に関する研究委員会』により、佐藤工業(株)、フジタ工業(株)、戸田建設(株)、西松建設(株)、(株)熊谷組、(株)間組の共同研究として行われた。

本研究を実施するにあたり、終始貴重なご指導、ご助言を頂きました建設省建築研究所 山内泰之氏および戸田建設(株)千葉 脩氏に、ここに記して深甚の謝意を表します。また、実験の実施ならびに実験データのまとめに協力を得た佐藤工業(株)高田誠一氏および同社中央技術研究所の諸氏に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 坂 静雄：矩形耐震壁の横力負担と開口の影響，日本建築学会論文報告集，第30号，pp.149-154，昭和18年9月

- 2) 大沢 胖：ゴム実験による高層開口耐震壁の剛性に関する研究(計算値との比較検討), 日本建築学会論文報告集, 第 54 号, pp.281-284, 昭和 31 年 9 月
- 3) 富井政英, 富田 滋：有開口耐震壁のせん断実験概要(有開口耐震壁のせん断抵抗に関する研究・第 1 報), 日本建築学会論文報告集, 第 66 号, pp.301-304, 昭和 35 年 10 月
- 4) 富井政英, 富田 滋：有開口耐震壁の負担せん断とせん断変形の関係(有開口耐震壁のせん断抵抗に関する研究・第 2 報), 日本建築学会論文報告集, 第 66 号, pp.305-308, 昭和 35 年 10 月
- 5) 富井政英, 富田 滋：耐震壁の開口の影響による負担せん断の低減率(有開口耐震壁のせん断抵抗に関する研究・第 3 報), 日本建築学会論文報告集, 第 67 号, pp.23-27, 昭和 36 年 2 月
- 6) 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 , 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2061-2062, 昭和 58 年 9 月
- 7) 徳広育夫, 小野正行：壁厚の異なる有開口耐震壁の実験的研究(その 2. 終局耐力と変形性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.205-206, 昭和 60 年 10 月
- 8) 山田 稔, ほか 2 名：縦開口鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性変形性状に関する研究(Ⅳ漸増変位振幅交番繰返し載荷-縦開口：幅開口比 1/4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1665-1666, 昭和 53 年 9 月
- 9) 山田 稔, ほか 2 名：偏在開口コンクリート耐震壁の弾塑性交番繰返し変形性状に関する研究(Ⅴ漸増変位振幅交番繰返し載荷-側中部開口 1/9, 隅開口 1/12), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1473-1474, 昭和 57 年 10 月
- 10) 梅村 魁, ほか 4 名：鉄筋コンクリート立体耐震壁の耐力と復元力特性に関する実験(その 7：有開口 I 型断面壁の実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1621-1622, 昭和 53 年 9 月
- 11) 梅村 魁, ほか 4 名：鉄筋コンクリート立体耐震壁の耐力と復元力特性に関する実験(その 8：有開口 I 型断面壁の破壊性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1623-1624, 昭和 53 年 9 月
- 12) 青山博之, ほか 2 名：鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の開口補強方法に関する実験的研究(その 9：補強方法及び壁配筋法の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1629-1630, 昭和 56 年 9 月
- 13) 青山博之, 細川洋治：鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の開口補強方法に関する実験的研究(その 10：実験結果の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1631-1632, 昭和 56 年 9 月
- 14) 吉崎征二, ほか 3 名：多数の小開口を持つ鉄筋コンクリート耐震壁の強度と変形(その 1：開口の配置と寸法の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1645-1646, 昭和 55 年 9 月
- 15) 吉崎征二, ほか 3 名：多数の小開口を持つ鉄筋コンクリート耐震壁の強度と変形(その 2：開口の配置と寸法の影響Ⅱ), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1623-1624, 昭和 56 年 9 月
- 16) 高田誠一, ほか 4 名：建屋の復元力特性に関する研究, その 23：開口を有する高配筋耐震壁に関する実験(実験概要と結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2379-2380, 昭和 59 年 10 月
- 17) 佐藤和英, ほか 3 名：有開口高配筋耐震壁のせん断終局強度に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, pp.367-372, 1988 年 10 月
- 18) K. Sato et al. : Load-deflections of shear walls with opening, Trans. 9th Structural Mechanics in Reactor Technology, HK 10/4 pp.537-542, 1987 年 8 月
- 19) 広沢雅也：既存の鉄筋コンクリート造耐震壁に関する実験資料とその解析, 建設省建築研究所, 建築研究資料, 第 6 号, 昭和 51 年 3 月
- 20) 千葉 脩, ほか 3 名：建屋の復元力特性に関する研究, その 73：高配筋耐震壁の復元力特性(最大せん断力), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.317-318, 昭和 62 年 10 月
- 21) 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, (社) 建築研究振興協会, p.259, 昭和 61 年 6 月
- 22) 谷 資信, ほか 3 名：鉄筋コンクリート耐震要素の復元力特性(その 1) 復元力特性とそのモデル化について, 日本建築学会論文報告集, 第 202 号, pp.11-19, 昭和 47 年 12 月
- 23) 千葉 脩, ほか 5 名：建屋の復元力特性に関する研究, その 8：高配筋耐震壁に関する実験(実験概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1509-1510, 昭和 58 年 9 月

(1990 年 2 月 10 日原稿受理, 1990 年 9 月 25 日採用決定)