

[181] 間柱付耐震壁の力学的挙動に関する実験的研究

正会員 狩野 芳一 (明治大学 工学部)
 正会員 〇田 中 清 (フジタ工業技術研究所)
 正会員 藤原 敏夫 (フジタ工業技術研究所)

1. まえがき

我国に数多く存在する中低層鉄筋コンクリート造建物には、所謂せん断壁(せん断破壊する耐震壁)と呼ばれる耐震壁が散在している。この種の耐震壁の長所は強度・剛性が高いことであり、欠点は変形性能に乏しく破壊が急激なことである。従って、この種の耐震壁は強度依存型の耐震設計においてのみ用いられて来ている。

筆者等は、既に耐震壁の板内にせん断強度が異なる領域を設けて、せん断強度が小なる領域を先行破壊域とすることにより、上記せん断壁の破壊モードをじん性に富むものに改善し、変形を考慮した設計においても用いられ得るせん断壁の研究を行って来ている。その一環として本研究では、耐震壁の水平断面を変断面にし、間柱状の断面と配筋が施こされた部分と間柱部の断面厚よりも相対的に薄い壁板部とから成る耐震壁を製作し、薄壁部への応力及び破壊の集中度合を実験的に検討した。その結果、良好な破壊・変形状が得られたのでここに報告する。

2. 実験概要

実験に先立ち、間柱のせん断スパン比が1.5で薄壁幅と間柱幅が等しいモデルについて、予備解析と予備実験を行った結果、薄壁と間柱との板厚比(t_w/B_{wc})が1/3以下(壁板が相対的にかなり薄い)の場合には、薄壁に顕著な応力及び破壊集中を生じることが判った。

本実験ではこの結果を踏まえて、 t_w/B_{wc} が1/3のものと同壁をより厚くしたもの($t_w/B_{wc} = 1/2, 2/3$)について、間柱付耐震壁の力学的挙動を比較・検討した。

2.1 試験体

試験体数は4体で、縮尺は約1/4とした。試験体の形状寸法及び配筋状況の一例を図-1に示し、各試験体の諸元を表-1に示す。試験体名にAのみを付したものは、薄壁厚が20, 30, 40 mmと異なるだけでその他の諸元は等しくした。また、間柱とそで壁には、せん断補強効果を高めるために縦(主)筋と帯筋との交点に幅止め筋を配筋した。そで壁付柱としたのは、柱の拘束効果を高めることを意図したものである。また、62AB試験体には、上記幅止め筋の効果を検討するため、幅止め筋を配筋していない。使用した鉄筋及びコンクリートの素材試験結果を表-2に示す。

2.2 加力方法

図-2に加力装置を示し、図-3に加力プログラムを示す。加力は曲げせん断加力とし、柱に $\sigma_{c0} = 30 \text{ kgf/cm}^2$

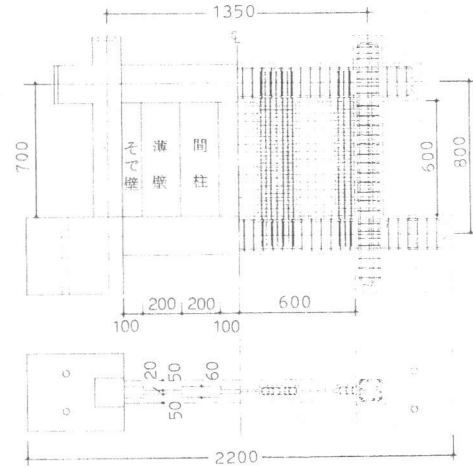


図-1 試験体の形状寸法及び配筋状況 (WNT-62 試験体)

表-1 試験体の諸元

試験体	柱	はり	間柱	薄壁	そで壁	t_w/B_{wc}
WNT-62A	$B_c \times D_c$ 15×15cm	$b_b \times D_b$ 12×20cm	$B_{wc} \times D_{wc}$ 6×20cm	t_w 2.0cm ($p=1.0\%$)	$B_{sw} \times D_{sw}$ 6×10cm	1/3
WNT-63A	主筋 8-D10	主筋 4-D10	主筋 14-4φ(1.47%) 帯筋 □-3.2φ@40 (0.67%)	3.0cm (0.67%) 3.2φ	主筋 6-4φ(126%) 帯筋 □-3.2φ@40 (0.67%)	1/2
WNT-64A	$p_c=2.53\%$ □-D6@50	(1.19%) □-D6@50	幅止め筋* □-3.2φ@40	4.0cm (0.5%)	幅止め筋* □-3.2φ@40	2/3
WNT-62AB	$p_c=0.85\%$ (1.07%)	(1.07%) □-3.2φ@40	* WNT-62ABは無	2.0cm (1.0%)	□-3.2φ@40	1/3

表-2 使用した材料の素材試験結果 (鉄筋)

鉄筋	降伏点 σ_y	引張強さ σ_B	ヤング係数 E_s	伸び (%)	適用	(コンクリート)**		
						圧縮強度 (試験時) f_c	引張強さ f_t	ヤング係数 (%) E_c
3.2φ	3.29*	4.79	2100	38.6	横筋、幅止め筋	211	19	159
3.2φ	7.22*	7.64	2108	12.4	間柱帯筋			
4.0φ	6.47*	7.09	2100	12.8	間柱・そで壁主筋			
D 6	3.72*	5.24	1721	25.1	柱帯筋、はり助筋			
D 10	3.66	5.96	1751	25.5	柱・はり主筋			

* 0.2% offset 時の力
 ** 最大粒径 10mm の豆砂利を使用

の一定軸力を与えて後に、頂部はり芯位置に水平せん断力を正負交番繰返し载荷した。

3. 実験結果及び考察

3.1 ひびわれ及び破壊状況

各試験体共に先ず薄壁に斜めひびわれが生じ、その時の水平変位量 R は $0.35 \sim 0.45 \times 10^{-3}$ rad. であった。その後、間柱、周辺フレームの曲げひびわれ→間柱の斜めひびわれの順でひびわれが発生した。最大荷重時には、各試験体共に全薄壁部に縦方向のスリップ状せん断破壊を生じた。その時の水平変位量は、 t_w/B_{wc} が大きいもの程多くなる傾向を有していた。この薄壁部のせん断破壊により、各試験体は共に耐力低下を生じるが、周辺フレーム・間柱及び薄壁の残存部が一体となったラーメン型の抵抗機構に移行するため、従来のせん断壁の様に急激な耐力低下は生じず、所定の耐力を維持しながら順次崩壊機構を形成して行った。

最終的には、 $R = 40 \times 10^{-3}$ rad. の水平変位量に達した時点で加力を中断したが、各試験体は共に薄壁部を除き顕著な損傷を受けてはいなかった。

写真-1には、各試験体の $R = 20 \times 10^{-3}$ rad. 時のひびわれ状況を示す。

3.2 耐力性状

正負加力時の主要な耐力の実験値を、その時の水平変位量及び計算値と共に、表-3に示す。

(薄壁の斜めひびわれ耐力)

初等はり理論より求めた薄壁の平均せん断応力度が $0.1 f_c$ に達する時のせん断力を計算値としたが、実験値との対応は非常に良い結果となった。

図-4には、実験値と計算値との関係を示す。

(最大耐力：第1次抵抗機構の耐力)

最大荷重時までとそれ以降の耐力低下域を含めて、第1次抵抗機構と呼ぶことにする。その機構は複雑で現時点では適切な耐力算定式を提案出来ない。そこで、本耐震壁に広沢式²⁾(修正大野・荒川式)を適用してみた。

その結果を図-5に示すが、

64A以外は $\pm 20\%$ の誤差範囲に実験値が入っている。

(維持耐力：第2次抵抗機構の耐力)

耐力低下以降のラーメン型の抵抗機構を第2次抵抗機構と呼ぶことにするが、その耐力は薄壁を無視して求めた崩壊機構の耐力(図-7b)よりも、薄壁の残存強度

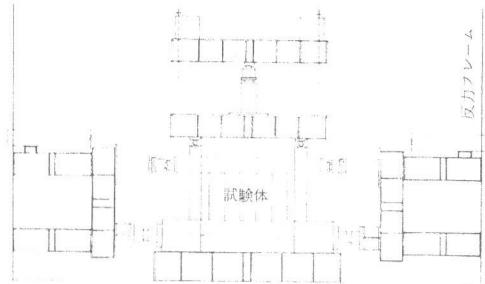


図-2 加力装置

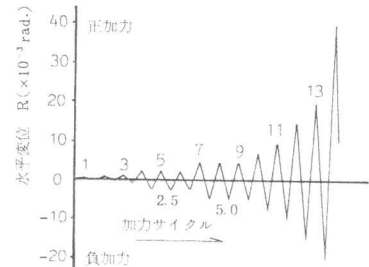


図-3 加力プログラム

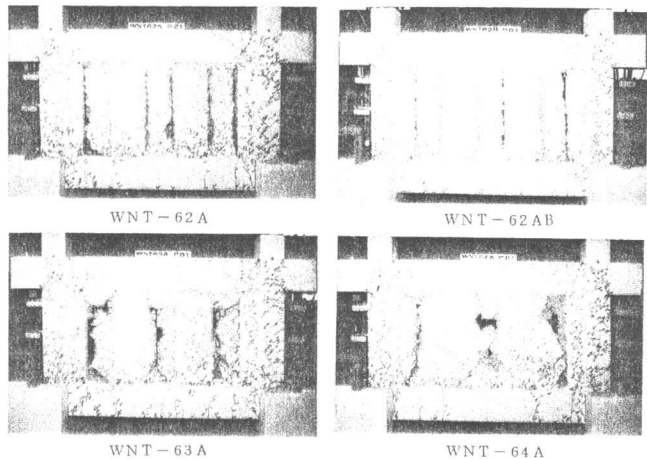


写真-1 ひびわれ状況 ($R = 20 \times 10^{-3}$ rad. 時)

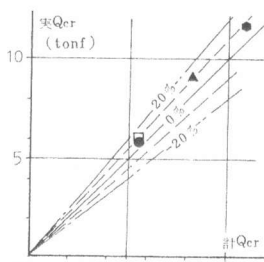


図-4 薄壁の斜めひびわれ耐力

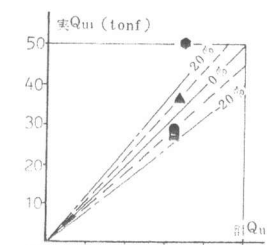


図-5 第1次抵抗機構の耐力

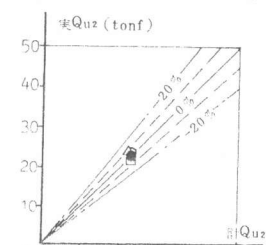


図-6 第2次抵抗機構の耐力

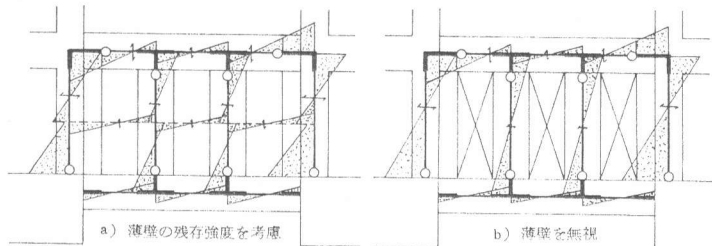


図-7 第2次抵抗機構の崩壊機構

を横筋のせん断強度とし、これが周辺フレームに曲げ戻し作用をすとした崩壊機構の耐力(図-7 a))とよく一致した。

3.3 荷重-変位関係

図-8には、水平せん断力と水平変位との関係の一例(WNT-62 A)を示す。

図-9には、その包絡線の比較を示す。

各試験体共に、剛性・強度が高くかつ耐力低下域を含む第1包絡線と、耐力を維持しながら変位が増加する第2包絡線より成っている。

t_w/B_{wc} が大きくなると、第1包絡線の剛性・強度も高くなりかつ耐力低下域の勾配も急になって来る。しかし、各試験体共配筋量が等しくかつ薄壁の破壊で同様の第2次抵抗機構が形成されたため、その第2包絡線はほぼ等しくなっている。

(初期剛性及び剛性低下率)

初期剛性は、初等はり理論を用いて求めた。表-4に実験値と計算値を示すが、両者は比較的良く一致した。

次に、この初期剛性計算値を用いて求めた、ひびわれ以降の水平変位の割線剛性低下率と水平変位との関係を示したのが図-10である。各試験体ともほぼ等しい低下率となっている。

(等価粘性減衰定数と吸収エネルギー)

図-11と12に、各ループの等価粘性減衰定数 h_e 及び履歴面積(吸収エネルギー、 E_D)と水平変位の関係を示す。

両者の履歴は t_w/B_{wc} の影響により若干異なるが、

$R = 40 \times 10^{-3}$ rad.の大変形時には、各値とも大きく増加している。

3.4 変形モード及び壁面積膨張率

周辺フレームの変形モードの一例(WNT-62 A)を図-13に示す。変形の増大に伴って全体がラーメン型の変形モードに移行すると共に、鉛直方向への膨らみも大きくなって来る。次に、同図の変位量を積分して得られる壁面積膨張率(c_{pw})と水平変位との関係を示したのが図-14である。

周辺フレームの剛性・強度が同一であるため、 t_w/B_{wc} が大きき最大耐力が大きい程、この面積膨張率は大きくなりかつ変位の増加に伴い増加し続ける傾向を示す。

周辺フレームの剛性・強度が同一であるため、 t_w/B_{wc} が大きき最大耐力が大きい程、この面積膨張率は大きくなりかつ変位の増加に伴い増加し続ける傾向を示す。

表-3 各種耐力の実験値と計算値との比較 (*1) tonf, (*2) $\times 10^{-3}$ rad.

試験体	薄壁の斜めひび割れ耐力		最大耐力(第1次抵抗機構)				維持耐力(第2次抵抗機構)								
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値			計算値					
							①	②	③	①	②	③			
WNT-62A	+	5.81	0.443	5.49	1.06	28.36	5.00	32.12	0.883	22.38	40.0	22.68	17.36	0.987	1.289
	-	6.00	0.314		1.09	29.34	5.00		0.913	—	—				
WNT-63A	+	9.06	0.479	8.18	1.11	36.51	7.06	33.53	1.089	23.08	40.0			1.018	1.329
	-	8.04	0.293			0.98	35.45	4.98		1.057	—	—			
WNT-64A	+	11.16	0.611	10.87	1.07	49.74	8.92	34.92	1.424	24.04	40.0			1.060	1.385
	-	12.09	0.351			1.11	51.40	7.46		1.472	—	—			
WNT-62AB	+	6.08	0.371	5.49	1.11	27.18	5.05	32.12	0.846	21.75	40.0			0.959	1.253
	-	6.09	0.443		1.11	27.74	4.98		0.864	—	—				

$$*3) Q_{ui} = \left(\frac{0.0679 \cdot P_{tc}^{0.23} (1.80 + f_c)}{\sqrt{M/QD + 0.12}} + 2.7 \sqrt{P_{wh} \cdot \sigma_{why}} + 0.1 \sigma_{pe} \right) b_e \cdot j$$

$$b_e = A_n / D; A_n: \text{全断面積}, D: \text{全せい}, P_{wh} = P_{sh} \times \frac{t_w}{b_e}$$

P_{sh} : 薄壁の横筋比, その他の記号は文献2)に準ずる。

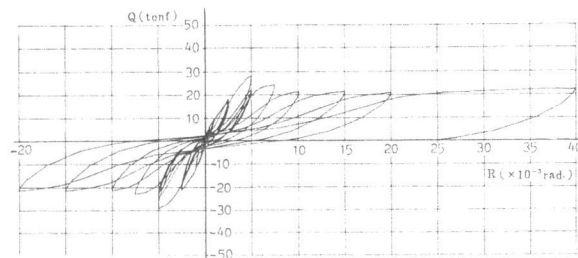


図-8 荷重-変位関係(WNT-62 A)

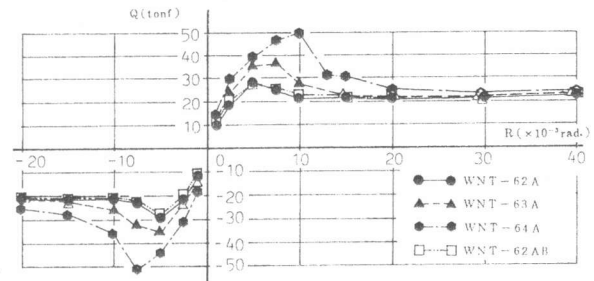


図-9 荷重-変位包絡線の比較

表-4 初期剛性

試験体	実験値 K_I (tf/cm)	計算値 $cal K_I$ (tf/cm)	$K_I / cal K_I$
WNT-62 A	323.9	360.3	0.899
WNT-63 A	415.4	468.9	0.886
WNT-64 A	580.0	542.6	1.069
WNT-62AB	319.6	360.3	0.887

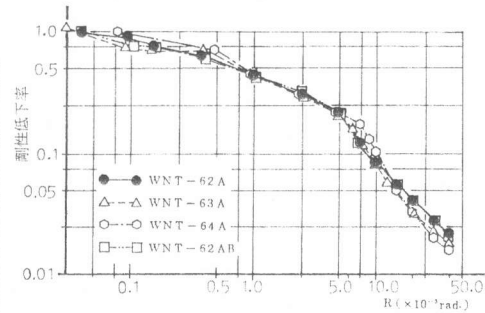


図-10 剛性低下率

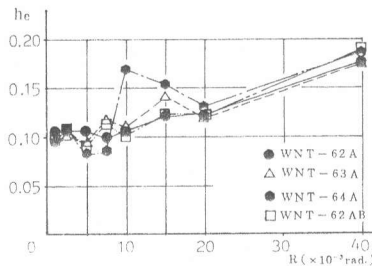


図-11 等価粘性減衰定数

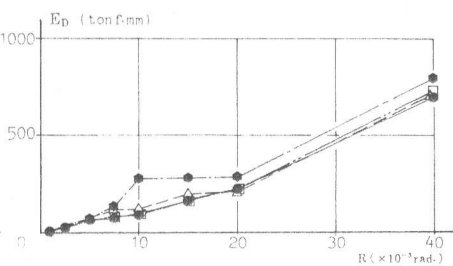


図-12 吸収エネルギー

3.5 ひずみ挙動

(柱・はり主筋の軸方向ひずみ)

最大耐力時には、引張柱脚外端の主筋は既に降伏していたが、その他の柱及びはり主筋は降伏していない。

最大耐力以降の抵抗機構が、第2次抵抗機構に移行し曲げ崩壊機構が順次形成されるにつれ、ヒンジ位置に対応した柱及びはり主筋が降伏して来る。

(間柱主筋の軸方向ひずみ)

間柱主筋も最大耐力時までは降伏しておらず、第2次抵抗機構に移行した後に降伏を生じる。図-15には、62A及び64Aの両試験体について間柱脚部の主筋ひずみの履歴を比較して示す。62A ($t_w/B_{we} = 1/3$) では、初期変位時には既に曲げによる軸方向ひずみを生じているが、 t_w/B_{we} が2/3の64Aでは、最大耐力時までは一般壁の縦筋と同様に正負両加力時に引張-引張となるひずみ挙動を示し、第2次抵抗機構に移行した後に曲げによる軸方向ひずみを生じる様になる。

(間柱の帯筋及び幅止め筋の軸方向ひずみ)

62Aと62ABの2体については、同位置での帯筋と62Aについては幅止め筋のひずみを測定した。このひずみ履歴を示したのが図-16である。この図は脚部での例であるが、帯筋のひずみは第2次抵抗機構において急増しているのが判る。また、幅止め筋のひずみ量はかなり少なく、有効性はあまり無いが、間柱が曲げ圧壊して来ると有効に働き始めている。

(壁板全体のせん断ひずみ)

ひびわれ発生前 ($Q = 5.0 \text{ tonf}$) での壁板全体のせん断ひずみ分布は、初等はり理論より得られるひずみ分布と比較的良く一致する結果が得られた。(図-17)

4. 結び

本実験より、間柱のせん断スパン比を1.5とし薄壁幅を間柱幅と等しくした場合、薄壁と間柱の板厚比が1/3~2/3の範囲にあれば、間柱付耐震壁の薄壁部に損傷を集中させることが可能で、かつ薄壁破壊後は全体の抵抗機構をラーメン型の抵抗機構に移行させ、水平変位の履歴特性を安定したものにすることが出来る結果を得た。

また、最大耐力は、薄壁と間柱との板厚比が1/3~1/2の範囲にあれば既往の算定式である広沢式により大略推定出来、耐力低下後の維持耐力も、薄壁の横筋のせん断強度が曲げ戻し効果として寄与するとして求めた間柱を含むラーメンの曲げ崩壊機構の水平耐力計算値により推定出来ることが判った。

今後は、耐震壁の形状が種々変化した場合について実験的に検討を行うと共に、薄壁破壊時の抵抗機構の解明と本耐震壁を有する建物の応答性状について解析的検討を行う必要があると考えている。

[参考文献]

- 1) 田中, 藤原 : 靱性を有する鉄筋コンクリート造耐震壁の開発研究(第2~4報) ; 建築学会大会要覧集, 昭和58年9月
- 2) 広沢 : 既往の鉄筋コンクリート耐震壁に関する実験資料とその解析 ; 建築研究資料 No.6, March, 1975
- 3) 谷, 野村 他 : 鉄筋コンクリート耐震要素の復元力特性(その5)-崩壊に至る復元力特性とそのモデル化の方法- ; 建築学会論文報告集 第300号.
- 4) 富井, 大崎 : 梁橋付無開口壁の剪断抵抗に関する研究(第1報) ; 建築学会論文報告集, 第51号, 昭和30年9月

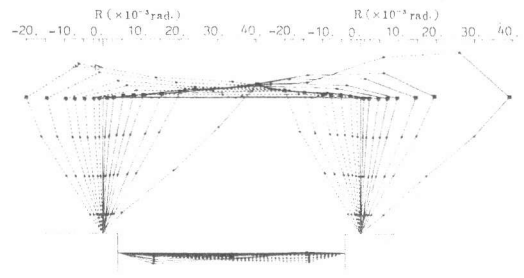


図-13 変形モード (WNT-62A)

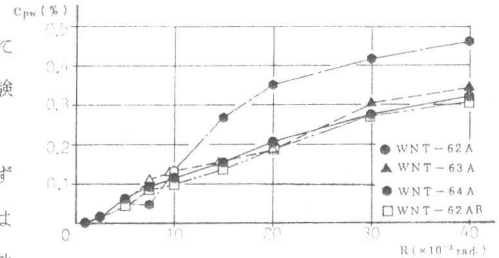


図-14 壁面横膨張率

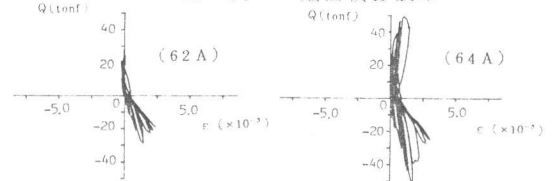


図-15 間柱主筋のひずみ

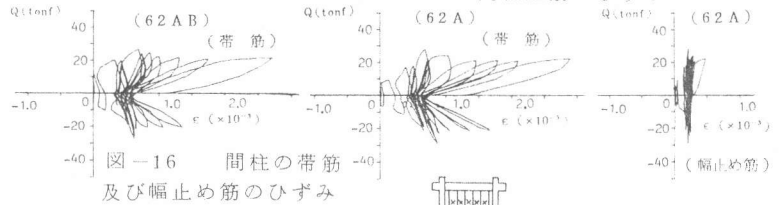


図-16 間柱の帯筋及び幅止め筋のひずみ

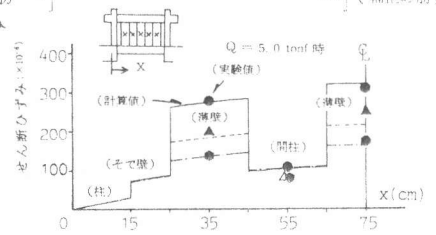


図-17 壁板のせん断ひずみ分布