

論文

[2196] 単独せん断破壊型耐震壁の架構における靱性評価の解析

川辺 祥一*1・望月 重*2

1. はじめに

せん断破壊型耐震壁の代表的な破壊形式として、付帯ラーメンのせん断破壊により破壊に至る場合と、壁板の圧縮破壊（スリップ破壊）により破壊に至る場合を挙げる事が出来る。付帯ラーメンのせん断破壊により破壊に至る場合は、急激な破壊を生じる。それに対して、壁板のスリップ破壊の場合は、最大荷重以降も耐力の低下が小さく、靱性に優れた破壊形式となることが、実験等により示されている。

鉄筋コンクリート耐震壁の耐力が壁板のスリップ破壊で決まる場合の研究に関しては、富井博士ら [1]、今井博士 [2]、筆者の一人によるものがあるが、富井博士ら、今井博士の研究は、主として1層1はり間の単独耐震壁、多層1はり間の連層耐震壁または1層多はり間の連スパン耐震壁といったような付帯ラーメン付き耐震壁の場合のみであった。それに対して、筆者らは、スリップ破壊が、付帯ラーメンと連続ラーメンの拘束効果により影響されることに着目し、実験および壁板をブレースで置換したモデルにより最大荷重以後の挙動を考慮したプログラムを開発し、解析を行ってきた。[3],[4],[5] 既往の研究 [3],[4] では、非線形解析手法として荷重増分法を用いたために、スリップ破壊をする試験体において最大荷重以後の耐力の低下を解析において十分に再現できたとはいえなかった。[5] の研究では、非線形解析手法として変位増分法を用いて、スリップ破壊をする試験体の最大荷重以後の耐力低下を再現出来たが、せん断破壊をする試験体において、フレームのせん断破壊による耐力低下を再現することは出来なかった。そこで、本研究では、[5] で作成したプログラムをフレームのせん断破壊による耐力の低下を考慮するように一部変更を行い、そのプログラムを [3][4][5] で行った試験体に適応し、得られた結果に対して検証を行うことにより妥当性を確認する。さらに本プログラムを用いて、せん断破壊型耐震壁を有する架構において、靱性のある破壊モードになるための条件について、3層3スパンで各層に単独耐震壁を含むラーメン架構のモデルを設定し、壁の配置および壁厚を変えた場合について解析を行い、配置および壁厚の変化がラーメン架構を含む耐震壁の靱性におよぼす影響について試行する。

2. 解析概要

解析は、変位増分による弾塑性解析であり、付帯ラーメンは、線材に置き換え、壁板は筆者らが単独耐震壁のひび割れ後の付帯ラーメンの応力算定において提案しているブレース置換を用いた。尚、ラーメン部材の剛性マトリックスは、材端バネ法により求めた。

2.1 壁板

壁板は図1に示すように、鉛直方向に対しほぼ45度の角度をなす4本の圧縮ブレースと引張りブレースに置換した。引張りブレースの応力-ひずみ関係は壁筋の降伏点 (σ_y) を折れ点とするバイリニア型とし、圧縮ブレースは、ひび割れを含む場合の鉄筋コンクリートの圧縮応力-ひずみ関係において、コンクリートの最大圧縮強度がシリンダーコンクリートの最大圧縮強度 (σ_c)

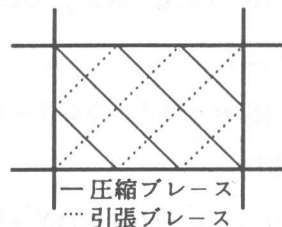


図1 壁板のモデル化

*1 東京工科大学専門学校講師 建築科、工修（正会員）

*2 武蔵工業大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

より低下することを考慮し、圧縮応力-ひずみ関係のモデルは、白石博士ら [6] により提案されたモデルに従った。(図 2) その際、コンクリートの圧縮有効係数 ν は [6] に従い 0.7 とし、応力が $0.2\sigma_0$ 以下にならないようにした。本解析において、壁板の圧縮ブレースのスリップ破壊の判断は、図 2 に示す圧縮応力-ひずみ関係において、最大圧縮強度時のひずみ (ϵ_0) の時に発生するとした。

2.2 ラーメン

ラーメン部材の剛性マトリックスは、材端バネ法により求め、曲げモーメントおよびせん断変形を考慮した。

曲げの復元力特性は、図 3 に示すようにひび割れを第 1 折点、降伏を第 2 折点とするトリリニア型とした。図 3 で示す曲げひび割れモーメント (M_{cr})、降伏モーメント (M_y) と剛性低下率 (α_m) は以下のようにした。

• はり

$$M_{cr} = 2.0\sqrt{\sigma_c}Z_e \quad (1)$$

$$M_y = 0.9a_t\sigma_y d \quad (2)$$

$$\alpha_m = (0.043 + 1.64np_t + 0.043a/D)(d/D)^2 \quad (3)$$

• 柱

$$M_{cr} = 2.0\sqrt{\sigma_c}Z_e + ND/6 \quad (4)$$

$N \leq 0.4D\sigma_c$ の時

$$M_y = 0.8a_t\sigma_y D + 0.5ND(1 - N/(bD\sigma_c)) \quad (5)$$

$$\alpha_m = (0.043 + 1.64np_t + 0.043a/D + 0.33N/(bD\sigma_c))(d/D)^2 \quad (6)$$

せん断力の復元力特性は、図 4 に示すように終局せん断力まで弾性とし、終局せん断力を越えた後は、せん断力を負担しないものとした。終局せん断力 Q_u は、壁の付帯ラーメンと連続ラーメンを分けて求めた。付帯ラーメンの終局せん断力は、鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、「付 21 壁板周辺の柱および梁のせん断破壊を防止または抑制した耐震壁の構造計算法」に従い、付帯はり、柱の終局せん断力を (7), (8) 式により求めた。また、連続ラーメンのはり、柱の終局せん断力は、式 (9)、(10) 式の荒川式により求めた。

• 付帯はり

$$Q_u = 8.58bD + 0.26N + 0.374p_g\sigma_y g b D \quad (7)$$

• 付帯柱

$$Q_u = 8.58bD + 0.13N + 0.374p_g\sigma_y g b D \quad (8)$$

• 連続ラーメンのはり

$$Q_u = \left\{ \frac{0.0679p_t^{0.23}(\sigma_c + 180)}{a/d + 0.12} + 2.7\sqrt{p_w\sigma_{wy}} \right\} b j \quad (9)$$

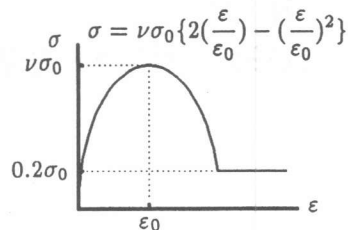


図 2 圧縮ブレースの応力-ひずみ関係

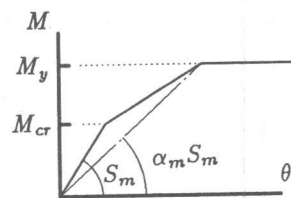


図 3 曲げモーメントの特性

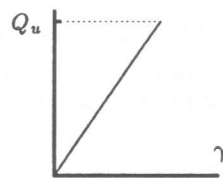


図 4 せん断力の特性

● 連続ラーメンの柱

$$Q_u = \left\{ \frac{0.0679 p_t^{0.23} (\sigma_c + 180)}{a/d + 0.12} + 2.7 \sqrt{p_w \sigma_{wy}} + 0.1 N / bD \right\} b j \quad (10)$$

尚、ここで a : シャースパン比、 a_t : 引張鉄筋断面積、 b : はり、柱幅、 D : はり、柱のせい、 d : 有効成、 p_t : 引張鉄筋比、 Z_e : 等価断面係数、 σ_c : コンクリート圧縮強度、 σ_y : 引張鉄筋降伏点、 σ_{wy} : せん断補強筋降伏点、 n : ヤング係数比、 p_g : はり、柱主筋の全断面積に対する断面比、 σ_{yg} : はり、柱主筋の降伏点、 N : はり、柱に作用する軸力、 j : 応力中心間距離、 p_w : せん断補強筋比、 σ_{wy} : せん断補強筋降伏点を示す。

2. 3 解析法の検証

解析法の妥当性を確認するために、筆者らが行った実験 [3][4][5] との比較検討を行った。図5に壁配置、表1に各試験体の構造諸元、図6は、各試験体における実験値と解析値の荷重-部材角関係

表1 構造諸元

試験体名	柱および付帯柱			はり			付帯はり		壁板			
	断面	主筋比	帯筋比	断面	主筋比	あばら筋比	主筋比	あばら筋比	壁厚	壁筋比		
1W-1	50*50 mm ²	2.7%	0.7%	50*40 mm ²	2.6%	0.4%	2.6%	0.4%	6mm	1.0%		
1W-2							4-4.0	1.2%				
1W-3							2-3.2	0.4%				
1W-4							6-4.0	1.2%				
2W-1							はりと同じ					
2W-2	50*30	3.4%	0.5%	はりと同じ		10mm	0.6%					
0-2-0	65*65 mm ²	3.0%	1.5%	65*65 mm ²	1.8%	0.32%	はりと同じ	はりと同じ	9.0	0.87%		
0-2-1										4-D6	3.2-	2.0
3-2-1										Ø16.5	Ø16.5	Ø40
FW-1	65*65 mm ²	3.0%	0.88%	65*65 mm ²	1.8%	0.75%	はりと同じ	はりと同じ	8.0	0.4%		
FW-2										3.0-	6.0	
FW-3										Ø21.5	0.9%	
FW-4										付帯柱	15.0	
FW-5										1.15%	0.2%	
	付帯柱	3.0-	付帯柱	1.8%	1.12%	12.0	0.2%					
	4.5%	Ø16.5	3.0-	2-D6	3.0-Ø20.0	12.0	0.5%					
	6-D6		Ø16.5				1.2-					
							Ø20.0					

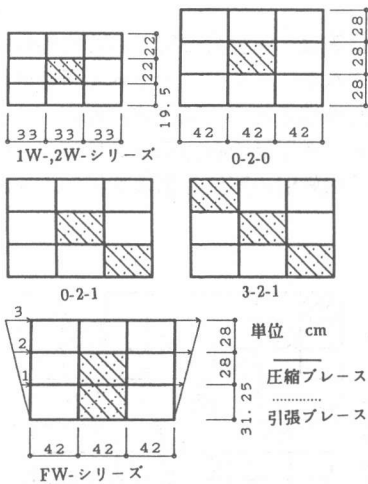


図5 検証モデル

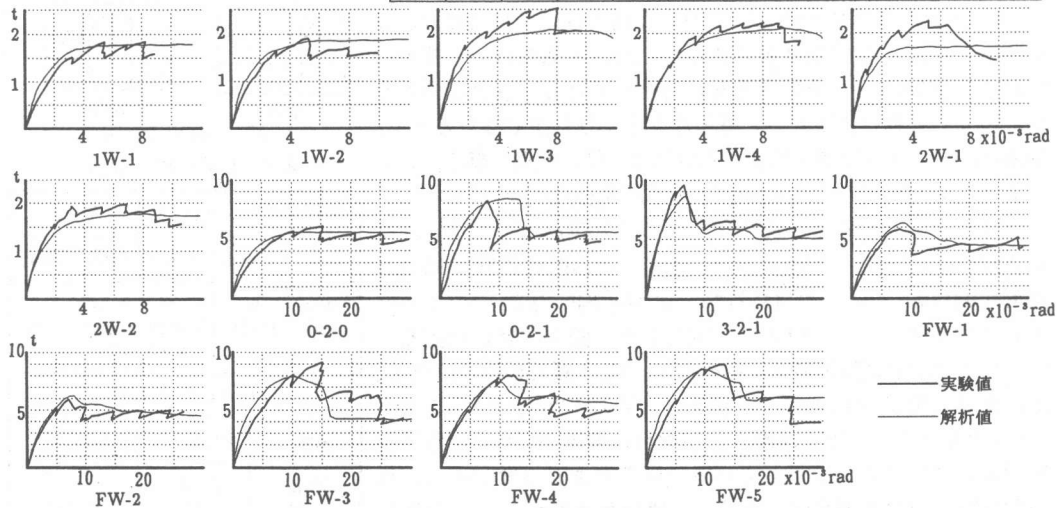


図6 検証モデルの荷重-部材角関係

図6に示す荷重-部材角は、破壊が生じた壁の層を考慮し、1W-,2W- シリーズ、0-2-0、0-2-1、FW-シリーズでは2層目、3-2-1は、3層目の部材角を示している。尚、変位増分の比率は、1層:2層:3層=1:2:3とし、正側、負側より加力する。

表2は、各試験体の最大荷重および最大荷重時の部材角、終局荷重を実験値と解析値の比較を行った。

表2 最大荷重および部材角、終局荷重

試験体名	最大荷重および部材角(*10 ⁻³ rad)				終局荷重		試験体名	最大荷重および部材角(*10 ⁻³ rad)				終局荷重	
	eP _{max}	eP _{max}	eR _{max}	eR _{max}	eP _{uit}	eP _{uit}		eP _{max}	eP _{max}	eR _{max}	eR _{max}	eP _{uit}	eP _{uit}
1W-1	1.95	1.89	6.06	6.88	1.53	1.50	0-2-1	8.10	8.20	8.07	13.00	5.80	5.50
1W-2	2.00	1.89	6.11	7.07	1.70	1.90	3-2-1	9.40	8.50	6.58	7.00	6.00	5.00
1W-3	2.28	2.00	10.09	8.14	1.72	2.00	FW-1	5.99	6.20	7.16	8.00	4.83	4.50
1W-4	2.17	2.05	10.08	8.19	1.80	2.00	FW-2	5.83	6.10	6.98	7.50	4.89	4.50
2W-1	2.13	1.80	5.95	5.04	1.60	1.45	FW-3	9.20	8.00	15.07	10.00	4.39	4.10
2W-2	1.89	1.79	8.00	6.44	1.51	1.50	FW-4	8.18	7.50	12.12	10.00	5.01	5.80
0-2-0	6.00	5.70	15.00	11.00	5.00	5.50	FW-5	9.74	8.50	13.12	10.00	3.59	6.00

図6、表2の結果から、解析で求められた各試験体の変形状等は、実験値で得られた結果をほぼ再現していると判断される。又、既往の研究において再現出来なかったフレームのせん断破壊による耐力低下をほぼ再現出来た。しかし、付帯ラーメンのせん断破壊を起こす試験体において、解析から得られた最大荷重が実験値を下回る結果となったが、最大荷重以後の耐力低下等について解析結果は、実験値をほぼ追従していると判断され、架構を有する耐震壁の靱性評価の解析に本システムを用いることは妥当性があると思われる。

3. 設定モデルに対する靱性評価の試み

2. 3 解析法の検証により解析の妥当性を確認した。そこで、本解析を用いてラーメン架構に単独耐震壁がある場合の靱性の評価を試みた。モデルは3層3スパンラーメンとし、各層に一箇所耐震壁を設け、耐震壁の配置を変えた場合、各配置で壁厚(20cm, 15cm, 10cm)を変えた場合について評価を行った。尚、壁厚は3層共同じ壁厚とする。ラーメン架構は、「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」、日本建築学会、1991改の例題1のX₂ラーメンを参考に決めた。スパン、高さは図7に、はり、柱の断面形状および配筋は表3に示す。尚、各層のはり、柱の形状および配筋は、1階の耐震壁に付帯するはり、柱と同様とした。また、柱脚は固定とし、壁の浮き上がりは生じないとする。評価は、ラーメン架構の形状およびはり、柱の配筋、壁筋比、コンクリート(ヤング率 210t/cm²、最大圧縮強度σ_c = 210kg/cm²、同ひずみε₀ = 0.2%)、鉄筋(ヤング率 2100t/cm²、はり、柱主筋SD35(降伏強度 3500kg/cm²)、壁筋、せん断補強筋SR24(降伏強度 2400kg/cm²)の材料特性、軸力(平均応力度 40kg/cm²として柱1本あたり 144t)は一定とした。図7に壁の配置を示す。図7で示す試験体名は、初めに3、2、1層での壁の位置を、次に壁厚(単位cm)を示す。例えば、W123-20は、3層1スパン目、2層2スパン目、3層3スパン目に壁厚20cmの耐震壁が配置されていることを示している。図7における壁配置は、極力曲げ降伏型の破壊を防ぐために、壁板が連層することを避け

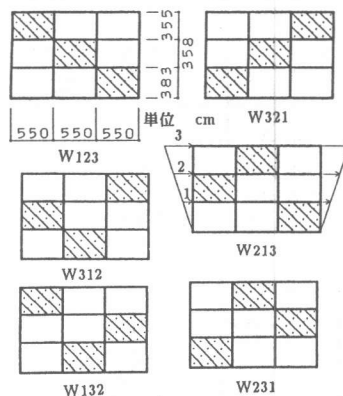


図7 解析モデル

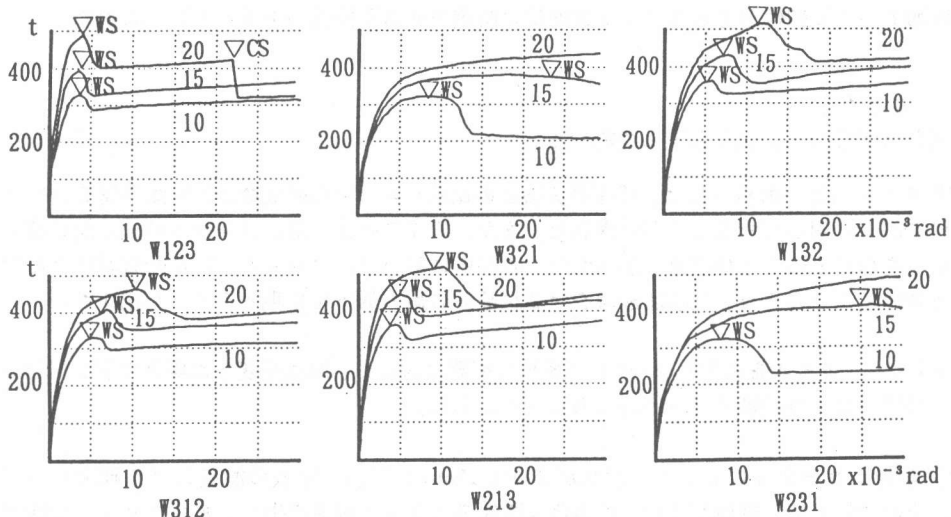
表3 モデル構造諸元

柱および付帯柱			壁板	
断面	主筋比	帯筋比	壁厚	壁筋比
60*60 cm ²	0.96 12-D19	0.44 2-φ13 -φ100	10mm 15mm 20mm	0.32%
はりおよび付帯はり				
断面	主筋比	筋筋比		
35*75 cm ²	0.74 5-D22	0.2% 2-φ9φ180		

た配置とした。(W123とW321、W132とW312、W213とW231は正側、負側の加力方向関係となる。)尚、変位は、1層:2層:3層=1:2:3の比率で増分し、部材角 $30 \times 10^{-3} \text{rad}$ において計算を打ち切った。

3.1 荷重-部材角関係

各壁配置に対して壁厚を変えた場合の3層の荷重-部材角関係を図8に示す。表4には、最大荷重、最大荷重時部材角、終局荷重、終局荷重時部材角、耐力低下率、破壊モードを示す。ここで、解析において終局荷重を特定することは難しい。そこで、便宜的に部材角が安定した時、また特定出来ない場合は、部材角 $30 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時を終局荷重とする。尚、荷重-部材角曲線に示す数値は壁厚(単位cm)を示す。



WS:壁板のスリップ破壊、CS:付帯柱のせん断破壊

図8 荷重-部材角関係

表4 最大荷重および部材角、終局荷重および部材角、耐力低下率、破壊モード

試験体名	壁厚 (cm)	最大荷重および部材角		終局荷重および部材角		耐力低下率 (%)	破壊モード
		最大荷重 (t)	部材角 ($\text{rad} \times 10^{-3}$)	終局荷重 (t)	部材角 ($\text{rad} \times 10^{-3}$)		
W123	20	505.4	4.3	327.0	30.0	35.2	WS, CS
	15	407.7	3.7	346.0	10.0	15.1	WS
	10	335.7	3.7	305.9	10.3	8.8	WS
W321	20	455.5	30.0	455.5	30.0	-	BF
	15	395.8	16.7	367.4	30.0	-	BF, WS
	10	335.4	8.1	220.3	19.6	34.3	WS
W132	20	542.6	12.5	433.8	20.2	20.1	WS
	15	449.0	7.6	401.0	20.2	10.6	WS
	10	388.0	5.4	343.5	12.0	11.5	WS
W312	20	469.8	10.3	390.3	20.0	16.9	WS
	15	416.7	7.0	363.5	15.2	12.8	WS
	10	338.4	5.4	310.4	15.2	8.3	WS
W213	20	528.6	10.3	420.0	20.0	20.5	WS
	15	455.0	5.4	400.1	12.0	12.1	WS
	10	372.2	4.8	340.1	10.3	8.6	WS
W231	20	503.3	30.0	503.3	30.0	-	BF
	15	417.6	18.5	403.3	30.0	-	BF, WS
	10	331.7	8.7	238.1	16.0	28.2	WS

記号: WS:壁板のスリップ破壊、CS:付帯柱のせん断破壊、BF:曲げ降伏

耐力低下率=(最大荷重-終局荷重)/最大荷重

3. 2 考察

今回解析したモデルで、壁板のスリップ破壊を生じた壁は、1層の壁のみであり、2、3層の壁にはスリップ破壊は生じなかった。また、スリップ破壊が発生した圧縮ブレースは、2階のはりと柱の交点を結ぶ対角方向の圧縮ブレースであった。

解析したモデルにおいて、配置による変形性状、破壊モード等の比較をする。壁厚が20cm、15cmの場合、配置の違いにより 1) 曲げ降伏型、2) せん断破壊型(W123の壁厚20cmの場合)、3) スリップ破壊型の3種類の破壊モードが見られ、破壊モードを特定することは困難であった。それに対して、壁厚が10cmの場合、今回解析したモデルにおいて、破壊モードは、すべて壁板のスリップ破壊であった。このことから、単独せん断破壊型耐震壁を有する架構において、壁厚の制御により、破壊モードを靱性があるスリップ破壊型に特定できる可能性があることが示された。

4. まとめ

本研究から得られた結論を以下に要約する。

1) 解析モデルおよび解析方法は、既往の実験との比較から、せん断破壊型単独耐震壁を含むラーメン架構の解析に適応できることが示された。また、既往の研究では、フレームのせん断破壊による耐力低下を再現することは出来なかったが、本解析において、フレームのせん断破壊による耐力低下を考慮することにより、せん断破壊をする試験体の耐力低下を再現することが出来た。

2) 3層3スパンモデルを設定し、6通りの壁板の配置に対して、厚さを変えた場合の解析を行い、配置および壁厚により破壊モードが異なることを示した。

3) 今回解析したモデルにおいて、壁厚が20cm、15cmの場合、壁板の配置により破壊モードは異なる。それに対して、壁厚が10cmの場合は壁板のスリップ破壊を生じ、またスリップ破壊が生じる時の部材角のバラツキは比較的少ない。

参考文献

- [1] Masahide TOMII, Fumiya ESAKI: LATERAL SHEAR CAPACITY OF ONE-BAY ONE-STORY REINFORCED CONCRETE FRAMED SHEAR WALLS WHOSE EDGE COLUMNS OR EDGE BEAMS FAIL IN SHEAR, 日本建築学会構造系論文報告集 第376号, P81~P91, 昭和62年6月
- [2] 今井 弘: 鉄筋コンクリート耐震壁のせん断ひびわれ後の性状に関する研究, 日本建築学会論文報告集 第268号, P9~P20, 昭和53年6月
- [3] 望月 重: ラーメン内におけるせん断破壊型耐震壁の非弾性性状、-主としてスリップ破壊型耐震壁について-, 日本建築学会構造系論文報告集 第384号, P106~P115, 昭和63年2月
- [4] 龍井 潤一、望月 重、濱本 卓司、中島 康宏: 分散配置された耐震壁を有するRCフレームの破壊制御モードについて(その1. 荷重増分法によるブレース置換モデル解析)、日本建築学会大会学術講演梗概集C分冊 P761~P762, 1990年10月
- [5] 龍井 潤一、望月 重、濱本 卓司: フレーム内における部分的連層耐震壁のせん断破壊挙動、コンクリート工学年次論文報告集13巻第2号, P589~P594, 1991年
- [6] 白石 一郎、中村 善郎、狩野 芳一: 鉄筋コンクリート造耐震壁の最大耐力への壁筋の効果、日本建築学会構造系論文報告集 第392号, P34~P45, 昭和63年10月