

論文

[2098] 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

正会員○龍井潤一（武蔵工業大学大学院）

正会員 望月 重（武蔵工業大学建築学科）

正会員 濱本卓司（武蔵工業大学建築学科）

1. はじめに

耐震壁を有するRCフレームの破壊モードは、壁厚、壁筋比、付帯フレームの拘束条件等のパラメータにより変化する。壁板の斜めひび割れにより徐々に圧壊するものの付帯フレームには大きな損傷を与えることのないスリップ破壊は、壁板のせん断ひび割れが付帯フレームまで進展して急激に耐力低下を示すせん断破壊に比べ、比較的変形能力に優れ、最大耐力以後の耐力低下も少なく、靱性に富んだ破壊形式である<sup>1)</sup>。本研究では、パラメータ値の適切な選択によりスリップ破壊で壊れるような破壊モード制御を行うことを目的に、2層耐震壁を有する3層3スパンフレームの試験体を用いて実験を行い、各パラメータによる破壊形式への影響を検討した後、変位増分法を用いたブレース置換モデルによりせん断破壊とスリップ破壊の最大耐力以後の挙動を追跡した。実験結果と解析結果の比較検討を行って解析法の妥当性を確認するとともに、耐震壁を有するRCフレームのせん断挙動を解明する上での有益な資料を得たので報告する。

2. 実験

2.1 実験内容

本解析に用いた試験体は、単独耐震壁を2枚有する3層3スパンRCフレームで、実物大の約1/10縮小モデルである。試験体の形状は、柱心々間距離420mm、1階階高は315mm、2、3階階高は280mm、柱断面65x65mm<sup>2</sup>、はり断面65x55mm<sup>2</sup>である。構造諸元を表1に、試験体配筋図を図1に示す。主筋はD6(SD295A)、帯筋および肋筋は3.0mm径のなまし鉄線、壁筋は1.2mm径のなまし鉄線を使用した。鉄筋およびモルタルの材料特性を表2に示す。

加力装置図を図2に示す。各柱には50tオイルジャッキを用いてPC鋼棒(11φ)の引張力を反力として $\sigma_0 = 40\text{kg/cm}^2$ の軸力を加えた。水平力は、50tオイルジャッキを用いて治具Aを介して各層はり端部を圧縮加力すると同時に、他端も50tオイルジャッキを用いてPC鋼棒により治具Aと治具Cをつなぎ、治具Cを押すことによって治具Aに引張力を生じさせた。

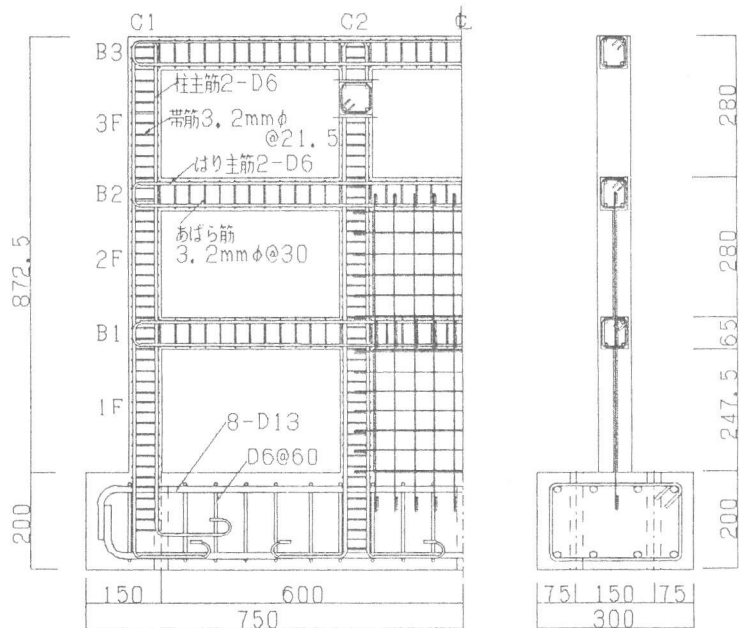


図1 試験体配筋図 (FW-1)

各層への荷重配分は1層:2層:3層=1:2:3とした。加力の制御は3層部材角(試験体頂部変位/試験体全高さ)を、 $\pm 2, 5, 10, 15, 20, 25 \times 10^{-3} \text{rad}$ で正負交番で2回づつ繰り返し、最終サイクルで $+30 \times 10^{-3} \text{rad}$ まで単調加力を行った。

表1 構造諸元

試験体名	柱			付帯柱		梁			付帯梁 肋筋比	壁	
	断面	主筋比	帯筋比	主筋比	帯筋比	断面	P t	肋筋比		壁厚	壁筋比
FW-1	65x65 mm <sup>2</sup>	3.0% (4-D6)	0.88% 3.0mm @21.5)	3.0% (4-D6)	0.88% (3.0mm @21.5)	65x65 mm <sup>2</sup>	1.8% (2-D6)	0.75% (3.0mm @30.0)		8mm	0.4%(1.2mm@40.0)
FW-2										6mm	0.9%(1.2mm@20.0)
FW-3										15mm	0.2%(1.2mm@40.0)
FW-4										12mm	0.2%(1.2mm@40.0)
FW-5										12mm	0.5%(1.2mm@20.0)

表2 使用材料の性質

種類	鉄筋・鉄線				
	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏点 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強さ (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング率 ( $\times 10^6 \text{kg/cm}^2$ )	伸び率 (%)
D13	1.27	3.596	5.315	1.58	20.1
D6	0.32	3.177	5.144	1.62	18.2
3.0mm	0.06	3.327	4.779	2.68	26.9
1.2mm	0.01	3.335	5.527	4.29	14.5

試験体名	モルタル		
	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ヤング率 ( $\times 10^5 \text{kg/cm}^2$ )
FW-1	299	27.7	1.77
FW-2	320	25.3	1.81
FW-3	306	20.9	1.80
FW-4	298	21.7	1.88
FW-5	263	20.4	1.75

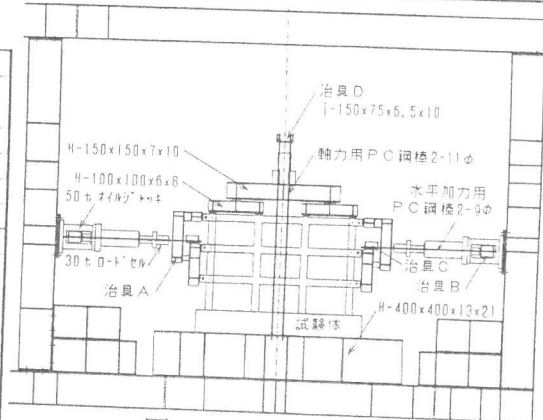


図2 加力装置図

## 2.2 実験結果

典型的なスリップ破壊で終局に至ったFW-1、FW-2およびFW-4試験体は、おおむね次のひび割れパターンをたどって終局に至った。1) 壁板のせん断ひび割れ、2) はり端部曲げひび割れ、3) 1層柱の柱脚曲げひび割れを経て、4) 壁板のスリップ破壊で最大荷重となり以後壁板の剥離を生じながら、5) はり端部および1層柱脚曲げ降伏によりメカニズム状態となり終局に至った。FW-3試験体は付帯柱のせん断破壊により終局に至り、上述の1)~4)の経過の後、5) 壁板のせん断ひび割れが柱を貫通し、せん断破壊による急激な耐力低下を示して終局に至った。またFW-5試験体は5) 1層柱頭柱脚の曲げ圧縮破壊により終局に至った。破壊形式の異なる試験体FW-3、FW-4、FW-5の最終破壊状況図を図3に示す。

試験体の各種強度を表3に示す。最大荷重に関しては、スリップ破壊により終局に至ったFW



図3 最終破壊状況図

FW-1 試験体は5.99 t、壁厚を6mmにして壁筋量を2倍にしたFW-2 試験体は5.83 tであった。付帯柱にせん断破壊を生じたFW-3 はFW-1 試験体の壁厚を15mmとしたものであり、最大荷重は9.2 tとなった。また、壁厚12mm、付帯架構のせん断補強筋をFW-3 の1.5倍にしたFW-4 の試験体の最大荷重は8.18 t、FW-4 に付帯架構の主筋量および壁筋量を増やしたFW-5 試験体の最大荷重は9.74 tであった。

終局荷重に関しては、FW-1 およびFW-2 試験体はそれぞれ4.83 t、4.89 tであり、最大荷重に対する低下率は19.4%、16.1%となりじん性に富む破壊形式となった。FW-3 試験体の終局荷重は4.39 tであり、FW-1 およびFW-2 試験体の値を下回り、低下率も52.3%となった。これは付帯フレームでのせん断破壊によるものである。FW-4 試験体の終局荷重は5.01 tで低下率は38.8%であった。スリップ破壊型であるにもかかわらず低下率が高いのは壁厚がFW-1 およびFW-2 に比べて厚かったためである。FW-5 試験体の終局荷重は3.59 tで低下率は63.1%であった。この大きな低下率は1層の曲げ圧縮破壊に起因していると考えられる。

表3 最大荷重、最大荷重時部材角、終局荷重、および破壊モード

試験体名	最大荷重(tf)および部材角( $\times 10^{-3}$ rad)					終局荷重(tf)			破壊モード <sup>※</sup>	
	ePmax	cPmax	実/解	eRmax	cRmax	実/解	ePult	cPult		実/解
FW-1	5.99	5.96	1.01	7.16	7.10	1.01	4.83	4.38	1.10	BY, WS
FW-2	5.83	5.95	0.98	6.98	7.48	0.93	4.89	4.62	1.05	BY, WS
FW-3	9.20	8.28	1.11	15.07	9.21	1.64	4.39	4.81	0.91	BY, WS, CS
FW-4	8.18	7.88	1.04	12.12	8.51	1.43	5.01	4.86	1.03	BY, WS
FW-5	9.74	8.11	1.20	13.12	7.81	1.68	3.59	5.64	0.64	C1, WS, CS

※BS: はりのせん断破壊, BY: はり端および1層柱脚曲げ降伏, WS: 壁板スリップ破壊, C1: 柱頭柱脚曲げ降伏  
CS: 柱のせん断破壊  
終局荷重は部材角30/1000radの時の荷重とする。

### 3. 解析概要

#### 3.1 ブレース置換モデル

壁板を図4に示すように鉛直に対し45度をなす4本の圧縮ブレースと4本の引張ブレースで置換した。引張ブレースの応力-ひずみ関係は降伏点( $\sigma_y$ )を折れ点とするバイリニア型とし、圧縮ブレースの応力-ひずみ関係は図5に示すようにCollinsの提案した応力-ひずみ曲線において、せん断ひずみ係数入を

0.8にしたものを採用した。

なお、フレーム部材には材端バネ法を用いた。柱では曲げモーメント、せん断力、及び軸力を、はりでは曲げモーメントとせん断力を考慮した。

曲げの復元力特性はひび割れ荷重を第1折点、降伏荷重を第2折点とするトリリニア型、

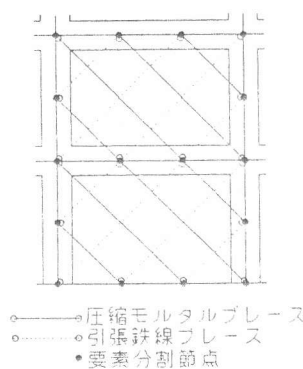


図4 壁板のモデル化

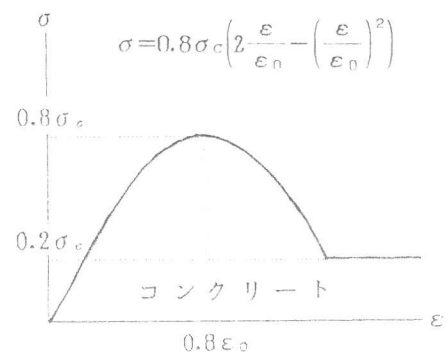


図5 壁板の応力-ひずみ関係

せん断力の復元力特性は終局強度を折れ点とする完全弾塑性型、軸方向力の復元力特性は引張側がひび割れ荷重を折点とするバイリニア型、圧縮側は圧縮強度時までの完全弾性型とした。

### 3. 2 変位増分法

荷重増分法は最大荷重以後壁のせん断破壊により急激に耐力低下する挙動は再現することができるが、じん性のあるスリップ破壊を追跡する点で難点があった<sup>2)</sup>。そこで、今回変位を漸増させ制御する方法を取ることににより、従来の解析では十分に再現できなかったスリップ破壊にまで解析対象を広げること考えた。以下にその方法を要約する。

実験では試験体の左右で押し引き載荷を行うので、 $i$ 層の左側および右側の荷重をそれぞれ  $p_{iL}$ 、 $p_{iR}$  と表すと、荷重作用点での荷重分布は図6のようになる。試験体に作用する全荷重を  $P$  とした場合、各作用点での荷重を3層左側での荷重  $p_{3L}$  を用いて表すと、 $p_{2L} = 2p_{3L}/3$ 、 $p_{1L} = p_{3L}/3$ 、 $p_{3R} = p_{3L}$ 、 $p_{2R} = 2p_{3L}/3$ 、 $p_{1R} = p_{3L}/3$  となる。これをマトリックス表示すると次式を得る。

$$\{P'\} = [T]^T \{P\} \quad (1)$$

ここに、 $\{P'\} = [p_{3L} \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots]^T$ 、

$\{P\} = [p_{3L} \ 0 \ 0 \ p_{2L} \ 0 \ 0 \ \dots]^T$ 、

$[T]$  はベクトル  $\{P'\}$  と  $\{P\}$  を関係づけるマト

リックスである<sup>2)</sup>。試験体の各節点における力-変位関係は次式で表される。

$$\{P\} = [K] \{\delta\} \quad (2)$$

$\{\delta\} = [\delta_{11} \ \delta_{12} \ \delta_{13} \ \delta_{21} \ \delta_{22} \ \delta_{23} \ \dots]^T$ 、

$\delta_{ij}$  の  $i$  は節点番号、 $j$  は自由度であり、 $[K]$  は全体剛性マトリックスである。上式に (1) 式を代入すると次式を得る。

$$\{P'\} = [T]^T [K] \{\delta\} \quad (3)$$

3層左側の作用点で変位制御を行うので、ベクトル  $\{\delta\}$  の第1要素は既知である。3層左側の作用点には強制変位  $\delta_{11}$  が与えられているので、 $\delta_{11}$  の値を  $\{P'\}$  の第1要素に代入し、それに対応する  $[T]^T [K]$  マトリックスの第1行1列を1とし、第1行の残りの要素を0とおくことで (3) 式を解くことができる。柱脚の固定端の境界条件は  $\delta_i$  が拘束されているとき全体剛性マトリックス  $[K]$  の要素  $k_{ii}$  を1とし、 $i$  行  $i$  列以外の要素を0とおくことにより導入される。

なお、スリップ破壊した壁板の応力の解放に関しては、ある荷重状態においてブレースに置換した壁板のひずみが最大応力時ひずみを越えたとき、不釣り合い力を部材の両端で逆向きに解放した。この操作を各ステップ毎に不釣り合い力が生じるたびに繰り返すことにより、壁板の破壊に伴う耐力低下を評価した。

## 4. 実験と解析の比較

### 4. 1 各種強度

最大荷重に関しては、各試験体とも解析と実験の比は20%以内におさまっている。特に、スリップ破壊で終局に至った試験体、FW-1、FW-2、FW-4の3体の試験体については4%以内におさまっていることから、スリップ破壊型の試験体実験値と解析値はほぼ一致した。終局荷重に関しては、スリップ破壊型のFW-1、FW-2、FW-4試験体の実験と解析の比は、10%以内におさまっている。これらの試験体はいずれも実験値の方が解析値よりも高い値であるが、柱がせん断破壊したFW-3試験体においては、実験値の方が解析値よりも低くなっている。これは、解析でフレームのせん断破壊による耐力低下を考慮しなかったため、その分が耐力差と

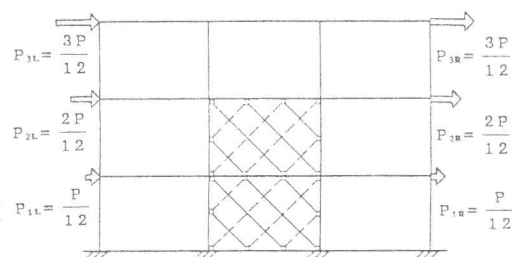
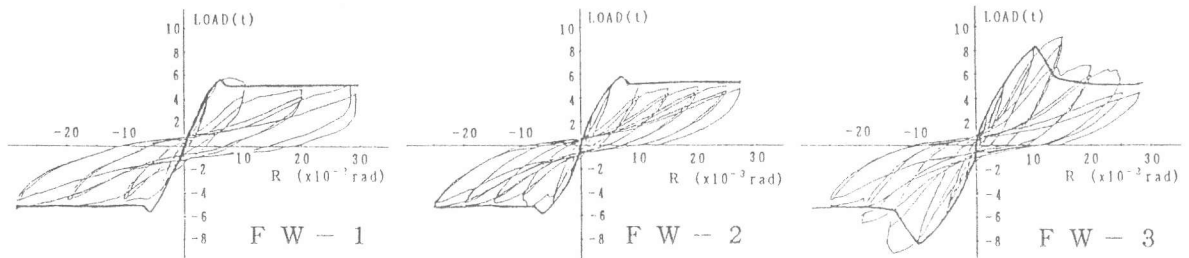


図6 荷重分布

してでてきてしまったと思われる。FW-5 試験体についても柱の曲げ圧縮破壊を解析では考慮してはならず、その差が36%となってしまう。

#### 4. 2 荷重-部材角関係

図7に実験と解析の荷重-3層部材角関係の結果を示す。スリップ破壊型のFW-1、FW-2 試験体については解析値は実験値と良く一致した。また、同じスリップ破壊型のFW-4 試験体は、正側で壁板のスリップ破壊以後徐々に耐力が低下しているため、解析値と実験値があわなかった。負側に関しては、ほぼ解析値と実験値は一致している。FW-3、FW-5 試験体についてはフレームの破壊による耐力低下を再現できていない。



#### 4. 3 荷重-壁板ひずみ関係

壁板のせん断ひび割れが付帯柱を貫通したFW-3 試験体、およびスリップ破壊で終局に至ったFW-4 試験体の壁板における荷重-ひずみ関係を図8に示す。両試験体の荷重-ひずみ曲線の解析値と実験値は一部壁両端部に開きが見られるがほぼ妥当な曲線を示しており、本解析モデルが、全体挙動のみでなく局部的な挙動の再現にも有効であることが分かる。

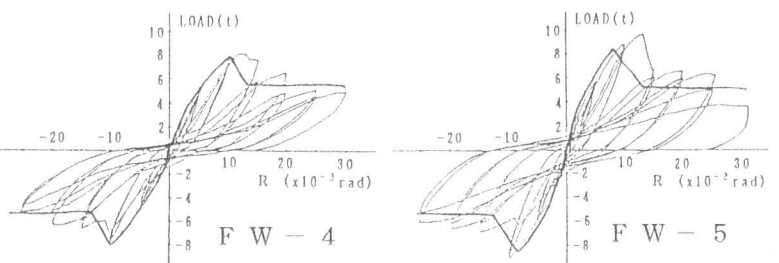


図7 荷重-部材角関係

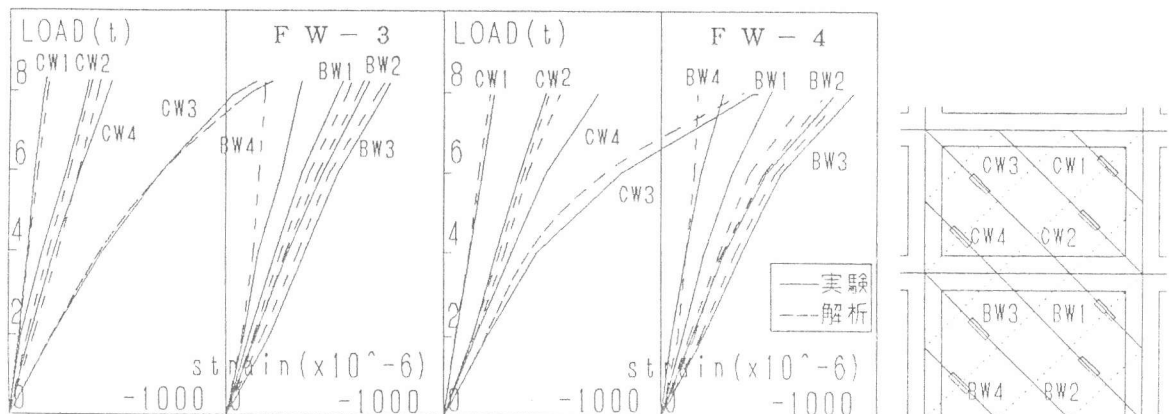


図8 荷重-壁板ひずみ関係

#### 4. 4 荷重-モーメント関係

スリップ破壊型のFW-2 試験体、せん断破壊型のFW-3 試験体および1層柱の曲げ圧縮破壊型のFW-5 試験体における荷重-部材端モーメント曲線を図9に示す。実線は実験値を、点線は解析値を表している。ただし、実験値は、部材の曲げ主筋に貼付したゲージからひずみを読みとり、ひずみの平面保持を仮定して算定したものである。1層付帯柱の柱脚において、スリッ

プ破壊型のFW-2試験体は実験値と解析値がおおむね一致している。しかし、1層付帯柱のせん断破壊となったFW-3試験体および1層柱の曲げ圧縮破壊となったFW-5試験体は実験値が解析値を大幅に上回っている。これはFW-2試験体の壁が他の2体に比して薄いため付帯フレームに与える影響が少ない

が、せん断破壊および曲げ圧縮破壊を起こしたFW-3およびFW-5試験体は壁が厚く付帯フレームに与える影響が大きくなることによるものであり、材端ばね法の限界であると考えられる。したがって、材端ばね法は純ラーメン部材に適用する場合には十分な精度を与えるが、耐震壁を含むラーメン部材に適用する場合には今後工夫が必要であろう。

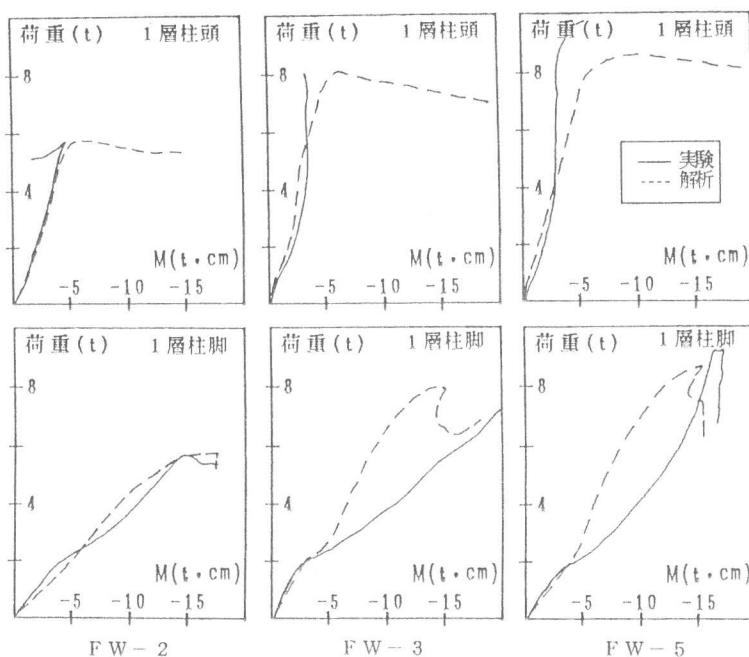


図9 荷重-モーメント関係

## 5. 結び

本研究では、2層耐震壁を有する3層3スパンフレームの破壊形式の異なる実験を行い各パラメータが破壊形式に与える影響を検討し、さらに最大耐力以降の挙動を追跡するために、今回新たに開発した変位増分法を用いたブレース置換モデルによる解析結果と実験結果を比較検討した。本研究の範囲内で得られた結論を以下に要約する。

- 1) 実験から、壁厚、壁筋比、付帯フレームの主筋比およびせん断補強筋比は破壊モードを制御する上での重要因子であることが分かった。
- 2) 変位増分法を用いたブレース置換モデル解析により、荷重増分法では追跡の難しかったじん性の富むスリップ破壊型耐震壁を有するRCフレームの最大荷重以後の耐力低下を再現できた。
- 3) 本解析法により、せん断破壊型のRCフレームの全体的挙動だけでなく歪レベルの局部的な性状も定量的に把握できることが分かった。

今後、本解析法をさらに改良しパラメトリックスタディを行って、フレーム付き耐震壁の破壊モード制御に関する資料を蓄積する必要があると考える。

## 参考文献

- 1) 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-、日本建築学会論文報告集、第384号、PP. 106-115
- 2) 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フレームの破壊モード制御について（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、PP. 761-762、1990
- 3) 和田章・須藤福三：複数の荷重を受ける構造物の不安定領域を含んだ非線形解析について、日本鋼構造協会第11回大会研究集会マトリックス解析研究発表論文集、PP. 217-222、1972. 6
- 4) 小野里憲一・望月洵：マクロモデルによる連層耐震壁の弾塑性解析、コンクリート工学年次論文報告集、PP. 575-580、1990