

# [106] 純せん断力を受ける RC 単独耐震壁の復元力特性と地震応答解析

正会員 望月 重 (武蔵工業大学工学部)  
 正会員 ○袴田 浩 (武蔵工業大学大学院)

## 1.) はじめに

鉄筋コンクリート構造物の復元力特性、特に、そのモデル化に関しては、すでに多くの提案がなされており、鉄筋コンクリート耐震壁に関しては志賀博士らの研究<sup>1)</sup>があり、また、鉄筋コンクリート耐震壁を含んだ耐震要素に関しては谷博士らの研究<sup>2)</sup>がある。しかしながら、せん断破壊する耐震壁の復元力特性のモデルはほとんど見当らないと言える。それは、耐震壁の純せん断実験が困難なため役立つ資料が乏しいことに起因するものである。

以上の点から、本研究は、既往の純せん断加力実験の鉄筋コンクリート単独耐震壁の実験資料を基に壁板のせん断補強筋比 (以後、「壁筋比」と略す) や柱の付加軸応力の復元力特性にあたる影響について調べ、耐震壁の復元力特性モデルを提案し、それに基づいた建物の地震応答解析を行ったものである。

## 2.) 資料の諸元

本研究において採用した資料は、純せん断力と一定の柱軸応力を受ける、一層一はり間の付帯ラーメンを有するモルタル壁体、総数39体の実験結果に関するものである。なお、試験体の諸元一覧を表-1に示す。試験体の加力は、せん断加力と一定の柱軸応力の2種類である。せん断加力は、壁体の対角線2方向に等量の引張と圧縮の繰り返し同時加力を行ったものである。また、正負とも部材角 $R=1, 2, 4, 6, 8, 10 \cdots \times 10^{-3}$ の変位で履歴を制御し、定常ループを求める為に、最大荷重以後変位制御ができなくなる場合を除いて、同一の部材角で正負とも3回ずつの繰り返し加力を行っている。

## 3.) 履歴特性

荷重一部材角関係より明らかとなった履歴特性の概要を述べると次のようになる。荷重一部材角曲線の包絡線は壁板の初ひびわれにより剛性が低下し、その後徐々に剛性が低下していく。変形が部材角 $4 \times 10^{-3}$ に達すると剛性は急激にゆるやかになり、部材角 $6 \sim 8 \times 10^{-3}$ 付近で最大荷重となっている。最大荷重後は、せん断破壊のため変形を制御するのが困難であり、最大荷重時に崩壊したものも少なくない。履歴ループは概して逆S字型をしており、定変位における第3回目のループでは特に強い逆S字型を示している。以後第3回目以降に得られた履歴ループのみを対象とする。履歴ループを基に求めた等価粘性減衰定数は壁筋比が増大すると減少する傾向がある。履歴ループは除荷時、スリップ時および載荷時にわけて考えられるが、ループ頂点の高さに対する各領域の境界点であるスリップ開始点およびひずみ硬化開始点の高さの比 $P_s/P_o$ 、 $P_h/P_o$ は、経験変位によらずほぼ一定値でそれぞれおおよそ0.10および0.15であった。

表-1 試験体の諸元

試験体名	t	h	t	b × d	Ps	Pg	Pw	$\sigma_n$	
0.35-00-1.2	52.0	37.0	1.5	4.5 × 7.0	0.35	1.68	0.47	0	
0.35-30-1.2								30	
0.35-60-1.2								60	
0.70-00-1.2'	52.0	37.0	1.5	4.5 × 7.0	0.70	1.68	0.47	0	
0.70-00-1.2								0	
0.70-30-1.2								30	
0.70-60-1.2	60								
1.05-30	52.0	37.0	1.5	4.5 × 7.0	1.05	1.68	0.47	30	
20W-0.2F-1.2	73.0	52.0	2.0	6.5 × 10.0	0.35	1.97	0.20	0.60	
20W-0.6F-1.2								1.24	
20W-1.2F-1.2									
35W-0.5F	73.0	52.0	3.5	6.5 × 10.0	0.35	1.97	0.48	0.76	
35W-0.8F								1.24	
35W-1.2F									
0.35-FW-1.2	73.0	52.0	2.0	6.5 × 10.0	0.35	1.74	0.62	0	
0.70-FW-1.2									0.70
1.05-FW-1.2									1.05
0.35W	73.0	52.0	2.0	6.5 × 10.0	0.26	1.74	0.62		
0.70W									0.52
1.05W									0.78
0.35-SW-7.0	73.0	52.0	2.0	7.0 × 10.0	0.35	1.83	0.92		
0.35-SW-8.5				8.5 × 10.0					2.26
0.35-SW-10.0				10.0 × 10.0					1.92
0.70-SW-7.0	73.0	52.0	2.0	7.0 × 10.0	0.70	1.83	0.92		
0.70-SW-8.5				8.5 × 10.0					2.26
0.70-SW-10.0				10.0 × 10.0					1.92

記号 t(h): 壁板周辺の柱(はり)中心間水平(鉛直)距離(cm); t: 厚さ(cm)  
 b × d: 付帯ラーメンの断面積(cm<sup>2</sup>); Ps: 壁筋比(%); Pg: 付帯ラーメンの主筋全断面積のコンクリート全断面積に対する比(%); Pw: 付帯ラーメンのあばら筋比および帯筋比(%);  $\sigma_n$ : 柱の付加軸応力(kg/cm<sup>2</sup>)

## 4.) 復元力特性のモデル化

復元力特性モデルは、包絡線とそれとは独立に定まる履歴ループによりなるモデルとする。なお、以下

のモデル化に関しては正側加力時の資料に基づくことにした。まず、包絡線は次に示すような4つの領域にわけて、4本の折線で表す。a) 壁板の初ひびわれ点までの弾性領域。図-1,2は、最大荷重時せん断力に対する初ひびわれ時せん断力の比である、壁板の初ひびわれ時せん断力比 $Q_{cr}/Q_{max}$ および部材角 $R_{cr}$ とモルタル圧縮強度 $f_c$ との関係を描いたものである。図-1,2より判る如く、 $Q_{cr}/Q_{max}$ と $R_{cr}$ の値は壁筋比及びモルタル圧縮強度等の影響が顕著にみられないので、復元力特性モデルでは一律に $Q_{cr}/Q_{max}=0.25$ ,  $R_{cr}=0.25 \times 10^{-3}$ とした。b) 壁板の初ひびわれより部材角 $4 \times 10^{-3}$ までの領域。部材角 $4 \times 10^{-3}$ を分岐点としたのは先に述べた包絡線の性状によるものである。図-3は、部材角 $4 \times 10^{-3}$ におけるせん断力 $Q_{r4}$ の最大せん断力 $Q_{max}$ との比 $Q_{r4}/Q_{max}$ と壁筋比 $P_s$ との関係を描いたものである。図よりわかるように、柱に付加軸力のある場合は壁筋比が増すと、 $Q_{r4}/Q_{max}$ の値は大きくなる傾向がみられるが、柱に付加軸力のない場合はばらつきが大きく壁筋比の違いによる差が明確でないので、モデルでは図中に示すように柱に付加軸力のない場合は $Q_{r4}/Q_{max}=0.85$ 柱に付加軸力のある場合は $Q_{r4}/Q_{max}=0.143 \cdot P_s(\%) + 0.85$ とした。c) 部材角 $4 \times 10^{-3}$ 以後最大荷重までの領域。図-4は、最大荷重時部材角 $R_{max}$ と壁筋比 $P_s$ との関係を描いたものである。図-4は、ばらつきが大きく壁筋比や柱の付加軸力の有無等の違いによる差は明確でないので、モデルでは $R_{max}=6.50 \times 10^{-3}$ とした。先に述べた部材角 $4 \times 10^{-3}$ の点と $(R_{max}, 1.0)$ の点とを結ぶことによりこの領域の剛性を定める。d) 最大荷重以後の領域。最大荷重以後、履歴を制御することができた試験体について、ループ頂点の $(R, Q/Q_{max})$ と最大荷重点 $(R_{max}, 1.0)$ を結んで得られる剛性 $K$ と壁筋比の関係を描いたのが図-5である。モデルでは、図中に示した曲線 $K=-20/P_s$ とする。

履歴ループについては、次の3つの領域にわけて6本の折線で表すことにした。a) ループ頂点からスリップ開始点までの除荷領域。図-6は、除荷領域につ

表-2 復元力特性モデルパラメータ一覧

包絡線モデル			履歴ループモデル		
	本解析	S.D.S		本解析	S.D.S
a	$0.04 \cdot P_s \cdot n + 0.16$	0.3	kr keq	A	-0.31
b	$0.10 \cdot P_s \cdot n + 0.10$	-		B	1.99
c	$-0.02/P_s$	0.1	ka keq	A	0.16
k	16	-		B	0.96
z	26	10	S	0.10	0.15
			S	0.15	0.15

kr/keq-A $\cdot$ P<sub>s</sub>+B  
ka/keq-A $\cdot$ P<sub>s</sub>+B<sup>\*</sup>  
P<sub>s</sub>: 壁筋比(%), n: 柱に付加軸力あり(なし) n=1, (n=0)  
注: 比較として志賀博士により提案されたS.D.S.モデルの一例も併記する。

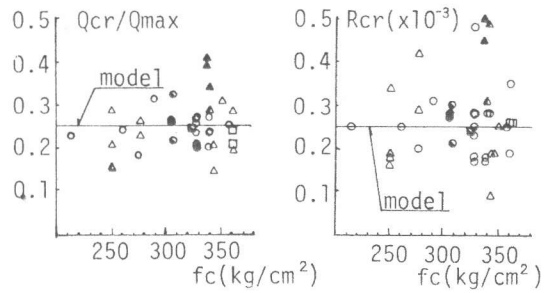


図-1  $Q_{cr}/Q_{max}$ - $f_c$  の関係 図-2  $R_{cr}$ - $f_c$  の関係

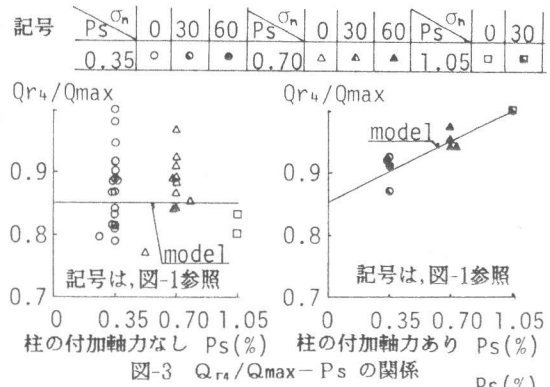


図-3  $Q_{r4}/Q_{max}$ - $P_s$  の関係

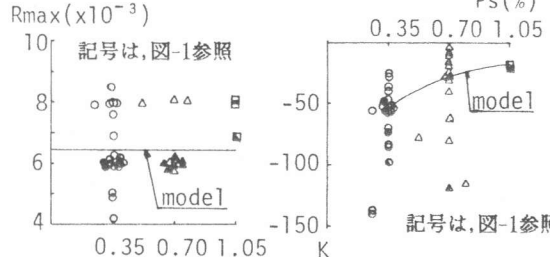


図-4  $R_{max}$ - $P_s$  の関係

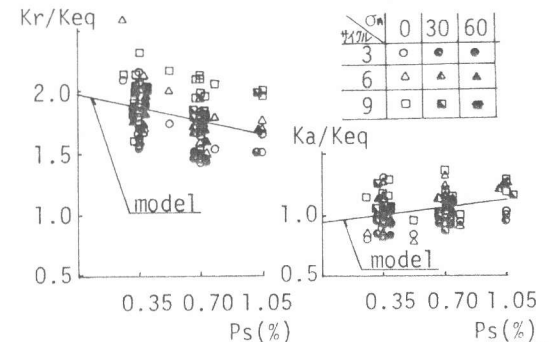


図-5  $K$ - $P_s$  の関係

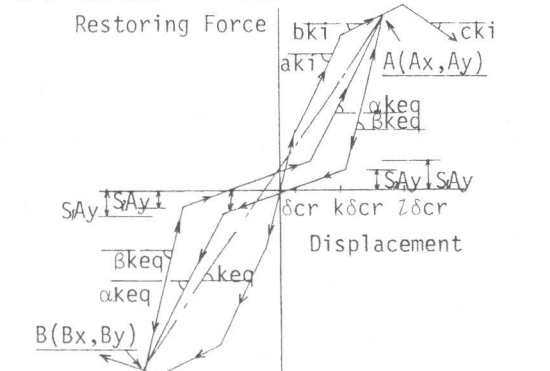


図-6  $K_r/K_{eq}$ - $P_s$  の関係



図-7  $K_a/K_{eq}$ - $P_s$  の関係



図-8 復元力特性モデル

いてループ頂点 $P_0$ と $P/P_0=0.1$ の点を結んで得られる剛性 $K_r$ を、ループ頂点と原点とを結んで得られる等価剛性 $K_{eq}$ で除した値 $K_r/K_{eq}$ と壁筋比の関係で示したものである。履歴ループのモデルでは、図中の直線で示す如く壁筋比 $P_s$ により定まる剛性とした。b) スリップ開始点よりひずみ硬化開始点までのスリップ領域。この領域は、除荷剛性と載荷剛性およびスリップ開始点高さとひずみ硬化開始点高さより定まる。

c) ひずみ硬化開始点よりループ頂点までの載荷領域。図-7は、ループ頂点と $P/P_0=0.15$ の点とを結んで得られる剛性 $K_a$ を等価剛性 $K_{eq}$ で除した値 $K_a/K_{eq}$ と壁筋比 $P_s$ の関係を示したものである。履歴ループのモデルでは、図中の直線で示す如く壁筋比により定まる剛性とした。

包絡線と履歴ループの組合せよりなる復元力特性モデルを図-8に示し、モデルのパラメータの一覧を表-2に示す。このモデルの包絡線は、第1~4分岐の勾配 $K_i, a \cdot K_i, b \cdot K_i, c \cdot K_i$  ( $K_i$ :初期剛性;  $a, b, c$ :定数)と壁板の初ひびわれ発生点変位 $\delta_{cr}$ , 第2折点変位 $k \cdot \delta_{cr}$ , 最大荷重点変位 $l \cdot \delta_{cr}$ で定まる。履歴ループは、ループ頂点とスリップ開始点および、ひずみ硬化開始点を結ぶことにより得られる折線の勾配と折点の高さにより定める。ここで折線の勾配は、正負各々の最大経験変位点を結ぶことにより得られる等価剛性 $K_{eq}$ により定める。なお、ループ上で速度の向きに変化を生ずるような非定常な履歴については本研究資料では明らかでないので、文献1)を参考に、履歴ループの最初の戻り剛性で戻り、ループ上をたどることとする。

### 5.) 応答解析

#### 5-1 解析条件

入力地震波は、表-3に示す通りであるが、いずれも最大加速度はそれぞれ980galに補正して用いた。数値計算は線形加速度法により時間間隔 $\Delta T=0.01$ 秒で行った。減衰は履歴による減衰のみとし、弾性時の固有周期は0.1~0.6秒の範囲として解析を行った。また、解析モデルは、先に述べたものとし、壁筋比 $P_s=0.35, 0.70, 1.05\%$ の3種類およびそれぞれについて柱の付加軸応力の有無により計6種類のものを対象とした。なお、せん断破壊の特性から最大耐力以後の履歴制御は多くの試験体で不可能であったことから、先に述べた如く最大耐力以後のモデルは必ずしも適切とは言えないので、最大耐力後に変形が進むような場合本解析結果は妥当ではない。

表 3 作用地震波の諸元

作用波	$T_i$	$mT_a$	$eP$	D
El Centro (NS)	15.0	2.12	0.1	履歴減衰のみ
Taft (NS)	15.0	9.10		
Taft (S69E)	20.0	3.72		
Tokyo101 (NS)	11.4	3.36	0.6	
Hachinohe (NS)	20.0	9.64		

記号  $T_i$ :作用時間(s);  $mT_a$ :最大加速度発生時間(s);  $eP$ :弾性時の固有周期; D:減衰

$\mu$  ductility factor

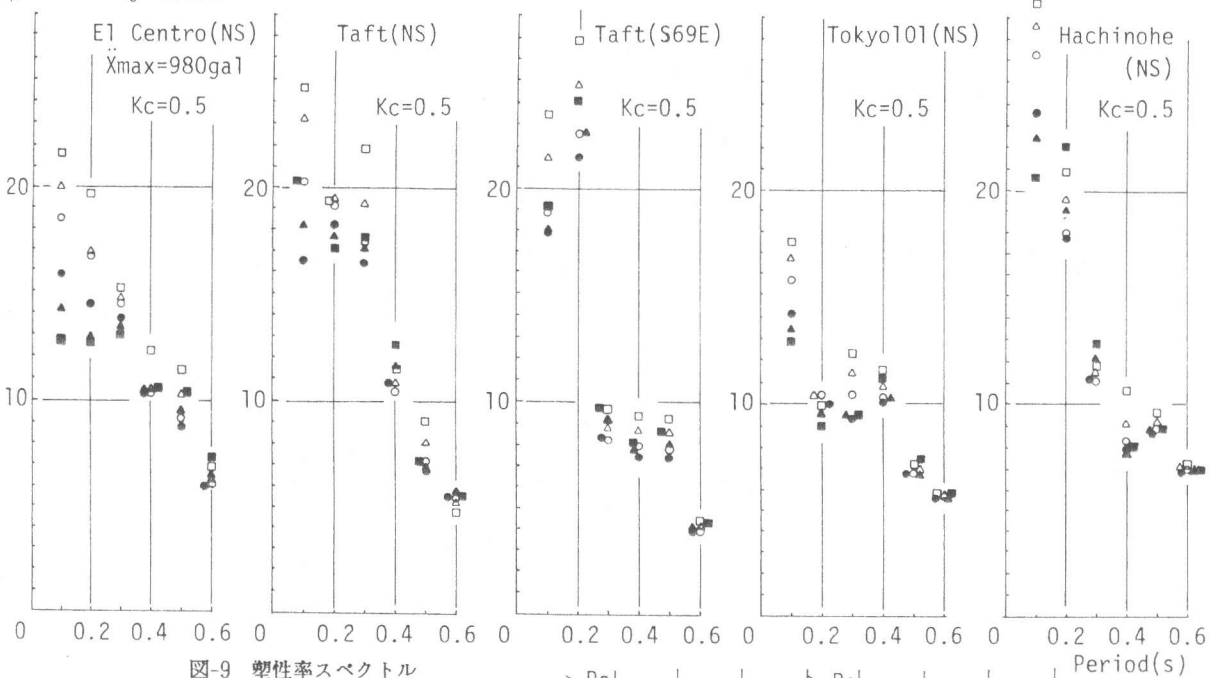


図-9 塑性率スペクトル

記号  $\begin{matrix} \square & \triangle & \circ \\ \hline 1.05 & 0.70 & 0.35 \end{matrix}$   $P_s$

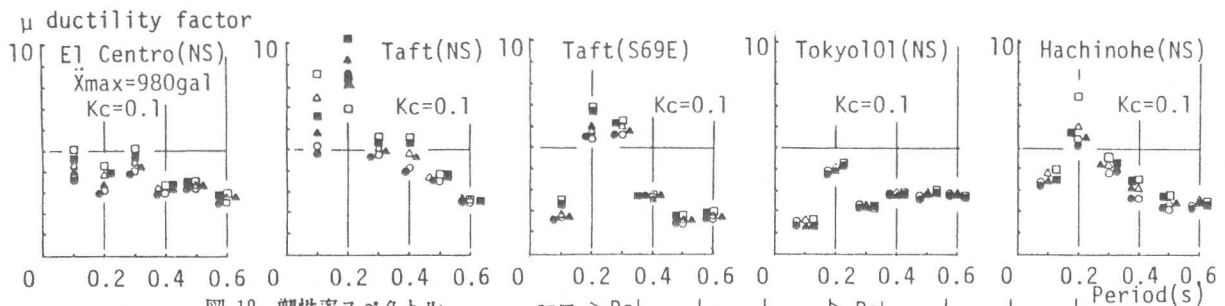
## 5-2 解析結果および考察

図-9は、入力波（最大980gal）に対して降伏震度を0.5に設定した場合の塑性率スペクトルを描いたものである。なお、塑性率は壁板の初ひびわれ時の変位を基準とした。入力波の最大加速度は便宜上980galに設定したものであって、この場合の結果は、最大入力加速度400gal程度の地震波に対し、壁板ひびわれ時の加速度を200gal程度に設定した場合と同様であると考えられる。図-9において、固有周期が0.4秒以上になると、パラメータの違いによる差が明確でなくなるので、主に固有周期が0.3秒以下の場合について述べる。図-9より、弾性時の固有周期が等しいものと考え、柱に付加軸力がない場合は、壁筋比が大きいもの程応答が大きくなっているのに対し、柱に付加軸力がある場合は、必ずしもその傾向は一定でない。一方、柱の付加軸力の有無による差は、一部（Taft(S69E)の0.3秒およびHachinohe(NS)の0.2秒）で逆転しているのを除けば、柱に付加軸力のない場合の方がある場合に比べて、応答が大きくなっている。

次に、個々のパラメータによる結果について入力地震波別に検討してみる。まず、柱に付加軸力がない場合、Taft(S69E)波による塑性率が固有周期0.2秒で最大になっているのを除けば、固有周期が0.1秒のときに塑性率が最大になっている。次に、柱に付加軸力がある場合は、壁筋比0.35%で、Taft(NS)波による塑性率が、0.2秒で最大になっている。壁筋比1.05%の場合は、El Centro(NS)波で固有周期0.3秒で、また、Hachinohe(NS)波では固有周期0.2秒で最大となっている。これらのことを除けば柱に付加軸力がない場合と同様な傾向を示している。しかしながら、全体的にみて、2次的なピークの位置が、柱の付加軸力の有無および入力地震波により異なっている。また、El Centro(NS)およびTokyo101(NS)波を入力した場合で柱に付加軸力のある場合およびTokyo101(NS)波で柱に付加軸力がなく固有周期0.2秒の場合を除き、固有周期0.2秒以下ではほぼ塑性率が16(部材角 $4 \times 10^{-3}$ 程度)以上となっており、Taft(NS)波では固有周期0.3秒でも塑性率は16を上回っている。このことより、入力地震波に対する降伏震度を0.5程度に設定した場合は、ほぼ最大耐力に達しているものと考えられ、本報で対象としているような、せん断破壊型の耐震壁の復元力が主成分となっている構造物では、せん断破壊の特性から特に注意が必要である。

図-10は、入力地震波に対する降伏震度を1.0に設定した場合の塑性率スペクトルを描いたものである。これらの解析結果では、柱の付加軸力の有無および壁筋比の違いによる差は明確でないが、El Centro(NS)波を入力した場合、固有周期0.1秒および0.3秒で塑性率がピークになっており、また、Taft(NS)波を入力した場合は、壁筋比1.05%で柱の付加軸力がない場合に固有周期0.1秒のときに塑性率がピークとなっている。これらを除けば、固有周期が0.2秒でピークとなっているのがわかる。

以上の結果より、せん断破壊型の耐震壁の復元力が主成分となっている構造物の地震応答は、柱の付加軸力、壁筋比および降伏震度などにより、その応答性状が異なっていることが判る。柱の付加軸力の有無および壁筋比をパラメータとして持つ本解析モデルは、せん断破壊型の耐震壁の復元力が主成分となっている構造物の地震動時の弾塑性性状を把握する上で、より適切な復元力特性モデルであると思われる。



## 6.) 結び

以上、せん断破壊する耐震壁の復元力特性のモデルを提案し、その応答解析について述べた。解析結果より、柱の付加軸力の有無が耐震壁の応答性状におよぼす影響が比較的大きいことおよび壁筋比の違いによりその応答特性が異なることが明かとなった。

以上の点より、せん断破壊型の耐震壁の復元力が主成分となっている構造物の地震時の応答を考える上で柱の付加軸力および壁筋比は、重要な影響因子であると考えられる。

参考文献 1) 志賀敏男他、日本建築学会大会梗概集(昭和49年10月)No.2087~2088

2) 谷 資信他、日本建築学会論文報告集(昭和47年12月)No.202