

論文 側柱が伸びた鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力に及ぼす側柱補強筋と壁筋の影響

金谷 修平*1・溝口 光男*2・荒井 康幸*2・栗田 卓*3

要旨: 鉄筋コンクリート耐震壁が偏心した引張軸力を受けて側柱が大きく伸びた場合のせん断耐力に関し、側柱補強筋と壁筋を変えた耐震壁について、水平力に対して圧縮側となる側柱脚部に大きな伸びを与えた後に破壊させる実験を行った。その結果、圧縮側柱脚部が伸びた場合のせん断耐力は、圧縮軸力を受ける場合と同様に、柱補強筋比による影響は少なく、壁筋比の大小による影響が大きいことを示した。

キーワード: 鉄筋コンクリート, 耐震壁, せん断耐力, 伸び, 柱補強筋, 壁筋

1. はじめに

高層建物内に配置される連層耐震壁の一階では、水平力に対して圧縮側となる側柱に、その直交方向の曲げの影響による大きな引張力を受けることがある¹⁾。また、L形壁のような立体耐震壁や境界梁で連結された並列壁の引張側の耐震壁も同様で、圧縮側の側柱に引張力を受けることがある。このような耐震壁では、側柱軸筋が引張降伏することも考えられる。筆者らは、水平力に対して圧縮側となる側柱に引張力を加えて、この側柱の軸筋が引張降伏する伸び以上に柱脚部の伸びを大きくした耐震壁の加力実験を行い、側柱脚部の伸びが大きくなるとせん断耐力は低下することを示した^{2)~7)}。本研究では、圧縮側柱脚部の伸びが大きい場合についてせん断耐力に及ぼす柱補強筋と壁筋の影響について検討した。

力時の軸方向応力度 σ_0 を -1.5N/mm^2 とし、圧縮側柱 (C柱) 脚部に大きな伸び v を与えてせん断破壊させた試験体である。ここで、圧縮側柱 (C柱) 脚部の伸び v は柱脚部の基礎梁から高さ 200mm までの区間の値とし、その値は拙論²⁾を基に伸びが大きい場合として 4mm と設定した。試験体名は、IH で I 形断面、壁内法高さ 1500mm であることを示し、ハイフンの後の文字と数字で、壁補強筋比の大きさ (文字 M : 中, 文字 H : 大), 柱主筋本数 (数字 6 : 6 本), 2-4 ϕ に換算した柱補強筋間隔 (数字 1 : 1cm, 数字 5 : 5cm), 壁全体の軸力の向き (文字 C : 圧縮, 文字 T : 引張), 与える柱脚の伸び (T に続く数 4 : 4mm) を表している。試験体の設計は、正加力でせん断

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、図-1 に示すような上下に梁を有する鉄筋コンクリート壁模型 4 体とした。試験体の一覧を表-1 に示す。試験体の寸法は全試験体共通とし、壁全長 1300mm、壁内法高さ 1500mm、柱断面 150mm 角である。壁厚は 50mm を目標としたが、製作した各試験体の壁厚 (実測値 28 点の平均値) は表-1 に示す値となった。配筋は側柱の軸鉄筋を全試験体共通として、6-D13 (軸筋比 $p_g=3.38\%$) を使用し、柱補強筋を 2-D6@35 (柱補強筋比 $p_w=1.21\%$)、壁筋を縦横とも 4 ϕ @40 (壁筋比 $p_s=0.62\%$) とした試験体 (図-1 左半分) と、柱補強筋を 2-4 ϕ @50 ($p_w=0.33\%$)、壁筋を縦横とも 4 ϕ @30 ($p_s=0.82\%$) とした試験体 (図-1 右半分) の 2 種がある。IH-M61C と IH-H65C の 2 体は、軸圧縮応力度 σ_0 (=壁の全軸力 N/壁全断面積) を 2N/mm^2 として圧縮力を加えた比較のための試験体である。IH-M61T4 と IH-H65T4 の 2 体は、正加

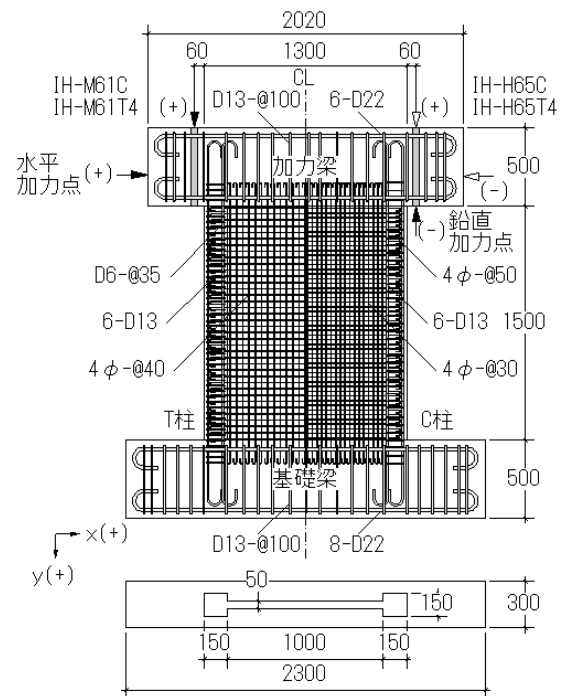


図-1 試験体形状と配筋 (単位: mm)

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科建築社会基盤系専攻 (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域教授 博士 (工学) (正会員)

*3 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻

表-1 試験体一覧

試験体	壁厚 (mm)	柱配筋		壁筋	加力 方向	v (mm)	軸応力度 σ_0^* (N/mm ²)	軸力 N* (kN)	設計時強度計算値 (kN)			
		軸筋	補強筋						P ₁ **	P ₂ **	cQbu	cQsu
IH-M61C	48	6-D13 pg=3.38%	2-D6@35 pw=1.21%	4φ@40 ps=0.62%	±	—	2.0	190	95	95	283	237
IH-M61T4	49				+	—	-1.5	-143	117	-259	314	230
					-	4.0	-1.0	-95	78	-173	72	234
IH-H65C	51	6-D13 pg=3.38%	2-4φ@50 pw=0.33%	4φ@30 ps=0.82%	±	—	2.0	190	95	95	290	247
IH-H65T4	50				+	—	-1.5	-143	125	-268	328	240
					-	4.0	-1.0	-95	83	-178	74	244

* 圧縮を正とする ** 符号は図-1の座標に従う

表-2 コンクリート性状

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数* (N/mm ²)
IH-M61C	24.9	2.60	20500
IH-M61T4	23.4	2.53	21700
IH-H65C	26.1	2.64	21800
IH-H65T4	26.5	3.07	21500

* 1/3 割線弾性係数

表-3 鉄筋性状

名称	断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断伸び (%)	備考
D22	387.1*	394	573	21.9	梁主筋
D13	126.7*	367	526	28.8	柱主筋・梁助筋
D6	31.67*	329**	530	30.4	柱帯筋
4φ	12.3	224**	323	35.2	壁筋・柱帯筋

* 公称断面積 ** 0.2% 耐力

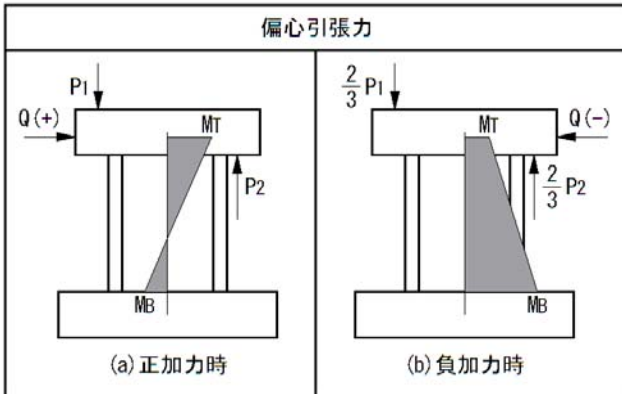


図-2 モーメント分布

破壊することを目標とし、負加力で曲げ破壊するように軸方向応力度 σ_0 を正加力の 2/3 (-1.0N/mm²) とした。設計時の曲げとせん断の両強度計算値 cQbu, cQsu を表-1 に示す。cQbu は、壁脚モーメントを下に示す式(1)⁸⁾ の値と仮定し、加力梁に加えた鉛直力 P₁, P₂ による壁頂モーメントを考慮して計算したせん断力である。偏心引張力を加えた試験体の P₁, P₂ の値は、図-2 のように正加力の壁頂モーメント M_T が、式(1)の曲げ強度略算値 Mbu と等しくなるように定めた。

$$M_{bu} = 0.9a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.4a_w \cdot \sigma_{wy} \cdot D + 0.5N \cdot D \left(1 - \frac{N}{B_c \cdot D \cdot F_c} \right) \quad (1)$$

ここに、 a_t : 側柱主筋全断面積、 σ_y : 側柱主筋降伏点強度、 a_w : 壁縦筋全断面積、 σ_{wy} : 壁縦筋降伏点強度、 D : 壁全長、 B_c : 側柱幅、 N : 軸方向力、 F_c : コンクリート圧縮強度

cQsu は下に示す式(2)⁸⁾ のせん断強度計算値であり、シアスパン M/Q は cQbu を求めたモーメント分布から計算した。

$$cQ_{su} = \left\{ \frac{0.068 p_{te}^{0.23} (F_c + 17.7)}{\sqrt{M/(Q \cdot D) + 0.12}} + 0.846 \sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh} + 0.1 \sigma_0} \right\} b_e \cdot j \quad (2)$$

ここに、 p_{te} : 等価引張主筋比 (= $100a_t / (b_e \cdot d)$)、 $M/(Q \cdot D)$: シアスパン比、 σ_{wh} : 壁横筋降伏点強度、 p_{wh} : b_e を壁厚と考えた壁横筋比、 σ_0 : 平均軸方向応力度、 b_e : 等価壁厚、 $j = 7/8 \times d$ 、 $d = D - D_c/2$ 、 D_c : 側柱せい

なお、式(1)および式(2)は圧縮軸力を対象とした式であるが、引張軸力下の計算式が見られないのでこれらの式を用いており、引張応力の場合には N と σ_0 に負の値を代入した。コンクリートは、普通コンクリート(粗骨材の最大寸法: 13mm)を使用し、設計基準強度は 21N/mm² とした。コンクリートと鉄筋の性状は表-2、表-3 にそれぞれ示す。

2.2 加力方法及び計測方法

加力装置の側面図を図-3 に示す。加力は、3 台のアクチュエータを図のように配置して行った。これらのアクチュエータの定格容量は、アクチュエータ 1 では圧縮 200kN、引張 150kN、アクチュエータ 2,3 では圧縮 500kN、引張 300kN である。水平方向の加力は、変位漸増繰り返しとし、負方向から先に加力した。変位振幅は、圧縮軸力を加えた IH-M61C と IH-H65C の 2 体では壁頂部の水平方向部材角 Rx (=加力梁下端で計測した水平変形/壁内法高さ) を 1~3 サイクル時はピーク時でそれぞれ 1, 2, 4×10⁻³ ラジアンとし、-4 サイクル目はアクチュエータ 3 の容量一杯の荷重を加えた後、+4 サイクル目に最大荷重

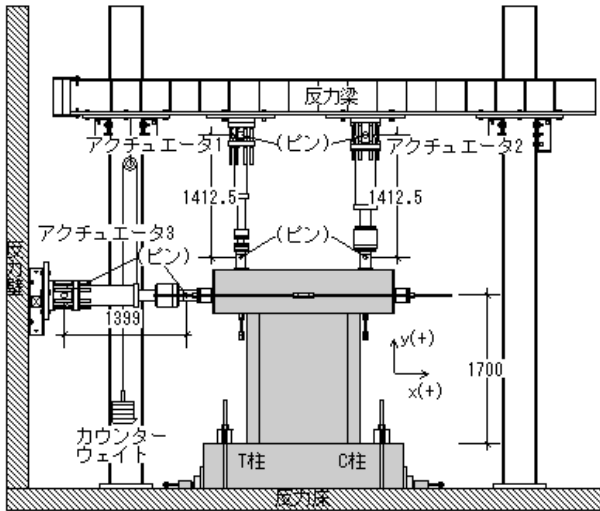


図-3 加力装置 (単位: mm)

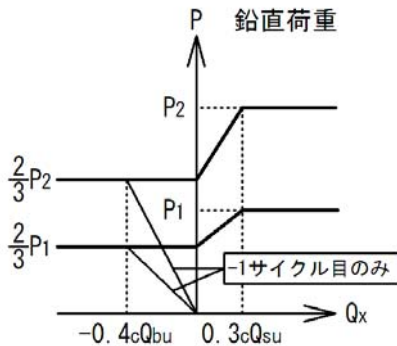


図-4 鉛直荷重の設定

を確認するまで加力を行った。C柱脚部を伸ばしてせん断破壊させる IH-M61T4 と IH-H65T4 の 2 体では、1, 2 サイクル目は圧縮軸力を加えた試験体と同様に加力したが、-3 サイクル目に C 柱脚部の伸びが所定の伸び $v=4\text{mm}$ となるまで負方向に加力した後、+3 サイクルで最大荷重を確認するまで加力を行った。IH-M61C と IH-H65C の圧縮軸力は、表-1 に記した均等な鉛直力 P_1 , P_2 をアクチュエータの加力点に下向きに加えた。IH-M61T4 と IH-H65T4 の引張軸力は、負加力では曲げ破壊、正加力ではせん断破壊させるために正負加力で異なる値とし、正加力の水平力 Q に対して圧縮側となる C 柱に大きな引張力が加わるようにするため、表-1 に示す鉛直荷重 P_1 , P_2 を図-4 に示すように設定した。なお、正負加力の最大荷重は軸力一定となった後に得られるように考慮し、鉛直力を変化させている。図中の cQ_{bu} , cQ_{su} は表-1 に示す曲げとせん断の強度計算値である。変位の計測は、壁頂の加力梁下端の水平変形と C 柱脚部の伸び (基礎梁から高さ 200mm 位置の柱中心の鉛直変位) をデジタル変位計で計測した。また、側柱の柱頭と柱脚の軸鉄筋のひずみ度をワイヤーストレインゲージで計測した。

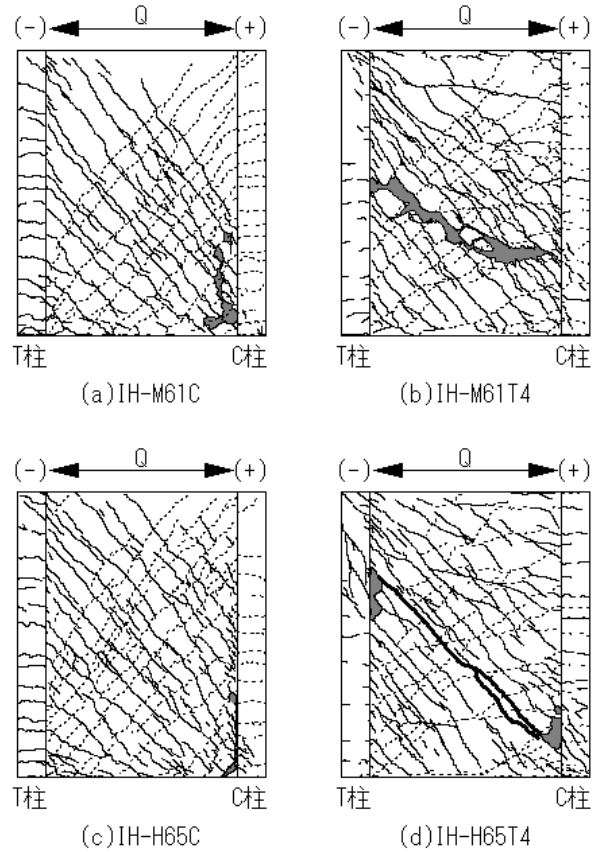


図-5 ひび割れ図

3. 実験結果

3.1 ひび割れ及び破壊状況

実験終了時のひび割れ及び破壊状況を図-5 に示す。図中の実線は正加力時、破線は負加力時に発生したひび割れを示す。また、太線は大きく開口したひび割れ、黒塗り部はコンクリートの剥落部分を示す。圧縮軸力を加えた IH-M61C と IH-H65C の 2 体では、正負両加力とも壁板に対角方向の斜めひび割れが多数発生した。柱補強筋比の大きい IH-M61C ($p_w=1.21\%$) では、+4 サイクルに T 柱脚部の軸筋が降伏したため、T 柱と T 柱側の壁板下部のひび割れが徐々に開口し、最終時には、C 柱側の壁板下部のコンクリートが急激に剥落した。柱補強筋比の小さい IH-H65C ($p_w=0.33\%$) では、+4 サイクルに T 柱脚部の軸筋が降伏し、IH-M61C とほぼ同様のひび割れ状況となったが、最大荷重後は、壁板下部の C 柱との境界付近でコンクリートが徐々に剥落した。C 柱脚部を伸ばした IH-M61T4 と IH-H65T4 の 2 体では、負加力が発生した壁板下部の斜めひび割れの角度が、正加力に発生したひび割れと比較して緩やかとなっている。また、正加力のひび割れは、圧縮軸力を加えた試験体と比較して、壁板上部の斜めひび割れの角度が緩やかとなっている。柱補強筋比の大きい IH-M61T4 ($p_w=1.21\%$) では、+3 サ

イクルに壁板中央の緩やかな傾きの斜めひび割れが開口し、その後、壁板中央のコンクリートが剥落した。柱補強筋比の小さい IH-M61T4 ($p_w=0.33\%$) では、+3 サイクルに C 柱脚部と T 柱上部に斜めひび割れが発生し、+1 サイクルに発生した壁板中央の大きな斜めひび割れが開口し、その後、開口したこの斜めひび割れの T 柱側と C 柱側の両端の壁板でコンクリートが剥落した。

3.2 荷重-変形曲線

水平方向の荷重-部材角曲線を図-6 に示す。図中の白丸及び黒丸は、それぞれ正加力時、負加力時の最大荷重を示す。圧縮軸力を加えた IH-M61C と IH-H65C の 2 体の正加力時の荷重-部材角曲線は、両試験体とも、+4 サイクルで T 柱脚部の軸筋が降伏したため、最大荷重時までほぼ同様の曲線となっている。最大荷重後の曲線は、

両試験体とも、壁板下部の C 柱との境界付近でコンクリートが徐々に圧壊して荷重が低下し、IH-M61C では、最終時に C 柱側の壁板下部のコンクリートの剥落によって急激な耐力低下を示した。C 柱脚部を伸ばした IH-M61T4 と IH-H65T4 の 2 体の荷重-部材角曲線は正加力の最大荷重時までほぼ同様の曲線となっている。両試験体とも、+3 サイクルに荷重上昇が緩やかとなっているものの T 柱軸筋は降伏していない。最大荷重後の曲線は、IH-M61T4 では、壁板中央の緩やかな傾きの斜めひび割れの開口と、コンクリートの剥落に伴って、徐々に荷重が低下した。

IH-H65T4 では、壁板中央の斜めひび割れの開口と、そのひび割れの T 柱側と C 柱側の両端の壁板コンクリートの剥落によって、徐々に荷重が低下した。

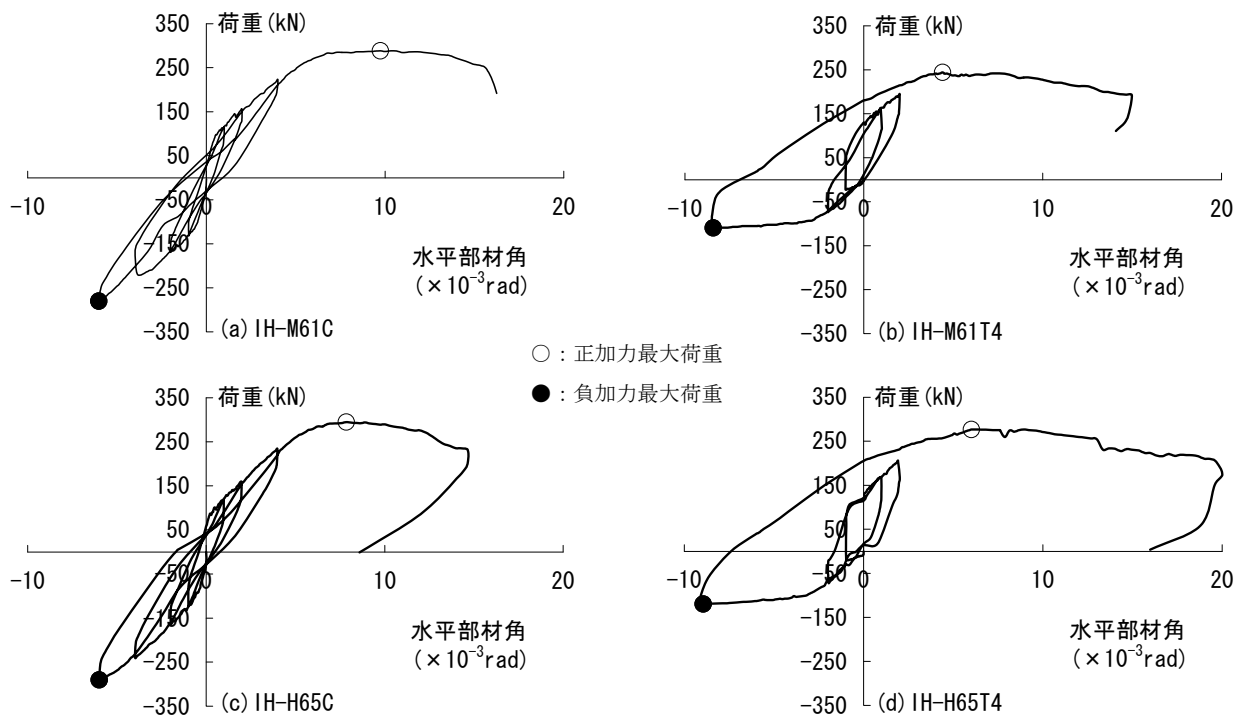


図-6 荷重-変形曲線

表-4 最大耐力

	試験体名	最大荷重時実験値				計算値			比率			破壊形式
		tQmax (kN)	Rx max ($\times 10^{-3}$ rad)	v max (mm)	N* (kN)	cQbu (kN)	cQsu (kN)	Vu (kN)	tQmax/cQbu	tQmax/cQsu	tQmax/Vu	
正加力時	IH-M61C	288	9.74	-0.64	190	284	259	231	1.01	1.11	1.25	曲げ
	IH-M61T4	244	4.41	4.40	-141	314	252	230	0.78	0.97	1.06	せん断
	IH-H65C	295	7.85	-0.63	190	291	280	268	1.01	1.05	1.10	曲げ
	IH-H65T4	277	6.01	3.81	-143	327	277	269	0.85	1.00	1.03	せん断
負加力時	IH-M61C	280	-6.02	1.03	190	284	260	231	0.99	1.08	1.21	-
	IH-M61T4	110	-8.41	4.59	-93	107	167	124	1.03	0.66	0.89	曲げ
	IH-H65C	290	-6.00	0.71	191	291	280	268	1.00	1.04	1.08	-
	IH-H65T4	120	-8.94	4.54	-94	112	189	151	1.07	0.63	0.79	曲げ

tQmax : 最大耐力実験値, Rxmax : 水平部材角, vmax : C 柱脚部の伸び, N : 軸力
cQbu : 式(1)の計算値, cQsu : 式(2)の計算値, Vu : 式(3)の計算値

* 圧縮を正とする

3.3 最大耐力

最大耐力実験値 tQ_{max} と強度計算値を表-4 に示す。表には最大荷重時の軸力 N 、水平部材角 Rx_{max} 、および C 柱脚部（基礎梁から高さ 200mm までの柱心区間）の伸び v_{max} も示した。計算値 cQ_{bu} と、 cQ_{su} は前述の式(1)、式(2)の計算値であり、 M/Q 、 N 、 σ_0 には、実験で正負の最大荷重時に得られた値をそれぞれ用いた。 V_u は式(3)¹⁾によるせん断強度計算値である。

$$V_u = t_w \cdot l_{wb} \cdot p_s \cdot \sigma_{sy} \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w \cdot l_{wa} \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad (3)$$

ここに、 t_w : 壁厚、 l_{wb} : トラス機構の等価壁長さ (= $l'_w + D_c + \Delta l_{wb}$)、 l_{wa} : アーチ機構の等価壁長さ (= $l'_w + D_c + \Delta l_{wa}$)、 l'_w : 壁板の柱内法長さ、 D_c : 側柱せい、 Δl_{wb} 、 Δl_{wa} : 壁板の有効長さの増分、 p_s : 壁横筋比、 σ_{sy} : 壁横筋降伏点強度、 $\cot \phi = 1.0$ 、

$$\tan \theta = \sqrt{(h_w/l_{wa})^2 + 1} - h_w/l_{wa},$$

$$\beta = (1 + \cot^2 \phi) p_s \cdot \sigma_{sy} / (v \cdot \sigma_B),$$

$$v = 0.7 - \sigma_B / 200, \quad h_w : \text{加力点高さ},$$

$$\sigma_B : \text{コンクリート圧縮強度},$$

図-7 に、正加力実験値 tQ_{max} をせん断強度計算値 V_u で除した比率と圧縮側柱脚部の伸び v との関係を示す。図には比較のため、既往の実験結果^{3)~7)}も合わせて示した。同図をみると、圧縮側柱脚部の伸びが大きくなると伸びがない場合と比較して、 tQ_{max}/V_u は最大で 43% 減少しているものの、C 柱脚部の伸びによる耐力の低下割合には、大きなばらつきがみられる。本論と同一の試験体寸法で、コンクリート強度が同程度の試験体についての実験結果^{3), 5)~7)}と、本論の実験結果を合わせて、側柱補強筋と壁筋の影響について検討する。図-8 に、正加力時の最大荷重実験値と柱補強筋比 $pw \times$ 柱補強筋降伏点強度 σ_{wy} の関係を示す。図をみると、側柱脚部を伸ばした試験体（白抜き記号）の最大荷重は、壁筋比 ps にかかわらず、 $pw \cdot \sigma_{wy}$ が大きくなると僅かに大きくなる傾向を示しており、圧縮軸力試験体（黒塗り記号）の場合とほぼ同様の傾向を示している。また、 $pw \cdot \sigma_{wy}$ の大小にかかわらず、圧縮軸力試験体と側柱脚部を伸ばした試験体の最大荷重の差は、壁筋比 ps の小さいものの方が大きくなっている。図-9 に、正加力時の最大荷重実験値と壁筋比 $ps \times$ 壁筋降伏点強度 σ_{sy} の関係を示す。図をみると、側柱脚部を伸ばした試験体（白抜き記号）の最大荷重は、柱補強筋比 pw にかかわらず、 $ps \cdot \sigma_{sy}$ にほぼ比例して大きくなっており、その増大割合は、圧縮軸力試験体（黒塗り記号）と大差ないものとなっている。なお、 $pw=0.33\%$ の試験体については、他の試験体と比較して最大荷重が小さくなっているが、これは、最大荷重時の側柱脚部の伸びが他よりも大きかったことが原因と

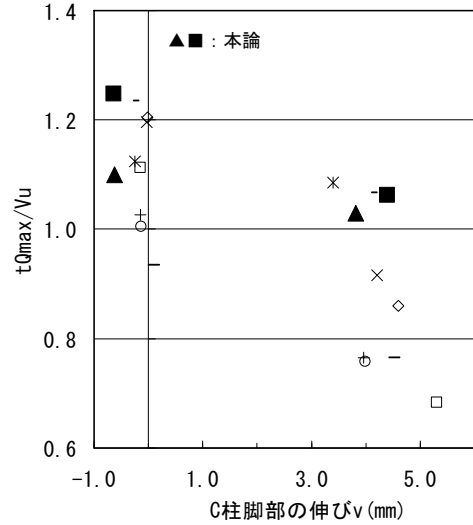


図-7 正加力最大荷重実験値/計算値と伸び

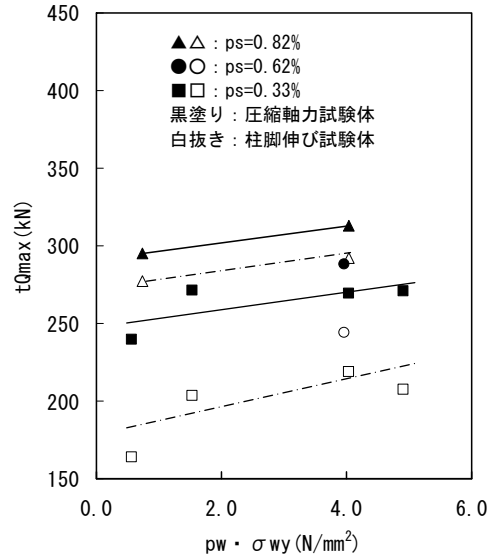


図-8 $pw \cdot \sigma_{wy}$ をパラメータとした比較

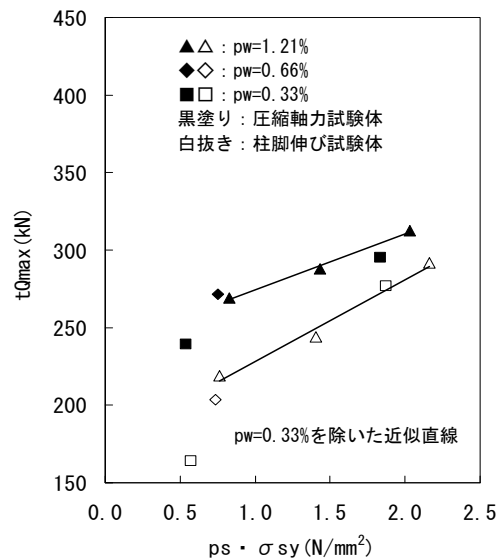


図-9 $ps \cdot \sigma_{sy}$ をパラメータとした比較

考えられる。側柱脚部を伸ばした試験体の最大荷重が、圧縮軸力試験体と同様に $ps \cdot \sigma_{sy}$ に比例して大きくなっているため、側柱脚部が伸びた場合のトラス機構によるせん断力 V_t は、圧縮軸力の場合と同様であると仮定して、最大荷重実験値 tQ_{max} から V_t を差し引いた残りをアーチ機構によるせん断力 $V_a (=tQ_{max}-V_t)$ と考えてみる。この V_a から求められる側柱によるアーチ機構の壁長さの増分 Δl_{wa} と $ps \cdot \sigma_{sy}$ との関係は $pw=1.21\%$ の場合について示すと、図-10 のようになる。ここで、トラス機構の側柱による壁板の有効長さの増分 Δl_{wb} は、柱に引張軸力が加わっていることを考慮して 0 とした。この場合でのアーチ機構の壁長さの増分 Δl_{wa} は、 $ps \cdot \sigma_{sy}$ の増減による変化を、側柱の拘束力によるものとして考える。図をみると、側柱脚部を伸ばした試験体のアーチ機構の壁長さの増分は、 $ps \cdot \sigma_{sy}$ が小さい場合には圧縮軸力試験体に比べて大幅に小さく、 $ps \cdot \sigma_{sy}$ が大きい場合には圧縮軸力試験体との差が小さく、側柱による拘束力が圧縮軸力の場合と大差ない結果となっている。コンクリート圧縮強度の有効係数や、アーチ機構の圧縮束の角度の影響もあると思われるものの、側柱脚部が伸びた耐震壁のせん断耐力には、壁筋比の大小の影響が大きいと考えられる。

4. まとめ

柱補強筋と壁筋の異なる鉄筋コンクリート耐震壁について、水平力に対して圧縮側となる側柱脚部を大きく伸ばした加力実験を行い、せん断耐力に及ぼす側柱補強筋と壁筋の影響について検討した。その結果、圧縮側柱脚部が伸びた場合のせん断耐力は、圧縮軸力を受ける場合と同様に、柱補強筋比による影響は少なく、壁筋比の大小による影響が大きいことを示した。今後、コンクリート圧縮強度の有効係数やアーチ機構の圧縮束の角度などを含め、せん断耐力の低下についてさらに検討したい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999
- 2) 溝口光男，荒井康幸，坂本 亨：偏心引張力がRC耐震壁のせん断耐力に及ぼす影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.607-612，2003.7

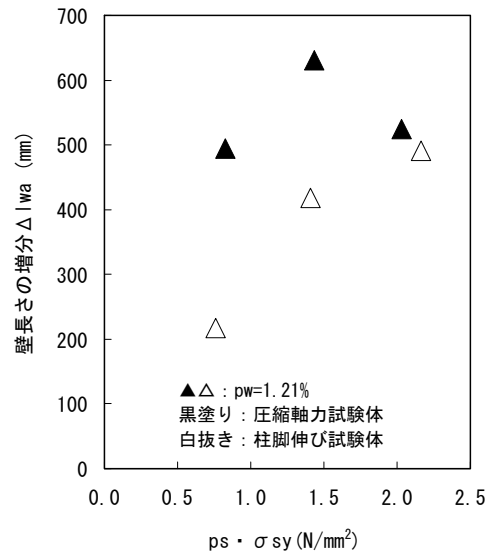


図-10 アーチ機構による壁長さの増分

- 3) 溝口光男，荒井康幸：側柱の伸びが鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.601-606，2004.7
- 4) 溝口光男，荒井康幸：高強度コンクリートを用いたRC耐震壁のせん断耐力に及ぼす側柱の伸びの影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.445-450，2006.7
- 5) 溝口光男，荒井康幸：鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力に及ぼす側柱の伸びと帯筋比の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.361-366，2007.7
- 6) 溝口光男，荒井康幸，安達清人：鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力に及ぼす側柱の伸びと太さの影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.427-432，2008.7
- 7) 溝口光男，荒井康之，安達清人，栗田卓：側柱が伸びた柱補強筋比の大きな鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力に及ぼす壁筋の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.445-450，2009.7
- 8) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能（1990），p.401，1990