

論文 側柱が伸びた鉄筋コンクリートL形断面耐震壁のせん断耐力

下川部 皓紀*1・溝口 光男*2・荒井 康幸*2

要旨: 建物内に含まれる耐震壁は、L形やコ形などの立体壁の形状で配置されている場合が少なくない。このような立体壁が水平力を受け、水平力に対して圧縮側にある側柱が直交する壁から境界応力の影響を受けて大きく伸びた場合のせん断耐力に関し、壁筋比を大きくして側柱の帯筋比を変化させたL形断面耐震壁について実験を行った。その結果、L形壁では側柱が伸びた場合のせん断耐力は伸びない場合と比べて低下し、平面壁と同様に帯筋比による影響はほとんどみられないことを示した。

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

1. はじめに

高層建物内に配置される連層耐震壁はL形やコ形などの立体壁の形状で配置されている場合が少なくない。このような立体の耐震壁の下層では、一般に水平力を受けると曲げの影響とともに他に直交する壁から境界応力を受け、水平力に対して圧縮側となる側柱に大きな引張力が作用し、側柱脚部が引張降伏以上に大きく伸びることがあると考えられる。筆者らは、これまでに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平面壁の加力実験を行い、側柱脚部の伸びが大きくなると側柱が伸びない場合に比べてせん断耐力は低下することを明らかにした^{1),2),3),4),5),6),7),8)}。

本研究では、L形断面耐震壁（以後、L形壁と呼ぶ）について、側柱脚部を大きく伸ばした実験を行い、側柱の帯筋比がL形壁のせん断耐力に与える影響について検討する。

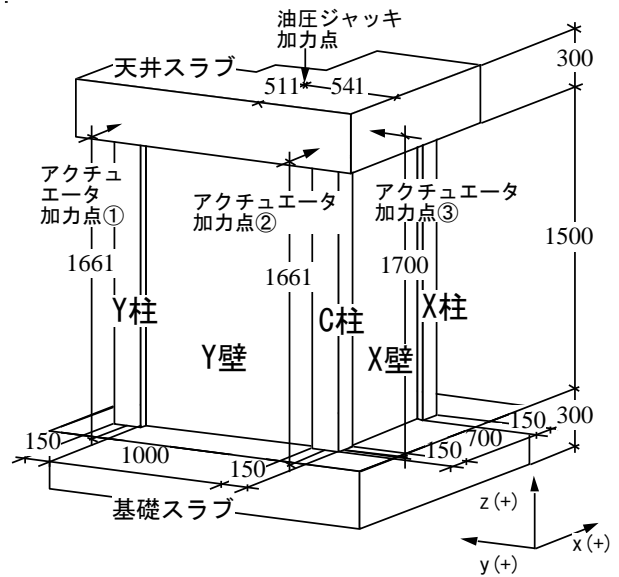


図-1 試験体寸法及び各部名称（単位：mm）

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の壁断面は、壁板の周囲に柱形を有する不等辺のL字形とし、壁頂部には鉛直力を加えるための天井用スラブを設けた。試験体数は4体とし、試験体の寸法は全試験体共通とした。図-1に各部の寸法および名称を示す。また、表-1に試験体一覧を示す。試験体は比較のため、Y壁を平面壁実験を行った試験体と同寸法とし、Y壁の面内方向のせん断耐力を得ることを目標としてY壁がせん断破壊し、X壁は曲げ破壊するように設計した。壁全長はY壁を1300mm、X壁を1000mmとし、柱断面は150mm角とした。壁厚はY壁を50mm、X壁を100mmとして計画したが、製作した各試験体の壁厚（X壁は21カ所の平均値、Y壁は28カ所の平均値）は表-1に示す

表-1 試験体一覧

試験体	壁厚(mm)		軸筋比 Pt (%)		帯筋比 Pw (%)		壁筋比 Ps (%)	
	X壁	Y壁	X,C柱	Y柱	X柱	C,Y柱	X壁	Y壁
LH-M41T4	102	51	1.26	1.89	0.33	1.21	0.35	0.71
LH-M41C	99	45					0.35	0.71
LH-M45T4	105	48				0.33	0.35	0.71
LH-M45C	104	54					0.35	0.71

値となったに示す値となった。柱の配筋は、軸鉄筋を全試験体共通とし、Y柱では8-D13 ($P_g=4.5\%$)、C柱およびX柱では4-D13 ($P_g=2.25\%$)とした。LH-M41T4とLH-M41Cの2体の側柱の帯筋は、Y柱とC柱では2-D6@35 ($P_w=1.21\%$)、X柱では2-4φ@50 ($P_w=0.33\%$)とし

*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)

た。LH-M45T4 と LH-M45C の 2 体の側柱の帯筋はすべての柱で 2-4 φ @50($P_w=0.33\%$)とした。壁の配筋は Y 壁, X 壁ともに 4 φ @35($p_{sy}=0.71\%$, $p_{sx}=0.35\%$)とし全試験体共通とした。LH-M41T4 と LH-M45T4 の 2 体は, C 柱脚部が伸びた状態で Y 壁がせん断破壊するように実験した試験体である。この C 柱脚部の伸び v は平面壁の実験^(1),2),3),4),5),6),7)8)と同様とし, 基礎スラブから高さ 200mm の位置で 4mm とした。LH-M41C と LH-M45C の 2 体は C 柱脚部を伸ばすような加力を行わない比較用の試験体である。使用したコンクリートは, 早強ポルトランドセメントを用いた普通コンクリート(粗骨材の最大寸法: 13 mm)とし, 設計基準強度は 26 N/mm² とした。コンクリートの性状は表-2 に, 鉄筋の性状は表-3 にそれぞれ示す。

2. 2 加力及び計測方法

加力装置の平面図を図-2 に示す。x, y 両方向の水平加力は, 水平面上に配置された 3 台のアクチュエータによって行い, アクチュエータ②, ③で x, y 両方向に所定の強制変形を与えると同時にアクチュエータ①で捩じれが生じないようにした。鉛直力は油圧回路にリリース弁を取り付けて, 常に一定の圧縮力を維持できる油圧ジャッキにより, 壁の図心位置に加えた。この鉛直力の大きさは全試験体共通とし, 軸圧縮応力度($\sigma_o = \text{鉛直力} / \text{壁全断面積}$)が 1.0N/mm²となる値(188kN)とした。図-3 に加力変位図を示し, 図中の符号がついた数字はサイクル数を示す。C 柱脚部を伸ばした LH-M41T4 と LH-M45T4 の 2 体は, 図の赤線で示すようにはじめに x 正方向に x 方向部材角が 1×10^{-3} ラジアンとなるように加力後, y 方向にピーク時の部材角が 1×10^{-3} ラジアンとなるように正負加力を行った。次に, x 正方向に所定の荷重(X 壁の曲げ耐力計算値の 80%)に到達するまで加力した後, y 方向へピーク時の部材角が $1, 2 \times 10^{-3}$ ラジアンとなるような正負繰り返し加力を行った。y 方向の 4 サイクル目では y 正方向に所定の荷重(後述する式(2)の値を用いた Y 壁のせん断耐力計算値の 80%)となるまで加力を行った後, x 正方向に C 柱脚部の伸びが所定の伸び($v=4\text{mm}$)となるまで加力し, その後に y 負方向へ最大荷重が確認されるまで加力した。比較用の LH-M41C と LH-M45C の 2 体は, 図-3 の青線で示すようにサイクルピーク時の部材角が $1, 2 \times 10^{-3}$ ラジアンとなるように y 方向のみに変位漸増正負繰り返し加力を行い, 3 サイクル目ではアクチュエータ③の荷重が y 正方向に所定の荷重(後述する式(2)の値を用いた Y 壁のせん断耐力計算値の 80%)となるまで加力した後, y 負方向に最大荷重が確認されるまで加力を行った。変位の計測は, 天井スラブ下面高さの水平変位をデジタル変位計で計測し,

表-2 コンクリート性状

試験体	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	ヤング係数* (N/mm ²)
LH-M41T4	27.9	3.49	27700
LH-M41C	27.6	3.83	30400
LH-M45T4	30.6	3.29	26900
LH-M45C	28.4	3.24	26900

* σ_B の1/3の時の割線弾性係数

表-3 鉄筋の性状

呼び名	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
D16	(198.6)*	434	633	16	天井,基礎主筋
D13	(126.7)*	408	568	25	柱主筋
D6	(31.67)*	(324)**	530	33	柱帯筋
4φ	12.3	(252)**	325	49	壁筋,柱帯筋

(*)公称断面積 (**)0.2%耐力

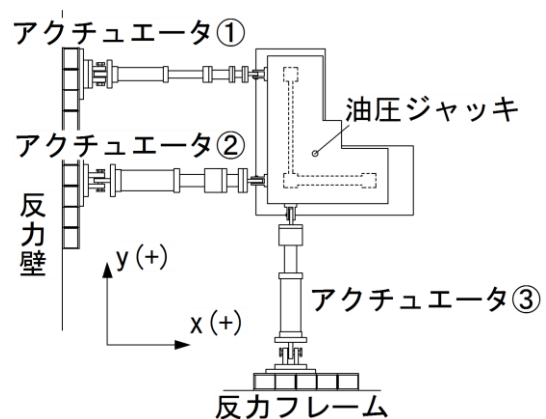


図-2 加力装置平面図

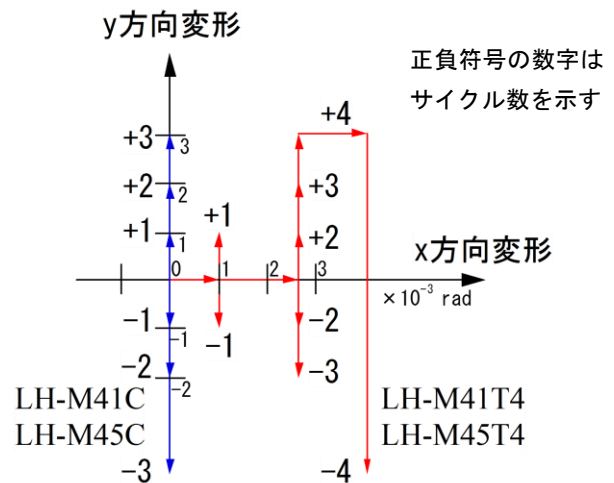


図-3 加力変位計画図

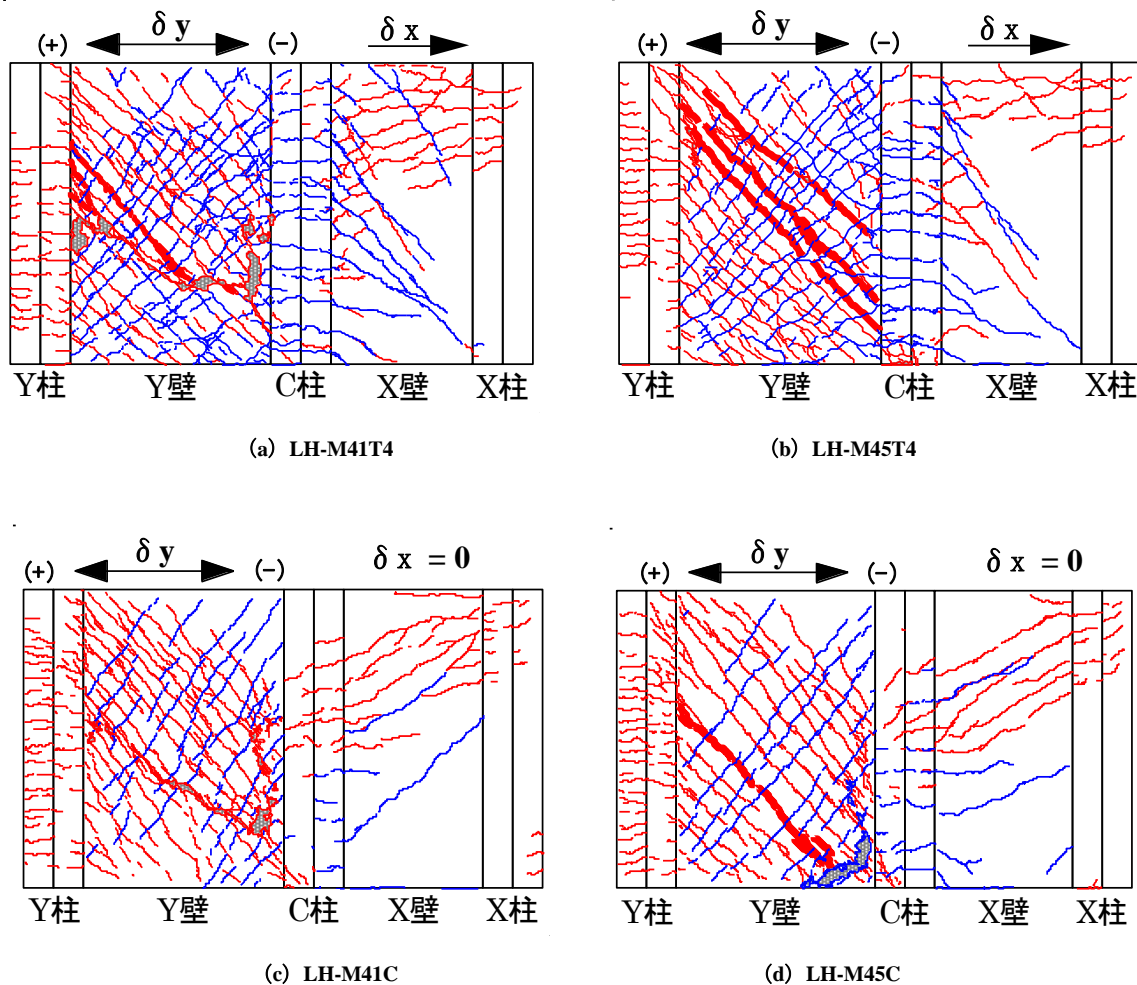


図-4 ひび割れ図

各柱の高さ方向を7分割した各区間の伸びを歪ゲージ式変位計で計測した。試験体に加えた鉛直荷重と水平荷重は、各アクチュエータと油圧ジャッキに取り付けたロードセルにより計測した。C柱脚部とY柱頂部の危険断面の四隅の柱軸筋の歪み度をワイヤーストレインゲージにより計測した。

3. 実験結果

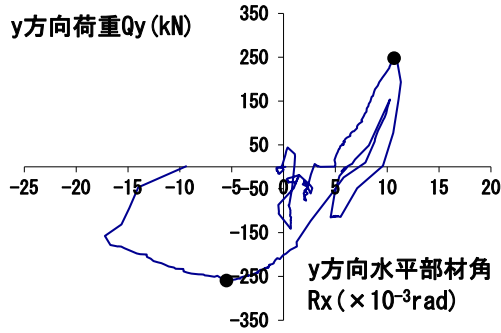
3.1 ひび割れ破壊状況

各試験体の実験終了時のひび割れ状況を、両壁を展開して図-4に示す。図の青線はy方向正加力時、赤線はy方向負加力時に発生したひび割れを表している。また、太線は大きく開口したひび割れ、灰色部分はコンクリートの剥落部分を示す。比較用のLH-M41CとLH-M45Cでは、Y壁のC柱側下部のコンクリートが剥落して最大荷重に達し、その後Y壁の斜めひび割れが大きく開口した。C柱脚部を伸ばしたLH-M41T4とLH-M45T4では、x方向に変形させてC柱を伸ばしたため比較用のLH-M41CとLH-M45Cに比べてC柱全体に水平ひび割れがみられた。最終サイクルの負加力時にY壁の斜めひび割れが大きく開口して最大荷重に達している。このY壁の開口部

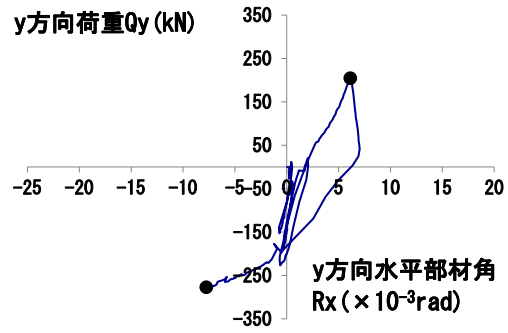
分では面外方向のずれがみられた。また、C柱とY柱の帯筋比の大きいLH-M41T4では、最大荷重後、Y柱側の壁高さ中央部からC柱側下部にかけて壁のコンクリートが剥落した。平面壁の実験結果では、今回の実験目標にC柱を伸ばした試験体と伸ばしていない試験体のどちらも帯筋比が小さい場合にはC柱にせん断ひび割れが発生して最大荷重を得ており、L形壁では破壊形状が異なる結果となった。

3.2 荷重-変形曲線

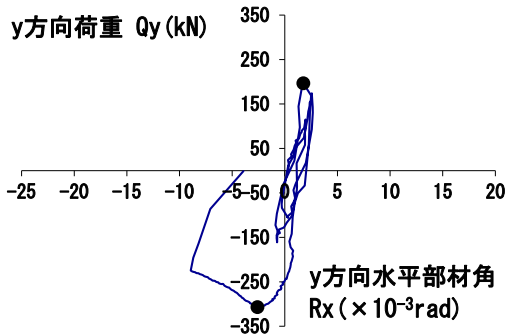
各試験体の荷重-変形曲線を図-5に示す。図中の黒丸は正負両加力時の最大荷重を示している。C柱とY柱の帯筋比が大きい場合、C柱脚部を伸ばしたLH-M41T4は、比較用のLH-M41Cに比べて、負加力の最終サイクルでは、最大荷重時までの荷重増加は緩やかであり、最大荷重も小さくなっている。LH-M45T4は、加力装置の故障のため最大耐力を確認できていないが、-4サイクル目の曲線はLH-M41T4と同様の曲線になっており、比較用のLH-M45Cに比べて、-4サイクル目の最大荷重時までの荷重増加は緩やかになっている。平面壁の実験においてもC柱を伸ばした試験体では最大荷重時までの荷重増



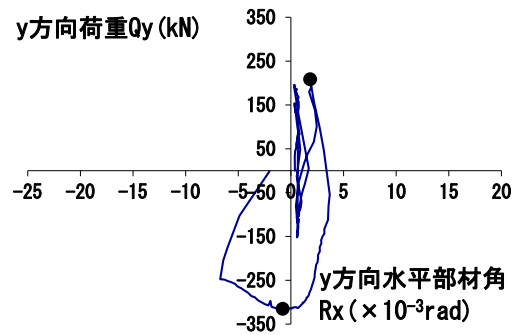
(a) LH-M41T4



(b) LH-M45T4



(c) LH-M41C



(d) LH-M45C

図-5 y方向の荷重-変形曲線

加は緩やかで最大荷重後の荷重低下も緩やかであり、L形壁の実験結果も平面壁と同様となっている。

3.3 最大荷重

表-4にy方向の最大荷重実験値、 $Q_{max,y}$ と計算値を示す。計算値 cQ_{bu} 、 cQ_{su} および V_u は以下に示す曲げ強度とせん断強度の計算値である。

cQ_{bu} は下に示す式(1)⁹⁾の曲げ終局強度計算値であり、図-6に曲げ終局強度の計算方法を示す。図-6に示すようにL形断面を加力方向の軸線上に投影し、鉄筋の投影された位置を考慮に入れ、y方向について計算した。

$$cQ_{bu} = \sum ((a_{s,i} \cdot \sigma_{sy,i} \cdot \ell_i) + N \cdot \ell_n) / h \quad (1)$$

ここに、 $a_{s,i}$: 投影された柱および壁の鉄筋断面積、
 $\sigma_{sy,i}$: 投影された柱および壁の鉄筋の降伏点強度、
 ℓ_i : 投影された鉄筋の圧縮合力中心間の距離、
 h : 加力点高さ N : 軸力、 ℓ_n : 投影された重心までの距離

cQ_{su} は下に示す式(2)¹⁰⁾のせん断強度計算値である。

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

ここに、 p_{te} : 等価引張主筋比 ($=100a_t/(b_e \cdot d)$)、

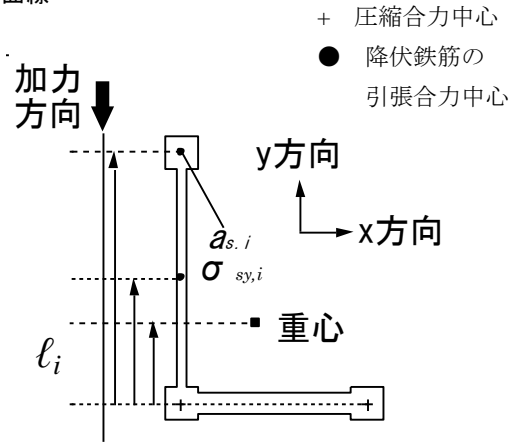


図-6 曲げ終局強度の計算方法

$M/(Q \cdot D)$: 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

V_u は式(3)¹¹⁾によるせん断強度計算値である。

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

ここに、 t_w : 壁厚、 l_{wb} : トラス機構の等価壁長さ、 l_{wa} : アーチ機構の等価壁長さ、 p_s : 壁横筋比、 σ_{sy} : 壁横筋降伏点強度、 $\cot \phi = 1.0$ 、 $\tan \theta = \sqrt{(h_w/l_{wa})^2 + 1} - h_w/l_{wa}$ 、

表-4 y 方向最大耐力実験値

	試験体名	最大荷重時				計算値			比率			せん断応力度	
		$tQ_{max,y}$ (kN)	R_y ($\times 10^{-3}$ rad)	v (mm)	N^* (kN)	cQ_{bu} (kN)	cQ_{su} (kN)	V_u (kN)	$\frac{tQ_{max,y}}{cQ_{bu}}$	$\frac{tQ_{max,y}}{cQ_{su}}$	$\frac{tQ_{max,y}}{V_u}$	$t\tau_{su}$ (N/mm ²)	$\frac{t\tau_{su}}{\sigma_B}$
正加力時	LH-M41T4	248	10.66	1.94	183	544	270	241	0.46	0.92	1.03		
	LH-M41C	197	1.76	0.12	185	537	257	265	0.37	0.77	0.74		
	LH-M45T4	205	6.13	1.38	185	545	274	277	0.38	0.75	0.74		
	LH-M45C	209	1.82	0.48	187	548	278	265	0.38	0.75	0.79		
負加力時	LH-M41T4	-259	-5.51	4.07	183	-375	-301	-241	0.69	0.86	1.07	4.42	0.16
	LH-M41C	-307	-2.60	-0.12	189	-371	-286	-265	0.83	1.07	1.16	5.93	0.21
	LH-M45T4	-277	-7.76	4.05	184	-373	-306	-277	0.74	0.91	1.00	5.02	0.16
	LH-M45C	-315	-0.78	0.17	183	-377	-310	-265	0.83	1.02	1.19	5.07	0.18

*Nは軸力であり圧縮が正とする

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

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

$$\sigma_B: \text{コンクリート圧縮強度}$$

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 には負の値を代入した。

なお、同表にはy方向の最大荷重時のy方向変形 R_y 、C柱脚部の伸び v および軸力 N も併記し、 $tQ_{max,y}$ をY壁断面面積 A_w (=Y壁厚さ×柱中心間距離)で除した平均せん断応力度 $t\tau_{su}$ と、この平均せん断応力度をコンクリートの圧縮強度 σ_B で除した比率 $t\tau_{su}/\sigma_B$ を示した。表をみると、C柱脚部を伸ばした後に得られたy方向の最大荷重実験値(負加力時)は、比較用の試験体の最大荷重実験値(負加力時)よりも小さくなっている。図-7にC柱脚部を伸ばした試験体と伸ばしていない試験体の $t\tau_{su}/\sigma_B$ の関係を示す。同図には平面壁の実験結果^{1),2),3),4),5),6),7),8)}も併せて示した。この平面壁の実験結果は本実験のL形壁のY壁と寸法および形状が同様のものであり、側柱を大きく伸ばした時の値である。凡例はC、Y柱の帯筋比 p_w を用いて試験体を分類し、色塗りでL形壁を、白抜きで平面壁を示している。図をみると、L形壁では、C柱脚部を伸ばした試験体の $t\tau_{su}/\sigma_B$ が伸ばしていない試験体に比べて低下しており、帯筋比 p_w の大きいものの方が帯筋比 p_w 小さいものよりも大きく低下している。平面壁では帯筋比 p_w が小さいものの方が $t\tau_{su}/\sigma_B$ は低下しており、異なる結果となった。これは、平面壁では伸びた柱のせん断ひび割れで最大荷重が決まったのに対して、L形壁では壁の斜めひび割れで最大荷重が決まったためと考えられる。図-8にC柱脚部を伸ばした試験体の $t\tau_{su}/\sigma_B$ と $p_w \cdot \sigma_{wy}$ (p_w : 帯筋比, σ_{wy} : 帯筋降伏強度)の関係を示す。同図にも比較のため平面壁の値を併記した。凡例はY壁の壁筋比 p_s を用いて試験体を分類し、色塗りでL形壁を、白抜きで平面壁を示している。図をみると、本実験のL

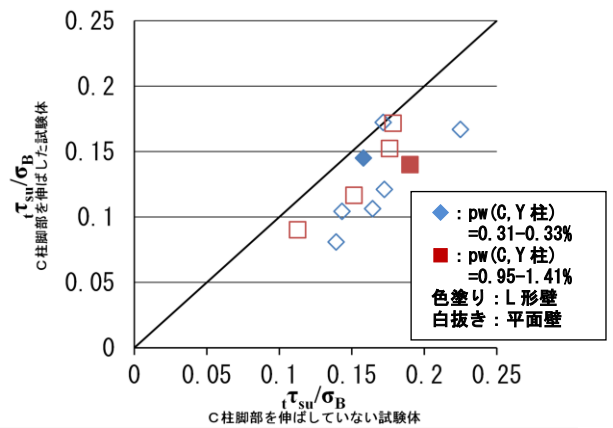


図-7 脚部を伸ばした試験体と伸ばしていない試験体

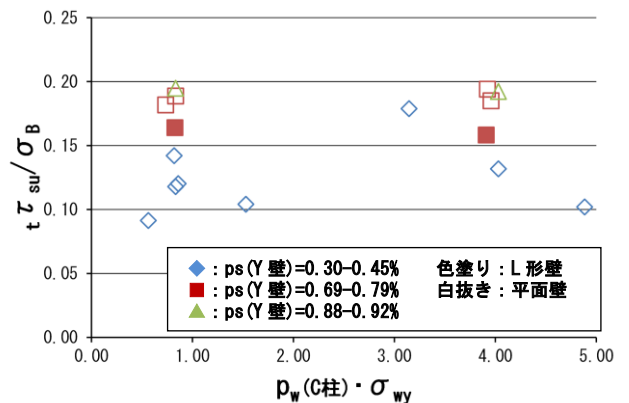


図-8 平均せん断応力度と帯筋比

形壁($p_s=0.71\%$)では $p_w \cdot \sigma_{wy}$ が0.83と3.91のときには、 $t\tau_{su}/\sigma_B$ の値はどちらも0.16程度となり、平面壁($p_s: 0.69\sim 0.79\%$)の実験結果よりも小さな値となっており、直交壁の影響により柱を伸ばした試験体においても $t\tau_{su}$ が小さくなると考えられる。

4. まとめ

側柱の帯筋比を変化させたL形断面耐震壁について実験を行い、大きく伸びた側柱が水平力に対して圧縮側となる方向のL形壁のせん断耐力について検討した。その結果、L形壁では、C柱脚部を伸ばした試験体のせん断耐力が伸ばしていない試験体に比べて低下しており、帯筋比の大きいものの方が帯筋比小さいものよりも大きく低下している。平面壁では帯筋比が小さいものの方がせん断耐力は低下しており、異なる結果となった。これは、平面壁では伸びた柱のせん断ひび割れで最大荷重が決まったのに対して、L形壁では壁の斜めひび割れで最大荷重が決まったためと考えられる。壁筋比の大きいとき、L形壁のせん断応力は平面壁のせん断応力よりも小さな値となっており、直交壁の影響により柱を伸ばした試験体においてもせん断応力が小さくなると考えられる。

謝辞

本研究は平成 23 年度日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C);代表者 溝口光男)により行われたものである。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 金谷修平, 溝口光男, 荒井康之, 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.32, No.2, pp.391-396, 2010.7
- 8) 森 貴規, 溝口 光男, 荒井 康幸, 金谷 修平: 側柱が伸びた柱補強筋比の小さい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.33, No.2, 2011.7
- 9) 溝口光男, 荒井康幸: 二方向水平力を受ける鉄筋コンクリート L 形開断面耐震壁の弾塑性性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集 第450号 pp.71~80, 1993.8
- 10) 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
- 11) 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