

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に及ぼす帯筋比の影響

花木 健哉*1・溝口 光男*2・荒井 康幸*2・下川部 皓紀*1

要旨: 水平力に対して圧縮側とな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、壁筋比を小さくして側柱の帯筋比を変化させた鉄筋コンクリート L 形断面耐震壁について破壊させる実験を行った。その結果、水平力に対して圧縮側となる側柱が伸びる場合のせん断耐力は、壁筋比が 0.33% と 0.71% の違いによらず、帯筋比の影響が小さいことを示した。

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, 帯筋比, 壁筋比

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、これまでに平面壁の実験から、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が低下することを確認した^{1),2)}。また、昨年度はL形断面耐震壁（以後、L形壁と呼ぶ）について、側柱脚部が大きく伸びるような加力実験を行い、せん断耐力に及ぼす帯筋比の影響について検討した³⁾。

本研究では、L 形壁について、昨年度よりも壁筋比を小さくした実験を行い、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。

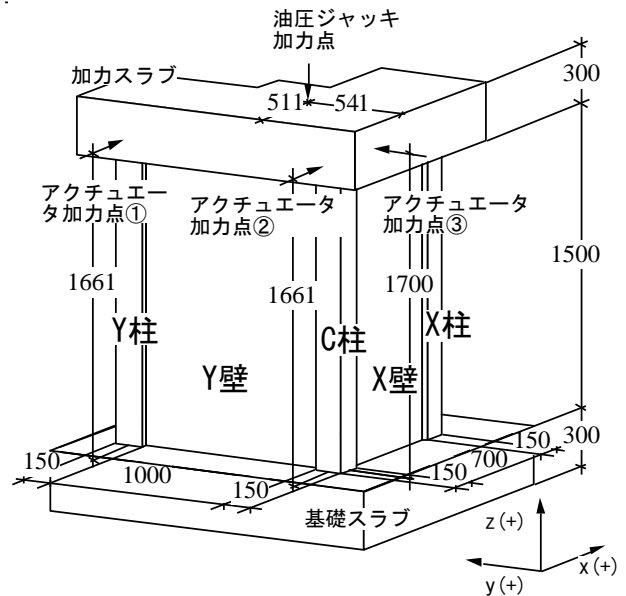


図-1 試験体寸法及び各部名称 (単位: mm)

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加力スラブを設けた。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壁を昨年度の試験体³⁾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に示す値となった。

表-1 試験体一覧

試験体	壁厚 (mm)		軸筋比 p_g (%)		帯筋比 p_w (%)		壁筋比 p_s (%)	
	X壁	Y壁	X, C柱	Y柱	X柱	C, Y柱	X壁	Y壁
LH-L41T4	110	66	2.25	4.50	0.33	1.21	0.25	0.32
LH-L41C	108	55						
LH-L45T4	110	56						
LH-L45C	110	59						

表-2 コンクリートの性状

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数* (N/mm ²)
LH-L41T4	29.8	3.02	21200
LH-L41C	31.2	3.35	21400
LH-L45T4	30.7	3.14	21400
LH-L45C	32.9	2.84	22500

*最大圧縮応力度 σ_B の1/3の時の割線弾性係数

*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領域教授 博士(工学) (正会員)

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-L41T4とLH-L41C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($p_w=0.33\%$)とした。LH-L45T4とLH-L45Cの2体の側柱の帯筋はすべての柱で2-4φ@50($p_w=0.33\%$)とした。壁の配筋は、Y壁では4φ@80($p_s=0.32\%$)、X壁では4φ@50($p_s=0.25\%$)とし、全試験体共通とした。LH-L41T4とLH-L45T4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加力した試験体である。このC柱脚部の伸び v は既往の実験³⁾と同様とし、基礎スラブから高さ200mmの位置で4mmとした。ここで、C柱脚部の伸びの値は既往の研究²⁾をもとに伸びが大きい場合として設定した。LH-L41CとLH-L45C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、普通ポルトランドセメントを用いた砕石コンクリート(粗骨材の最大寸法:13mm)とし、設計基準強度は21N/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。

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)*	394	590	25.9	天井、基礎主筋
D13	(126.7)*	386	555	25.8	柱主筋
D6	(31.67)*	428**	565	22.4	柱帯筋
4φ	12.3	279**	317	36.4	壁筋、柱帯筋

*JIS G 3112 **0.2%耐力

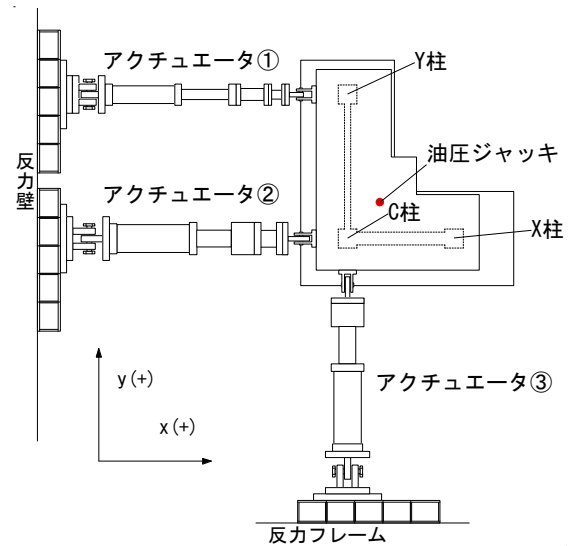
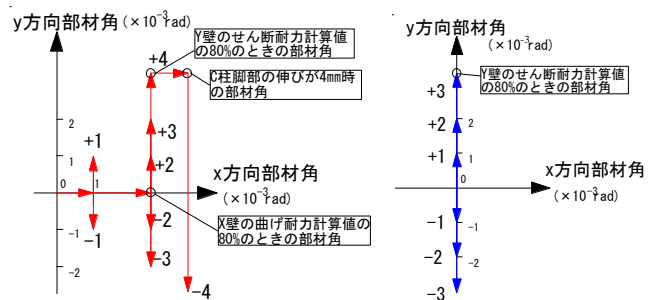


図-2 加力装置平面図

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で振じれが生じないようにした。鉛直力は油圧回路にリリーフ弁を取り付けて、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(σ_0 =鉛直力/壁全断面積)が1.0N/mm²となる値(188kN)とした。図-3に加力変位計画図を示し、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-L41T4とLH-L45T4の2体は、同図(a)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1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)による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y負方向へ最大荷重が確認されるまで加力した。なお、各サイクルは変位制御としたが、サイクルピークの値は各方向の荷重により制御した。比較用のLH-L41CとLH-L45Cの2体は、同図(b)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



(a) LH-L41T4, LH-L45T4 (b) LH-L41C, LH-L45C

図-3 加力変位計画図

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)による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。なお、LH-L45Cは加力装置の容量限界のため、4サイクル正方向で最大荷重を確認している。x, y両方向の変位の計測は、加力スラブ下面高さの水平変位をデジタル変位計で計測し、各柱の高さ方向を7分割した各区間の伸びをひずみ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柱とY柱の柱軸筋、C柱脚部とY柱頂部の帯筋のひずみ度をワイヤーストレインゲージにより計測した。

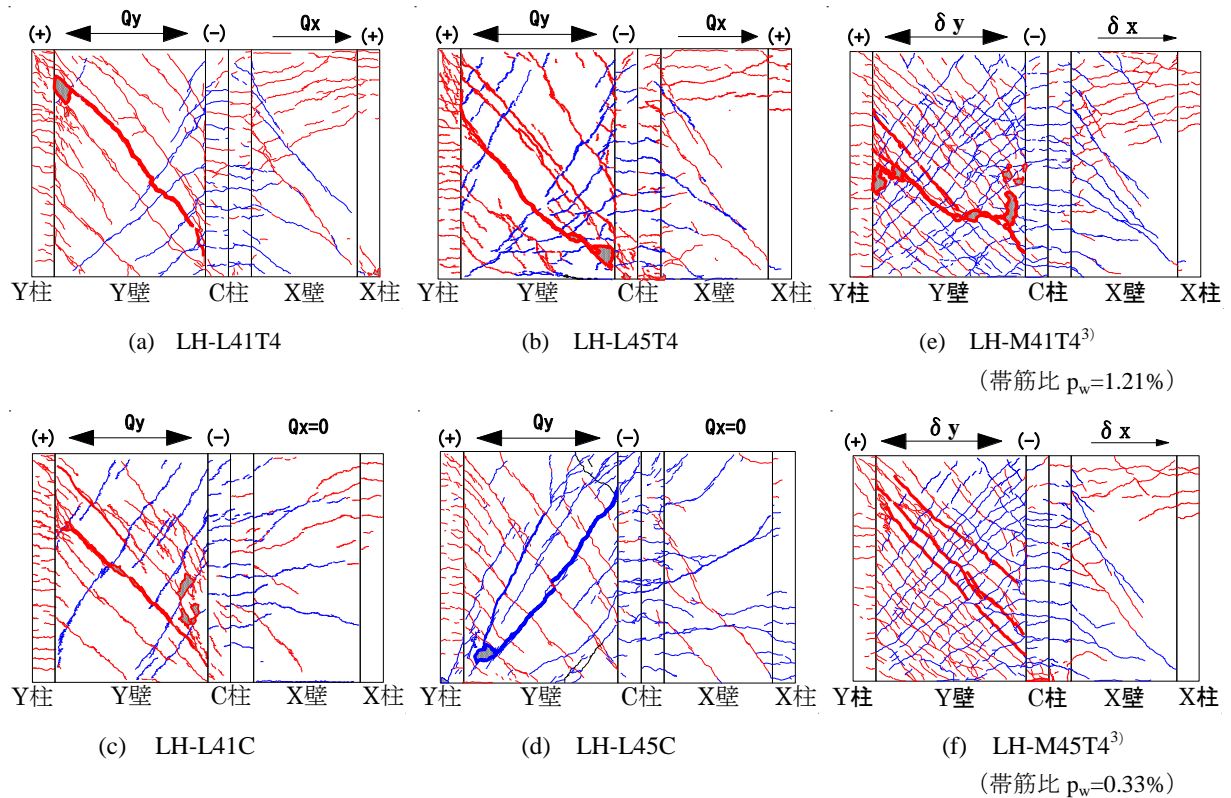


図-4 最終ひび割れ状況

3. 実験結果

3.1 ひび割れ及び破壊状況

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-L41CとLH-L45Cでは、LH-L41Cはy負方向でY壁の壁板コンクリートが剥落し、斜めひび割れが徐々に開口して最大荷重に達し、その後、壁板コンクリートが大きく剥落した。LH-L45Cはy正方向でY壁の斜めひび割れが徐々に開口するとともに壁板コンクリートが僅かに剥落して最大荷重に達し、最終時に至っている。両試験体とも、最大荷重時には側柱のせん断破壊はみられず壁板のせん断破壊が先行している。C柱脚部を伸ばしたLH-L41T4とLH-L45T4では、y正方向で発生したY壁下部の斜めひび割れの角度は、x方向に変形させてC柱を伸ばしたため45°よりも小さくなっており、45°以上となっている比較用のLH-L41CとLH-L45Cに比べて少し緩やかになっている。また、両試験体とも、最大荷重時には、比較用の試験体2体と同様に側柱のせん断破壊はみられず壁板のせん断破壊が先行している。図-4(e)、(f)に示した昨年度の壁筋比0.71%のC柱を伸ばした試験体の実験結果³⁾では、帯筋比1.21%の場合にY壁で開口した斜めひび割れの角度が約30°で、0.33%の場合の約45°に比べて緩やかになっていた

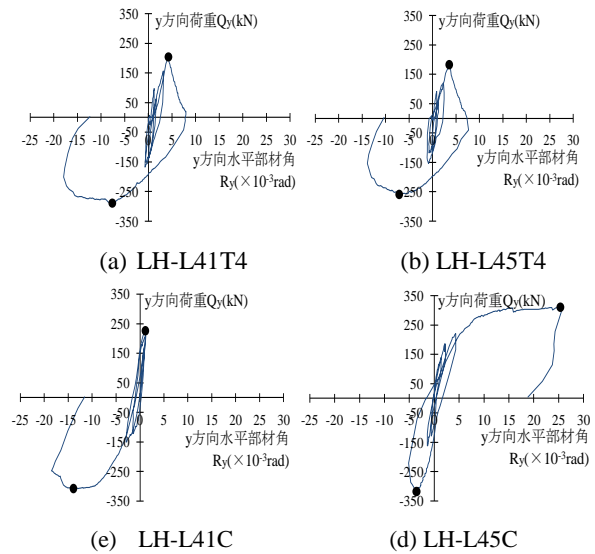


図-5 y方向荷重-変形曲線

が、本実験では、C柱を伸ばした試験体においては帯筋比の大小によらず約45°となり、帯筋比による明確な差異はみられなかった。

3.2 荷重-変形関係

各試験体のy方向の荷重-変形曲線を図-5に示す。図中の黒丸はy正負両加力時の最大荷重を示している。C柱脚部を伸ばしたLH-L41T4とLH-L45T4の2体の荷重-変形曲線は、負4サイクル目の最大荷重時まではほぼ同じで帯筋比の違いによる差異は見られないものの、最大荷

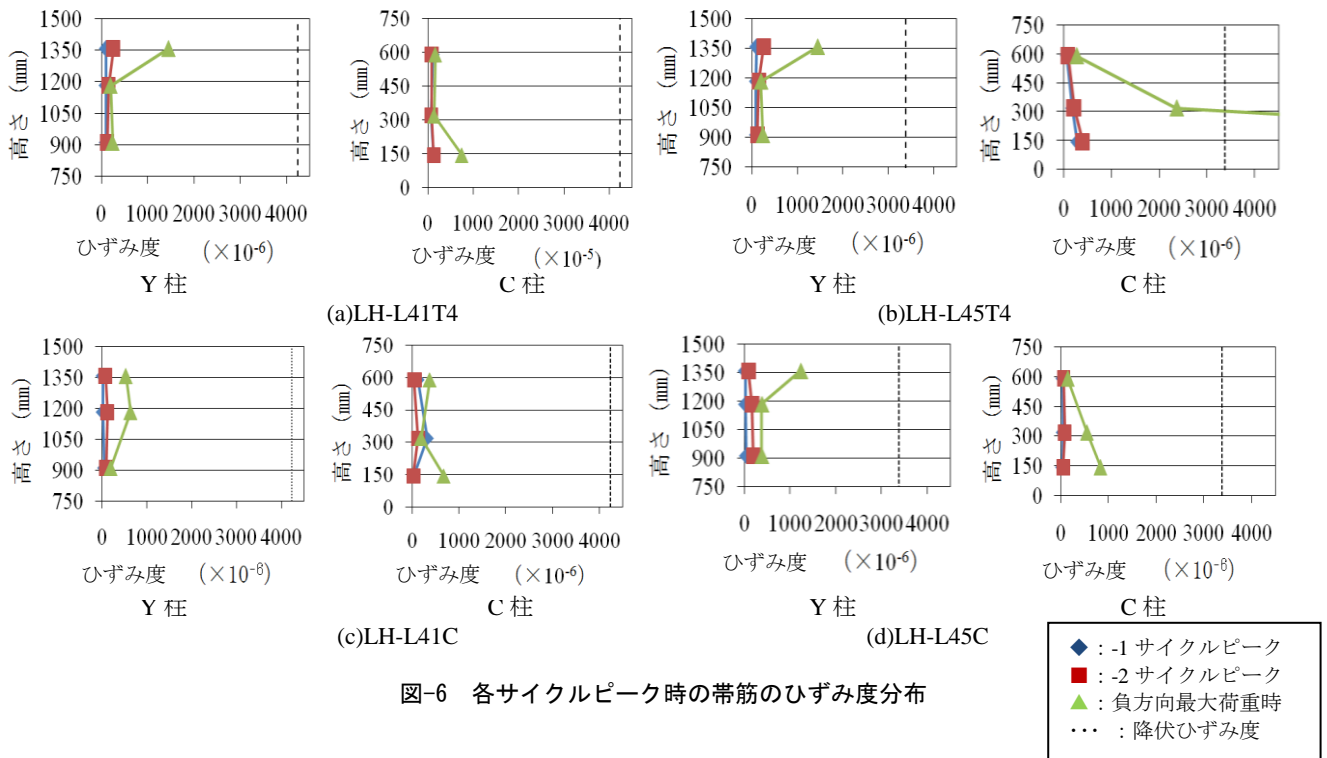


図-6 各サイクルピーク時の帯筋のひずみ度分布

重後の荷重低下が帯筋比の小さい LH-L45T4 の方が少し大きくなっており、帯筋の拘束の影響であると考えられる。なお、両試験体に見られる正 4 サイクルの大きな荷重低下は C 柱脚部を所定の伸びまで伸ばすために x 正方向へ変形させたときに生じたものである。比較用の LH-L41C と LH-L45C の 2 体の荷重-変形曲線については、LH-L41C の曲線は負 3 サイクルで引張側柱脚部の軸筋の降伏がみられ、荷重上昇が緩やかになって最大荷重時に至っており、その後急激に荷重低下している。LH-L45C の曲線は、正 4 サイクルで最大荷重を得るように加力したものであるが、正 4 サイクル目に引張側の柱脚部の軸筋が降伏して荷重が上がらなくなり、曲げ型の曲線形状を示している。

3.3 側柱帯筋のひずみ度分布

各試験体の Y 柱と C 柱の帯筋のひずみ度を図-6 に示す。計測した帯筋位置を基礎スラブからの高さとして図-7 に示す。C 柱脚部の伸びや帯筋比にかかわらず、いずれの試験体も y 負方向 1, 2 サイクルでは Y 柱、C 柱ともに帯筋のひずみ度は小さく違いは見られない。y 負方向最大荷重時のひずみ度をみると、C 柱脚部を伸ばした LH-L41T4 と LH-L45T4 では、Y 柱上部のひずみ度は降伏ひずみ度の半分程度に大きくなっており差は見られないが、C 柱下部のひずみ度は帯筋比の小さい LH-L45T4 の方が降伏ひずみ度を越えており大差がみられた。比較用の LH-L41C と LH-L45C ではひずみ度が小さいものの、Y 柱上部のひずみ度は帯筋比の大きい LH-L41C が上部と中部でともに大きくなり、帯筋比の小さい LH-L45C

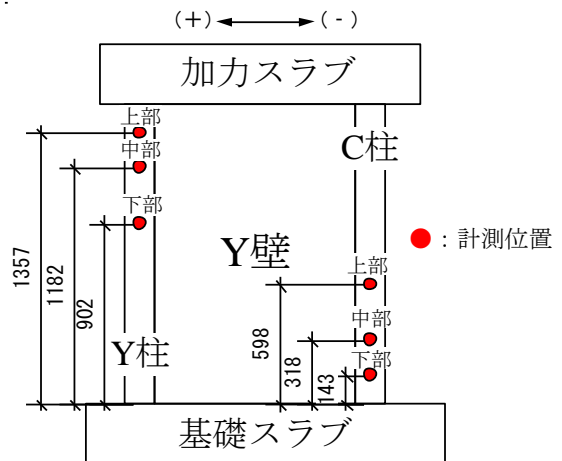


図-7 側柱帯筋のひずみ度計測位置

が上部のみ大きくなっている。C 柱下部のひずみ度は LH-L41C が下部のみ大きくなり、LH-L45C が中部、下部の順に大きくなっている。

3.4 最大荷重

表-4 に y 方向の最大荷重実験値 Q_{max} 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) の曲げ終局強度計算値であり、図-8 に曲げ終局強度の計算方法を示す。図-8 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。

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

表-4 y方向最大耐力

試験体名	最大荷重時				計算値			比率			せん断応力度		
	tQ_{max} (kN)	R_y ($\times 10^{-3}$ rad)	v (mm)	N^* (kN)	cQ_{bu} (kN)	cQ_{su} (kN)	V_u (kN)	$\frac{tQ_{max}}{cQ_{bu}}$	$\frac{tQ_{max}}{cQ_{su}}$	$\frac{tQ_{max}}{V_u}$	$t\tau_{su}$ (N/mm ²)	$\frac{t\tau_{su}}{\sigma_B}$	
正加力時	LH-L41T4	(204)**	4.19	0.44	206	418	274	301	(0.49)**	(0.74)**	(0.68)**	/	
	LH-L41C	(226)**	1.09	-0.03	195	414	243	246	(0.55)**	(0.93)**	(0.92)**		
	LH-L45T4	(183)**	3.55	0.48	198	415	257	265	(0.44)**	(0.71)**	(0.69)**		
	LH-L45C	311	25.31	-0.54	203	416	267	283	0.75	1.16	1.10		
負加力時	LH-L41T4	-287	-7.65	4.27	207	-317	-312	301	0.90	0.92	0.95	4.56	0.15
	LH-L41C	-306	-13.90	0.01	196	-313	-276	246	0.98	1.11	1.24	3.79	0.13
	LH-L45T4	-258	-7.10	4.77	199	-314	-292	265	0.82	0.88	0.97	4.91	0.15
	LH-L45C	(-318)**	-3.61	0.05	202	-315	-304	283	(1.01)**	(1.05)**	(1.13)**	4.03	0.14

*Nは軸力であり圧縮を正とする ** () は最大耐力とみなせない最大荷重

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)⁵⁾のせん断強度計算値である。

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

ここに、 p_{te} : 等価引張主筋比(100 $a_s/(b_e \cdot d)$)、 $M/(Q \cdot D)$:

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

V_u は式(3)⁶⁾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、 $\cot \phi=1.0$ 、 $\tan \theta = \sqrt{(h_w/l_{wa})^2 + 1 - h_w/l_{wa}}$ 、 $\beta = (1 + \cot \phi) \cdot p_s \cdot \sigma_{sy} / (v \sigma_B)$ 、 $v = 0.7 - \sigma_B/200$ 、 h_w : 加力点高さ、 σ_B : 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の式を用いており、引張応力の場合には σ_0 には負の値を代入した。なお、表-4にはy方向の最大荷重時のy方向部材角 R_y 、その時のC柱脚部の伸び v および軸力 N も併記し、 tQ_{max} をY壁断面積 A_w (=Y壁厚 \times 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

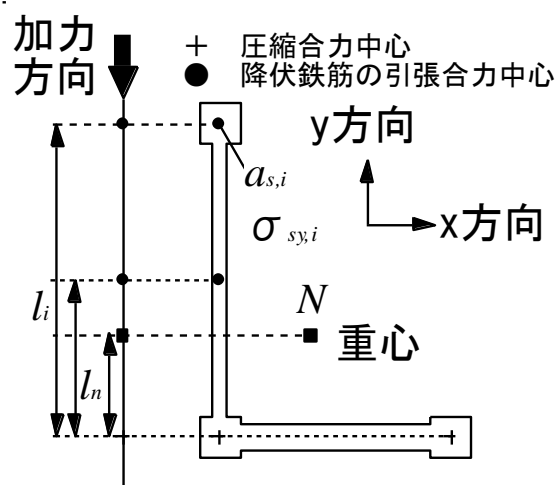


図-8 曲げ終局強度の計算方法

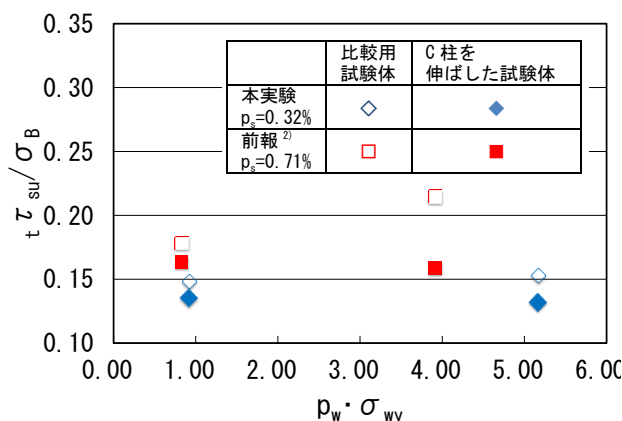


図-9 平均せん断応力度と帯筋比

(負加力時)は、比較用の試験体の最大荷重実験値(LH-L41Cは負加力時、LH-L45Cは正加力時)よりも小さくなっている。図-9にC柱脚部を伸ばした試験体と比較用の試験体の $t\tau_{su}/\sigma_B$ 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。同図には昨年度の実験結果³⁾も併せて示した。図をみると、壁筋比 p_s が0.32%の本実験結果では、C柱を伸ばした試験体の $t\tau_{su}/\sigma_B$ は $p_w \cdot \sigma_{wy}$ の大小にかかわらず0.13、0.14となり、差がみられなかつ

た。比較用の試験体の τ_{su}/σ_B も $p_w \cdot \sigma_{wy}$ にかかわらず 2 体とも 0.15 となっており、C 柱の伸びにより τ_{su}/σ_B はわずかに小さくなるものの、 τ_{su}/σ_B への $p_w \cdot \sigma_{wy}$ による影響はほぼみられない結果となった。昨年度の壁筋比 p_s が 0.71% の実験結果³⁾では、C 柱を伸ばした試験体の τ_{su}/σ_B は $p_w \cdot \sigma_{wy}$ 大小にかかわらず 2 体とも 0.16 となっているものの、比較用の試験体の τ_{su}/σ_B が $p_w \cdot \sigma_{wy}$ が 0.83 のときには 0.18、 $p_w \cdot \sigma_{wy}$ が 3.91 のときには 0.21 となっており、 $p_w \cdot \sigma_{wy}$ が大きい方が大きな値となっており、壁筋比の大小によって τ_{su}/σ_B に対する帯筋比の影響が異なるものとなっている。図-9 に示す試験体は、帯筋比が小さいものを含めて、すべて側柱が破壊する前に壁板のせん断ひび割れの開口もしくはコンクリートの圧壊で最大耐力が決まっており、 $p_w \cdot \sigma_{wy}$ の影響が小さくなったものと考えられる。壁筋比が大きく、側柱の破壊が壁板の破壊よりも先に起こるような場合については、今後検討が必要と考えている。

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せん断耐力について検討した。その結果、側柱脚部を伸ばした場合のせん断耐力への帯筋比の影響は壁筋比が 0.32% と 0.71% の違いによらず小さい。また、壁筋比 0.32% の L 形壁では、C 柱が伸びていない場合のせん断耐力に対する C 柱が伸びる場合のせん断耐力の低下割合は、壁筋比 0.71% の場合と比べて帯筋比の影響は小さくなった。本論文で検討した試験体は、すべて側柱

が破壊する前に壁板のせん断ひび割れの開口もしくはコンクリートの圧壊で最大耐力が決まっており、帯筋比の影響が小さくなった。壁筋比が大きく、側柱の破壊が壁板の破壊よりも先に起こるような場合については、今後検討が必要と考えている。

参考文献

- 1) 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, pp409-414, 2011.7
- 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) 下川部皓紀, 溝口光男, 荒井康幸: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.415-420, 2013.7
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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