

# 論文 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

溝口 光男<sup>\*1</sup>・荒井 康幸<sup>\*2</sup>

**要旨**：偏心引張力を受ける鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力に関して、水平力に対して圧縮側となる側柱脚部の伸びを変化させた実験を行った。その結果、既往のせん断強度計算値に対するせん断耐力の比は、圧縮側柱脚部の伸びが大きくなるにつれて直線的に小さくなること、また、この比率の低下は、圧縮側柱脚部の軸筋が降伏する程度の伸びであれば小さく、圧縮軸力を受ける場合の比率と大差ないことを示した。

**キーワード**：鉄筋コンクリート、耐震壁、せん断耐力、加力実験、偏心引張力、伸び

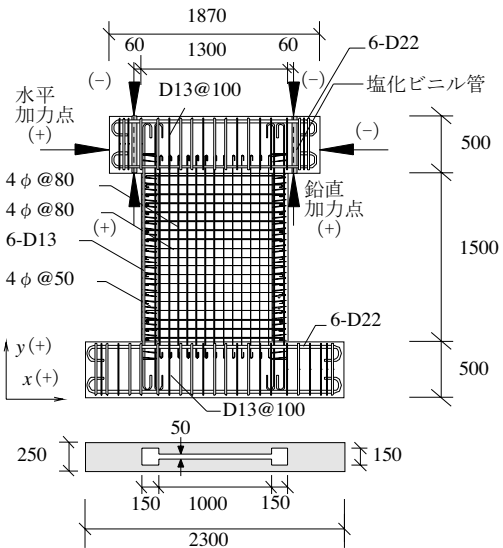
## 1. はじめに

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。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大きな引張力を加えた耐震壁の加力実験を行い、圧縮側柱脚部の伸びが大きいとせん断耐力が低下することを確認<sup>1), 2)</sup>し、圧縮側柱脚部の伸びとせん断耐力の関係について検討<sup>3)</sup>した。この結果によれば、偏心引張力を受ける耐震壁のせん断耐力は、圧縮側柱脚部の伸びが軸筋降伏時の伸びの2.5倍を超えると急激に低下した。本研究では、壁高さを前報<sup>3)</sup>よりも高く変化させた実験を行って、せん断耐力と圧縮側柱脚部の伸びの関係について検討した。

## 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平面壁模型とし、寸法及び配筋の等しい6



**図-1** 試験体形状と配筋 (単位: mm)

体とした。壁の寸法は、前報<sup>3)</sup>と同様に壁厚50mm、壁全長1300mmとし、せん断スパン比による差異を検討するため、壁内法高のみを前報<sup>3)</sup>より300mm高い1500mmとした。柱断面は150mm角である。壁補強筋は、縦横とも4φのなまし鉄線を@80(壁筋比 $p_s=0.31\%$ )として配筋した。柱の配筋は、軸鉄筋として6-D13(軸筋比 $p_g=3.38\%$ )を用い、帯筋に4φのなまし鉄線を@50(帯筋比 $p_w=0.33\%$ )の角スパイラル筋とし

\*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科助教授 工博 (正会員)

\*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博 (正会員)

て巻いた。表-1に試験体一覧を示す。IH-M65Cは、比較のため軸圧縮応力度 $\sigma_c$ を $2\text{N/mm}^2$ とした試験体である。その他5体は、軸応力度 $\sigma_c$ が $-1.5\text{N/mm}^2$ となるような同じ偏心引張力を加えた試験体であり、せん断破壊時の圧縮側柱脚部(図-5に示すC柱1層目)の伸びが表中の $v$ となるように変化させて実験を行った試験体である。試験体の設計は、正加力でせん断破壊することを目標とし、負加力では曲げ破壊するように軸方向力を正加力の

$2/3$ とした。設計時の曲げとせん断の両強度計算値 $cQbu$ ,  $cQsu$ 及び設定軸力 $N$ を表-1に示す。 $cQbu$ は、壁脚モーメントを表-2に示す式(1)の値と仮定し、加力梁に加えた鉛直力 $P_1$ ,  $P_2$ による壁頂モーメントを考慮して計算した値である。 $P_1$ ,  $P_2$ の値は、図-4(a)のように正加力の壁頂モーメント $M_T$ が、表-2に示す式(1)の曲げ強度略算値 $Mbu$ と等しくなるように定めた。 $cQsu$ は、表-2の式(2)の計算値であり、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。なお、表-2に示す各計算式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みられないので、これらの式を用いており、引張応力の場合には式中の

表-1 試験体一覧

試験体名	加力方向	設計時強度計算値(kN)					v (mm)
		$P_1$	$P_2$	$N^*$	cQbu	cQsu	
IH-M65C	±	-93	-93	0	296	232	-
IH-M65T1.0	+	-130	270	-140	340	228	1.0
	-			-93	80	152	
IH-M65T2.0	+	-130	270	-140	340	228	2.0
	-			-93	80	152	
IH-M65T2.5	+	-130	270	-140	340	228	2.5
	-			-93	80	152	
IH-M65T3.0	+	-130	270	-140	340	228	3.0
	-			-93	80	152	
IH-M65T5.0	+	-130	270	-140	340	228	5.0
	-			-93	80	152	

\*: 軸力 (圧縮を正とする)

表-2 強度計算式

曲げ強度<sup>4)</sup>

$$Mbu = 0.9at \cdot \sigma_y \cdot D + 0.4aw \cdot \sigma_{wy} \cdot D + 0.5N \cdot D \left( 1 - \frac{N}{Bc \cdot D \cdot Fc} \right) \quad (1)$$

せん断強度<sup>4)</sup>

$$Qsu = \left\{ \frac{0.068 pie^{0.23} (Fc + 17.7)}{\sqrt{M/(Q \cdot D) + 0.12}} + 0.846 \sqrt{\sigma_{wh} \cdot p_{wh}} + 0.1\sigma_0 \right\} be \cdot j \quad (2)$$

せん断強度 (日本建築学会指針式<sup>5)</sup>)

$$Vu = tw \cdot lwb \cdot ps \cdot \sigma_{sy} \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) tw \cdot lwa \cdot v \cdot \sigma_B / 2 \quad (3)$$

式(1)~(3)中の記号 (参考文献参照)

$at$ :側柱主筋全断面積,  $\sigma_y$ :側柱主筋降伏点強度,  $aw$ :壁縦筋断面積,  $\sigma_{wy}$ :壁縦筋降伏点強度,  $D$ :壁全長,  $Bc$ :側柱幅,  $N$ :軸力,  $Fc, \sigma_B$ :コンクリート圧縮強度,  $pie$ :等価引張鉄筋比,  $M/(Q \cdot D)$ :シアスパン比,  $\sigma_{wh}, \sigma_{sy}$ :壁横筋降伏点強度,  $p_{wh}, ps$ :壁横筋比,  $\sigma_0$ :平均軸方向応力度,  $be$ :等価壁厚,  $j = 7/8 \times d$ ,  $d = D - Dc/2$ ,  $Dc$ :側柱せい,  $tw$ :壁厚,  $lwb$ :トラス機構の等価壁長さ,  $lwa$ :アーチ機構の等価壁長さ,  $\phi$ :トラス機構のコンクリート圧縮束の角度,  $\cot \phi = 1.0$ ,  $\tan \theta = \sqrt{(hw/lwa)^2 + 1} - hw/lwa$ ,  $\beta = (1 + \cot^2 \phi) ps \cdot \sigma_{sy} / (v \sigma_B)$ ,  $v = 0.7 - \sigma_B / 200$ ,  $hw$ :加力点高さ

表-3 コンクリートの性状

試験体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数* (N/mm <sup>2</sup> )
IH-M65C	25.9	3.01	21300
IH-M65T1.0	25.2	2.77	20500
IH-M65T2.0	31.8	2.65	23100
IH-M65T2.5	29.0	2.79	23500
IH-M65T3.0	25.4	2.46	20200
IH-M65T5.0	32.5	2.86	22600

\*: 1/3割線弾性係数

表-4 鉄筋の性状

呼び名	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)	備考
D22	387.1	402	616	22.3	梁主筋
D13	126.7	419	606	20.1	柱主筋, 梁補強筋
4φ	12.55	168*	274	46	壁筋, 柱補強筋

\*: 0.2%耐力

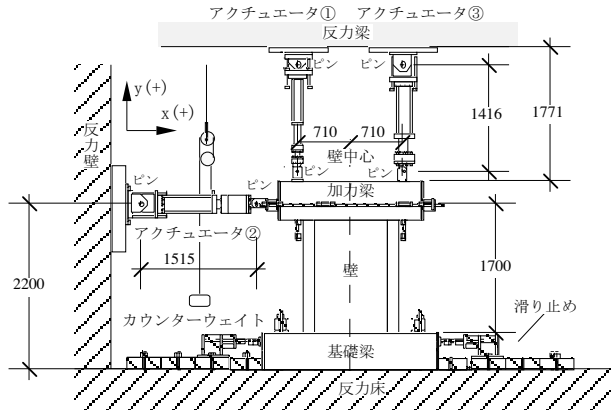


図-2 加力装置 (単位: mm)

$N$  と  $\sigma_c$  には負の値を代入した。コンクリートは早強ポルトランドセメントを用いた豆砂利普通コンクリート (砂利の最大寸法 10mm) とし、設計基準強度は  $24\text{N/mm}^2$  とした。コンクリートと鉄筋の性状は表-3, 表-4 にそれぞれ示した。

## 2.2 加力方法及び計測方法

加力装置の側面図を図-2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。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、IH-M65Cでは壁頂部の水平方向部材角  $R_x$  (=加力梁下端で計測した水平変形/壁内法高さ) が各サイクルピーク時で 1, 2, 4, 6,  $10 \times 10^{-3}$  ラジアンとした。偏心引張力を加えた試験体では、1, 2 サイクル目は IH-M65C と同様としたが、3 サイクル目を最終サイクルとして、負方向に C 柱脚部の伸びが所定の伸び  $v$  になるまで加力した後、正加力で最大荷重を確認するまで加力を行った。鉛直方向の加力は、IH-M65C では、2 台のアクチュエータで表-1 に示す均等な鉛直力  $P_1, P_2$  を下向きに加えた。偏心引張力を加えた 5 体では、正加力で水平力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し、図-3 のように設定した。図中の  $P_1, P_2$  の値 (力の向きは図-4 に示す) は表-1 に示した。また、 $cQ_{bu}, cQ_{su}$  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、図-5 に

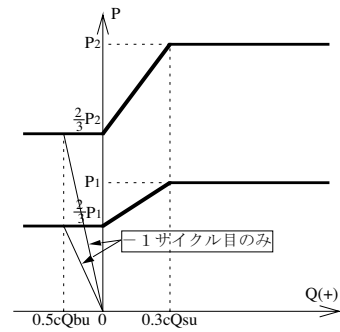


図-3 鉛直荷重の設定

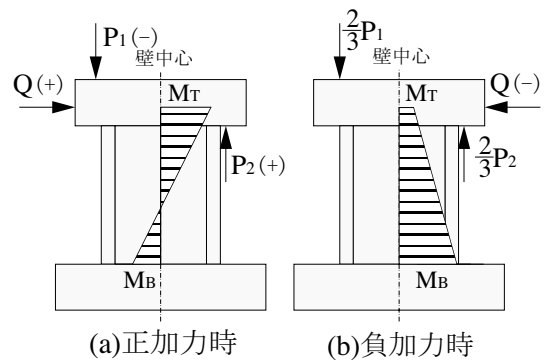


図-4 モーメント分布

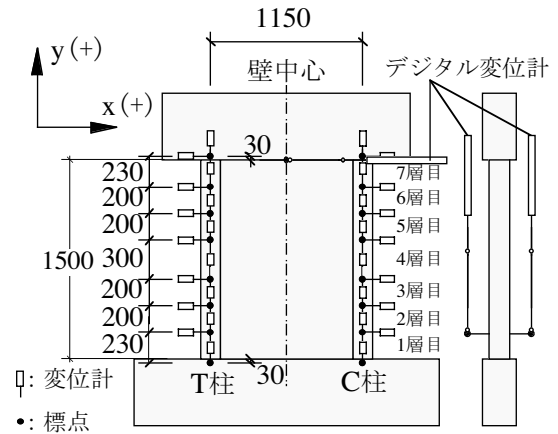


図-5 変位計測位置 (単位: mm)

示すように、壁頂の加力梁下端の水平変形と C 柱脚部の鉛直変位をデジタル変位計で計測した。また、壁高を 7 分割して側柱の各層の伸びと各標点位置の水平変位及び側柱頂部の鉛直変位を計測した。なお、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。

### 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状況を図-6に示す。図中の実線は正加力に、破線は負加力に発生したひび割れをそれぞれ示す。圧縮軸力を受けたIH-M65Cでは、正負両加力ともに壁板に対角線方向の斜めひび割れが交差して発生し、正4サイクル目でT柱頭部とC柱脚部の斜めひび割れと、壁板の斜めひび割れがほぼ同時に急激に広がって破壊した。偏心引張力を受けた試験体では、負加力には角度の緩やかな斜めひび割れが壁板に発生し、IH-M65T1.0とIH-M65T5.0の正加力のひび割れ発生数が少ない。破壊状況は、正加力でC柱脚部とT柱頭部に斜めひび割れ発生後、IH-M65Cに比べて角度の緩やかな壁板の斜めひび割れとC柱脚部の斜めひび割れが徐々に広がり始め、その後にT柱頭部の斜めひび割れが少しずつ広がり最終時に大きく開口した。なお、全試験体とも、正加力最大荷重時には引張側となるT柱脚部の軸筋は降伏していない。

#### 3.2 荷重-変形曲線

水平方向の荷重  $Q_x$ -部材角  $R_x$  曲線を図-7に示す。圧縮軸力を受けたIH-M65Cでは、正4サイクル目に側柱の斜めひび割れの開口を伴う壁板の破壊のため、急激な荷重低下のみられる曲線となっている。

偏心引張力を受けた試験体では、IH-M65T1.0を除く4体の負3サイクルには、C柱脚部軸筋が降伏しており、軸筋降伏後最大変形時まで荷重がほぼ一定の曲線となっている。正加力については、所定のC柱脚部

の伸びとした正3サイクルには、壁板とC柱脚部の斜めひび割れとともにT柱頭部の斜めひび割れが徐々に拡幅しており、最大荷重時までの荷重上昇と最大荷重時から最終時までの荷重低

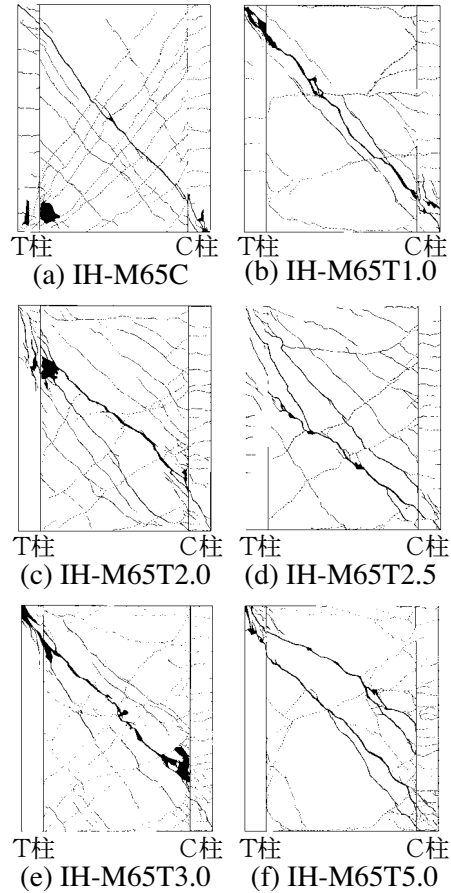


図-6 ひび割れ状況

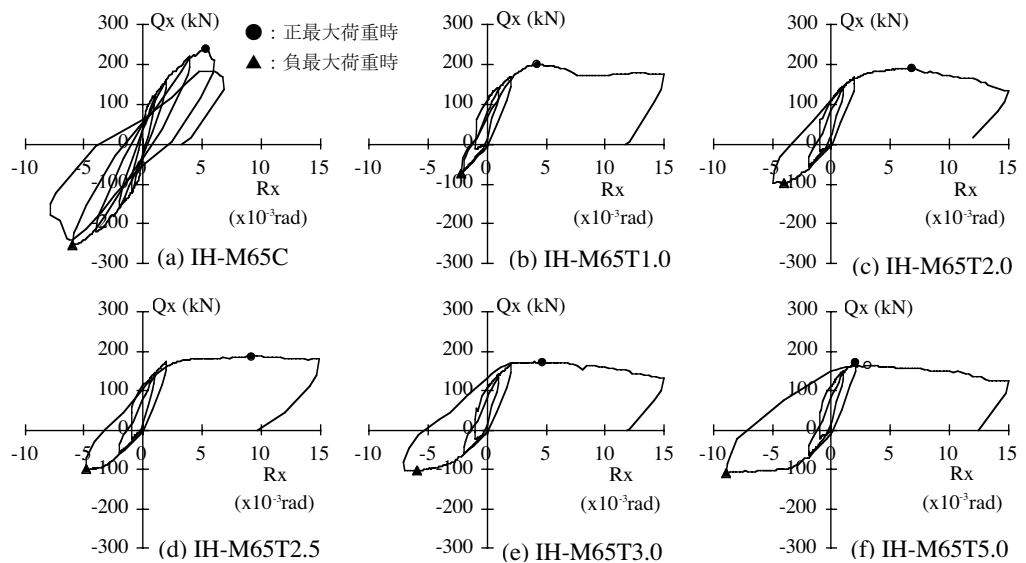


図-7 荷重-変形曲線

下が少ない曲線となっている。なお、IH-M65T5.0の最大荷重は、最終サイクルの荷重が前サイクルより低くなったため、前のサイクルで得られている。

### 3.3 側柱の変形

正加力最大荷重時における側柱各層の伸びと層間変形を図-8に示す。図示した伸びは、図-5に示す各標点間の伸びを各層の高さで除した値であり、層間変形は、各層上下の水平変位の差（上から下を引く）とした。

偏心引張力を受けた

試験体をみると、C柱の伸びは1層または1、2層で大きくなり、C柱の層間変形もこれらの層の値が大きくなっている。一方、T柱の層間変形はT柱の伸びに拘わらず、C柱脚部の伸びの小さい試験体では上部の複数の層に分散しているのに対して、C柱脚部の伸びの大きい試験

体では最上層の7層に集中している。

### 3.4 せん断耐力

各試験体の最大荷重実験値  $tQ_{max}$  と計算値を表-5に示す。表には最大荷重時のC柱脚部（1層目）の伸び $v$ も示した。IH-M65T5.0の正加力については、 $v$ を大きくした後の荷重最大値（図

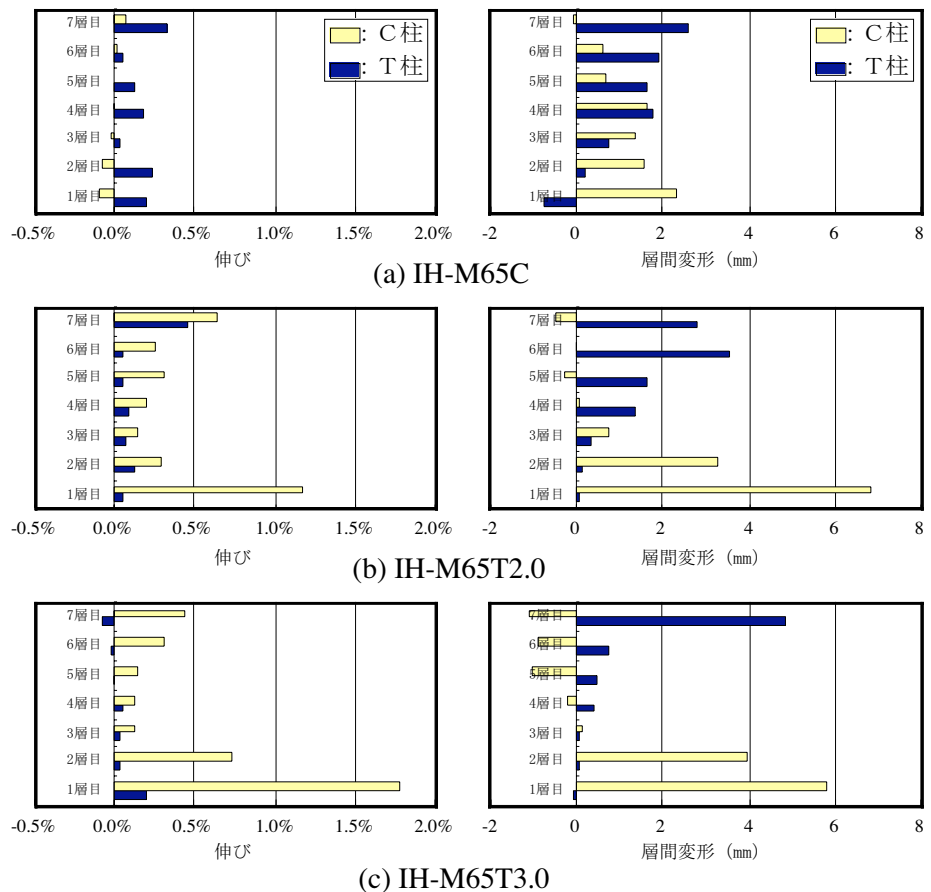


図-8 側柱の伸びと層間変形

表-5 最大耐力

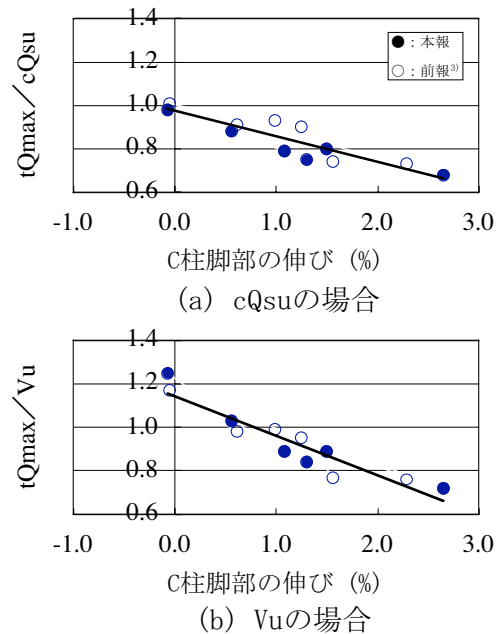
加力方向	試験体名	実験値					計算値			比率		
		tQmax (kN)	N** (kN)	$\sigma_{o}^{***}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Rx ( $\times 10^{-3}$ rad)	v (mm)	cQbu (kN)	cQsu (kN)	Vu (kN)	tQmax/cQbu	tQmax/cQsu	tQmax/Vu
正加力	IH-M65C	239	186	1.96	5.33	-0.14	298	243	191	0.80	0.98	1.25
	IH-M65T1.0	199	-138	-1.45	4.25	1.11	342	227	193	0.58	0.88	1.03
	IH-M65T2.0	190	-137	-1.44	6.78	2.60	341	254	225	0.56	0.75	0.84
	IH-M65T2.5	187	-140	-1.47	9.18	2.16	341	238	211	0.55	0.79	0.89
	IH-M65T3.0	173	-138	-1.45	4.65	2.99	340	217	194	0.51	0.80	0.89
	IH-M65T5.0	170	-140	-1.47	2.00	0.55	342	244	228	0.50	0.70	0.75
	*	164	-138	-1.45	3.06	5.30	342	241	228	0.48	0.68	0.72
負加力	IH-M65C	-254	187	1.97	-5.98	1.11	295	243	191	0.86	1.05	1.33
	IH-M65T1.0	-72	-92	-0.97	-2.25	1.12	81	157	193	0.89	0.46	0.37
	IH-M65T2.0	-97	-92	-0.97	-3.98	2.04***	82	181	225	1.18	0.54	0.43
	IH-M65T2.5	-100	-93	-0.98	-4.78	2.50	82	173	211	1.22	0.58	0.47
	IH-M65T3.0	-103	-92	-0.97	-5.98	3.14***	82	164	194	1.26	0.63	0.53
	IH-M65T5.0	-109	-93	-0.98	-8.90	5.17	82	188	228	1.33	0.58	0.48

\*: C柱脚部の伸び $v$ を大とした後の最大値 \*\* : 圧縮を正とする \*\*\* : 最大変形時の値

— 7 (f)の○印) を\*欄に併記した。計算値  $cQ_{bu}$  と  $cQ_{su}$  は表— 1 と同様の方法で計算した曲げ強度とせん断強度であるが、 $M/Q$  には最大荷重時の値を用いている。 $V_u$  は、表— 2 の式(3)に示す日本建築学会指針式による計算値である。計算値  $cQ_{su}$ 、 $V_u$  に対する実験値の比率とC柱脚部の伸び $v$ との関係を前報の結果<sup>3)</sup>を含めて図— 9に示す。横軸は、伸び $v$ を層高(200mm)で除した値とし、IH-M65T5.0 については、表中の\*欄の値を示した。図によれば、本報の結果(図中●印)は幾分ばらつきがあるものの、 $cQ_{su}$ 、 $V_u$  ともに比率はC柱脚部の伸びが大きくなるにつれて低下する傾向を示している。前報の結果<sup>3)</sup>と併せて、比率と伸びの関係を直線で近似してみると図中の直線が得られる。 $cQ_{su}$ 、 $V_u$  の各データはともに直線の近辺にプロットされており、比率は伸びに比例して小さくなるといえる。また、実験では約 0.5%の伸びで柱脚部軸筋が降伏した。圧縮軸力を受ける場合の比率に比べて 0.5%の伸びの比率は、 $cQ_{su}$ 、 $V_u$  ともに 10 %程度の低下であり、大差ないとみなすことができる。一方、偏心引張力を受ける試験体の負加力の実験値については、IH-M65T1.0を除き、C柱脚部軸筋が降伏しており、曲げ耐力に達したと考えられる。計算値  $cQ_{bu}$  に対する  $tQ_{max}$  の比率は、1.18~1.33、平均 1.25 となり、実験値が計算値に比べて少し大きな値となっている。

#### 4. まとめ

偏心引張力を受ける耐震壁について、水平力に対して圧縮側となる側柱脚部の伸びを変化させた加力実験を行い、前報の結果<sup>3)</sup>を含めてせん断耐力について検討した。その結果、計算値に対する実験値の比率は、 $cQ_{su}$ 、 $V_u$  ともに圧縮側柱脚部の伸びが大きくなるにつれて直線的に小さくなること、圧縮側柱脚部の軸筋が降伏する程度の伸びであれば比率の低下は少なく、比率は圧縮軸力を受ける場合の比率と大差ないことを示した。



図— 9 実験値の計算値に対する比率

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、室蘭工業大学大学院生の奥田大史氏には多大なるご協力をいただいた。ここに、深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 溝口光男, 荒井康幸, 細谷孝司: 偏心引張力を受ける鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.499-504, 2001.7
- 2) 溝口光男, 荒井康幸, 坂本 亨: 引張軸力を受ける鉄筋コンクリート耐震壁のせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.919-924, 2002.6
- 3) 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, Vol.25, No.2, pp.607-612, 2003.7
- 4) 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), pp.401-403, 1990
- 5) 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, pp.209-214, 1999