

論文 鉛直荷重による軸力が耐震壁側柱のせん断強度に及ぼす影響

徳田俊宏^{*1}・江崎文也^{*2}・小野正行^{*3}・本多貴士^{*4}

要旨:耐震壁付帯ラーメン側柱の応力状態を再現できる側柱要素試験体のせん断実験法を用いて,鉛直荷重による一定軸方向力を変動因子としたせん断力載荷実験を実施した。実験結果によれば,要素試験体の破壊機構は,耐震壁側柱のせん断破壊機構に極めて近似していることがわかった。また,鉛直荷重による一定軸方向力を増大すると側柱のせん断強度が上昇し,強度上昇分は,鉛直荷重による一定軸方向応力度に比例していることがわかった。

キーワード:耐震壁,側柱,せん断破壊,せん断強度,軸方向応力度

1. 序

RC耐震壁の水平せん断強度は,付帯ラーメン部材強度に依存している。付帯ラーメン部材が強剛であれば,壁板のスリップ状せん断破壊により耐震壁の水平せん断強度が支配される。一方,ひび割れが生じた壁板の膨張を付帯ラーメン部材が十分に拘束することができなければ,壁板がその強度を十分に発揮する以前に付帯ラーメン部材がせん断破壊を起こし,耐震壁が水平せん断耐力に達する。このことは,耐震壁の水平せん断強度が,壁板のせん断強度と付帯ラーメンのせん断強度の累加にならないことを意味している。つまり,耐震壁の水平せん断強度は,付帯ラーメンのせん断強度に依存していることになる。したがって,耐震壁の水平せん断強度を的確に評価するためには,付帯ラーメン部材のせん断強度を適切に評価する必要があるものと考えられる。文献1)では,鉛直荷重による一定軸力が作用しない場合について,主筋比および帯筋比を変動因子とした側柱要素試験体のせん断実験を行った。しかし,通常,耐震壁の付帯柱には鉛直荷重による一定軸方向応力度が作用していることから,側柱のせん断強度に及ぼす鉛直荷重による軸方向応力度の影

響を明らかにする必要がある。そこで,側柱の補強筋量を一定とし,鉛直荷重による軸方向応力度を変動因子とした付帯柱のせん断実験を計画するとともに,側柱のせん断強度に及ぼす帯筋の補強効果を検討するため,帯筋補強のない試験体の実験も計画した。本論は,これらの実験結果により,側柱のせん断強度に及ぼす鉛直荷重による軸方向応力度および帯筋強度の影響について検討した結果を述べるものである。

2. 実験概要

2.1 試験体形状および加力方法

図-1に示す耐震壁付帯ラーメン側柱のせん断破壊の恐れが大きい部分に着目して,図-2に示すような要素試験体によるせん断実験により検討することにした。図-3に試験体形状および配筋を,表-1に試験体一覧を示す。表-2には,使用した材料の力学的性質を示す。コンクリート強度が低いのは,既存不適格RC建築物を想定して,低強度コンクリート配合としたためである。試験体形状は,せん断破壊の恐れが大きい耐震壁側柱脚部を想定し,実物の約1/3縮尺モデル側柱要素試験体とした。壁板の厚さは,最大耐力時に壁板のスリップ破壊が先

*1 名工建設株式会社 修士(工学)(正会員)

*2 九州共立大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)

*3 近畿大学教授 九州工学部建築学科 博士(工学)(正会員)

*4 九州共立大学大学院 都市システム工学専攻(正会員)

行しないように決めた。鉛直荷重による側柱軸方向力は、一般的な中低層RC建築物の下層部分を想定して決めた。また、側柱のせん断強度に及ぼす帯筋の補強効果について検討するため、鉛直荷重による側柱軸方向力を作用させていない試験体のうち帯筋がない主筋補強試験体実験シリーズを計画した。図-2に示す自己バランス型の鉛直荷重載荷装置を用いて、側柱の軸芯上に所定の鉛直荷重に相当する軸方向力を載荷後、試験機により手で一方向単調増加荷重を載荷した。軸方向力は、試験機での載荷開始から実験終了まで一定値となるように制御した。なお、試験体下部は試験体ベッドに直接タッチさせた。

2.2 測定方法

文献1)に示す測定装置を用いて、柱の水平変形および鉛直変形を測定した。また、図-3に示す位置の柱主筋および帯筋、壁板の補強筋の各ひずみをワイヤーストレンゲージにて測定

表-2 使用材料の力学的性質

コンクリート

Specimen	σ_B	E_C
E18-1(2,3)-0-0	17.9	14.5
E18-3-0.3-0(2,4)	17.5	14.2

σ_B : シリンダー圧縮強度 (MPa), E_C : ヤング係数 (GPa)

鉄筋

Bar	a	σ_y	σ_u	E_s	ϵ
D6	0.32	371	504	197	11.5
D10	0.71	362	504	189	22.5
D13	1.27	354	486	185	21.5

a: 断面積 (cm²), σ_y : 降伏点 (MPa), σ_u : 引張強度 (MPa)

E_s : ヤング係数 (GPa), ϵ : 伸び (%)

した。荷重、変位および鉄筋のひずみの測定は、連続的に荷重を載荷しながら0.1secのサンプリング間隔でハードディスクに記録した。試験体に生じたひび割れの記録は、目視およびビデオ撮影によった。載荷速度はおよそ1.6kN/secである。

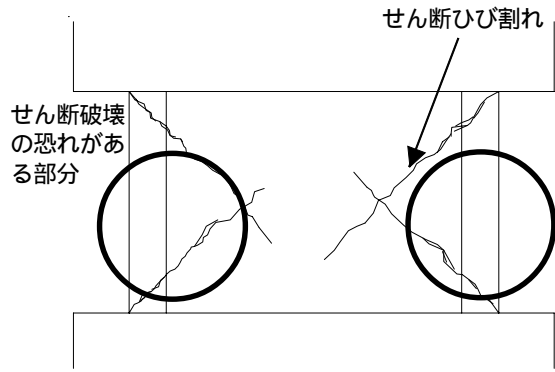


図-1 せん断破壊の恐れがある側柱部分

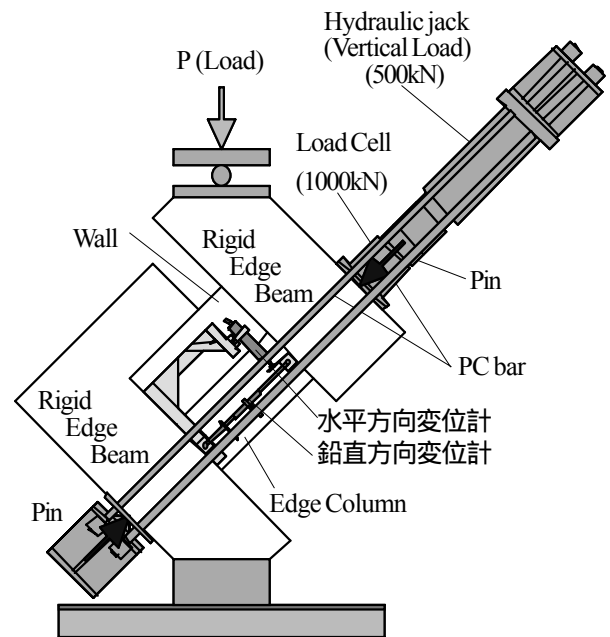


図-2 加力方法

表-1 試験体一覧

Specimen	Edge column			Thickness (mm)	Wall Reinforcement	Axial Load N/bD (MPa)	
	Section b×D(mm×mm)	Longitudinal Reinforcement	Transversal Reinforcement				
E18-1-0-0	200×200	6-D10 ($p_g=1.09\%$)	/	100	D6@100mm (Single Layer) ($p_s=0.32\%$)	0	
E18-2-0-0		6-D13 ($p_g=1.91\%$)					
E18-3-0-0		10-D13 ($p_g=3.18\%$)					
E18-3-0.3-0		10-D13 ($p_g=3.18\%$)	D6@100mm ($p_w=0.32\%$)				2
E18-3-0.3-2							4
E18-3-0.3-4							4

p_g : 主筋比, p_w : 帯筋比, p_s : 壁筋比, N: 軸力, b: 側柱幅, D: 側柱せい

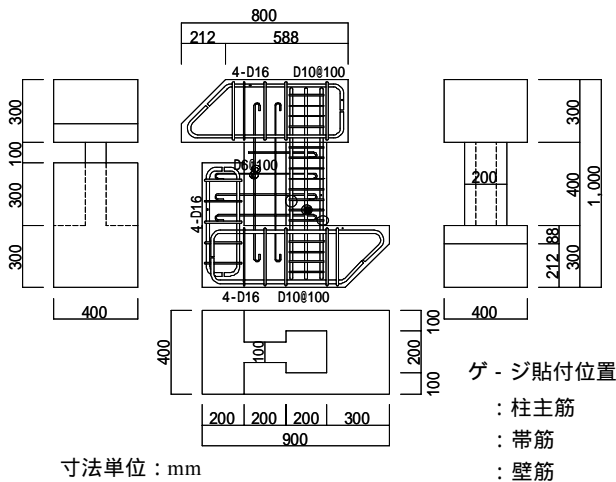


図 - 3 軸力載荷シリーズ試験体形状・配筋およびゲージ貼付位置

3. 実験結果

3.1 破壊性状と履歴性状

図 - 4 および図 - 5 に、主筋のみで補強した主筋補強シリーズ試験体および鉛直荷重による軸方向力を変化させた軸力載荷シリーズ試験体の水平荷重 Q と側柱部材角 R (= 柱水平変位 / 柱内法高さ) との各関係、 Q と側柱の軸方向平均ひずみ ε_v (= 軸方向変位 / 柱内法高さ) との

各関係および実験終了時の各試験体のひび割れと破壊状況を、それぞれ示す。 P は水平断面に対して 45 度方向に載荷しているので、 $Q=P/\sqrt{2}$ とした。いずれの実験シリーズとも、載荷荷重を徐々に増加させていくと、想定した破壊線に沿ったひび割れが、側柱横の壁板に発生した。このひび割れは、側柱との境界部分へ進展し、ひび割れの発生と同時に荷重が一旦低下する。軸力載荷シリーズ試験体の場合は、荷重の低下は少なかった。これは、補強筋量が多いためと考えられる。ひび割れ発生後は徐々に荷重が増加し、側柱にも斜めせん断ひび割れが発生した。いずれの試験体とも、 R がおよそ 0.5% 程度になると最大荷重に達し、最大荷重時には、壁板に生じたひび割れと柱に生じたひび割れが連続して、想定した破壊線が形成された。主筋補強シリーズでは、ひび割れの形状および本数は、主筋量に関係なく、ほぼ同じひび割れ性状を示した。軸力載荷シリーズでも、軸力の大きさにかかわらずほぼ同じひび割れ性状を示した。ひび割れ状況によれば、既往の耐震壁側柱

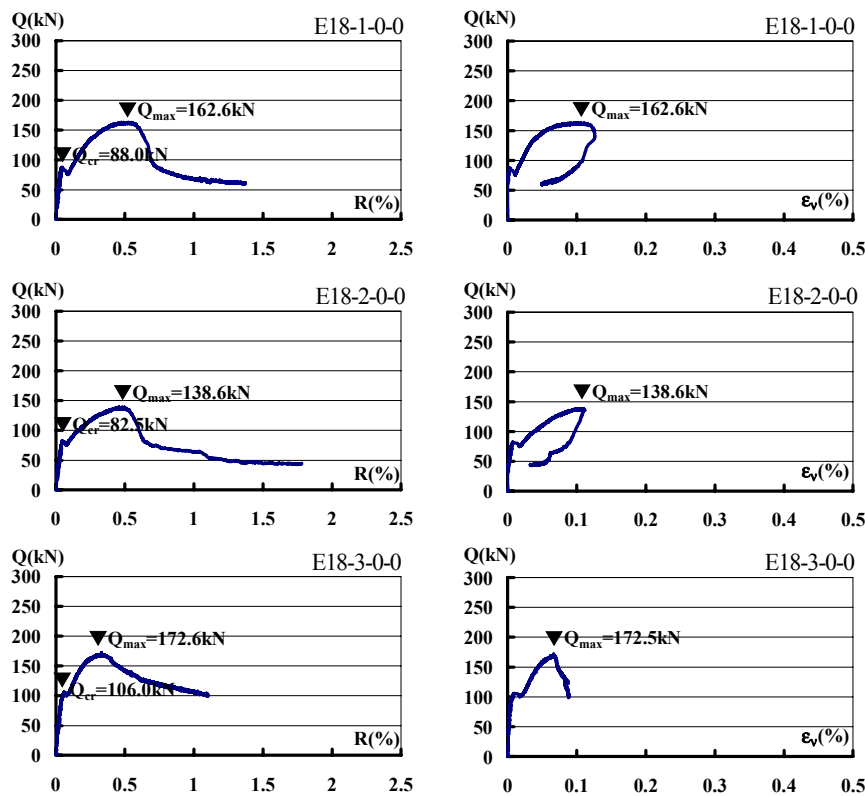


図 - 4 主筋補強シリーズ試験体の水平荷重 Q と側柱部材角 R との関係、 Q と側柱軸方向平均ひずみ ε_v との関係および実験終了時のひび割れと破壊状況

のせん断破壊状況にきわめて類似していることがわかる。最大荷重以後は、想定した破壊線に沿ったひび割れ幅が拡大するとともに、壁板隅角部に圧壊現象が観察され、徐々に荷重が低下した。図 - 4 によれば、ひび割れ後は急激な伸びひずみが生じている。しかし、最大荷重以後は伸びひずみの増加が停止または鈍化し、その後縮む方向に変化している。軸力載荷シリーズでは、図 - 5 によれば、所定の鉛直荷重を載荷した試験体では、軸方向力載荷後に軸方向圧縮ひずみが生じている。その後の試験機の荷重 P により側柱に変動軸力が作用するため、徐々に圧縮ひずみが増加するが、側柱にせん断ひび割れが生じると、主筋補強シリーズと同様に、急激な伸びひずみが生じている。しかし、最大荷重後は、伸びひずみの増加が停止または鈍化し、その後縮む方向に変化している現象は、主筋補強シリーズの場合と同様である。一般に、部材がせん断破壊を起こすと部材が縮む現象が起こる。軸方向ひずみ履歴曲線から判断すると、いずれの実験シリーズ試験体とも、最大荷

重以後は側柱がせん断破壊しているものと考えてよい。図 - 6 に、主筋補強シリーズ試験体の側柱主筋および壁横筋の各ひずみの例を示す。データが得られた壁横筋のひずみは、壁板のせん断ひび割れ発生直後から急激に増加し、最大荷重時には、壁横筋のひずみが降伏ひずみより大きくなっている。したがって、最大荷重後は、壁横筋は降伏しているものと考えてよい。一方、側柱主筋のひずみは、壁板のせん断ひび割れ発生直後から徐々に増加するが、最大荷重時には降伏ひずみにまでは達していないようである。最大荷重後は、荷重の低下とともに徐々にひずみが小さくなっていることがわかる。これは、側柱がせん断破壊を起こし、柱が徐々に縮む方向に変形していることによるものと考えられる。図 - 7 に、軸力載荷シリーズ試験体の側柱主筋、壁横筋および帯筋の各ひずみの例を示す。主筋補強シリーズ試験体の場合と同様に、データが得られた壁横筋のひずみは、壁板のせん断ひび割れ発生直後から急激に増加し、最大荷重時には、壁横筋は降伏している。主筋

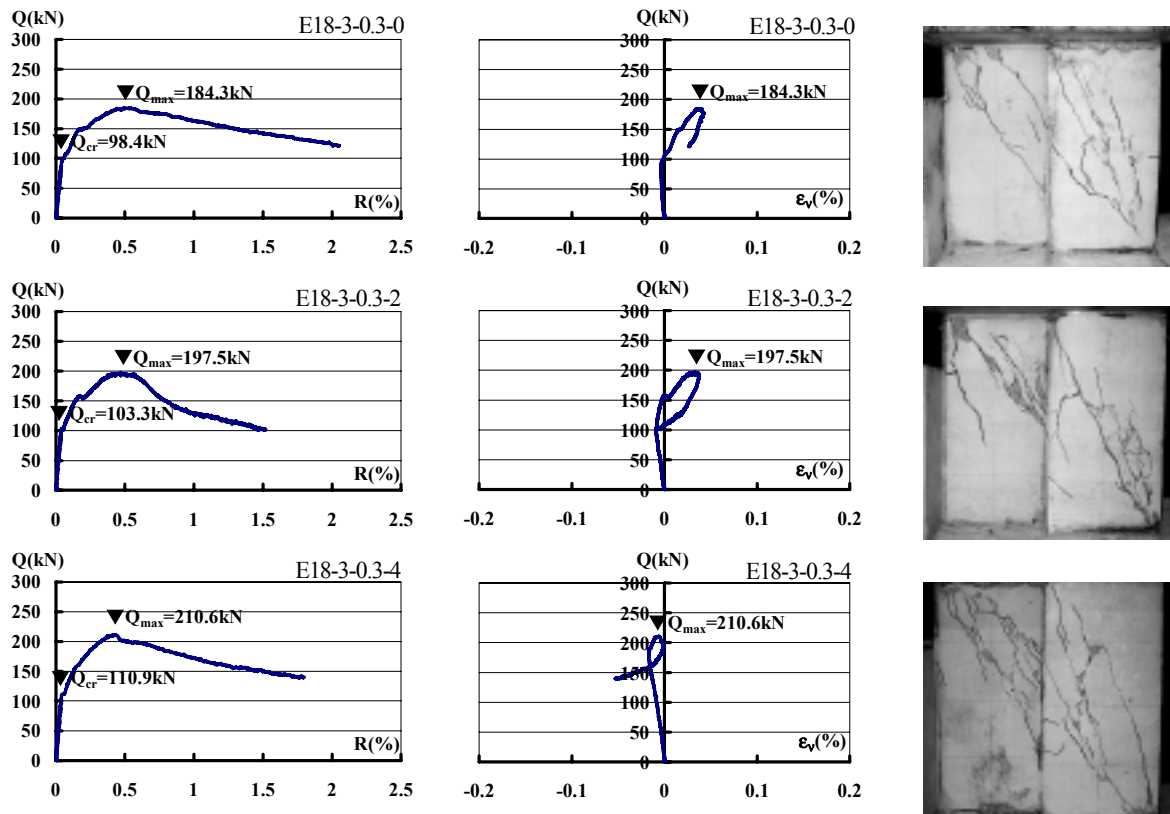


図 - 5 軸力載荷シリーズ試験体の水平荷重 Q と側柱部材角 R との関係、 Q と側柱軸方向平均ひずみ ϵ_v との関係および実験終了時のひび割れと破壊状況

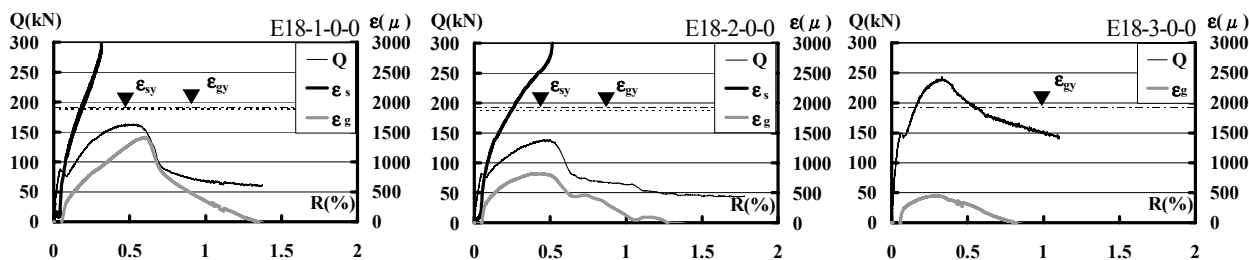
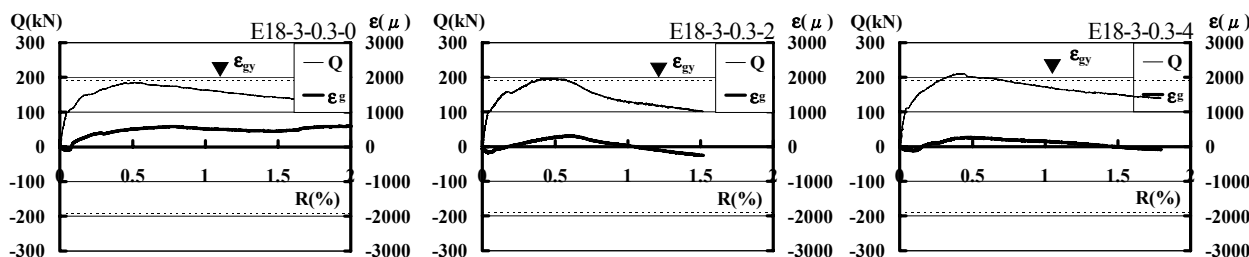
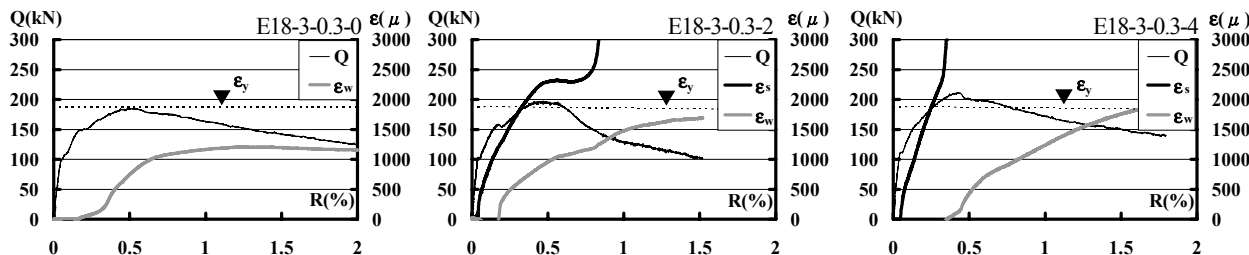


図 - 6 主筋補強シリーズ試験体の側柱部材角 R と側柱主筋ひずみ ϵ_g および側柱部材角 R と壁横筋のひずみ ϵ_s との関係



(a) 主筋ひずみ



(b) 壁横筋および帯筋の各ひずみ

図 - 7 軸力載荷シリーズ試験体の側柱部材角 R と側柱主筋ひずみ ϵ_g および側柱部材角 R と壁横筋のひずみ ϵ_s , 帯筋のひずみ ϵ_w との関係

については、軸方向力載荷後圧縮ひずみが生じているが、ひび割れ後には徐々に引張ひずみが増加している。特に、軸力が大きい試験体では引張ひずみの増加は小さく、いずれの試験体とも、主筋は降伏していない。最大荷重以後は、荷重の低下とともに徐々に引張ひずみが小さくなっているのは、主筋補強シリーズ試験体の場合と同様である。帯筋のひずみについては、最大荷重時に降伏ひずみに達していないが、荷重低下後にも徐々にひずみが増大し、降伏ひずみ近傍まで達している。これは、帯筋が側柱せん断破壊後の荷重低下をある程度押さえている効果を示しているものと考えてよい。

3.2 強度性状

表 - 3 に実験結果一覧を示す。ひび割れ強度およびひび割れ時の部材角は、いずれもほぼ同

程度である。図 - 8 に側柱せん断強度 Q_{cu} と帯筋強度 $p_w \sigma_{yw}$ (σ_{yw} : 帯筋降伏強度) との関係を示す。各試験体のコンクリート強度が異なることから、コンクリートのせん断破壊で決まる強度がコンクリート圧縮強度の平方根で表すと適切に評価できるとの報告²⁾もあることを考慮し、 Q_{cu} および実験事実と適合する $\sqrt{p_w \sigma_{yw}}$ を、それぞれ $\sqrt{\sigma_B}$ で除した値で比較した。壁筋のひずみ測定結果によると、横筋はせん断強度以前に降伏ひずみに達しているため、 Q_{cu} は、(1)式より求めた。

$$Q_{cu} = \frac{P_u}{\sqrt{2}} - Q_w \quad (1)$$

ここで、

P_u : 最大載荷荷重

Q_w : 壁横筋強度 ($= p_s \sigma_y t l'$, p_s : 壁筋比, σ_y : 壁

筋降伏点強度, t : 壁厚, l' : 壁内法長さ)

図 - 8 には, 文献 1) の実験結果も併せて示している。これらによれば, 側柱が帯筋で補強されていれば, 側柱のせん断強度が増大することがわかる。また, 帯筋が側柱のせん断強度に及ぼす影響は, 単独柱のせん断強度に及ぼす影響の場合と同様に, 帯筋強度 $p_w \sigma_{yw}$ の平方根に比例している。表 - 3 によれば, 側柱に作用する鉛直荷重による一定荷重 N が大きくなると最大荷重が増大している。そこで, 側柱のせん断強度に及ぼす鉛直荷重による一定軸方向応力度の影響を考察するため, 鉛直荷重が作用していない試験体の側柱せん断強度 Q_{cu0} より増大した強度上昇分 ΔQ_{cu} を (2) 式で求め, 側柱の断面積 bD (b : 側柱幅, D : 側柱せい) で除した鉛直荷重軸方向応力度による側柱の増大せん断強度 $\Delta Q_{cu}/bD$ と鉛直荷重による軸方向応力度 N/bD との関係を示す。これらによ

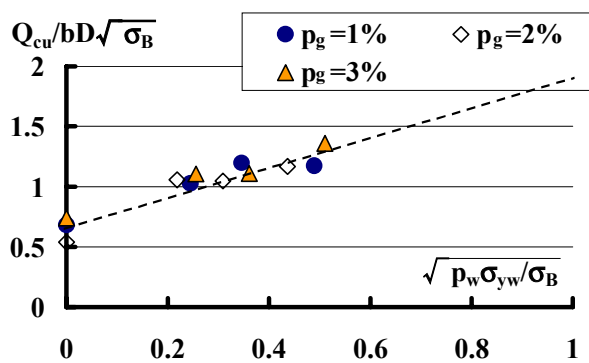


図 - 8 側柱せん断強度 Q_{cu} と帯筋強度 $p_w \sigma_{yw}$ との関係

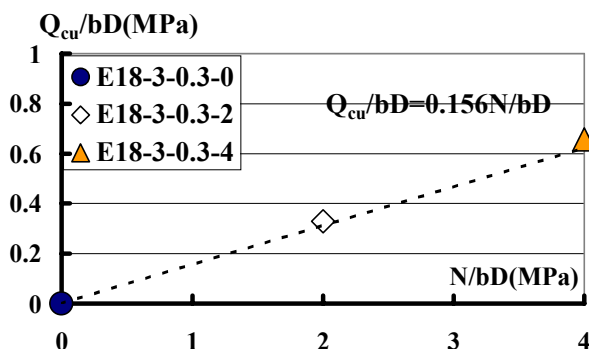


図 - 9 鉛直荷重軸方向応力度による側柱の増大せん断強度 $\Delta Q_{cu}/bD$ と鉛直荷重による軸方向応力度 N/bD の関係

表 - 3 実験結果一覧

Specimen	First Cracking Load		Maximum Load	
	Q_{cr} (kN)	R_{cr} (%)	Q_u (kN)	R_u (%)
E18-1-0-0	88.1	0.04	162.6	0.47
E18-2-0-0	82.5	0.1	138.6	0.46
E18-3-0-0	106	0.06	172.6	0.33
E18-3-0.3-0	112	0.09	185	0.47
E18-3-0.3-2	106	0.06	200	0.48
E18-3-0.3-4	115	0.05	211	0.46

ると, 増大せん断強度 $\Delta Q_{cu}/bD$ は, 鉛直荷重による軸方向応力度 N/bD に比例していることがわかる。この関係を回帰直線として求めると, (3) 式に示す関係が得られた。

$$\Delta Q_{cu} = Q_{cu} - Q_{cu0} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta Q_{cu}}{bD} = 0.156 \cdot \frac{N}{bD} \quad (3)$$

4. 結論

側柱の応力状態を再現した耐震壁側柱要素試験体せん断実験を行った結果, 以下のことがわかった。

- 1) 側柱要素試験体のせん断破壊は, 既往の1スパン耐震壁の水平力載荷実験から得られた側柱のせん断破壊とほぼ同じ性状であった。
- 2) 帯筋強度を増大するとせん断強度が上昇する傾向があり, 上昇率は, 帯筋強度の平方根に比例しているようであった。
- 3) 鉛直荷重による軸方向力が増大すると側柱のせん断強度が増大し, 上昇分は, 軸方向力に比例していた。

今後は, コンクリート強度を変動因子とした実験を行い, 更に検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 徳田俊宏, 江崎文也, 小野正行: 軸力が作用しない耐震壁側柱のせん断強度に関する実験的研究, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.3, pp.493-498, 2001.7
- 2) ACI: Buildg code Requirement, for Reinforced concrete (ACI 318-89), ACI, 1989, 111P