

論文 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

徳田俊宏*1・江崎文也*2・小野正行*3

要旨:耐震壁付帯ラーメンの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提案した。この実験法を用いて、側柱の主筋比および帯筋比を実験変動因子とした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、主筋比および帯筋比を増大すると側柱のせん断強度が上昇する傾向があるが、上昇率は必ずしも主筋強度および帯筋強度に比例しているようではないことがわかった。

キーワード:耐震壁、側柱、せん断破壊、せん断強度

1. 序

R C ラーメン構造の柱および梁のせん断設計では、梁の終局せん断強度実験式¹⁾や下界定理に基づくトラス・アーチ理論による算定式²⁾がせん断終局強度式として採用されている。しかし、耐震壁の水平抵抗機構および破壊機構に基づく研究では、耐震壁付帯ラーメンの力学的挙動は、フレーム構造の柱や梁のそれとは異なることが報告されている³⁾。

耐震壁付帯ラーメンは、せん断ひび割れが生じた壁板の膨張を拘束する役目があるため、付帯ラーメンには、水平変形に伴うせん断力のほか、壁板の膨張に伴う拘束反力が生じる。せん断ひび割れが発生した後の壁板を直交異方性弾性板と仮定した耐震壁に関する応力解析によれば、ひび割れの続発・進展により、耐震壁の側部材にはせん断力が集中することが指摘されている⁴⁾。このことは、耐震壁のせん断実験で側部材端部がせん断破壊を起こしている例が多いことから実証されており、耐震壁付帯ラーメン側部材の端部は、せん断破壊の恐れがきわめて大きい。耐震壁の側部材、とくに側柱がせん断破壊を起こすと鉛直支持能力が急激に低下し、建物の落階現象を引き起こす要因ともなることから、これらの破壊を防止す

るためにも、耐震壁側部材の抵抗機構・破壊機構を明らかにしておくことが重要と考えられる。

耐震壁のせん断実験で観察された耐震壁側柱端部のせん断破壊の状況によれば、側柱のせん断破壊は、ラーメン構造の柱のせん断破壊状況とは異なり、パンチングシア破壊に酷似している。水平抵抗および破壊機構に基づく側部材のせん断強度に関する半理論式によると、せん断強度に及ぼす因子は、帯筋の影響よりも軸力と主筋の影響が大きいことが報告されている³⁾ことを考慮すると、付帯ラーメン側部材端部のせん断破壊がパンチングシア破壊に近いものと考えられる。

そこで、耐震壁付帯ラーメンのせん断強度を明らかにするため、付帯ラーメン側部材の応力状態が再現できる要素試験体モデルに関するせん断実験法を考案した。

本論は、これらの試験体を用いて側柱のせん断実験を行い、せん断強度に及ぼす影響因子について、実験的に検討を行ったものである。

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の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

*1 近畿大学大学院 産業技術研究科造形学専攻 (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)

示すような要素試験体によるせん断実験を計画した。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。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行しないように決めた。図-2に示すように、上下の剛な側ばり部分を圧縮すれば、壁板上部の隅角部から側柱脚部外端を結ぶ斜め45度の線に破壊断面が形成され、側柱端部が直接せん断破壊を起こすものと考えられる。このような破壊面が形成されれば、耐震壁側柱のせん断破壊にきわめて近い状況が再現できると考え、図-2に示す実験法を考案した。耐震壁圧縮側柱では変動軸圧縮力が作用することを考慮し、柱部材の曲げせん断実験にも採用されている載荷法を利用して、剛な側ばりと壁板を設けて直接せん断破壊が生じるようにした。側柱端部には耐震壁に正負繰返し水平力が作

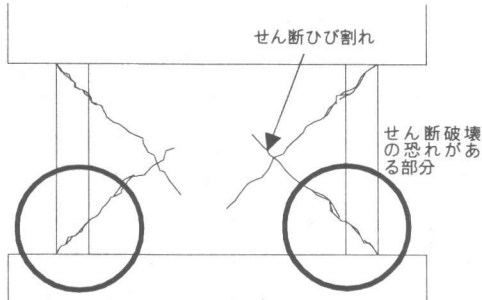


図-1 せん断破壊の恐れがある側柱部分

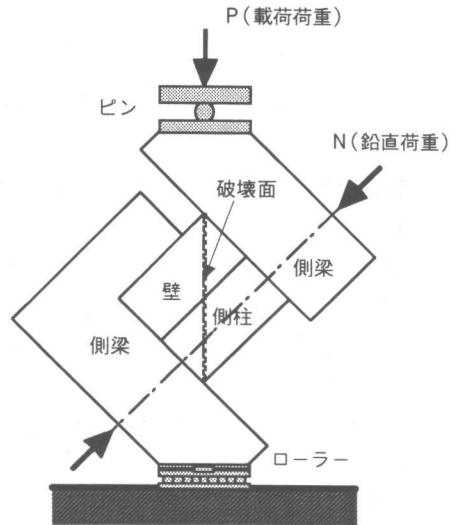


図-2 加力方法

表-2 使用材料の力学的性質

コンクリート

試験体名	σ_B	E_C
E20-1-0.3(0.6, 1.2)-0	19.8	21.5
E25-2-0.3(0.6, 1.2)-0	24.9	23.6
E18-3-0.3(0.6, 1.2)-0	18.2	18.8

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

鉄筋

種別	a	σ_y	σ_u	E_s	伸び (%)
D6	0.32	371	504	197	11.5
D10	0.71	334	473	176	15.8
D13	1.27	361	505	182	17.8

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)

表-1 試験体一覧

試験体名	側柱			壁	
	断面bxD (mm×mm)	主筋(主筋比) (%)	帯筋(帯筋比) (%)	厚さ (mm)	壁筋(壁筋比) (%)
E20-1-0.3-0	200×200	6-D10 ($p_g=1.1\%$)	D6@100 ($p_w=0.32\%$)	100	縦横共 D6@100mm ($p_s=0.32\%$)
E20-1-0.6-0			D6@50 ($p_w=0.64\%$)		
E20-1-1.2-0			D6@25 ($p_w=1.28\%$)		
E25-2-0.3-0		6-D13 ($p_g=1.9\%$)	D6@100 ($p_w=0.32\%$)		
E25-2-0.6-0			D6@50 ($p_w=0.64\%$)		
E25-2-1.2-0			D6@25 ($p_w=1.28\%$)		
E18-3-0.3-0		10-D13 ($p_g=3.2\%$)	D6@100 ($p_w=0.32\%$)		
E18-3-0.6-0			D6@50 ($p_w=0.64\%$)		
E18-3-1.2-0			D6@25 ($p_w=1.28\%$)		

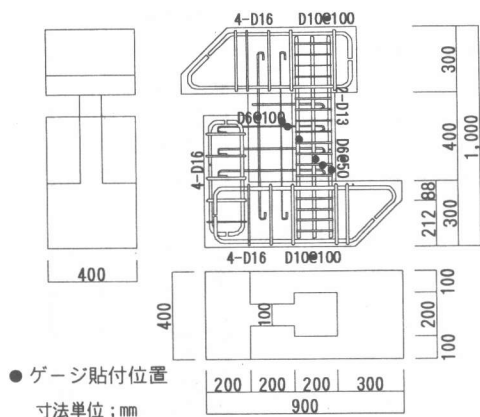


図-3 試験体形状・配筋およびゲージ貼付位置

用しても、斜めせん断ひび割れは一方方向のみに生じるので、一方方向単調載荷により実験を行っても問題はないと思われる。なお、本実験シリーズでは、鉛直荷重による一定軸力は作用させていないが、水平荷重による変動軸圧縮力が作用する。

2.2 測定方法

図-4に測定装置を示す。柱の水平変形および鉛直変形を、上下の剛な梁に埋め込んだボルトに固定された測定フレームに取り付けた高感度変位計（水平変位感度：200 μ /mm、鉛直変位感度：500 μ /mm）にて測定した。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グージにて測定した。

荷重、変位および鉄筋のひずみの測定は、既往の実験のように制御変位で荷重を一時停止して測定する方法ではなく、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。また、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。

3. 実験結果

3.1 破壊性状と履歴性状

図-5に、各試験体の水平荷重 Q と側柱部材角 R （ R ＝柱水平変位／柱内法高さ）との関係、水平荷重 Q と側柱の軸方向平均ひずみ ϵ_v との関係および実験終了時の試験体のひび割れと破壊状況を示

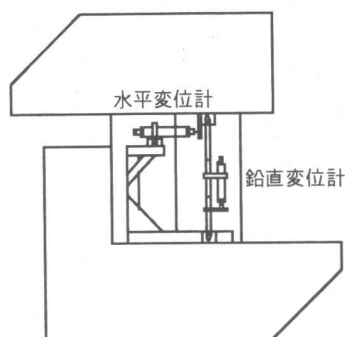


図-4 測定装置

す。水平荷重 Q は、試験機の荷重 P の水平成分として、 $Q = P/\sqrt{2}$ で求めた。

試験体に載荷する荷重を徐々に増加させていくと、いずれの試験体とも、側柱と接する壁板に、想定した破壊線近傍に沿って斜めせん断ひび割れが発生し、それと同時に載荷荷重が一時低下した。帯筋比が小さい試験体では、壁板のひび割れ発生とほぼ同時期に、壁板に発生した斜めせん断ひび割れと接続するように側柱に斜めせん断ひび割れが発生し、破壊線に沿った斜めせん断ひび割れが形成された。一方、帯筋比が大きい試験体では、その後の荷重が増大した後に側柱に斜めせん断ひび割れが発生し、斜めひび割れの発生本数も多くなる傾向がみられ、必ずしも想定した破壊線に沿ったひび割れのみが大きくなるとは限らなかった。しかし、いずれの試験体とも最大荷重時のひび割れ状況を観察すると、既往の耐震壁の水平力載荷実験で観察された側柱脚部のせん断破壊にきわめて類似した破壊性状を示していることから、本実験で計画した要素試験体を用いて耐震壁側柱脚部のせん断強度を検討できるものと思われる。

せん断ひび割れ発生後は、荷重は徐々に増大していくが、ひびわれの続発と初ひび割れの幅が徐々に拡大し、水平変形が急激に大きくなり、脆性が著しく低下した。荷重がピークに達した後は、破壊線近傍の壁板に一部圧壊が生じるとともに、側柱脚部のせん断破壊も激しくなった。載荷

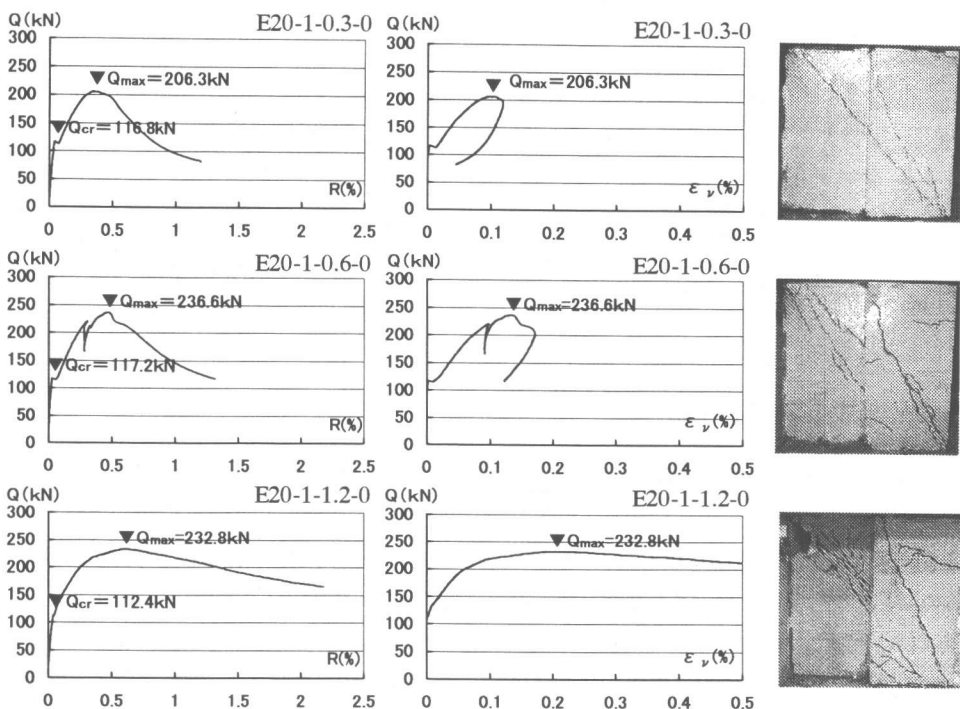


図-5 a 主筋比 $p_g = 1\%$ 試験体の水平荷重 Q と側柱部材角 R との関係, Q と側柱軸方向平均ひずみ ϵ_v との関係および実験終了時のひび割れと破壊状況

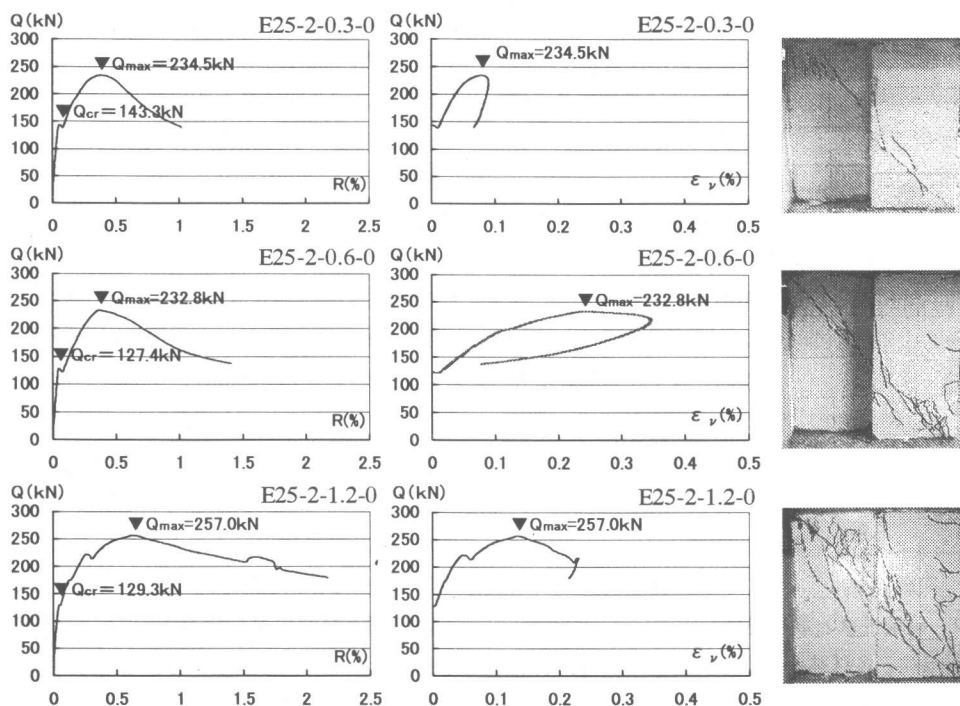
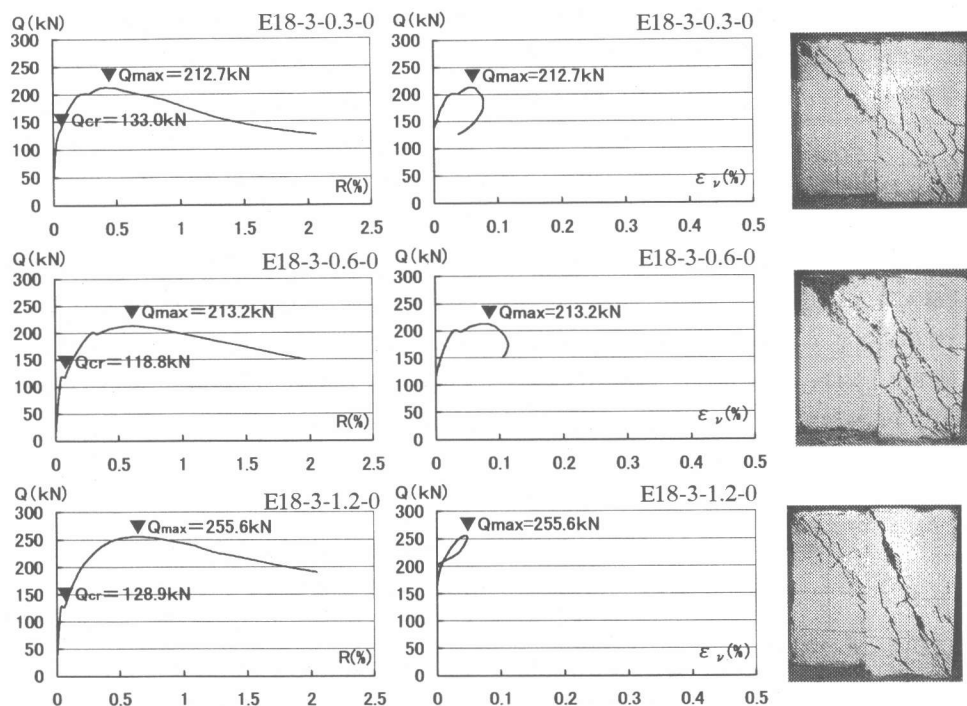
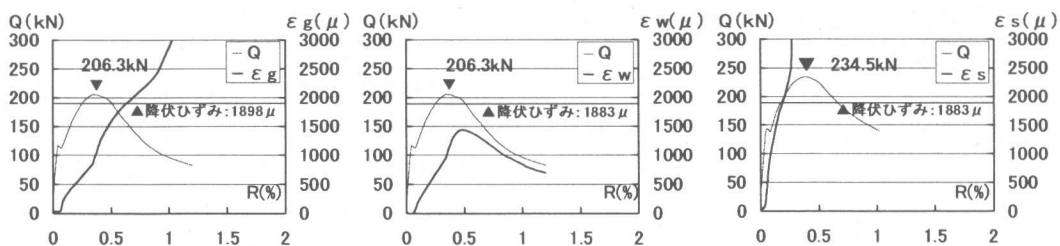


図-5 b 主筋比 $p_g = 2\%$ 試験体の水平荷重 Q と側柱部材角 R との関係, Q と側柱軸方向平均ひずみ ϵ_v との関係および実験終了時のひび割れと破壊状況



図－5 c 主筋比 $p_g = 3\%$ 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 E20-1-0.3試験体の側柱部材角 R と側柱主筋ひずみ ε_g 、帯筋のひずみ ε_w 、およびE25-2-0.3試験体の側柱部材角 R と壁横筋のひずみ ε_s との関係

荷重が増大している間は、柱の軸方向変形が徐々に伸びているが、荷重のピーク後は徐々に縮んでいることから、側柱の鉛直変形が縮み始めると側柱が破壊したものと判断してよいと考えられる。

図－6に補強筋の最も少ないE20-1-0.3試験体の側柱主筋と帯筋、およびE25-2-0.3試験体の壁横筋の各ひずみの1例を示す。最大荷重時には、壁筋、側柱主筋および帯筋とも降伏ひずみに近傍に達している。しかし、主筋量が2～3%の比較的主筋量が多い試験体では、主筋が降伏ひずみに達する以前に最大荷重となっていることから、主筋がそ

の強度を発揮する以前にせん断破壊しているものと思われる。

3.2 強度性状

表－3に実験結果一覧を示す。図－7および図－8に側柱せん断強度 Q_{cu} と主筋強度 $p_g \sigma_{yg}$ (σ_{yg} : 主筋降伏強度) との関係および Q_{cu} と帯筋強度 $p_w \sigma_{yw}$ (σ_{yw} : 帯筋降伏強度) との関係を、それぞれ示す。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

るとの報告もあることを考慮し、 Q_{cu} 、 $p_g \sigma_{yg}$ および $p_w \sigma_{yw}$ を、それぞれ $\sqrt{\sigma_B}$ で除した値で比較した。 Q_{cu} は、壁横筋が降伏しているとして、(1) 式から求めた。

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

ここで、

P_u : 最大載荷荷重

Q_{wu} : 壁横筋強度 ($= p_g \sigma_{yl'}$, p_g : 壁筋比, σ_y : 壁筋降伏点強度, t : 壁厚, l' : 壁内法長さ)

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の、(1) 式

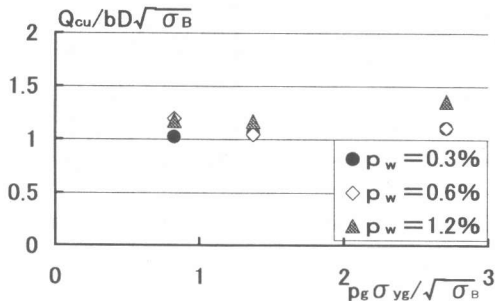


図-7 側柱せん断強度 Q_{cu} と主筋強度 $p_g \sigma_{yg}$ との関係

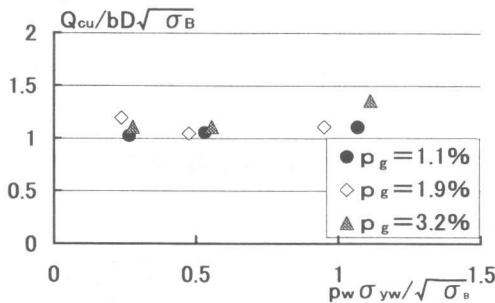


図-8 側柱せん断強度 Q_{cu} と帯筋強度 $p_w \sigma_{yw}$ との関係

表-3 実験結果一覧

試験体名	ひび割れ時		最大耐力時	
	Q_{cu} (kN)	R_{cu} (%)	Q_u (kN)	R_u (%)
E20-1-0.3-0	116.8	0.04	206.3	0.35
E20-1-0.6-0	117.2	0.03	236.6	0.47
E20-1-1.2-0	112.4	0.04	232.8	0.61
E25-2-0.3-0	143.3	0.06	234.5	0.39
E25-2-0.6-0	127.4	0.05	232.8	0.37
E25-2-1.2-0	129.3	0.05	257.0	0.63
E18-3-0.3-0	133.0	0.05	212.7	0.42
E18-3-0.6-0	118.8	0.06	213.2	0.61
E18-3-1.2-0	128.9	0.04	255.6	0.65

で Q_{cu} を求めることができるようである。

図-7 および図-8 によれば、主筋強度が増大すると側柱のせん断強度が上昇する傾向がある。また、帯筋強度の増大によって側柱のせん断強度が上昇する傾向がみられるが、増大率は、主筋強度および帯筋強度に必ずしも比例しているようではない。補強筋強度が大きくなると、せん断破壊時には壁縦筋、主筋および帯筋とも降伏ひずみに達していないことから、側柱せん断強度に及ぼす補強筋強度の影響についての定量的な評価は、今後の実験資料を加えて更に検討する必要がある。

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の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) 主筋強度を増大するとせん断強度が上昇する傾向があるが、上昇率は、必ずしも主筋強度に比例しているようではなかった。
 - 3) 帯筋強度が増大すると側柱のせん断強度が増大する傾向がみられるが、上昇率は必ずしも帯筋強度に比例しているようではなかった。
- 今後は、コンクリート強度および軸力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。

謝辞

試験体製作および実験の実施にあたっては、九州共立大学技能員花田憲一、高田一俊、青木治の各氏、および平成12年度九州共立大学工学部建築学科江崎研究室、近畿大学九州工学部建築学科小野研究室の卒論生の協力を得た。ここに、関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，日本建築学会－許容応力度設計法－，1999.11，pp.133～169
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度型耐震設計指針・同解説，日本建築学会，1990.11.1，pp.122～135
- 3) 富井政英・江崎文也：Lateral Shear capacity of One-Bay One-Story Reinforced Concrete Framed Shear Walls Whose Edge Columns or Edge Beams Fail in Shear，日本建築学会構造系論文報告集，第376号，1987，pp.81～91
- 4) 江崎文也・船本憲治・富井政英：せん断ひび割れ以後の1層連スパン耐震壁の力学的性状に関する理論的研究，日本建築学会九州支部研究報告，第27号，1983，pp.225～228