

論文 耐震壁中間柱のせん断強度に及ぼす補強筋強度の影響

姜 優子*1・江崎文也*2・小野正行*3・別枝和美*4

要旨:耐震壁付帯ラーメンの中間柱の応力状態を再現できる中間柱要素試験体のせん断実験法を用いて,中間柱の無補強試験体,主筋補強試験体および帯筋補強試験体について,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,連層耐震壁中間梁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,中間柱のせん断強度上昇には主筋が最も効果的であることがわかった。

キーワード:耐震壁,中間柱,せん断破壊,せん断強度,主筋,帯筋

1. 序

耐震壁の中間柱や中間梁は,単独の柱や梁と異なり,壁板からのせん断応力のほかせん断ひび割れに伴う壁板の膨張による拘束応力が作用する。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,中間部材には側部材でみられるようなせん断ひび割れの進展・続発によって生じるせん断力の集中はない。ひび割れの進展・続発による異方性が進行しても中間部材のせん断力は,壁板に生じる単位長さ当たりのせん断力とほぼ同じ程度のせん断力が生じることが指摘されている¹⁾。しかし,中間部材は,壁筋と同様にせん断ひび割れの発生に伴う壁板の膨張を拘束する役目をしていることから,中間部材には主として拘束反力による大きな軸方向引張力が生じる。

文献2)では,耐震壁付帯ラーメン中間部材のせん断強度を明らかにするため,付帯ラーメン中間柱の応力状態が再現できる要素試験体モデルのせん断実験法を提案した。この実験装置を用い,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中間柱要素試験体のせん断実験を行った。その結果,主筋比を増大するとせん断強度

が増大する傾向があるが,必ずしも主筋比に比例しているようではないこと,また,せん断強度に及ぼす帯筋比の影響は明らかにされていないことなどがわかった。そこで,中間柱のせん断強度に及ぼす主筋比および帯筋比の影響を明らかにするため,各補強筋のみで補強された要素試験体のせん断実験を計画した。

本論は,これらの試験体を用いた中間柱のせん断実験により,せん断強度に及ぼす補強筋の影響について,実験的に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の中間柱のせん断破壊の恐れが大きい部分に着目して,文献2)で用いた中間柱要素試験体によるせん断実験により,せん断強度に及ぼす補強筋強度の影響について検討を行うことにした。図-2に試験体形状および配筋の例を,表-1に試験体一覧を示す。また,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連スパン耐震壁中間柱中央部を想定し,実物の約1/3縮尺モデル中間柱要素試験体とした。壁板の厚さは,最大耐力

*1 近畿大学大学院 産業技術研究科造形学専攻 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 近畿大学大学院 産業技術研究科造形学専攻(正会員)

時に壁板のスリップ破壊が先行しないように決めた。実験は、中間柱を補強していない無補強シリーズ、主筋のみで補強した主筋補強シリーズ、帯筋のみで補強した帯筋補強シリーズの3つの実験シリーズを計画した。壁筋比は、いずれの試験体とも0.32%である。試験体にはIa-b-c-d(e)の記号を付けている。aはコンクリートシリンダー圧縮強度の値(MPa), bは主筋比の値(%), cは帯筋比の値(%), dは鉛直荷重による中間柱の軸圧縮応力度(MPa), eは同一試験体を区別する番号を、それぞれ示している。剛な側梁間に挿入した楔を壁板の対角線方向(水平と45度)に圧縮する方法²⁾で、一方向単調増加荷重により、試験体にせん断力载荷を行った。本载荷法では、曲げの影響は少ないと考えられる。通常、中間柱には鉛直荷重による一定軸方向力が作用するが、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。これらの影響については、今後検討する予定である。

2.2 測定方法

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にて柱の水平変形および鉛直変形を測定した²⁾。ま

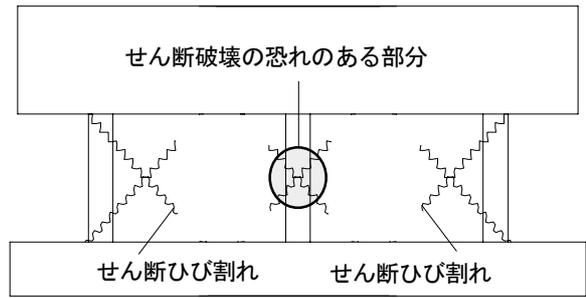


図-1 せん断破壊の恐れがある中間柱部分

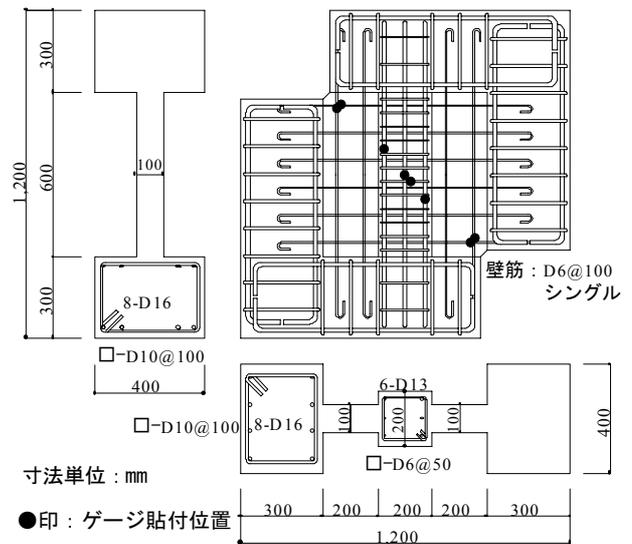


図-2 試験体形状・配筋およびゲージ貼付位置

表-1 試験体一覧

specimen	intermediate column			wall	
	section (mm×mm)	longitudinal reinforcement	transversal reinforcement	thickness (mm)	reinforcement
I18-1-0-0	200×200	6-D10 ($p_g=1.1\%$)	—	100	D6@100mm (single layer) ($p_s=0.32\%$)
I18-2-0-0		6-D13 ($p_g=1.9\%$)			
I18-3-0-0		10-D13 ($p_g=3.2\%$)			
I19-0-0.3-0		—	D6@100mm ($p_w=0.32\%$)		
I19-0-0.6-0			D6@ 50mm ($p_w=0.64\%$)		
I19-0-1.2-0			D6@ 25mm ($p_w=1.28\%$)		
I23-0-0-0(1.2.3)		—	—		

表-2 使用材料の力学的性質

コンクリート

specimen	σ_B	E_C
I18-1(2,3)-0-0	17.9	14.5
I19-0-0.3(0.6, 1.2)-0	19.3	15.6
I23-0-0-0	23.0	17.1

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(cm^2), σ_y : 降伏点(MPa), σ_u : 引張強度(MPa)
 E_s : ヤング係数(GPa), ϵ : 伸び(%)

た、**図-2**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した。載荷速度はおよそ1.6kN/secとした。荷重、変位および鉄筋のひずみの測定は、0.1secのサンプリング間隔で記録し、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

図-3に、無補強シリーズの試験体について、水平荷重 Q と中間柱部材角 R (=柱水平変位/柱内法高さ) との関係、 Q と中間柱軸方向平均ひずみ ε_v との関係および実験終了時の試験体のひび割れ状況を示す。なお、水平荷重 Q は、試験機の荷重 P が水平断面に対して45度方向なので、 $Q=P\sqrt{2}$ とした。

無補強シリーズの場合、剛な梁と接する上下の壁板隅角部を結ぶ斜め45度方向に、せん断ひび割れが発生し、**図-3**に示すように、急激に荷重が低下した。このひび割れは柱にも貫通し、その後低下した荷重からの上昇はほとんどみられない。柱の軸方向平均ひずみ履歴曲線によれば、引張ひずみが徐々に増大していることから、中間柱が斜め引張破壊を起こし、壁筋の

みが抵抗する機構が形成されたものと判断される。

図-4に、帯筋補強シリーズの試験体について、水平荷重 Q と中間柱部材角 R との関係、 Q と中間柱軸方向平均ひずみ ε_v との関係および実験終了時の試験体のひび割れ状況を示す。帯筋のみで補強された実験シリーズの場合は、補強筋のない無補強シリーズと同様に、壁板隅角部を結ぶ斜め45度方向に、せん断ひび割れが発生し、**図-4**に示すように、急激に荷重が低下した。しかし、無補強の場合と異なり、その後ひび割れ時の荷重近傍まで荷重の上昇がみられる。これは、帯筋が抵抗していることによるものと考えられる。しかし、ひび割れ時の荷重までは回復していない。柱の軸方向平均ひずみ履歴曲線によれば、無補強シリーズの場合と同様に、部材角の増大とともに引張ひずみが徐々に増大していることから、中間柱が斜め引張破壊を起こし、壁筋と帯筋が斜めひび割れの広がり抵抗する機構が形成されたものと判断される。

図-5に、主筋補強シリーズの試験体について、水平荷重 Q と中間柱部材角 R との関係、 Q と中間柱軸方向平均ひずみ ε_v との関係および実験終了時の試験体のひび割れ状況を示す。主

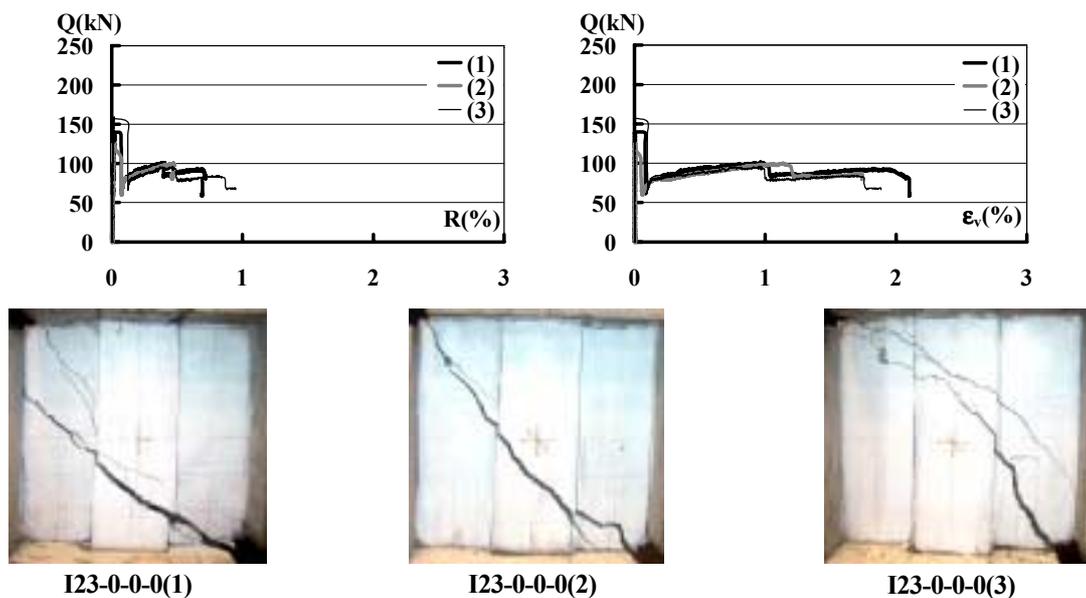


図-3 無補強シリーズ試験体の水平荷重 Q と中間柱部材角 R との関係、 Q と中間柱軸方向平均ひずみ ε_v との関係および実験終了時のひび割れと破壊状況

筋のみで補強された実験シリーズの場合は、前述の2つの実験シリーズ同様に、上下の壁板隅角部を結ぶ斜め45度方向に、せん断ひび割れが発生するが、そのひび割れの進展は柱との境界部で一旦止まった。この時一時荷重が低下するのは前述の2つの実験シリーズの場合と同様であるが、**図-5**に示すように、ひび割れ後にひび割れ時の荷重以上に荷重が増大することが異なっている。柱の軸方向平均ひずみ履歴曲線

によれば、柱の伸びひずみが止まると荷重が最大となり、その後柱が縮み始めると荷重が徐々に低下した。通常、せん断破壊を起こすと部材が縮むので、最大荷重以後は柱がせん断破壊したものと考えられる。

中間部材の水平抵抗機構から判断すると、水平せん断力の増加とともに壁板に斜めひび割れが生じ、軸方向引張力が作用することから、中間部材の補強筋としては、軸方向引張力に抵抗

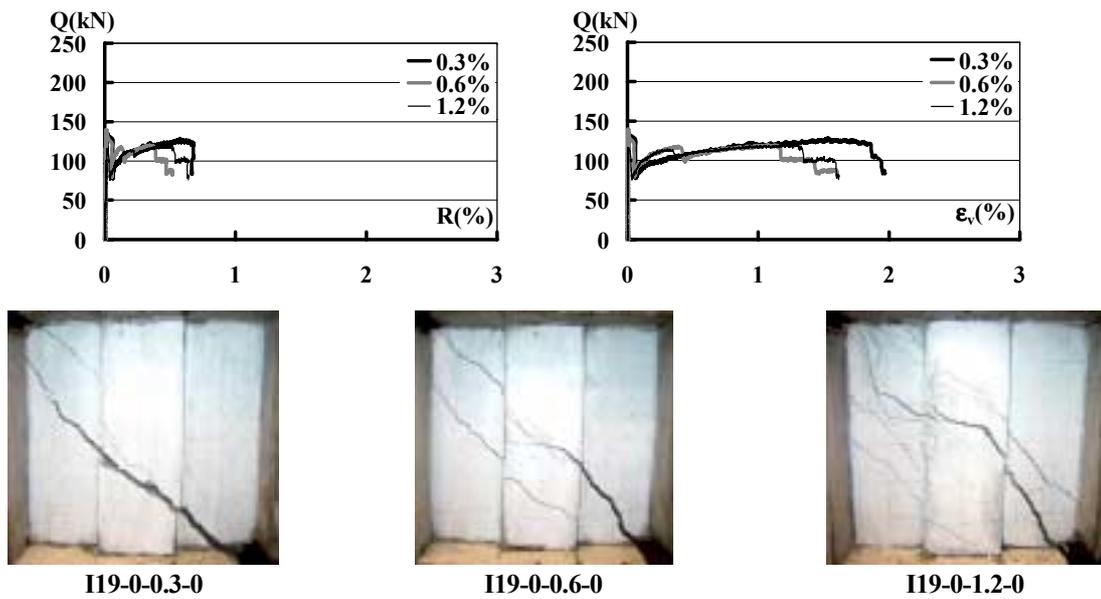


図-4 帯筋補強シリーズ試験体の水平荷重 Q と中間柱部材角 R との関係、 Q と中間柱軸方向平均ひずみ ϵ_v との関係および実験終了時のひび割れと破壊状況

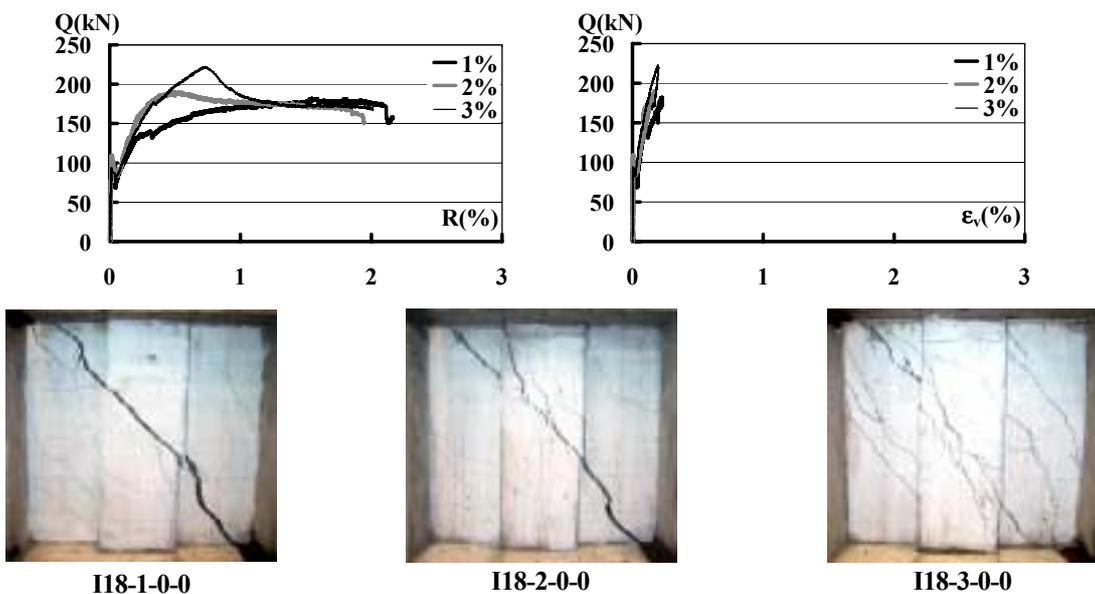


図-5 主筋補強シリーズ試験体の水平荷重 Q と中間柱部材角 R との関係、 Q と中間柱軸方向平均ひずみ ϵ_v との関係および実験終了時のひび割れと破壊状況

できるものが最も効果的である。主筋はダボ作用による抵抗もある程度期待できるので、本実験の結果からも、中間柱の主筋が水平抵抗に最も効果がある結果を示した。

いずれの実験シリーズとも連層耐震壁の実験結果から観察された中間梁のせん断破壊に極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中間柱のせん断強度を検討できると思われる。

図-6に、主筋補強シリーズ試験体の中間柱部材角 R と主筋ひずみとの関係を示す。これらによると、主筋比が最も大きい試験体の場合は降伏ひずみまでは達していない。しかし、ひび割れ後には引張ひずみが急激に大きくなっていることから、主筋が載荷荷重に対して有効に抵抗していることがわかる。主筋比が2%以下の場合、最大水平荷重時には降伏ひずみより大きく、主筋は降伏している。

図-7に、各実験シリーズの R と壁横筋ひずみとの関係を示す。これらによれば、ひび割れ後急激に引張ひずみが生じ、水平荷重が最大になる以前に降伏していることがわかる。

図-8に、帯筋補強シリーズ試験体の R と帯筋ひずみとの関係を示す。ひび割れ後、引張ひずみが大きくなっているが、降伏ひずみまで達していないものもあり、壁横筋ほどの抵抗はしていないようである。

3.2 強度性状

表-3に実験結果一覧を示す。ひび割れ時の部材角は、いずれの試験体ともほぼ同じである。ひび割れ時の水平荷重は、コンクリート強度が同一であれば、ほぼ同程度となった。また、コンクリート強度が高いほどひび割れ荷重が高くなっている。主筋で補強されていない試験体の場合は、帯筋比1.2%の試験体を除き、ひび割れ時が最大荷重となっている。

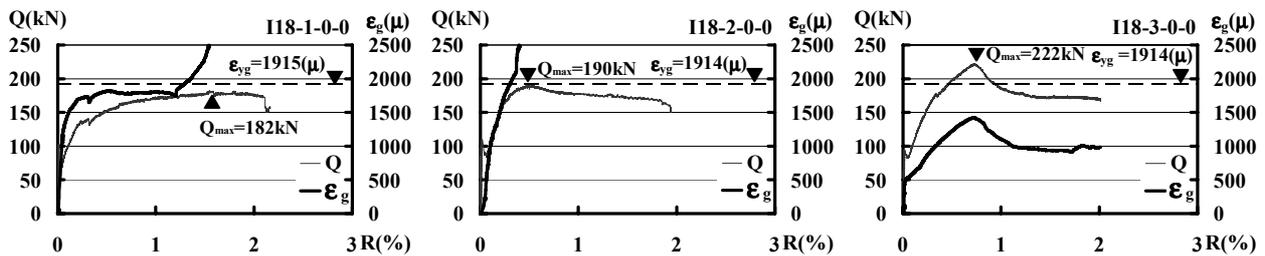


図-6 主筋補強シリーズ試験体の中間柱部材角 R と中間柱主筋ひずみ ϵ_g との関係

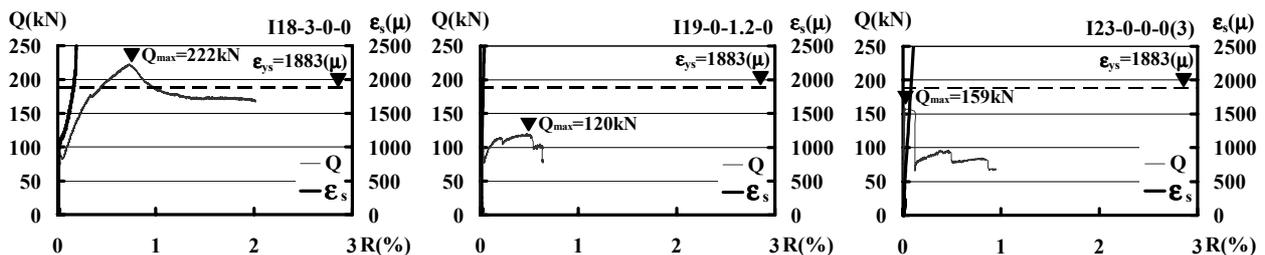


図-7 各実験シリーズ試験体の中間柱部材角 R と壁横筋ひずみ ϵ_s との関係

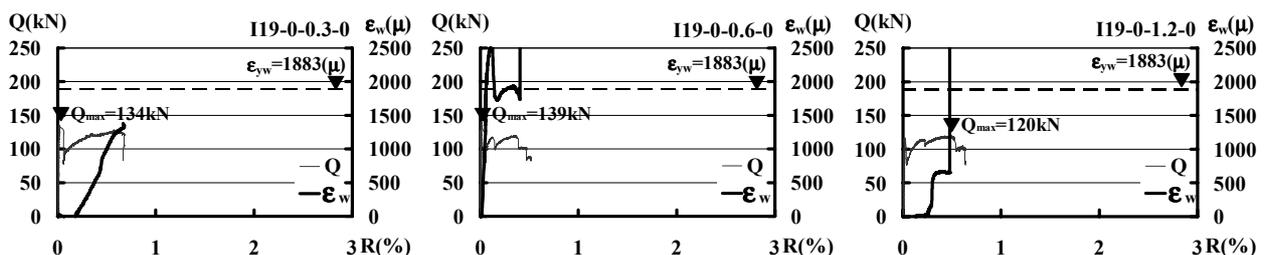


図-8 帯筋補強シリーズ試験体の中間柱部材角 R と帯筋ひずみ ϵ_w との関係

中間柱のせん断強度に及ぼす補強筋強度の影響を考察するため、主筋強度を変化させた実験シリーズ試験体の実験結果より、中間柱せん断強度 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³⁾もあることを考慮し、 Q_{cu} 、 $p_g \sigma_{yg}$ を、 $\sqrt{\sigma_B}$ で除した値で比較した。壁横筋が降伏していることから、 Q_{cu} を (1) 式より求めた。

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

ここで、

P_u : 試験機の最大荷重

Q_{wu} : 壁横筋強度

($=p_s \sigma_{ys} t l'$, p_s : 壁筋比, σ_{ys} : 壁筋降伏点強度, t : 壁厚, l' : 壁内法長さ)

図-9には文献2)で報告した実験資料も併せて示している。これらによると、主筋強度が大きくなると、中間柱せん断強度が増大する傾向があることがわかる。帯筋補強すれば帯筋のない試験体に比べてせん断強度が多少増大する傾向がみられるが、主筋ほどの効果はないようである。

4. 結論

中間柱の要素試験体を用いて、各補強筋のみの実験シリーズを行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 中間柱要素試験体のせん断破壊は、既往の連層耐震壁の水平力載荷実験から得られた中間梁のせん断破壊性状とほぼ同じであった。
- 2) 水平せん断力の増大とともに壁板に斜めひび割れが生じて軸方向引張応力が生じるため、中間柱のせん断強度は、主筋強度に最も影響を受ける。せん断強度を大きくするためには、主筋強度を増大することが最も効果的と考えられる。
- 3) 帯筋を設けると多少せん断強度が増大する

表-3 実験結果一覧

specimen	first cracking load		maximam load	
	Q_{cr} (kN)	R_{cr} (%)	Q_u (kN)	R_u (%)
I18-1-0-0	103	0.01	182	1.55
I18-2-0-0	109	0.02	190	0.55
I18-3-0-0	87	0.04	222	0.73
I19-0-0.3-0	134	0.02	134	0.02
I19-0-0.6-0	139	0.01	139	0.01
I19-0-1.2-0	116	0.02	120	0.47
I23-0-0-0(1)	139	0.02	139	0.02
I23-0-0-0(2)	125	0.02	125	0.02
I23-0-0-0(3)	159	0.02	159	0.02

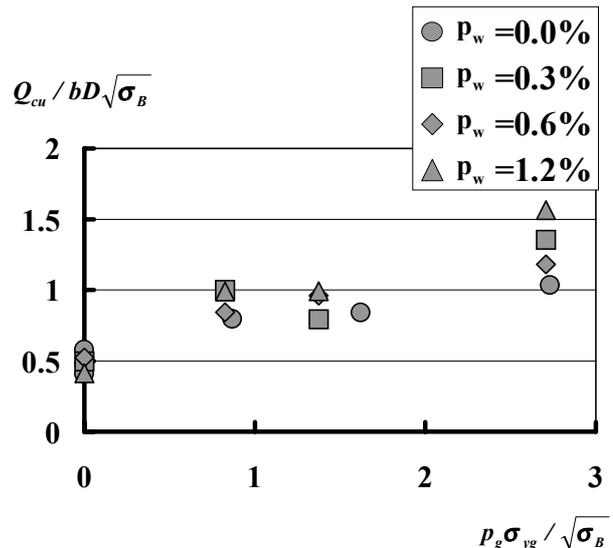


図-9 中間柱せん断強度 Q_{cu} と主筋強度 $p_g \sigma_{yg}$ との関係

傾向があるが、主筋強度ほどの効果はないようである。

今後パラメータを変化させた実験を行い、せん断強度に及ぼす補強筋の効果について検討する予定である。

参考文献

- 1) 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, pp.225-228, 1983,
- 2) 姜優子, 江崎文也, 小野正行: 軸力が作用しない中間柱のせん断強度に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.3, pp.457-462, 2001.7
- 3) ACI, Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89), ACI, 1989