

論文 軸力が作用しない耐震壁中間柱のせん断強度に関する実験的研究

姜 優子*1・江崎文也*2・小野正行*3

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提案した。この実験法を用いて、中間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、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、主筋比および帯筋比を増大すると中間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、中間柱、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・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、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みられない。ひび割れの進展・続発による異方性化が進行しても、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⁴⁾。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引張軸力が生じる。中間部材の抵抗機構および破壊機構に基づいたせん断強度に関する実験的研究はほとんど行われていないことから、中間部材のせん断強度は現在のところ不明のままである。そのため、中間部材の断面設計法はまだ確立されているとはいえないのが現状と思われる。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考案した。

本論は、これらの試験体を用いて中間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中間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。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

* 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）

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、剛な梁の間に挟み込んだ上下のくさびを圧縮すれば、上下の壁板隅角部を結ぶ斜め45度の破壊面が形成され、中間柱中央部が直接せん断破壊を起こすものと考えられる。くさびと接触するピンは、ピン受けの部分の表面処理と潤滑油注入により、ピンの回転を拘束しないようにした。連スパン耐震壁のせん断実験で中間柱がせん断破壊を起こした実験資料はみあたらない。しかし、連層耐震壁のせん断実験では、上下の壁板のせん断ひび割れが中間梁を貫通して耐震壁がせん断破壊し、耐震壁の水平耐力が決まっているものがあることから、本実験法で中間梁のせん断破壊にきわめて近い状況が再現できるものと考えられる。耐震壁に正負繰返し水平力が作用すると、中間柱には斜めせん断ひび割れが交差して生じる。本実験のように一方向単調載荷の場合には交差したひび割れは生じないが、連スパン耐震壁中間柱のせん断強度に及ぼす正負繰返しの影響は、ラーメン構造の柱や梁のせん断強度に及ぼす正負繰返しの影響よりも小さいものと考え、

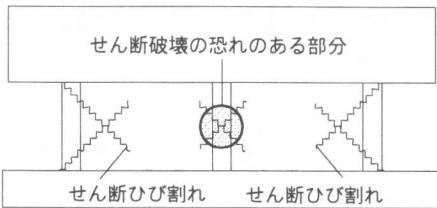


図-1 せん断破壊の恐れがある中間柱部分

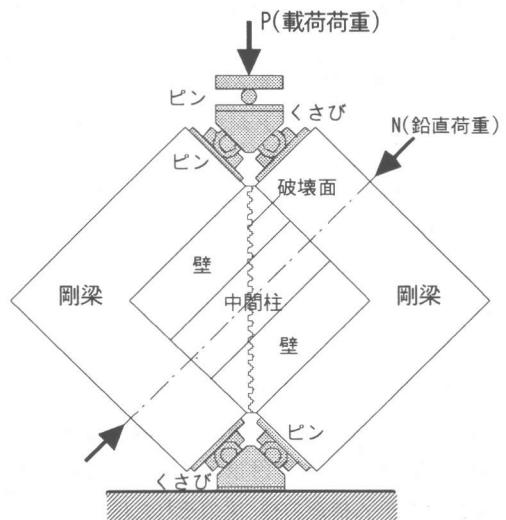


図-2 加力方法

表-1 試験体一覧

試験体名	中間柱			壁	
	断面b×D (mm×mm)	主筋(主筋比) (%)	帯筋(帯筋比) (%)	厚さ (mm)	壁筋(壁筋比) (%)
I20-1-0.3-0	200×200	6-D10 ($p_g = 1.1\%$)	D6@100 ($p_w = 0.32\%$)	100	縦横共 D6@100mm ($P_s = 0.32\%$)
I20-1-0.6-0			D6@50 ($p_w = 0.64\%$)		
I20-1-1.2-0			D6@25 ($p_w = 1.28\%$)		
I25-2-0.3-0		6-D13 ($p_g = 1.9\%$)	D6@100 ($p_w = 0.32\%$)		
I25-2-0.6-0			D6@50 ($p_w = 0.64\%$)		
I25-2-1.2-0			D6@25 ($p_w = 1.28\%$)		
I18-3-0.3-0		10-D13 ($p_g = 3.2\%$)	D6@100 ($p_w = 0.32\%$)		
I18-3-0.6-0			D6@50 ($p_w = 0.64\%$)		
I18-3-1.2-0			D6@25 ($p_w = 1.28\%$)		

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
I20-1-0.3(0.6, 1.2)-0	19.8	21.5
I25-2-0.3(0.6, 1.2)-0	24.9	23.6
I18-3-0.3(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)

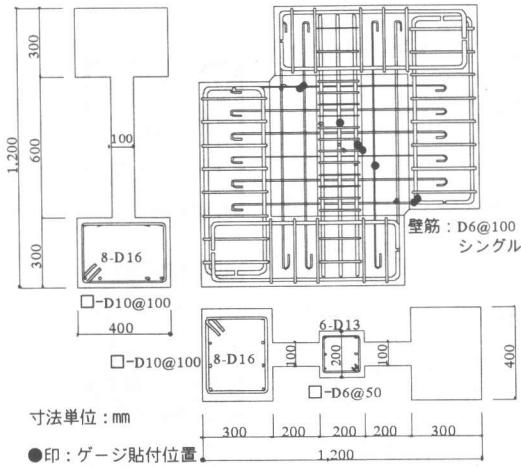


図-3 試験体形状・配筋およびゲージ貼付位置

一方向単調載荷により実験を行うこととした。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。

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： $200\mu/\text{mm}$ 、鉛直変位感度： $500\mu/\text{mm}$ ）にて測定した。また、図-3に示す位置の柱主筋および帶筋、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、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-5に、各試験体の水平荷重 Q と側柱部材角 R （=柱水平変位/柱内法高さ）との関係、水平荷重 Q と側部材の軸方向平均ひずみ ε 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。

載荷荷重を徐々に増加させていくと、いずれの試験体とも、剛な梁と接する上下の壁板隅角

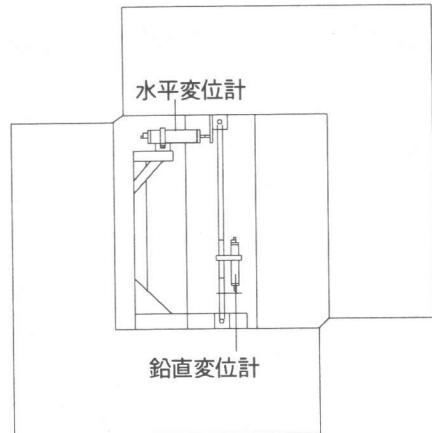


図-4 測定装置

部を結ぶ斜め45度方向に、せん断初ひび割れが発生し、その進展は中間柱で一旦止まった。初ひび割れ時に載荷荷重が一時低下したが、その後、荷重が徐々に増大するとともに壁板にせん断ひび割れが続発し、中間柱部分にも斜め45度方向のせん断ひび割れが発生した。主筋比が小さい試験体では、帶筋比が小さいものほど壁板の初ひび割れ以外のせん断ひび割れの発生は少なく、初ひび割れが拡幅した。このひび割れと柱に生じたひび割れとが繋がって最大荷重に達し、想定した破壊線に沿った斜めせん断ひび割れが形成された。一方、帶筋比が大きくなると壁板および柱の斜めせん断ひび割れの数が多くなり、とくに主筋比が大きい試験体では、その傾向が強かった。このため、中間柱に発生した斜めひび割れのうち、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、せん断ひび割れが耐震壁中間梁を貫通して水平耐力に達した連層耐震壁の実験結果から観察された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。せん断ひび割れ発生後、荷重は徐々に増大するが、ひびわれの続発と初ひび割れが徐々に拡幅する

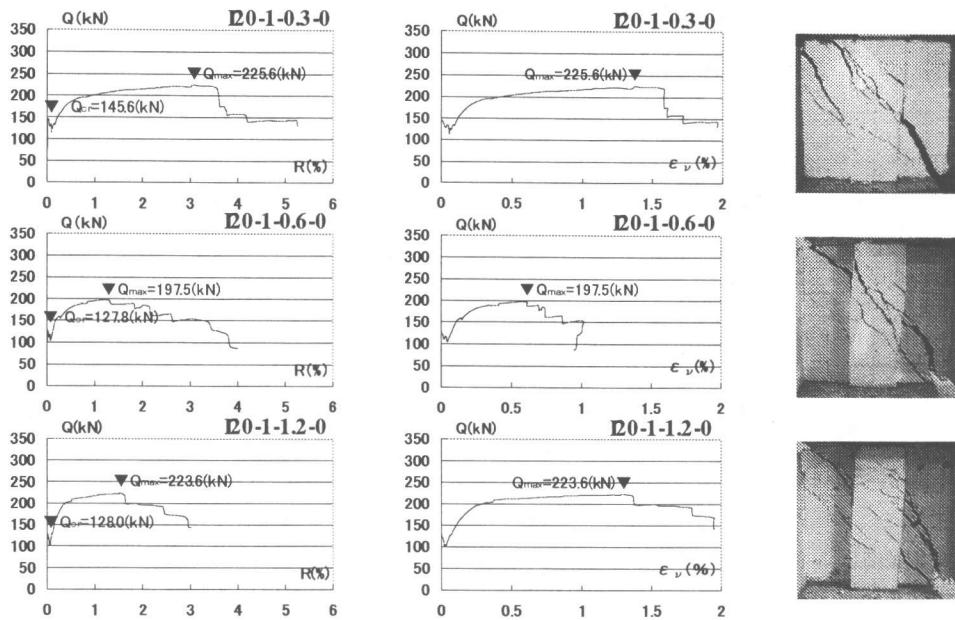


図-5 a 主筋比 $p_g = 1\%$ 試験体の水平荷重 Q と中間柱部材角 R との関係, Q と中間柱軸方向平均ひずみ ϵ_v との関係および実験終了時のひび割れと破壊状況

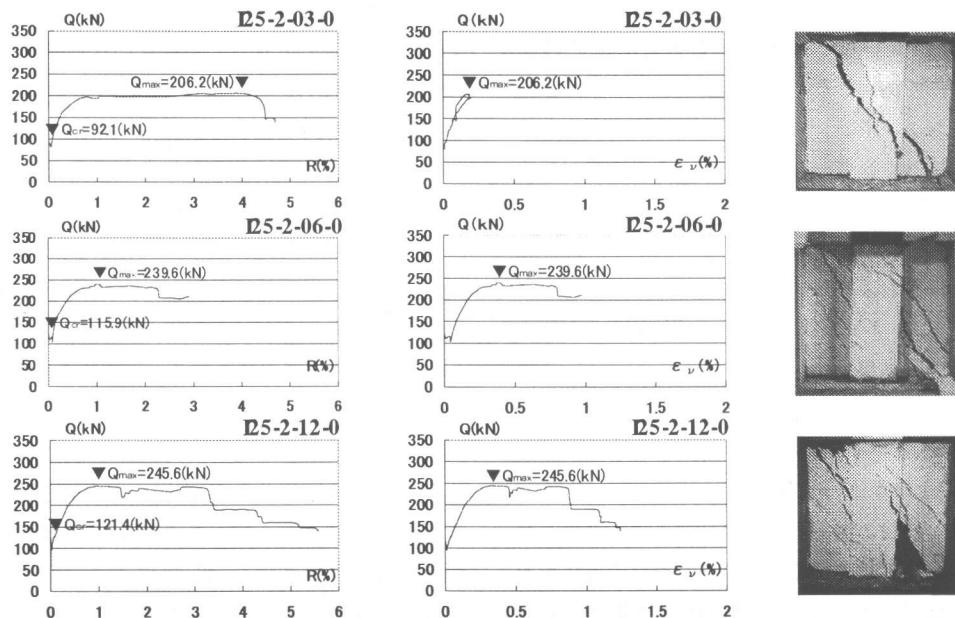


図-5 b 主筋比 $p_g = 2\%$ 試験体の水平荷重 Q と中間柱部材角 R との関係, Q と中間柱軸方向平均ひずみ ϵ_v との関係および実験終了時のひび割れと破壊状況

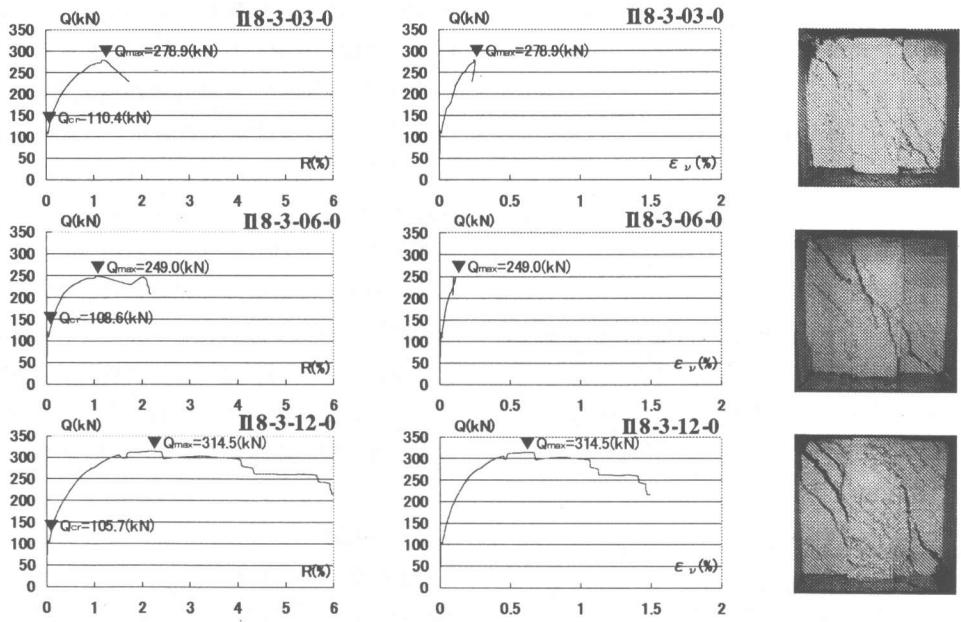


図-5c 主筋比 $p_g = 3\%$ 試験体の水平荷重 Q と中間柱部材角 R との関係, Q と中間柱軸方向平均ひずみ ε_v との関係および実験終了時のひび割れと破壊状況

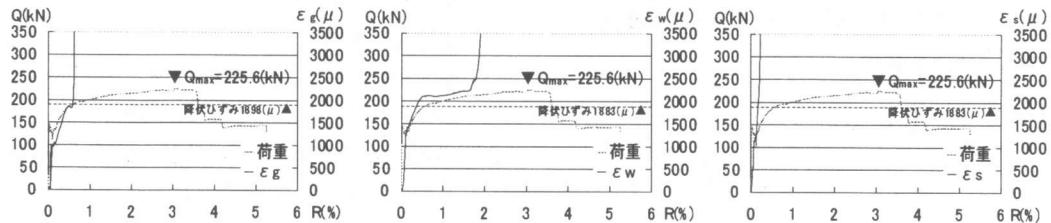


図-6 I20-1-0.3 試験体の中間柱部材角 R と中間柱主筋ひずみ ε_g , 帯筋のひずみ ε_w , および壁横筋のひずみ ε_s との関係

ため水平変形が急激に大きくなり、剛性が著しく低下した。載荷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、 ε_v が低下していることから、柱の鉛直変形が縮み始めると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 I20-1-0.3 試験体中間柱の主筋と帯筋、および壁板の補強筋の各ひずみの 1 例を示す。最大荷重時には、壁筋、中間柱主筋および帯筋とも降伏ひずみに達している。しかし、主筋量が 3% の試験体では、せん断破壊時に主筋が降伏ひずみに達していないものもあり、主筋がその強度を発

揮する以前に破壊しているようである。

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

($= p_s \sigma_y t'$, p_s : 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で、(1) 式で Q_{cu} を求めることができるようである。

図-7によれば、主筋強度が増大すると中間柱のせん断耐力が上昇する傾向がある。しかし、増大率は主筋強度に比例しているようではない。主筋強度が最も大きく、かつ帶筋強度が大きい試験体では、主筋が降伏ひずみに達していないものがあり、主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。一方、図-8によれば、帶筋強度の増大による中間柱のせん断耐力が上昇する傾向は、本実験の範囲ではみられないようである。

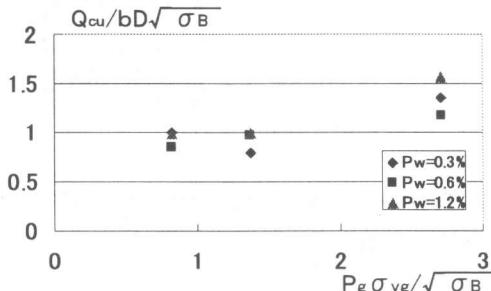


図-7 中間柱せん断強度 Q_{cu} と主筋強度 $p_g \sigma_{yw}$ との関係

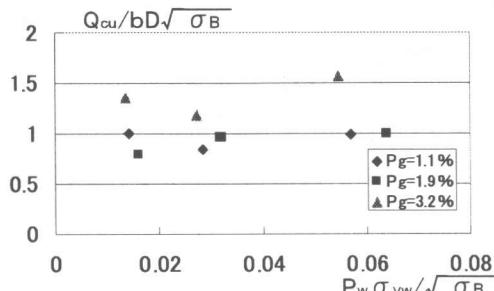


図-8 中間柱せん断強度 Q_{cu} と帶筋強度 $p_w \sigma_{yw}$ との関係

4. 結論

中間柱の応力状態を再現した耐震壁中間柱要素試験体のせん断実験の結果、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) 帯筋強度の増大による中間柱のせん断強度の増大傾向は、本実験の範囲ではみられなかった。

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

表-3 実験結果一覧

試験体名	ひび割れ時		最大耐力時	
	Q_{cr} (kN)	R_{cr} (%)	Q_u (kN)	R_u (%)
I20-1-0.3-0	145.6	0.04	225.6	4.59
I20-1-0.6-0	127.8	0.02	197.5	1.91
I20-1-1.2-0	128.0	0.15	223.6	2.29
I25-2-0.3-0	92.1	0.02	206.2	5.86
I25-2-0.6-0	115.9	0.11	239.6	1.50
I25-2-1.2-0	121.5	0.02	245.7	1.42
I18-3-0.3-0	110.4	0.05	278.9	1.81
I18-3-0.6-0	108.6	0.01	249.0	1.60
I18-3-1.2-0	105.7	0.03	314.5	3.33