

論文 PC 鋼棒にプレストレスを導入した腰壁付き RC 柱の耐震補強に関する実験的研究

川満 じゅん*1・山川 哲雄*2・鴨川 茂義*3・飯干 福馬*4

要旨：腰壁が付随することにより柱が短柱化し、脆性的なせん断破壊が生じやすくなった柱に、新しい耐震補強の1つとしてコーナーブロックを介して外帯筋状に配置したPC鋼棒にプレストレスを導入し、腰壁付きRC柱の耐震性能を検討した。そのために、一定軸圧縮下の正負繰り返し水平加力実験を行ない、PC鋼棒の配置問題を腰壁も含めて実験的に検討した結果、本試験体の場合腰壁部分の柱までPC鋼棒によって補強する必要があることが分かった。

キーワード：腰壁付きRC柱、耐震補強、PC鋼棒、プレストレス、横拘束

1. 序

著者らは脆性的なせん断破壊を起こしやすいRC短柱や極短柱に、コーナーブロックを介して外帯筋状に配置したPC鋼棒にプレストレスを導入する靱性型耐震補強法を提案した^{1)~3)}。単独柱の一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験を行い、その結果靱性に富んだ曲げ破壊先行の柱試験体に改善できることを実験結果として示した。しかし、建築物として短柱や極短柱が単独柱として存在することはきわめてまれであり、一般的には腰壁や垂れ壁などにより短柱化することが多い。特に、学校建築物の校舎には腰壁がよく利用されている。しかも、その腰壁が柱に接続され、そのために柱が短柱化し、せん断破壊しやすくなっている。このような腰壁付き短柱の耐震補強実験は連続繊維シートを用いてすでに試みられている^{4)~8)}。しかし、これらの方法は腰壁部の補強に工夫が必要であるが、本法は腰壁部にPC鋼棒が貫通するだけの穴を設けるのみであるゆえに比較的工法が容易である。

本研究の目的は、このような柱のせん断強度を大幅に引き上げ、曲げ破壊先行を確保し、かつ靱性を大幅に改善する耐震補強法として先に

提案した方法^{1)~3)}が、腰壁付き柱にも実際有効であるかどうか、あるいは有効にするためにはどのような工夫を必要とするかを検討するために腰壁付き柱のパイロット実験を計画し、本研究開発の目処をつけることにある。

2. 実験計画

試験体の形状寸法および配筋図をFig.1に、その一覧表をTable 1に示し、使用材料の力学特性値などをTable 2に示す。試験体は1971年以

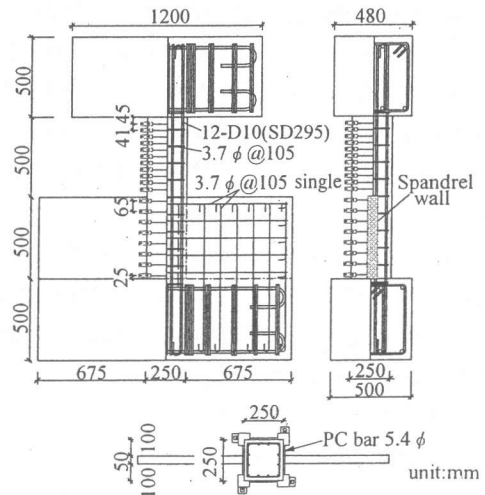


Fig. 1 Detail of the specimen (R99W-P41CW-H)

*1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)

*2 琉球大学 教授 工学部環境建設工学科 工博(正会員)

*3 長崎県庁(元琉球大学大学院学生) 工修(正会員)

*4 高周波熱錬(株) 製品事業部営業課長 (正会員)

Table 1 Column specimens with spandrel walls

	R99W series			
	P0	P41C	P41CW	P41CW-H
Specimen				
N/(bD ₀)	0.2		0.35	
PC bar	—	5.4 φ @41	5.4 φ @41(column) 5.4 φ @65(spandrel wall)	
Concrete	Cylinder strength :σ _B =20.6MPa			
Common details	Longitudinal reinforcement : 12-D10 (p _g =1.36%) Transverse reinforcement : 3.7 φ -@105 (p _w =0.08%) Wall reinforcement :3.7 φ -@105 (p _s =0.20%) Wall thickness :50mm PC bars :5.4 φ (Prestress 490MPa) Penetrating hole diameter :14.5 φ			

Table2 Properties of rebar and PC bar

Type	A(cm ²)	f _y (MPa)	ε _y (%)	E _s (GPa)	
Rebar	D10	0.71	371	0.20	185.6
	φ3.7	0.11	333	0.17	195.9
PC bar	φ5.4	0.23	1202	0.60	200.0

Note :A = cross section area, f_y = yield strength of rebar, ε_y = yield strain of rebar, E_s = modulus of elasticity.

前の旧耐震設計基準(せん断補強筋が250mm間隔)で設計された学校建築物のRC柱(約600×600mm正方形断面を想定)を1/2.4に縮小モデル化したもので、主筋比は1.36%、帯筋比は0.08%である。試験体のせん断スパン比は腰壁が付随していなければ柱のみでは2であるが、腰壁が付随することにより柱内法高さに限定すればせん断スパン比1である。

文献³⁾によると、せん断破壊するせん断スパン比1.0の極短柱に5.4φのPC鋼棒を41mmピッチに配置した試験体は耐震性能が大幅に改善されることが分かっている。そこで、実際の施工で現在流通しているPC鋼棒13φに相当する5.4φのPC鋼棒をせん断スパン比1.0に相当する柱内法高さ部分に41mmピッチで配置した。腰壁部分は層間変形角の増大にともない、入力せん断力が大きくなるにつれてひび割れが生じ、腰壁部分の柱が腰壁と分離され長柱化すると考えられる。その結果、曲げ降伏ヒンジが形成されやすくなり、入力せん断力の増大が抑制されるため、腰壁部分の柱は

せん断スパン比2.0の長柱として考え、65mmピッチに5.4φのPC鋼棒を配置した。PC鋼棒用貫通孔の直径は本例の場合14.5φとPC鋼棒径の約3倍近くあるが、実際の施工ではPC鋼棒径の2倍以下にすることが可能であると思われる。拘束力はコーナブロックによる支圧力として柱に導入されることになる。本研究ではプレストレスの施工と維持管理の容易さを優先させて、手で容易に導入できる降伏点ひずみ(約6000μ)の約1/3強の2450μ前後(490MPa)を採用した。

荷重方法は一定軸圧縮力比0.2(試験体名R99W-P0, R99W-P41C, R99W-P41CWの3体)および0.35(試験体名R99W-P41CW-Hの1体)のもとで、正負繰返し水平加力実験を行った。加力装置は建研式加力装置を用い、水平加力用のジャッキの軸線が柱全体の反曲点高さ位置に相当する腰壁頂部に一致するようにジャッキを取り付けた。加力プログラムは、層間変形角3%を目標に0.5%づつ増分させながら、各層間変形角で3回づつ正負繰返す。層間変形角3%までいたっても、最大水平耐力の80%以上を維持している状態であれば層間変形角4%および5%で正負1回繰返しを行って、耐震性能の確認を行った。

3. 実験結果

最終破壊状況をFig.2に示し、せん断力Vと層間変形角Rの関係、および柱材軸上の層間平均伸縮ひずみε_vと層間変形角Rの関係をFig.3に示す。Fig.3に破線で示した直線は、多段配筋柱の曲げ強度略算式によるものである。面内方向に腰壁・垂壁の付いた柱の、せん断終局強度や曲げ終局強度を算定する時の内法高さは、柱せいの1/2、あるいは腰壁・垂壁高さの1/4をそれぞれ有効内法高さに算入することが文献⁹⁾に紹介されている。これに従えば、本試験体の場合いずれの方法で計算しても、その値は125mm(柱せい250mm、腰壁高さ500mm, Fig.1参照)となるので、柱の有効内法高さは500mmから125

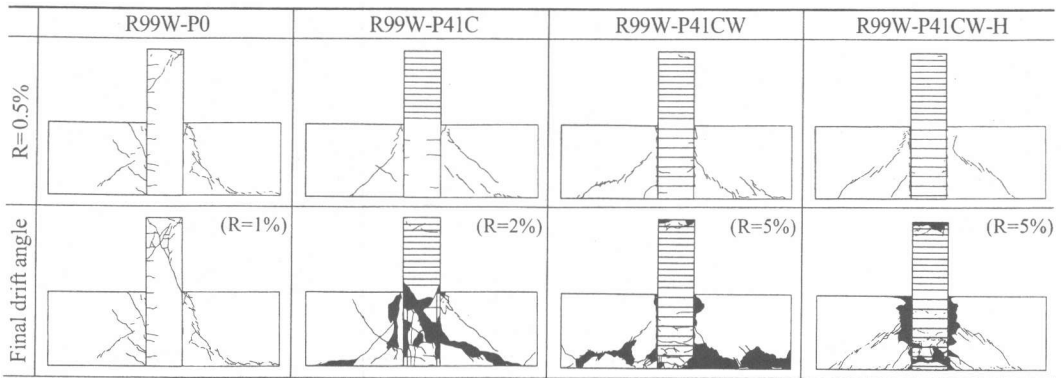


Fig. 2 Observed cracking patterns of column specimens with spandrel walls

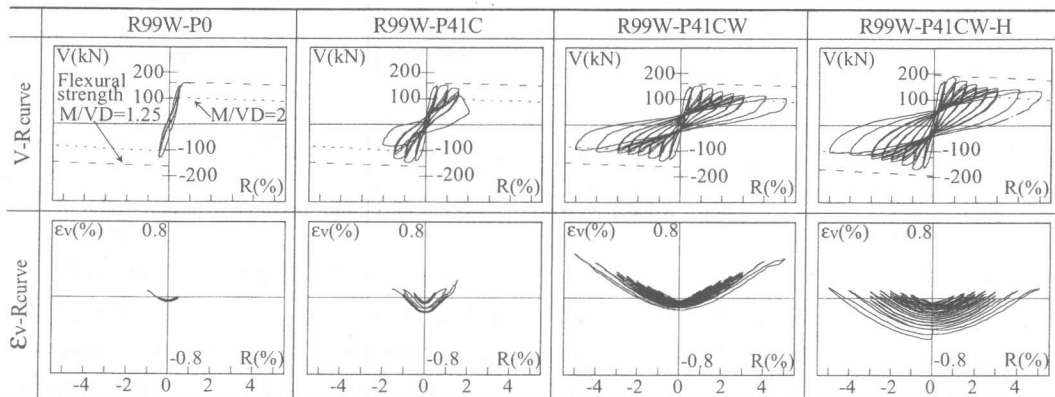


Fig. 3 V-R and Ev-R relationships

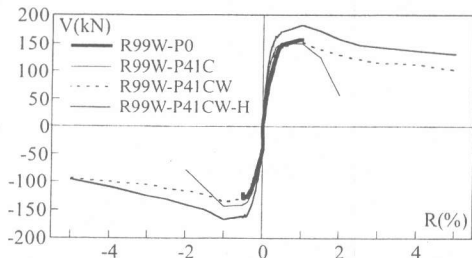


Fig. 4 Measured skeleton curves

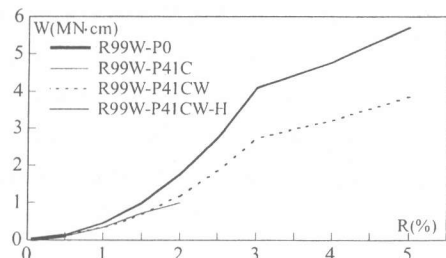


Fig. 5 Accumulated absorbed energy

mm増加して625mmとなり、その結果せん断スパン比 $M/(VD)$ は1.25となる。また、柱と腰壁の境界にPC鋼棒の貫通孔を介してスリットが生じた極限状態を想定すると、本試験体における柱のせん断スパン比は2.0となる。したがって、本論では柱のせん断スパン比1.25と2.0をそれぞれ極限状態のせん断スパン比と考え、以後の計算に採用する。

Fig. 4 にスケルトンカーブと Fig. 5 に累積エネルギー吸収量に関する実験結果の比較をそれぞれ

れ示す。さらに、Fig. 6 にPC鋼棒のひずみ測定位置と測定結果を示す。試験体R99W-P41CW-Hの柱内法高さ部分のPC鋼棒のみ偶数段にひずみゲージを貼付していたため、他の2体と測定位置が若干異なる。しかし、柱内法高さ部分はPC鋼棒による補強によって剛体に近い挙動をしたため、仮に同じ位置に貼付していたとしても、ほとんど変わらない結果が出たと思われる。図は鉛直軸を挟んで右側にweb面、左側にflange面を表示している。webとflange面にお

いて、どちらも鉛直軸を挟んで正負の挙動はほとんど変わらない。

いずれの試験体も層間変形角0.1~0.2%で腰壁と柱の境界に縦ひび割れが生じ、続いて柱頭の曲げひび割れ、次いで腰壁のせん断ひび割れが順に生じた。壁厚が薄いためかP C鋼棒用の貫通孔を介して早い段階で腰壁と柱の境界に縦ひび割れが生じ、スリットの形成が促進された。

既存不適格RC柱に相当する耐震補強前の腰壁付き柱(R99W-P0)はせん断補強筋の不足($p_w=0.08\%$)に加え、有効せん断スパン比1.25のため、柱内法高さ部分のせん断ひび割れが顕著に生じた。最大耐力以降、せん断亀裂の幅が顕著となり、1%時に脆性的なせん断破壊に至った。

P C鋼棒により柱内法高さ部分のみ補強した試験体(R99W-P41C)では、層間変形角1.5%の加力に移行する途中に、柱頭・柱脚で主筋が降伏した。1.5%時に腰壁頂部の圧壊により、内法高さ部分が長くなり層せん断力が低下した。柱内法高さ部分をP C鋼棒で補強したことによって、その部分の柱のせん断強度が腰壁の無補強部分よりも相対的に増大し、その結果無補強部分の腰壁が層間変形角2%の加力に移行する途中で、柱と共にせん断破壊した。

試験体R99W-P41CWは、層間変形角1.0~1.5%の時に腰壁頂部の圧壊が始り、層間変形角の増大と共にP C鋼棒用貫通孔部に縦ひび割れが生じ、次いでその縦ひび割れが上下に連続して完全にスリット状になった(Fig.2参照)。腰壁の圧壊によりわずかに層せん断力が低下した

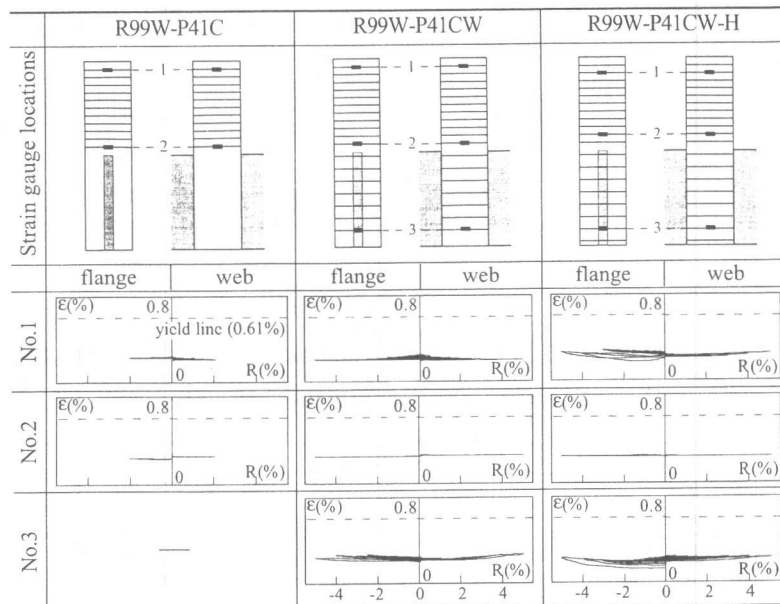


Fig. 6 Measured strains of PC bar of column specimen with spandrel wall

が、以後せん断力の低下は少ない(Fig.3参照)。しかし、実験によると主筋は完全に降伏しているが、Fig.6に示すようにP C鋼棒は一切降伏せず、ひずみの増加も小さい。また、試験体R99W-P41CとP41CWは層間変形角が1.5%まで、弾塑性挙動がほぼ等しいが、その後は腰壁部まで補強してあるP41CWの耐震性能が優れていることがFig.4よりわかる。

試験体R99W-P41CW-Hは、高軸力のため柱材軸上の平均圧縮ひずみがやや大きくなっている。若干の耐力低下が見られるものの、試験体R99W-P41CWより履歴性状は優れている。腰壁部分の柱までP C鋼棒で補強した試験体R99W-P41CWとP41CW-Hは共に曲げ破壊であり、耐震性能が最も改善されている。

4. 解析的検討

本試験体は腰壁付きRC柱として計画したが、壁厚が50mmと薄く、その長さが片側で675mm(Fig.1参照)とやや短い。また、本実験において腰壁部分の水平変形を拘束せず、片持ち壁として柱の両側に取り付いている。このため、柱の内法高さのみP C鋼棒で補強した場合には、

その内法高さ部分の柱が剛体的挙動を呈し、腰壁部分はあたかも幅の広い袖壁付き柱のような弾塑性挙動を示すことも考えられる。

曲げ強度およびせん断強度の計算にはP C鋼棒を帯筋比に累加し、受動的拘束効果と共にプレストレスによる能動的拘束効果をコンクリート強度と靱性の増大に反映させる。横拘束されたコンクリートの構成則には崎野・孫の提案式¹⁰⁾を採用した。これを用いてファイバーモデルで曲げ強度を計算し、せん断強度式には修正荒川mean式を採用する。なお、ファイバーモデルは断面の解析であるが、これを部材レベルのV-R曲線に拡張するためには、材軸に沿って曲率分布を仮定する必要がある。柱両材端の曲げ降伏ヒンジ部に曲率が集中するものとして、その領域を柱せいの50%と仮定し、仮想仕事法を用いて計算した¹¹⁾。ただし、 $M/(VD)=1.25$ と 2.0 を基本的に仮定し、柱断面のみで計算した。

せん断強度を求める場合にも、試験体を柱内法高さ部分と腰壁部分に分けることなく、すべて単

独柱として $M/(VD)=1.25$ と 2.0 で計算した。

Fig.7のR99W-P0では曲げ強度がせん断強度を上回り、せん断破壊先行を計算結果は示唆しており、それは実験結果と一致していることが分かる。

柱内法高さ部分のみP C鋼棒で補強した試験体R99W-P41Cは、補強した部分の柱の曲げ強度とせん断強度を有効せん断スパン比 1.25 で計算した。柱も含めた腰壁部分のせん断強度は腰壁を袖壁と見なせば、文献¹²⁾で示されている評価式を利用することができる。しかし、この式はFig.7のR99W-P41Cに示すように過小評価する傾向があり、単独柱のせん断強度よりも小さい。 $M/(VD)=1.25$ の無補強単独柱のせん断強度を参考までに示した。その結果、腰壁部分のせん断強度が最も低く、柱を含む腰壁部分がせん断破壊に至ったと推定される。

試験体R99W-P41CWおよびP41CW-Hでは、腰壁部分の柱までP C鋼棒で耐震補強したことで、柱内法高さ部分も腰壁部分も共に柱のせん

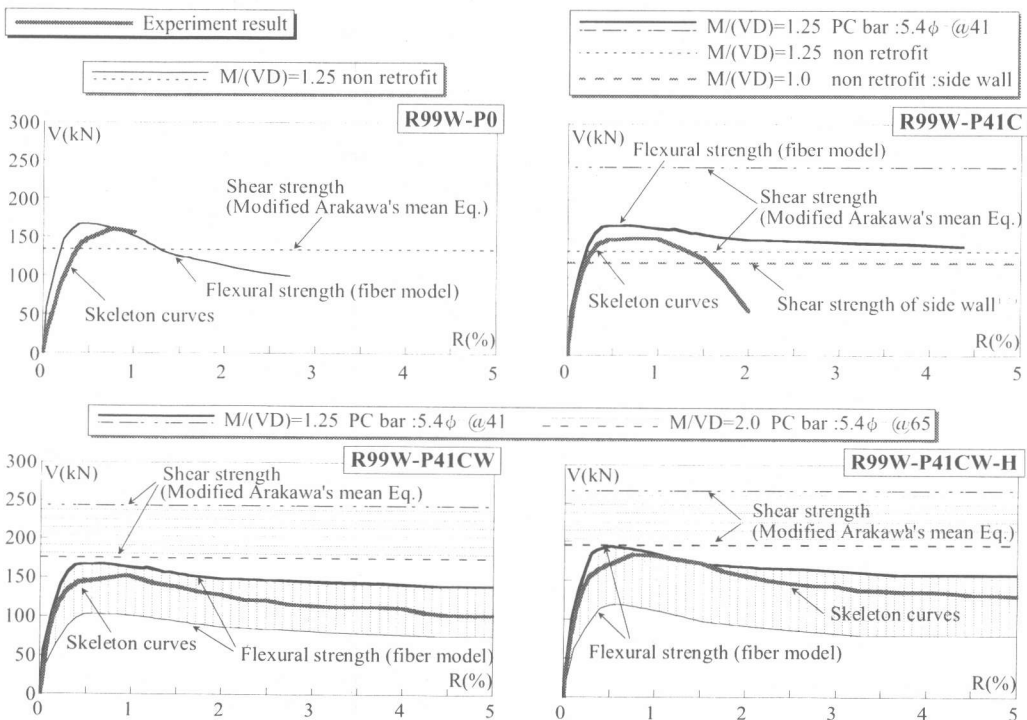


Fig.7 Calculated and experimental results

断強度が増大している。腰壁と柱境界にPC鋼棒の貫通孔を介してスリット状のひび割れが早期に生じ、層間変形角が大きくなるにつれて柱と腰壁の間に完全なスリットが形成された実験結果を考慮して、せん断スパン比2.0の計算結果も示した。ここでは簡単な計算として柱内法高さ部分のみ、有効せん断スパン比1.25として、41mmピッチのPC鋼棒で、一方腰壁部分の柱に関しては、せん断スパン比2.0として65mmピッチのPC鋼棒で曲げ強度をそれぞれ計算する。せん断強度も曲げ強度と同じ考えで単独柱について計算した。その他にせん断スパン比2.0の条件で、柱頭部分はPC鋼棒が41mmピッチ、腰壁のある柱脚部分はPC鋼棒が65mmピッチで曲げ強度を計算することも考えられる。曲げとせん断に関して高い強度と低い強度間でそれぞれハッチした領域どうしを比較すると、曲げ強度がせん断強度より低い。その低い曲げ強度ゾーンに実験結果としてのスケルトンカーブが存在する。そのスケルトンカーブも最初は $M/(VD)=1.25$ の曲げ強度曲線上にあるが、層間変形角が増大するにつれて $M/(VD)=2.0$ の曲げ強度曲線に近づいていることがわかる。以上のことから、実験での曲げ破壊先行を計算結果も裏付けている。

5. 結論

- (1) 腰壁部の壁厚が薄い方に属すると思われる腰壁付きRC柱の耐震補強において、短柱化したRC柱内法高さ部分のみの耐震補強では十分な耐震補強効果が期待出来ないことがわかった。耐震補強効果を著しく増大させるためには、腰壁部分の柱にも同じようなPC鋼棒による耐震補強をほどこすことが必要である。
- (2) 腰壁付き柱の耐震補強にあたっては、本例の場合、柱の内法高さ部分は有効せん断スパン比1.25で、腰壁部分の柱はせん断スパン比2.0でPC鋼棒の補強設計を行うことも一案である。
- (3) PC鋼棒を取り付けるために腰壁部に設けた貫通孔は、腰壁の厚さや貫通孔の径にも依存

すると思われるが、層間変形角の増大と共に貫通孔どうしのひび割れが連なり、スリット化することが本加力実験で判明した。

謝辞：

本実験に関して地元沖縄の(株)屋部土建(前田裕継社長)と(株)トクシュ(今野両一社長)に大変お世話になりました。ここに厚くお礼を申し上げます。

参考文献：

- 1) 鴨川茂義, 山川哲雄, 倉重正義: PC鋼棒によるプレストレスで横拘束したRC柱の耐震補強実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No.1, pp.415-420, 1999
- 2) 山川哲雄, 鴨川茂義, 倉重正義: プレストレスを導入したPC鋼棒で外帯筋状に横補強したRC柱の耐震補強法に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第526号, pp.141-145, 1999.12
- 3) 田川利郎, 山川哲雄, 鴨川茂義, 倉重正義: PC鋼棒によるプレストレスを導入したRC柱の耐震補強実験(その1 $M/(VD)=1.0$ の極短柱), 日本建築学会研究報告九州支部, 第39号・1, 構造系, pp.457-460, 2000.3
- 4) 植原文雄, 塩原等, 法量良二, 中村洋行: 既存鉄筋コンクリート造腰壁付き短柱の炭素シートによる耐震補強, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.1171-1176, 1998
- 5) 塩原等, 白都滋, 法量良二, 中村洋行: 既存鉄筋コンクリート造腰壁付き短柱の炭素シートによるせん断補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.373-378, 1999
- 6) 小林正浩, 松崎育弘, 中野克彦, 福山洋: 炭素繊維シートにより補強した腰壁付き柱の構造性能に関する実験結果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1417-1422, 1999
- 7) 北野敦則, 城攻, 後藤康明, 根東正茂: 炭素繊維シートを用いた腰壁付きRC柱の耐震補強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.21, No.3, pp.1375-1380, 1999
- 8) 岡本直, 石橋一彦, 谷垣正治, 伊吹英昭: 腰壁によって短柱化した柱のアラミド繊維シートによる補強効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-2(中四), pp.93-94, 1999
- 9) 日本建築防災協会: 連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・施工指標, 日本建築防災協会, 1999.9
- 10) 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, No.461, pp.95-104, 1994.7
- 11) 中山耕一, 山川哲雄: FIBERモデルを用いたRC柱の弾塑性解析に関する一検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-2(東海), pp.337-338, 1994
- 12) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説(改訂版), 日本建築防災協会, 1990