

論文 鋼板巻きで耐震補強したRC柱の耐震性能に関する実験的研究

仲 鵬^{*1}・山川哲雄^{*2}

要旨: 鋼板巻きで耐震補強する場合に、局部補強と全面補強、適正板厚などの設計上の目安を検討するために、耐震補強したRC柱の耐震性能に関する実験的研究を行った。せん断スパン比が2.0、主筋比が2.44%と1.36%、帯筋比が0.43%と0.28%であるRC柱試験体を6体用い、一定軸力下（軸力比0.35）で正負繰り返し加力実験を行った。鋼板による全面横補強でその適正板厚を評価し、せん断余裕度が十分であれば次にその板厚で局部横補強を検討する。その際、少なくとも1.1～1.2以上のせん断余裕度があれば、じん性に富んだ曲げ破壊先行が期待できそうである。

キーワード: 耐震補強RC柱、鋼板巻き、局部補強、せん断余裕度、せん断破壊、じん性

1. 序

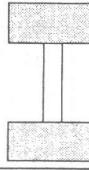
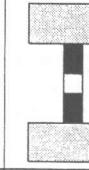
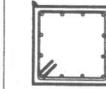
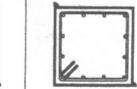
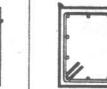
著者らは鋼板巻きで耐震補強したRC柱の耐震性能に関する実験的研究を行い、局部補強と全面補強、適正板厚などの設計上の目安をどこに求めたらよいかなどを検討してきた¹⁾。本研究はこれらの観点からさらに実験を追加し、鋼板巻きによるRC柱の耐震補強法に関して検討

を重ねたものである。

2. 実験計画

RC柱を鋼板巻きで耐震補強した場合、耐震補強後のせん断余裕度（日本建築学会式²⁾と修正荒川式^{3, 4)}によるせん断強度計算値のうちいずれか小さい値/横拘束効果を考慮した曲げ強

表-1 試験体一覧

Specimen	CR97A-S0	CR97A-S3	CR97A-DS	CR97B-S0	CR97B-S3	CR97B-DS
Elevation (mm)						
Section (mm)						
σ_B (MPa)	31.4			29.1		
Plate length (mm)	0	375x2	1000	0	375x2	1000
Plate thickness(mm)	0	3.2 ($f_y = 265.4$ MPa)		0	3.2 ($f_y = 265.4$ MPa)	
Common details	Longitudinal bars = 12-D13 ($f_y = 360.6$ MPa, $p_g = 2.44\%$), lateral reinforcement = D6-@60 ($f_y = 388.2$ MPa, $p_w = 0.43\%$)			Longitudinal bars = 12-D10 ($f_y = 360.2$ MPa, $p_g = 1.36\%$), lateral reinforcement = D6-@90 ($f_y = 388.2$ MPa, $p_w = 0.28\%$)		

*1 琉球大学大学院 工学研究科生産エネルギー工学専攻 工修（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）

度計算値)が1.1~1.2以上あれば、せん断破壊や曲げせん断破壊する脆性的なRC柱をじん性に富んだ曲げ破壊タイプのRC柱に移行させることができそうであることが、著者らの実験で一部明らかになつた¹⁾。このことをさらに確実なものにするために本実験を計画した。

試験体の形状、配筋と材料の特性を表-1に示す。せん断スパン比はともに2(250x250x1000mm)であるが、配筋が2種類に分類される。CR97Aシリーズでは主筋比が2.44% (12-D13)であり、CR97Bシリーズでは主筋比が1.36% (12-D10)である。主筋比の2.44%は通常のRC柱のはば上限値に相当し、1.36%は下限値に近い配筋量であると考えられる。一方、帯筋比はそれぞれ0.43% (D6-@60) と0.28% (D6-@90)である。したがって、両基準RC柱試験体ともせん断余裕度は1.02~1.04程度であり、曲げせん断破壊する恐れのある脆性的な試験体である。鋼板で耐震補強する試験体についてはせん断余裕度が全面補強で1.5以上を確保し、これと同じ板厚で局部補強する場合には1.1以上確保できるように耐震補強RC柱試験体を作成した。なお、鋼板は閉鎖形に囲って現場溶接

し、RC柱の表面と鋼板との約6mmの隙間に、膨張材を添加したセメントペーストでグラウトした。さらに、鋼板が軸圧縮力を直接伝達しないように、柱頭と柱脚部に約10mmのクリアランスを設けた。

3. 実験結果と考察

建研式加力装置を用い、一定軸力下(軸力比 $N/(bD\sigma_u)=0.35$)で、正負繰り返し加力実験を行った。部材角Rを0.5%ずつ増分させながら、同一振幅で3サイクルずつ正負繰り返しの変形制御で、R=3.0%まで加力を行った。図-1に各試験体の水平耐力-部材角関係、図-2に材軸方向伸縮ひずみ-部材角関係を示す。

基準試験体CR97A-S0は部材角R=0.6%で主筋が降伏し、R=1.0%で最大水平耐力に達した。その後新たな付着ひび割れが多数生じつつ、水平耐力が急激に低下し、R=2.0%で柱頭部の主筋が座屈したので、加力を中止した。局部補強試験体CR97A-S3はR=1.5%でひび割れが現れ、付着ひび割れが少しずつ増えながら、R=3.0%までCR97A-DSと同じようにじん性に富む水平耐力を維持した。

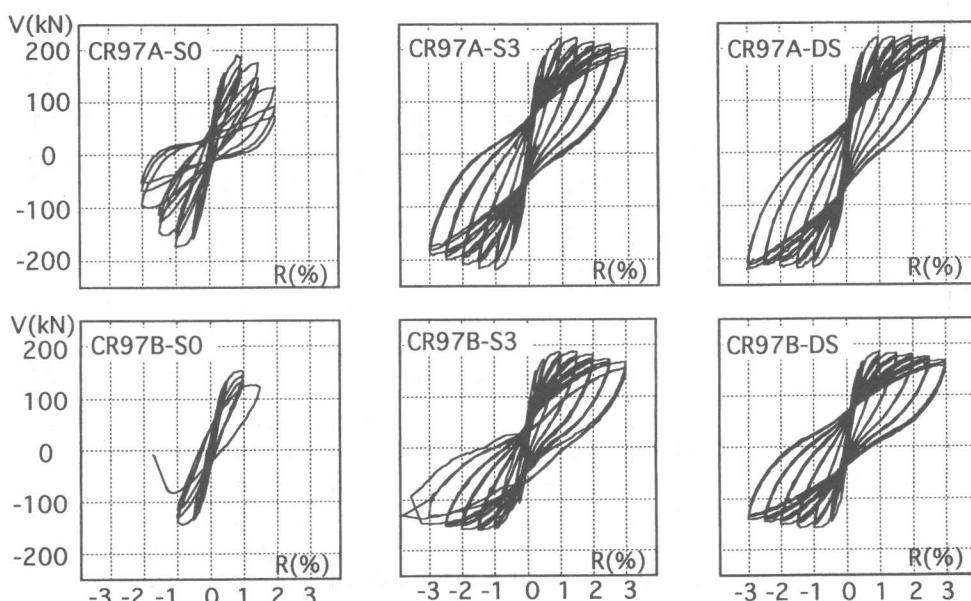


図-1 柱のせん断力-部材角履歴曲線

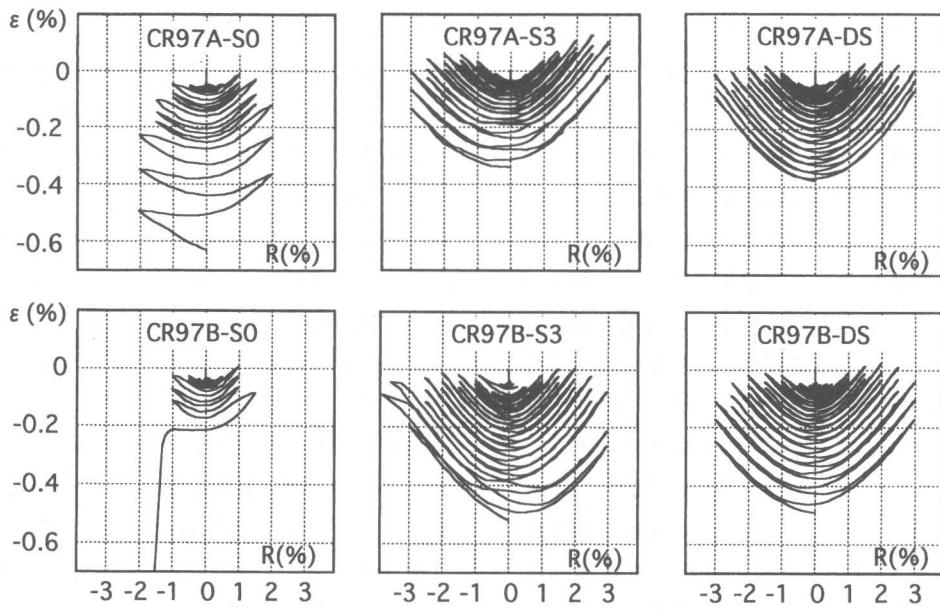


図-2 柱の材軸方向伸縮ひずみ-部材角関係

一方、CR97Bシリーズの基準試験体CR97B-S0は部材角 $R=0.5\%$ で主筋が降伏し、 $R=1.0\%$ で大きなせん断ひび割れと付着ひび割れが生じた。その後 $R=1.5\%$ で柱頭部のかぶりコンクリートが完全に剥落し、柱頭部の主筋が座屈してせん断破壊した。帯筋間隔(90mm)が大き過ぎることにより、帯筋が横拘束力を十分に発揮できずにせん断破壊をしたと考えられる。局部補強試験体CR97B-S3は $R=2.5\%$ ではじめての付着割裂ひび割れが生じ、 $R=3.0\%$ まで加力による新たなひび割れはほとんどなかった。

図-3に柱のひずみエネルギー吸収能力を比較する。曲げ破壊先行の柱では、局部補強であっても、十分に横拘束力を発揮し、変形が進んでも水平耐力を維持し、全面鋼板補強と同量のエネルギー量を吸収できた。しかし、せん断破壊先行の柱($M/(VD)=2$)に対しては、局部補強($1.5D$)しても耐震性能上有効でないことが、著者らの実験すでに確認されている¹⁾。その時のせん断余裕度は局部補強しても0.8前後であった。

基準試験体の大変形に対する貧弱な耐震能力が確認され、鋼板による十分なせん断補強で、

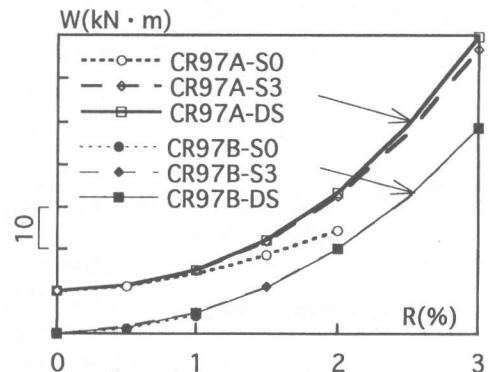


図-3 柱のひずみエネルギー吸収能力比較

柱頭、柱脚部のヒンジ領域内では塑性変形が確実に確保され、せん断応力を伝達することができ、かつ主筋の座屈を抑制でき、大きな変形にいたっても、水平耐力を維持できた。

4. 理論的検討

柱の曲げとせん断性状を評価するために、まず帶筋や鋼板による横拘束効果を考慮したコンファインドコンクリートの構成則をそれぞれのシリーズに関して求めた^{5, 6)}。その上で、平面保持を仮定したファイバーモデルを用い、かつ材軸方向に曲率分布を仮定して柱試験体の曲げ

強度と部材角の関係を求めた。一方、せん断強度は日本建築学会式²⁾及び修正荒川式^{3, 4)}により、横拘束効果を考慮せず、コンクリートのシリンダー強度をそのまま用いて計算した。基準試験体の計算結果は図-4に示すように曲げ強度とせん断強度がほぼ同程度の試験体である。

全面鋼板補強した試験体に対して、鋼板がせん断強度に寄与する分をトラス効果に相当する分として、せん断補強筋比に付加する。これは鋼板の板厚を直径及び帯筋間隔と見なし、 $p_w f_y$ を計算する⁷⁾。さらにアーチ機構には帶筋と補強鋼板による横拘束効果を単純累加して求めたコンファインドコンクリートの圧縮強度を用いる。図-4に示すように、鋼板で全面横補強するとせん断強度がトラス効果などにより著しく上昇するが、曲げ強度はあまり上昇せず、じん性が改善されていることがわかる。

鋼板でRC柱の柱頭、柱脚を局部横補強した場合は、せん断スパン比の減少によりアーチ効

果によるせん断強度の増大が期待され、柱上下端部の局部補強長さの半分を付加した純RC柱部分にその有効せん断スパン比を仮に適用して、既存の日本建築学会式と修正荒川式に基づくせん断強度を計算する。すなわち、局部横補強RC柱試験体CR97A-S3, CR97B-S3の有効せん断スパン比はともに1.25である。また、全面補強試験体CR97A-DS, CR97B-DSも、柱中央にスリットがあると想定すれば、この場合有効せん断スパン比は1.0となる。これに対して、局部補強前の柱の原断面に関する曲げ強度を求める。なお、鋼板耐震補強分を横拘束効果として取り入れても、曲げ強度の上昇は微少である（図-4参照）。これらの計算結果に実験結果も合わせて図-5に示す。試験体CR97A-S3, CR97B-S3は計算上曲げ破壊が先行する形になっている。実験結果では全面的に横補強した試験体CR97A-DS, CR97B-DSと同様に、ねばりに富んだ曲げ破壊を示している。

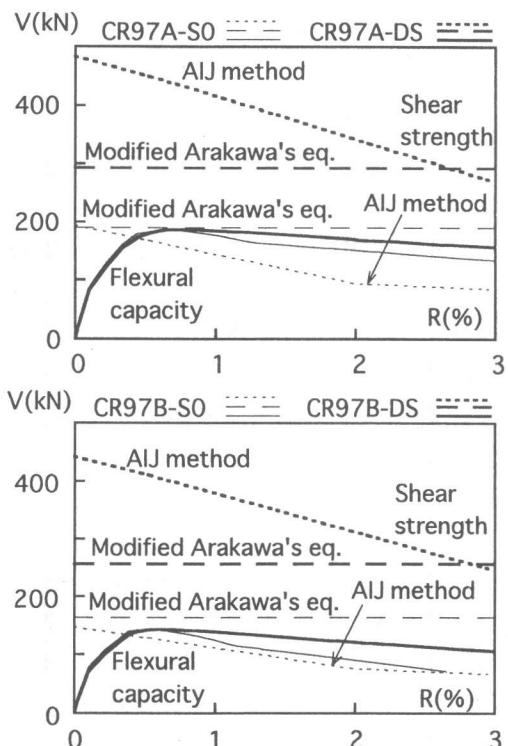


図-4 計算による曲げ強度とせん断強度の比較

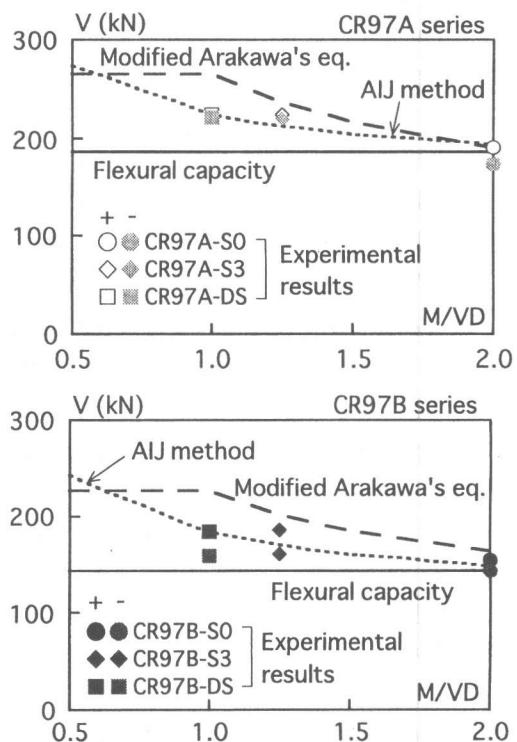


図-5 せん断スパン比のせん断強度への影響

以上検討したことをふまえ、せん断余裕度 V_s/V_f を用いて実験値と計算結果の比較を図-6 にまとめて示す。ここに、 V_{exp} ：最大水平耐力実験値、 V_f ：曲げ強度計算値（局部または全面横補強した試験体に対して帶筋と鋼板による横拘束効果の単純累加を考慮したコンファインドコンクリートの強度を用いる）、 V_s ：せん断強度計算値（局部横補強した試験体には有効せん断スパン比を、全面横補強した試験体にはコンファインドコンクリートの強度と横補強材によるトラス効果を、修正荒川式とヒンジを計画しない日本建築学会式にそれぞれ適用して計算した値のいずれか小さい方を採用する）である。

基準試験体CR97A-S0とCR97B-S0が1.02と1.03のせん断余裕度を示し、曲げせん断破壊先行が予想される。これに対して、横補強することによってCR97A-S3、CR97B-S3、CR97A-DS、CR97B-DSがそれぞれ1.14、1.19、1.57、1.80と十分なせん断余裕度を持ち、曲げ破壊先行が期待できる。また、実験結果からもこれらの4体がじん性に富んだ曲げ降伏していることが分かる。

全面補強試験体において、鋼板の板厚が曲げ挙動に及ぼす影響についての計算結果を参考までに図-7に示す。図-7より板厚が大きくなる、すなわちせん断余裕度が大きくなるにつれてじん性も改善されていることがわかる。しかし、コンクリートの構成則にe関数を用いてもこのことを理解することはできない。

図-8に鋼板の全面補強によって軸力がRC柱の水平耐力低下率に及ぼす影響を示し、全面補強試験体の実験結果も同図にプロットする。ここに、 $V_{R=3}$ ：柱試験体部材角Rが3.0%に達する時の曲げ耐力に関する計算値である。軸力比が増大するにつれ、曲げ強度が低下する。このことはじん性の低下を意味し、補強鋼板の板厚をあげることによって、じん性の低下を緩和することが可能である。図-8は曲げ降伏を前提にしているので、薄板で補強する場合にせん断破壊を防ぐことができるかも確認しなければなら

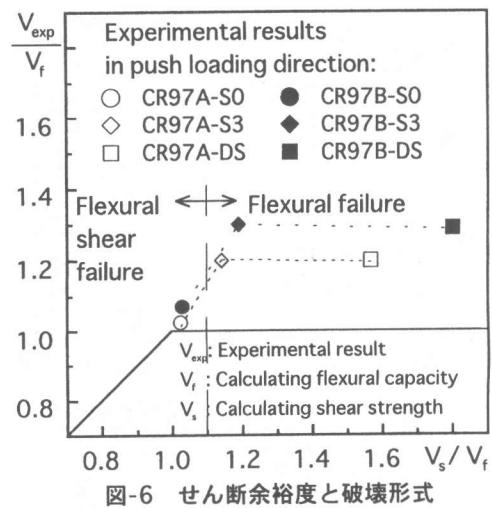


図-6 せん断余裕度と破壊形式

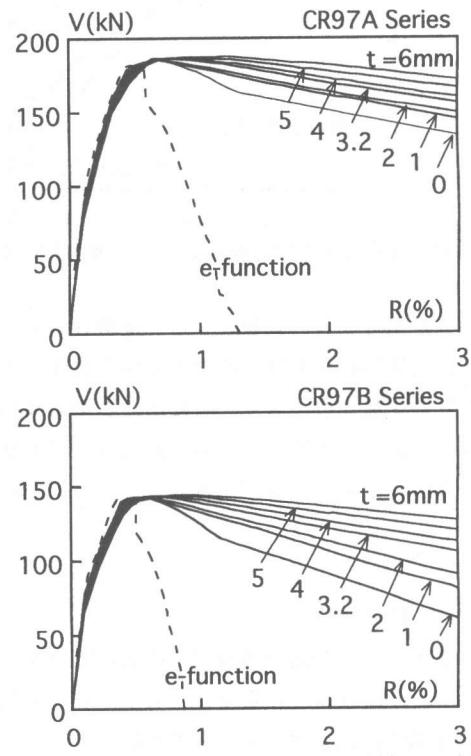


図-7 計算による曲げ強度と部材角の関係

ない。ここに一例として、図-9に計算上板厚を1mmとする薄鋼板で柱試験体CR97B-S0を補強する場合の水平耐力を示す。その時、曲げ破壊先行がほぼ可能ではあるが、じん性が不足がちであることを示唆している。

鋼板で局部又は全面横補強することにより、せん断強度の上昇と塑性ヒンジ部の回転能力の

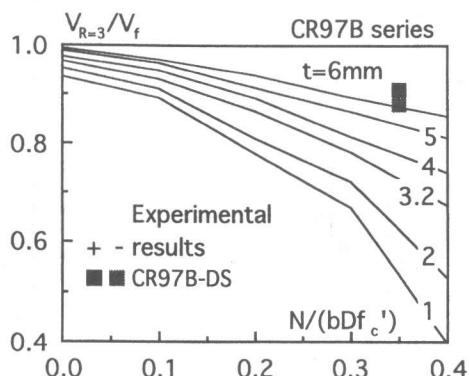
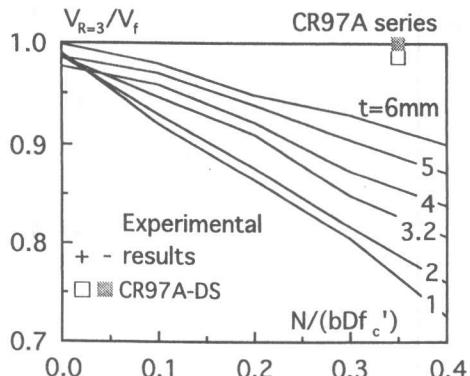


図-8 計算による曲げ強度の低下と軸力比の関係

増大が期待でき、鋼板による局部横補強長さと全面横補強時の板厚が柱のせん断余裕度に及ぼす影響を図-10に示す。鋼板による全面補強試験体に対して板厚が効果的であるが、局部補強試験体では補強長さが頭打ちになる傾向が見られる。

5. 結論

鋼板による全面横補強でその適正板厚を評価し、せん断余裕度に余裕があれば次にその板厚で局部横補強を検討する。その際、少なくとも1.1~1.2以上のせん断余裕度があれば、じん性に富んだ曲げ破壊先行が期待できることになりそうである。

謝辞：本研究は文部省による平成九年度「民間等との共同研究（区分A）」（沖縄県建造物耐震耐久性調査協同組合）の一部である。耐震補強試験体に関しては、地元沖縄の金秀建設（株）、及び特殊防水（株）に多大な協力をいただきました。ここに、関係者各位に深く感謝します。

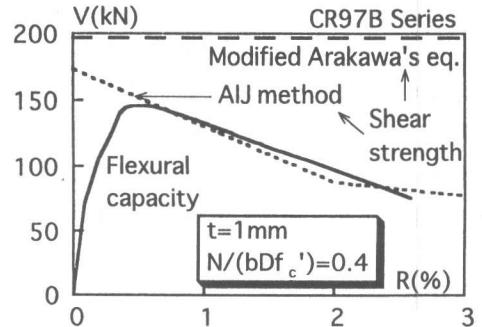


図-9 薄板で全面補強時の水平耐力計算結果

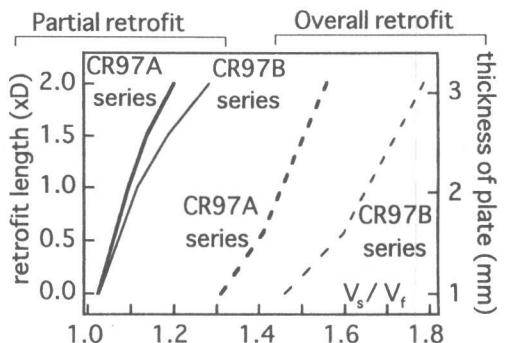


図-10 局部補強長さ、板厚とせん断余裕度の関係

参考文献：

- 仲鵬、山川哲雄：鋼管または鋼板で耐震補強したRC柱の弾塑性挙動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.19 No.2, pp. 1635-1640, 1997. 6
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, pp.104-121, 1990. 11
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, pp. 167-192, 1991. 4
- 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能, pp. 157-165, 1981. 6
- Yamakawa, T. and Hao, H.T. and Muranaka, K.: Elastoplastic Behavior of Doubly Confined R/C Columns in Steel Tube and Hoops, 日本建築学会構造系論文集 No. 500, pp. 83-89, Oct. 1997
- Mander, J. B. and Priestley, M. J. N. and Park, R. : Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.144, No.8, pp.1804-1826, Aug. 1988
- 益尾潔: RC及びSRC柱の耐震補強実験と設計式の検証、コンクリート工学 Vol. 34, No. 10, pp. 21-30, 1996. 10