

論文 アラミド繊維正形成形管を利用した合成 RC 柱の耐震性能

渡嘉敷貴之*1 山川哲雄*2 張愛暉*3 佐藤元*4

要旨:本実験は打込み型枠兼横補強材としてのアラミド繊維正形成形管に関する横補強効果の限界を検討するために、太径の主筋 (D19) を用い、かつ主筋量 (8-D19, $P_g=3.67\%$) を増やした上で、新素材と鉄筋コンクリートからなる合成RC柱 (せん断スパン比=1.5) に関する耐震加力実験を行った。その結果、ねばりのある曲げ破壊を保証するために必要なせん断余裕度と付着余裕度のうち、付着余裕度が不足し、付着割裂破壊となった。

キーワード:打込み型枠兼横補強材, アラミド繊維成形管, 付着割裂破壊, 合成 RC 柱

1. 序

著者らは、昨年RC柱の打込み型枠兼横補強材として利用するために、炭素繊維シートを5層エポキシ樹脂で重ね合わせて板厚3~4mm程度の正形成形管 (250×250mm) を2体試作した。この正形成形管を用いてせん断スパン比2.0の合成RC柱に関する一定軸圧縮力下 (軸力比0.35) の正負繰返し水平加力実験を行った。その結果、帯筋無しで主筋量が $P_g=2.44\%$ (12-D13) と比較的多く配筋されているにも関わらず、帯筋無しの正方形鋼管横補強RC柱とほぼ同程度の耐震性能を示したり。

そこで、連続繊維シートで製作した正形成形管に関する横補強効果の限界を検討するために、太径の主筋 (D19) を用い、かつ主筋量 (8-D19, $P_g=3.67\%$) を増やした上で、せん断スパン比1.5の耐震加力実験を計画した。なお、今回の実験では前回の炭素繊維シートにかわって、アラミド繊維シートをエポキシ樹脂で4層重ねて同一サイズの正形成形管を試作した。

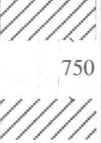
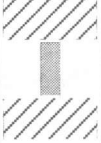



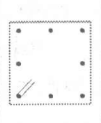

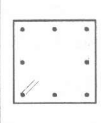
2. 試験体

試験体は Table 1 に示す4体である。基準 RC

柱1体、帯筋の有無によるAFRP成形管RC柱試験体各1体と、帯筋と正方形鋼管で二重に横補強したRC柱試験体1体の合計4体である。主筋は太径のD19が8本配筋され、主筋比も3.67%とかなり多い。帯筋比は0.64%で通常の配筋量に近いが、せん断スパン比は1.5である。

また、山川らによって鋼管と帯筋で二重に横拘束した方が、同じ鋼材量で鋼管のみの場合よ

Table 1 Column specimens

Specimen	Standard	AFRP tube		Steel tube
	H98M-A0	H98M-A44h	H98M-A44	H98M-S33h
Elevation(mm)				
Cross section (mm)				
Common details	Wall thickness of the steel tube : $t=3.2\text{mm}$ Wall thickness of the AFRP tube : 4 ply Longitudinal reinforcement : 8-D19 SD345 ($P_g=3.67\%$) Transverse reinforcement : D6-@40 SD295 ($P_w=0.64\%$) Shear span to depth ratio : $M/(VD)=1.5$ Strength of concrete cylinder : $\sigma_B=37.3\text{MPa}$			

*1 清水建設 (株) (元琉球大学大学院 工学研究科環境建設工学専攻) 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)

*3 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科 学術博士 (正会員)

*4 横浜ゴム (株) BD 推進室 (事業開発推進室) 担当課長

Table 2 Properties of material

	Thickness or section area	$s\sigma_y$ (MPa)	$s\epsilon_y$ (%)	sE (GPa)	$sE*t$
Aramid fiber sheet (1 ply)	0.193mm	2059	1.80	117.7	90.9 (4ply)
Steel plate	3.2mm	265	0.20	222.7	712.6
Longitudinal reinforcement	(D19) 287mm ²	380	0.22	189.2	
Transverse reinforcement	(D6) 32mm ²	388	0.22	184.1	

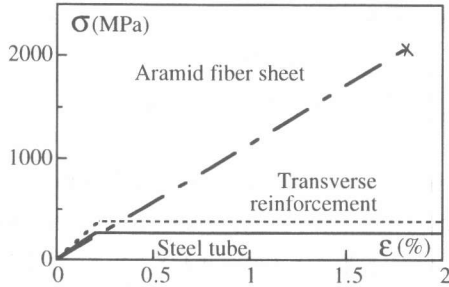


Fig. 1 Stress-strain relationships for reinforcement

り、優れた耐震性能を示すことがすでに明らかにされている²⁾。したがって、AFRP成形管において鋼管と同様に帯筋と二重に横補強することにより、より高い横補強効果を生みだしたり、又は、繊維シートの層数の低減が期待できるかどうかを検討するために、同じAFRP成形管に帯筋の有無を組み合わせた2種類の試験体を用意した。

特に、基準RC柱H98M-A0はせん断余裕度と付着余裕度が共に1.0を下回り、韌性に欠ける柱である。AFRP成形管はTable 2に示すような力学的特性を有するアラミド繊維シート（繊維目付280g/m²）をエポキシ樹脂で4層固めて試作したものである。その厚さは3.0mm～4.6mmで平均3.4mm程度の正方形チューブである。アラミド繊維シートの力学的特性を他の鋼材とともにFig. 1に示す。

AFRP成形管にコンクリートを打設する際には、前回同様に成形管の板剛性（面外曲げ剛性）が小さいためにフレッシュコンクリートの側圧により成形管が外にはらみ出す現象が見られた。打設前後の測定によると側圧が大きい柱脚部近傍の中央面で最大5.5mm程度で、測定誤差など

を考慮しても板厚よりやや大きいレベルである。

3. 実験結果

建研式加力装置を用いて、一定軸圧縮力（軸力比0.35）下の正負繰り返し水平加力実験を行った。各試験体の実験結果一覧表をTable 3に、またひび割れをFig. 2に、せん断力V-部材角R、平均軸ひずみ ϵ_v -部材角R関係をFig. 3に示す。補強試験体は加力実験終了後、AFRP管や鋼管を剥いでひび割れを観察した。基準RC柱H98M-A0は、部材角R=0.5%に達する前に、せん断ひび割れが生じるとともに耐力低下が生じた。0.5%での繰り返し加力で、柱に生じた細かいせん断ひび割れがつながり、主筋に沿う付着割裂ひび割

Table 3 Experimental result

Specimen	V_{max} (kN)	$V_{R=3\%}$ (kN)	V_{flex} (kN)	V_{max}/V_{flex}	failure mode
H98M-A0	270.7	—	325.5	0.83	bond
H98M-A44h	299.5	226.1	340.0	0.88	bond
H98M-A44	273.8	—	335.7	0.82	—
H98M-S33	358.8	253.2	325.9	1.10	flexural →bond

Note : V_{max} is the maximum shear force in the push loading. $V_{R=3\%}$ is shear force at drift angle R=3%. V_{flex} is analytical flexural capacity by fiber model.

Specimen	Standard			AFRP tube		Steel tube
	H98M-A0			H98M-A44h	H98M-A44	H98M-S33h
	Drift angle					
	0.5%	1.0%	2.0%	After loading test		
WEB						
	—	—	0.9	0.8	1.5	1.5
FLANGE						
	—	—	0.3	1.0	0.7	1.0

Note : The numerals are width of the maximum crack (mm).

Fig. 2 Observed cracking patterns

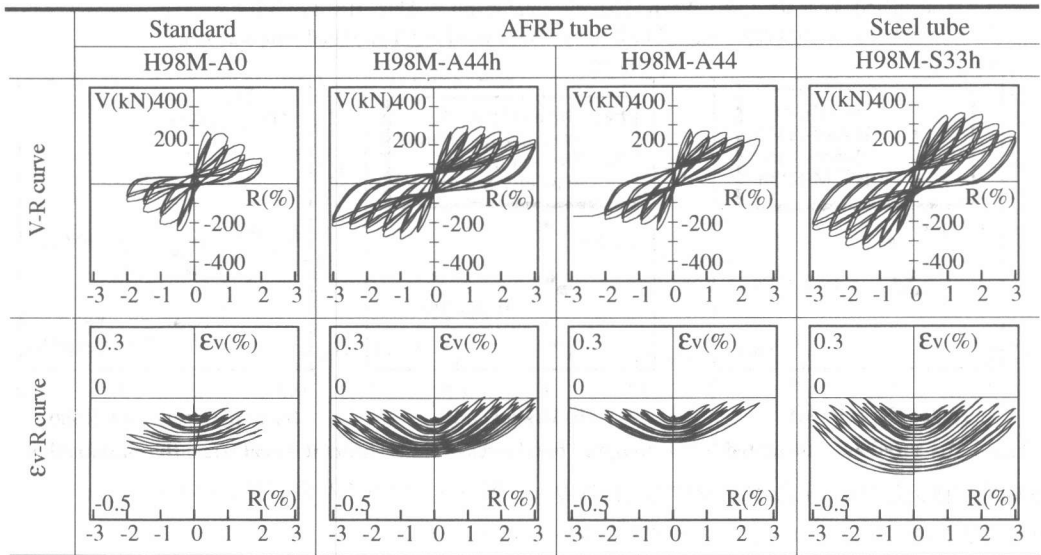


Fig. 3 Measured V-R and Ev-R relationships

れが形成された。その後の加力で、付着割裂ひび割れが顕著になり、ループ性状は典型的な逆S字型を呈した。部材角が2%で3サイクル時の水平耐力が最大水平耐力の約1/3となり、実験を終了した。この柱の主筋は降伏せず、破壊モードは付着割裂破壊である。

AFRP合成RC柱H98M-A44hでは、 $R=0.5\%$ までは繰り返しによる耐力低下は殆どなく、安定した性状を示した。1%のピーク手前で剛性が急激に低下したが、耐力低下が生じなかった。しかし、1%での繰り返し加力で、ピーク時水平力の低下が大きく、ループ性状も逆S字型を呈した。その後の加力で、各部材角ピーク時の水平力が緩やかに低下し、顕著な逆S字型ループ性状を示した。実験終了後のひび割れ観察で、主筋に沿う付着割裂ひび割れが確認された。この柱の破壊モードも付着割裂破壊である。

AFRP合成RC柱H98M-A44では、帯筋が配筋されていないため、帯筋が配筋された同じAFRP合成RC柱H98M-A44hよりも早い時点の $R=0.5\%$ で付着割裂破壊が生じた。なお、2.5%の負の1回目に向かう途中でトラブル発生のため、加力実験をとりやめた。

帯筋と鋼管で二重に横補強した合成RC柱H98M-S33hでは、 $R=1\%$ のピーク手前で主筋が

降伏し、その繰り返し加力でも安定した曲げ性状を示した。1.5%の繰り返し加力から、逆S字型のループ性状を示し、付着劣化が顕著に進んだ。この柱の破壊モードは主筋降伏後の付着割裂破壊である。4体の柱の平均軸ひずみが0.3%以下で安定していることや、主筋の座屈がほとんど観察されなかったことでコンクリート圧壊が支配的でなかったことを意味している。

鋼管RC柱を除いて、いずれの試験体も主筋が降伏レベルに至っていない。横補強材としての帯筋、AFRP成形管や鋼管の横ひずみからも、横補強効果が十分発揮されているとは言えず、また主筋の未降伏と合わせて、合成RC柱の耐震性能が十分発揮されていない。このことは、このような太径でしかも比較的多い主筋量に対して横補強材の横拘束効果が不足している。または、この程度の横補強材に対して太径、主筋量が多すぎる。すなわち、主筋がその能力を発揮する前に付着すべりが発生したことを意味している。

4. 付着性状の検討

本実験では付着による試験体の耐震性能の劣化が顕著であったため、主筋に生じる付着応力と主筋の付着割裂強度の検討を行った。その検討結果をせん断余裕度と共にFig. 4に示す。せん

V_s : Calculated shear strength, V_{exp} : Experimental result, τ_{bu} : Bond splitting strength
 V_f : Calculated flexural capacity, τ_f : Bond stress at yield of longitudinal reinforcement

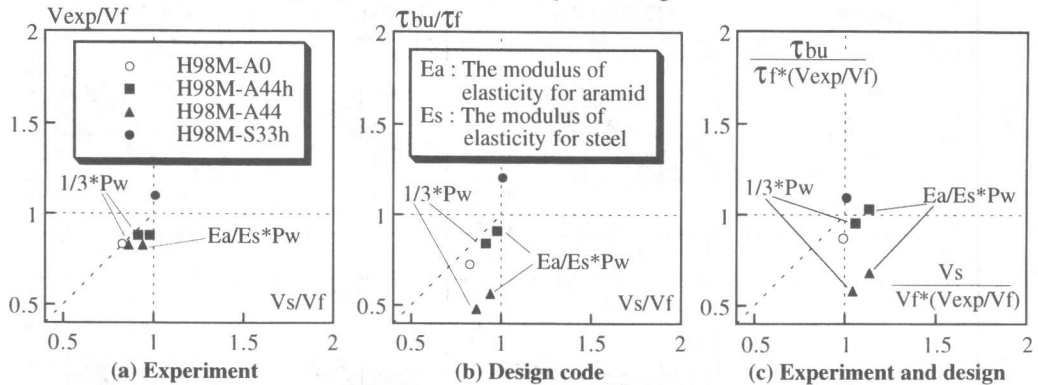


Fig. 4 Measured and calculated bond strength / bond stress versus shear/ flexural strength relationships

断強度は修正荒川 mean 式³⁾で、曲げ強度は拘束効果⁴⁾を考慮した上でファイバーモデルを用いて、それぞれ計算した。付着強度や付着応力度は文献5)を準用し、成形管や鋼管による補強試験体は3体とも $N_w/N_1=2/3$ とし、帯筋と同じ扱いにして計算した。鋼管の横補強量に関して、せん断強度はそのまま 100% 帯筋の P_w に換算し、付着に関しては文献5)より、鋼管の横拘束効果が帯筋のそれよりはるかに落ちるので、1/3倍して帯筋の P_w に換算した。アラミド繊維はその膜剛性 E_t を鋼管に換算して準用した場合と、設計用引張強度を 1/3 倍した場合の2通り計算した。

Fig. 4 (a) ではせん断余裕度に対する実験結果を示すが、鋼管と帯筋で二重に横補強したRC柱試験体H98M-S33hを除いていづれの試験体もせん断余裕度が不足し、かつ実験結果としての最大水平耐力が曲げ強度計算値より小さく、主筋が降伏していないことを示す。Fig. 4 (b) にはせん断余裕度と付着余裕度の関係を計算結果として示す。Fig. 4 (a)と同様に鋼管RC柱を除いたすべての試験体は、両方の余裕度がともに、1.0より小さい。しかも、45° 方向線より下にあるので、付着割裂破壊がせん断破壊より先行しそうであることがわかる。このことをさらに検討するために、Fig. 4 (c) のように最大水平耐力に関する実験結果を用いて、付着余裕度とせん断余裕度の関係を再整理した。Fig. 4 (c) は Fig. 4 (b)と同様に、実験上付着割裂破壊で破壊形式が支

配されていることを示唆している。

5. 解析による検討

平面保持を仮定したfiberモデルによる弾塑性解析を行い、実験結果と比較検討を行った。帯筋や鋼管による拘束コンクリートの構成則は崎野・孫の提案式⁴⁾を用いた。帯筋と鋼管で二重に横拘束する場合は、両者の横拘束効果を単純累加で求めた⁶⁾。AFRP管で横拘束されたコンクリートの構成則は川島らが炭素繊維拘束効果に対して提案した式⁷⁾を準用した。その他の仮定は4節の仮定をそのまま用いた。各種拘束状態下のコンクリート構成則を Fig. 5 に示す。帯筋や鋼管と、AFRP管による初期剛性に若干差異があるのは、それぞれの構成則の違いによるものである。アラミド繊維と帯筋で二重に横拘束した方が、アラミド繊維だけより靱性が劣っているのは、川島式の特徴であり、また両方の差異もほとんど見られない。

実験結果と解析結果の比較を Fig. 6 に示す。参

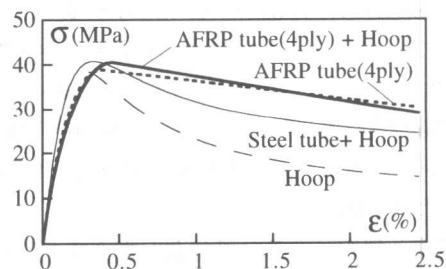


Fig. 5 Calculated stress-strain curves for concrete

考までに文献2)に基づき、付着すべりを考慮したファイバーモデルによる曲げ解析を行った。ただし、せん断強度は修正荒川mean式³⁾である。Fig. 6によれば、鋼管RC柱を除いて付着すべりを考慮しない曲げ解析がせん断強度を上回っている。しかし、付着すべりを考慮すると、その曲げ解析はせん断強度をすべて下回っており、しかも鋼管RC柱を除いて、実験結果のスケルトンカーブとほぼ一致している。付着に関するFig. 6の計算結果は、Fig. 4の計算結果と整合性を有している。

アラミド成形管を用いた本試験体は帯筋の有無に関わらず、付着割裂破壊先行型の試験体であることがFig. 4, 6からわかった。そこで、これ

らの試験体のコンクリート強度 (37.3MPa) と、主筋量 (8-D19, $P_g=3.67\%$) を用いて、曲げ破壊先行型の試験体に移行させることが可能かどうかの検討を行った。

Fig. 7にアラミド繊維層数を横軸にとり、せん断及び付着余裕度に関する計算結果を示した。Fig. 7では付着余裕度が支配的であるが、最も条件の良い帯筋有でアラミド繊維のヤング係数を鋼管のそれに換算して準用した場合でも5層必要であり、他は10層以上必要という非現実的な結果となった。もっとも、目付量の多いアラミド繊維シートを利用すれば層数を減らすことは可能であるが、経済的な問題はつきまとう。

Fig. 8は、アラミド繊維シートを4層に固定し、

中子筋付き帯筋量を横軸にして、せん断及び付着余裕度を計算した図である。Fig. 8より、付着余裕度の増加勾配は大きい、せん断余裕度のそれは小さい。帯筋量はRC柱の上限値である1.2%程度は少なくとも必要であることを示唆している。

Fig. 9は、付着すべりを考慮したファイバーモデルを用いて、主筋本数(8本)と帯筋(D6-@40)は一定にして主筋径の減少、すなわち主筋量を減らすことによって、付着すべりを防げるかどうかをコンクリート

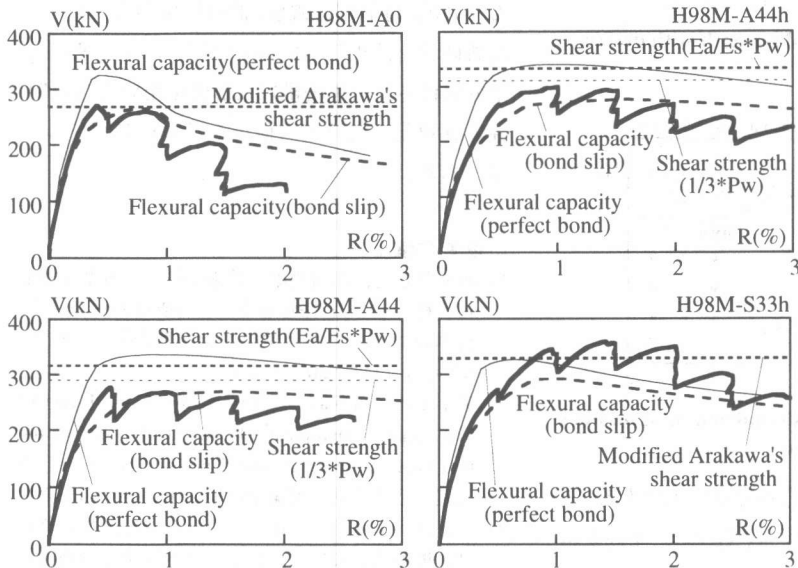


Fig. 6 Measured skeleton curves versus calculated flexural and shear strength relationships

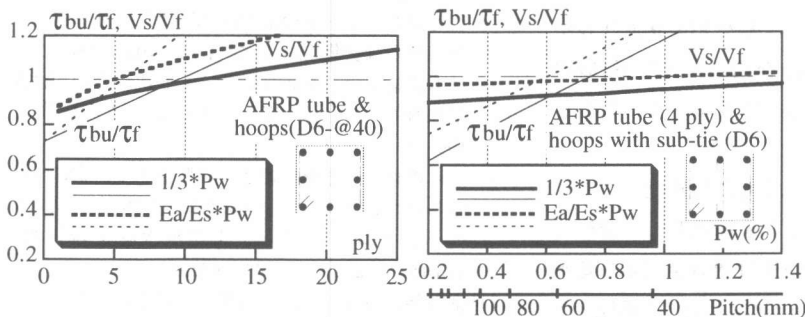


Fig. 7 Bond strength and shear strength versus number of aramid fiber sheets relationships

Fig. 8 Bond strength and shear strength versus transverse reinforcement relationships

Vslip : Max. lateral capacity (bond slip)
 Vu : Max. lateral capacity (perfect bond)

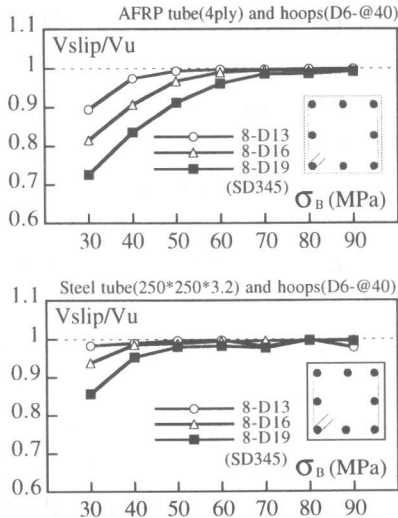


Fig. 9 Calculated flexural strength with perfect bond or bond slip

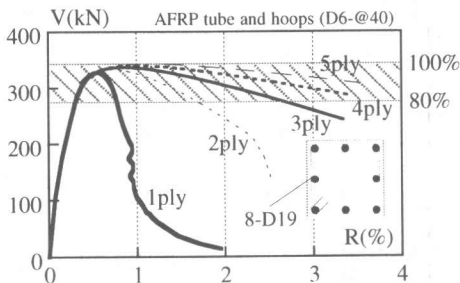


Fig. 10 V-R curves versus number of aramid fiber sheets relationships

強度を横軸にとり、検討した計算結果である。アラミド繊維成形管を用いたRC柱では、主筋が8-D13であればコンクリート強度(シリンダー強度)が50MPa、8-D16であれば60MPaで付着すべりを計算上ほぼ防止できることがFig. 9よりわかる。このことからしても、今回の主筋量が4層のアラミド繊維成形管に対して多すぎることを意味している。

Fig. 10はせん断破壊と付着割裂破壊をしないものと仮定して、アラミド繊維成形管と帯筋で二重に横補強した柱試験体H98M-A44hを基本に、アラミド繊維シートの層数と靱性の関係、すなわち曲げ圧壊を防止できるかどうかを検討したものである。Fig. 10より、4層以上巻いたアラ

ミド繊維成形管であれば、曲げ圧壊を防止し、靱性を確保できることがわかる。したがって、Fig. 6からFig. 9まで検討してきたように、せん断破壊と付着割裂破壊が曲げ圧壊よりきびしいので、せん断破壊と付着割裂破壊を防止できれば、自動的に曲げ圧壊は回避できそうである。

6. 結論

打込み型枠と横補強材を兼ねるアラミド繊維正方形成形管を用いた合成RC柱の曲げせん断実験を行った。その結果、アラミド繊維成形管RC柱に太径の主筋を比較的少量に用いたため、付着余裕度が不足し、付着割裂破壊となった。このことは種々の解析結果からも裏付けられた。せん断破壊、付着割裂破壊、曲げ圧壊および曲げせん断破壊を防止し、曲げ破壊先行で、かつ靱性が十分確保された連続繊維成形管を用いた合成RC柱の具現化に向けて、研究をさらに継続する予定である。

参考文献:

- 1) 渡嘉敷貴之, 山川哲雄, 仲鵬: 打ち込み型枠兼横補強材としてCFRP管を用いた合成柱の耐震性能, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.1243-1248, 1998.7
- 2) Tetsuo Yamakawa, Hong Tao Hao, Keisuke Muranaka: 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 第500号, pp.83-90, 1997.10
- 3) 李正浩, 清水泰: 鉄筋コンクリート柱部材の終局せん断耐力式に関する検討, 日本建築学会構造系論文集 第483号, pp.121-128, 1996.5
- 4) 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 第461号, pp.95-104, 1994.7
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説, 日本建築学会, 1997.7
- 6) 山川哲雄: 正方形鋼管と直線型帯筋で二重に横補強したコンクリートの圧縮性状に関する実験的研究, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.537-542, 1993.6
- 7) 細谷学, 川島一彦, 星隈順一: 炭素繊維シートで横補強されたコンクリート柱の応力度-ひずみ関係, 東京工業大学地震工学研究グループ, TIT/EERG 96-2, 1996.8