

# 論文 アラミド繊維成形管を横補強材兼型枠に利用した合成円形 RC 柱の実験的研究

仲 鵬<sup>\*1</sup> 山川哲雄<sup>\*2</sup> 張 愛暉<sup>\*3</sup> 渡嘉敷貴之<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究は一定軸圧縮力下(軸力比0.35)の正負繰り返し水平加力実験を行い, 横補強材兼型枠材として提案したアラミド繊維円形成形管の横補強効果が合成円形RC柱の弾塑性挙動に及ぼす影響を検討した。その結果, 今回の実験では柱に太径の, しかも高強度主筋を比較的多量に用いたため, 曲げ破壊を保障する付着余裕度が不足し, 付着割裂破壊となった。付着強度とせん断強度の比較検討を行い, 柱の破壊モードを判別できた。

**キーワード:** アラミド繊維円形成形管, 合成RC柱, せん断強度, 付着割裂強度, 等価断面

## 1. 序

著者らは, 連続炭素繊維シートをエポキシ樹脂で5層重ね合わせて製作した正方形成形管を鋼管にかわり, 打込み型枠兼横補強材としてRC柱に利用する方法を提案したり。その結果, 連続炭素繊維シート成形管を用いた合成RC柱は, 鋼管を用いた合成RC柱とほぼ同程度の耐震性能を保有することがわかった。本研究では成形管の横補強効果のさらなる増大を期待してアラミド繊維シートで円形成形管を試作し, その横補強効果が合成円形RC柱の弾塑性挙動に及ぼす影響を検討した。

## 2. 柱試験体

円形柱試験体は250 mm正方形柱と断面積が同じになるように径282 mmを採用し, せん断スパン比  $M/(VD)$  が1.33である。試験体一覧を **Figure 1** に示す。柱試験体は基準RC柱1体, アラミド繊維シート成形管を用いた合成RC柱(以後, AFRP管柱と略称する)2体, 鋼管合成RC柱(以後, 鋼管柱と略称する)1体の計4体である。横拘束効果の増大が期待できる円形断面であるので, 基準RC柱以外は帯筋を配筋せず, 全柱にD19の太径で, かつSD490の高強度異形鉄筋を8本配筋 ( $P_g = 3.67\%$ )

した。したがって, 基準RC柱試験体HC98M-A0は曲げ強度が高くなり, せん断余裕度と付着余裕度がともに1.0を下回り, 靱性に欠けるRC柱となっている。AFRP管はアラミド繊維シートを1層と4層で製作した2種類とした。鋼管柱は基準RC柱と同様に, AFRP管柱の弾塑性挙動や横補強効果を比較するために用意した試験体である。

アラミド繊維シート1層当たり, 鋼管及び鉄筋の力学的特性を **Table 1** に示す。円形成形管はアラミド繊維シートを1層または4層, エポキシ樹脂で固めることによって製作した。

Specimen	Standard	AFRP tube		Steel tube
	HC98M-A0	HC98M-A11	HC98M-A44	HC98M-S33
Elevation (mm)				
Cross section (mm)				

Note: Longitudinal reinforcement is 8 - D19 (SD490),  $p_g = 3.67\%$ ; strength of concrete cylinder is 40.6 MPa.  
Steel hoop in HC98M-A0 is D6 - @40 (SD295),  $p_w = 0.57\%$ .

**Figure 1** Column specimens

- |              |                   |            |
|--------------|-------------------|------------|
| * 1 琉球大学大学院  | 理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)   |
| * 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 清水建設 (株) | (元琉球大学大学院生)       | 工修 (正会員)   |

**Table 1 Properties of reinforcing materials**

transverse reinforcement	thickness or section area	tensile yield strength (MPa)	tensile yield strain (%)	Young's modulus (GPa)
AFRP sheet (1ply)	0.193 mm	2059	1.80	117.7
steel plate	3.2 mm	374	0.20	222.7
vertical bar (D19-SD490)	287 mm <sup>2</sup>	490	0.26	193.5
lateral steel (D6-SD295)	32 mm <sup>2</sup>	388	0.22	184.1

**3. 加力実験結果**

建研式加力装置を用いて、一定軸圧縮応力(軸力比0.35)下の正負繰り返し加力で行った。水平加力の制御は初期ひび割れが発生するまでは荷重制御で行い、ひび割れ発生後は柱の部材角  $R$  を0.5%ずつ、同一振幅で3サイクルずつ繰り返しの変形制御で3%まで行った。**Table 2**に実験結果の一覧を示す。各試験体の破壊状況を**Figure 2**に、せん断力  $V$  - 部材角  $R$  関係を**Figure 3**に、平均軸ひずみ  $\epsilon_r$  - 部材角  $R$  関係を**Figure 4**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て**Figure 2**に記載した。

基準柱 HC98M-A0 では、部材角  $R=0.5\%$  までは繰り返しによる耐力低下も殆どなく、安定した性状を示した。部材角  $R=1\%$  の1回目ピーク手前に剛性低下が生じ、繰り返し加力によって水平耐力が急激に低下して、ループ性状も逆S字型を示した。その後、柱の主筋は降伏しておらず(**Figure 5**参照)、付着割裂ひび割れが顕著になり、典型的な付着割裂破壊を呈した。コアコンクリートが帯筋に拘束されていることで、付着破壊後かぶりコンクリートが剥落し、付着滑りにより耐力の低下が最後まで止まらなかった。

繊維1層のAFRP管柱 HC98M-A11 では、部材角  $R=0.5\%$  に達する前に、急激な耐力低下が生じ、早期に深刻な付着割裂破壊が生じた。その後、同じ逆S字型ループ性状を示したが、水平耐力が加力終了時まで衰えず、ほぼ安定した履歴曲線を描いた。これは、かぶりコンクリートが連続繊維シートに拘束され、破壊しても剥落しなかったため、付着破

**Table 2 Summary of experimental results**

specimen	$V_{max}$ (kN)	$V_{R=3\%}$ (kN)	$V_{flex}$ (kN)	$\frac{V_{max}}{V_{flex}}$	failure mode
HC98M-A0	264.9	126.8	356	0.74	bond
HC98M-A11	183.0	153.5	376	0.49	bond
HC98M-A44	276.0	261.3	398	0.69	bond
HC98M-S33	416.5	374.5	413	1.01	flexural → bond

Note: The  $V_{max}$  shows The maximum shear force in the push loading direction,  $V_{R=3\%}$  expresses the shear force at drift angle  $R = 3\%$ , and  $V_{flex}$  represents the analytical flexural capacity by fiber model.

壊後もある程度の付着応力を維持できたと思われる。実験終了後、成形管を剥がし、主筋に沿う付着割裂ひび割れが確認された(**Figure 2**参照)。

繊維シートを4層とした試験体 HC98M-A44 は、繊維1層柱 HC98M-A11 より高い耐力のレベルで類似の履歴曲線を示し、付着割裂破壊が生じた。拘束量を増やすことにより、最大耐力が高められたが、主筋の降伏を保証できなかった。

鋼管柱 HC98M-S33 では、部材角  $R=1.0\%$  まで安定した曲げ性状を示した。1.5% 以後の各部材角レベルでの繰り返しサイクルは若干逆S字型ループ性状を示したが、1回目加力のピーク荷重に比べ、耐力の低下が少なかった。実験終了後鋼管を剥がして柱頭・柱脚の曲げひび割れ以外のひび割れを観察されなかった。この柱の主筋が降伏していることより、破壊モードは曲げ破壊である。ただし、

	Standard			AFRP tube		Steel tube
	HC98M-A0			HC98M-A11	HC98M-A44	HC98M-S33
	R=0.5%	R=1.0%	R=2.0%	Final Stage	Final Stage	Final Stage
WEB						
	—	—	0.6	1.5	0.5	0.1
FLANGE						
	—	—	0.6	0.8	1.0	0.2

Note: Arabic numerals express maximum width of crack (mm)

**Figure 2 Observed cracking patterns**

V-R 曲線から若干の付着劣化が認められる。

Figure 4に示した柱材軸方向の平均伸縮ひずみ $\epsilon_v$ は繰り返し回数を積み重ね、軸圧縮ひずみが増加する。基準RC柱HC98M-A0はやや増加しているような性状を示し、水平耐力の低下が部材角の増大とともに顕著であることに一致する。これに対して、繊維シートや鋼管で拘束した試験体はより安定した軸縮みを示唆しており、しかも縮み量が少なく、脆性的な破壊は生じなかったことが理解できる。

柱の材端 flange 部に相当する主筋の材軸方向ひずみ履歴曲線をFigure 5に示す(ゲージ貼付位置はFigure 1に示す)。鋼管柱を除いて、主筋が降伏レベルに至っていないことがわかる。横補強材としてAFRP 成形管や鋼管の横補強効果が十分発揮できず、また主筋の未降伏と合わせて、このような配筋では合成RC柱の強度と靱性が期待できないことが

分かる。これは、比較的多い太径の高強度主筋に対して横補強材の横拘束効果が不足しており、主筋がその曲げ能力を発揮する前に付着すべりが発生したためである。

各試験体の水平力-部材角履歴曲線より得られた累積エネルギー吸収能力を比較してFigure 6に示す。アラミド繊維1層巻の柱は基準試験体に比べて、部材角 $R=2.0\%$ までは吸収能力が小さいが、その後は基準試験体より累積エネルギー吸収能力が良くなっている。巻き数を4層に増大させると、累積エネルギー吸収能力が著しく上昇した。それは付着割裂破壊したかぶりコンクリートが繊維シートに拘束され、繊維シートが破断するまで圧縮応力を負担して、曲げ耐力を維持しているためである。鋼管柱の場合、主筋が降伏した後の付着滑りが少ないので、エネルギー吸収量がさらに改善されている。

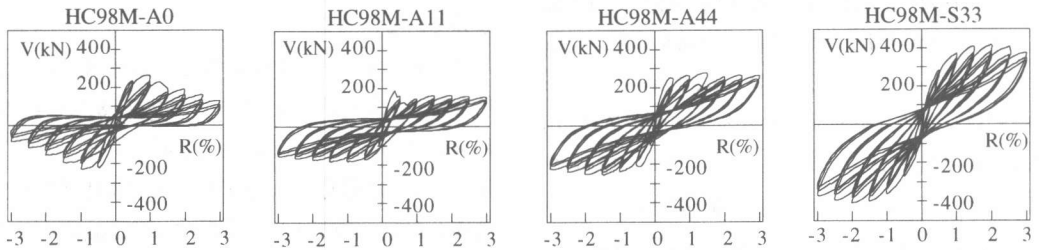


Figure 3 Measured horizontal force - drift angle relationships of columns

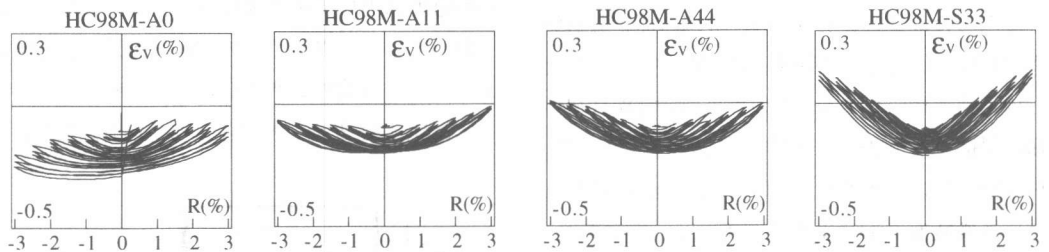


Figure 4 Measured vertical strain - drift angle relationships of columns

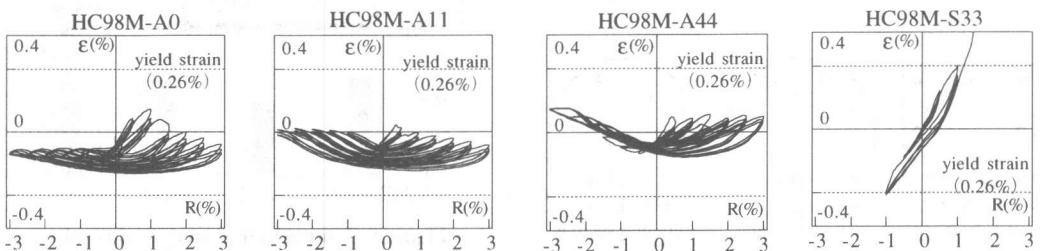


Figure 5 Measured strains of longitudinal bar - drift angle hysteresis loops of columns

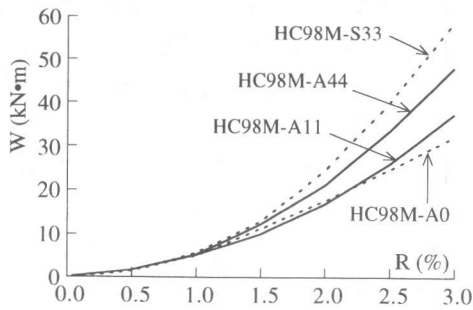


Figure 6 Accumulated absorbed energy of columns

#### 4. 付着、せん断及び曲げ強度の検討

横補強量の不足により、柱の主筋とコンクリートとのインターフェースの役割を果たす付着力を保証できず、両者の間に付着滑りが生じ、付着割裂破壊により部材の構造性能は顕著に劣ったことが以上述べた実験結果から分かった。柱部材のせん断強度と付着性能を検討するため、次に示す解析仮定を設けた。

(1) 円形断面部材は同一断面積を持つ正方形断面250x250 mmに置き換え、かつ等価せん断スパン比も1.33として解析を行う (Figure 7 (a) 参照)。なお、置換した正方形断面における主筋の配置は、円形断面と同じかぶりコンクリート厚さの15 mmを持つものとして定めた。主筋と帯筋は断面積が等しくなるように置換してせん断と付着強度式を準用する。しかし、円形補強材のせん断補強効果が正方形の場合より減少するため、等価断面正方形でのせん断補強筋比  $p_w$  の値を0.785倍して減じる<sup>2)</sup>。

(2) 柱部材における主筋の付着割裂性能は靱性保証型指針式 (AIJ97) を用いて解析する<sup>3)</sup>。なお、付着割裂破壊の破壊モードは、本試験体の場合正方形等価断面で生じるサイドスプリットとなる。また、Figure 7 (b), (c) に示すように円形断面に生じ

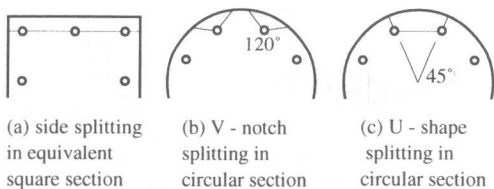


Figure 7 Bond splitting mode assumed in analyses

るVノッチとU型スプリット破壊も考えて式を準用する場合に、1組の横補強筋の足の数  $N_w = 2$ 、1段目主筋の本数  $N_l = 2$  とする。付着強度を算定する際にも仮定1) におけるせん断補強筋比  $p_w$  の低減を行う。

(3) 連続繊維成形管の表面に貼付したゲージの測定結果から、柱試験体が最大耐力に達する時横方向引張ひずみが0.2%、部材角3.0%時にも0.8%未満であったことから、成形管の横拘束効果が十分発揮されていないので、連続繊維シートの引張強度を低減して適用する必要があると判断した。文献4) により、アラミド繊維シートの設計用引張強度は引張強度の1/3とする。

(4) 横補強材に用いる連続繊維成形管と鋼管は、せん断強度を評価する際のトラス機構の有効係数に用いる帯筋間隔として、平断面芯々距離250x250 mmで、1 cmを仮定する。1 cmが妥当か、又は0とおくことも可能かどうかについては、今後の検討課題である。

以上の仮定に基づいて計算した設計用付着応力度と付着信頼強度を比較してFigure 8に示す。横補強効果があるほど付着性能が増大することが分かる。付着余裕度が1.0を下回る試験体は付着割裂破壊となり、1.0を上回る試験体は曲げ破壊またせん断破壊となる。等価正方形断面で算出した付着信頼強度は円形断面でのU型スプリット破壊による結果とほぼ同程度で、共に鋼管及び連続繊維成形管による横補強が不足であることを示唆している。なお、円形断面における主筋の付着強度は、等

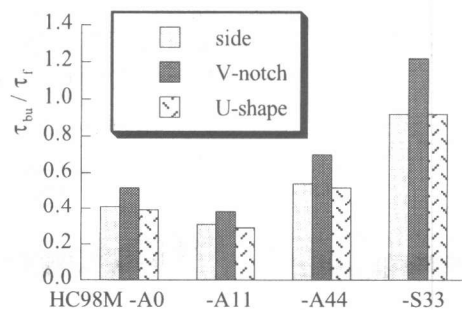


Figure 8 Comparison of analytical results responding to several bond splitting failure

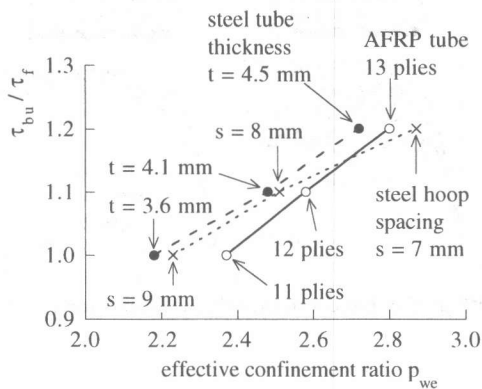


Figure 9 Essential transverse reinforcement corresponding to bond stress due to flexure

備正方形断面を用いて従来強度式を適用できることが分かる。したがって、以下の計算では曲げ強度を除いて、等価正方形断面による付着及びせん断強度を採用する。

付着割裂破壊が生じないようにするため、必要な横補強材を付着余裕度（付着信頼強度と付着応力の比率）1.0, 1.1, 1.2とそれぞれ計算した結果をFigure 9に示す。図から分かるように、付着余裕度を1.0-1.2確保するためには、トラス機構に關与する断面の有効幅と有効せいで定義した有効横補強筋比  $p_{we}$  がほぼ2.2-2.8%必要である。しかし、帯筋間隔がきわめて小さいことや、アラミド繊維シート巻き数が多く、本試験体の場合は、鋼管補強を除いて現実的でない。したがって、現実的には帯

筋とアラミド成形管の組み合わせが考えられる。

さらに、曲げ強度の評価については、帯筋や鋼管による拘束コンクリートの応力-ひずみ構成則はそれぞれManderらや崎野・孫の提案式を用いた<sup>5, 6)</sup>。AFRP管による拘束効果は、炭素繊維シートで定式化された川島らの提案式<sup>7)</sup> にアラミド連続繊維シートの力学的性質をそのまま適用する。各種横拘束材の拘束効果をFigure 10に示す。柱の曲げ強度の算定は、平面保持仮定により fiber モデルを用いて精算を行った。

柱のせん断耐力の算定は、上述の仮定をもとに、終局強度型指針A式 (AIJ90)、靱性保証型指針式 (AIJ97) と修正荒川 mean 式を適用した<sup>2, 3)</sup>。AIJ式に関しては、柱部材のヒンジ領域回転角を0と仮定した時のせん断強度の計算結果を参考にFigure 11に示す。せん断余裕度は鋼管補強柱HC98M-S33を除いて、すべて1.0以下で不足している。

そこで、せん断余裕度と付着余裕度の不足度合いを検討するために、等価正方形断面で比較した両者の計算結果をFigure 12に示す。Figure 12より、付着余裕度がせん断余裕度より不足し、せん断破壊より付着割裂破壊が先行することが予測される。このことは実験結果とも対応している。

付着割裂やせん断破壊が発生しないものと仮定して、fiber モデルにより求めた曲げ強度のスケルトンカーブと実験結果の間には、鋼管柱を除いて、

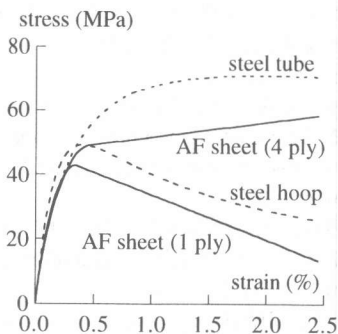


Figure 10 Stress - strain curve of confined concrete

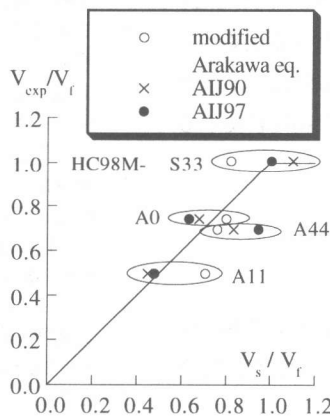


Figure 11 Comparison of analytical and test results

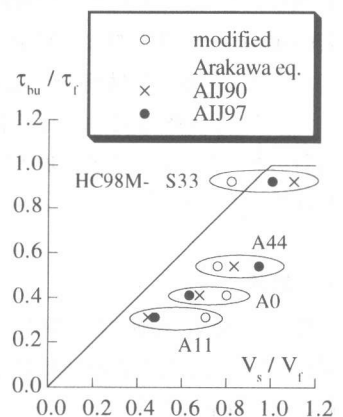


Figure 12 Comparison of bond and shear strength

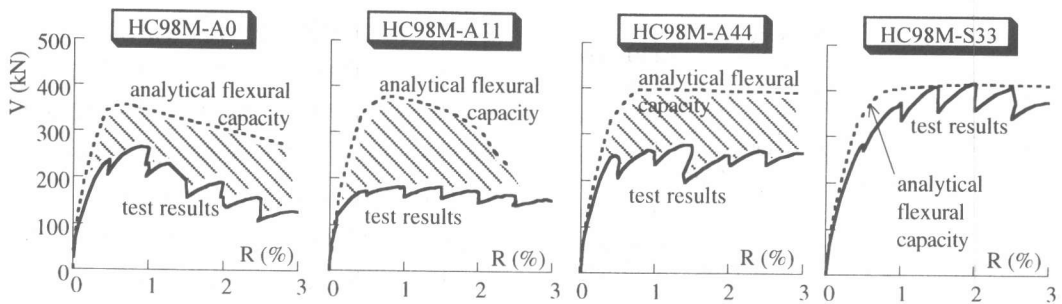


Figure 13 Comparison of analytical flexural capacity with perfect bond and experimental skeleton curves

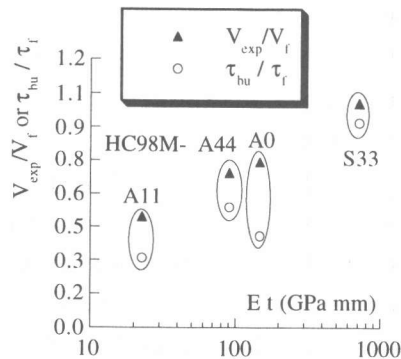


Figure 14 Effect of membrane stiffness Et

かなりの差異があることが Figure 13 より分かる。この差異が付着滑りに起因していることは前述の通りである。

Figure 14 に膜剛性を横軸に対数で表示し、実験結果としてのせん断耐力と前述の仮定を用いて等価正方形断面による計算で求めた付着強度を示す。なお、帯筋補強基準柱 HC98M-A0 における帯筋は体積比が等しくなるように等価膜剛性に置換した。Figure 14 より、曲げ強度計算値に対する実験値としてのせん断耐力比は膜剛性の対数値にほぼ比例していることが分かる。また、付着余裕度に関する計算値も膜剛性の対数値に基準 RC 柱を除いてはほぼ比例している。

## 5. 結論

打込み型枠と横補強材を兼ねるアラミド繊維成形管を用いた合成円形 RC 柱に関しては、本実験の範囲内で以下の知見を得た。

- 1) アラミド繊維円形成形管による横拘束効果の増大以上に、太径の高強度主筋を比較的多量

に用いたため、アラミド繊維のせん断補強効果が十分発揮できず、成形管柱は曲げ降伏せず付着割裂破壊した。

- 2) 付着性能は円形断面を等価正方形断面に置換した付着強度算定式により、概ね評価することができる。

**謝辞:** アラミド繊維成形管は横浜ゴム (株) に試作していただきました。金秀建設 (株)、琉球大学工学部附属工作工場の比嘉實文部技官をはじめ多くの関係者に多大な協力をいただきました。加力実験は琉球大学地域共同研究センター内の施設で行った。関係者各位に厚くお礼を申し上げます。

### 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) 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, 日本建築学会, 1990
- 3) 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
- 4) 連続繊維補強コンクリート研究委員会: 連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp. 104-110, 1997.7
- 5) 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
- 6) 孫玉平, 崎野健治: 円形鋼管横補強 RC 柱の曲げ終局強度の算定法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 3, pp. 1117-1122, 1998
- 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/BERG 96-2, 1996.8