

論文 打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

渡嘉敷貴之^{*1}・山川哲雄^{*2}・仲鵬^{*3}

要旨：打込み型枠と横補強材を兼ねた正方形CFRP管を用いた合成RC柱の弾塑性挙動に関する一定軸力比下の正負繰返し水平加力実験を行った。本実験は正方形CFRP管がRC柱の打込み型枠兼横補強材として施工実験を行い、かつ耐震性能上横拘束効果とせん断強度の増大を十分はたしうるかどうかを検証するためのパイロット実験である。その結果、コンクリート打設時にフレッシュコンクリートの側圧による若干のはらみ出しが生じたほかは、特に帯筋なしの柱試験体でも主筋の付着すべりや、じん性の低下もほとんど生じず、耐震性能上期待以上、すなわち鋼板巻き補強と同等のじん性に富んだ弾塑性挙動を示した。

キーワード：打込み型枠、横補強材、CFRP管、横拘束効果、耐震性能

1. 序

航空、船舶などハイテク産業やゴルフ、釣りなどレジャー産業に広く利用されていた炭素繊維、アラミド繊維など新素材繊維がシート、ワイヤー、棒材などに加工され、建築及び土木構造物、とりわけ既存構造物の耐震補強にかなり利用される世の中になってきた¹⁾。そういう中であって、本研究は従来の鉄筋または新素材で棒状に製品化された主筋と、必要に応じて帯筋を配筋した柱に打込み型枠（永久型枠）と横補強材を兼ねた連続繊維補強成形管（正方形、円形、長方形）を配置し、その中にコンクリートを打設した合成コンクリート柱の新たな提案である。特に本論ではその手始めとして、正方形の炭素繊維成形管（以後CFRP管と呼称する）を用いて従来の鉄筋コンクリート柱の合成構造化を試みたものである。CFRP管は鋼管同様に単独では構造部材になりえないが、コンクリート²⁾またはコンクリートと主筋、帯筋を併用することにより、すなわち合成構造化することにより優れた構造部材になりうる。

現在、コンクリート工事では大量消費型の合成ベニヤ板が型枠に利用され、地球温暖化の一

要因である森林資源の大量伐採に繋がっている。その一方、型枠大工など技能を必要とする職人が確実に減少している。これらを考慮すると、コンクリート2次製品や、連続繊維補強成形管を打込み型枠として利用するアイデアは、今後ますます社会のニーズとして高まるものと思われる。さらに、CFRP管には横補強材として高い横拘束効果を期待できる。また、これらの新素材は一般に軽いのでCFRP管の自重も軽量で、施工の省力化も期待できる。さらにCFRP管は鋼管と違い、腐食の心配がないので耐久性に富んでいる。

以上のような社会的背景と理由により、打込み型枠兼横補強材としてCFRP管を用いた合成RC柱の弾塑性挙動に関する加力実験を行った。本実験は正方形CFRP管が、RC柱の型枠材としての機能を満たし、かつ横補強材としてRC柱の横拘束効果とせん断強度の増大を十分はたしうるかどうかを検証するためのパイロット実験である。これらが今回の実験で検証できたら、正方形および円形CFRP成形管、またはアラミド繊維を用いた成形管で横補強された合成柱の一定軸力比下の正負繰返し水平加力実験を中心とした系統的な実験を順次実施する予定である。

*1 琉球大学大学院 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 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. 柱試験体

柱試験体の一覧表を表-1に示す。表-1より柱試験体は250×250mmの正方形断面で、高さが1000mmのせん断スパン比が2である。主筋量が2.44%と多いわりには、軸力比が0.35と高く、帯筋比が0.43%とやや少ない傾向にあるので基準RC柱試験体CR97A-S0は曲げせん断破壊しやすい、いわゆるねばりに欠けた柱であると思われる。このような基準試験体に対して、CFRP管で打込み型枠兼横補強材として利用した場合の試験体CC97-SD（帯筋有り）とCC97-SS（帯筋無し）を用意した。そして参考試験体として鋼板で横補強した耐震補強試験体CR97A-DSを掲載した。また、CFRP管や鋼板に軸圧縮力を伝達させず、横補強材としての機能を十分確保するために、CFRP管や鋼板と上下スタブとの間に約10mm程度のクリアランスを設けてある。

表-1 試験体一覧

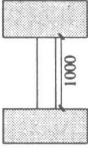
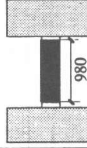
正方形断面 (250×250×1000mm)				
試験体名	基準RC柱	炭素繊維成形管		鋼板巻き補強
	CR97A-S0-	CC97-SD	CC97-SS	CR97A-DS
試験体				
断面 (単位:mm)		 炭素繊維 5 層巻き		 鋼板 (t=3.2)
軸力比	0.35			
主筋	12-D13 (P _g =2.44%)			
帯筋	D6-@60 (P _w = 0.43%)		なし	D6-@60 (P _w = 0.43%)
せん断スパン比	M/(V _D) = 2			
4週 コンクリート強度	31.2MPa	31.9MPa		31.2MPa
実験時 コンクリート強度	31.4MPa	33.3MPa		31.4MPa
打設日	1997.6.21	1997.10.1		1997.6.21
実験日	1997.8.30	1997.11.8	1997.11.4	1997.9.4

表-2 炭素繊維シートと鋼板、鉄筋の力学特性

	厚さまたは断面 面積	$s\sigma_y$ (MPa)	$s\epsilon_y$ (%)	sE (GPa)
炭素繊維シート (1層分)	0.167mm	3481.4	1.5	230.4
鋼板(CR97A-DS)	3.2mm	265.4	0.20	222.7
鉄筋	D6 (帯筋)	388.2	0.22	184.1
	D13 (主筋)	360.6	0.21	202.7

試験体CR97A-S0, CC97-SD, CR97A-DSは帯筋比が同一の試験体で、コンクリート打設日と加力実験日の違いにより、加力実験時のコンクリート強度（シリンダー強度 σ_b ）に若干の差異があるが、2MPa程度であるから、実験結果に与える影響は無視できるものと思われる。

正方形CFRP管は、繊維目付300g/m²、設計厚さ0.167mmの炭素繊維シートを1周と1/4ずつずらしながら、5層フープ巻きして、柱高さ方向に200mmのラップをとりエポキシ樹脂で積層して製作された。炭素繊維シート1層当り、鋼板及び鉄筋の各力学特性を表-2に示す²⁾。

3. コンクリート打設時のはらみ出しについて

CFRP管は正方形で、かつ板としての面外曲げ剛性が鋼板より小さいと考えられるので、コンクリート打設時にフレッシュコンクリートの側圧により面外にはらみ出す可能性がある。そこで、CFRP管を用いた2つの柱試験体について、コンクリート打設前と後でCFRP管のはらみ出し量について計測した。一方フレッシュコンクリートの側圧（22.6kPa/m）を仮定し、フープ方向にCFRP管から単位幅切り出し、等分布荷重を受ける両端固定梁とみなして解析し、それらを表-3に整理する。CFRP管壁のヤング係数はエポキシ樹脂を考慮して67.7GPa（帯筋有り）、72.6GPa（帯筋無し）と仮定し、単位幅の梁としての長さは柱のせい（250mm）を採用し、梁せいは2.9mm（帯筋有り）、2.7mm（帯筋有り）を

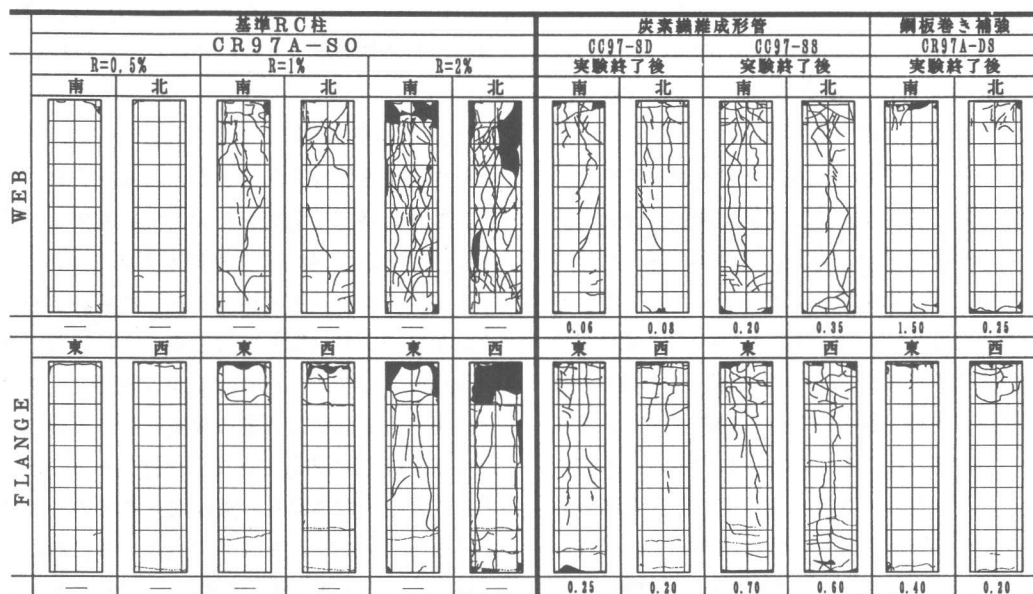
表-3 はらみ出し量の計算値と測定値の比較

試験体の側定位置			測定値 (mm)	計算値 (mm)	測定値/ 計算値
CC97-SD (帯筋有り)	Flange	中央部	4.90	3.01	1.63
	(A-C)	脚部	-	4.51	-
	Web	中央部	4.70	2.19	2.15
	(B-D)	脚部	6.60	3.29	1.89
CC97-SS (帯筋無し)	Flange	中央部	1.80	3.94	0.46
	(A-C)	脚部	4.70	6.06	0.78
	Web	中央部	2.40	4.03	0.60
	(B-D)	脚部	2.85	6.01	0.47

用いて計算した。2つの試験体でヤング係数と梁せいが若干異なるのは、CFRP管が工場製品ではなく、1つ1つ手作り（試作品）であることから生じる成形管のばらつきである。表-3より測定位置によっては、測定値が計算値の倍になっている。したがって、打設時にCFRP管にはらみ出し防止用の治具を取付けるなどの処置をし、はらみだし量の制御をすることは、今後の検討課題の1つである。

4. 加力実験と考察

実験は建研式加力装置を用いて、一定軸応力比下の正負繰り返し水平力加力実験を行った。水平加力の制御はひび割れが発生するまでは荷重制御により行い、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サイクルずつ正負繰り返しの変形制御で3%まで行った。ただし、水平耐力が急激に低下した場合などは加力途中でも実験を終了することにした。



注1) CFRP管及び鋼管巻き補強試験体は加力実験終了後、CFRP管や鋼板を剥いで観察したひび割れ図である。
注2) 数字は最大ひび割れ幅 (mm) を示す。

図-1 各試験体のひび割れ図

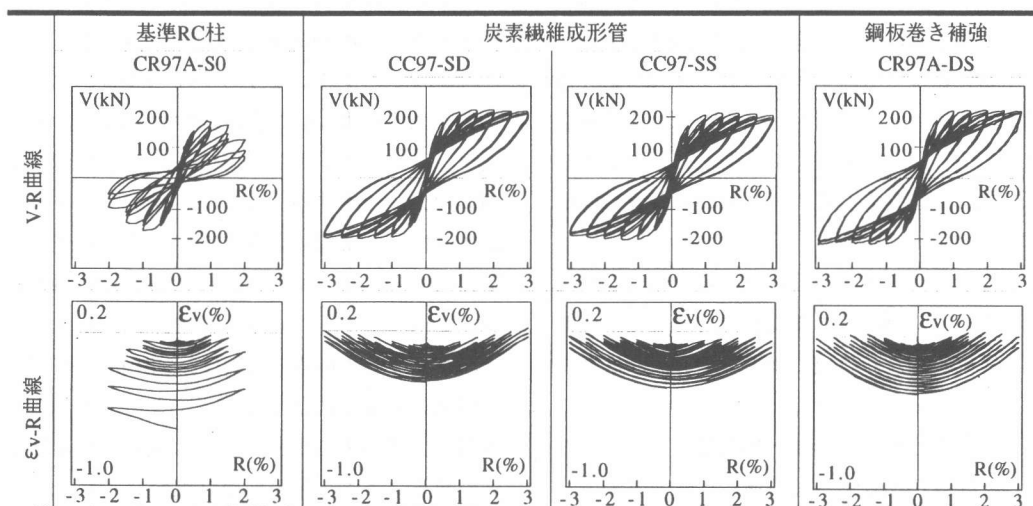


図-2 各試験体のV-R曲線と ϵ_v -R曲線（実験結果）

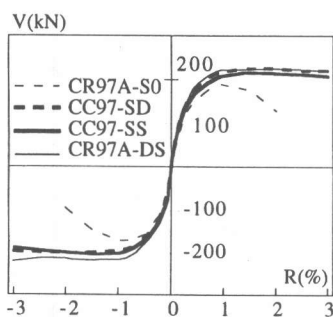


図-3 スケルトンカーブの比較 (実験結果)

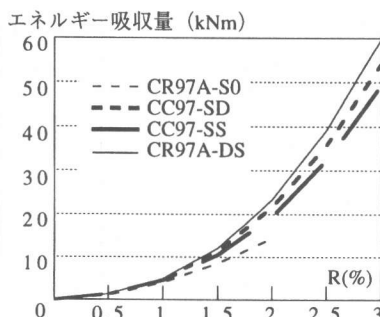


図-4 累積エネルギー吸収量の比較 (実験結果)

純粋なRC柱である基準試験体CR97A-S0の部材角 $R=0.5, 1$, そして2%時で、かつ実験終了後のひび割れ状況を図-1に示す。主筋に沿った付着割裂ひび割れが先行したせん断ひび割れの傾向を示している。この基準試験体は、 $R=1\%$ で最大水平耐力に達した後、部材角の増大に伴い水平耐力が急激に低下してきたので、 $R=2\%$ で加力実験を終了した。加力実験終了後、CFRP管や鋼板を剥いで観察したひび割れ図を残りの3試験体について図-1に示す。図-1より、帯筋無しのCFRP柱試験体CC97-SSのみが、主筋に沿ったひび割れが大きく生じており、主筋の付着すべりが一部生じた恐れがある。しかし、CFRP管または鋼板巻きで横補強した試験体は、図-2に示すように水平耐力の劣化がほとんど見られない。これは図-2に併記した ϵ_v - R 曲線をみても明らかである。基準試験体は水平繰返し回数が増大するにつれ、平均圧縮ひずみ ϵ_v が圧縮側に増大し、引張側におしもどすような現象はあまり見られない。このことは水平耐力の劣化、柱が活力を失いつつあることを意味しており、横補強した残りの3試験体とは対照的である。

このことの理解をさらに深めるために、図-3, 4を示す。図-2, 3より、基準試験体は曲げ降伏後のせん断破壊の様相を示し、ねばりに欠けた状態を示している。また、図-4から、この基準試験体のエネルギー吸収量は最低で、さらに試験体CC97-SS(帯筋無し)のエネルギー吸収量もやや少ない。これは前述したように、

図-2の履歴曲線では定量的に把握できなかったが、主筋の付着すべりの若干の影響が図-4では表現されたものと思われる。帯筋を配筋した残りの2試験体では、鋼板巻き試験体CR97A-DSが若干上回っているが、これはCFRP管より鋼板巻きが板としての面外曲げ剛

性が本試験体の場合大きいからだと思われる。

5. 理論的検討

断面の平面保持を仮定したfiberモデルによる柱試験体の弾塑性解析を行い、実験結果と比較する。そのためには、まず横拘束されたコンファインドコンクリートの構成則を求める必要がある。帯筋や鋼板に関しては従来から常用してきたMander⁹⁾や松村⁹⁾らの構成則を利用し、両者を併用する場合には両者の単純累加で求めてきた⁹⁾。CFRP管に関しては炭素繊維シートに関して定式化された川島らの構成則¹⁾をそのまま用いる。これらの式をCFRP管に適用するにあたっては、フープ方向に炭素繊維シートが5層巻きされ、かつエポキシ樹脂で成形管化されているが、エポキシ樹脂を無視して炭素繊維シートの5層巻きとして単純に取り扱う。かつ、計算断面は全試験体とも $250 \times 250\text{mm}$ の正方形とする。

コンファインドコンクリートの構成則に関する計算結果を図-5に示す。CFRP管で横拘束したコンファインドコンクリートに関しては、終局限界ひずみを考慮して、その初期剛性と水平強度は、計算上帯筋や鋼板のそれに比較すると小さい。またCFRP管による初期剛性がプレーンコンクリートの初期剛性より解析モデル上小さくなっている。これは、文献1)と4)による構成則の相異によるものであり、どちらの構成則が実験結果をより正確に表現しているかを検証することは、今後の検討課題である。

CFRP管が柱のせん断強度の増大に及ぼす効果

については、鋼板巻き補強と同様にトラス効果として組み入れる^{7,8)}。アーチ効果に用いるコンクリート強度に関しては、横拘束効果を考慮していないシリンダー強度 σ_b を用いるか、横拘束効果を考慮したコンファインドコンクリートの最大強度を用いるか議論の別れるところである。せん断破壊は通常歪みレベルが小さいところで起こる破壊現象である。しかし、この歪みレベルをクリアーしても本試験体の場合せん断破壊が生じないとすれば、横拘束効果によりせん断強

度が上昇したと見なすことも可能となる。したがって、このような場合にはアーチ効果にも横拘束作用によるコンクリート強度上昇効果を組み入れた方が望ましいと考えられるので、本計算ではこれを考慮した。fiberモデルを利用した解析の詳細については文献9)、10)を参照されたい。図-6~9より実験結果が計算結果でもほぼ裏づけられ、CFRP成形管で横補強することによりせん断耐力の増大とじん性の増大を確保できる見通しが得られた。ただし、CFRP管で横

補強した試験体のV-R曲線が途中で不連続箇所が生じている理由は、解析する柱断面の最外縁ひずみが図-5に示すように終局ひずみに達したからである。

本実験で用いたCFRP管は炭素繊維シートを5層巻いてあるので、炭素繊維量が多すぎるさらいがある。そこで、図-10は炭素繊維シートの巻き数に対するせん断耐力(日本建築学会式¹¹⁾)と曲げ耐力に関する計算結果の比較であり、試験体CC97-SS(帯筋無し)について示す。図-10より炭素繊維シート1, 2層巻きは、曲げ破壊先行が計算上保障されるが、横拘束効果が不十分なので曲げ圧壊し、じん性が不足している。一方、3, 5層巻きは若干じん性に違いがみられるが、そんなに差がない上にせん断耐力も十分確保されてるので、今回の試験体では3層巻きでも設計可能であると思われるが、これも今後の検討課題の一つである。

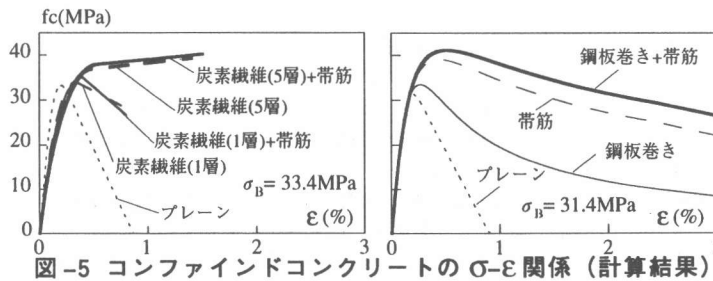


図-5 コンファインドコンクリートの σ - ϵ 関係(計算結果)

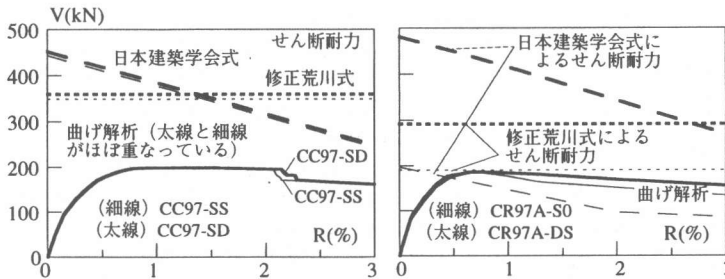


図-6 せん断耐力と曲げ耐力に関する計算結果の比較

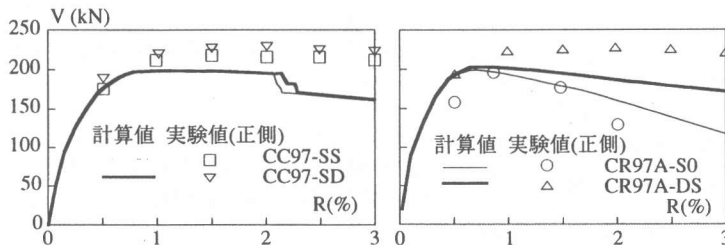


図-7 曲げ耐力に関する計算結果と実験結果の比較

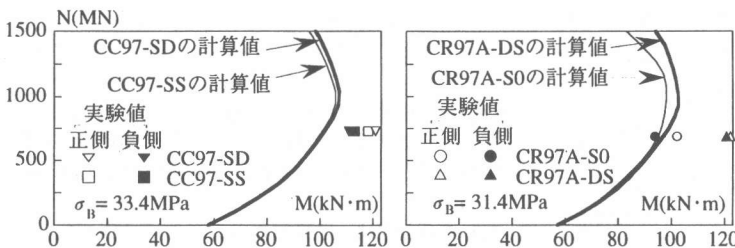


図-8 N-M 相関曲線に関する計算結果と実験結果の比較

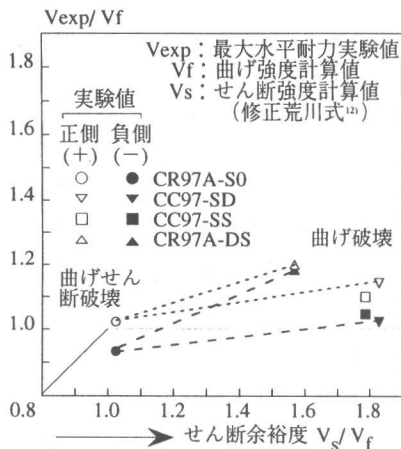


図-9 せん断余裕度と破壊モード

6. 結論

打込み型枠兼横補強材として CFRP 管を用いた合成柱の、一定軸力比 (0.35) 下の正負繰返し水平加力実験を行った。その結果、コンクリート打設時にフレッシュコンクリートの側圧による若干のはらみ出しが生じた。炭素繊維シートを 5 層巻いてエポキシ樹脂で固めただけの正形成形管のため、主筋の付着すべりや、じん性の低下が危惧されたが、耐震性能上期待以上の弾塑性挙動を示した。特に試験体 CC97-SS (帯筋なし) は、心配していた主筋の付着すべりがごく一部生じたようではあるが、V-R 曲線ではスリップ現象はみられず良いループを描がき、部材角 $R=3\%$ でも水平耐力の劣化がみられず、鋼板巻き補強と同等の結果が得られた。

したがって、今後炭素繊維やアラミド繊維で製作した成形管を打込み型枠兼横補強材として利用する立場から、正方形のみならず円形の成形管、又は成形膜の技術開発を行う必要がある。これらの成形管 (膜) で横拘束されたコンファインドコンクリートの構成則を検証するとともに、系統的な曲げせん断実験を行い、連続繊維成形管 (膜) とコンクリート及び主筋、さらには必要に応じて帯筋を基本に組み合わせた新しいハイブリッド部材の耐震設計法の確立に向けて、さらに研究を展開するに値することが今回のパイロット実験で明らかになった。

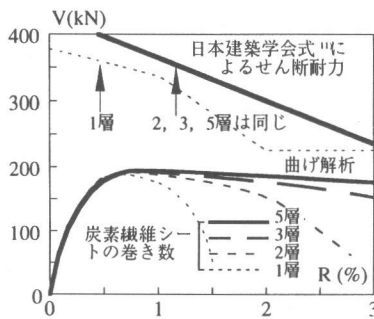


図-10 試験体 CC97-SS (帯筋無し) の炭素繊維シートの巻き数と耐力 (計算結果)

謝辞: CFRP 管は著者の 1 人である山川の提案により、新日鐵化学 (株) に急遽試作していただきました。CFRP 成形板の引張り試験は清水建設 (株) 技術研究所にお願いしたものであり、両社に対してここに厚くお礼を申し上げます。なお、本研究は琉球大学工学部環境建設工学科の宮城佳之君の 1997 年度の卒業研究である。

参考文献:

- 1) 細谷学, 川島一彦, 星隈順一: 炭素繊維シートで横拘束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
- 2) 東燃株式会社: トウシート工法技術資料, トウシート事業部, 1996.9
- 3) Seible, F., 他 4 名: The Carbon Shell System for Modular Short and Medium Span Bridges, International Composites EXPO'97, 1997.1
- 4) Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.144, No.8, pp.1804-1826, 1988
- 5) 松村弘道, 伊藤茂樹: 角型鋼管に充填されたコンクリートの圧縮強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C (熊本), pp.1627-1628, 1989.10
- 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) 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
- 8) 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, 日本コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1635-1640, 1997.6
- 9) 山川哲雄, 他 3 名: 電食試験により腐食した RC 柱の耐震性能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.16, No.1, pp.805-810, 1994.6
- 10) 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 (東海), pp.337-338, 1994.9
- 11) 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, pp.106-121, 1990.11
- 12) 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, 日本建築学会, pp.158-163, 1981.6