

論文 セメント系新材料を用いた横拘束柱の中心圧縮実験

永井 寛^{*1}・丸田 誠^{*2}・桜本 文敏^{*3}・閑田 徹志^{*4}

要旨:高靱性繊維補強セメント複合材料や比重 1.2 の超軽量コンクリートなどのセメント系新材料における一軸圧縮性状に及ぼす高強度横補強筋の拘束効果を把握するため、柱の中心圧縮実験を実施した。その結果、高靱性繊維補強セメント複合材料では普通コンクリートと同様に拘束効果による強度上昇が期待できるが、超軽量コンクリートでは期待できないこと等の軸圧縮性状に関する知見が得られた。

キーワード:高靱性繊維補強セメント複合材料, 超軽量コンクリート, 拘束効果

1. はじめに

近年、これまでのコンクリートに比べて、優れた材料特性を有する繊維補強コンクリートや、比重が非常に小さい超軽量コンクリート等のセメント系新材料が開発されている。筆者等は、ビニロン繊維を混入した高靱性繊維補強セメント複合材料(HPFRC) ¹⁾及び比重 1.2 の超軽量コンクリート(LWC) ²⁾の構造材適用に関する検討を進めている。HPFRC は 2%以上の引張ひずみ領域まで引張強度を保持できる高靱性のセメント系材料であり、高性能の構造部材が実現できる可能性がある。

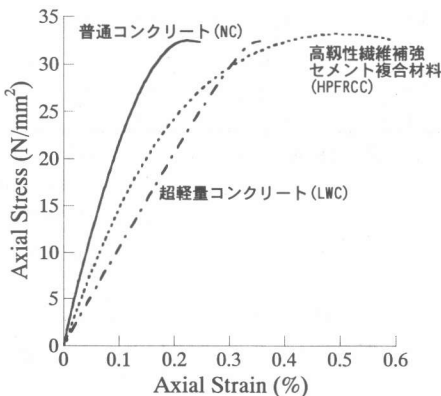


図-1 セメント系新材料の圧縮性状例

また、LWC は比重が普通コンクリート(NC) に比べて約半分程度であり、建物自重が低減できる可能性がある。

しかしながら、HPFRC や LWC の圧縮性状は、図-1 の圧縮応力-圧縮ひずみ関係図を示すように、弾性係数が NC に比べて HPFRC で約 2/3 程度、LWC で約 1/2 程度である事が報告されているものの、横補強筋を配したような柱部材における圧縮性状を報告した例は少なく、構造部材への適用のためには、力学的基礎性状を把握する必要がある。

そこで、本研究では、セメント系新材料の基礎性状把握の一環として、セメント系新材料を用いた柱の一軸圧縮性状に及ぼす高強度横補強筋の拘束効果を把握することを目的とした柱の一軸中心圧縮実験を実施した。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体の形状、寸法と代表的な配筋を図-2 に、試験体一覧を表-1 に示す。試験体は、1/3 程度の縮尺を想定し、断面 300mm 角、高さ 900mm とした 16 体である。実験因子はセ

*1 鹿島技術研究所建築技術研究部構造・耐震グループ主任研究員 工修 (正会員)
 *2 鹿島技術研究所建築技術研究部構造・耐震グループ主管研究員 博士 (工学) (正会員)
 *3 鹿島技術研究所建築技術研究部生産・材料グループグループ長 工修 (正会員)
 *4 鹿島技術研究所建築技術研究部生産・材料グループ主任研究員 Ph.D. (正会員)

メント系材料種別と横補強筋比である。材料種別としては、①ビニロン繊維を体積比で2%混入した高靱性繊維補強セメント複合材料(HPFRCC)、②超軽量骨材を用いた比重1.2の超軽量コンクリート(LWC)、③超軽量コンクリートにビニロン繊維を体積比で1.0%混入した超軽量繊維補強コンクリート(LWFC)、および、最大骨材径10mmの豆砂利を用いた普通コンクリート(NC)の計4種類である。本実験ではいずれも実験時の現場封緘養生においてFc30を目標として調合した。一方、横補強筋はD6-SD785の高強度鉄筋を溶接閉鎖型の角形及び丸形フープを組み合わせて用い、横補強筋比Pwを0%、0.6%、1.2%及び1.8%の4種類とした。なお、横補強筋の組み立て筋として、軸方向にD3鉄筋を4本配しているが、軸応力への影響はないものと考えている。

表-2及び表-3に本研究で使用した横補強筋及びコンクリートの機械的性質を示す。

2.2 加力及び計測方法

加力には5000kNアムスラー型圧縮試験機を用い、単調一軸圧縮荷重を行った。

変形は、図-3に示すように、試験体両端に幅150mmの鋼製計測治具を取付け、この治具間を計測した。鋼製治具は、同時にコンクリート剥落防止にも作用しているため、試験区間は治具間の600mmとした。

鉄筋ひずみは、図-2に示すように、高さ方向中央の丸フープおよび角フープについてひずみゲージにより計測した。

3. 実験結果

3.1 実験経過概要

横補強筋比Pw=1.2%の試験体についての最終破壊状況を図-4に、各試験体の軸応力度-軸ひずみ度関係を図-5に、最大強度と鉄筋降伏時の荷重を一覧として表-4に示す。

NC試験体は、最大強度まで

表-1 試験体一覧

試験体	材料種別	Fc	Pw(%)	比重
NC00	普通 コンクリート (NC)	30	0.0	約2.3
NC06			0.6	
NC12			1.2	
NC18			1.8	
HF00	高靱性繊維 補強セメント複 合材料 (HPFRCC)	30	0.0	約1.8
HF06			0.6	
HF12			1.2	
HF18			1.8	
LC00	超軽量 コンクリート (LWC)	30	0.0	約1.2
LC06			0.6	
LC12			1.2	
LC18			1.8	
LF00	超軽量 ビニロン繊維 コンクリート (LWFC)	30	0.0	約1.2
LF06			0.6	
LF12			1.2	
LF18			1.8	

表-2 横補強筋の機械的性質

種類	降伏点* (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (10 ⁵ N/mm ²)
D6-SD785	1089	1239	1.98

*降伏点は0.2%オフセット法による

表-3 コンクリートの機械的性質*

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (10 ⁴ N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
NC00, NC06 NC12, NC18	32.5	2.44	2.7
HF00	32.1	1.51	4.7
HF06	33.9	1.55	5.4
HF12	32.7	1.55	5.2
HF18	33.6	1.54	5.2
LC00	30.9	1.04	1.8
LC06	32.4	1.06	1.9
LC12	32.8	1.05	2.0
LC18	31.7	1.07	1.9
LF00	34.8	1.16	2.9
LF06	32.2	1.13	2.8
LF12	33.7	1.13	2.9
LF18	33.4	1.17	2.9

*いずれも現場封緘養生によるテスト-5の実験時の性質

$$\text{軸ひずみ } \varepsilon = \frac{\text{軸変形 } \delta(\text{mm})}{600(\text{mm})}$$

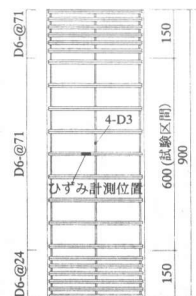


図-2 試験体形状・配筋

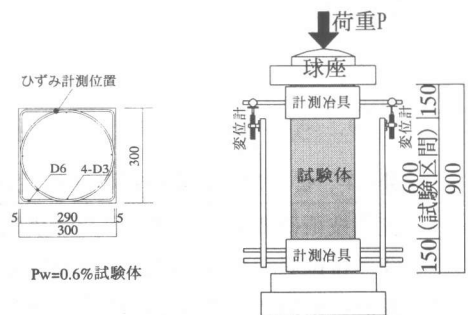


図-3 加力・計測状況

はコンクリートの剥落が少ないが、最大強度後に剥落が顕著になった。横補強筋比の増大に伴い、最大強度及び最大強度時ひずみが増大し、NC18($P_w=1.8\%$)では、最大強度時ひずみが4%を上回った。

HPFRCC 試験体は、加力終了までコンクリート剥落は非常に少なかった。NC 試験体と比べて、最大強度までの剛性は小さいが、横補強筋比の増大に伴い、最大強度及び最大強度時ひずみは増大した。最大強度時ひずみは、

表-4 実験結果一覧

試験体名	最大強度		丸形フープ降伏		角形フープ降伏	
	軸応力度 (N/mm^2)	軸歪度 (%)	軸応力度 (N/mm^2)	軸歪度 (%)	軸応力度 (N/mm^2)	軸歪度 (%)
NC00	31.1	0.29	—	—	—	—
NC06	30.9	0.79	29.2	1.27	13.6	2.27
NC12	42.8	2.55	39.9	3.18	24.9	2.88
NC18	54.5	4.34	53.7	4.77	54.5	4.41
HF00	31.6	0.49	—	—	—	—
HF06	36.7	0.72	29.2	1.71	29.5	1.67
HF12	39.7	3.57	39.7	3.51	39.3	4.43
HF18	49.2	8.95	45.6	5.81	—	—
LC00	25.9	0.39	—	—	—	—
LC06	27.0	0.45	—	—	—	—
LC12	28.1	0.42	—	—	—	—
LC18	28.2	0.42	—	—	—	—
LF00	27.0	0.35	—	—	—	—
LF06	28.5	0.36	20.1	1.94	19.7	2.96
LF12	27.6	0.39	—	—	—	—
LF18	29.4	0.39	27.9	12.32	—	—

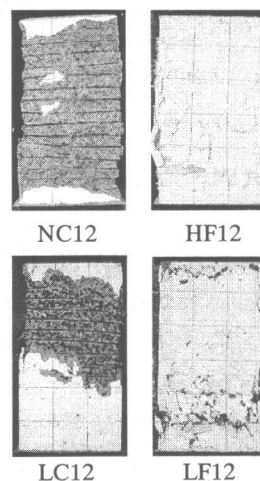
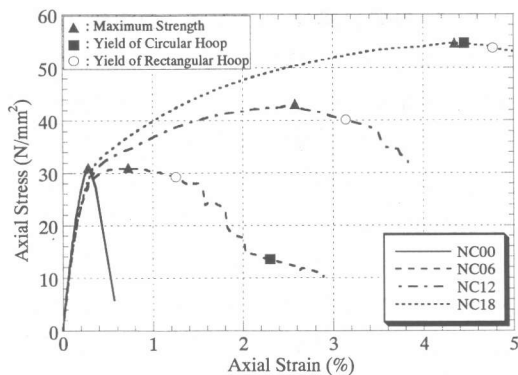
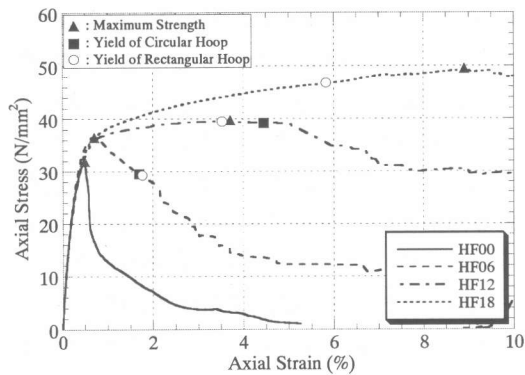


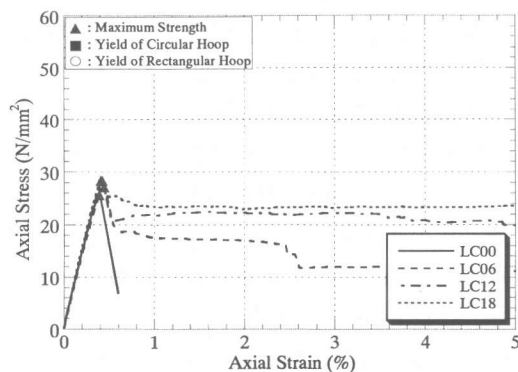
図-4 最終破壊状況



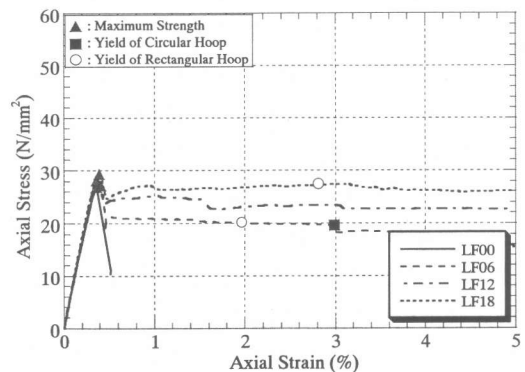
(a)NC 試験体



(b)HPFRCC 試験体



(c)LWC 試験体



(d)LWFC 試験体

図-5 軸応力度-軸ひずみ度関係

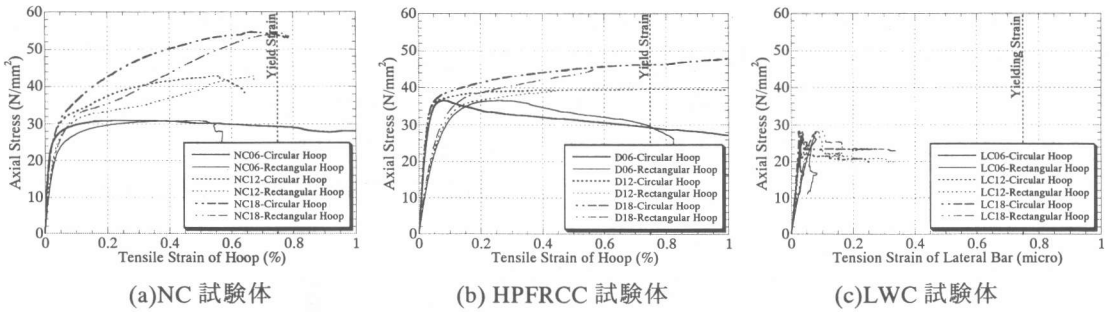


図-6 軸応力度-横補強筋ひずみ関係

NC 試験体に比べて非常に大きく、HF18 ($P_w=1.8\%$)では約9%であった。

LWC 試験体と LWFC 試験体は同様な実験経過を示し、軸ひずみ 0.4%程度の比較的小さいひずみにおいて最大強度に達した。その後、若干の耐力低下を示したが、横補強筋を有する試験体ではひずみが10%程度までほぼ一定の強度を保持した。最大強度は横補強筋比によらず同程度であるが、この最大強度後の保持強度は、横補強筋比が大きいほど高く、また、同横補強筋比であれば LWFC の方が高いものとなった。なお、一定強度を保持している間に LWC 試験体ではかぶりコンクリートの剥落が生じた。また、剥落後に、横補強筋とコンクリートが接する部分において軽量骨材が粉砕・剥落する現象が観察された。

3.2 軸応力度-横補強筋ひずみ度関係

図-6に、NC、HPRC、LWC 試験体の横補強筋ひずみ-軸応力度関係を示す。NC、HPRC 試験体では、同軸応力下におけるひずみは丸形フープより角形フープの方が大きく、 $P_w=0.6\%$ の試験体では横補強筋の降伏以前に最大強度に達したが、 $P_w=1.2\%$ 及び 1.8% の試験体では横補強筋の降伏近傍またはそれ以上のひずみで最大強度に達した。一方、LWC 試験体では、NC 及び HPRC 試験体に比べて、最大強度まで同様な性状を示すが、最大強度後のひずみ増分は非常に小さい。また、LWFC 試験体では LWC 試験体と同様な性状を示した。従って、軽量骨材を用いた場合に、ある程度までは横補強筋による拘

表-5 無筋試験体とシリンダーの比較

	最大強度 σ_{max}	最大強度時ひずみ ϵ_{max}
	シリンダー-強度 σ_p	シリンダー-強度時ひずみ ϵ_p
NC00	0.96	1.33
HF00	0.98	1.01
LC00	0.84	1.18
LF00	0.78	1.05

束効果が得られるが、軽量骨材が粉砕されてしまうため、横補強筋の応力がある一定応力以上伝達できないものと考えられる。

3.3 無筋試験体とシリンダーの強度

表-5に、現場封緘養生したシリンダー($\phi 100 \times 200\text{mm}$)による圧縮試験結果(表-3)を用いて、無筋試験体の実験結果を基準化した値の関係を示す。これより、NC 試験体及び HPRC 試験体では約1.0となり、無筋試験体とシリンダーの強度はほぼ一致した。一方、LWC 試験体及び LWFC 試験体では約0.8であり、超軽量骨材を用いた試験体はシリンダー強度より低くなった。この原因については、今後検討する必要がある。一方、シリンダーによる圧縮強度時ひずみに対する最大強度時ひずみの比は、1.0~1.3であった。

3.4 横補強筋比の影響

図-7に、シリンダーによる圧縮試験結果で各試験体の実験結果を基準化した値と横補強筋比の関係を示す。同図(a)は最大強度について、同図(b)は最大強度時ひずみについて示す。これより、横補強筋比の増大に伴い、NC 試験体及び HPRC 試験体は最大強度及び最大強度時ひずみが増大する傾向にあり、横補強筋による拘束効果が認められる。

HPFRCC 試験体の強度は、NC 試験体に対して $P_w=0.6\%$ では高くなっており、NC 試験体と同等以上の拘束効果が発揮されているが、 $P_w=1.2\%$ 及び 1.8% では若干低くなった。一方、最大強度時ひずみ比率は、全体的に NC 試験体の方が大きくなっているが、HPFRCC 試験体のシリンダーによる圧縮強度時ひずみは NC の 2 倍以上であり、最大強度時ひずみの絶対値は HPFRCC 試験体のほうが大きい。なお、LWC 試験体及び LWFC 試験体では、最大強度及び最大強度時ひずみともにほぼ一定の比率を示していることから、横補強筋の拘束効果による最大強度への影響は認められない。

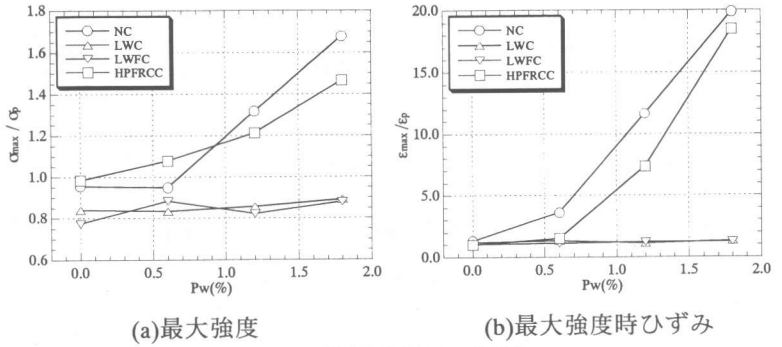


図-7 横補強筋比の影響

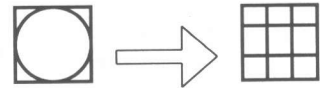
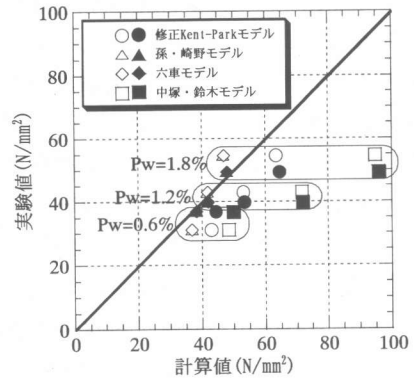


図-8 フープ筋の仮定



(白抜き：NC 試験体，黒塗り：HPFRCC 試験体)

図-9 最大強度の比較

4. 拘束効果に関する検討

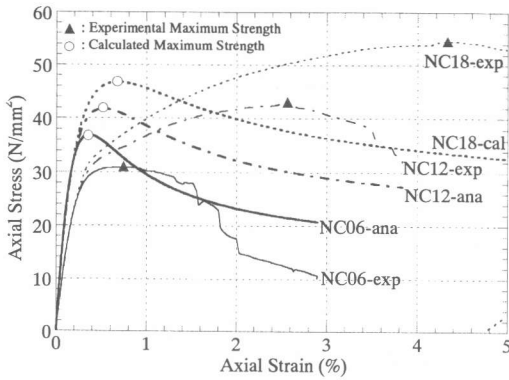
4.1 最大強度

ここでは、拘束効果による強度上昇が認められた NC 試験体及び HPFRCC 試験体について、既往の拘束コンクリートモデルとの比較を試みる。検討に用いる拘束コンクリートモデルとしては、NC を対象に提案された①孫・崎野モデル³⁾(NewRC モデル)、②修正 Kent-Park モデル⁴⁾、③六車モデル⁵⁾、④中塚・鈴木モデル⁶⁾とした。算定の際に、HPFRCC 試験体では、普通コンクリートとみなした。また、本実験のように丸形及び角形のフープを組み合わせている部材を対象にしたモデルは提案されていないが、丸田等⁷⁾により既往モデルへの適用検討がされており、本研究でも、図-8 に示すように、円形フープ筋を井桁の中子筋として仮定した。ただし、横補強筋体積の算定時には全体積を考慮した。なお、各モデルともに、適用範囲を超えて検討に用いている場合もあるが、ここでは無視した。

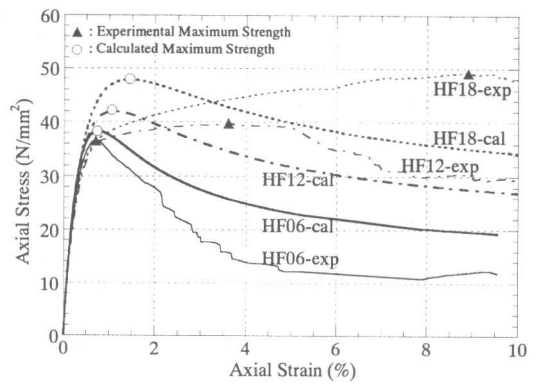
図-9 に、各モデルによる最大強度計算値と実験値との関係を示す。なお、図中白抜きが NC 試験体について、黒塗りが HPFRCC 試験体について示している。これより、修正 Kent-Park モデル及び中塚・鈴木モデルによる計算値は、いずれの材料の実験値に対しても過大に評価している。一方、孫・崎野モデル及び六車モデルによる計算値は実験値に対して、NC 試験体の横補強筋比 0.6% では若干高めに評価し、横補強筋比 1.8% では低めの評価となる。また、HPFRCC 試験体では、概ね実験値を評価できている。

4.2 コンクリート応力-ひずみモデル

図-10 に、既往の拘束コンクリートモデル



(a)NC 試験体



(b)HPFRCC 試験体

図-10 応力-ひずみ関係モデルの検討

のうち、最大強度との対応が良い孫・崎野モデルによる軸応力-軸ひずみ度関係計算値と、実験結果を合わせて示す。ここで、HPFRCCの計算において、最大強度時ひずみ及びヤング係数は、シリンダーによる試験結果を用いた。これより、どちらの材料においても、孫・崎野モデルによる計算結果は最大強度が発揮されるひずみを過小に評価しているため実験結果を推定できていない。この軸応力-軸ひずみ関係が評価できない理由としては、既往のモデルが、①最大強度時ひずみが1%を超える場合を取り扱っていない、②本実験のような高強度横補強筋と普通強度コンクリートの組み合わせを対象としていないこと等が考えられ、今後の検討課題である。

5. まとめ

横補強筋を配した場合のセメント系新材料の中心圧縮実験を実施し、以下の結論を得た。

- 1) HPFRCC 試験体は、NC 試験体と同様に横補強筋比の増大に伴い、横拘束柱の最大強度及び靱性は増大し、拘束効果を期待できる。
- 2) LWC 及び LWFC 試験体では、横拘束による最大強度への効果は見られないが、耐力低下後に10%程度の大変形まで一定の強度が保持され、その保持強度への影響が見られた。

- 3) NC 及び HPFRCC 試験体の最大強度は、孫・崎野モデルで概ね評価できるが、最大強度時ひずみは実験値に比べて過小評価しており、応力-ひずみ関係を評価できない。モデル化を含めた検討が今後の課題である。

参考文献

- 1) 関田徹志：高性能繊維補強セメント材料の設計技術の現状、コンクリート工学、Vol.38, No.6, pp.9-16, 2000.6
- 2) 桜本文敏、依田和久他：超軽量高強度コンクリートの開発（その1～5）、日本建築学会大会学術講演梗概集、1997～1998
- 3) 孫玉平他：高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の靱性改善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.15, No.2, pp.719-724, 1993
- 4) Kent, D. C. and Park, R. : Flexural Members with Confined Concrete, Proceedings ASCE, Vol.97, No, ST7, pp.1969-1990, July 1971
- 5) Muguruma, H. and Watanabe, F. : Ductility Improvement of High Strength Concrete Column with Lateral Reinforcement, High Strength Concrete, Second International Symposium, ACI SP-121, pp.47-60, 1990
- 6) 鈴木計夫、中塚佑他：角形横補強筋によるコンファインドコンクリートの拘束機構と強度、変形特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11, No.2, pp.449-454, 1989
- 7) 丸田誠、別所佐登志：高強度材料を使用したRC柱の中心圧縮実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.2, pp.665-670, 1994