

論文

[2120] コンファインド高強度コンクリートの中心圧縮性状に関する実験的研究

崎野健治*1・孫 玉平*2

1. はじめに

近年鉄筋コンクリート造建物の高層化にともない、材料が高強度化されている。このような傾向をさらに推進するプロジェクトとして、建設省を中心とした総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート構造物の超軽量・超高層化技術の開発」（委員長青山博之東大教授）がある。本研究はその一環として行われたもので、降伏点応力が 11300kg/cm² の高強度円形横補強筋の拘束効果を実験的に検討したものである（高強度鉄筋分科会主査森田司郎京大教授）。

円形横補強筋の拘束効果については、これまで多くの研究者によって実験的に検討されている。しかしながら、既往の研究は普通強度のコンクリートを用いた小型試験体によるものが多い。したがって、本論においては高強度コンクリートを用いた比較的大型の試験体の中心圧縮実験を行い、高強度円形横補強筋の拘束効果を検証するとともに、実験結果に基づきコンファインド高強度コンクリートの応力-ひずみ関係の提案を行った。

2. 試験体および実験方法

試験体は直径30.5cm（かぶりコンクリート無しの場合は25.5cm）の円形断面を有する全長75cmの柱で、主な実験変数は、かぶりコンクリートの有無、コンクリート強度、横補強筋量の3種類である。主筋量（公称直径13mmのD13を8本配筋）、主筋と横補強筋の強度を一定とした。横補強筋としてスパイラル筋ではなく円形帯筋を用いた。使用した高強度鉄筋の力学的性質を表1に、コンクリートの調合を表2に示す。試験体は各コンクリート強度シリーズにつき12体、計48体を計画した。12体の試験体の内6体は主筋および帯筋を配筋していない無筋コンクリート試験体で、実際の柱に用いられたコンクリートの強度（プレーンコンクリート強度と書く）とシリンダー試験により得られた圧縮強度との違いを調べるために行った。試験体の配筋詳細を図1に、試験体一覧を表3に示す。図1中の破線はかぶりコンクリートのない試験体の外

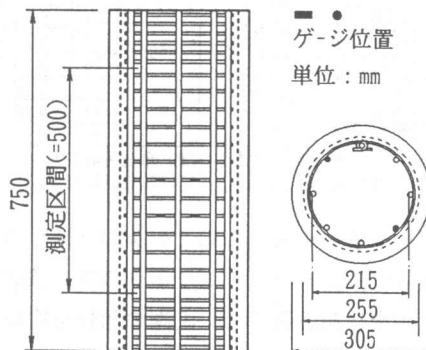


図1 試験体配筋詳細

表1 鉄筋の力学的性質

名称	D6	D13
断面積 (cm ²)	0.32	1.27
降伏点応力 (kg/cm ²)	11300 ¹⁾	6200 ¹⁾
ヤング係数 (kg/cm ²)	2.02 × 10 ⁶	1.84 × 10 ⁶
伸び (%)	9.99	12.3

1) 0.2%オフセット降伏強度

表2 コンクリート調合表

強度 (kg/cm ²)	単位水量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)	絶対重量 (kg/m ³)			スランフ* (cm)	Air (%)	
			セメント	細骨材	粗骨材 混和剤			
400	171	42.0	408	727	1146	1.02 ¹⁾	10.0	4.0
600	165	30.0	550	713	1080	11.0 ¹⁾	21.0	2.0
800	165	28.0	589	628	1111	15.3 ¹⁾	23.5	3.2
1200	145	20.3	616	584	971	109 ²⁾	28.0	1.3

1) 高性能A E減水剤（ボゾリスSP-9HS） 2) デンシットA D（比重2.30）

*1 九州大学教授 工学部建築学科，工博（正会員）

*2 九州大学助手 工学部建築学科，工博（正会員）

表3 試験体および実験結果一覧

試験体名	調査強度 FC	全断面面積 Ag ¹	コンクリートシリンダー		帯筋		最大耐力 (tonf)	単純累加耐力 ² (tonf)	コンファインドコンクリートの結果					
			強度 cσ _B	ヤング係数 (t/cm ²)	間隔 (mm)	体積比 (%)			cσ _{CB} ³ 実験値	歪み (%)	cσ _{CB}	Richart ⁴ cσ _{CB}	建研式 ⁵ cσ _{CB}	提案式 cσ _{CB}
CC20L	400	730 かぶりあり	323	255.2	20	2.74	391	261	727	4.35	2.25	816	881	848
CC40L					40	1.37	265	261	459	1.39	1.42	502	528	527
CC60L					60	0.91	241	261	381	0.71	1.18	398	411	421
CCOOL1~3		511 かぶりなし			—	0	174	200	238	0.17	0.74	—	—	—
CN20L					20	2.74	395	200	739	4.06	2.29	816	881	848
CN40L					40	1.37	265	200	457	1.61	1.42	502	528	527
CN60L					60	0.91	234	200	394	0.59	1.22	398	411	421
CNOOL1~3					—	0	107	140	246	0.19	0.76	—	—	—
CC20M					600	730 かぶりあり	523	305.6	20	2.74	477	383	971	1.83
CC40M	40	1.37	440	383					699	0.52	1.34	747	672	687
CC60M	60	0.91	348	383					609	0.47	1.16	643	555	581
CCOOM1~3	511 かぶりなし	—	0	383		325			525	0.21	1.00	—	—	—
CN20M		20	2.74	488		286			993	2.29	1.90	1061	1025	1008
CN40M		40	1.37	335		286			639	0.87	1.22	747	672	687
CN60M		60	0.91	325		286			598	0.43	1.14	643	555	581
CNOOM1~3		—	0	253		227			496	0.20	0.95	—	—	—
CC20MH		800	730 かぶりあり	875		422.9			20	2.74	665	599	1425	1.14
CC40MH	40				1.37		439	599	835	0.79	0.95	852	924	969
CC60MH	60				0.91		381	599	726	0.47	0.85	744	807	863
CCOOMH1~3	511 かぶりなし		—		0		430	543	589	0.15	0.67	—	—	—
CN20MH			20		2.74		594	435	1257	1.00	1.44	1166	1277	1289
CN40MH			40		1.37		412	435	826	0.72	0.94	852	924	969
CN60MH			60		0.91		382	435	755	0.44	0.87	744	807	863
CNOOMH1~3			—		0		299	380	585	0.15	0.67	—	—	—
CC20H			1200		730 かぶりあり		1343	456.6	20	2.74	989	886	—	—
CC40H	40	1.37		1055		886			—	—	—	1581	1259	1343
CC60H	60	0.91		1034		886			—	—	—	1477	1143	1237
CCOOH1~3	511 かぶりなし	—		0	995	833			1363	0.36	1.02	—	—	—
CN20H		20		2.74	743	635			1634	0.74	1.22	1895	1613	1664
CN40H		40		1.37	718	635			1570	0.39	1.17	1581	1259	1343
CN60H		60		0.91	753	635			1654	0.42	1.23	1477	1143	1237
CNOOH1~3		—		0	673	583			1317	0.33	0.98	—	—	—

注 1) 単位はcm²である 2) 単純累加耐力=0.85cσ_B(A_s-A_s) + ρ_sσ_yA_s 3) 無筋試験体の場合はブレンコンクリート強度を表す
4) Richart式: cσ_{CB}=0.85cσ_B+2.05ρ_sσ_yh(1-s/2Dc)² 5) 建研式: cσ_{CB}=0.72cσ_B+2.30ρ_sσ_yh(1-s/2Dc)²

径を示す。なお、本論でのかぶり厚さの定義は試験体表面から帯筋中心までの距離である。したがって、かぶりコンクリートのない試験体も製作上必要なかぶり8mmを有する。

載荷は単調載荷で、両端の回転を拘束した実験を行った。FC1200シリーズは2000 t 試験機を、他のシリーズは1000 t 試験機を使用して中心圧縮力を載荷した。柱中央部（検長50cm）におけるコンクリートの軸方向ひずみを参考文献1で述べた方法で測定した。また、主筋および帯筋のひずみを図1に示す位置に貼付したひずみゲージで測定した。

3. 実験結果

3.1 プレーンコンクリートの実験結果

各コンクリート強度シリーズ6体のプレーンコンクリートの平均的応力-ひずみ関係の実験結果を図2に示す。また、比較のためシリンダー試験により得られた応力-ひずみ関係も併せて図2に示す。FC800, FC1200シリーズにおいては、加力不良によって明らかに早期破壊したと思われる1体の試験体を除して平均した。

図2より分かるように、プレーンコンクリー

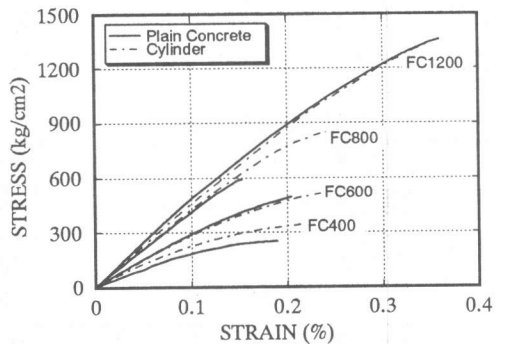


図2 プレーンコンクリートの応力-ひずみ関係

トの強度は、FC600、FC1400シリーズの場合はほぼシリンダー強度と等しいが、FC400とFC800シリーズの場合はACI規準に定められている0.85 σ_c より低い。この2シリーズの試験体は高強度コンクリートを使用しているにもかかわらず、いずれも軸方向変位が非常に小さい（軸方向ひずみが0.2%より小さい）段階で破壊した。この原因については、今後さらに検討する必要があると思われる。

3. 2 全荷重-軸方向ひずみ関係

帯筋で拘束された柱の主な実験結果を表3に示している。柱の全荷重-軸方向ひずみ関係の一例を帯筋の間隔（量）をパラメータに取り図3に示す。図中の実線と一点鎖線はそれぞれかぶりコンクリートのある試験体とかぶりコンクリートのない試験体の実験結果を表す。図3から分かるように、FC800級までの高強度コンクリートを用いた試験体の場合は帯筋の間隔を密にすることによってコンファインドコンク

リート柱の耐力のみならず、靱性も改善される。しかしながら、FC1200シリーズの場合は帯筋をもっとも密に配筋した試験体CC20HとCN20Hにのみ若干の靱性改善が見られたが、他の試験体では、帯筋がかぶりコンクリートの剥離によって解放されるエネルギーを吸収しきれない等の理由のため急激な破壊を生じた。このことはFC1200級の超高強度コンクリートの場合靱性の改善を期待するために体積比2.74%以上の帯筋を配筋する必要があることを示唆している。

3. 3 コンファインドコンクリートの軸方向応力-ひずみ関係

コンファインドコンクリートの軸方向応力は、全荷重より主筋の負担分を差し引いたコンクリート負担軸力をコンクリートの断面積で除して求めた。ただし、断面積は、かぶりコンクリートが剥離し始める時点のひずみ（0.2%）以前は全断面積を取るが、かぶりコンクリートが完全に剥離したときのひずみ（0.4%）以後はコアコンクリートの断面積を取った。この間のひずみに対応する応力は曲線補間法で求めた [1]。図4にコンファインドコンクリートの軸方向応力-ひずみ関係を、帯筋の間隔をパラメータに取り示す。なお、FC1200シリーズのかぶりコンクリートのある試験体については、帯筋をもっとも密に配筋した試験体CC20Hをのぞき、かぶりコンクリートの破壊と同時に全体破壊が生じたため、コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係の実験結果は得られなかった。

図4から、FC800までの試験体の場合は、コンファインドコンクリートの強度増加および靱性改善が帯筋量の増加に伴い顕著になること、またかぶりコンクリートの有無がコンファインドコンクリートの中心圧縮性状に及ぼす影響があまり見られないことなどが分かる。一方、FC1200シリーズでは、かぶりコンクリートのない試験体の場合、帯筋の拘束効果は強度に関しては（帯筋の量にあまり関係ない形で）現れているが、靱性改善については（実験に用いた試験機の剛性不足のため）不明である。

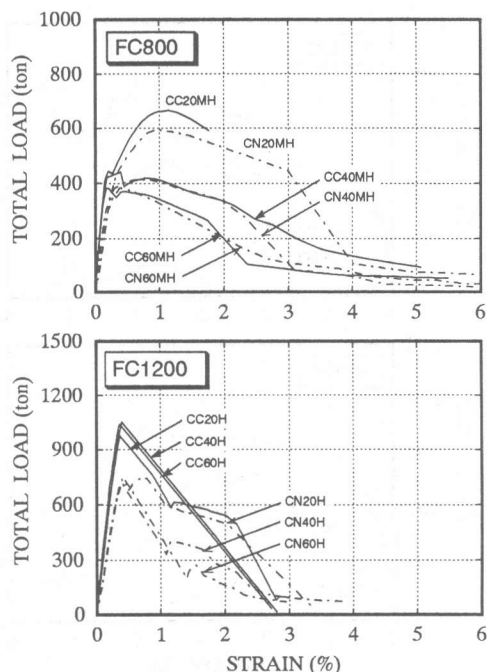


図3 全荷重-軸方向ひずみ関係

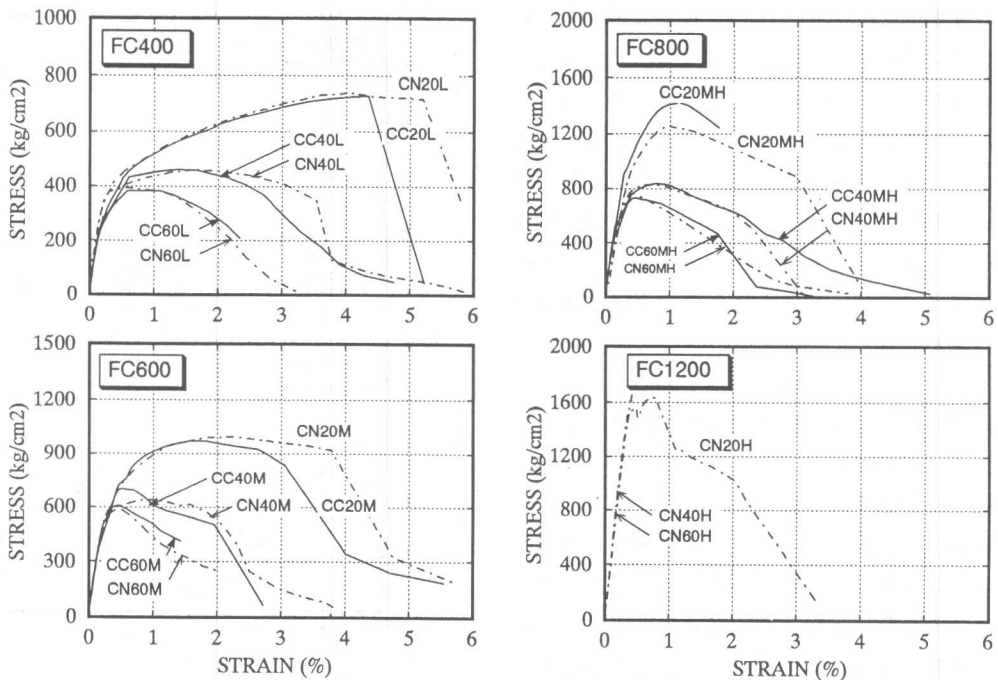


図4 コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係

4. 実験結果の考察

4. 1 コンファインドコンクリートの強度

コンファインドコンクリートの強度の実験値と諸計算値を表3に示す。諸計算値のうち提案式による計算値は、式(1)を用いて算定した。

$$c\sigma_{cB} = \sigma_p + 4.18\sigma_{re} = 0.8c\sigma_B + 4.18 \left[\frac{1}{2} \rho_h \sigma_{hy} \left(1 - \frac{s}{2D_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ここで、 σ_p : プレーンコンクリート強度、 $c\sigma_B$: コンクリートのシリンダー強度、 ρ_h : 帯筋の体積比、 σ_{hy} : 帯筋の降伏点応力、 s : 帯筋の間隔、 D_c : 帯筋の中心間距離、 σ_{re} : 側圧係数。

式(1)は直径が20cm以上を有する試験体に関する既往の実験結果[2, 3]と今回の実験結果に対して回帰分析を行って得たコンファインドコンクリート強度の実験式である(図5参照)。また、比較のため表3にはRichart式[2]および建研式[3]で求めた計算値も示している。ただし、Richart式を用いる際に帯筋の間隔による影響を $(1-s/2D_c)^2$ の形で考慮にいたしたものを使用した。実験値と諸提案式で求めた計算値との比較を図6に示す。図6から分かるように提案式は諸式とほぼ同じ精度で実験結果を良く評価している。

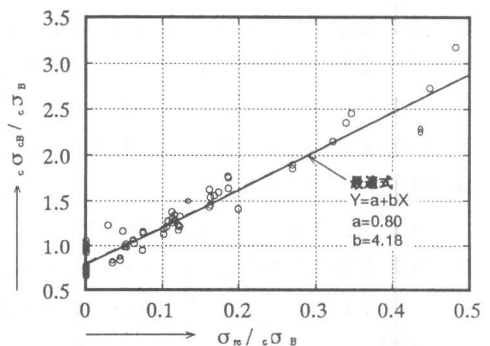


図5 $c\sigma_{cB} - \sigma_{re}$ 関係

4. 2 コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係

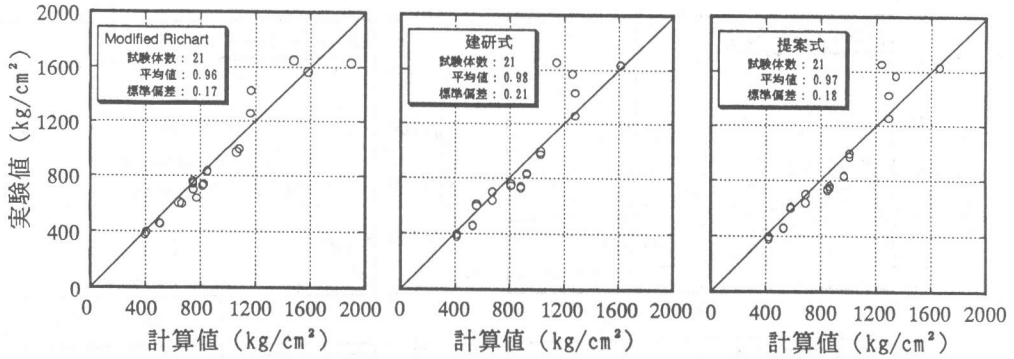


図6 コンファインドコンクリート強度の比較

高強度コンクリートを含めたコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係式として、本論においては(2)式を用いることを提案する。

$$\frac{\sigma_c}{c\sigma_{cB}} = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2} \quad (2)$$

$$X = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}, \quad A = \frac{E_c \epsilon_{co}}{c\sigma_{cB}}, \quad K = \frac{c\sigma_{cB}}{c\sigma_B}$$

$$D = 1.50 - 0.00168c\sigma_B + 0.25\sqrt{\frac{(K-1)c\sigma_B}{23}}$$

式中の $c\sigma_{cB}$ は式(1)で、 E_c は Martinez の提案式 [5] で求める。また、他の記号の持つ意味については文献4を参照されたい。式(2)は、著者らが直線型帯筋により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係式として構成した実験式 [1] で、コンファインドコンクリート強度の算定式に式(1)を用いる以外は、円形帯筋の場合にそのまま適用したものである。式(2)および Mander 式 [6] で求めた計算結果と実験結果との比較を図7に示す。Mander 式はコンファインドコンクリートの強度と応力-ひずみ関係の強度後の下り勾配域を全般的に過大評価している傾向が見られる。これに対して式(2)は、初期剛性や応力-ひずみ関係の全体に対して良く対応している。

5. まとめ

以上の研究より FC800級までのコンファインドコンクリートの強度の増加および靱性の改善は帯筋間隔が密になるにつれて伴い顕著になる

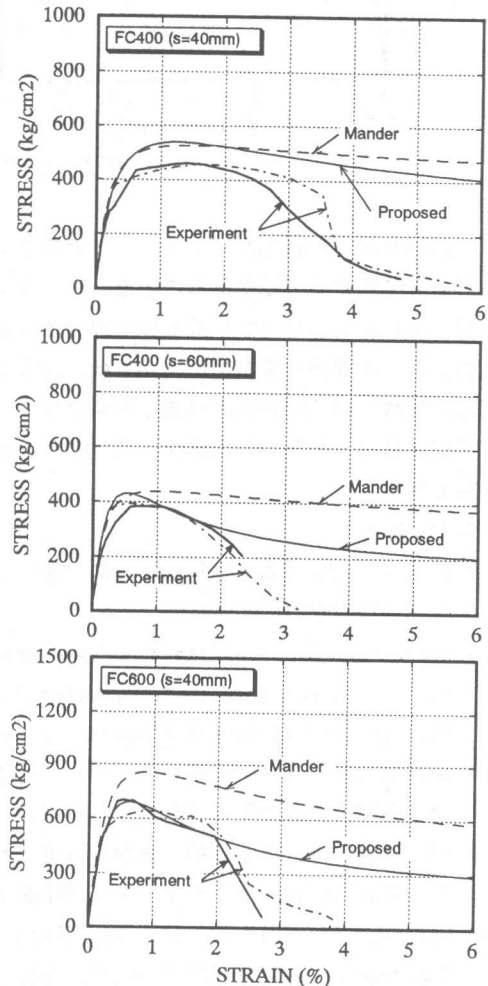


図7 応力-ひずみ関係の比較

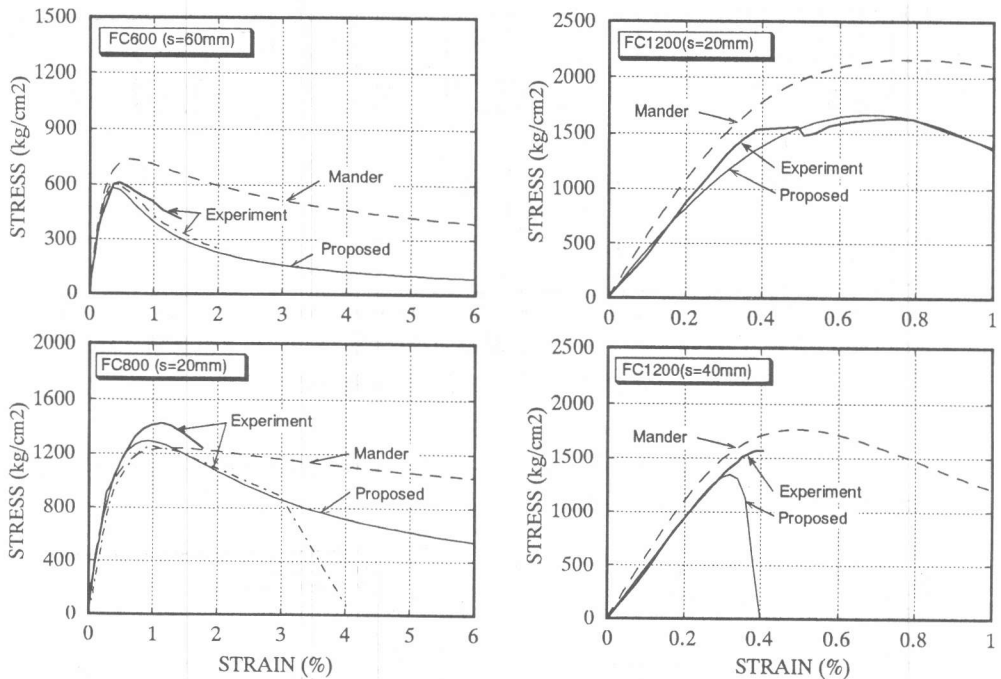


図7 応力-ひずみ関係の比較 (続き)

が、FC1200級の超高強度コンクリートの場合には韌性の改善を期待するためには体積比2.74%以上の帯筋を配筋する必要があることと、コンファインドコンクリートの強度および応力-ひずみ関係が(1)式および(2)式で良く評価できることが明らかになった。

[謝辞] 本実験の実施にあたっては、建設省建築研究所の1000ton 試験機および東京大学大型構造物実験室の2000ton 試験機を使用させていただいた。ここに深く感謝します。また九州大学文部技官藤原文夫氏、川口晃氏、久島昭久氏および光山裕朗氏(現福岡市役所)の多大な協力に感謝します。

[参考文献]

- 1) 孫玉平：直線型横補強材により拘束された鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状，九州大学学位論文，1992年3月
- 2) Richart, F.E., Brandtzaeg, A. and Brown, R.L., "The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression," Bulletin No. 190, University of Illinois, Engineering Experiment Station, Urbana, April 1929.
- 3) 葉研地彰他：高強度鉄筋コンクリート円柱の中心圧縮性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)，1992.8
- 4) 崎野健治，孫玉平：高軸力を受ける正方形鋼管横補強RC柱の繰返し曲げせん断性状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. 14, No. 2, pp. 319-324, 1992
- 5) Martinez, S., Nilson, A.h. and Slate, F.O., "Spirally Reinforced High-Strength Concrete Columns," ACI Journal, Vol. 81, No. 35, pp.431-442, Sept.-Oct. 1984
- 6) Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," Proc., ASCE, Vol.114, No.ST8, pp.1804-1826, August 1988