

論文

[2121] 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

孫 玉平*1・崎野健治*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の高強度直線型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)。さらに、実験結果に基づき直線型横補強筋により拘束された高強度コンクリートの応力-ひずみ関係の提案も行った。

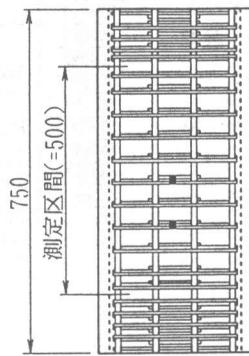


図1 試験体の配筋詳細

● ● ゲージ位置
単位: mm

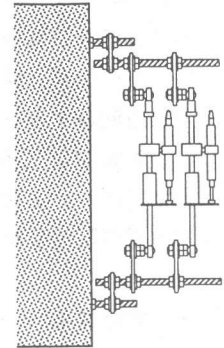
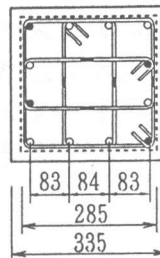


図2 測定方法

2. 試験体および実験方法

柱の変動因子は、かぶりコンクリートの有無、コンクリートの圧縮強度(設計基準強度400, 600, 1200kg/cm²の3種類)および横補強筋の量(体積比で 4.44, 2.22, 1.37%の3種類)とした。柱の高さ(750mm), 主筋量(公称直径 13mmのD13を12本配筋), 主筋と横補強筋の降伏強度(それぞれ 6200と11300kg/cm²)を一定とした。横補強筋として囲型帯筋を用いた。試験体は各コンクリート強度シリーズにつき12体, 計36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(プレオ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1に示す。図1中の破線はかぶりコンクリート

表1 試験体一覧

試験体名	調査強度 FC	全断面積 Ag (cm ²)	コンクリートシリンダー強度 σ_{cs}	ヤング係数 (t/cm ²)	間隔 (mm)	帯筋体積比 ρ_n (%)				
SC25L	400	1122 (カブリあり)	323	255.2	25	4.44				
SC50L					50	2.22				
SC80L					80	1.39				
SC00L1~3					-	0				
SN25L					812 (カブリなし)	25	4.44			
SN50L						50	2.22			
SN80L		80				1.39				
SN00L1~3		-				0				
SC25M		600				1122 (カブリあり)	523	305.6	25	4.44
SC50M									50	2.22
SC80M					80				1.39	
SC00M1~3					-				0	
SN25M	812 (カブリなし)		25	4.44						
SN50M			50	2.22						
SN80M			80	1.39						
SN00M1~3			-	0						
SC25H			1200	1122 (カブリあり)	1343	456.6			25	4.44
SC50H									50	2.22
SC80H	80								1.39	
SC00H1~3	-								0	
SN25H	812 (カブリなし)	25					4.44			
SN50H		50					2.22			
SN80H		80		1.39						
SN00H1~3		-		0						

*1 九州大学助手 工学部建築学科, 工博(正会員)

*2 九州大学教授 工学部建築学科, 工博(正会員)

のない試験体の外幅を示す。なお、本論でのかぶり厚さの定義は試験体表面から外周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て行った。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試験体に埋め込んだ金具に取り付けた変位計（各面2個、計8個）で測定した（図2参照）。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のプレーンコンクリート柱の強度の実験結果を表2に示す。実験値は各試験体の最大耐力を断面積で割って求めた。FC1200シリーズの場合では、超高強度コンクリートの脆性破壊に伴う爆発音および振動が公害をもたらすため、外幅335mmの試験体SC00H1～SC00H3および外幅285mmの試験体SN00H3については最大荷重に達する前に除荷した。そのため、それらの試験体の強度に関する実験値は得られていない。

表2より分かるように、プレーンコンクリートの強度は、FC400シリーズの場合はACI規準に定められている $0.85\sigma_B$ よりも若干低いが、FC600、FC1200シリーズの場合はシリンダー試験で得られた圧縮強度との比が $0.85\sim 1.04$ で、平均値は 0.95 となっている。

3.2 全荷重-軸方向ひずみ関係

表2 プレーンコンクリートの実験結果

試験体名	断面積 (cm ²)	最大耐力 (ton)	σ_p (kg/cm ²)	$c\sigma_B$ (kg/cm ²)	$\sigma_p / c\sigma_B$
SC00L1	1122	275	245	323	0.76
SC00L2		296	264	323	0.82
SC00L3		285	254	323	0.79
SN00L1	812	217	267	323	0.83
SN00L2		209	257	323	0.80
SN00L3		216.5	267	323	0.83
SC00M1	1122	548	488	523	0.93
SC00M2		545	486	523	0.93
SC00M3		539	480	523	0.92
SN00M1	812	442	544	523	1.04
SN00M2		387	477	523	0.91
SN00M3		426	525	523	1.00
SN00H1	812	1064	1310	1343	0.98
SN00H2		921	1134	1343	0.85

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

表3 コンファインド鉄筋コンクリート柱の実験結果一覧

試験体名	$c\sigma_B^1$	初期剛性 ($\times 10^5$ kg/cm ²)	最大耐力 (tonf)	単純 累加耐力 ³ (tonf)	コンファインドコンクリートの結果								
					$c\sigma_{CB}^1$ 実験値	歪み (%)	修正 Park式		Sheikh式		提案式		
							$c\sigma_{CB}^1$	比率 ²	$c\sigma_{CB}^1$	比率 ²	$c\sigma_{CB}^1$	比率 ²	
SC25L	323	—	583	398	—	—	—	—	—	—	—	—	
SC50L	323	2.34	434	398	466	1.97	573	0.81	515	0.90	510	0.91	
SC80L	323	2.48	385	398	394	0.44	472	0.83	436	0.90	426	0.92	
SN25L	323	1.71	574	313	651	3.64	825	0.79	651	1.00	719	0.91	
SN50L	323	1.79	421	313	448	1.81	573	0.78	515	0.87	510	0.88	
SN80L	323	2.02	380	313	399	0.93	472	0.85	436	0.92	426	0.94	
SC25M	523	4.35	740	586	900	1.63	1025	0.88	821	1.10	919	0.98	
SC50M	523	2.97	660	586	687	0.84	774	0.89	685	1.00	711	0.97	
SC80M	523	2.78	593	586	654	0.49	680	0.96	612	1.07	634	1.03	
SN25M	523	2.34	781	449	951	2.52	1025	0.93	821	1.16	919	1.03	
SN50M	523	2.11	563	449	656	0.93	774	0.85	685	0.96	711	0.92	
SN80M	523	2.61	525	449	606	0.38	680	0.89	612	0.99	634	0.96	
SC25H	1343	4.86	1261	1358	1521	0.72	1845	0.82	1518	1.00	1739	0.87	
SC50H	1343	5.33	1325	1358	—	—	—	—	—	—	—	—	
SC80H	1343	4.73	1311	1358	—	—	—	—	—	—	—	—	
SN25H	1343	3.10	1204	1004	1562	0.65	1845	0.85	1518	1.03	1739	0.90	
SN50H	1343	2.74	1163	1004	1505	0.42	1594	0.94	1382	1.09	1531	0.98	
SN80H	1343	3.29	1177	1004	1525	0.41	1500	1.02	1301	1.17	1453	1.05	
注 1) 応力の単位はkg/cm ² である		2) 比率=実験値/計算値		平均値		0.87	平均値		1.01	平均値		0.96	
3) 単純累加耐力 ³ = $0.85c\sigma_B(A_s-A_s)$ + σ_pA_s		標準偏差		0.27	標準偏差		0.15	標準偏差		0.12	標準偏差		0.12

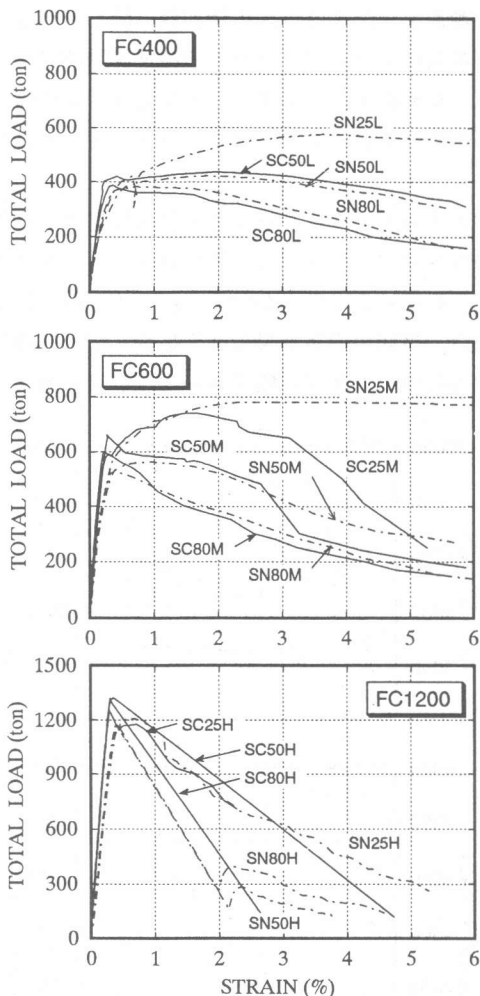


図3 全荷重-軸方向ひずみ関係

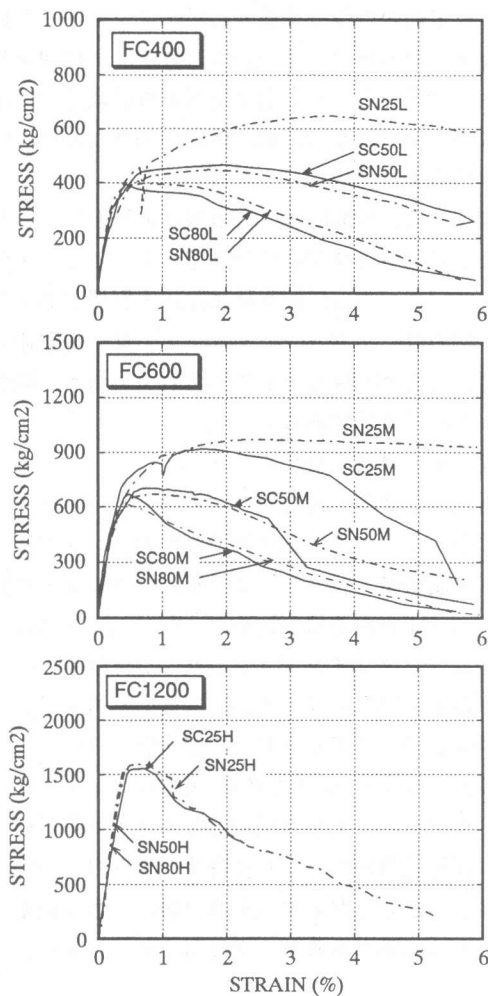


図4 コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係

帯筋で拘束された柱の主な実験結果を表3に示す。柱の全荷重-軸方向ひずみ関係を、コンクリート強度別に帯筋の間隔(量)をパラメーターに取り、図3に示す。試験体 SC25Lは測定装置不調のため信頼できる軸方向変位のデータが得られなかったため図中に示されていない。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、FC600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鉄筋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 SC25HとSN25Hのみに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靱性を確保するには帯筋の補強レベル ($0.5\rho_n\sigma_{ny}/\sigma_B$) を0.19以上と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実験結果

コンファインドコンクリートの軸方向応力-ひずみ関係の実験結果を図4に示す。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。断面積はSheikhの手法 [1]で求めた。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 SC25H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、試験体SC50HとSC80Hについては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、FC600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。

3. 4 帯筋のひずみ

帯筋のひずみ-軸方向ひずみ関係の一例を図5に示す。すべての試験体で、かぶりコンクリートの圧壊後（軸方向ひずみが約0.4%になる時）帯筋のひずみが急増し始める。FC400とFC600の場合はコンファインドコンクリートが強度（応力-ひずみ関係のピーク点）に達する時中子筋が降伏ひずみに達したが、周辺帯筋は降伏域に入っていなかった。FC1200の場合はコンファインドコンクリートが強度に達する時点で中子筋および周辺帯筋のひずみは降伏ひずみの約30%程度しか生じておらず、それ以後は急激に破壊したため信頼できるデータは得られていない。

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。実験値はシリンダー強度に対し、FC400の試験体では22%増~102%増で、FC600の試験体では16%増~82%増で、FC1200の試験体では12%増~16%増である。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。

$$\sigma_{cB} = \sigma_B + 11.5\rho_h\sigma_{hy}\left(\frac{d}{C}\right)\left(1 - \frac{s}{2D_c}\right) \quad (1)$$

ここで、 σ_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、 d :帯筋の公称直径、 C :帯筋の横支持長さ[1]、 s :帯筋の間隔、 D_c :周辺帯筋の中心間距離。

式(1)は、著者らが直線型横補強筋により拘束されたコンファインドコンクリートの強度式として提案した [2]のもので、式中の実験定数11.5は著者らによって行われた正方形鋼管で拘束されたコンクリートの中心圧縮 [3]の実験結果に基づいて定めたものである。また、比較のため既

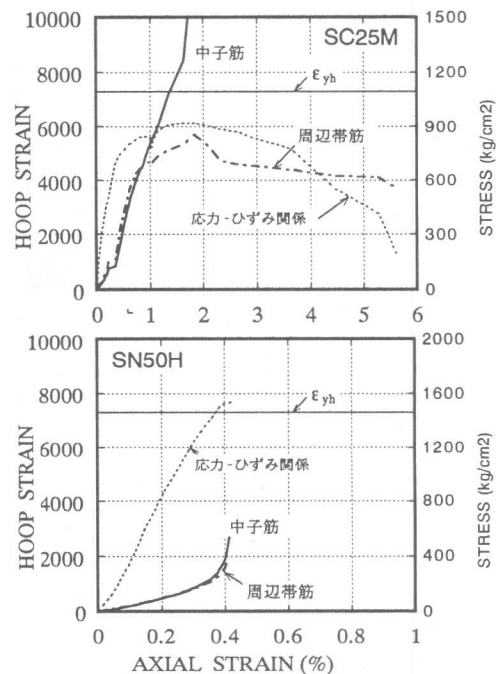


図5 帯筋ひずみ-軸方向ひずみ関係

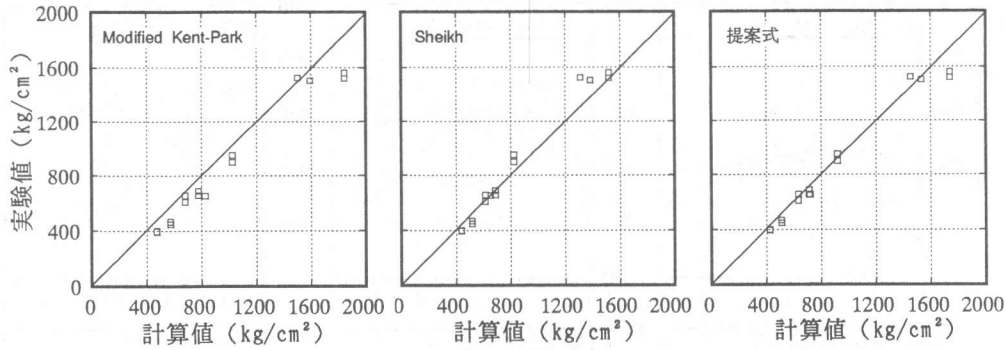


図6 コンファインドコンクリート強度の比較

往の諸提案式のうち修正Kent・Park式[4]およびSheikh式[1]で求めた計算値も表3に示している。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。表3および図6から分かるように、修正Kent・Park式による計算値は実験値を過大評価しているのに対して、提案式はSheikh式とほぼ同じ精度で実験結果を良く評価している。ただし、式(1)はSheikh式より表現が簡単である上に、帯筋横補強の極限状態にあたる正方形鋼管横補強の場合でも実験結果をよく評価できる[3]ことから、汎用性の高い式と言える。

4.2 コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係

コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係の実験値と計算値との比較を図7に示す。計算値は、式(2)を用いて求めたものとSheikhらの提案式[1]で求めたものである。

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

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

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

$$\gamma = 0.25 \quad \text{帯筋横補強}, \quad \gamma = 0.75 \quad \text{鋼管横補強}$$

式(2)式は、著者らが(正方形鋼管を含む)直線型横補強筋により拘束され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構成した実験式である[2,3], 式中の他の記号の持つ意味については文献3を参照されたい。式(2)とSheikh式で求めた計算結果と実験結果との比較を図7に示す。図7から分かるように、Sheikh式はコンファインドコンクリートの強度と応力-ひずみ関係のピーク点後の下り勾配域を良く評価しているが、応力-ひずみ関係のピーク点までの部分をFC400の場合は過大評価、FC1200の場合は過小評価するような現象が見られる。これに対して式(2)は、FC1200の試験体の場合でも、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。ただし、FC1200の試験体の下り勾配域に対しては、実験結果が得られなかったため、この結論については今後さらに検討する必要があると思われる。

5. まとめ

シリンダー強度が323kg/cm²~1343kg/cm²のコンクリートを、降伏点応力が11300kg/cm²の高強度帯筋で横補強した比較的大型の鉄筋コンクリート短柱および無筋コンクリート短柱36体の中心

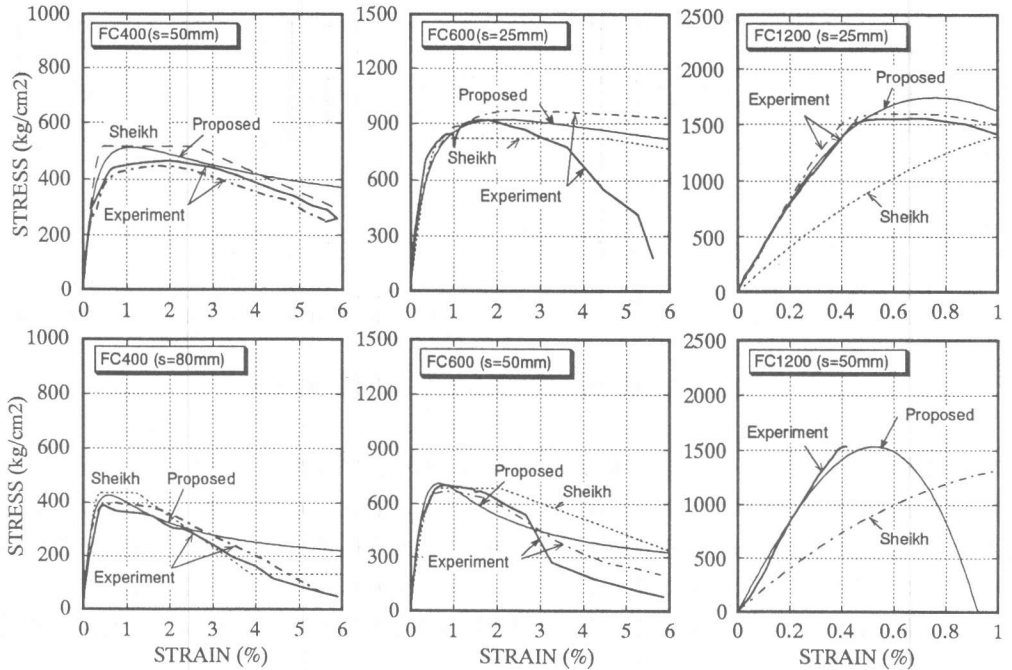


図7 コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係の比較

圧縮実験を行い以下の知見を得た。

1) FC600 級までのコンファインド高強度コンクリートの強度の増加および靱性の改善は帯筋量の増加に伴い顕著になる。FC1200級の超高強度コンクリートの場合は靱性の改善を期待するためには帯筋の補強レベル ($0.5 \rho_h \sigma_{hy} / c \sigma_c$) を0.19以上とする必要がある。

2) 直線型横補強筋により拘束されたコンファインド高強度コンクリートの強度および応力-ひずみ関係は式(1)および式(2)で比較的良く評価できる。

[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) Sheikh, S.A., et al., "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns," Proceedings, ASCE, V.106, ST 5, pp. 1079-1102, May 1980
- 2) 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
- 3) 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
- 4) Scott, B.D., et al., "Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates," ACI Journal, Proceedings, Vol. 79, No. 1, pp.13-27, Jan.-Feb. 1982