

論文

[2074] 横補強筋の配筋形式がコンクリートの圧縮性状に及ぼす影響について

孫 玉平*1・崎野健治*2・渡辺慶一*3・田 福勝*4

1. はじめに

鉄筋コンクリート純ラーメン構造物は、通常、靱性に富む全体曲げ降伏機構を想定して耐震設計されることが望ましいとされているが、その場合に、部材の塑性ヒンジ領域に十分な塑性変形能力を保有することが保証されなければならない。梁・柱部材の変形能力を高める手法としては、主筋と直交して配筋される鉄筋（横補強筋と呼ぶ）により横補強する方法が有効であることが知られている。建築学会の終局強度型耐震設計指針には、横補強筋の配筋形式、間隔等の詳細設計によって、曲げまたは曲げと軸力を受ける部材のヒンジ部の塑性変形能力を間接的に保証している。一方、より直接的に柱・梁部材のヒンジ領域の塑性変形能力を保証・確認するには、部材断面の曲げ解析に必要なコンクリート、特に横補強筋により拘束されたコンクリート（以下コンファインドコンクリートと書く）の応力-ひずみ関係を適切に決定することが重要である。

本研究では、降伏点が約10000kgf/cm²級の高強度横補強筋により拘束された高強度コンクリート（設計強度 FC=600kgf/cm²）短柱の中心圧縮実験を行い、横補強筋の量その他、横補強筋の配筋形式および太さ（直径）がコンファインドコンクリートの圧縮応力-ひずみ関係に及ぼす影響を実験的に調べた。また、著者らが提案した、横補強筋の配筋形式および直径等の影響を考慮にいられたコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係式の適応性についての検討も行った。

2. 実験概要

試験体は 200x200x500mmの正方形断面短柱である。コンクリートの圧縮強度（設計基準強度が600kg/cm²）、主筋量（D13異形鉄筋を8本配筋、主筋比が2.54%）、鋼材の降伏強度を一定とした。試験体の実験変数は、横補強筋の量（体積比で表す）、配筋形式および横補強筋の直径の3種類である。横補強筋には、直径が6mmの高強度異形鉄筋D6と直径が10mmの高強度異形鉄筋D10を使用した。横補強筋端部の定着は 135度フックで、余長を直径の8倍を取った。使用した高強度横補強筋と普通強度の主筋の力学的性質を表1に、引張応力-ひずみ関係の実験結果を図1に示す。

計12体の鉄筋コンクリート柱は、使用した横補強筋の直径によってD6シリーズとD10シ

表1 鋼材の力学的性質

名称	HD6	HD10	D13
断面積 (cm ²)	0.32	0.71	1.27
降伏点 (kgf/cm ²)	10460 ¹⁾	8890 ¹⁾	3690
降伏点ひずみ (%)	0.68	0.77	0.21
ヤング係数 (kgf/cm ²)	1.80×10 ⁶	1.88×10 ⁶	1.83×10 ⁶
破断伸び (%)	8.3	10.0	17.3

1) 0.2%オフセット降伏強度

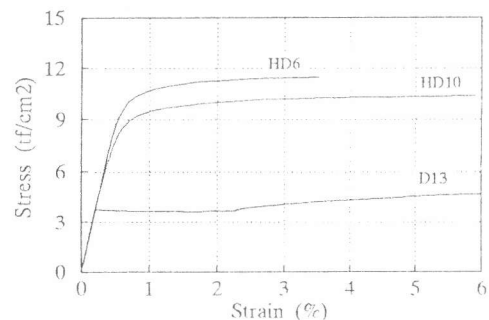


図1 鋼材の引張応力-ひずみ関係

*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）
 *3 九州大学大学院 工学研究科建築専攻
 *4 九州大学研究生 工学部建築学科、工修

リーズに分けられ、各シリーズ内では横補強筋の配筋形式と配筋量が変動因子となっている。試験体の配筋詳細を図2に、試験体一覧を表2に示す。また、実際の柱に用いるコンクリートの強度（無筋コンクリート強度と記す）とシリンダー強度との違いを見るために、主筋と横補強筋を配筋していない無筋コンクリート柱を2体製作した。

コンクリートに使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、粗骨材に最大粒径13mmの砂利を用いた。実験時材令でのコンクリートのシリンダー圧縮強度は表2に示されている。

荷重は単調荷重で、試験体両端の回転を拘束して、500ton試験機を使用して中心圧縮力を試験体に加えた。試験体中央部（検長34cm）におけるコンクリートの軸方向縮みを試験体に埋め込んだボルトに取り付けた変位計（各面2個、計8個）により測定した。変位計の取り付け詳細を図3に示す。また、主筋および横補強筋のひずみを図3に示す位置に貼付したひずみゲージにより測定した。試験体は、無筋コンクリート柱を除き、いずれも軸方向ひずみが約6.0%になるまで荷重を行った。

3. 実験結果

図4に各試験体の荷重-軸方向縮み量関係を横補強筋の量をパラメーターに示す。軸方向縮みが大きい領域に見られる荷重の急減点では、横補強筋の定着フックの緩みまたは破断が明瞭に観察された。図4より分かるように、横補強筋の配筋形式と直径が同じ試験体の場合は、横補強筋量の増加に伴い柱の最大軸耐力および靱性が高くなる。これは横補強筋により拘束されたコア部分のコンファインドコンクリートの強度と靱性が横補強筋の量の増加によって高くなったことによるものと考えられる。D6Mシリーズの試験体D6M35では、測定ボルトの埋め込み部分が試験体部分より弱く（横補強筋の間隔が大きく）なり、大変位ピーク点を過ぎてから主筋の座屈が他の試験体と異なって試験体の上端部に集中して発生した。そのため、ピーク点後の耐力低下は上端部の主筋の座屈が顕著になるにつれて激しくなり、拘束効果あまり大きく現れなかった。

横補強筋の配筋形式および直径（太さ）がコンファインドコンクリートの圧縮性状に及ぼす影響を調べるために、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を図5と図6に示す。コンクリートの応力は、主筋が負担する軸力を完全弾塑性材料と仮定して全荷重から差し引いたコンクリートの負担する軸力を断面積で割って求めた。ただし、断面積は、コンクリートのひび割れが始めて観察された軸ひずみ ϵ_{c1} （実測値が0.16%~0.20%）までは全断面積（400cm²）を、軸ひずみが0.4%以上になる域ではコア断面積（324cm²）を取った。その間の応力は3次曲線で

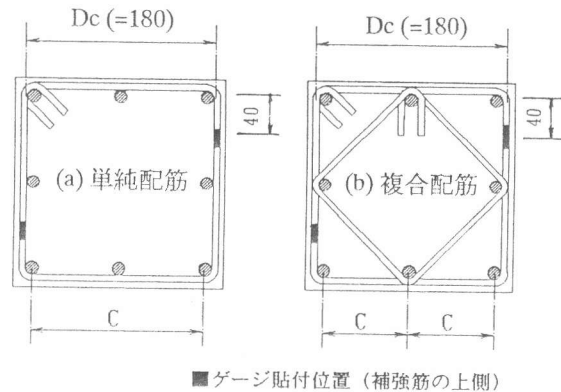


図2 試験体の配筋詳細

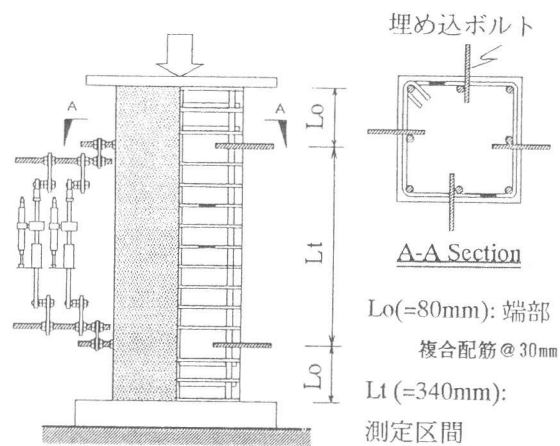


図3 加力および測定方法

表2 試験体詳細および主な実験結果一覧

試験体名	$c\sigma_B$ (kg/cm ²)	配筋 形式	横補強筋の詳細					最大耐力 (tonf)	単 純 累加耐力 ¹⁾ (tonf)	コンファインドコンクリートの結果			
			直径 (mm)	C (mm)	間隔 (mm)	ρ_h (%)	σ_{hy} (kg/cm ²)			$c\sigma_{cB}$ 実験値	ϵ_{co} (%)	計算値	
												$c\sigma_{cB}$	比率 ²⁾
D6S20	525		6.0	162	20	3.48	10460	238.4	211.5	640	0.46	621	1.03
D6S30					30	2.32		587				1.02	
D6S40					40	1.74		570				0.99	
D6M35	525		6.0	81	35	3.39	10460	268.5	211.5	739	1.01	706	1.05
D6M50					50	2.38		645				1.07	
D6M70					70	1.70		606				0.99	
D10S35	547		10.0	158	35	4.41	8890	260.0	218.8	712	0.43	742	0.96
D10S47					47	3.28		687				0.99	
D10S60					60	2.57		653				1.03	
D10M60	531		10.0	79	60	4.39	8890	308.0	213.4	862	1.69	889	0.97
D10M80					80	3.29		783				0.95	
D10M100					100	2.64		710				0.97	
PL-1	531	プレーン	—	—	—	—	185.5	180.5	464	0.21	531	0.87	
PL-2			—	—	—	—	214.5				536	0.26	531

注 1) 単純累加耐力 = $0.85c\sigma_B(A_k - A_n) + \sigma_y A_n$ 2) 比率 = 実験値 / 計算値
 3) 試験体名凡例: D6 M 35 ①D6: 横補強筋の呼び直径 (D6:6mm, D10:10mm) ②M: 配筋形式 (M:複合, S:単純) ③35: 横補強筋間隔 (35:35mm, ect)

近似して求めた。

図5に示す結果は、同体積比の横補強筋を配筋した場合は、周辺横強筋のみによる拘束よりもサブタイを併用した複合配筋による拘束の方がコンファインドコンクリートにもたらす強度上昇および靱性改善の度合いが高いことを示唆している。また、図6より、横補強筋の量と配筋形式が同じである場合は、直径が太い方がコンファインドコンクリートの強度にもたらす上昇量が高いことが見られる。しかし、応力-ひずみ関係のピーク点後の下り勾配に関しては逆の現象が見られた。その理由としては、次の2点が挙げられる。①高強度横補強筋による拘束の場合は、通常、応力-ひずみ関係のピーク点に達する際には横補強筋は降伏していないが(図7を参照)、変位が大きくなるにつれて降伏していくので、下り勾配域の形状は降伏強度の影響を受けることが考えられる。本実験では直径が太い方のD10異形鉄筋の降伏点が8890kgf/cm²であるのに対して、

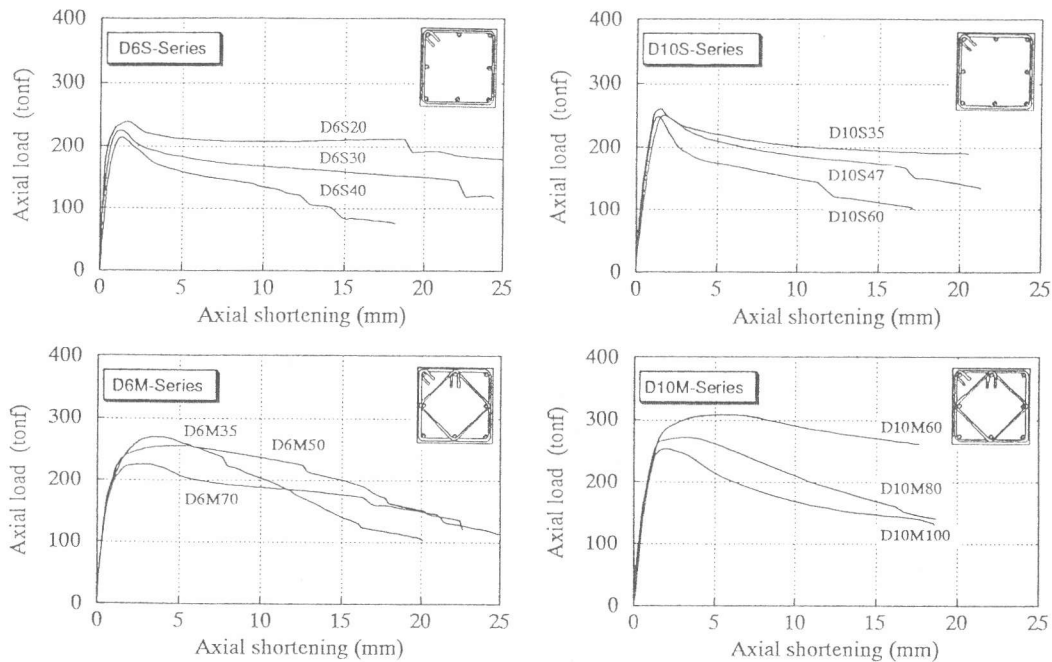


図4 荷重-軸縮み関係の実験結果

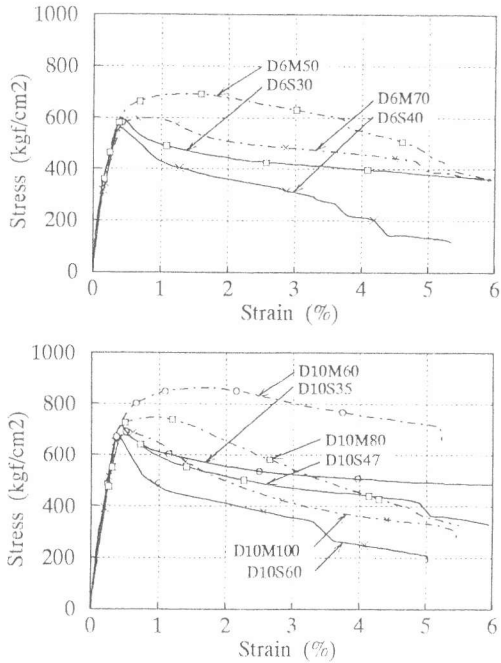


図5 応力-ひずみ関係（配筋形式の影響）

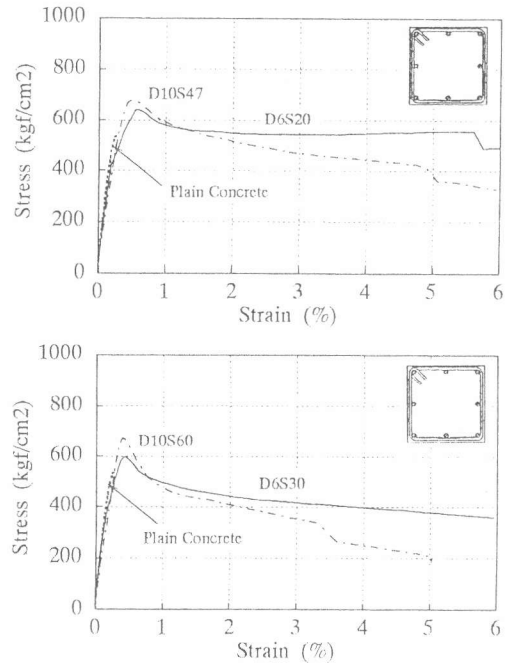


図6 応力-ひずみ関係（直径の影響）

D6異形鉄筋のそれが 10460kgf/cm^2 と約 1500kgf/cm^2 高く、その影響が出たためと考えられる。②横補強筋の量を同一にするため、D10鉄筋で横補強した試験体の横補強筋の間隔がD6で横補強した試験体のその2倍以上となり、主筋の座屈後挙動に差が出たためと考えられる。

コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係のピーク点に達するときの各試験体の中央断面における外周横補強筋に生じる横方向ひずみと横補強筋の間隔 s との関係を図7に示す。図中の○と□はそれぞれ単純配筋形式を有するD6とD10鉄筋で横補強された試験体の実験結果を、●と■は複合配筋形式を有する試験体の実験結果を表す。図7より、いずれの試験体においても横補強筋は応力-ひずみ関係がピーク点に達する際に降伏していないこと、同じ太さの横補強筋を使用した場合間隔が大きいかにも関わらず複合配筋形式の方が単純配筋形式よりも横補強筋のひずみが大きい、すなわち拘束効果が高いことなどが分かる。また、横補強筋のひずみは間隔が大きくなるにつれて減少する傾向が見られるが、その負勾配は配筋形式によって大きく異なることも図7より伺える。ただし、このような現象を定量的に定式化するにはさらなる実験データの蓄積が必要となるので、今後の研究課題にしたい。

4. 実験結果の評価

まずコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係のピーク点における最大応力である強度の評価について述べる。著者らは、横補強筋の量に加え、横補強筋の配筋形式および直径の影響を考慮にいたし、横補強筋あるいは角型鋼管により拘束されたコンファインドコンクリートの強度の統一的な算定式として式(1)を提案している[1]。

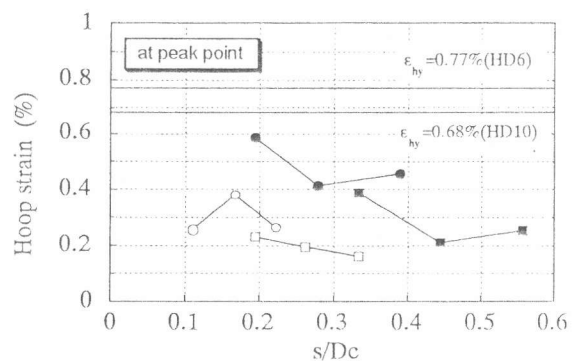


図7 横補強筋のひずみと間隔の関係

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

ここで、 $c\sigma_B$:コンクリートのシリンダー強度、 ρ_h :横補強筋の体積比、 σ_{hs} :横補強筋の応力、 d :横補強筋の公称直径、 C :横補強筋の横支持長さ、 s :間隔、 D_c :周辺横補強筋の中心間距離。横補強筋の横支持長さ C の定義は、2本以上の周辺筋またはサブタイによって固定される鉄筋の中心間距離である(図2参照)。ただし、式(1)を用いて高強度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を評価する際に、最大強度時に横補強筋が降伏していない(前節図7を参照)ことから、横補強筋の応力 σ_{hs} に上限値を設ける必要があると思われる。ここで、文献1で述べた実験と本実験における外周横補強筋ひずみの平均値(0.33%)を参考にして、強度算定式中の横補強筋の応力 σ_{hs} の上限値を7000kgf/cm²とする。

式(1)で求めたコンファインドコンクリート強度の計算値は表2に示されている。表2より、強度の実験値と計算値との比率の平均値は1.00で、標準偏差が0.05と(1)式による計算結果は精度よく実験結果を評価していることが分かる。また、比較のため、Sheikhら[2]と鈴木ら[3]によって提案されている、横補強筋の配筋形式の影響を反映した強度算定式を用いて実験結果を評価した。紙面の都合で詳細を示すことができないが、結果のみを述べると、Shiekhらの式を用いた場合は強度の実験値と計算値との比率の平均値が1.11で、標準偏差が0.17となり、鈴木らの式を用いた場合は平均値が0.98で、標準偏差が0.16となっている。

次にコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係について述べる。応力-ひずみ関係の実験結果と計算結果との比較を図8に示す。計算結果は、式(2)で求めたものとSheikhらの提案式[2]を用いて求めたものである。

$$Y = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2} \quad (2)$$

ここで $X = \varepsilon_c / \varepsilon_{c0}$ 、 $A = E_c \varepsilon_{c0} / c\sigma_{cB}$ 、 $K = c\sigma_{cB} / c\sigma_B$ 、 $E_c : (0.703 + 0.106\sqrt{c\sigma_B}) \times 10^5$ 、 $D = 1.50 - 0.00168c\sigma_B + 0.50\sqrt{(K-1)c\sigma_B/23}$ 。

式(2)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[1,4]である、式中の他の記号の持つ意味については文献4を参照されたい。

図8から分かるように、Sheikh式で求めた計算結果は単純配筋形式を有する試験体の応力-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、複合配筋形式の試験体の実験結果を過小評価する傾向にある。一方、式(2)による計算結果は、いずれの試験体に対しても、応力-ひずみ関係の最大応力と、横補強筋の定着フックがほどけたり破断したりするまでの下り勾配域を比較的良く捉えている。

5. まとめ

高強度横補強筋により拘束された高強度コンクリート柱の中心圧縮実験を行い、横補強筋の配筋形式と直径がコンファインドコンクリートの圧縮性状に及ぼす影響を調べ、次の結論を得た。

1) コンファインドコンクリートの強度と靱性が横補強筋量の増加に伴い顕著に上昇する。また、横補強筋量が等しい場合は、複合配筋の方が外周横補強筋のみの配筋よりも拘束効果(強度

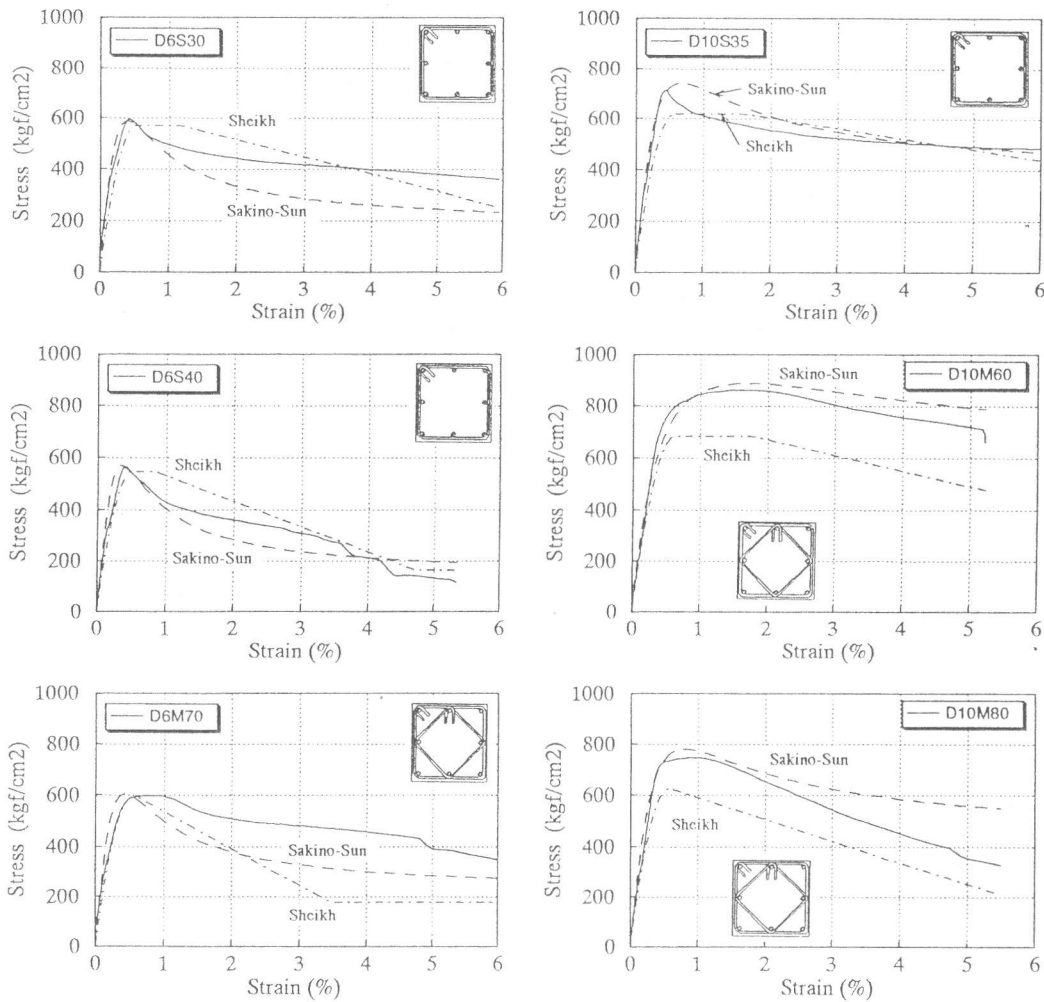


図8 応力-ひずみ関係の比較

の上昇および靱性の改善の度合い)が高い。

2) 同量横補強筋で拘束する場合、横補強筋の太さが拘束効果、特に靱性改善効果に及ぼす影響については、間隔による影響と相互関連しているため、今後の課題となる。

3) 異なる配筋形式で拘束されたコンファインドコンクリートの強度および圧縮応力-ひずみ関係を、著者らがすでに提案している式(1)と式(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、九州大学文部技官藤原文夫氏、川口晃氏、津賀山健治氏および九州大学学生池田崇氏の多大な協力を得た。ここに深く感謝します。

[参考文献]

- 1) Sun, Y.P. and Sakino, K., : Ductility Improvement of Reinforced Concrete Columns with High-Strength Materials, Transactions of the JCI, Vol. 15, pp. 455-462, 1993
- 2) Sheikh, S.A. and Uzumeri, S.M., : Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns, Proceedings, ASCE, V.108, ST 12, pp. 2703-2722, Dec. 1982
- 3) 鈴木計夫・中塚侑・菅田昌宏: 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
- 4) 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