

論文 緊張PC鋼棒で横補強したコンクリート柱の中心圧縮実験と構成則

中田 幸造^{*1}・山川 哲雄^{*2}

要旨：緊張PC鋼棒によりプレストレスを導入した横補強柱の受動的・能動的横拘束効果を究明するために中心圧縮実験を行い、既往の応力ひずみ関係式であるMander式と崎野・孫式の修正を試みた。実験の結果、緊張ひずみレベルの増加に伴い圧縮強度が上昇すること、降り勾配には横補強材の体積比が関係していることが分かった。次にMander式、崎野・孫式に実験結果を反映させた結果、両式とも圧縮強度を精度よく予測できるようになったが、降り勾配に差が見られた。即ち、強度上昇率に依存しない降り勾配係数を有する崎野・孫式が全体的な挙動をより適切に表現できることがわかった。

キーワード：PC鋼棒，プレストレス，構成則，横拘束効果，中心圧縮

1. 序

本研究は山川らによって提案されたPC鋼棒やアラミド繊維ベルトを外帯筋状に配置して、プレストレスを導入したRC柱の恒久的および応急的耐震補強法に関する基礎的研究に相当する。PC鋼棒やアラミド繊維ベルトなどの外部横補強材を利用してRC柱にプレストレスを導入することは、従来のせん断補強効果と受動的横拘束効果に加えて能動的横拘束効果を新たに加えることになる。

今までは、山川らによって主に単独柱、腰壁付き柱や袖壁付き柱の曲げせん断実験によるせん断補強効果の解明に重点が置かれており、PC鋼棒やアラミド繊維ベルトによる能動的横拘束効果が、コンファインドコンクリートの強度や強度以降の軟化領域にどのような影響を与えるかなどに関しては、十分な研究がまだ行われていない。

本研究では上記2種類の外部横補強材のうち、PC鋼棒に緊張力を導入したコンファインドコンクリートの受動的・能動的横拘束効果を中心圧縮実験で解明し、既存の構成則を修正すること

が研究目的である。

2. 実験概要

試験体はFig. 1のように250 × 250mmの正方形断面、全高500mmである。本研究では、PC鋼棒による横拘束効果を実験的に検証するために鉄筋を一切配筋していない。緊張力はコーナブロックにねじ込んだPC鋼棒をナットで締め付

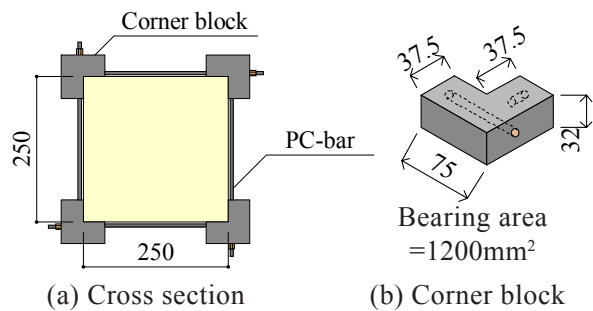


Fig. 1 Uniaxial compression specimen details

Table 1 Material properties of PC bar

PC bar (5.4φ)	Cross section (mm ²)	f _y (MPa)	ε _y (%)	E (GPa)
	23	1220	0.61	200

f_y=yield strength, ε_y=yield strain, E=Young's modulus.

*1 琉球大学 工学部環境建設工学科助手 工修 (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博 (正会員)

Table 2 Details of retrofit and test results

a)PC bar interval: 41mm and concrete cylinder strength (σ_B)=23.2MPa

Specimen	Pretension strain level(μ)	Prestress level (MPa)	σ_{cB} (MPa)	ϵ_{cB} (%)	ϵ_{max} (%)
P03S-P01	-	-	20.0	0.16	-
P03S-P02	-	-	19.8	0.17	-
P03S-P03	-	-	20.8	-	-
P03S-P41N1	0	0	21.4	0.28	1.04
P03S-P41N2	0	0	20.1	0.36	0.96
P03S-P41L1	1225	245	23.0	0.26	0.87
P03S-P41L2	1225	245	22.5	0.24	0.72
P03S-P41L3	1225	245	23.0	0.20	1.00
P03S-P41M1	2450	490	24.7	0.30	0.86
P03S-P41M2	2450	490	23.4	0.26	0.53
P03S-P41M3	2450	490	24.0	0.21	0.70
P03S-P41H1	3675	735	25.8	0.31	0.63
P03S-P41H2	3675	735	24.8	0.26	0.61
P03S-P41E1	4000	800	25.1	0.27	0.44
P03S-P41E2	4000	800	25.1	0.25	0.60

σ_{cB} =compressive strength of confined concrete, ϵ_{cB} =strain of confined concrete at maximum stress, ϵ_{max} =maximum strain.

けて導入する。PC 鋼棒の材料特性を Table 1 に示す。実験変数はPC 鋼棒間隔と緊張ひずみレベルである。各シリーズに3体ずつプレーンコンクリート試験体を用意した。試験体総数は28体である。試験体一覧及び実験結果を Table 2 に示す。使用したコンクリートは呼び強度13.5MPa、普通ポルトランドセメント、スランプ18cm、粗骨材粒径13mm以下で混練し、鉛直方向に打設した。

荷重はコンクリート部分のみの単調荷重で、1端固定(下部)、他端ピン(上部)の材端条件で2,000kN 万能試験機を用いた。試験体の軸方向ひずみは、Fig. 2に示す荷重板間のひずみ4箇所(検長500mm)と試験体中央部4箇所(間隔41:370mm, 間隔82:330mm)の計8箇所測定した。軸ひずみの修正方法は、圧縮強度時までは試験体中央部で測定した軸ひずみを用いた。それ以降は荷重板で測定された軸ひずみを圧縮強度時のひずみの差だけシフトして用いた(詳しくは文献1)を参照)。

3. 実験結果

P41シリーズのプレーンコンクリート3体の圧縮強度は平均でシリンダー強度の87.1%, P82シリーズでは平均で80.6%である。

b)PC bar interval: 82mm and concrete cylinder strength (σ_B)=21.5MPa

Specimen	Pretension strain level(μ)	Prestress level (MPa)	σ_{cB} (MPa)	ϵ_{cB} (%)	ϵ_{max} (%)
P03S-P01	-	-	17.0	0.23	-
P03S-P02	-	-	17.5	0.20	-
P03S-P03	-	-	17.5	0.25	-
P03S-P82N1	0	0	18.7	0.26	0.71
P03S-P82N2	0	0	17.7	0.24	0.68
P03S-P82L1	1225	245	19.5	0.33	0.67
P03S-P82L2	1225	245	18.6	0.41	0.64
P03S-P82Q1	1860	372	20.6	0.32	0.76
P03S-P82Q2	1860	372	18.8	0.51	1.00
P03S-P82M1	2450	490	21.9	0.30	0.67
P03S-P82M2	2450	490	19.9	0.40	0.94
P03S-P82H1	3675	735	20.8	0.32	0.73
P03S-P82H2	3675	735	22.2	0.28	0.86

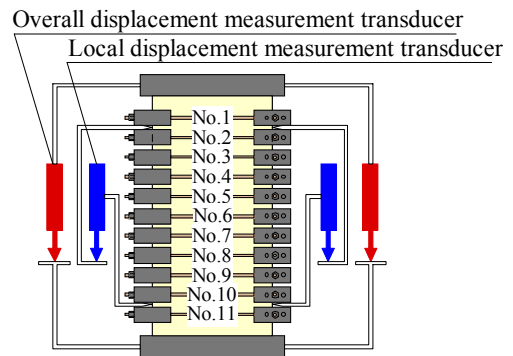


Fig. 2 Axial strain measurement setup

σ_c =compressive stress, σ_p =compressive strength of plain concrete.

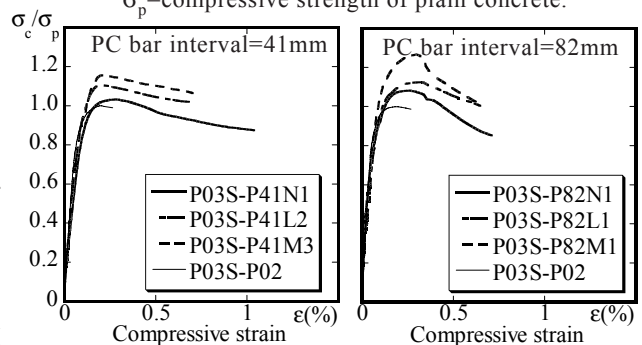


Fig. 3 Stress-strain curves of confined concrete

Fig. 3は実験から得られた応力ひずみ曲線である。縦軸は圧縮強度をプレーンコンクリート強度で無次元化している。圧縮強度以降大変形まで測定していないのは、損傷したコンクリートのはらみ出しによりPC鋼棒に面外の曲げが生じる前に実験を終了したためである。なお、コンクリート表面とPC鋼棒の間隔は3mmである。Fig. 3より、緊張ひずみレベルの増加と共に圧縮

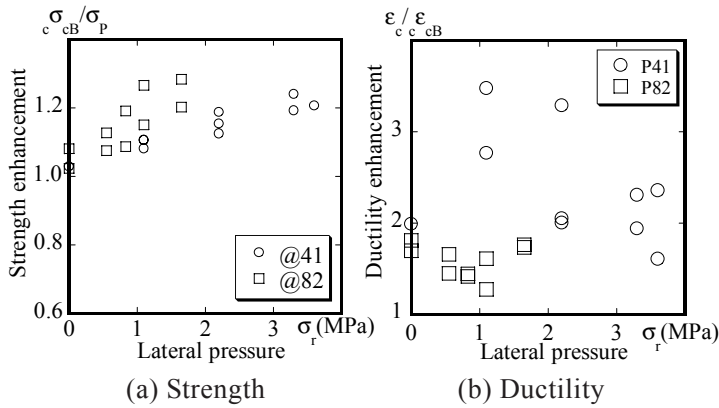


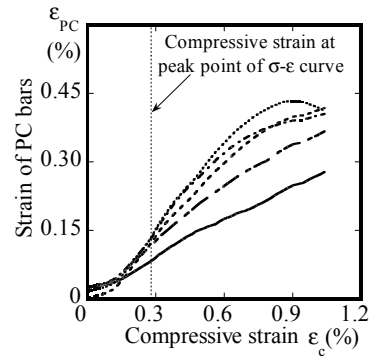
Fig. 4 Strength and ductility enhancement by lateral pressure σ_r

強度は上昇することがわかるが、降り勾配にはあまり差が見られない。また、緊張ひずみレベルが両シリーズ間で同じ場合、強度上昇率が同じか、あるいはP82シリーズがやや高くなっている。圧縮強度に関してはFig. 4(a)で考察する。

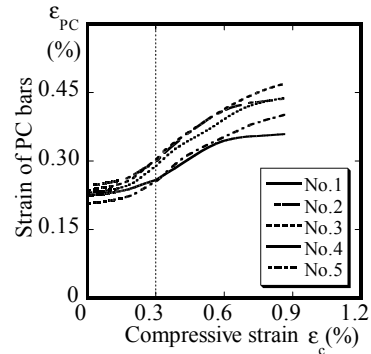
Fig. 4は、横拘束圧(σ_r)を変数にして(a)が強度上昇率を、(b)が圧縮靱性を定量的に示したものである。横拘束圧は以下の式で算定した。

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \rho_p \cdot \sigma_{pt} \quad (1), \quad \rho_p = \frac{4p_a}{b_p s} \quad (2)$$

ここで、 ρ_p : PC 鋼棒の体積比、 σ_{pt} : PC 鋼棒の緊張応力度、 p_a : PC 鋼棒の断面積、 b : 柱幅、 s : PC 鋼棒の間隔である。Fig. 4(a)の縦軸は実験圧縮強度をプレーンコンクリート強度で無次元化した値である。Fig. 4(b)の縦軸は圧縮強度が92%に低下したときの中心圧縮ひずみを圧縮強度時の中心圧縮ひずみで除したものを表している。圧縮強度が92%に低下したときの圧縮ひずみを採用したのは、強度低下率が一番小さい試験体に合わせたためである。Fig. 4(a)より、横拘束圧が上昇するにつれて強度上昇率が増大していくことが分かる。P82シリーズの強度上昇率がP41シリーズより大きい理由は、以下の点が考えられる。P82シリーズのプレーンコンクリート強度はシリンダー強度の80.6%であり、P41シリーズの87.1%より小さいことから、コンクリート強度の低い場合の方が、能動的横拘束圧(プレストレス)の圧縮強度に寄与する効果は高いと考えることができるが、この現象の確認は今後の研究課題である。Fig. 4(b)より体積



(a) P03S-P41N1



(b) P03S-P41M1

Fig. 5 Strain of PC bars versus axial strain of concrete

比の大きいP41シリーズの圧縮靱性能が優れていること、P82シリーズは靱性能に緊張ひずみの影響がほとんど見られないが、P41シリーズは、緊張ひずみが大きくなると靱性能が低下する傾向にある。

Fig. 5(a)、(b)にP41シリーズのPC鋼棒のひずみ-圧縮ひずみ関係を示す(Fig. 2のNo.1-No.5)。グラフの縦軸がPC鋼棒のひずみ、横軸がコンクリート柱の圧縮ひずみである。グラフ中の垂直破線は圧縮強度時の中心圧縮ひずみである。Fig. 5よりノンプレストレス、プレストレス試験体共に圧縮ひずみの初期からPC鋼棒のひずみが増大していることがわかる。

4. 既往の提案式による予測 (Unit: N, mm)

4.1 Mander式²⁾の修正

本節では、Mander式に修正を加え、実験結果を予測する。修正は圧縮強度算定式に対して行う。まず、PC鋼棒に対する拘束効果係数(k_c)はコーナブロックの大きさを考慮し、横補強筋への適用方法を準用した(Fig. 6参照)。

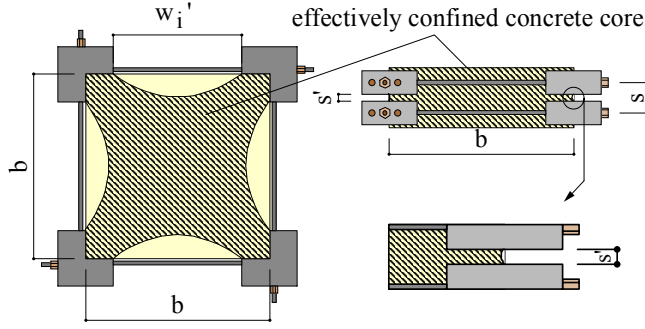


Fig. 6 Effective area of confined concrete

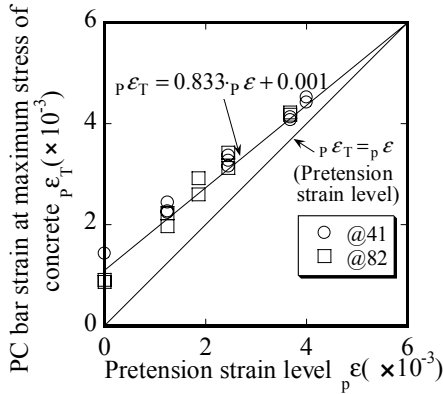


Fig. 7 PC bar strain at maximum stress of confined concrete versus pretension strain level of PC bar

$$k_e = \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6b^2} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 k_e : 拘束効果係数、 b : 柱断面の幅、 s' : コーナブロック間の隙間、 w_i' : PC 鋼棒の有効支持長さ、 i : 非拘束領域の数である。

圧縮強度に影響を及ぼす PC 鋼棒の横拘束圧は、圧縮強度時に存在する PC 鋼棒ひずみで考慮する。Fig. 7は縦軸が実験で得られた圧縮強度時の PC 鋼棒ひずみ (P41, P82 シリーズ)、横軸が PC 鋼棒における初期緊張ひずみの関係を表している。またグラフには初期緊張ひずみレベルの線 ($\epsilon_T = \epsilon_p$) も示している。Fig. 7より緊張ひずみレベルが増加するに伴い、圧縮強度時の PC 鋼棒ひずみも増大する。そこで実験値に対して回帰分析を行うと次式が得られる。

$$\epsilon_T = 0.833\epsilon_p + 0.001 \quad (4)$$

ここで、 ϵ_T : 圧縮強度時の PC 鋼棒ひずみ、 ϵ_p : 緊張ひずみレベルである。ここで、式 (4) の ϵ_p に PC 鋼棒の降伏ひずみを代入したとき、 $\epsilon_T = \epsilon_y$ (つまり係数の和が 1) となるよう実験結果に注

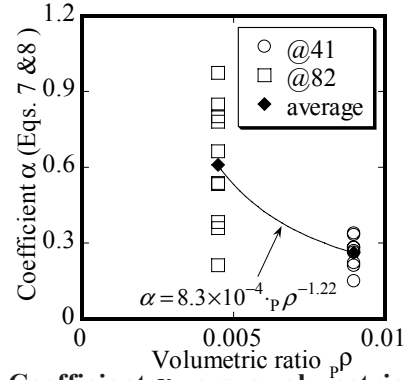


Fig. 8 Coefficient α versus volumetric ratio of PC bar

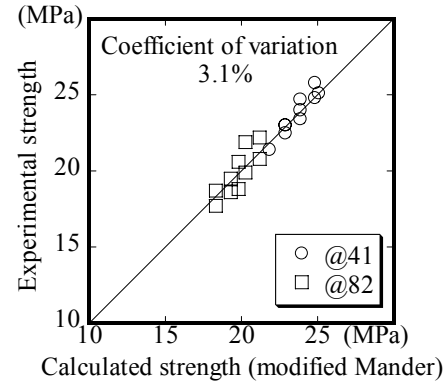


Fig. 9 Comparison of experimental and calculated strengths of confined concrete

目して式 (4) を変形すると式 (5) を得る。

$$\epsilon_T = 0.836\epsilon_p + 0.164\epsilon_y \quad (5)$$

ここで、 ϵ_y : PC 鋼棒の降伏ひずみである。従って、圧縮強度時に存在する PC 鋼棒の有効横拘束圧は次式で表される。

$$\sigma_p f_1' = \frac{1}{2} \rho_p E_p E_T \cdot k_e \quad (6)$$

ここで、 $\sigma_p f_1'$: 圧縮強度時の PC 鋼棒の存在応力 ($E_p \cdot \epsilon_T$) を用いて計算される平均側圧に、拘束効果係数を乗じた PC 鋼棒の有効横拘束圧、 E_p : PC 鋼棒のヤング係数である。この PC 鋼棒の有効横拘束圧を従来の帯筋の項に加えると、帯筋と PC 鋼棒で横補強されたコンファインドコンクリート柱の圧縮強度式が得られる (式 (7))、

$$\sigma_{cB} = \sigma_p \cdot \left\{ -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \left(\frac{h f_1' + \alpha_p f_1'}{\sigma_p} \right)} - 2 \left(\frac{h f_1' + \alpha_p f_1'}{\sigma_p} \right) \right\} \quad (7)$$

$$\alpha = 8.3 \times 10^{-4} \cdot \rho_p^{-1.22} \quad (8)$$

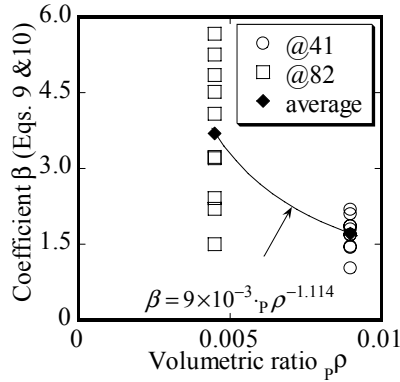


Fig. 10 Coefficient β versus volumetric ratio of PC bar

ここで、 σ_{cB} ：コンファインドコンクリートの圧縮強度、 σ_p ：プレーンコンクリート強度、 f'_1 ：帯筋の有効横拘束圧、 α ：補正係数である。式(8)は、実験より得られた強度上昇率(σ_{cB}/σ_p)から逆算して求めたP41シリーズ、P82シリーズそれぞれの α の平均値とPC鋼棒の体積比の関数として与えた(Fig. 8参照)。Fig. 9は、式(7)で求めたPC鋼棒で横補強されたコンクリート柱の計算圧縮強度と実験圧縮強度を比較したものである。Fig. 9より、本論文で修正した式(7)による結果は実験結果を精度良く評価していることがわかる。

4.2 崎野・孫式³⁾の修正

本節では前節と同様に崎野・孫式に修正を加え、本実験結果を予測する。修正を加える式は、圧縮強度算定式と降り勾配係数(D_g)である。実験結果を考慮して、強度上昇率はプレーンコンクリートからの上昇率とした。圧縮強度算定式は、Mander式と同様に帯筋の寄与分にPC鋼棒の寄与分を加えて式(9)のように表現する。

$$\sigma_{cB} = \sigma_p + 23(\sigma_{re} + \beta \cdot \rho_p \sigma_{re}) \quad (9)$$

$$\beta = 9 \times 10^{-3} \cdot \rho_p^{-1.114} \quad (10)$$

$$\rho_p \sigma_{re} = \frac{1}{2} \rho_p \rho_p E_p \varepsilon_T \cdot \left(\frac{p d}{p C} \right) \cdot \left(1 - \frac{p S}{2 D} \right) \quad (11)$$

ここで、 σ_{re} ：帯筋の有効側圧因子、 $\rho_p \sigma_{re}$ ：PC鋼棒の有効側圧因子、 β ：補正係数、 $p d$ ：PC鋼棒の直径、 $p C$ ：PC鋼棒の有効支持長さ、 D ：柱せいである。式(10)は、実験より得られた強度上昇率(σ_{cB}/σ_p)から逆算して求めたP41シリー

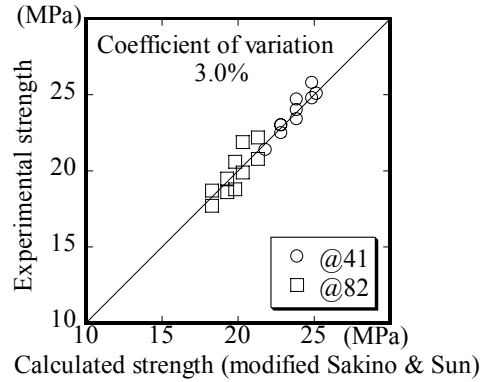


Fig. 11 Comparison of experimental and calculated strength of confined concrete

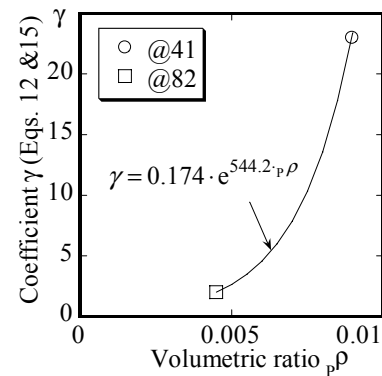


Fig. 12 Coefficient γ versus volumetric ratio of PC bar

ズ、P82シリーズそれぞれの β の平均値(Fig. 10参照)とPC鋼棒の体積比の関数として与えた。Fig. 11は、式(9)で求めたPC鋼棒で横補強されたコンクリート柱の計算圧縮強度と実験圧縮強度を比較したものである。Fig. 11より、本論文で修正した式(9)による結果は実験結果を精度良く評価している。

次に降り勾配係数(D_g)を修正する。降り勾配係数(D_g)は、式(12)のように帯筋の項にPC鋼棒の項を加えることで考慮する。

$$D_g = 1.5 - 0.017 \cdot \sigma_{cB} + 1.6 \sqrt{\sigma_{re} + \gamma \cdot \rho_p \sigma_{re}} \quad (12)$$

$$\rho_p \sigma_{re} = \frac{1}{2} \rho_p \rho_p \sigma_y \cdot \left(\frac{p d}{p C} \right) \cdot \left(1 - \frac{p S}{2 D} \right) \quad (13)$$

ここで、 D_g ：降り勾配係数、 σ_{cB} ：シリンダー強度、 γ ：補正係数、 $\rho_p \sigma_{re}$ ：降り勾配に影響を与えるPC鋼棒の有効側圧因子、 $\rho_p \sigma_y$ ：PC鋼棒の降伏強度である。降り勾配係数(D_g)は、実験結果を用いて式(14)に示す誤差の平方和が最小となるように求めた。

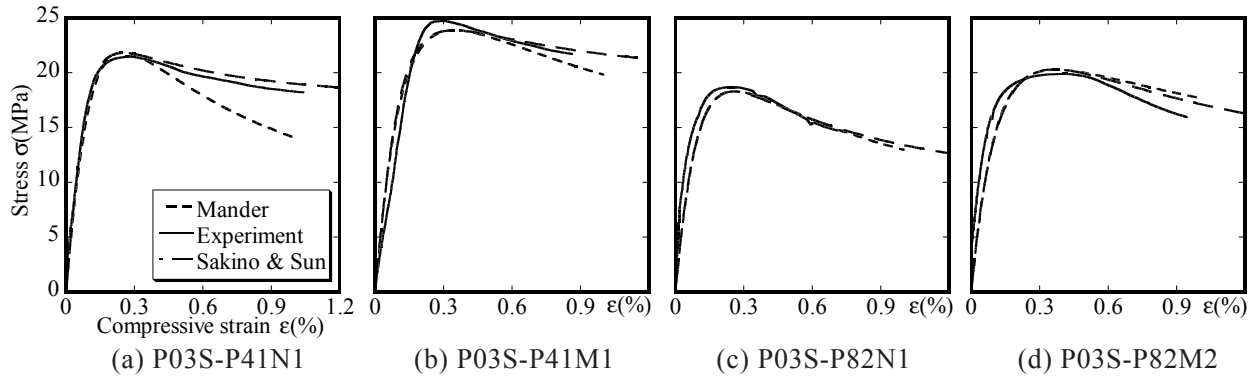


Fig. 13 Comparison of experimental and calculated stress-strain curves of confined concrete

$$\sum_{i=1}^n \left\{ Y_i - \frac{A \cdot X_i + (D_g - 1) \cdot X_i^2}{1 + (A - 2) \cdot X_i + D_g \cdot X_i^2} \right\}^2 \quad (14)$$

ここで、 Y : 実験値, n : 測定点数, 変数 Y, A, X は文献³⁾を参照されたい。このようにして求めたプレストレス試験体の D_g は, 実験終了時の圧縮ひずみが小さいためうまく定めることができなかつた。従って, ノンプレストレス試験体の逆算結果 (D_g) を用いて係数 (γ) を求め, 体積比との関係を示したのが, Fig. 12 である。Fig. 12 の逆算結果に対して係数 (γ) と体積比の関係を表現すると次式となる。

$$\gamma = 0.174 \cdot e^{544.2 \cdot v \cdot \rho} \quad (15)$$

4.3 応力ひずみ曲線の比較

Fig. 13 に計算結果と実験結果の応力ひずみ曲線の比較を代表的な試験体について示す。Fig. 13 (a), (b) が P41 シリーズ, (c), (d) は P82 シリーズである。P41 シリーズは P03S-P41N1 試験体で崎野・孫式が特に良く評価できている。これは崎野・孫式の降り勾配が強度上昇率に依存しないためであり, Mander 式は降り勾配が強度上昇率に依存しているためである。P82 シリーズは両式とも同程度の評価を与えている。

5. 結論

- 1) 横補強材が同体積比の場合, 圧縮強度には PC 鋼棒の緊張ひずみレベルが影響し, 降り勾配には体積比の影響が大きい。
- 2) 側圧が増加すると強度上昇率も上昇していく。PC 鋼棒間隔の強度上昇率への影響は今後の検討課題である。

3) PC 鋼棒ひずみは初期緊張ひずみの有無に関わらず, 圧縮ひずみの初期から増加していく。

4) 圧縮強度時の PC 鋼棒ひずみは, 緊張ひずみレベルの増加と共に上昇していく。

5) 既存の応力ひずみ関係式である Mander 式と崎野・孫式を PC 鋼棒試験体に適合するように修正した。この結果, 中心圧縮実験結果を良く評価できるようになった。特に崎野・孫式は降り勾配を制御できるためノンプレストレス試験体を良く表現できる。

今後, 実験資料を蓄積し, 修正式の妥当性の確認や追加の検討を行う必要がある。

謝辞

本研究は, 平成 14 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (B)), (一般) 14350306, 代表者: 山川哲雄) の助成を受けた。

参考文献

- 1) 中田幸造, 山川哲雄, 森下陽一, 舛田尚之: 緊張アラミド繊維ベルトを用いた拘束コンクリート柱の圧縮性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No. 2, pp127-132, 2003.
- 2) Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, 1988.
- 3) 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力ひずみ関係, AIJ 構造系論文集, No. 461, pp. 95-104, 1994.