

論文 緊張PC鋼棒を用いた拘束コンクリート柱の構成則に関する実験的研究

中田 幸造^{*1}・山川 哲雄^{*2}・金城 秀俊^{*3}・Md. Nafiur RAHMAN^{*4}

要旨：本論では，緊張PC鋼棒を外部横補強材として用いた耐震補強法の受動的・能動的横拘束効果を中心圧縮実験により解明し，本耐震補強法に適用し得る応力ひずみ関係を既往の応力ひずみ関係式を基本として修正することを試みた。この結果，PC鋼棒による能動的横拘束効果は圧縮強度を上昇させるが，それには上限が存在しそうであること，降り勾配には能動的横拘束効果は影響せず，受動的横拘束効果の内，体積比の影響が大きいことが分かった。また，既往の応力ひずみ関係式を修正した結果，降り勾配の評価が難しいことが分かった。

キーワード：PC鋼棒，プレストレス，構成則，外部横補強，中心圧縮実験

1. 序

山川・倉重らにより提案されたPC鋼棒を外部横補強材として用いた耐震補強法は，従来のせん断補強効果と受動的横拘束効果に加えて新たに能動的横拘束効果を加えることになる。特に，中心圧縮実験では従来の受動的横拘束効果に加えて，この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未解明である。

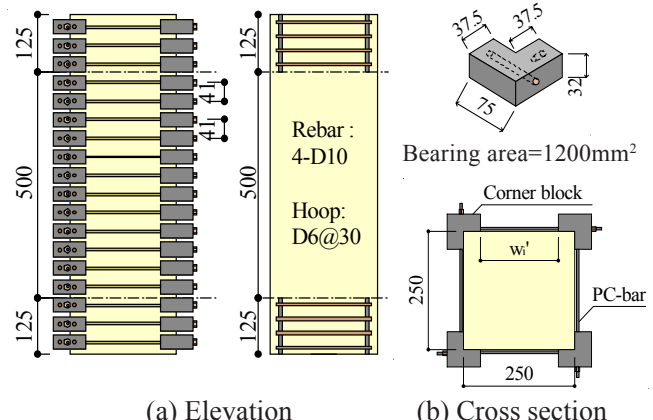
本研究目的は，PC鋼棒による受動的・能動的横拘束効果を中心圧縮実験で解明し，本耐震補強法に適用し得る応力ひずみ関係式を既往の提案式の修正により求めることである。

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 750mm である。昨年度¹⁾ の試験体は高さが 500mm で縦打ちであったため，全ての試験体で上部が破壊し，ブリージングの影響が避けられなかった。本研究では，製作した高さ 500mm で縦打ち試験体の上部と下部よりコアを抜いて強度を調べた結果，上部コア強度が平均で 3MPa 低いことがわかった。そこで本研究では

試験体高さを 750mm とし，上下 125mm 区間を鉄筋で補強し，打設方向を横打ちとしてブリージングの影響を極力排除した（500mm 区間には鉄筋は一切配筋されていない（Fig. 1 参照））。

PC鋼棒の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けて導入する。PC鋼棒の引張試験結果を 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



(a) Elevation (b) Cross section
Fig. 1 Uniaxial compression specimen details
 (Unit: mm)

Table 1 Mechanical properties of PC bar

| PC bar (5.4φ) | Cross section (mm ²) | σ _u (MPa) | E (GPa) |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|
| | 23 | 1103 | 206 |

σ_u=ultimate strength, E=Young's modulus of elasticity.

*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）

*3 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻（正会員）

*4 琉球大学大学院 理工学研究科生産エネルギー工学専攻 工修（正会員）

Table 2 Details of retrofit and test results

| Specimen | Pre-tension strain level (μ) | $c\sigma_B$ (MPa) | $c\sigma_{cB}$ (MPa) | ϵ_{cc} (%) | Specimen | Pre-tension strain level (μ) | $c\sigma_B$ (MPa) | $c\sigma_{cB}$ (MPa) | ϵ_{cc} (%) | P41 series: PC bar interval=41mm, P82 series: PC bar interval=82mm, P55 series: PC bar interval=55mm, P123 series: PC bar interval=123mm, |
|-----------|------------------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|------------|------------------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|--|
| | | | | | | | | | | |
| AC04-P01 | - | 22.3 | 18.7 | - | AC04-P01 | - | 25.3 | 21.0 | 0.17 | |
| AC04-P02 | - | | 20.8 | 0.14 | AC04-P02 | - | | 20.6 | 0.13 | |
| AC04-P03 | - | | 20.3 | 0.17 | AC04-P55N | 0 | | 23.1 | 0.25 | |
| AC04-P41N | 0 | | 20.7 | 0.22 | AC04-P55M | 2450 | | 26.8 | 0.28 | |
| AC04-P41M | 2450 | | 26.0 | 0.33 | AC04-P55H | 3675 | | 27.7 | 0.30 | |
| AC04-P41H | 3675 | | 25.4 | 0.32 | AC04-P123N | 0 | | 23.3 | 0.17 | |
| AC04-P82N | 0 | | 19.3 | 0.22 | AC04-P123M | 2450 | | 24.3 | 0.14 | |
| AC04-P82M | 2450 | | 24.4 | 0.23 | AC04-P123H | 3675 | | 25.8 | 0.24 | |
| AC04-P82H | 3675 | | 23.7 | 0.29 | | | | | | |

ϵ_{cc} =strain of confined concrete at maximum stress, $c\sigma_B$ =cylinder strength of concrete, $c\sigma_{cB}$ =compressive strength of confined concrete,

リーズに2～3体のプレーンコンクリート試験体を用意した。試験体総数は17体である。試験体一覧と実験結果をTable 2に示す。コンクリートは調合強度19.2MPa, スランプ18cm, 最大粗骨材粒径20mmである。

載荷は単調載荷であり, 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に示す載荷板間のひずみ4箇所(検長750mm)と試験体中央部4箇所の計8箇所(検長410～500mm)。

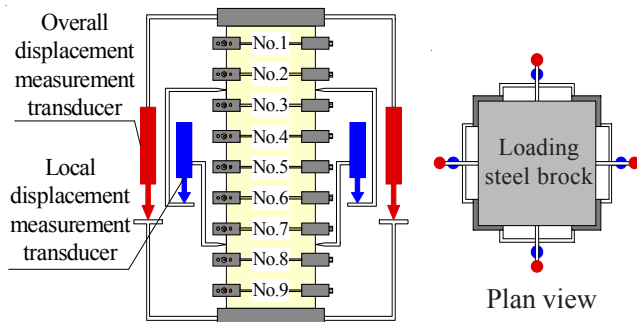


Fig. 2 Axial strain measurement setup

3. 実験結果

Fig. 3に実験による応力ひずみ関係を示す。縦軸は圧縮応力度をプレーンコンクリート強度で無次元化した。Fig. 3よりPC鋼棒に初期緊張ひずみを導入すれば圧縮強度が上昇すること, 初期緊張ひずみより体積比(本論ではPC鋼棒間隔)が降り勾配に影響していることがわかる。これらの特性を定量的に示したのがFig. 4～Fig. 5である。Fig. 4は縦軸が強度上昇率 $c\sigma_{cB}/\sigma_p$, 横軸は能動的横拘束圧をプレーンコンクリート強度で無次元化した値 σ_r/σ_p である。能動的横拘束圧は以下の式で算定した。

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

ここで, ρ_p : PC鋼棒の体積比, σ_{pt} : PC鋼棒の緊張応力度, a : PC鋼棒の断面積, b : 柱幅, s : PC鋼棒の間隔である。Fig. 4より能動的横拘束圧が大きくなれば強度上昇率も増加すること, 強度上昇に寄与する能動的横拘束圧には上限の存在する可能性があることがわかる。Fig. 5(a)は縦軸に圧縮強度が90%に低下したときの圧縮

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

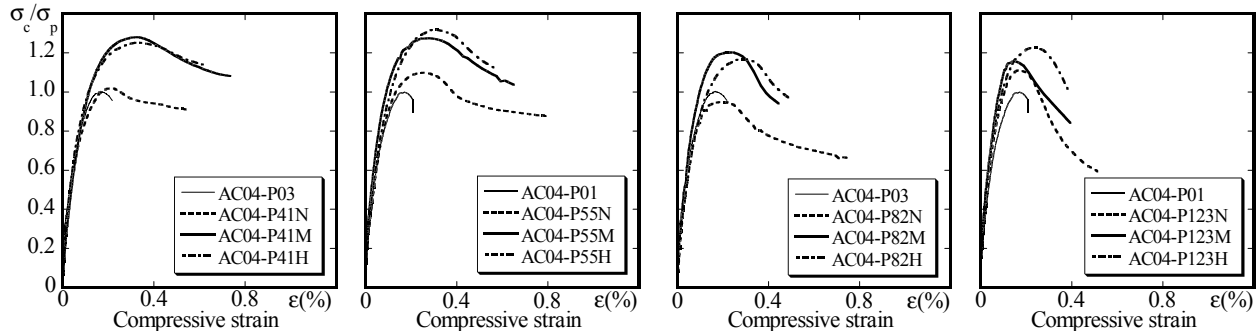


Fig. 3 Stress-strain curves of confined concrete

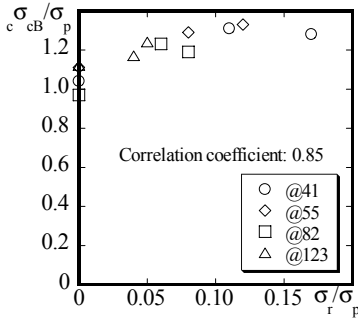


Fig. 4 Strength enhancement by lateral pressure

ひずみと強度時ひずみの比 $\epsilon_{90}/\epsilon_{cc}$ を、横軸に PC 鋼棒の初期緊張ひずみ $p\epsilon$ を示している。Fig. 5 (a) および相関係数 -0.26 より、降り勾配と初期緊張ひずみはほとんど相関のないことがわかる。これは能動的横拘束効果が降り勾配に影響していないことを示唆している。Fig. 5(b) は、縦軸は Fig. 5(a) と同様であり、横軸には PC 鋼棒の体積比 $p\rho$ を示している。Fig. 5(b) より、降り勾配は PC 鋼棒の体積比と相関が認められ (相関係数 0.59)、体積比が大きいほど降り勾配が緩やかになることがわかる。Fig. 6 は、代表して AC04-P82N の PC 鋼棒 (Fig. 2, No.3) ひずみ ϵ_{PC} と圧縮ひずみ ϵ の関係を示している。参考のために AC04-P82N の応力ひずみ関係も併記した。図中の点線が圧縮強度時の圧縮ひずみである。Fig. 6 より圧縮ひずみが進行するにつれて PC 鋼棒ひずみが増加し、受動的横拘束圧が上昇していくことがわかる。この受動的横拘束圧の上昇の影響は、応力ひずみ曲線の降り勾配には明確に現れず、前述したようにむしろ降り勾配には体積比の影響が顕著である。今後は PC 鋼棒径を変えて実験を行い、さらに検討を行う必要がある。ここで全試験体の圧縮強度時の PC 鋼棒ひずみ $p\epsilon_T$ と初期緊張ひずみ $p\epsilon$ の関係を Fig. 7 に示す。初期緊張ひずみの増加と共に圧縮強度時の PC 鋼棒ひずみも増加する。Fig. 8(a) に PC 鋼棒の初期緊張ひずみから圧縮強度時までの増分 $\Delta_p\epsilon$ と、PC 鋼棒の初期緊張ひずみ $p\epsilon$ の関係を、同図(b) に PC 鋼棒体積比 $p\rho$ との関係を示す。Fig. 8(b) には回帰分析の結果も示している。Fig. 8(a), (b) より

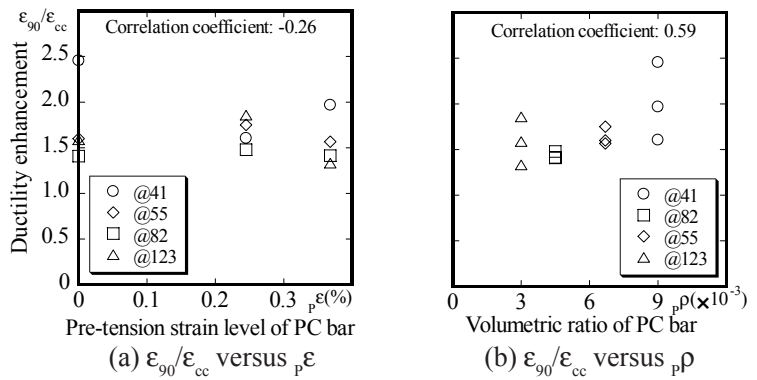


Fig. 5 Ductility enhancement versus pre-tension strain level and volumetric ratio of PC bar

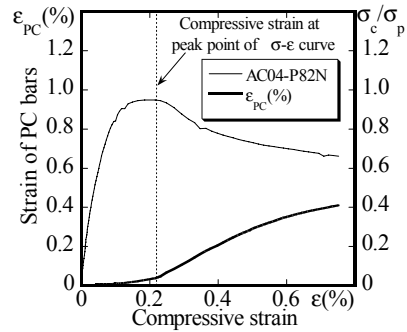


Fig. 6 Strain of PC bar versus axial strain of concrete

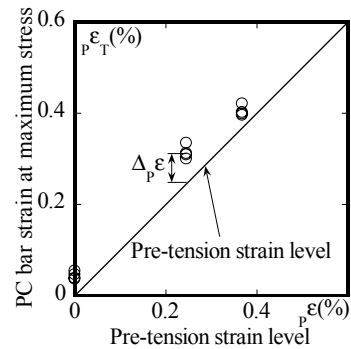


Fig. 7 PC bar strain at maximum stress versus pre-tension strain level of PC bar

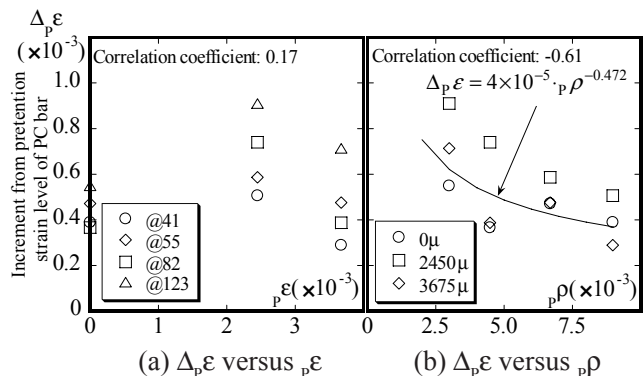


Fig. 8 Increment from pre-tension strain level of PC bar

$\Delta_p\epsilon$ は PC 鋼棒体積比と相関があり、PC 鋼棒体積比が小さいほど (PC 鋼棒間隔が大きいほど) $\Delta_p\epsilon$ が大きくなることがわかる。

4. 既往の応力ひずみ関係式による予測

4.1 Mander 式³⁾を基本とした予測 (N, mm)

本節では、実験データを用いて回帰分析を行い、PC鋼棒で外部横補強されたコンクリート柱の圧縮強度と強度時圧縮ひずみの予測を行う。Fig. 9は縦軸に強度上昇率 $\frac{\sigma_{cB}}{\sigma_p}$ を、横軸に有効横拘束圧 $\frac{p\sigma_e}{\sigma_p}$ を示している。有効横拘束圧は次式で算定した。

$$p\sigma_e = k_e \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot \rho_p \cdot \varepsilon_T \cdot p \cdot E \quad (3)$$

$$k_e = \left\{ 1 - \sum_{i=1}^N \frac{(w_i')^2}{6 \cdot b^2} \right\} \left\{ 1 - \frac{s'}{2 \cdot b} \right\}^2 \quad (4)$$

ここで、 k_e : Manderらによる拘束効果係数³⁾、 w_i' : PC鋼棒の有効支持長さ (Fig. 1 (b)参照)、 s' : コーナーブロック隙間間隔、 $p\varepsilon_T$: 圧縮強度時のPC鋼棒ひずみ (実験値)、 pE : PC鋼棒のヤング係数。本論では、圧縮強度時の横拘束圧については受動的・能動的横拘束圧の影響を分けて考えず、強度時のPC鋼棒ひずみにより統一的に評価する。回帰分析の結果、次式が得られた。

$$\frac{\sigma_{cB}}{\sigma_p} = 1.03 \sqrt{\frac{p\sigma_e}{\sigma_p} + 1.00} \quad (5)$$

独立変数の内、実験データを用いて決定しなければならないのは圧縮強度時のPC鋼棒ひずみである。圧縮強度時のPC鋼棒ひずみは式(6)で表現するものとし、PC鋼棒の初期緊張ひずみからのひずみ増分 $\Delta_p\varepsilon$ は、Fig. 8(b)の回帰式を使用する (式(7))。

$$p\varepsilon_T = p\varepsilon + \Delta_p\varepsilon \quad (6)$$

$$\Delta_p\varepsilon = 4 \times 10^{-5} \cdot p \cdot \rho^{-0.472} \quad (7)$$

Fig. 10は式(5)で求めた強度上昇率の計算値と実験値の比較である。式の誘導に使用した実験データなので、計算結果は実験結果を精度良く評価している。式(5)の精度検証及び帯筋が配筋された場合については来年度の課題である。

Fig. 11には式(8)で表されるManderらによる圧縮強度時ひずみ算定式³⁾の計算結果と、実験結果の比較を示している。

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1 + 5 \left[\frac{\sigma_{cB}}{\sigma_p} - 1 \right] \quad (8)$$

ここで、 ε_{cc} : 圧縮強度時ひずみ、 $\varepsilon_{co} = 0.002$ 。Fig.

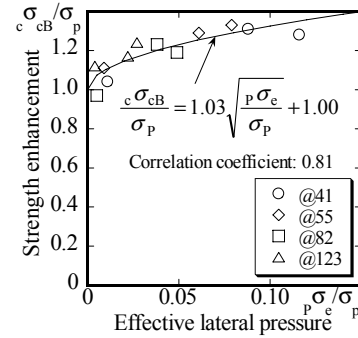


Fig. 9 Strength enhancement versus effective lateral pressure

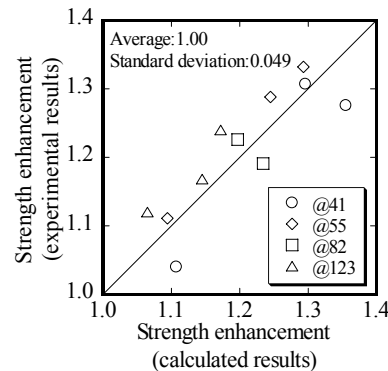


Fig. 10 Comparison of experimental and calculated strength enhancement

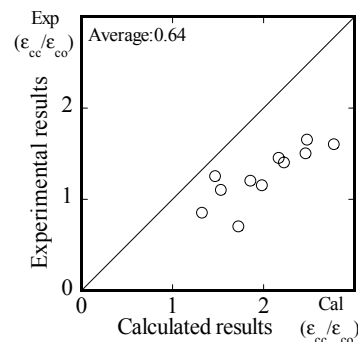


Fig. 11 Comparison of experimental and calculated strain enhancement

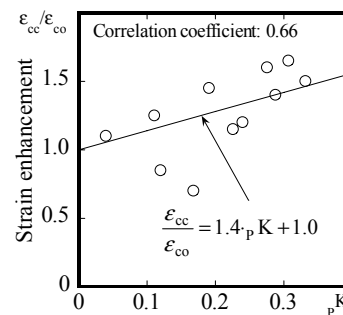


Fig. 12 Strain enhancement versus strength enhancement

11より計算結果は実験結果を過大評価することがわかった (実験値 / 計算値の平均値は0.64)。本試験体は無筋コンクリートであること、また、

PC 鋼棒は圧縮強度時に曲げは発生しないこと、これがRC 柱に対して定式化された式 (8) の過大評価の原因であると考えられる。そこで、実験から得られた強度時ひずみ上昇率 $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{co}$ と、PC 鋼棒による強度上昇率 $({}_pK = \sigma_{cB}/\sigma_p - 1)$ との関係を用いて回帰分析を行い次式を得た (Fig. 12)。

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{co}} = 1.4 \cdot {}_pK + 1.0 \quad (9)$$

$${}_pK = 1.03 \sqrt{\frac{{}_p\sigma_e}{\sigma_p}} \quad (10)$$

式(9)による計算結果と実験結果の対応は良好である (実験値 / 計算値の平均値は0.97)。

4.2 崎野・孫式⁴⁾を基本とした予測

本節では崎野・孫式を基本として応力ひずみ関係を評価する。まず変更点としては、コンファインドコンクリートの強度上昇量をシリンダー強度からの上昇量ではなく、プレーンコンクリートからの上昇量で評価する。従って、式中のシリンダー強度は全てプレーンコンクリート強度に置き換えることにする。

圧縮強度式は、4.1 節で定式化した式 (5) により評価する。基本となる崎野・孫式では補強材の面外剛性に関する変数が有効側圧因子⁴⁾で考慮されているが、本論で述べているPC 鋼棒による外部横補強では拘束状態が異なると考えられる。つまり、本論での拘束状態はPC 鋼棒の引張力による拘束であるので、見かけ上の平均的な側圧を低減させる係数はMander等に従い、有効な拘束面積を与える拘束効果係数で考慮する。

次に強度時ひずみは式(9)を採用し、その時の ε_{co} は崎野・孫式に従い式(11)で与える。

$$\varepsilon_{co} = 0.932(\sigma_p)^{1/4} \times 10^{-3} \quad (11)$$

次に降り勾配係数 D_g ⁴⁾を修正する。降り勾配係数は、次式のように表現するものとする。

$$D_g = 1.5 - 0.017 \cdot \sigma_p + A \cdot {}_p\sigma_D^B \quad (12)$$

$${}_p\sigma_D = \frac{1}{2} \cdot {}_p\rho \cdot \sigma_y \cdot k_e \quad (13)$$

ここで、 ${}_p\sigma_D$: 降り勾配を決定する受動的横拘束圧、 ${}_p\sigma_y$: PC 鋼棒降伏強度。本論では、PC 鋼棒降伏強度に引張試験結果の引張強度を用いてい

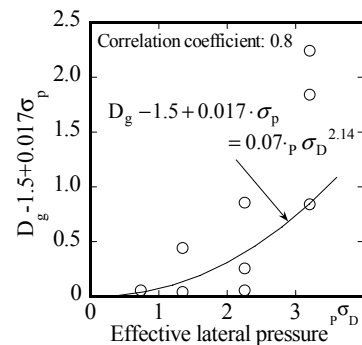


Fig. 13 Experimental results of parameter D

る。これは、使用したPC 鋼棒 (5.4φ) はネジ部の断面面積が小さいためにネジ部により強度が決定し、降伏強度が得られなかったからである。また、降り勾配を決定する受動的横拘束圧をPC 鋼棒の降伏強度で評価するのは、3 章でも述べたように降り勾配はPC 鋼棒の初期緊張ひずみではなく、体積比に影響されるからである。従って、本論ではPC 鋼棒の材料特性である降伏強度で降り勾配算定式の受動的横拘束圧を評価する。まず、実験結果を用いて降り勾配係数を逆算し、次に式(12)の係数A, Bを決定する。降り勾配係数の逆算は式(14)に示すように誤差の平方和が最小となるように行った。

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

ここで、 Y_i : 実験値、 n : 測定点数、変数Y, A, Xは文献4)を参照されたい。このようにして求めた降り勾配係数をFig. 13に示すように整理して回帰分析を行うと係数A, Bが求まり、降り勾配係数の算定式として次式を得る。

$$D_g = 1.5 - 0.017 \cdot \sigma_p + 0.07 \cdot {}_p\sigma_D^{2.14} \quad (15)$$

4.3 応力ひずみ関係の比較

Fig. 14には、4.1 節と4.2 節で修正を行ったMander式と崎野・孫式の計算結果と実験結果の比較を示している。グラフ中の破線がMander式、点線が崎野・孫式による計算結果、実線が実験結果である。(a) ~ (d) がノンプレストレス試験体、(e) ~ (h) がプレストレス試験体である。ノンプレストレス・プレストレス試験体共に圧縮強度まではMander式、崎野・孫式とも良好な評価を与えている。ノンプレストレス試

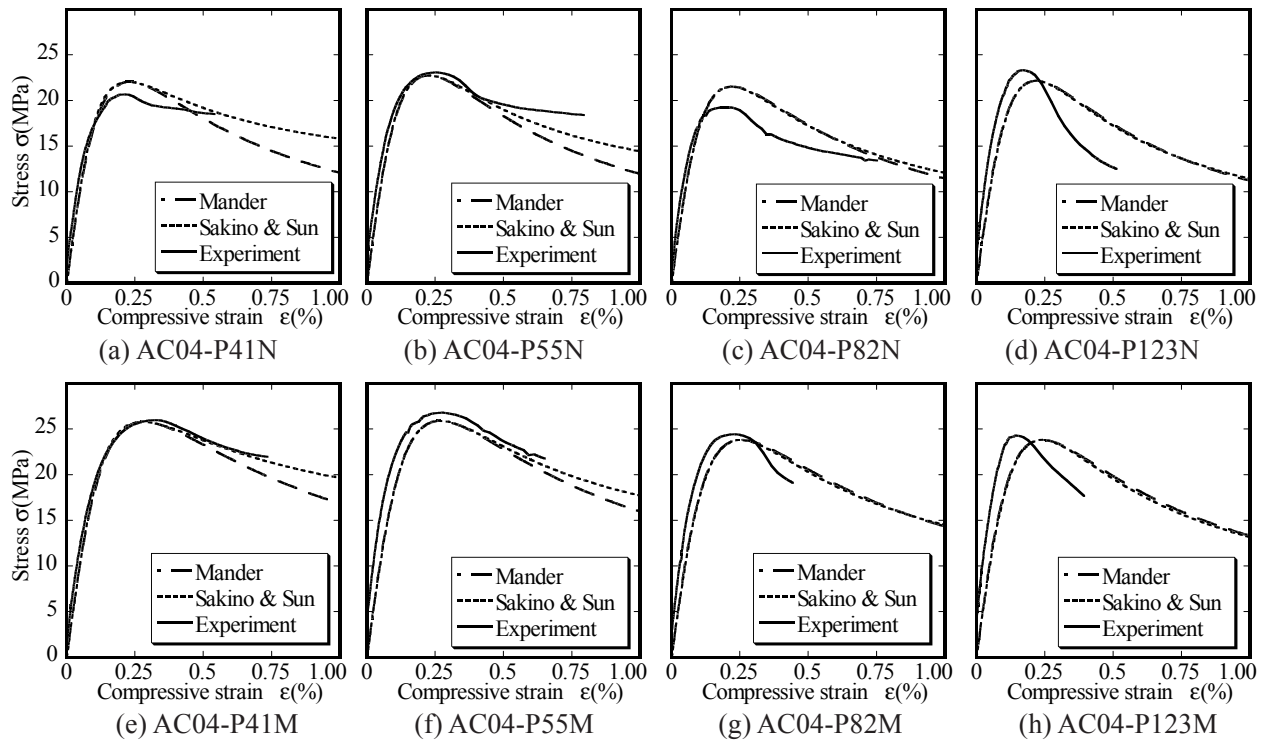


Fig. 14 Comparison of experimental and calculated stress-strain curves of confined concrete

験体では降り勾配の評価が難しく、プレストレス試験体では体積比が小さくなるにつれて降り勾配が良好に評価できなくなる。降り勾配係数の逆算結果をみると、例えばP123シリーズの降り勾配係数の値は、プレーンコンクリートのそれとほぼ同じであり、降り勾配を制御できる崎野・孫式であってもこれ以上の調整が困難だからである。

5. 結論

- 1) PC 鋼棒による能動的横拘束圧は圧縮強度を上昇させる。しかし、強度上昇に寄与する能動的横拘束圧には上限の存在する可能性がある。
- 2) 圧縮強度以後の降り勾配にはPC 鋼棒による能動的横拘束効果は影響しないことが分かった。また、強度以降の受動的横拘束効果上昇の降り勾配に与える影響は、PC 鋼棒の体積比が顕著に影響することが分かった。
- 3) PC 鋼棒の初期緊張ひずみから圧縮強度時までのひずみ増分は、PC 鋼棒に導入する緊張ひずみレベルではなく、体積比と相関のあることがわかった。
- 4) 実験結果と回帰分析から、Mander式および崎

野・孫式を修正した。両式による計算結果は圧縮強度までは良好に評価できるものの、ノンプレストレス試験体においては降り勾配の評価が難しく、プレストレス試験体においては体積比が小さくなる場合に降り勾配評価の難しいことがわかった。帯筋の配筋、PC 鋼棒径の変化、修正式の精度検証は今後の研究課題である。

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: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No.2, pp.103-108, 2004.
- 2) 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, pp.127-132, 2003.
- 3) 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.
- 4) 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.