

高強度鉄筋の全応力-ひずみ関係のモデル化と応用

陳 静

1. 序

近年、RC 構造物の高層化と大スパン化に伴い、高強度材料が広く使用されるようになりつつある。高強度材料を用いれば、鉄筋コンクリート構造物の耐震性能あるいは変形性能などに大きな影響を与えることが知られている。高強度材料を用いた RC 構造の耐震性能を適切に評価するためには、部材の耐力のみならず繰り返し荷重を受けるときの履歴性状も的確にとらえる必要がある。本研究は高強度鉄筋の全応力-ひずみ関係のモデル化を行うことを目的とする。

また、このモデルを用いて、鉄筋コンクリート柱断面の曲げモーメント-曲率関係に関する数値実験を行い、数値実験の結果から拘束 RC 柱円形断面の安定限界軸力比-曲率関係を検討し、安定限界軸力比の評価式を提案することを試みた。

2. 高強度鉄筋の全応力-ひずみ関係のモデル化

2.1 高強度鉄筋の全応力-ひずみ関係モデル

明瞭な降伏棚を示す高強度鉄筋の応力-ひずみ関係包絡線については Mander らの提案式があることから、本研究では、そうでない高強度鉄筋の包絡線について定式化を行う。

降伏棚を示さない高強度鉄筋の包絡線の応力-ひずみ関係を、図 1 に示すような Menegotto-Pinto 関数を用いて式(1)のように表す。

$$f_s = E_s \varepsilon_s \left\{ Q + \frac{1-Q}{\left[1 + |\varepsilon_s / \varepsilon_{ch}|^N \right]^{1/N}} \right\} \quad (1)$$

ここで、 f_s と ε_s は鉄筋の応力とひずみ、 E_s はヤング係数、 ε_{ch} は特性ひずみ、 Q はピーク点 (ε_{su}, f_{su}) での接線剛性 E_t と初期剛性 E_s の比、 N は曲線の湾曲度合いまたは曲率を表す湾曲係数である。 Q 、 N 、 ε_{ch} の値は、式(2)～式(4)で定める。

$$Q = \frac{E_t}{E_s} = 0.1(\varepsilon_{su})^{-2.5}, \quad (\varepsilon_{su} \text{ in } \%) \quad (2)$$

$$N = 3 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{ch} = \frac{f_{su} - QE_s \varepsilon_{su}}{E_s(1-Q)} \quad (4)$$

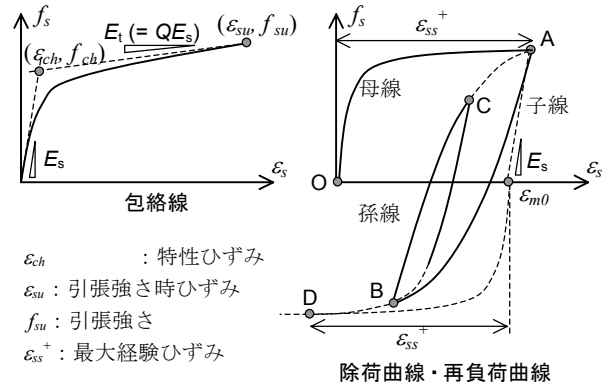


図 1 高強度鉄筋の応力-ひずみ関係

除荷・再負荷曲線を定義するのに先立って、除荷・再負荷曲線の終点の決め方を述べる。

Case 1 母線上の点 A から除荷・再負荷する場合

子線の終点は点 A から初期勾配 E_s で下ろした点 ε_{m0} を始点とする反対側の母線を引き、最大経験ひずみ ε_{ss}^+ の点 D とする。点 D で反対側の母線上に戻る。(図 1 を参照)

Case 2 子線上の点 B から除荷・再負荷する場合

孫線 (BCA) の終点は子線の始点 A とする。点 A で元の母線上に戻る。(図 1 を参照)

Case 3 孫線上の点 C から除荷・再負荷する場合

上層除荷 (または再負荷) 曲線 (ABD) の点 B を終点とする。点 B で上層除荷 (または再負荷) 曲線に戻る。(図 1 を参照)

除荷・再負荷曲線の終点を上述した方法で定めてから、包絡線と同様に除荷・再負荷曲線も、終点をピーク点とする Menegotto-Pinto 関数により定式化を行う。

本論では精度を損なわない前提で計算効率の向上を図るために、除荷・再負荷曲線の定義に必要なパラメーターである Q 、 N 、 ε_{ch} を収束計算のいらぬ方法で求めることにする。この方法で諸パラメーターを算定するにあたって除荷・再負荷曲線の終点での接線剛性は、上層除荷・再負荷曲線の終点での剛性に近いものと仮定した。

除荷・再負荷曲線の始点 (ε_0, f_0)、終点 (ε_b, f_b)、戻り上層除荷・再負荷曲線の Q を Q_R 、 N を N_R 、 ε_{ch} を $\varepsilon_{ch,R}$ と置くと、除荷・再負荷曲線の接線剛性 E_t は式(1)を微分する

ことよって得られ、これを初期剛性 E_s で割ることに
より式(5)から除荷・再負荷曲線の Q の値が求め
られる。

$$Q = Q_R + \frac{1 - Q_R}{\left[1 + \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_0}{\varepsilon_{ch,R} - \varepsilon_0}\right]^{1/N_R}} - \frac{1 - Q_R}{\left[1 + \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_0}{\varepsilon_{ch,R} - \varepsilon_0}\right]^{1 + \frac{1}{N_R}}} \times \left| \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_0}{\varepsilon_{ch,R} - \varepsilon_0} \right|^{N_R} \quad (5)$$

湾曲係数 N については次節の実験結果に基づき試行
錯誤で得られた実験式である式(6)で求める。

$$N = \begin{cases} 3.0 & \varepsilon_b \leq 0 \\ 3.0 - 18 \cdot \varepsilon_b & \varepsilon_b > 0 \end{cases} \quad (6)$$

また特性ひずみ ε_{ch} は、除荷・再負荷曲線の終点が
Menegotto-Pinto関数のピーク点となるので、式(1)に始
点と終点を代入し ε_{ch} について解くと、式(7)が得られる。

$$\varepsilon_{ch} = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_b - \varepsilon_0}{\left\{ \left(\frac{1 - Q}{f_b - f_0} \cdot \frac{1}{E_s} - Q \right) \cdot \frac{1}{\varepsilon_b - \varepsilon_0} \right\}^N - 1} \quad (7)$$

2.2 モデル妥当性の検証

提案モデルの高強度鉄筋への適応性を検証するた
めに KSS785 級異型鉄筋の正負繰り返し載荷試験を行
った。

繰り返し載荷試験の試験片は D13 異型鉄筋を加工し
た、3 本の $\Phi 10$ の丸鋼で、両端を直径 130mm の円形
鋼板に溶接して固定した。3 本の試験片は予定した 3

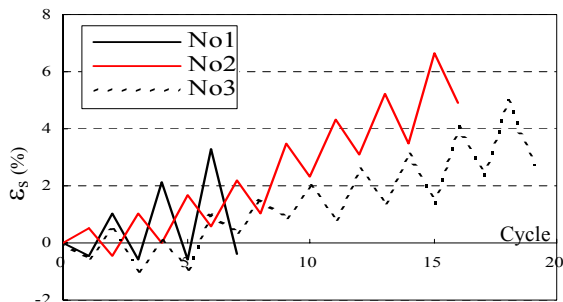


図2 載荷プログラム

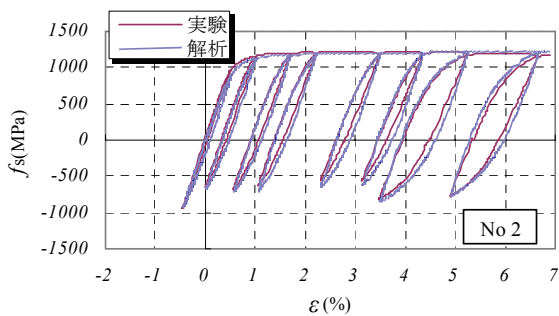


図3 試験片2の計算結果と実験結果の比較

通りの載荷プログラムに従い、目標ひずみ近傍に達し
てから除荷または再負荷を繰り返した。載荷プログラ
ムは図2に示す。載荷プログラムより分かるように、
試験は殆ど引張りひずみ領域にて行われていた。それは
圧縮ひずみへの載荷は試験片を早期に座屈させる恐れ
を避けるためである。

図3には、繰り返し載荷試験の試験片2に関する比
較の結果である。実線は実験結果で、破線は提案した
繰り返し応力-ひずみ関係モデルによる解析結果であ
る。図3より、本提案モデルは高強度鉄筋の繰り返し
履歴を精度良く評価できることが明らかである。

3. 曲げモーメント-曲率関係の解析仮定

断面分割法を用いて、繰り返し曲げモーメントを受
ける鉄筋コンクリート断面の曲げ履歴性状を解決する
際に、次の仮定を設けた。

- ① コンクリートおよび鉄筋のひずみ分布は平面保
持の仮定に従う。
- ② コンクリートは引張応力を負担しない。
- ③ コンクリートの応力-ひずみ関係は崎野・孫式
を用いる。
- ④ 高強度鉄筋の応力-ひずみ関係は本論2節で述
べたモデルを用いる。
- ⑤ 明瞭な降伏棚を示す普通強度鉄筋の応力-ひず
み関係の包絡線は Mander らの提案式を用いる。
- ⑥ 断面の破壊条件は、引張鉄筋ひずみが 0.2 ある
いは断面中央軸圧縮ひずみが 0.04 に達した時と
する。

4. 拘束円形 RC 柱の曲げ履歴性状に関する数値実験

数値実験の対象にしたのは直径が 800 mm の円形断
面である。解析対象断面を図4に示す。断面径は 800
mm、主筋の芯間距離は 640 mm である。また主筋の
配置は合計 12 本である。

数値実験変数は、コンクリート強度と鉄筋の降伏強

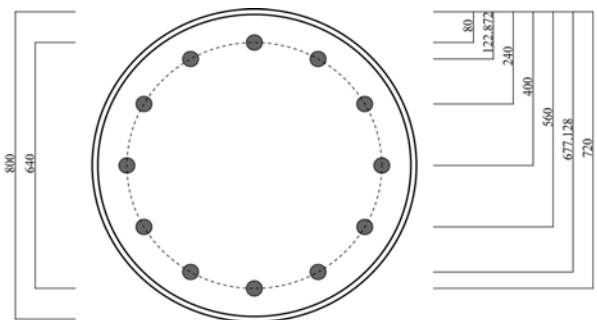


図4 数値実験解析断面の寸法詳細

度、横拘束材によるコンクリートの強度上昇率、主筋比および軸力比の5つである。コンクリート強度 f_c は30MPa、60MPa、90MPaと120MPaの4種類、鉄筋降伏強度 f_{ys} は320MPa、900MPaと1200MPaの3種類である。横拘束材によるコンクリートの強度上昇率 K は1.00、1.05、1.10、1.20、1.30および1.50の6種類、主筋比 p_g は1%、2%、3%、4%と5%の5種類である。軸力比 n が0から0.9までの計10種類を取った。本研究ではこれらの実験変数の組み合わせが異なる3600種類の試験体に関して検討を行った。载荷プログラムとしては、繰り返し曲率振幅の最大値6%とし、曲率振幅を±0.5%ずつ増加させ、同一振幅で4サイクルずつの繰り返し曲げ载荷を行った。図5と図6に、解析から得られる曲げモーメント-曲率関係と軸方向ひずみ-曲率関係の代表的な例を示す。

5. 安定限界軸力比の評価式の提案

一定軸力下繰り返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の耐力および変形能力の低下は主に柱の軸方向縮

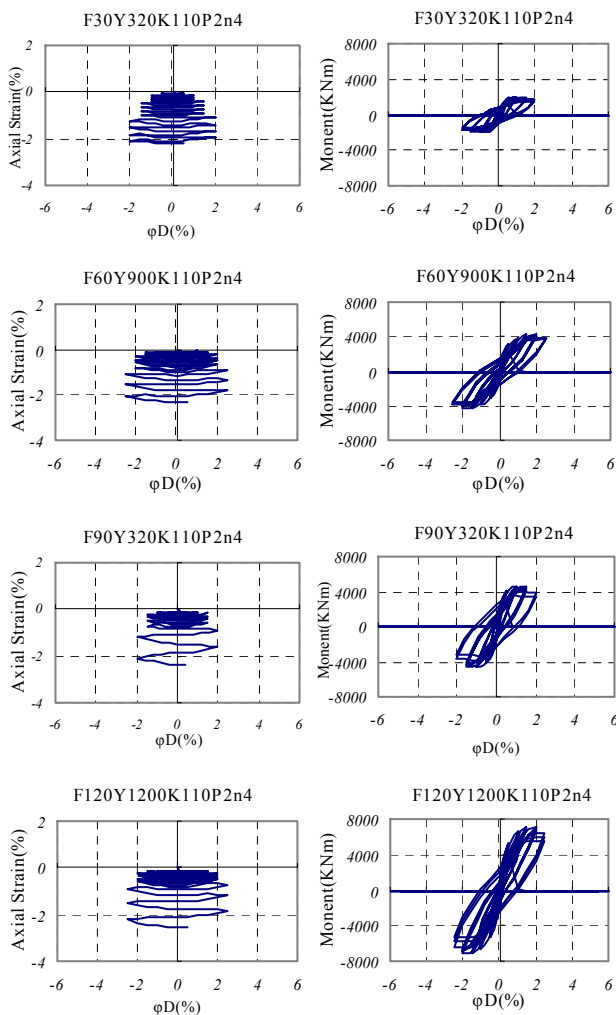


図5 軸方向ひずみ-曲率関係

図6 曲げモーメント-曲率関係

みの累積に起因することが知られている。図7には、 $f_c = 60\text{MPa}$ 、 $f_{ys} = 900\text{MPa}$ 、 $K = 1.2$ 、 $p_g = 2\%$ の試験体(F60Y900K120P2)の断面中央軸方向ひずみと曲率関係を示す。

ある曲率振幅繰り返し载荷を受ける時、断面中央の軸ひずみの増分がプレーンコンクリートの強度時ひずみ ϵ_0 以下に収束する状態を安定状態とする。RC柱が安定した曲げ挙動を示すための限界状態はこの安定状態とし、この安定状態を保つ最大の軸力比を安定限界軸力比と定義する。なお、プレーンコンクリートの強度時ひずみ ϵ_0 は式(8)によって求められる。

$$\epsilon_0 = 0.94 \times (f_c)^{1/4} \times 10^{-3} \quad (8)$$

上記定義に従って、試験体 F60Y900K120P2 の安定限界軸力比と曲率の関係は図8に示すようになる。

全試験体に対して解析を行い、それらの結果により、各変数が安定限界軸力比に及ぼす影響に関する検討を行った。図9、図10と図11には、それぞれ主筋比、強度上昇率および鉄筋の降伏強度をパラメータに取った安定限界軸力比と曲率の関係を示す。この3つの図から分かるように、主筋比、強度上昇率および鉄筋の降伏強度が高くなるにつれて、安定限界軸力比が高くなる。

安定限界軸力比と曲率の関係を求めるための設計式は、逆数模型を用いて式(9)を提案する。式中のパラ

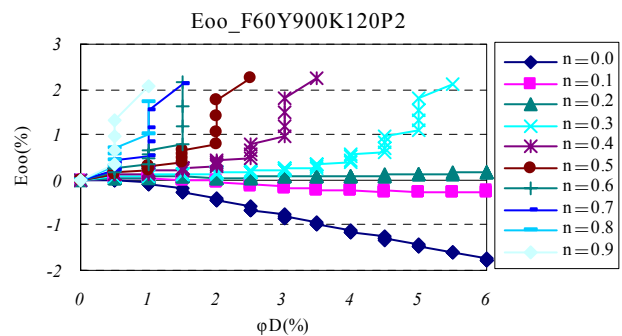


図7 断面中央軸方向ひずみ-曲率関係

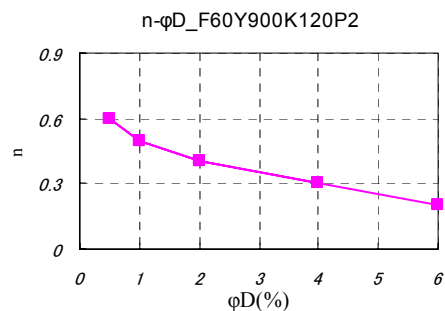


図8 安定限界軸力比-曲率関係

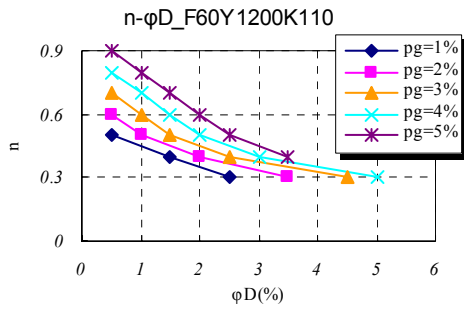


図9 安定限界軸力比—曲率関係（主筋比）

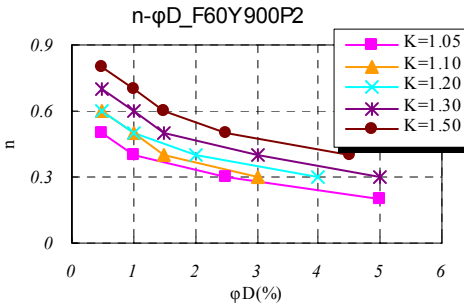


図10 安定限界軸力比—曲率関係（強度上昇率）

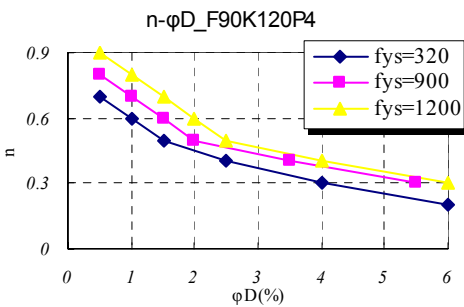


図11 安定限界軸力比—曲率関係（鉄筋降伏強度）

メーター a と b については数値実験結果に線形回帰分析を行った結果、式(10)と式(11)が得られた。

$$n = \frac{1}{a \cdot \Phi D + b} \quad (9)$$

$$a = -\alpha \times \frac{p_g \cdot f_{ys}}{f_c} + \beta \quad (10)$$

$$\alpha = -0.557 \cdot K + 0.928$$

$$\beta = -1.062 \cdot K + 1.884$$

$$b = -\theta \times \frac{p_g \cdot f_{ys}}{f_c} + \delta \quad (11)$$

$$\theta = 0.737 \times K^{-2}$$

$$\delta = -\eta \cdot K + \lambda$$

$$\eta = -0.004 \cdot f_c + 0.858$$

$$\lambda = \frac{1}{(0.002 \cdot f_c + 0.38)}$$

ただし、強度上昇率の適応範囲は 1.0 の場合を除く。

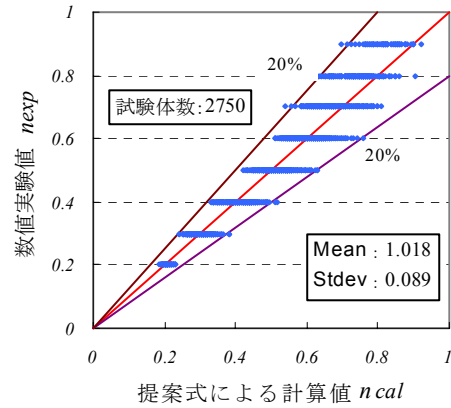


図12 提案式による計算結果と数値実験結果の比較

提案式による計算結果と数値実験結果との比較を図12に示す。図12から分かるように、2750体の試験体に関し、提案式による計算結果と実験結果との比の平均値は1.018で、標準偏差は0.089である。図12より、提案式による計算結果は安定限界軸力比の数値実験結果を精度よく評価できることが明らかである。

6. 結び

Menegotto-Pinto 関数を用いて高強度鉄筋の全応力—ひずみ関係のモデル化を行った。実験結果との比較より、本提案モデルは実験結果を精度良く評価できることが明らかとなった。ただし、本実験は圧縮側のひずみが1%付近までしか行えず、今後高強度鉄筋の圧縮ひずみ領域のデータと比較を行うことが必要である。

このモデルをもとに、繰り返し曲げモーメントを受けるRC柱の曲げ履歴性状を解析し、既往の実験結果を精度よく評価できることが分かった。また、拘束RC柱円形断面に関して数値実験を行い、解析結果から安定限界軸力比—曲率関係を検討し、安定限界軸力比の評価式を提案した。ただし、今回の評価式は強度上昇率が1.0の場合を適用範囲外としており、K=1.0の場合への適用性を考えた修正は今後の課題となる。

参考文献

- 1)大庭央久：拘束 RC 柱の曲げ終局強度および変形性能に関する研究、九州大学修士論文、1996
- 2)田福勝：拘束鉄筋コンクリートの弾塑性性状および安定限界軸力比に関する研究、九州大学学位論文
- 3)孫玉平、崎野健治：正方形鋼管横補強鉄筋コンクリート柱の曲げ終局強度の算定法、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.2、pp.131-136、1996.6