

論文 明瞭な降伏棚を持たない高強度鉄筋の応力 ひずみ関係の定式化と応用

孫 玉平^{*1}・崎野 健治^{*2}・北島 英樹^{*3}・福原 武史^{*4}

要旨：高強度鉄筋の高層建築物における実用例が増えつつある現状を踏まえ、明瞭な降伏棚を示さない高強度鉄筋の応力 ひずみ関係を Menegotto-Pinto 型関数を用いて定式化することを試みた。KSS785 異形鉄筋の引張試験結果に基づいて定式化された応力 ひずみ関係式は、鉄筋のヤング係数、引張強さとその時のひずみの値さえ分かれば、完全に決められる特徴を有する。また、高強度鉄筋を用いた R C 柱について、本モデルに基づく解析結果は水平力 水平変位の試験結果を精度よく評価できることを示した。

キーワード：高強度鉄筋，応力 ひずみ関係，Menegotto-Pinto 型関数，引張強さ

1. はじめに

より高度な鉄筋コンクリート構造物を実現するためには高強度コンクリートと高強度鉄筋の使用が必要不可欠である。地震の多い日本で高強度材料を活用した高層鉄筋コンクリート構造を推進するため、NewRC 総合研究プロジェクトを皮切りに、近年高強度材料を用いた R C 構造の開発研究が積極的に行われてきた¹⁾。それらの研究成果を踏まえて、圧縮強度が 60-100MPa 級のコンクリートと降伏点応力が 1000MPa の高強度鉄筋はすでに実用化されつつある²⁾。

R C 造建築構造物に高強度コンクリート及び高強度鉄筋を有効に利用するためには、高強度材料の特性を積極的に活用した設計手法を確立する必要がある。一方、高強度材料を用いた R C 柱および梁部材の曲げ性状を解析することは構造設計上において重要であり、それを正確に行うには材料の応力 ひずみ関係を的確にモデル化することは必要不可欠である。

筆頭著者の二人はこれまでに高強度材料を用いた R C 部材の曲げ性状の評価方法を開発するための研究の一環として、高強度コンクリートの応力 ひずみ関係の定式化を行った³⁾。本論はその続きとして降伏棚を持たない高強度鉄筋

の応力 ひずみ関係の定式化を目的とする。

2. 高強度鉄筋の引張試験結果

高強度鉄筋の応力 ひずみ関係の定式化に必要な基礎データを取得するために、KSS785 異形鉄筋について引張試験を行った。試験は D6、D10 及び D13 の 3 種類の異形鉄筋試験片について行っており、表 1 に引張試験の主たる実験結果を示す。表中に記されている数値は各鉄筋径について 3 本の試験片 (2 号) の実験結果の平均を表す。また、図 1 には引張応力 ひずみ関係曲線の実験結果をプロットしている。

図 1 より明らかのように、KSS785 異形鉄筋は応力 ひずみ曲線が明瞭な降伏棚を示さず、

表 1 主な引張試験結果

Notation	D6	D10	D13
E_s (GPa)	187	177	175
f_{sy} (MPa)	1042	997	915
f_{su} (MPa)	1209	1169	1106
ϵ_{su} (%)	5.18	2.79*	5.29
ϕ (%)	9.00	-	7.79

注： f_{sy} = 0.2% オフセット降伏点応力， ϕ = 伸び率

f_{su} と ϵ_{su} = 引張強さと引張強さ時ひずみ

*1 九州大学大学院 人間環境学研究院 助教授 工博 (正会員)

*2 九州大学大学院 人間環境学研究院 教授 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院 人間環境学府 都市共生デザイン専攻

*4 九州大学大学院 人間環境学府 都市共生デザイン専攻 (正会員)

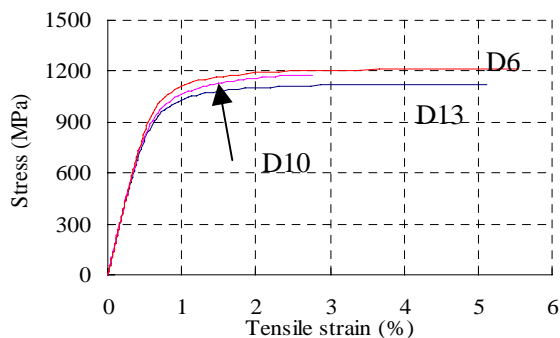


図 1 高強度鉄筋の引張試験結果

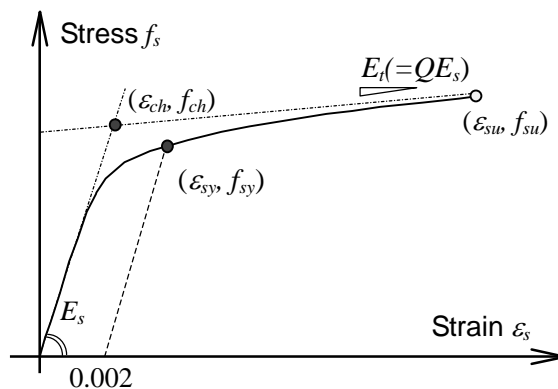


図 2 Menegotto-Pinto モデルの概要図

典型的な高強度鉄筋である。

3 . Menegotto-Pinto モデルによる定式化

3.1 Menegotto-Pinto モデルの概要

明瞭な降伏棚を示さない高強度の応力 ひずみ関係を定式化するには、これまでに Ramberg-Osgood モデルがよく用いられてきた。しかしながら、Ramberg-Osgood 型の応力 ひずみ関係では鉄筋の応力がひずみの関数として与えられず、ひずみが応力の関数として定義されており、かつ応力がひずみから簡単に求められない。従って、Ramberg-Osgood 型の応力 ひずみ関係は高強度鉄筋を用いた鉄筋コンクリート部材の断面解析にはあまり向いているとは言い難い。

本論では、応力はひずみの関数として直接求めることが可能な、Menegotto-Pinto 型モデル⁴⁾を用いて、明瞭な降伏棚を示さない高強度鉄筋の単調載荷時の応力 ひずみ関係を定式化する。

図 2 に Menegotto-Pinto 型の応力 ひずみ関係曲線の概要を示す。曲線はヤング係数 E_s を勾配に持つ直線 L_1 とピーク近傍における接線(勾配 $E_t = QE_s$) L_2 を漸近線とするものであり、曲線の方程式は式(1)に表される。

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

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 はピーク点での接線勾配とヤング係数(初期勾配)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。

式(1)より分かるように、Menegotto-Pinto 型の応力 ひずみ曲線を明瞭な降伏棚を持たない高強度鉄筋に適用する際には、 Q 、 N 、及び ε_{ch} で表される3つのパラメータ - を決める必要がある。以下、これらのパラメータの決め方について述べる。

3.2 パラメータ Q の算定式

パラメータ Q の値は、応力 ひずみ関係のピーク点近傍における接線剛性 E_{tu} をピーク点近傍の実験結果に直線回帰分析を施すことによって直接定めて、それを Q の算定式 ($= E_{tu} / E_s$) に代入すれば求まる。しかしながら、このような方法では、モデルの利用者(構造設計者)にその都度鉄筋の引張試験結果に対して回帰分析を行うことを強いることになり、使いやすさに問題がある。そこで、本論では、応力 ひずみ関係曲線の大変位域での接線剛性を前節で述べた実験結果からひずみの関数として求め、この関数をもって Q の値を求めることにする。

図 3 には、応力 ひずみ関係曲線の 1.0% 以上の領域における各点での接線剛性 E_t とひずみの関係曲線をプロットしている。図中の接線剛性 E_t の実験結果は引張試験曲線上の隣接している二点を結んだ直線の勾配として求められた。図に示すような実験結果に最適曲線を当てはめた結果、 Q の値を求めるための算式が以下のように得られた。

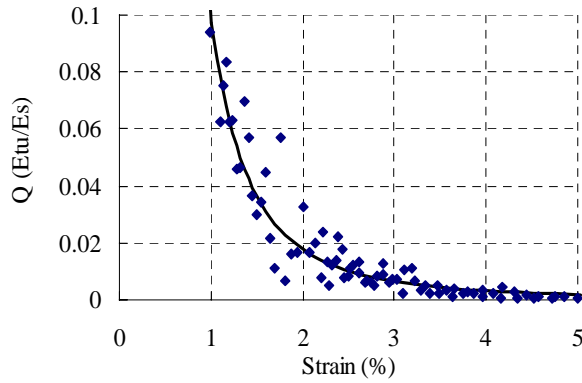


図 3 接線剛性の実験結果例

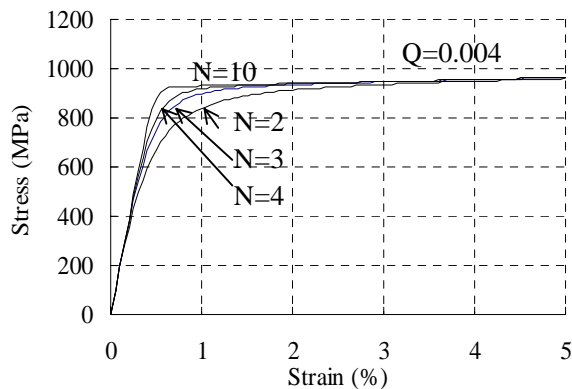


図 4 湾曲係数の影響

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

ここで、 ε_{su} は引張強さ時ひずみである。

3.3 特性ひずみ ε_{ch} の算定

Q の値を式(2)により求めれば、特性ひずみ ε_{ch} は直線 L_1 と直線 L_2 の交点座標として式(3)により求まる。

$$\varepsilon_{ch} = \frac{f_{su} - QE_s \varepsilon_{su}}{E_s(1-Q)} \quad (3)$$

ここで、 ε_{su} と f_{su} は応力 ひずみ関係のピーク点におけるひずみと応力である。

3.4 湾曲係数 N の算定式

湾曲係数 N の求め方を述べる前に、 N の値は鉄筋の応力 ひずみ関係曲線の形状にどのような影響を及ぼすかについて検討してみる。図 4 には検討例を示す。

図 4 より、 N の値が大きくなるにつれて、応力 ひずみ関係曲線は滑らかな曲線から次第に直線 L_1 と直線 L_2 からなる折れ線に近づいて

いくことが分かる。

次に、湾曲係数 N の求め方について述べる。

まず、実験により得られた応力 ひずみ関係曲線上の各点における湾曲係数 N_i を求めるための算定式の誘導を行う。

鉄筋の応力 ひずみ曲線上の各点 (ε_{si} , f_{si}) における割線剛性 $E_{sec,i} (= f_{si} / \varepsilon_{si})$ を式(1)より次のように求めることができる。

$$E_{sec,i} = \frac{f_{si}}{\varepsilon_{si}} = E_s \left\{ Q + \frac{1-Q}{\left[1 + \left| \frac{\varepsilon_{si}}{\varepsilon_{ch}} \right|^N \right]^{1/N}} \right\} \quad (4)$$

また、式(1)をひずみについて微分し、更に $X = \varepsilon_{si} / \varepsilon_{ch}$ と置けば、曲線上各点での接線剛性 E_{ti} は次のように求まる。

$$E_{ti} = \left. \frac{df_s}{d\varepsilon_s} \right|_{\varepsilon_s = \varepsilon_{si}} = E_s \left[Q + \frac{1-Q}{\left(1 + X^N \right)^{1/N}} \right] - \frac{E_s(1-Q) X^N}{\left(1 + X^N \right)^{1/N+1}} \quad (5)$$

一方、式(4)を式(5)に代入すると、次のような関係式が導かれる。

$$E_{sec,i} - E_{ti} = E_s(1-Q) \frac{X^N}{\left(1 + X^N \right)^{1/N+1}} \quad (6)$$

また、式(5)からは

$$E_{ti} - QE_s = E_s(1-Q) \frac{1}{\left(1 + X^N \right)^{1/N+1}} \quad (7)$$

が得られる。

よって、式(7)を式(6)に代入し、さらに適切な演算を行えば、応力 ひずみ関係曲線上各点における湾曲係数 N_i の値を求める式として式(8)が導かれる。

$$N_i = \frac{\ln \left| \frac{E_{sec,i} - E_{ti}}{E_{ti} - QE_s} \right|}{\ln \left| \frac{\varepsilon_{si}}{\varepsilon_{ch}} \right|} \quad (8)$$

なお、式(8)を用いて実験結果より N_i を求める際

に、各点における接線剛性 E_{ti} の実験結果を次式で求めればよい。

$$E_{ti} = \frac{f_{si} - f_{si-1}}{\varepsilon_{si} - \varepsilon_{si-1}} \quad (9)$$

ここで、 f_{si} と f_{si-1} は実験曲線上 i 番目点と $i-1$ 番目点での応力で、 ε_{si} と ε_{si-1} は i 番目点と $i-1$ 番目点でのひずみである。

最後に、引張試験により得られた応力 ひずみ関係曲線の降伏点 (ε_{ys} , f_{ys}) からピーク点 (ε_{su} , f_{su}) までの各点に対して式(8)を用いて求めた N_i の平均値を湾曲係数 N の初期値とし、その値について試行錯誤的に微調整を施せば実験結果を最もよくフィットできる場合の N の値が得られる。

前節で述べた引張試験結果に対して、上述した方法で求めた N の値は 2.8 ~ 3.3 の間にあった。一方、図 4 から分かるように、 N の値は 3.0 前後では多少の変動があっても応力 ひずみ関係曲線の形状に与える影響が軽微であることから、提案モデルをできるだけ簡潔なものにすべきことから、本論では、 N の値は 3.0 という一定値を取ることにする。

4. モデルの妥当性の検討

図 - 5 には本論で提案したモデルで求めた高強度鉄筋の応力 ひずみ関係の計算結果と実験結果との比較を示す。図中の実線で示されている実験結果には、本論第 2 節で述べた実験結果のほか、文献 3 で述べた実験に用いられた高強度鉄筋(USD685)の引張試験結果をも記載されている。また、比較のため鉄筋を完全弾塑性材料と仮定した場合の応力 ひずみ関係も合わせて図中に示している。

図 - 5 より分かるように、降伏点を過ぎた時点から鉄筋を完全弾塑性材料と仮定した場合の応力 ひずみ関係(太い実線で示されている)は実験結果との差が顕著になり、特に軸ひずみが 1.0%を超えた変形領域ではその差が無視できないほど大きくなっている。それに対して、Menegotto-Pinto 型の応力 ひずみ関係式を用い

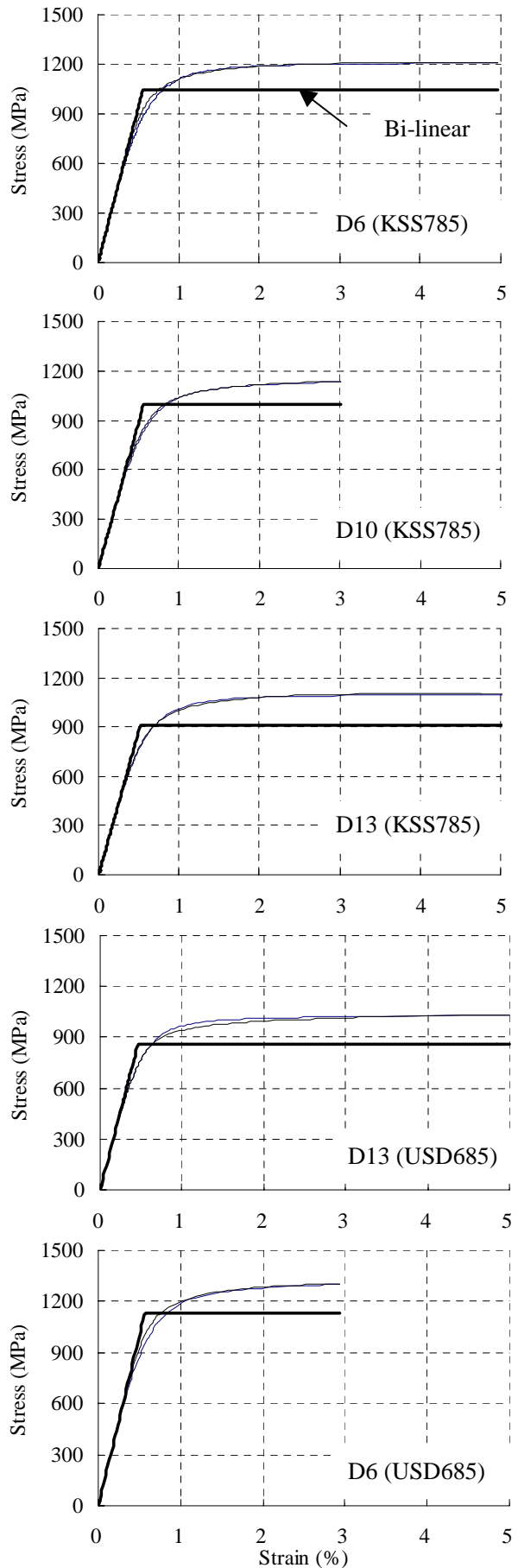


図 5 応力 ひずみ関係曲線の比較

て得られた解析結果（点線で示されている）はすべての引張試験片の実験結果を非常に高い精度で近似している。このことは式(1)で示すような Menegotto-Pinto 型の応力 ひずみ関係方程式が明瞭な降伏棚を持たない高強度鉄筋の単調載荷時の応力 ひずみ関係を精度良く表現できることを示している。

5. モデルの応用

前節で定式化した、明瞭な降伏棚を示さない高強度鉄筋の応力 ひずみ関係モデルを部材断面の曲げ解析に適用し、鉄筋を完全弾塑性材料と仮定した場合の応力 ひずみ関係に基づく曲げ解析結果との比較を通じて、モデルの適用性を検証する。

計算対象部材は、著者らは九州大学で実施している、高性能コンクリート骨組み構造の開発研究の一環として行われた、繰り返し履歴載荷を受ける高強度RC柱である（図 - 6 を参照）。

対象柱は、設計圧縮強度が 80MPa のコンクリートと本論第 2 節で述べた KSS785 級高強度異形鉄筋（D13）を用いて作られたもので、一定軸力下における繰り返しせん断載荷を受けた。柱の横拘束には普通強度の鋼板を用いた。また、図 - 6 より分かるように、柱は 250 mm × 250 mm の正方形断面を有し、柱のせん断スパンは 625 mm（せん断スパン比 2.5）となっている。

対象柱断面の曲げ性状を解析するにあたって設けた仮定は以下の通りである。1) 平面保持の仮定、2) コンクリートは引張応力を負担しない、3) コンクリートの圧縮応力 ひずみ関係は NewRC モデル¹⁾に従う、4) 主筋の応力 ひずみ関係は本論で提案した Menegotto-Pinto 型モデルによって与えられる。

図 7 には対象柱断面の曲げモーメントと断面せいDで無次元化された曲率の計算結果例を示す。比較のために、鉄筋の応力 ひずみ関係は完全弾塑性型モデルに従う場合の計算結果をも細い線で図中にプロットしている。図中の N は n はそれぞれ軸力と軸力比を表す。

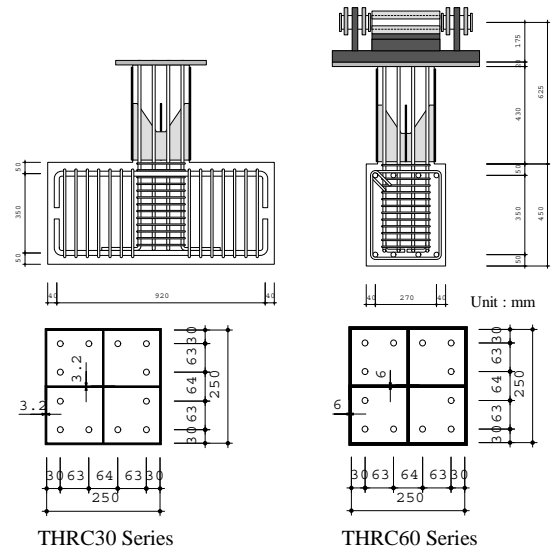


図 - 6 解析対象柱の概要

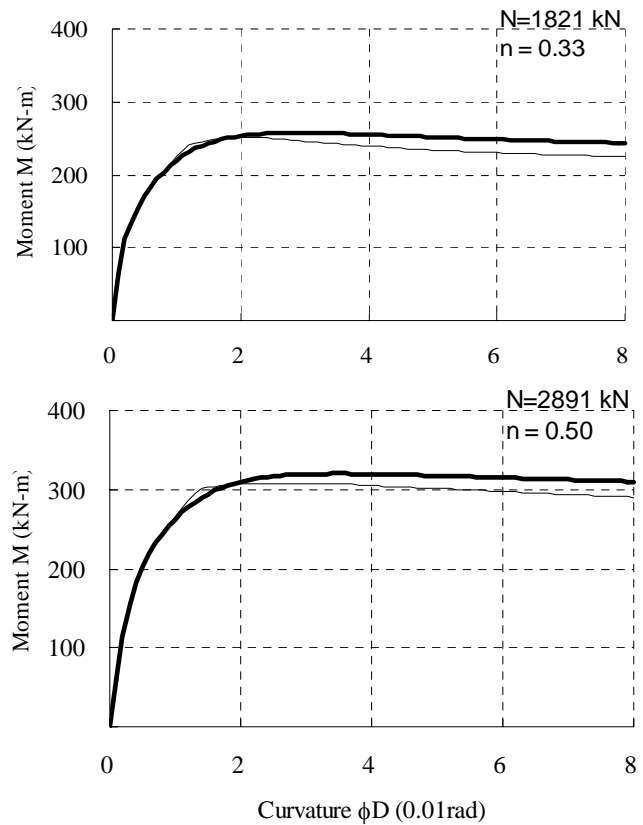


図 - 7 柱断面曲げ性状の検討

図 7 より明らかなように、高強度鉄筋の応力 - ひずみ関係に Menegotto-Pinto 型モデルを用いて求めた計算結果は完全弾塑性型モデルによる計算結果より、曲げ耐力が数パーセントしか変わらないが、曲げ耐力に達する時の曲率が倍ぐらい大きい。性能規定型耐震設計法を用いる

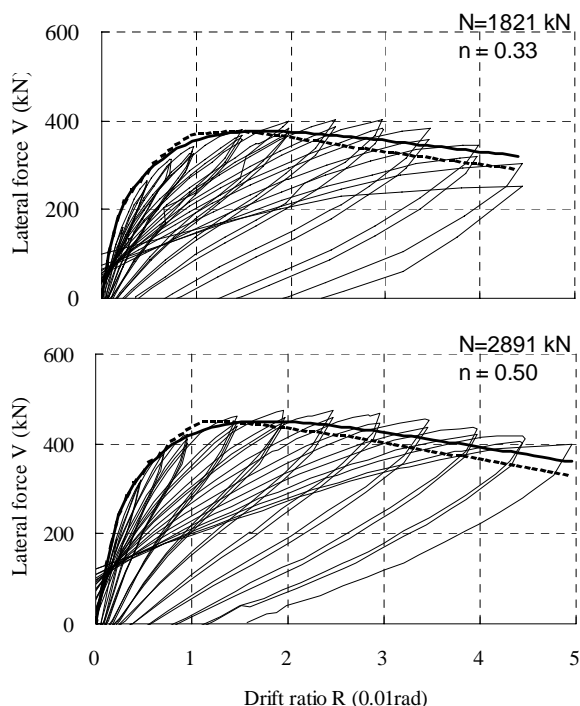


図 8 水平力 部材角関係の比較

際に、耐力時変形の適切な評価が重要視されつつあることを加味すると、明瞭な降伏棚を示さない高強度鉄筋の応力 ひずみ関係曲線として Menegotto-Pinto 型モデルを用いることは、妥当な曲げ性能評価に繋がると思われる。

この考察の妥当性を検証するために、柱の水平耐力 V と部材角 R との関係について、計算結果と実験結果との比較を行った。比較の結果を図 8 に示す。図中の実線は Menegotto-Pinto モデルを用いて求めた単調載荷時の計算結果で、破線は完全弾塑性モデルに基づく単調載荷曲線である。

柱断面の曲げモーメントと曲率関係から水平力と部材角関係を算定する際に、集中ヒンジモデルを用いた。すなわち、柱の水平変形は主に柱端部にある、長さ L_p を有する塑性ヒンジ領域の曲げ変形によるものとした。このような仮定に基づけば、曲げモーメントなどが水平力等との対応関係が以下のように表せる。

$$V = \frac{M}{L} - P \cdot R, \quad R = \phi D \cdot \frac{L_p}{D} \left(1 - \frac{L_p}{2L} \right) \quad (10)$$

ここで、 D は柱の断面せい、 L は柱のせん断スパン、 P は軸力である。なお、塑性ヒンジ長さについては、コンクリート部材解析に広く用いられている仮定に従い、 $1.0D$ とした。

図 8 から分かるように、Menegotto-Pinto 型モデルと完全弾塑性モデルによる計算結果は柱の実験耐力をほぼ同じ精度で評価できる。しかしながら、耐力時の水平変形については、完全弾塑性モデルによる計算結果は実験結果を大きく下回ったのに対して、Menegotto-Pinto 型モデルを用いた解析結果は実験値との対応が非常に良好である。また、耐力後の変形能力に関しても、Menegotto-Pinto 型モデルを用いた解析結果は実験結果とよく対応していることが図 8 より伺える。

結論

明瞭な降伏棚を持たない高強度鉄筋の応力 ひずみ関係を Menegotto-Pinto 型関数で定式化し、このモデルを用いれば、高強度材料を用いた RC 部材の力学性状を精度よく評価できることを明らかにした。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター：平成 4 年度 NewRC 研究開発概要報告書、平成 5 年 3 月
- 2) 並木 哲，他：FC1000 kg/cm² の高強度コンクリートを用いた超高層建築物の施工，コンクリート工学，Vol.37, No. 3, pp.35-38, 1999 年 3 月
- 3) 孫玉平、崎野健治：Ductility Improvement of Reinforced Concrete Columns with High-Strength Materials, Transactions of the JCI, pp. 455-462, 1993 年
- 4) Menegotto, M and Pinto P. E.: Method of Analysis for Cyclically Loaded RC Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending, IABSE Congress Reports of the Working Commission Band 13, 1973.