

論文

[2026] 鉄筋モデルの相違がRC柱部材のM-Φ解析結果に及ぼす影響

村山八洲雄*1・古市耕輔*2・S.Sivasubramanyan*3・S.A.Mahin*4

1. はじめに

RC柱部材の2軸曲げ復元力特性を解析的に推定する方法として、塑性ポテンシャル理論による方法、マルチスプリングモデルによる方法、およびファイバーモデルによる方法などがある。このうち、力学的根拠が明確で汎用性のあるファイバーモデルによる解析が、高橋脚や斜張橋塔など橋梁分野でも利用されるようになってきた。

ファイバーモデルによる解析では、これに取り込む鉄筋モデルの特性が解析結果に大きく現れることがある。しかし、鉄筋モデルの違いによる影響を比較検討した報告は殆ど見あたらない。また、既往の実験による適用性の検証は、本解析法の基本になっている曲げモーメント-曲率(M-Φ)関係ではなく、積分計算も含めた荷重-変位(P-δ)関係に関するものであった。

そこで、最も単純な1方向純曲げを受けるRC柱部材を対象に、軸力や柱筋比をパラメータとした実験を行い、各試験体について、解析でよく用いられる4種類の鉄筋モデルを用いたシミュレーション解析を行い、M-Φ関係の比較検討を行った。

2. 実験

2.1 概要

実験では、軸応力度 σ_N と柱筋比 p_l をパラメータとした。一般橋脚を想定したU1試験体(σ_N 7kg/cm²、 p_l 0.95%)、高橋脚や斜張橋塔を想定したU2試験体(σ_N 80kg/cm²、 p_l 0.95%)、建築柱部材を想定したU4試験体(σ_N 80kg/cm²、 p_l 2.85%)、および中間的なU3試験体(σ_N 80kg/cm²、 p_l 1.90%)の4体について行った。

2.2 試験体諸元

試験体諸元を図-1に示す。外形寸法は全ての試験体で同じで、断面は16cm×25cmの長方形、長さは1.3mである。コンクリートには最大骨材寸法 G_{max} 10mmのマイクロコンクリートを使用した。U1、U2、U3、およびU4試験体のコンクリートの実験時圧縮強度は、それぞれ、473、443、412、および414kgf/cm²であった。高剛性試験機による圧縮試験で得られたコンクリートの応力-ひずみ($\sigma_c - \epsilon_c$)関係は、図-2に示すように既往の普通コンクリートの場合とよく似たものであった。この試験に用いた3本の供試体の平均圧縮強度は439kg/cm²であった。

柱筋にはD6鉄筋(SD295)を、帯筋には縮小異形3mm鉄筋(SD295相当)を使用した。軸方向鉄筋の降伏強度 f_y は、3,030kgf/cm²、引っ張り強さ f_{max} は4,790kgf/cm²、降伏ひずみ量 ϵ_y は 1.580×10^{-6} 、硬化点ひずみ量 ϵ_h は1.5%、ヤング係数 E_s は 1.9×10^6 kgf/cm²、硬化時

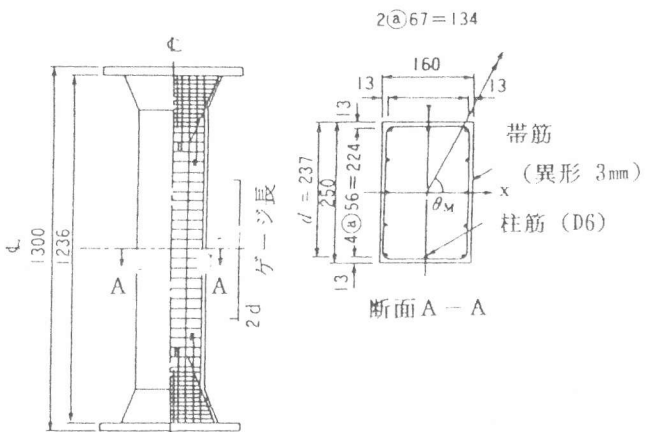


図-1 試験体諸元

*1 鹿島技術研究所主管研究員(正会員)

*2 鹿島技術研究所研究員(正会員)

*3 モラツワ大学講師

*4 カリフォルニア大学教授

ル、cubicモデル、Ramberg-Osgoodモデル、および加藤モデルの4種類を取り上げた。bilinearモデルの単調増加曲線は、 ε_y を境に E_s と E_h の勾配を有する2本の直線で与えた。他の3種類のモデルでは、勾配が E_s の弾性領域、 ε_y から ε_h までの降伏棚、およびその後の3次曲線で表した。3次曲線は初期勾配が E_h 、 f_{max} に対応するひずみ量 ε_{max} において勾配が0の曲線とし、その後は、傾き0の直線とした。以下に、各モデルの履歴ルールを述べるが、除荷時およびその途中の再載荷時の曲線は全て勾配 E_s の直線としている。

(a) bilinearモデル(B/L) スケルトンの内側では勾配 E_s で変化し、スケルトンに達したら、以降、第2勾配 E_h の直線上を進むものである。

(b) cubicモデル(Cu) 応力度の符号が反対の領域への載荷である軟化領域は、過去の最大応力度の点を目標点とする初期勾配 E_s の3次曲線である。曲率は常に外側に凸であることとし、変曲点が生じる場合は、生じない限界まで応力度を一定にして目標点をシフトさせている。

(c) Ramberg-Osgoodモデル(R/O) 軟化曲線は、累積塑性ひずみ量を考慮した指数関数で表現するものである。Park-Paulayが鉄筋に関する実験結果をもとに提案したもの[2]を用いた。

(d) 加藤モデル(Kt) 軟化域では過去最大の応力度に対する割線勾配を累積塑性ひずみ量をもとに決め、最大応力度点との間を双曲線関数とするものである。過去の最大応力度を超える領域では、累積塑性ひずみ量の分だけシフトさせた単調増加曲線としている[3]。

(e) Menegott-Pintoモデル(M/P)

上記以外にMenegott-Pintoモデル[4]も比較的良好に用いられている。このモデルはスケルトンがbilinearで、この2直線に対する内部履歴曲線の漸近(履歴曲線の広がり)の程度をインプットデータで調節できるようになっている。内部履歴曲線の広がり程度を別にすれば、本モデルの特性は上述のbilinearモデルで大略把握できると思われる。

(f) インプットデータ

解析で用いた鉄筋に関する諸定数として、 f_y 、 f_{max} 、 ε_y 、 ε_h 、 E_s 、および E_h などは材料試験結果をそのまま用い、 ε_{max} は9.5%に設定した。M- Φ シミュレーション解析では、実験で得られた曲率を入力し、曲げモーメントを出力するという方法による。

4. 解析結果

①M- Φ 曲線 解析結果を、実験結果とともに図-3に併記した。軸力の大きいU2およびU4試験体に関しては、どの鉄筋モデルを用いても解析結果は2.4節で述べたM- Φ 曲線の特徴を捕らえており、解析モデル間の相違は少ないように思われる。しかし、軸力の小さいU1試験体に関しては、2.4節で述べたM- Φ 関係の基本的特徴は表現されているものの、曲線形状には解析モデル間の相違がかなり明確に現れていることが分かる。

② $\sigma_s - \varepsilon_s$ 曲線 鉄筋モデルの特徴をよく表しているU2試験体最外縁鉄筋の $\sigma_s - \varepsilon_s$ 関係を一例として図-4に示した。図中の幾つかの曲線の不連続性は、解析のステップ間隔に起因する作図上の理由による。B/LモデルとKtモデルでは、同一サイクルのピーク応力度は引っ張り側が圧縮側よりも大きくなっている。これに対しCuモデルでは、比較的小さなひずみ変化で材料強度に達し、引っ張り、圧縮ともピーク応力度は殆どのサイクルで材料強度に達している。そのため、履歴曲線も幅の広いものとなっている。R/Oモデルでは、履歴曲線の引っ張り側で降伏応力度の下側を通るサイクルが多いため、総じて引っ張り側のピーク応力度が小さめであり、反対に圧縮側では殆どのサイクルでピーク応力度が材料強度に達していることが分かる。

5. M-Φ解析値に対する鉄筋モデルの影響

5.1 U1試験体

各鉄筋モデルを用いて計算した割線勾配、履歴曲線の面積（吸収エネルギー量）、曲線形状の代表値としての縦軸切点間距離を、実験値との比率として図-5～7に示した。ここで、割線勾配はスケルトンの高さで見做すこともできる。これらの図から、つぎのことが言える。

① B/Lモデル 割線勾配と吸収エネルギー量を塑性率が小さいときに過少評価している。履歴曲線の形状は総じて実験結果に近いものを与える。

② Cuモデル 割線勾配の大きさは、塑性率の広い範囲で実験値に近い値を与える。しかし、塑性率が大きいと吸収エネルギー量を過大評価し、履歴曲線の形状も実験結果と異なってくる。

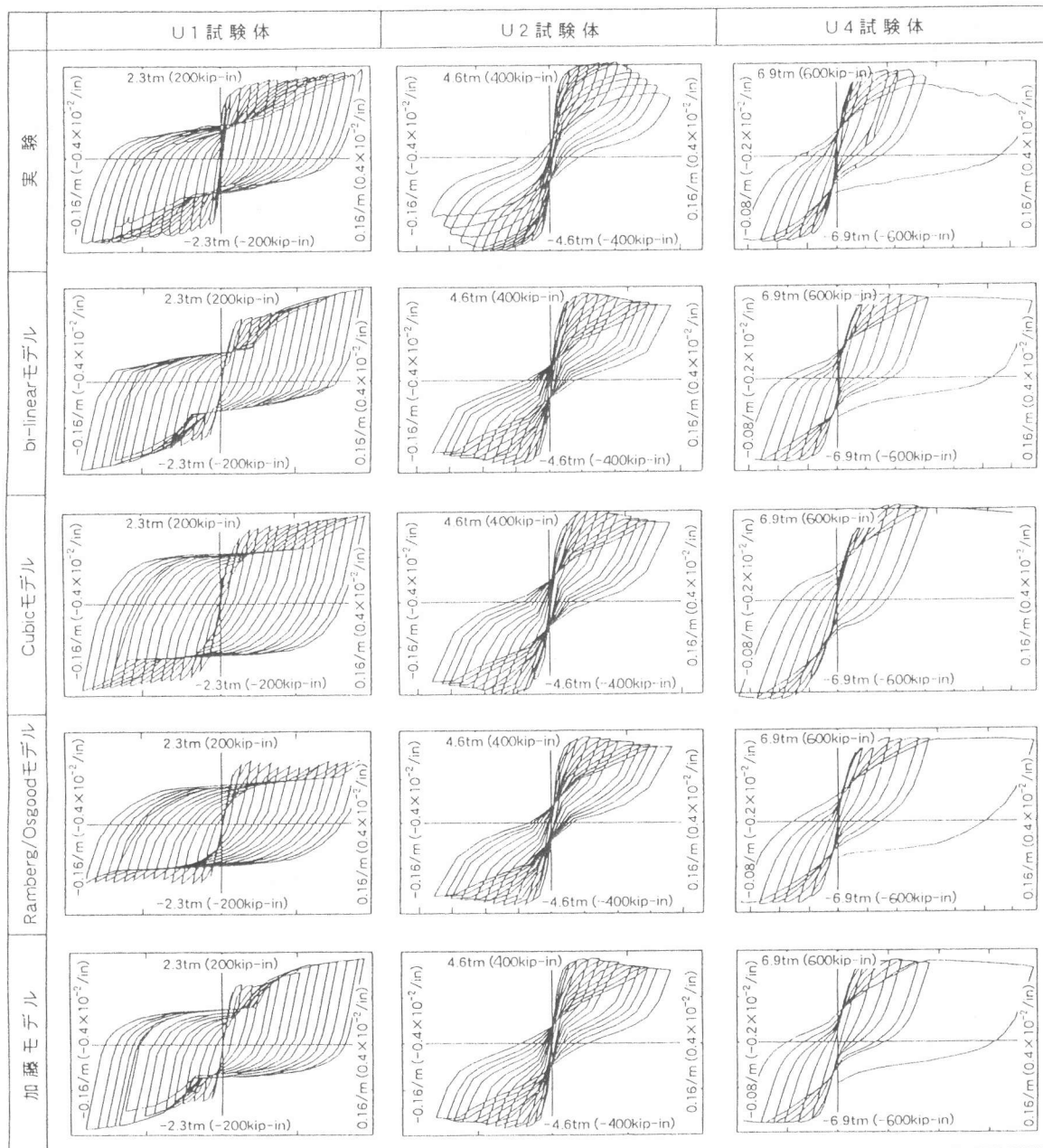
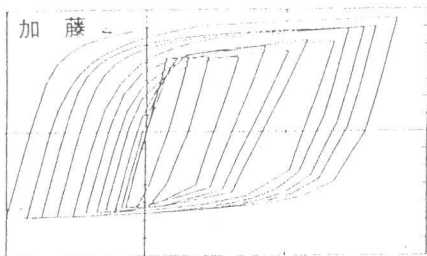
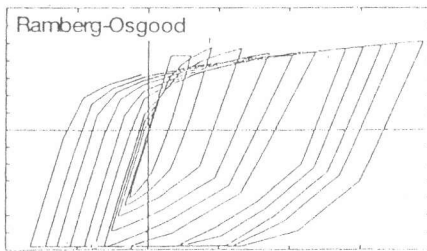
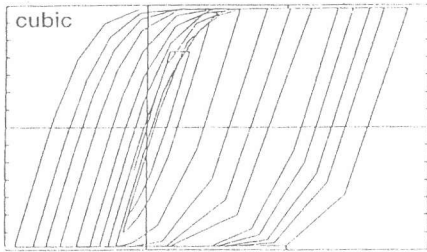
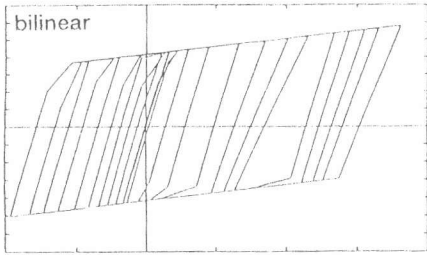


図-3 各試験体の曲げモーメント-曲率関係
(実験値および解析値)



たて軸: $\sigma_s \pm 4.920\text{kg/cm}^2 (\pm 70 \text{ ksi})$
 よこ軸: $\varepsilon_s -1\% \sim +2\%$

図-4 鉄筋の応力-ひずみ関係
(U2・解析値)

③R/O モデル 割線勾配と吸収エネルギー量を過少評価する。履歴曲線の形状も実験結果とかなり異なっている。

④Ktモデル 全般に B/Lモデルと同様の傾向を示す。ただし、塑性率が大きい時に吸収エネルギー量を幾分過大評価する。

Cuモデルで吸収エネルギー量が多いのは、前述のように $\sigma_s - \varepsilon_s$ 履歴曲線の幅が大きいためであり、R/Oモデルで割線勾配が小さいのは、 $\sigma_s - \varepsilon_s$ 関係で引張り側応力度が小さいためと考えられる。なお、

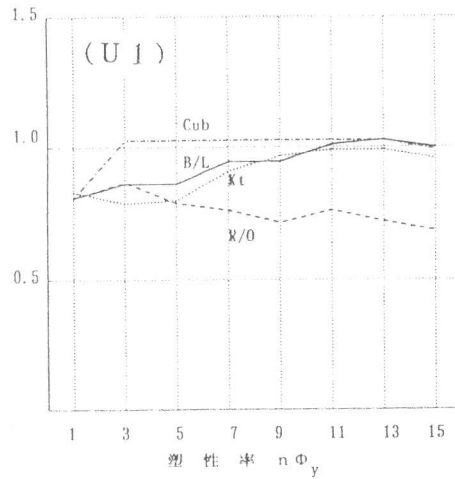


図-5 割線勾配の実験値に対する比率

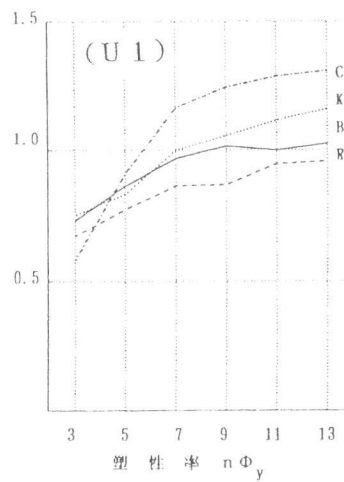


図-6 1サイクル吸収エネルギーの実験値に対する比率

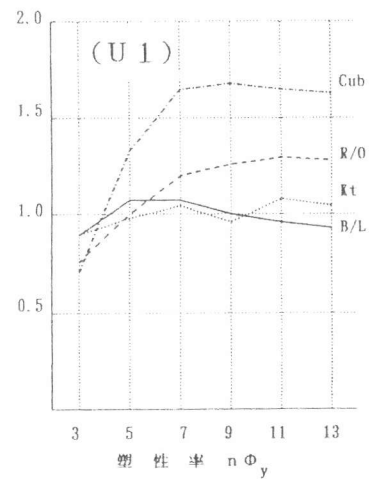


図-7 Y軸切辺の長さの実験値に対する比率

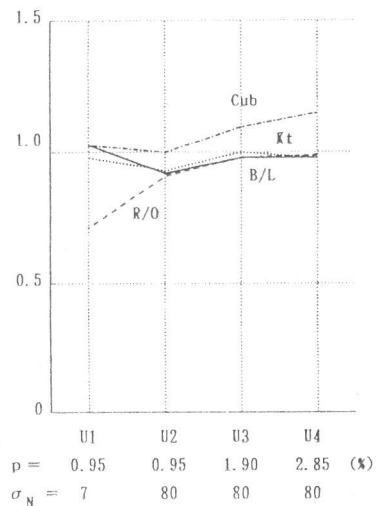


図-8 最大耐力の実験値に対する比率

解析でテンションチフニングを考慮してないため、解析では割線勾配（またはスケルトンの高さ）を過少評価していると考えられる。そのため、塑性率が小さい範囲のデータは参考程度に見るのが良いと思われる。

5. 2 U2～U4試験体

U2とU4試験体ではスケルトンの軟化領域の勾配を別にすれば、どのモデルによっても履歴曲線を含めて比較的良く実験結果を表していた（図-3）。軟化域での実験との相違は、主として柱筋の座屈挙動を解析で考慮していないためと推定される。細かくみると、U1試験体で述べた吸収エネルギー量の大小関係にモデルの特徴が現れているのが分かる。

図-8は、各モデルによる最大耐力の解析値と実験値の比を試験体毎に示したものである。B/LモデルとKtモデルでは、試験体の違いにかかわらず実験値とほぼ同じ値を与えていることが分かる。しかし、Cuモデルでは、U1、U2試験体で良好な結果を示したものの、U3、U4試験体では大きい値となった。逆にR/Oモデルでは、U1試験体で小さい結果を示したが、U2からU4試験体に変わるにしたがって実験値に近付いている。

U1試験体では、軸応力度が小さいため最大耐力は主として引っ張り側鉄筋の応力度に支配的な影響を受け、また、軸応力度と鉄筋比が大きいU3、U4試験体の最大耐力は引っ張り側のみならず圧縮側鉄筋の影響も大きいと考えられる。そのため、引っ張り側と圧縮側両方の応力度を過大評価するCuモデルは、U3やU4試験体で耐力を過大評価し、他方、引っ張り側応力度を過少評価、圧縮側応力度を過大評価するR/Oモデルは、U3やU4試験体で実験値に近い値を与えたと考えられる。

6. 結 論

R/C柱部材の漸増交番純曲げ加力実験という限られた条件下ではあるが、ファイバーモデルで用いる鉄筋モデルの相違がM- Φ 関係の解析結果に与える影響度合いを把握することができた。

①加藤モデルとバイリニアモデルは比較的良好なM- Φ 関係を与える。

②cubicモデルは、軸力の小さい柱部材に対して良好なM- Φ スケルトンを与えるが、履歴面積を過大評価する。また、軸力と鉄筋比が大きい柱部材に対しては、M- Φ スケルトンにおける曲げモーメントも過大評価する。

③Ramberg-Osgoodモデルは、軸力の小さい柱部材に対して、M- Φ スケルトンにおける曲げモーメントを過少評価する。その結果、履歴面積も過小評価する。軸力と鉄筋比が大きい柱部材に対しては、比較的良好なM- Φ 関係を与える。

[参考文献]

- 1) 村山、須田、古市： 高軸力・二軸曲げを受けるR/C部材の剛性評価方法、鹿島技術研究所年報、第37号、1989年10月、pp.57～64
- 2) R.Park, T.Paulay: Reinforced Concrete Structures、A Wiley-Interscience Publication pp.254～255
- 3) Kato B., Akiyama H. Yamanouchi Y.: Predictable Properties of Materials under Incremental Cyclic Loading. IABSE Reports Vol.13, Lisbon 1973, pp.119～124
- 4) M.Menegott, P.E.Pinto: Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C.Plane Frames Including Change in Geometry and Non-Elastic Behaviour of Elements under Combined Normal Force and Bending. IABSE Reports Vol.13, Lisbon 1973, pp.15～22