

高軸力下の補剛箱形断面部材の曲げ繰り返し解析に関する研究

Cyclic bending analysis of stiffened box-section members under high axial compression

原田秀則*, 山尾敏孝**, 村本裕樹***

Hidenori Harada, Toshitaka Yamao and Yuki Muramoto

*原田解析工房 (〒861-2101 熊本市桜木 5-1-10)

**工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

***修(工) 横河ブリッジ㈱ 橋梁本部技術部 (〒592-8331 堺市築港新町 2-3)

The ultimate strength and bending behavior of stiffened box-section members subjected to bending moment under high axial compression. Numerical analysis is carried out using MARC taking into account for large deformation and material nonlinear under monotonic and cyclic bending loading. The ultimate bending behavior and ductility of stiffened box-section member composed of plates with various width-to-thickness ratios. Based on the numerical results, the interaction curves for ultimate strength of stiffened box-section member subjected to compression and bending are proposed, and bending moment-curvature relations of the same member are derived as a function of both width-to-thickness parameter and axial load ratio.

Key Word: stiffened steel box-section, cyclic bending behavior, high axial compression, restoring force model

キーワード: 補剛箱型断面, 曲げ繰り返し挙動, 高軸力, 復元力モデル

1. はじめに

兵庫県南部地震により橋梁の鋼製橋脚は大きな損傷を受けたため耐震性能が問題となり耐震設計法が見直された。平成8年12月に改定された道路橋示方書V耐震設計編¹⁾では、新設橋の鋼製橋脚設計や既設鋼製橋脚の耐震補強の際に、設計荷重を越える大きな地震が作用しても、脆性的な破壊が生じないように、じん性の向上やエネルギー吸収性能を高め、地震時変形性能を確保する事が要求されるようになった。しかし、鉄筋コンクリート橋脚の場合と比べると、大きな地震力が作用した時の鋼製橋脚の抵抗メカニズムが十分に把握されていないことからこの研究が精力的に行われるようになった^{2)~5)}。

地震時保有水平耐力法では、鋼製橋脚の変形能をもとに保有水平耐力や許容塑性率を定量的に評価することとなり、動的解析法ではそれを基に復元力モデルを決めることになる。いずれの方法で耐震性の照査を行うにしろ繰り返し荷重下における鋼製橋脚の変形能を知ることは不可欠である。また、鋼製橋脚の耐震性能を求めるには、供試体を作成して繰り返し載荷実験を行うのが最良であるが、実験の所要時間が長期間に及ぶ可能性があることや製作や人件コストの点から考えると問題がある。

田嶋ら³⁾や運上ら⁴⁾は、鋼製橋脚の繰り返し実験データに基づいて、より汎用的なM- ϕ 関係を算出し、各種パラメータの関係について検討している。また、青木ら⁵⁾は履歴曲線モデルとして直線近似より精度が高くなる多曲線近似のモデル化を行っている。著者ら^{6) 7)}もこれまでに無補剛断面、補剛断面を対象に曲げと軸力が同時に作用した場合の繰り返し挙動特性に関する研究を行ってきた。しかし、これらの研究は軸力比 N/N_y が0.2以下の場合であり、高軸力を受ける補剛断面部材を対象としたM- ϕ 曲線はほとんど見あたらないし、有効な復元力モデルは提案されていないのが現状である。また、圧縮と曲げの組み合わせ載荷を受ける補剛箱形断面部材の挙動や終局強度曲線に関しては北田ら⁸⁾の研究があり、精度の高い終局強度曲線を提案している。更に、逆L字形橋脚では、橋軸方向に荷重を受けると、軸圧縮力と曲げモーメントのみならずねじりモーメントも生じ、複雑な挙動を呈するので、非線形動的解析を行う際には、圧縮、曲げ、ねじりの組み合わせ荷重に対するの復元力特性と最大強度相関曲線が必要となると考えられる。

本研究では、研究の第一段階として、曲げと圧縮のみが作用する場合について復元力モデルの定式化を行った。特に、鋼製橋脚の補剛箱形断面を対象に、高軸力と水平

力による曲げが作用する場合について、汎用プログラムのMARC⁹⁾を用いた弾塑性有限要素法により、幅厚比パラメータと軸力をパラメータとしたパラメトリック解析を行った。また、曲げと圧縮の同時载荷及び順次载荷解析を行い、载荷順序による最大強度と挙動に及ぼす影響を調べ、解析結果を基に曲げと軸力の最大強度相関曲線の定式化を行った。次に、一定軸力のもとで曲げの繰返し载荷解析を载荷パターンを変化させて行い、骨格曲線としてのM- ϕ 関係を近似的に導いた。この骨格曲線と履歴特性を組み合わせることで復元力モデルとし、解析結果と比較検討した。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

図1(a)に示すような橋脚の一部を想定した、曲げモーメントと軸力を同時に受ける正方形箱形補剛断面（補剛材数は補剛板1パネルあたり2本）を解析モデルとした。解析部分は、対称条件を考慮して解析モデルの1/

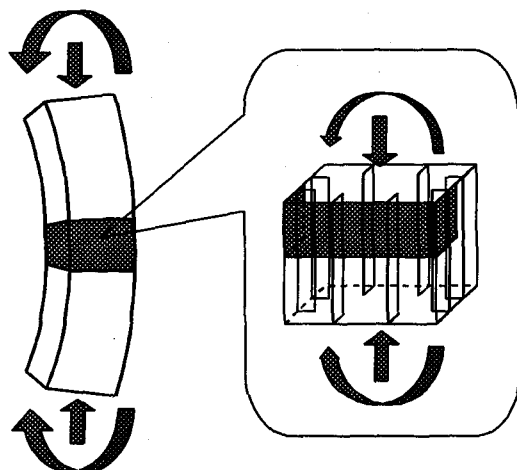


図1 圧縮と曲げを受ける橋脚の基部と解析モデル

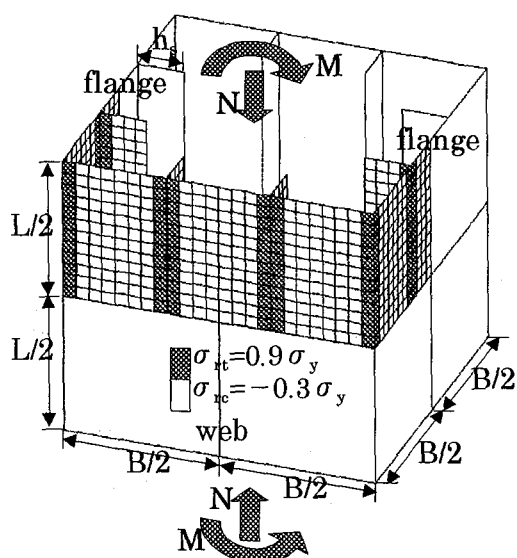


図2 解析モデルと残留応力分布

4部分（図1(b)のハッチング部）を対象とした。

パラメトリック解析を行うにあたっては、式(1)で示す断面の幅厚比パラメータ R_R を0.3~0.7までの5種類として表1に示すような諸元を用いた。補剛材を有する断面の板幅 B は一定として補剛板厚を変化させ、補剛箱断面の長さ L は既往の研究⁷⁾を参考にして板幅 B と等しくした。また、断面はフランジ、ウェブともに補剛材を有しているが、解析モデルの補剛材の幅厚比 b_s/t_s は全て10とし、式(2)で与えられる補剛材の幅厚比パラメータ R_s は、既往の研究⁷⁾を参考にして0.668に固定した。表1には補剛材1本の断面積、断面二次モーメント及び補剛材剛比 γ/γ^* （ γ ：縦補剛材の剛比、 γ^* ：弾性座屈理論による補剛材の限界剛比）を道路橋示方書¹⁾より計算し併せて示した。

2.2 初期不整と要素分割

本研究において解析モデルは補剛材を有しているため、図2に示すように、圧縮残留応力分布は実際の分布形状に近いようにモデル化し、引張残留応力の大きさは圧縮残留応力とつり合うように決定した。なお、引張残留応力度は $\sigma_{rt}=0.9\sigma_y$ 、圧縮残留応力度は $\sigma_{rc}=-0.3\sigma_y$ とし、残留応力の影響については文献⁷⁾等で確認している。初期たわみ波形は、図3に示すような補剛板の全幅及び板パネル間のたわみ波形を重ね合わせたものを仮定した。道路橋示方書において、初期たわみの最大値は板幅の1/150と規定されているが、実構造物においてはこれより小さくなると考え、既往の実験値⁸⁾を参考にして、初期たわみの最大値 δ_1 及び δ_2 を図3に示すように幅厚比の一次関数として仮定した。なお、解析の精度に関係してくる要素分割については、既往の研究結果⁷⁾を参考にして、補剛材間を8分割、補剛材高さ方向に4分割、板厚方向5分割、モデルの高さ方向に12分割とした。

表1 解析モデルの諸元

幅厚比パラメータ R_R	0.30	0.40	0.50	0.61	0.70
補剛板全幅 B (mm)	2000	2000	2000	2000	2000
補剛板板厚 t (mm)	48.0	36.0	29.0	24.0	20.7
補剛材高さ h_s (mm)	310	240	210	180	160
補剛材板厚 t_s (mm)	31.0	24.0	21.0	18.0	16.0
補剛材1本の断面二次モーメント I_1 (mm ⁴ ×10 ⁴)	30784	11059	6482	3499	2184
補剛材1本断面積 A_1 (mm ²)	9610	5760	4410	3240	2560
断面積比 A_1/Bt	0.100	0.08	0.076	0.068	0.062
剛比 γ	15.31	13.04	14.62	13.92	13.55
最適剛比 γ^*	14.27	13.55	13.40	13.10	12.89
補剛材剛比 γ/γ^*	1.07	0.96	1.09	1.06	1.05

$$R_R = \frac{B}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1)$$

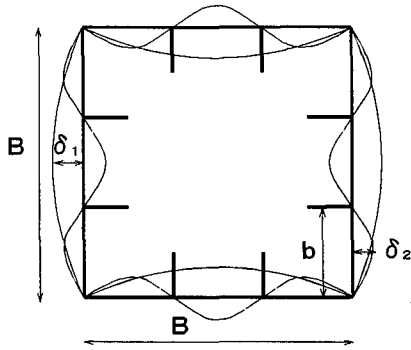
$$R_s = \frac{h_s}{t_s} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (2)$$

E ：ヤング係数

ν ：ポアソン比

k ：座屈係数（式(1)= $4n^2$ 、式(2)=0.425）

n ：補剛材で区切られる一辺のパネル数



$$\frac{\delta_1}{B} = 7.5 \times 10^{-6} \frac{B}{t}, \quad \frac{\delta_2}{b} = 5.0 \times 10^{-5} \frac{b}{t}$$

図3 初期たわみ分布

2.3 解析方法

解析は、FEM汎用プログラムのMARCを用い、次に示す設定のもとに行った。

- ① 材料は弾塑性かつ等方性である。
- ② von Misesの降伏条件に従う。
- ③ 大変形、アップデートラグランジェ法、有限塑性ひずみ解析を用いて解析を実行する。
- ④ 繰り返し載荷解析では、移動硬化則を用いる。
- ⑤ 収束計算法はNewton-Raphson法を用いる。
- ⑥ 積分点は、面内2×2、板厚方向に5とした。

本解析では、四辺形4節点シェル要素を用いて弾塑性有限変位解析を行った。作用断面力は、図4に示すようにに載荷辺に曲げ剛度無限大の剛板を取り付け、曲げを剛板の中央節点の回転角 θ により与えた。なお、この載荷手法については、文献9)で用いられている解析モデルを用いて解析を行った結果、文献の結果と比較してもほぼ妥当な結果を得ていることを付記しておく。

曲げモーメント M に対する曲率 ϕ は、図4に示す載荷面の傾き θ と部材長 L より $\phi = 2\theta/L$ と定義した。

使用した鋼種は、一般的によく用いられているSM490Yとした。その機械的性質としては、ヤング係数 $E=206\text{GPa}$ 、降伏応力 $\sigma_y=353\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、 $E/E_{st}=30$ 、

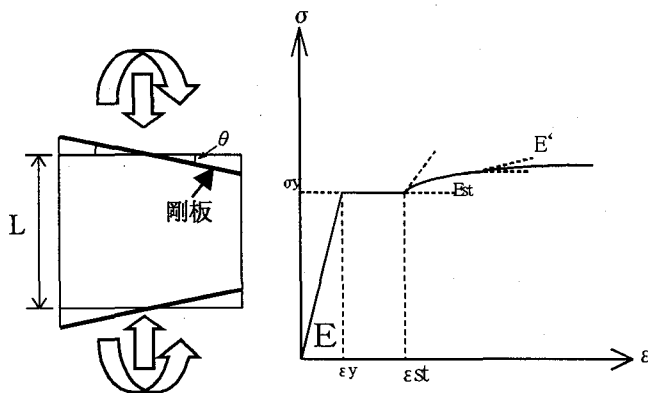


図4 載荷方法

図5 応力-ひずみ曲線

$\varepsilon_{st}/\varepsilon_y=7$ を用いた。また、応力-ひずみ関係¹¹⁾は式(3)を用いて図5に示すようなMulti-linearを採用した。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma}{\sigma_y} &= 0.556 \left(1 - e^{(0.42 - 0.06\varepsilon/\varepsilon_y)} \right) + 1 \quad (\varepsilon \geq \varepsilon_{st}) \\ E' &= \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{E}{30} \cdot e^{(0.42 - 0.06\varepsilon/\varepsilon_y)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

軸圧縮力 N/N_y を通常の橋脚より大きな値として0.0~0.4までの5種類とし、両者を組み合わせて用いた

3. 変形挙動と最大強度相関曲線

3.1 載荷方法と最大強度の関係

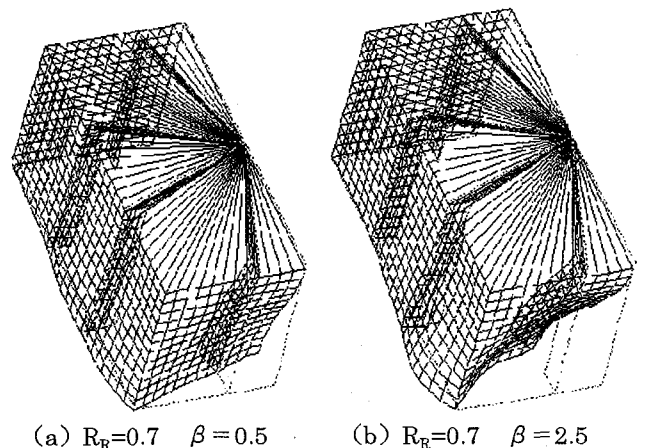
圧縮と曲げの最大強度相関曲線を、圧縮と曲げを同時載荷した場合と順次載荷した場合の二つの載荷パターンについて解析した。これは、載荷順序が挙動ならびに最大強度に及ぼす影響を調べるためである。

同時載荷の解析においては、圧縮と曲げに相当する荷重を変位により導入した。それぞれの変位に対する増分比を式(4)に示すような無次元パラメータ β ¹²⁾を用いて表すことにした。ここで、 θ は載荷面の回転角、 θ_y は載荷面の降伏回転角、 u は軸方向変位、 u_y は降伏軸方向変位である。

$$\beta = \frac{\theta/\theta_y}{u/u_y} \quad (4)$$

図6は曲げと圧縮の増分比 β を変化させ、同時載荷して解析した場合の最大強度に達した時点におけるモデルの変形状況を10倍に拡大して示した図である。曲げ変位が圧縮変位より大きい $\beta=2.5$ のモデルでは、圧縮変位が大きい $\beta=0.5$ のモデルに比べて変形が圧縮側フランジに集中していることが分かる。

次に順次載荷の方法としては、圧縮力を降伏に至るまで載荷した後に剛板の回転角を漸増させ曲げを載荷した。解析結果の一例として、図7に圧縮と曲げの順次載荷解析を行ったモデルの変形図を示す。



(a) $R_R=0.7$ $\beta=0.5$ (b) $R_R=0.7$ $\beta=2.5$

図6 変形図(変位スケール10倍)

図7 (a) は $R_R=0.3$ のモデルで $M/M_p=1.0$ に達した解析が終了した変形状態の変形である。図からわかるようにこのモデルでは $M/M_p=1.0$ に至るまでフランジ及びウェブとも大きな変形は生じなかった。一方、図 (b) は $R_R=0.7$ のモデルの変形状況を示しているが、このモデルでは $M/M_p=0.3$ を越えたあたりから強度劣化が激しくなった。比較の条件が同じでないが、図(b)には $M/M_p=0.3$ の変形状況を示した。図から分かるように、フランジのみならずウェブ側にも大きな変形が生じており、

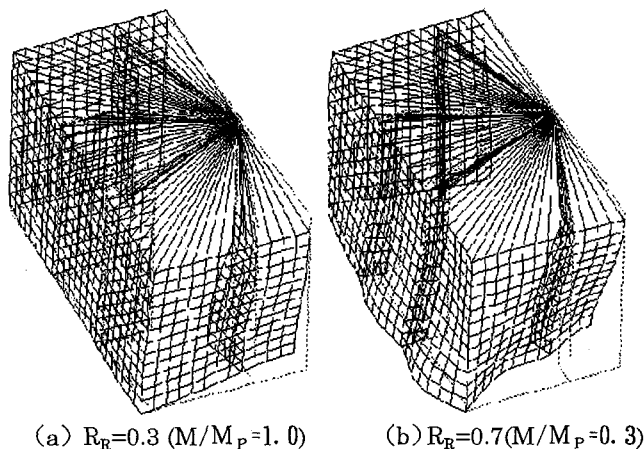


図7 変形図 (変形スケール10倍)

強度が低下したと考えられる。

図8は同時載荷解析及び順次載荷解析の結果を示したものである。幅厚比パラメータ R_R が0.3~0.6のモデルでは同時載荷及び順次載荷とも最大強度はほぼ同じ値を示している、載荷順序が違って解析結果にはほとんど影響がないと言える。しかし、幅厚比パラメータ R_R が0.7のモデルにおいては、順次載荷解析結果が圧縮降伏に達した後、 $M/M_p=0.3$ あたりから、同時載荷解析より最大強度が小さくなり、載荷方法の違いが出ている。

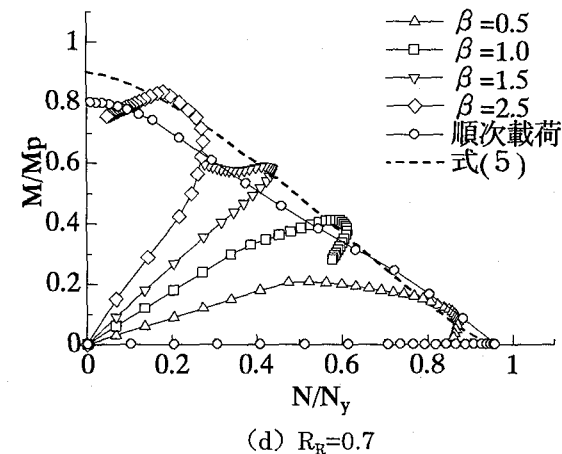
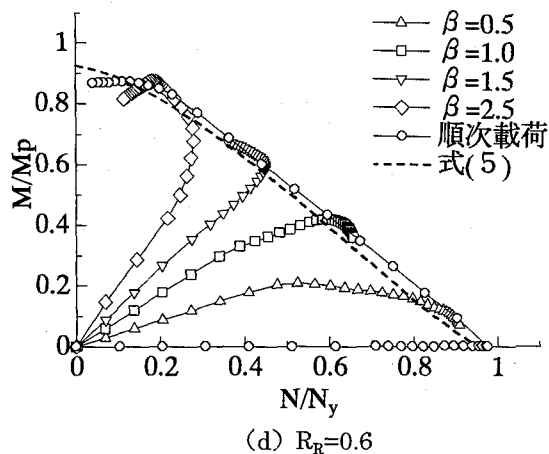
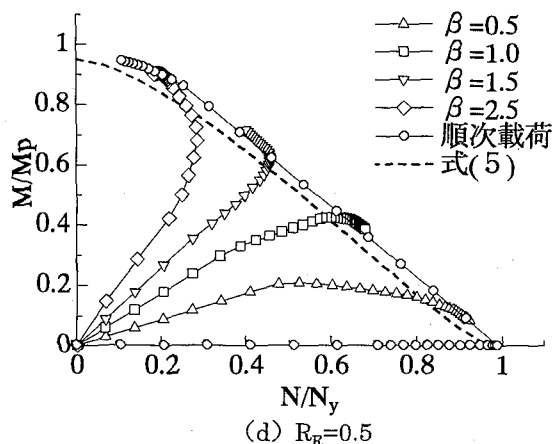
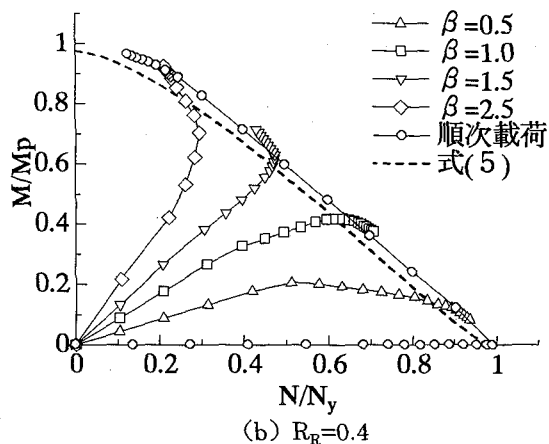
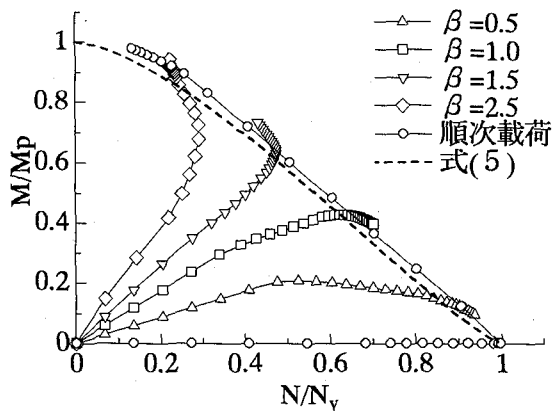


図8 最大強度相関曲線

3.2 最大強度相関曲線の定式化

単調同時載荷の解析結果を用いて、圧縮と曲げの相関強度関係を表すような曲線を最小二乗法により整理して求めた。その結果、圧縮と曲げを受ける補剛箱形断面部材の最大強度相関曲線は、断面固有の降伏軸力 N_y 、全塑性モーメント M_p 及び幅厚比パラメータ R_R を用いた次式で表すことができた。

$$\left(\frac{M}{M_p}\right)^{\frac{4}{5}} + \left(\frac{N}{N_y}\right)^{\frac{3}{2}} = 1.06 - 0.2R_R \quad (5)$$

なお、上式は正方形断面の場合にのみ有効である。最大強度相関式(5)の曲線を破線で図8に併せて示しているが、幅厚比パラメータ R_R が0.3~0.6については同時載荷、順次載荷共に解析結果よりも若干安全側に良く評価できていることがわかる。

ただし、幅厚比パラメータ R_R が大きな0.7のモデルでは順次載荷の解析結果と比較すると、曲げモーメントが大きくなると近似式より離れて危険側評価になっているが、同時載荷の解析結果とはよく対応していることがわかった。

4. 繰返し載荷解析の結果と考察

曲げの繰返し載荷解析においては、一定軸力を載荷した状態で、図9に示すように解析モデルの曲率が暫時1倍、2倍、3倍・・・6倍と一定の割合で増加するような荷重の増加パターンを採用した。なお、一定軸力は解析モデルの載荷面に取り付けてある剛板に軸力に相当する重さを与えることによって載荷した。

図10、図11は、幅厚比パラメータ R_R を0.3~0.7に変化させた時の軸力の影響について、繰返し載荷解析した解析結果を示したものである。図10は荷重変位履歴曲線の包絡線を示し、図11は $M-\phi$ 関係を示している。縦軸には解析により得られた曲げモーメント M を断面の全塑性モーメント M_p で、横軸には曲げにより生じた解析モデルの曲率 ϕ を降伏曲率 ϕ_y で無次元化した値を示してある。解析の曲げモーメントは剛体の中央の曲げを想定した回転角 θ を与えている節点の回転軸回りの反力である。(図4参照)

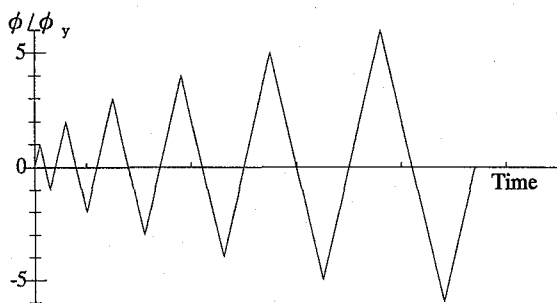
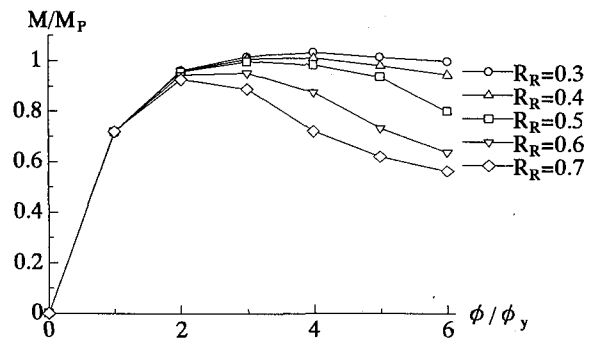
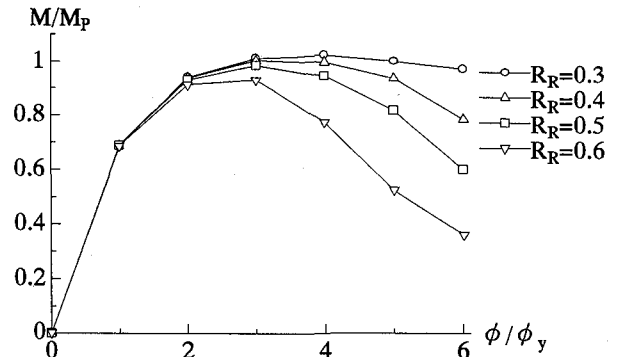


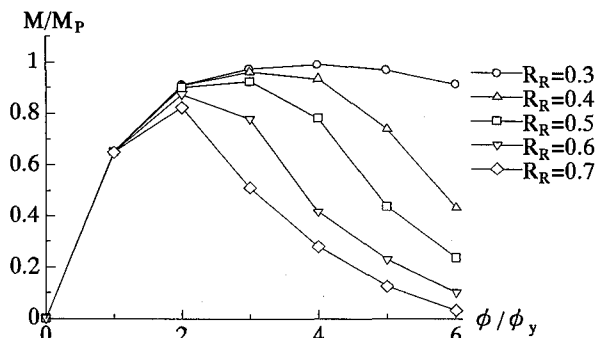
図9 載荷方法(荷重ステップI)



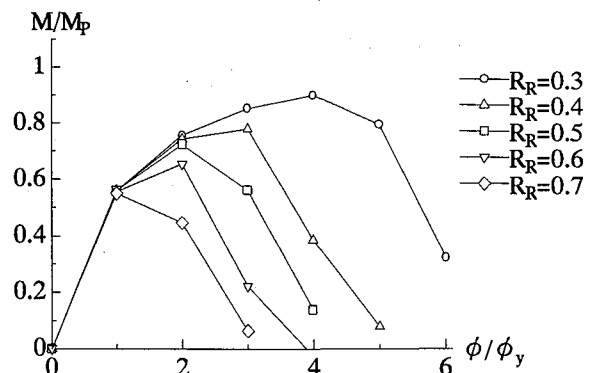
(a) $N/N_y = 0.0$



(b) $N/N_y = 0.1$

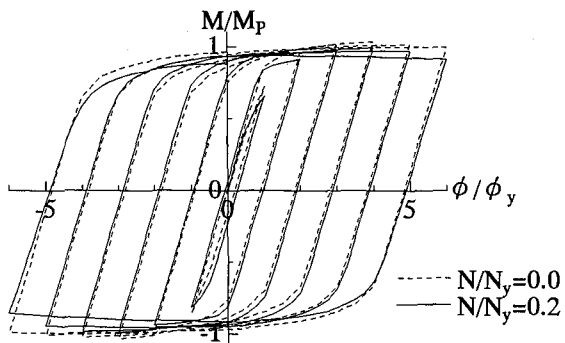


(c) $N/N_y = 0.2$

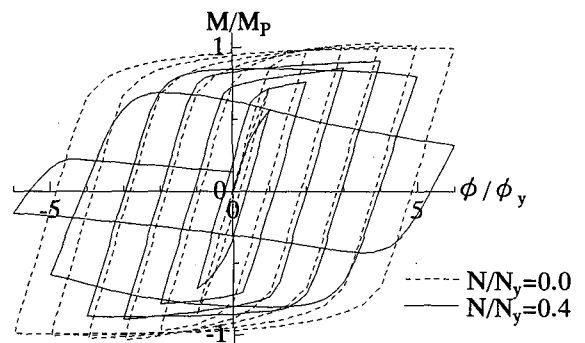


(d) $N/N_y = 0.4$

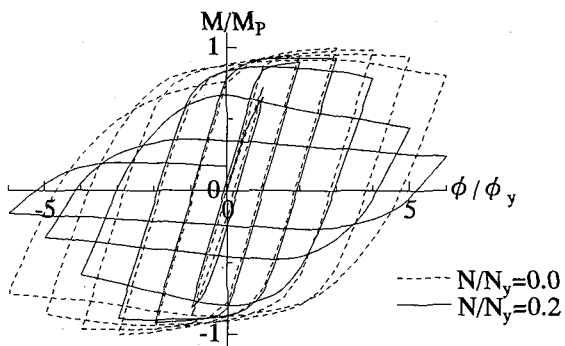
図10 包絡線の比較



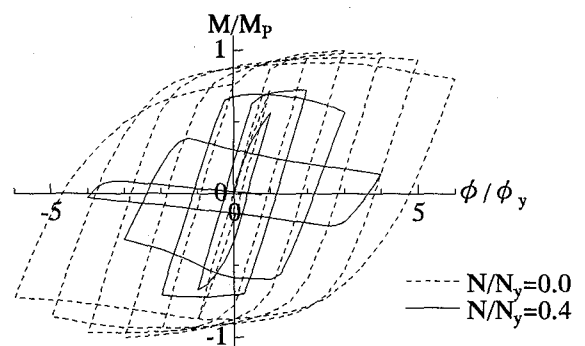
(a) $R_R=0.3$



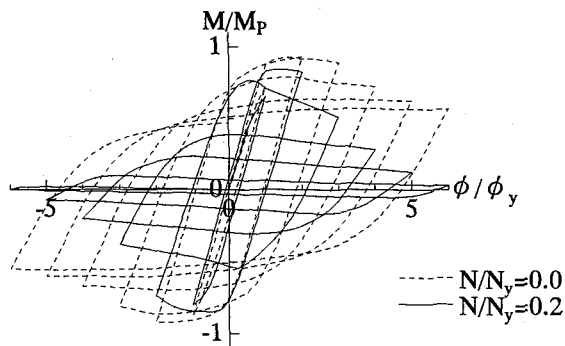
(b) $R_R=0.3$



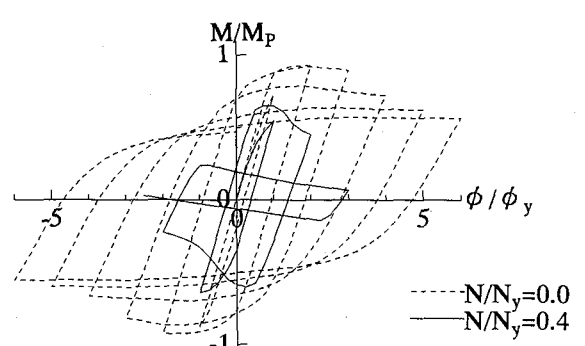
(c) $R_R=0.5$



(d) $R_R=0.5$

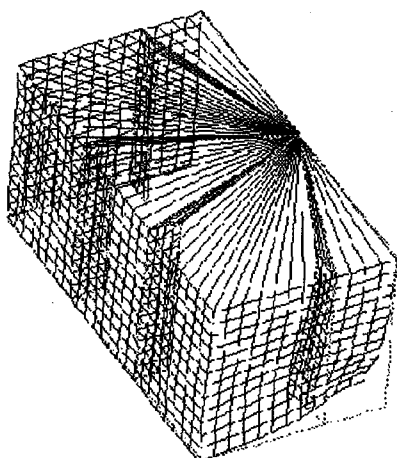


(e) $R_R=0.7$

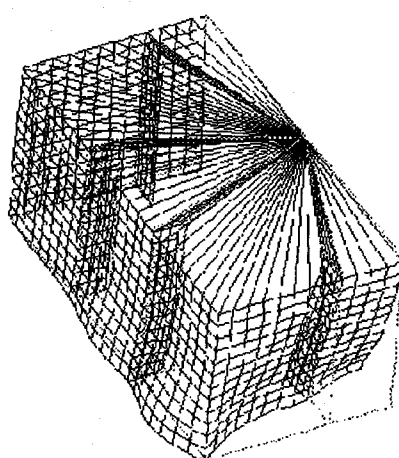


(f) $R_R=0.7$

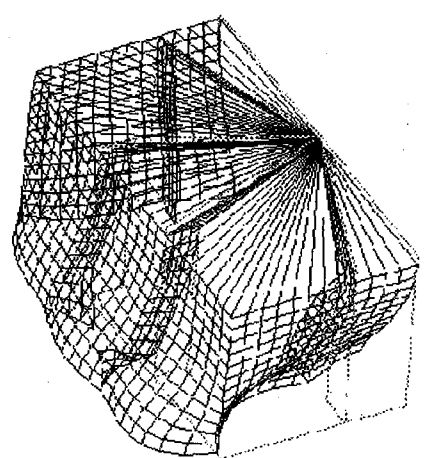
図 11 繰返し載荷時の $M-\phi$ 曲線



(a) $R_R=0.6, N/N_y=0.0$

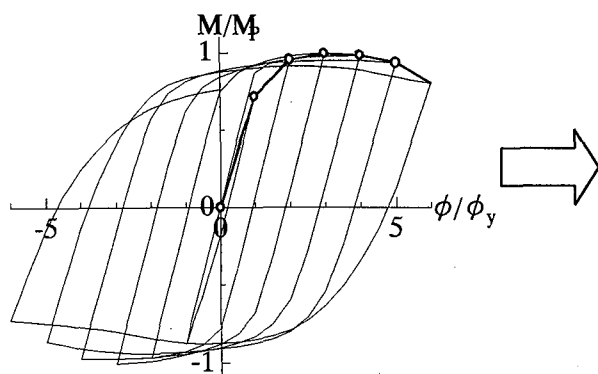


(b) $R_R=0.6, N/N_y=0.2$

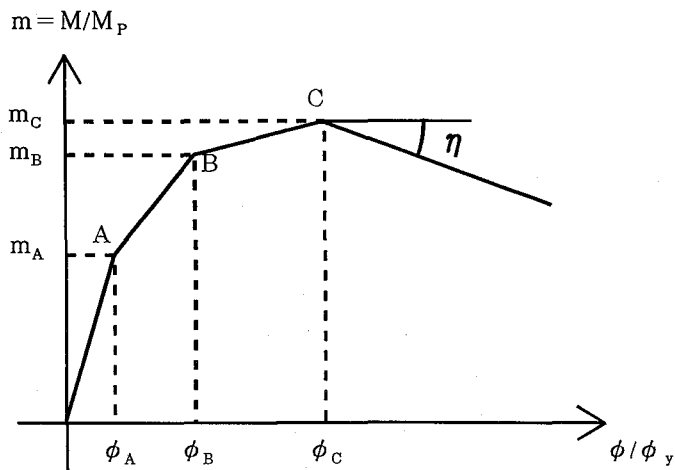


(c) $R_R=0.6, N/N_y=0.4$

図 12 $\phi/\phi_y=3$ での変形状況 (変形スケール 3 倍)



(a) 履歴ループと包絡線



(b) ポリリニア復元力特性

図 13 復元力特性

繰返し載荷解析の結果より、幅厚比パラメータ R_R が大きくなると、履歴ループの囲む面積が小さくなり、エネルギー吸収性能が悪くなっている。これは、局部座屈による最大強度後の強度劣化が幅厚比パラメータ R_R の大きいモデルほど著しいからである。幅厚比パラメータ $R_R=0.3$ のモデルにおいても軸力比 $N/N_y=0.4$ の場合には降伏曲率の 4 倍付近から急激に強度が劣化している。しかし、幅厚比パラメータ R_R が大きいモデルほど軸力による影響が大きい。

また、幅厚比パラメータ R_R が 0.4 以上のモデルでは、軸力比 $N/N_y=0.4$ を載荷したとき、モデルが降伏曲率の 6 倍に至る前に崩壊し、解析が終了した。特に幅厚比パラメータ $R_R=0.7$ 、 $N/N_y=0.4$ のモデルでは最大強度が全塑性モーメントの 6 割ほどである。

図 12 は降伏曲率の 3 倍の曲げを載荷した時の幅厚比パラメータ $R_R=0.6$ モデルの変形状況を示した図である。変形を見やすくするために変形のスケールを 3 倍に拡大してある。軸力が増えるにつれウェブにも変形が広がっている。これは、フランジが局部座屈を起こし、曲げに対して抵抗できなくなり、ウェブに大きな応力が生じているためである。なお、ここには示していないが、幅厚比パラメータ $R_R=0.6$ のモデルの $M-\phi$ 曲線でも、曲率が降伏曲率の 3 倍を越えた辺りから急激な強度劣化が確認できた。

5. 復元力モデルの定式化と考察

5.1 スケルトンカーブ（骨格曲線）

復元力モデルは、繰返し載荷解析の結果から、その包絡線（図 13 (a)）をもとに図 13 (b) に示すようなポリリニア（4 勾配）のスケルトンカーブを有し、変形の増加に伴い剛性が低減するような形の近似式を提案する。

スケルトンカーブは第一折れ点 A、第二折れ点 B、第三折れ点 C、第四勾配 η によって定義される。A、B、C 点

は、それぞれの座標を A (ϕ_A, m_A)、B (ϕ_B, m_B)、C (ϕ_C, m_C) とし、これらの座標点は図 10 に示す荷重変位履歴曲線の包絡線を参考にしながら、幅厚比パラメータ R_R 、軸力比 N/N_y を用いて次式に示すよう定式化した。なお、 $m=M/M_P$ とした。

一方、幅厚比パラメータ R_R が大きく、軸力比 N/N_y が大きいモデルにおいては ϕ_C が ϕ_B よりも小さくなることもあるが、この場合は第三折れ点 C を無視し、第一折れ点 A・第二折れ点 B・第三勾配 η によるトリリニア（三勾配）のスケルトンカーブを有するものとした。

(i) 第一折れ点 A

$$m_A = 0.72 \left(1 - 0.5 \left(\frac{N}{N_y} \right)^2 \right) \quad (6)$$

$$\phi_A = 0.8 \quad (7)$$

(ii) 第二折れ点 B

$$\phi_B = 1.8 \quad (8)$$

$$m_B = \left\{ 1.06 - 0.2R_R - \left(\frac{N}{N_y} \right)^{\frac{3}{2}} \right\}^{\frac{5}{4}} \quad (9)$$

(iii) 第三折れ点 C

$$\phi_C = 7.03 - 6.78R_R - 4.59 \frac{N}{N_y} \quad (10)$$

$$m_C = 1.25 - 0.5R_R - 0.75 \frac{N}{N_y} \quad (11)$$

ただし、 $m_C > 1.0$ の時は $m_C = 1.0$

(iv) 第四勾配 η

$$\eta = -0.15 + 0.5R_R + 0.375 \frac{N}{N_y} \quad (12)$$

ただし、パラメータの範囲は、 $0.0 \leq N/N_y \leq 0.4$ 、 $0.0 \leq R_R \leq 0.7$ である。

5.2 履歴特性

図14は今回定式化を行った履歴特性の概略図を示したものである。以下に示すような仮定に従って履歴ループを描く復元力モデルとした。

- 1) $|\phi| < \phi_A$ の場合原点を通る第一勾配の直線上を移動する。
- 2) 第二勾配上から反対方向に進む場合は第一折れ点を目指す直線上を移動する。
- 3) ϕ_B を越えてから反対方向に進む場合は、 i 点より式 (13) で求まる除荷勾配 κ_i の直線上を復元力 $-0.9m_i$ まで進む。

$$\kappa_i = 0.284 - 0.028\phi_i + 0.716m_i \quad (13)$$

ただし、 $\kappa_i > 1.0$ の場合は $\kappa_i = 1.0$

- 4) 除荷曲線が変形 0 の点を越えると、反対側の第二折れ点を目指す。
- 5) j 点を越えた後は反対側の変形点 k を目指す直線上を移動する。

図16は、繰り返し荷重のFEM解析結果と図14に示すような履歴特性を持つ復元力モデルによる近似式による結果を比較したものである。荷重の載荷方法は図9に示すような荷重ステップ（荷重ステップⅠ）を採用した。幅厚比パラメータ $R_R = 0.4$ 、軸力比 $N/N_y = 0.2$ のモデルでは曲率の大きい部分で解析値よりも危険側に評価しているが、それ以外のモデルでは安全側に評価できていることがわかる。また、幅厚比パラメータ R_R 及び軸力比 N/N_y が大きいモデルほど近似式と若干の差が生じている。なお、幅厚比パラメータ $R_R = 0.6$ 、軸力比 $N/N_y = 0.4$ の場合は復元力特性がトリリニアになるが、その比較例を図16 (d) に示した。以上の結果より、提案した近似式は、軸力比 N/N_y が 0.4 以下であれば、多少誤差が生じているもののよい近似を与えている。また、幅厚比パラメータ R_R が 0.6 以下のモデルでは、軸力比に関係無く非常に良く対応しているといえる。

次に、近似式は漸増の繰り返し解析により得ているが、繰り返し載荷方法の荷重ステップを変化させた場合について近似式の妥当性を検討した。図15に示すような最初に大きな変位を受ける載荷方法（荷重ステップⅡ）で繰り返しFEM解析を行い、提案した復元力モデルとの比較を行った。なお、この時の復元力モデルの形は、スケルトンカーブ（骨格曲線）は同じであるが、履歴特性については、一般的に鋼部材に用いられているような、最大荷重後に劣化勾配を持たない標準型の履歴特性¹³⁾を用いた。

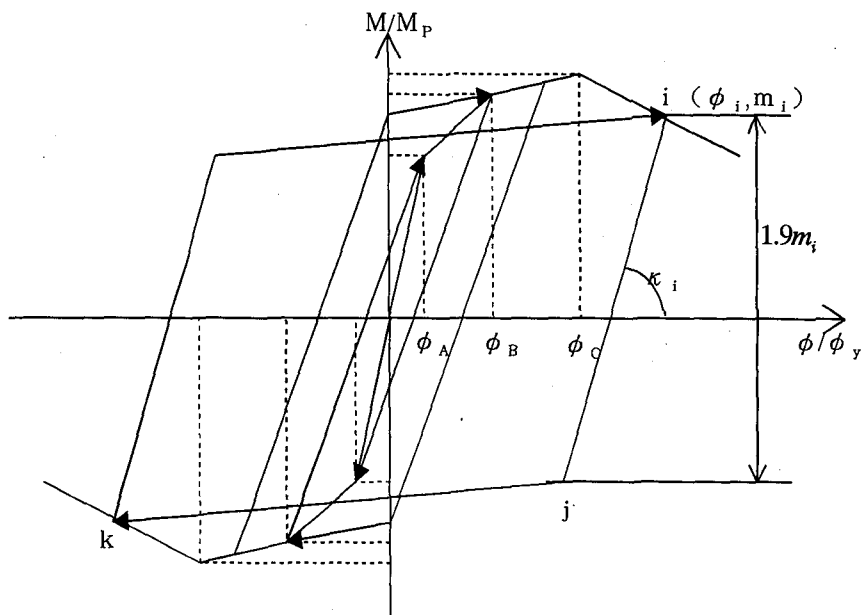


図14 履歴特性

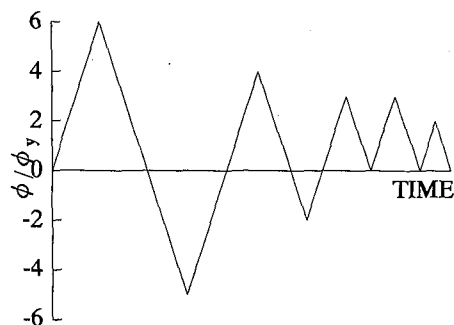
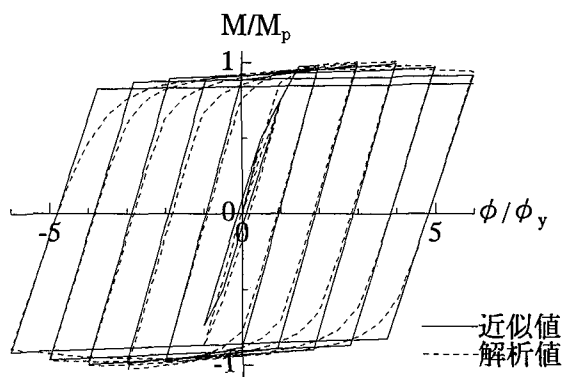


図15 載荷方法（荷重ステップⅡ）

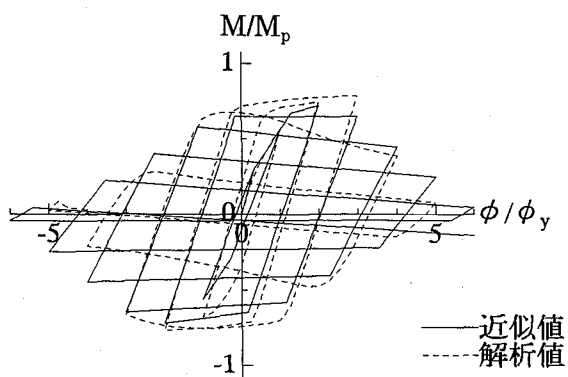
これは提案する復元力モデルを鋼製橋脚の非線形動的応答解析で用いるためである。

図17は、最大強度に達した後劣化しない復元力モデルを、図15に示す載荷方法による繰り返し載荷のFEM解析結果と比較したものである。解析対象モデルは図16の場合と同様であるが、幅厚比パラメータ $R_R = 0.6$ 、軸力比 $N/N_y = 0.4$ のモデル以外は、近似式は解析結果と非常に良く対応できていることがわかる。最大強度に達した後、局部変形等による劣化が生じない幅厚比が小さいモデルでは十分利用可能なモデルであることがわかった。

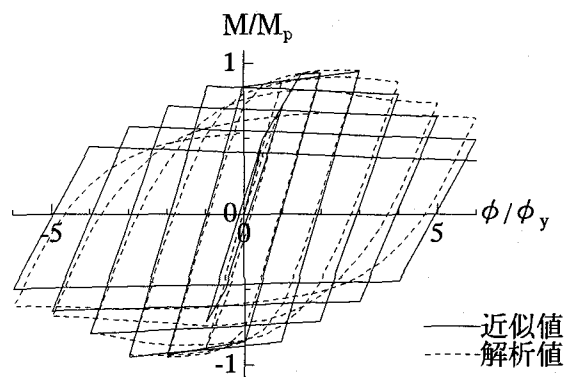
本研究では繰り返し載荷によるFEM解析結果のみからスケルトンカーブ（骨格曲線）の定式化を行ったが、圧縮と曲げを受ける部材の実験を行って提案式の精度を確認することにより、より良いスケルトンカーブが定式化できると思われる。また、履歴特性とスケルトンカーブの組み合わせた復元力モデルを提案したが、これらの式の有効性については、一緒に誘導した最大強度相関曲線も用いた非線形動的応答解析を行って、鋼製橋脚のハイブリッド実験結果との比較や軸力と曲げが変動する場合についても今後の検討課題としたい。



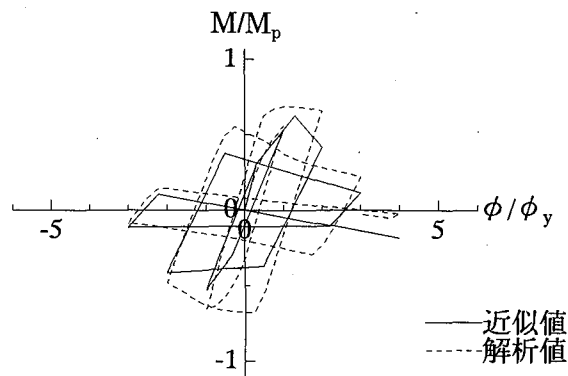
(a) $R_R=0.4, N/N_y=0.0$



(b) $R_R=0.4, N/N_y=0.2$

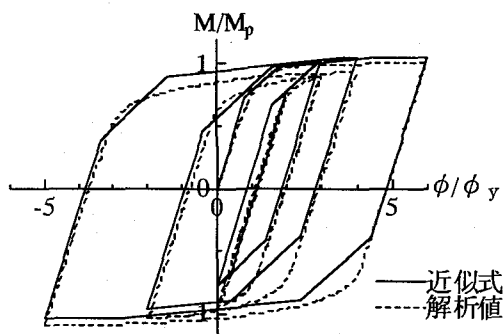


(c) $R_R=0.6, N/N_y=0.0$

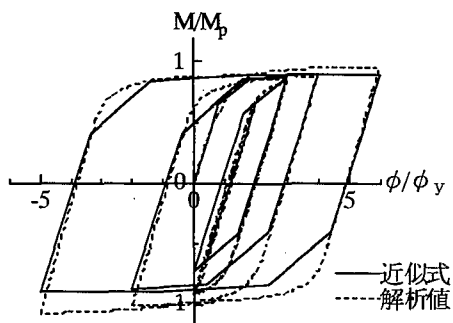


(d) $R_R=0.6, N/N_y=0.4$

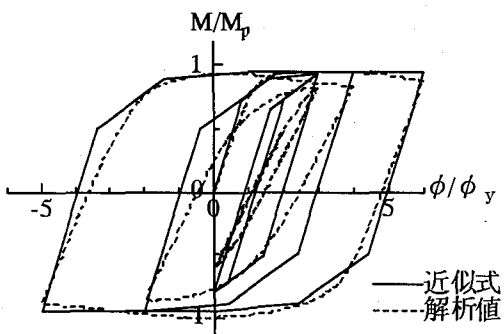
図 16 解析値と近似式の比較 (荷重ステップ I)



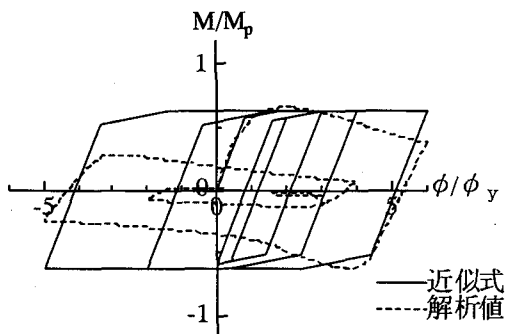
(a) $R_R=0.4, N/N_y=0.0$



(b) $R_R=0.4, N/N_y=0.2$



(c) $R_R=0.6, N/N_y=0.0$



(d) $R_R=0.6, N/N_y=0.4$

図 17 解析値と近似式の比較 (荷重ステップ II)

6. 結 論

補剛箱形断面を対象に、曲げと圧縮が作用する場合について汎用プログラムのMARCを用いた弾塑性有限要素解析を行った。まず、幅厚比パラメータ R_R 、軸力比 N/N_y をパラメータとしたパラメトリック解析を行い、その解析結果をもとに曲げと軸力を受ける補剛箱形部材の最大強度相関曲線を求めた。次に、一定軸力のもとで曲げの繰返し載荷解析を行って、非線形動的解析に用いることが出来る幅厚比と軸力比の関数で表された $M-\phi$ 関係の定式化を試みた。解析パラメータの範囲は限られているが、以下に得られた結論をまとめて示す。

- 1) 曲げと圧縮の同時載荷解析及び順次載荷解析結果より、軸力と曲げモーメントの最大強度相関曲線の定式化を行った。幅厚比パラメータ R_R が0.3~0.7の全モデルについて安全側に精度良く近似する式を得ることが出来た。
- 2) 軸力一定($0.0 \leq N/N_y \leq 0.4$)下で曲げの繰返し載荷解析を行った結果より、幅厚比パラメータ R_R が大きくなると、曲率が大きくなった時の強度劣化が激しく、軸力による影響が大きくなる。
- 3) 提案したポリリニアのスケルトンカーブを用いた復元力モデルは、全体的にうまく履歴曲線の概略を表しており、 $R_R=0.7$ で N/N_y が0.4に近づくほど解析値と近似値が多少離れる傾向にあるものの解析値とよく対応している。
- 4) 局部変形が生じて劣化挙動をしなければ、提案したスケルトンカーブと標準形の履歴特性と組み合わせで提案した復元力モデルは、任意の曲率履歴に対しても有効であることが示された。

謝辞：

本研究を実施するにあたり、文部科学省研究補助金(基盤研究C(一般))の補助を受けた。また、岩坪八代工業高等専門学校助手には貴重なご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説(Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編，Ⅴ耐震設計編)，1996。

- 2) 宇佐美勉，織田博孝：鋼構造物の耐震解析法および耐震照査法に関する研究展望，土木学会論文集，No.668/I-54，pp.1-16，2001。
- 3) 田嶋仁志，半野久光，船本浩二，松田宏：実験結果に基づく鋼製橋脚の $M-\phi$ 関係に関する一検討，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.33-40，1998。
- 4) 運上茂樹，寺山徹：鋼製橋脚の終局変位の算定方法に関する検討，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.99-106，1998。
- 5) 青木徹彦，鈴木森晶，田中智宏：多曲線近似履歴モデル，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.271-274，1998。
- 6) 山尾敏孝，松田浩，有住康則：鋼製橋脚の曲げモーメントと曲率関係の一評価法について，鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集，pp.117-122，1997。
- 7) 岩坪要，山尾敏孝，小串正明，岡本鉄也：補剛箱型断面部材の曲げ繰返し挙動特性，第2回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集，pp.233-240，1998。
- 8) 北田俊行，中井博，國廣昌史，原田直樹：圧縮と曲げとを受ける無補剛・補剛薄肉箱型断面の終局強度相関曲線に関する研究，構造工学論文集，Vol.40A，pp.331-342，1994。
- 9) MARC K7：Users Manual Vol.A-E，1997。
- 10) 小松定夫，牛尾正之，北田俊行：補剛板の溶接残留応力及び初期たわみに関する実験的研究，土木学会論文集，第265号，pp.25-35，1977。
- 11) 日本橋梁建設協会：鋼製橋脚の弾塑性有限変位FEM解析マニュアル，1998。
- 12) 中井博，北田俊行，村山泰男，室塚直人：曲げとねじりとを受ける箱桁の終局強度に関する解析的研究，構造工学論文集，Vol.42A，pp.71-82，1996。
- 13) (株)構造計画研究所：3次元立体構造物の静的・動的非線形解析プログラムRESP-T理論マニュアル，1998。

(2001年9月14日受付)