

補剛箱形断面部材の曲げ繰り返し挙動特性

岩坪 要*, 山尾敏孝**, 小串正明***, 岡本鉄也****

*工修 八代高専助手 土木建築工学科 (〒866-8501 八代市平山新町2627)

**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丁目39-1)

*** 熊本大学院自然科学研究科博士前期課程 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

**** (株)日本ピー・エス (〒914-8666 敦賀市若泉町3番地)

一定軸力を受ける補剛箱形鋼断面部材が、静的及び繰り返し曲げ荷重を受ける場合の耐力及び挙動特性について、弾塑性有限変位解析法を用いて行った。解析パラメータとして、補剛材を含めた構成板要素の幅厚比パラメータ R 、補剛材幅厚比 bs/ts 、軸力比 N/N_y 、剛比 γ/γ^* を考え、単調曲げ載荷解析及び繰り返し曲げ解析を行った。解析結果から幅厚比パラメータ R 、軸力比 N/N_y 、補剛材幅厚比 bs/ts が大きくなると最大曲げ強度が低下し、それ以降の強度の低下が見られるが、剛比が大きくなるほどその割合が小さくなっていることがわかった。また繰り返し曲げ解析においては規則性を持った挙動を示した。さらに鋼補剛箱形断面の曲げモーメントと曲率との関係を無次元化した曲げモーメント m 、軸力比 n 、曲率 ϕ を用いて $m-n-\phi$ 曲線の近似式を提案し、その妥当性についての検討を行った。

Keyword: Stiffened steel bridge pier, Numerical analysis, Cyclic bending behavior, Stiffness ratio

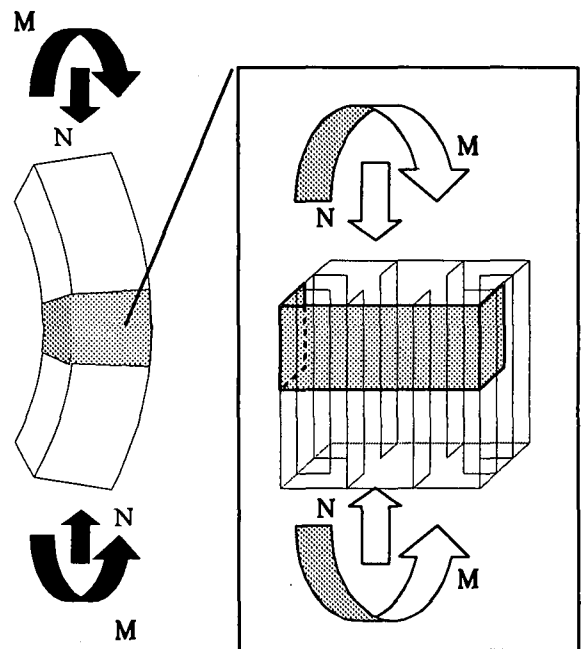
1. はじめに

鋼製橋脚は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ときの鋼製橋脚の変形能特性や抵抗メカニズム及び靱性の評価等については未だに十分解明されていない。道路橋示方書・V耐震設計編¹⁾の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になり、動的解析法ではそれをもとに復元力モデルを決めることになる。村越ら²⁾は、実寸大の多数の矩形断面供試体を作成して正負交番繰り返し載荷実験データに基づき、鋼製橋脚の $M-\phi$ 関係とそれに影響を与えるパラメータについて検討を行っている。著者ら^{3),4)}は、非線形振動応答を求める動的解析法で用いる復元力モデルとして、圧縮と曲げを受ける無補剛の鋼箱形断面短柱及び鋼管短柱のモーメント-曲率の関係を弾塑性有限要素法により求め、鋼製橋脚の $M-\phi$ 関係の近似式を提案してきた。

本研究では、補剛箱形断面部材を対象に曲げと圧縮が作用する場合について、補剛材を含めた構成板要素の幅厚比パラメータ R 、補剛材幅厚比 bs/ts 、軸力比 N/N_y 、剛比 γ/γ^* を考え、弾塑性有限要素法によりパラメトリック解析を行った。単調載荷及び繰り返し挙動載荷解析より得られた挙動について、無次元化した曲げモーメント m 、軸力比 n 、曲率 ϕ により $m-n-\phi$ 関係の近似式を提案し、その妥当性を検討するものである。

2. 解析モデル

図1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(補剛材数補剛板1パネルあたり二本)を解析モデルとした。解析は対称条件を考慮して、解析モデルの1/4部分(図1(b)のハッチング部分)を対象に行った。この解析モデルに軸力 N を一定に保ちながら、単調、及び繰り返し曲げを加えた。解析モ



(a) 橋脚の基部

(b) 解析モデル

図1 橋脚部の基部と解析モデル

表1 解析モデルの材料諸元

鋼材	SM490Y
弾性係数 E (GPa)	206
降伏応力 σ_y (MPa)	353
ポアソン比 ν	0.3
ひずみ硬化開始ひずみ ϵ_{st}	$10 * \epsilon$
ひずみ硬化係数 Est	$E/30$

モデルの鋼材はSM490Yを用い、その諸元は表1に示す。

荷重は一定圧縮軸力と曲げの載荷する方法として、図2のように、圧縮軸力を想定したおもりを解析モデルの上方より載荷したまま、曲げをX軸方向に線形的に変化する強制軸方向変位で与え、部材端での軸力を省いた各節点での軸方向反力より曲げモーメントを求めた。

解析モデルの断面寸法と初期たわみの形状を図3に示す。初期たわみの形状は、最大初期たわみが道路橋示方書⁹⁾の製作基準により規定されている板幅Bの1/150となるよう補剛板全体の初期たわみ(実線)と板パネルごとの初期たわみ(破線)とを与えた。残留応力の分布形状は示してないが、板端部と補剛材結合部に引張り残留応力 $\sigma_{rt} = 0.9\sigma_y$ 、板パネル中央部と補剛材端部に圧縮残留応力 $\sigma_{rc} = -0.3\sigma_y$ として、補剛板、補剛材ともに自己平衡を満足するように与えた⁹⁾。なお解析の精度に関係してくるメッシュ分割については、モデルの板厚方向に6分割とした。

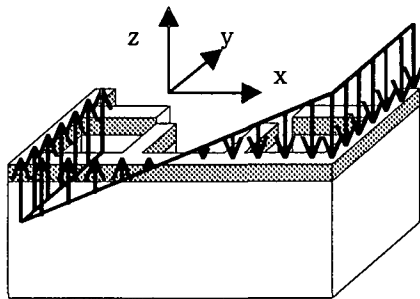
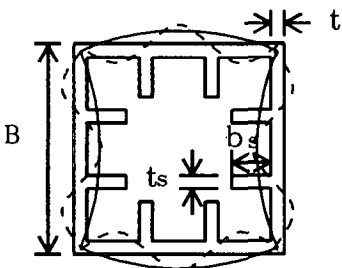


図2 荷重の載荷状況



B: 補剛板幅 t: 補剛板厚さ
bs: 補剛材長さ ts: 補剛材厚さ

図3 初期たわみ形状と断面寸法

表2 解析パラメータ諸元

R	b_s / t_s (R_s)	剛比 γ / γ^*	軸力比 N / N_y
0.3	5(0.33), 10(0.66)	1, 3, 5	0.0, 0.1, 0.2
0.4	5(0.33), 10(0.66)	1, 3, 5	0.0, 0.1, 0.2
0.5	5(0.33), 10(0.66)	1, 3, 5	0.0, 0.1, 0.2
0.6	5(0.33), 10(0.66)	1, 3, 5	0.0, 0.1, 0.2

ここに、 R_s は、補剛材幅厚比パラメータで、次式より

$$R_s = \frac{b_s}{t_s} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{0.425\pi^2}} \quad (1)$$

得られる。

3. 解析パラメータ

解析を行うにあたっての解析パラメータとして次の4つを考えた。

- ①補剛材を含めた構成要素の幅厚比パラメータR
- ②補剛材幅厚比 b_s / t_s
- ③剛比 (=補剛材剛比 γ / 最適剛比 γ^*)
- ④軸力比 n (=軸力 N / 降伏軸力 N_y)

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{4n^2\pi^2}} \quad (2) \quad \gamma = \frac{I_1}{\left(\frac{bt^3}{11}\right)} \quad (3)$$

$$\gamma^* = 4\alpha^2 n(1+n\delta_1) - \frac{(\alpha^2 + 1)^2}{n} \quad (4)$$

ここに

- n : 補剛板一枚あたりのパネル数
- I_1 : 補剛材一個の断面二次モーメント
- δ_1 : 補剛材一個の断面積比 (= $t_s b_s / t b$)
- α : アスペクト比

表2には解析パラメータの諸元を示す。短い部材で解析する場合、全てのモデルにおいてアスペクト比が問題となると考えられる。

そこで、アスペクト比の決定にあたり $R=0.7$ 、剛比3のモデルでアスペクト比を0.5、1.0、2.0と変化させて単調載荷解析を行った。図4は解析結果を示す。 $\alpha=0.5$ 、1.0の場合、挙動の差が僅少でほぼ同じであるが、 $\alpha=2.0$ の場合のみ最大強度到達後の強度劣化勾配が緩やかになっている。しかし、最大強度は全すべてのモデルとほぼ同じであることから以後の計算を $\alpha=1.0$ として行った。

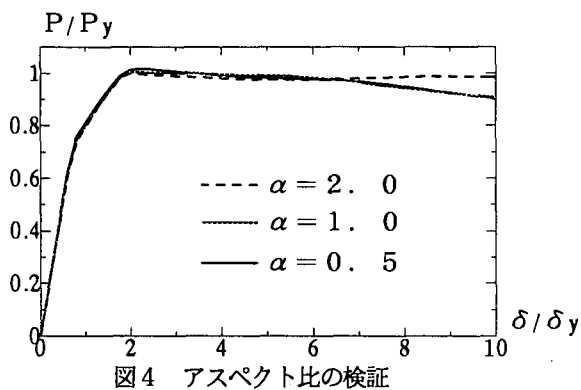


図4 アスペクト比の検証

4. 解析結果と考察

解析結果を表現するために曲げモーメント M 、軸力 N 、曲率 Φ を次のように無次元化した。(ここで曲率 Φ は荷重の荷重により生じた載荷面の傾き θ を解析対象モデルの軸方向部材長 $L/2$ で除した値である。)

$$m = \frac{M}{M_y} \quad n = \frac{N}{N_y} \quad \phi = \frac{\Phi}{\Phi_y} \quad (5)$$

ただし M_y : 降伏モーメント、 N_y : 降伏軸力、 Φ_y : 軸力を考慮しないときの降伏曲率

4.1 単調曲げ荷荷の場合

図5は、単調曲げ荷荷における $R=0.5$ 、 $n=0.0$ 、剛比1のモデルについて b_s/t_s を5、10と変化させた時の比較の図である。幅厚比 $b_s/t_s=10$ の方が最大強度がやや弱く、最大強度到達後の強度劣化勾配も少し大きくなっているものの、幅厚比 b_s/t_s の変化による差はあまり大きくないといえる。幅厚比 b_s/t_s が大きくなると補剛材に座屈が先に生じる可能性が大きくなることを考慮して、以後の解析では $b_s/t_s=5$ のモデルについてのみ検討することにした。

図6は、単調曲げ荷荷解析の結果の一例で、 $R=0.5$ として剛比を変化させた場合を示す。幅厚比パラメータ R 及び軸力比 n が大きく、剛比が小さなモデルほど最大曲げ強度が低下しており、最大曲げ強度以降の劣化勾配も大きくなっていることがわかる。また、図より $R=0.5$ 、剛比が1で軸力比が0.2のモデルについては、最大曲げ強度も小さくなっていることがわかる。なお、ここには示していないが、幅厚比パラメータ R が小さくなれば、剛比が大きいモデルほど軸力比影響は少ないことがわかった。

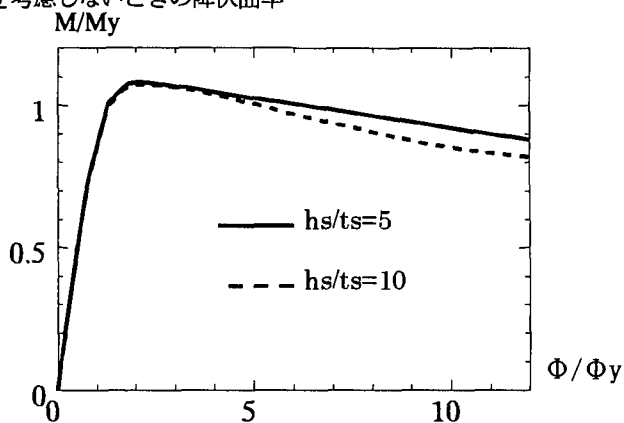
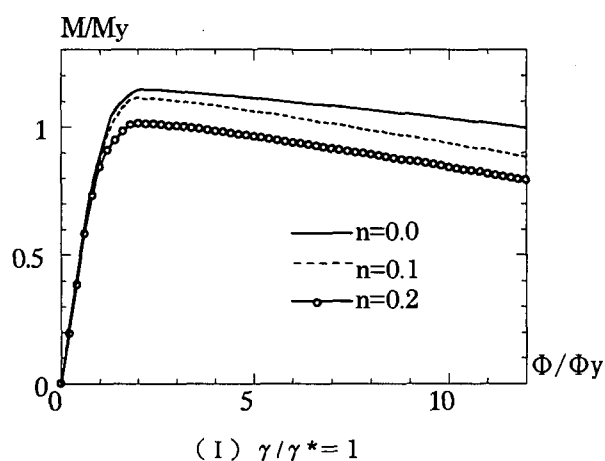
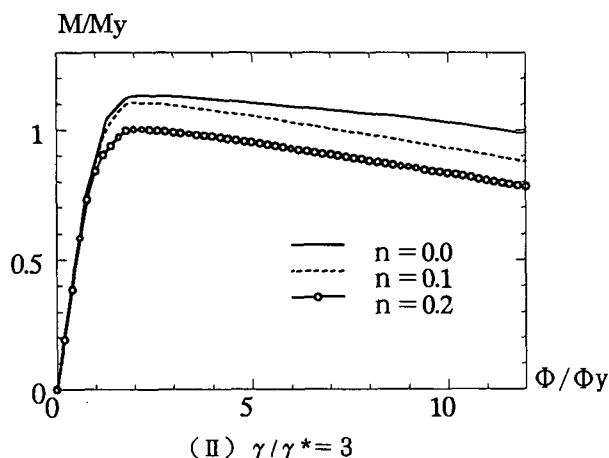


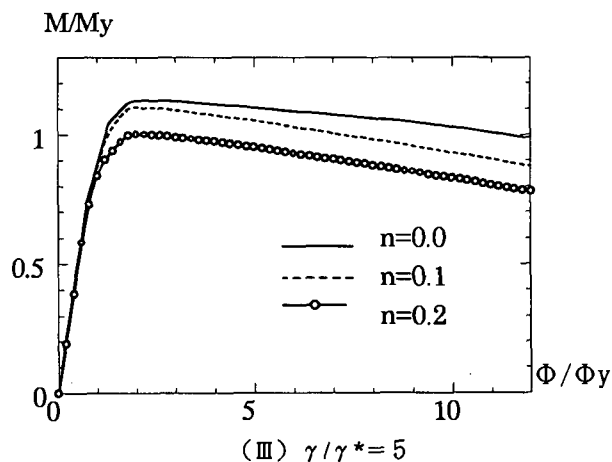
図5 b_s/t_s による比較



(I) $\gamma/\gamma^*=1$



(II) $\gamma/\gamma^*=3$



(III) $\gamma/\gamma^*=5$

図6 単調荷荷における曲げと曲率の関係 ($R=0.5$)

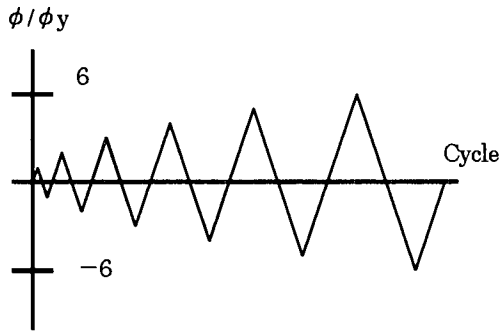


図7 繰り返し载荷パターン

4.2 繰り返し载荷の場合

繰り返し曲げ载荷の解析を行うにあたって、図7に示すような、解析モデルの曲率が暫時1倍、2倍、3倍と一定の割合で増加するような、荷重の载荷パターンを採用した。振幅φは降伏曲率φyの1倍、2倍、3倍…6倍となるようにした。

図8は、剛比3で幅厚比パラメータRを0.3、0.4、0.5、

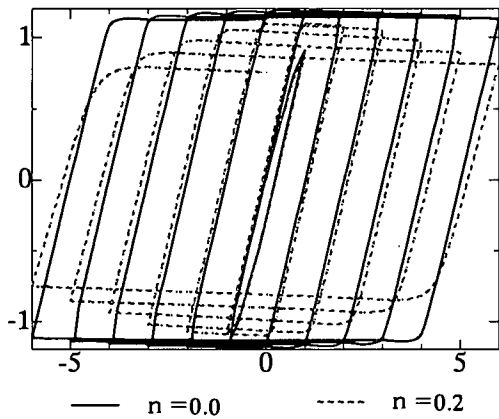
0.6としたモデルにおいて軸力nを0.0、0.2と変化させた時の曲げ繰り返し载荷の結果である。

繰り返し曲げ载荷の挙動は、载荷開始から最大曲げ強度までの挙動とそれ以降の強度劣化曲線については単調载荷と同じ挙動を示す。繰り返し载荷が進むにつれて、履歴曲線内部の面積つまり変形能がしだいに小さくなってゆく。なお、軸力比n及び幅厚比パラメータRの値が大きくなるほど、モデルの持つ繰り返し耐荷力が低下に伴う包絡線の低下が早くなり、履歴曲線の变形も大きくなる。Rが大きく、nが小さいモデルにおいてはある程度規則的な強度劣化がみられることがわかった。

5. 鋼補剛箱形断面短柱の曲線のモデル化

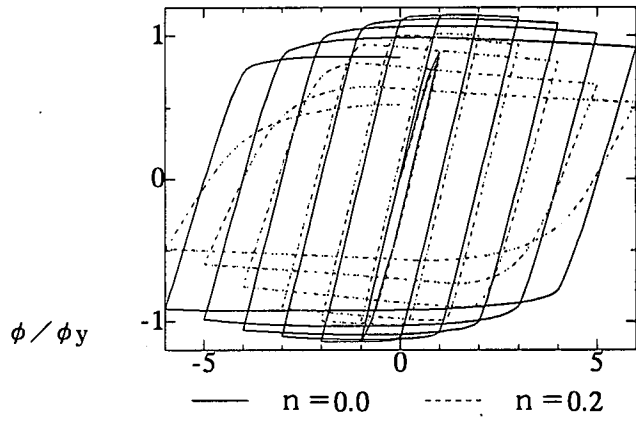
今までの解析結果より、剛比3と剛比5のモデルについては、幅厚比パラメータR、軸力比nの値にほとんど関係ない結果が得られたので、剛比が3以上については剛比3のモデルで代表させることとした。そこで、剛比3以上の鋼補剛箱形断面を対象として、幅厚比パラメータRと軸力

M/My

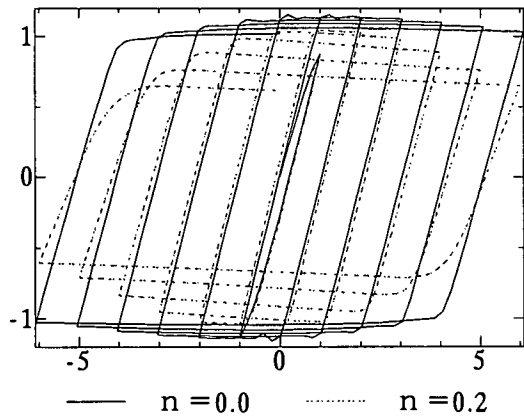


(a) R=0.3

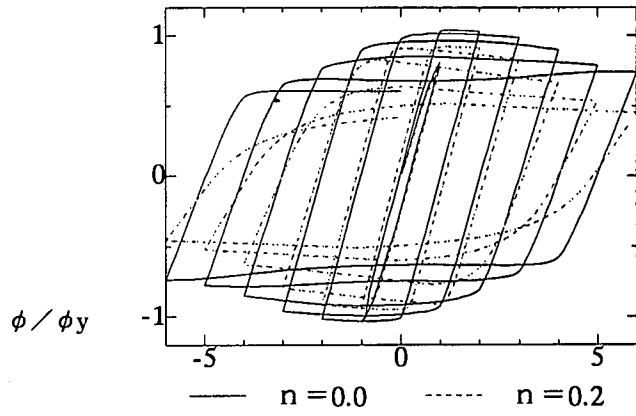
M/My



(c) R=0.5



(b) R=0.4



(d) R=0.6

図8 繰り返し载荷時のm-φ曲線 (γ/γ*=3)

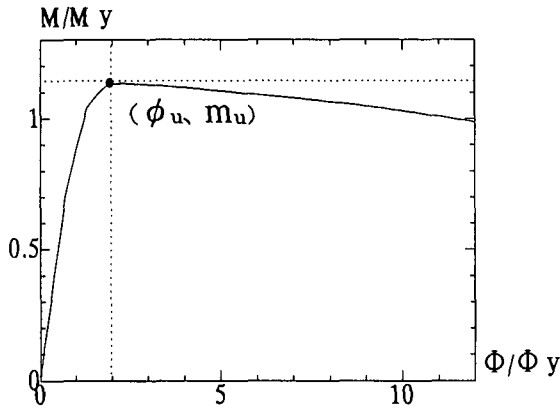


図9 m-φ曲線における最大点U(φ_u, m_u)

比nによりm-n-φ曲線のモデル化を行った。まず、一定軸力下で単調曲げを与えた場合の曲線のモデル化をし、次に繰り返し曲げを与えた場合の曲線のモデル化を、載荷開始から最大曲げモーメントまでは放物線、それ以降の劣化曲線及び除荷曲線は直線で近似して行った。

5.1 近似式

(1) m-φ曲線の近似式

図9に示すような単調曲げを与えたm-n-φ曲線の近似を行う。最大曲げモーメントまでは二次曲線で近似し最大曲げモーメント以降の劣化曲線は直線で近似する。

まず、m-φ曲線の最大点U(m_u, φ_u)を定めることにより、(0, 0)の点と極限值Uを通る関数として最大曲げ強度までの二次曲線部分を定めることができる。次に最大曲げ強度到達後の劣化曲線の劣化勾配Dを求めることにより、最大点Uを通り、傾きDを有する直線として近似することができる。式(6)、(7)に二次曲線、及び直線部の式

$$m = -\frac{m_u}{\phi_u^2}(\phi - \phi_u)^2 + m_u \quad (6)$$

$$m = D(\phi - \phi_u) + m_u \quad (7)$$

を示す。

ここに、

m_u : 最大曲げモーメントM_uを降伏モーメントM_yで除したもの

φ_u : 最大曲げモーメントM_uの点における曲率φを降伏曲率φ_yで除したもの

D : 劣化勾配

(2) 最大点U(φ_u, m_u)の近似

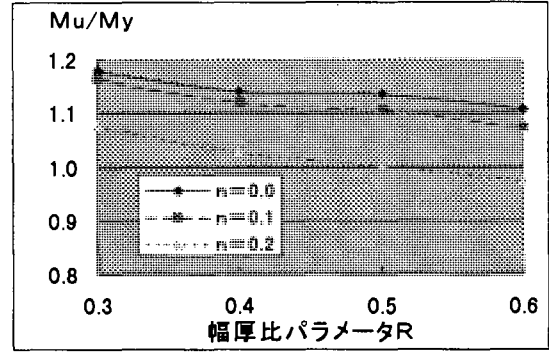


図10 最大強度と幅厚比の関係

まず近似対象となる、剛比3、R=0.3、0.4、0.5、0.6、n=0.0、0.1、0.2のモデルにおけるm-n-φ曲線の最大点Uの近似を行う。ここで、φ_uの値については全モデルにおいてφ_u=2.0となったので、m_uの値についての近似のみを行う。図10は幅厚比パラメータRとm_u=M_u/M_yの関係を示したものである。この図より最小2乗法を用いてm_uの値を直線で近似した。

結果が次式となった。

$$m_u = \alpha m R + \beta m \quad (8)$$

ここで $\alpha m = -0.5375 n - 0.2271$

$$\beta m = -0.3575 n + 1.2539 \quad (9)$$

これにより最大点U(φ_u, m_u)の近似ができた。次に劣化勾配Dの近似を行う。

(3) 劣化曲線の近似

図11はX軸に幅厚比パラメータRと劣化勾配Dの関係を各軸力比ごとに表したものである。ここでも、最小2乗法により劣化勾配DをRの関数による二次曲線で近似した。式(10)にその結果を示す。

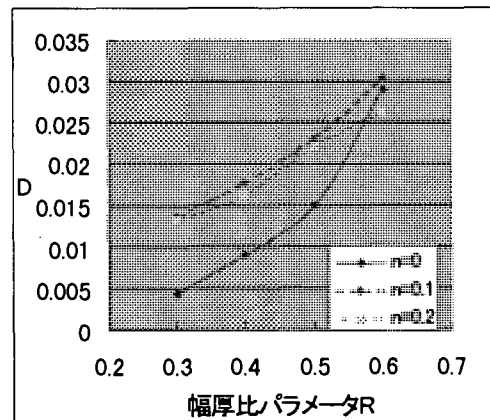


図11 劣化勾配と幅厚比の関係

$$D = \alpha_D R^2 + \beta_D R + \gamma_D \quad (10)$$

$$\left(\begin{array}{l} \alpha_D = -5.1n^2 + 2.052n - 0.233 \\ \beta_D = 3.89n^2 - 1.5335n + 0.13 \\ \gamma_D = 0.092n - 0.0217 \end{array} \right) \quad (11)$$

ここで、 M_u 、 D を近似する際に用いた α_m 、 β_m 、 γ_m 、 α_D 、 β_D 、 γ_D は、式(8)、(10)の係数と軸力比 n の関係を最小2乗法で近似した関数である。

(4) 近似値と解析値の比較

図12は $R=0.4$ 、 0.5 のモデルについての、解析値と誘導した近似式との比較を行った図である。両図とも、上から $n=0.0$ 、 0.1 、 0.2 のモデルである。ともに近似式が解析値とよく対応できているといえる。

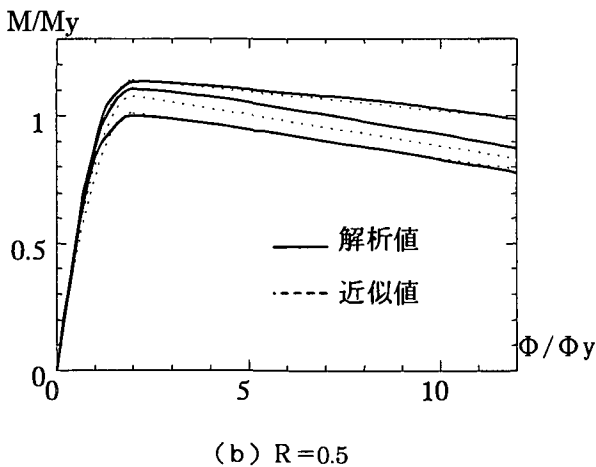
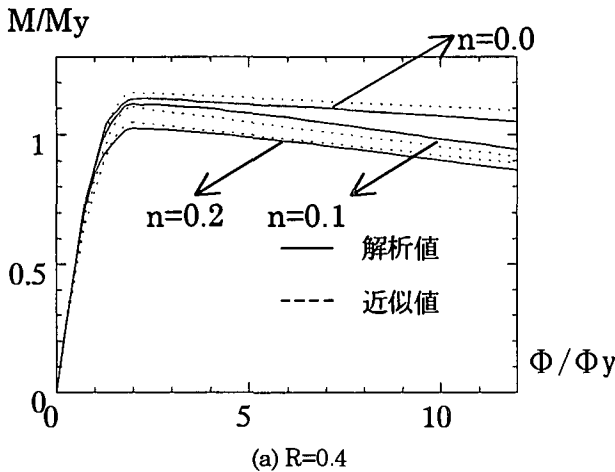


図12 解析値と近似式との比較

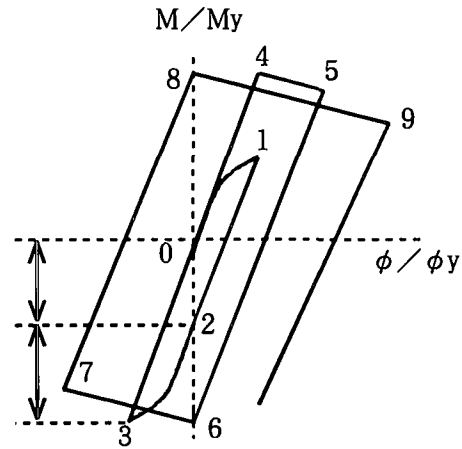


図13 繰り返し載荷の定式化モデル

5.2 繰り返し曲げを与えた $m-n-\phi$ 曲線の近似化

ここでは、図13に示すようなモデルを用いて繰り返し曲げ載荷の場合のモデル化を行った。

まず、弾性域(0-1)区間においては、すでに求めた単調載荷と同じ挙動を示す。次に(1-2)区間は除荷曲線と考えることができ、その傾きを M_u/My と仮定した。ここで、 M_u は単調載荷における最大曲げ強度である。(2-3)区間においては(0-1)区間と同じ挙動を示すことになるが、点3の M/My 値については軸力比 n の影響があり、その値を式(12)のように仮定した。

$$m_3 - m_2 = m_1(1 - 0.75n) \quad (12)$$

ただし m_1 、 m_2 、 m_3 の値はそれぞれ点1,2,3における M/My 値とする。次に(3-4)区間については(1-2)区間と同じ傾きを有すると仮定した。(4-5)区間においては、単調載荷における最大曲げ強度到達後の劣化勾配 D と軸力比 n との関数である次式でその傾きを仮定した。

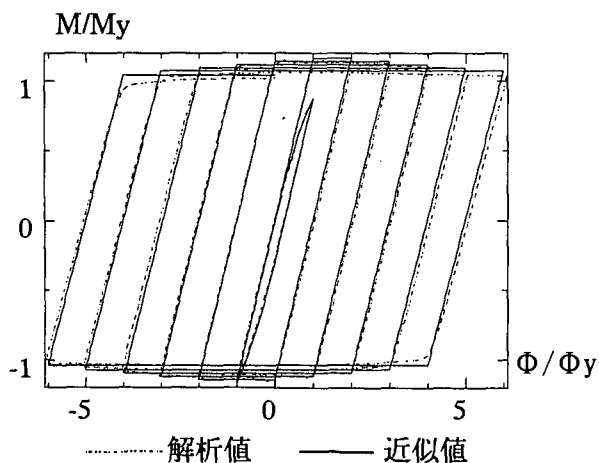
$$D_{(4-5)} = 5nD \quad (13)$$

(6-7)(8-9)区間においても(4-5)区間と等しい傾きを有するものとした。(5-6)区間からは、その傾きに幅厚比パラメータ R の影響がある。その傾きを次式で表す。

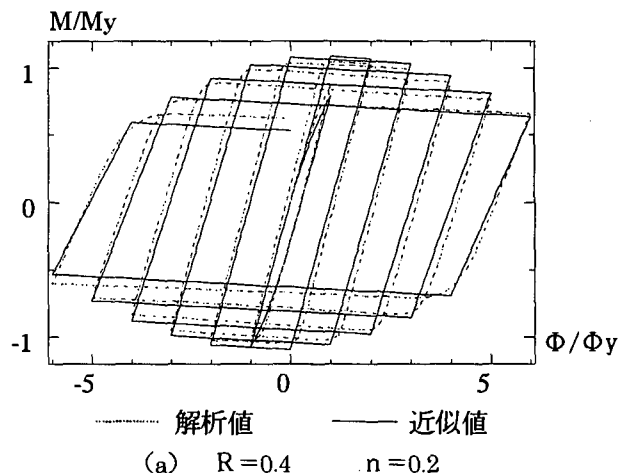
$$D_{(x)} = m_u / m_y \{ (-0.119R + 0.0377)X + 1 \} \quad (14)$$

ここで、変数Xは(5-6)区間で1、(7-8)区間で2となるもので、繰り返し載荷が先に進めば、モデルの持つ変形能が小さくなるようにしたものである。後は繰り返し載荷を進めるごとに、Xの値を暫時1ずつ増やしていくことにより、繰り返し載荷における履歴曲線をモデル化することができる。

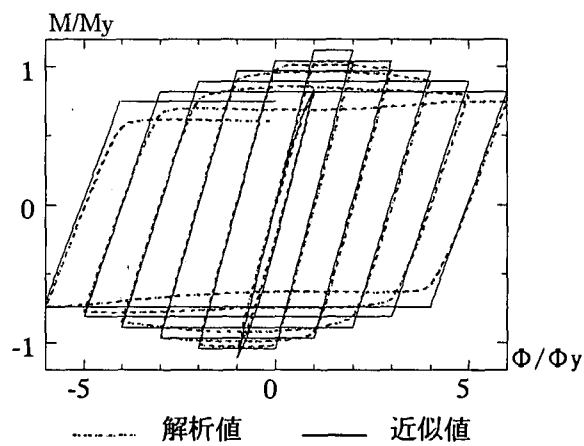
図14は、上述の方法で得られた近似曲線と解析結果の比較を示したものである。図(b)は、解析値と近似値の比較の中で、両者をもっともよく対応していると思われるもので、図(c)はその差が最も著しいものである。今回行った繰り返し載荷における履歴曲線の近似は、Rが大きく軸力比nが



(b) R=0.4 n=0.0



(a) R=0.4 n=0.2



(c) R=0.6 n=0.0

図14 解析値と近似値の比較

小さいモデルにおいては近似曲線の方が解析値より強度的に強めに出てしまう傾向があったが、繰り返し耐荷力の低下に伴う履歴曲線の変形の概略については、よく捉えることができていると思う。

以上の解析結果と単調及び繰り返し曲げ載荷におけるm-n-φ曲線の近似化について以下の事がいえる。

- 1) 剛比3と剛比5のモデルでは、幅厚比パラメータRが同値の時、m-n-φ曲線の差は僅少である。
- 2) 幅厚比パラメータR、剛比がともに等しいモデルでは、bs/tsの値が大きいほど最大曲げ強度到達後の強度劣化が大きくなる。
- 3) 単調載荷におけるモデルの近似曲線は、解析値とよく対応している。
- 4) 繰り返し曲げ載荷においては、直線により近似化を行ったが、局部的には解析値とはかけ離れた箇所もあるものの、両者はよく対応しており、その変形挙動の概略を捉えているといえる。

6. 結論

鋼補剛箱形断面を対象に、一定軸力下において単調及び繰り返し曲げを与えてその挙動解析を行い、その結果から、m-n-φ曲線の近似式を求めることを試みた。以下に得られた結論をまとめて示す。

- 1) 本研究では鋼補剛箱形断面を対象に、一定軸力のもとで単調及び繰り返し曲げを与えてその挙動解析を行い、できるだけ簡素化した関数によるm-n-φ曲線の近似式を提案した。
- 2) 単調曲げ載荷における近似式は解析値に良く対応しており、繰り返し曲げ載荷の場合においても、解析により得られた履歴曲線の変形を良く捉えているといえる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・図解説（V耐震設計編）1996.12

- 2) 村越 潤：鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験データに基づく M- Φ 関係に関する一検討、平成 10 年度土木学会全国大会講演概要集、1998.10
- 3) 山尾敏孝他：鋼製橋脚の曲げモーメントと曲率の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への応用に関するシンポジウム、1997.5
- 4) 松村新也：鋼箱形断面部材の曲げ繰返し挙動解析に関する研究、熊本大学提出平成 8 年度卒業論文、1997.2
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・図解説（I 共通編、II 鋼橋編）、1996.12
- 6) 小松定夫他：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、土木学会論文報告集 265 号、1977.11
- 7) MARC Users Manual Vol.A-E、日本マーク

(1998 年 8 月 17 日 受付)

CYCLIC BENDING BEHAVIOR OF STIFFENED STEEL MEMBERS

Kaname IWATSUBO, Toshitaka YAMAOKA, Masaaki OGUSHI and Tetsuya OKAMOTO

The present study is aimed at presenting a rational method for evaluating bending moment-curvature relations of stiffened steel members subjected to axial and bending moment. Numerical analysis is carried out using MARC. Taking into account for large deformation and material nonlinear it under cyclic bending loading. The ultimate bending behavior and ductility of stiffened steel box stub-columns composed of plates with various width-to-thickness ratios. Based on the numerical results, bending moment-curvature relations of stiffened steel box stub-columns are derived as a function of both width-to-thickness parameter and axial load ratio.