

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

山尾敏孝*, 松田 浩**, 有住康則***

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

**工博 長崎大学助教授 工学部構造工学科 (〒852 長崎市文教町1-14)

***工博 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒903-01 沖縄県中垂頭郡西原町千原1)

一定軸力を受ける無補剛鋼箱形断面及び鋼円形断面部材が、静的曲げ荷重を受ける場合の耐荷力及び変形挙動を弾塑性変位解析法を用いて行った。解析パラメータは、軸力比、幅厚比パラメータ及び径厚比パラメータを選んだ。箱形及び円筒短柱とも、軸力比もしくは幅厚比パラメータ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大きくなることが分かった。解析結果より、鋼箱形断面の無次元化した曲げモーメントと曲率との関係を近似式で表し、解析結果と比較検討を行った。

Key Words: Steel bridge pier, Nonlinear behavior, Numerical analysis

1. はじめに

兵庫県南部地震を契機に鋼製橋脚の耐震設計法が見直された。道路橋示方書耐震設計編¹⁾が大幅に改定され、地震時保有水平耐力法と動的解析が設計・照査に用いられることとなったのである。特に斜張橋や吊り橋の設計にはこれを義務づけている。これは、鋼製橋脚が局部座屈をともなって破壊する被害が先の地震で多く発生したためであり、その後多くの研究が行われてきた。しかし、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抵抗メカニズムや靱性の評価等については未だに十分理解されているとは言い難い。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。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。鋼製橋脚の変形能を求めるには、実寸大の供試体を作成して実験を行うのが最良であるが、コストの点からこれは不可能であるので、実験結果を数値計算で再現する試みが行われている。そこで本研究では、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^{2)~5)}により求め、その一評価式を提案するものである。

2. 鋼箱形短柱の解析

(1) 解析モデル

無補剛鋼箱形断面橋脚に一定軸力下で曲げモーメントを単調載荷させた場合の曲げモーメントと曲率の関係を調べるために、箱形断面短柱が軸力と曲げを受ける場合について弾塑性有限変位解析を行った。図2.1に示すような箱形断面部材を解析モデルと考え、x-y平面、y-z平面でそれぞれ対称条件を考慮して部材の1/4部分を解析対象として、軸力を一定に保ちながら曲げを加えた。座標系は部材方向にx軸、ウェブの長さ方向にy軸、フ

レンジ長さ方向にz軸をとった。モデルの断面は、 $b/d = 1.0$ の正方形断面、幅厚比 b/t は $b/t = 23, 27, 32, 55$ とした。なお、フランジ幅 $=b$ 、ウェブ幅 $=d$ 、板厚 $=t$ 、軸方向の長さ $=L$ とした。使用鋼材はSM490Yを採用し、その材料定数を表1に、解析モデルの寸法断面諸元については表2に示す通りである。ただし表2のRは幅厚比パラメータで次式で定義される。ここに、座屈係数 k は $k=4.0$ である。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2.1)$$

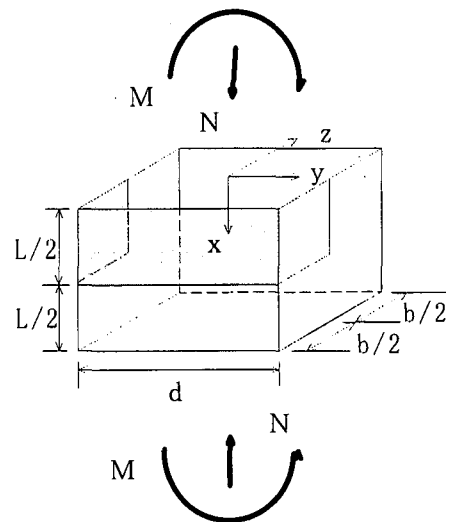


図2.1 解析モデル

表1 解析モデルの材料諸元

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}	$10 * \epsilon_y$
ひずみ硬化係数	E _{st}	$1/30 * E$

表 2 断面寸法の諸元

モデル	R	b/t	b=d(cm)	t(cm)
1	0.5	23	150	6.5
2	0.6	27	150	5.4
3	0.7	32	150	4.67
4	1.0	55	150	2.75

初期たわみの形状は道路橋示方書¹⁾の製作基準により、最大初期たわみが $b/150, d/150$ となるような sin カーブを用いた。中空単純支持なのでフランジ方向には内側方向に、ウェブ方向には外側方向に発生するように仮定した。また残留応力の分布形状は、図 2.2 に示すように板端部に引張残留応力 $\sigma_{rc}=0.9 \sigma_y$ を板中央部に圧縮残留応力 $\sigma_{rc}=0.3 \sigma_y$ を矩形の分布で仮定した。ここに σ_y は降伏応力である。

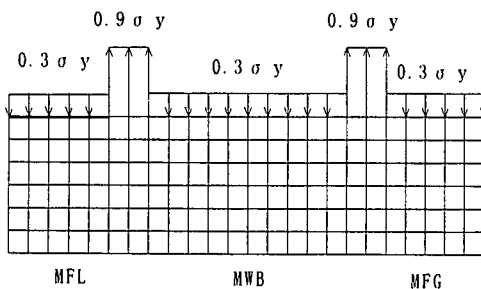


図 2.2 残留応力と要素分割

本解析では部材のメッシュ分割が精度と関係するので問題になる。既往の研究結果である文献 6) を参考にし、本解析の箱形断面モデルでは、軸方向分割数を 6 分割、ウェブ方向分割数を 12 分割、フランジ方向を 6 分割、板厚方向を 6 分割とした。図 2.2 に分割例を示す。アスペクト比の決定については、軸力比 0.1、幅厚比パラメータ 1.0 のモデルを用いて圧縮解析を行い、その際の強度とアスペクト比の関係を調べると図 2.3 のようになったので、今回の解析モデルのアスペクト比は全て 0.7 として行った。なお、これは既往の研究で得られている結果とほぼ同じである。

(2) 解析結果と考察

図 2.4 は単調曲げ载荷における曲げモーメントと曲率の関係を、幅厚比パラメータと軸力比を変化させて示し

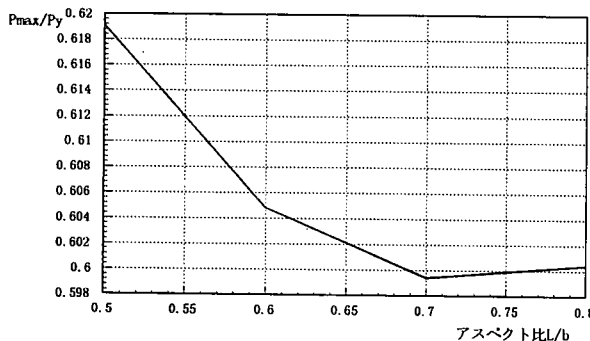


図 2.3 アスペクト比と最大強度の関係

たものである。なお図中の M_y 降伏モーメントであり、 Φ_y は M_y に対する降伏時の曲率でそれぞれ無次元化して示してある。これらの図より、単調载荷においては、幅厚比パラメータ R 、軸力比 n が大きくなるにつれ最大曲げ強度が低下し、最大曲げモーメントとそれに伴う曲率は小さくなる。また、最大曲げ強度以降の強度劣化曲線の低下勾配は大きくなることわかる。

3. 鋼円形短柱の解析

(1) 解析モデル

鋼製円筒橋脚に一定軸力下で曲げモーメントを単調载荷で作用させた場合の局部座屈を考慮した極限強度特性を解明するため、円形断面を有する鋼管短柱に圧縮力と曲げが作用した場合について弾塑性有限変位解析を行った。解析に用いたモデルは、図-3.1 に示すダイヤフラム等で区切られた鋼製円筒橋脚の一部である鋼管短柱であり、境界条件は载荷辺の面外変形に対して単純支持とした。解析は鋼製円筒短柱をアイソパラメトリックシェル要素でモデル化し、弾塑性有限変位理論に基づいた数値解析を行った。解析では二軸対称性から鋼管短柱の 1/4 部分を解析の対象とし、要素分割は 8×6 分割とした。なお、要素分割は 8×6 分割以上を用いれば十分な精度が得られることをパラメトリック解析を行う前に確認した。解析に用いたパラメータ及びその変動範囲を表 3 に示す。なお、径厚比パラメータは次式のように定義される。

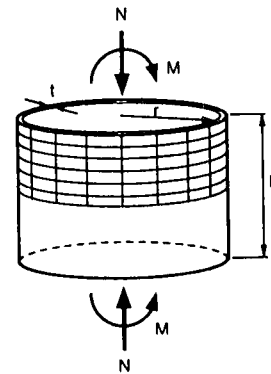
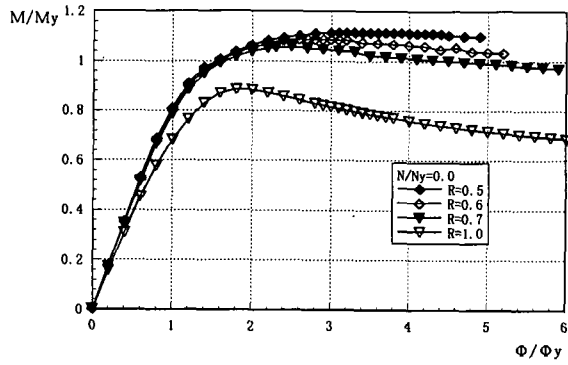


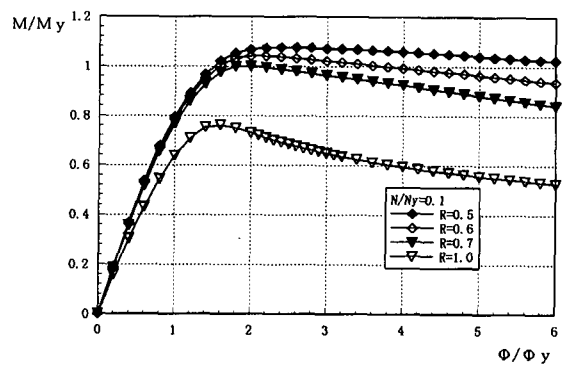
図 3.1 鋼管短柱モデル

表 3 解析パラメータ及びその変動範囲

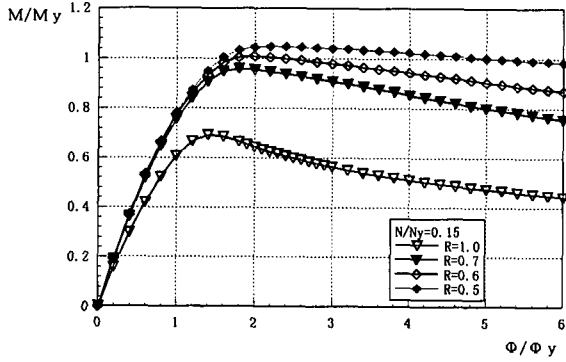
項目 (1)	記号 (2)	変動範囲 (3)
径長比	r/L	3 ~ 12
径厚比パラメータ	Rt	0.093, 0.160, 0.224, 0.288, 0.352
最大初期たわみ	w_0	$L/100, L/250, L/500$
軸力比	N/N_y	0.0, 0.1, 0.2, 0.3



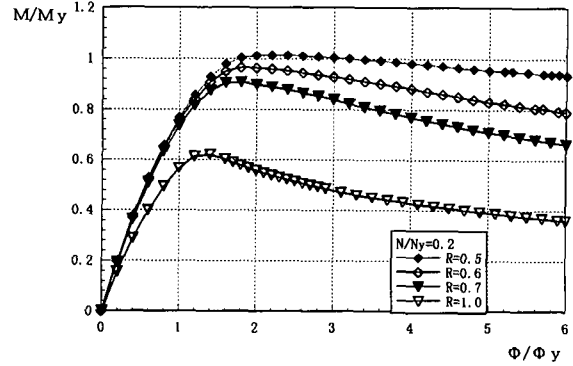
(a) $N/N_y = 0.0$



(b) $N/N_y = 0.1$

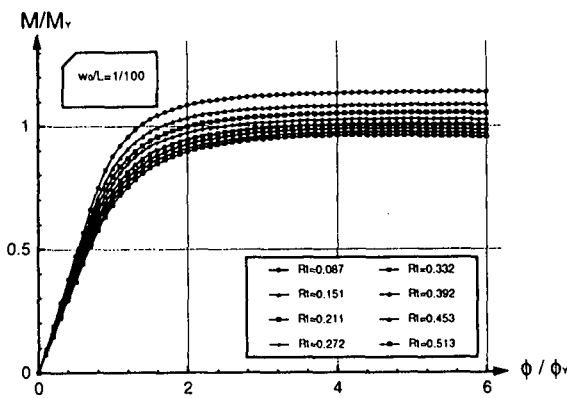


(c) $N/N_y = 0.1$

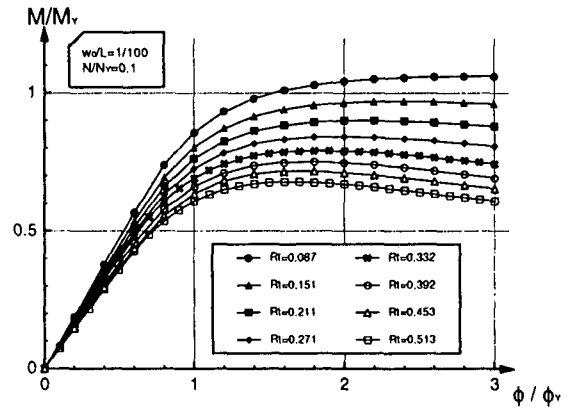


(d) $N/N_y = 0.2$

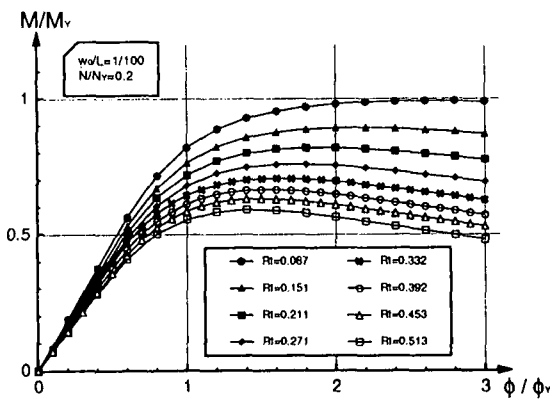
図 2.4 単調荷重での曲げモーメントと曲率の関係



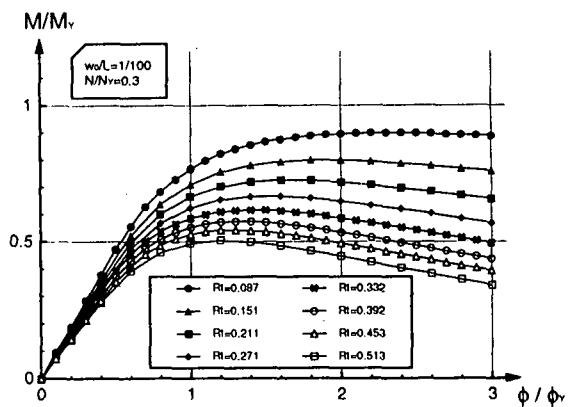
(a) $N/N_v = 0.0$



(b) $N/N_v = 0.1$



(c) $N/N_v = 0.2$



(d) $N/N_v = 0.3$

図 3.2 単調荷重での曲げモーメントと曲率の関係

$$Rt = \sigma_y / \sigma_e = 1.65(\sigma_y / E)(r/l) \quad (3.1)$$

ここで、 σ_y は降伏応力度、 σ_e は弾性座屈応力度及びEはヤング係数である。初期たわみ形状は、軸線中央で最大初期たわみを有する正弦波で仮定した。なお、残留応力については、鋼管の残留応力に関する資料が十分に整っていないため本解析では考慮しなかった。また、本解析では同一の径厚比パラメータを有する鋼管について径長比を種々変化させて解析を行い、極限強度が最小値を示す径長比を限界径長比と定義し、以下の解析において用いた。

(2) 解析結果と考察

解析で得られた曲げモーメントと曲率の関係の一例を、初期たわみを有する鋼管短柱に純曲げが作用する場合及び一定軸力が作用する場合について図3.2に示す。図中、 M_y 降伏モーメントであり、 Φ_y は M_y に対する降伏時の曲率である。これらの図から明らかなように、純曲げを受ける鋼管の曲げモーメントと曲率の関係は、最大モーメントに達した後、緩やかに耐荷力が低下している。一方、一定軸力を受ける鋼管では最大モーメントに達し後の耐荷力の低下が純曲げの場合と比較して著しい。その傾向は、径厚比が大きいほど顕著である。

初期たわみが鋼管短柱の極限強度に及ぼす影響を検討するため、純曲げを受ける鋼管短柱について、最大初期たわみを $w_0 = L/100, L/250, L/500$ と変化させ解析を行った。解析より得られた極限強度 M_{max} と径厚比パラメータ Rt の関係を図3.3に示す。図から明らかなように、最大初期たわみの値が大きくなるに従って極限強度は低下している。また、初期たわみ $w_0 = L/100$ を有する鋼管短柱について、軸力比を $N/N_y = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3$ と変化した場合の極限強度と径厚比パラメータの関係を図3.4に示す。軸力比が大きくなるに従って極限強度(最大曲げ耐荷力)が低下していることがわかる。

図3.5に終局時の変形モードの一例を示す。図から明らかなように圧縮部で局部変形が明確に現れている様子がうかがえる。

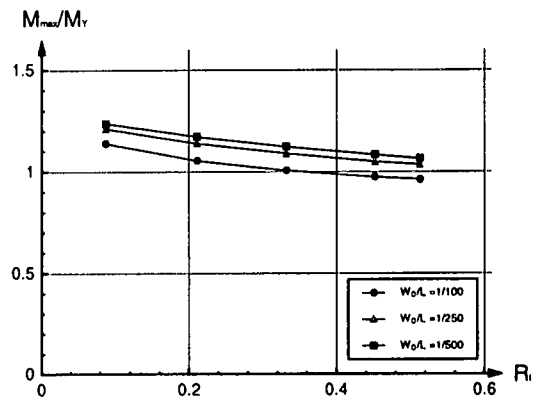


図3.3 初期たわみの影響

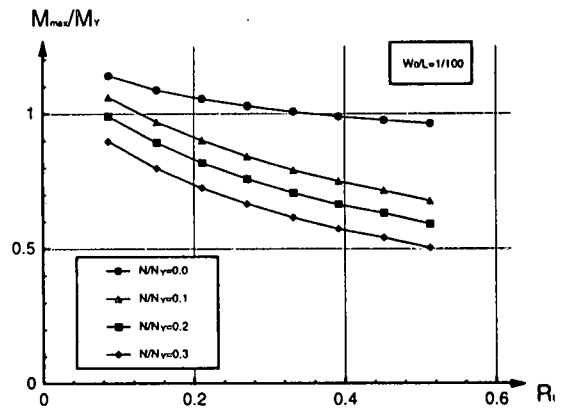


図3.4 軸力比の影響

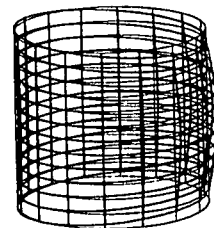


図3.5 終局時の変形図

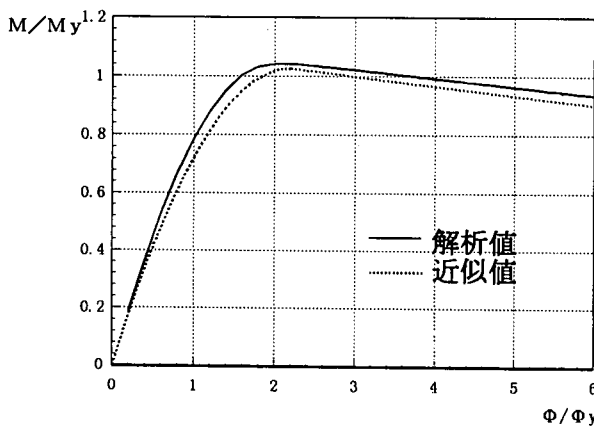


図4.1 解析による曲げモーメントと曲率の関係

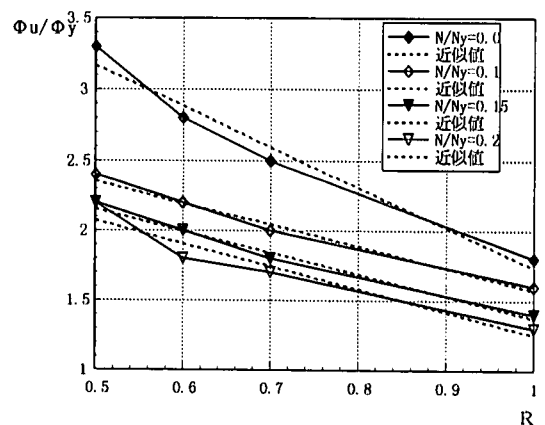


図4.2 幅厚比パラメータRと最大曲率 ϕ_u の関係

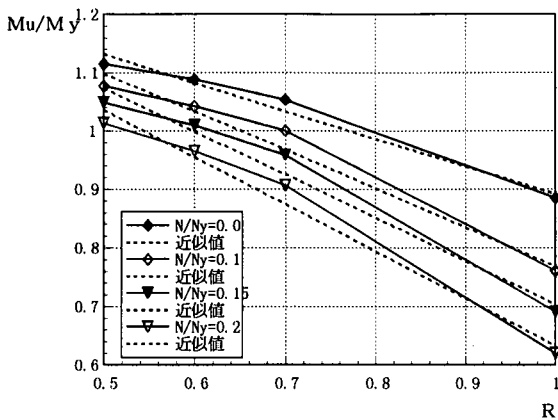


図 4.3 幅厚比パラメータRと最大曲げモーメント m_u の関係

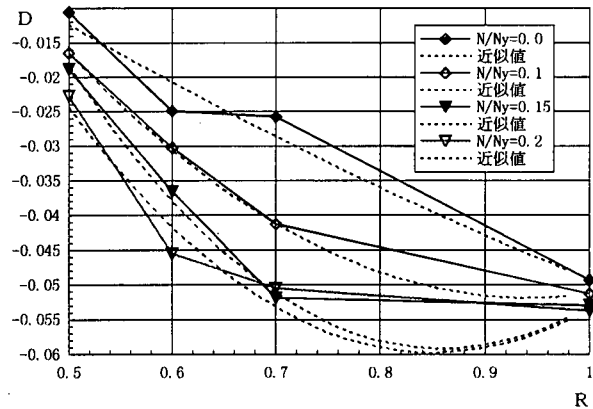


図 4.4 幅厚比パラメータRと劣化勾配Dの関係

4. 鋼箱形断面短柱の曲線のモデル化

ここでは、無補剛鋼箱形断面を対象にして、解析で得られた一定軸力下での曲げモーメントと曲率の近似式を、文献7)の手法を参考にして求めることを試みた。近似式を表現するために曲げモーメント M 、軸力 N 、曲率 Φ をそれぞれ下のように無次元化した。

$$m = \frac{M}{M_y}, \quad n = \frac{N}{N_y}, \quad \phi = \frac{\Phi}{\Phi_y} \quad (4.1)$$

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である。種々の幅厚比をもつ鋼箱形断面の一定軸力下で単調曲げを受けた場合の $m-n-\phi$ 曲線の近似化を行うが、解析結果の荷重-変位挙動より、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は直線で近似して行った。以下にその近似方法の概要を述べる。

(1) $m-n-\phi$ 曲線の近似式

図 4.1 に示すようなモーメントと曲率の関係が解析から得られているので、最大曲げモーメントまではほぼ2次曲線で近似し、それ以降は直線近似が可能となる。そこで、近似式は曲げモーメントの最大点の座標 (ϕ_u, m_u) と劣化勾配 D によって決定出来ると考え、最大曲げモーメントまでの曲線式と直線式として次式を用いた。この ϕ_u と m_u を幅厚比パラメータ R と軸力比 n の関数として求め、 $m-\phi$ 曲線を導き出すことにした。

$$m = -\frac{m_u}{\phi_u^2} (\phi - \phi_u)^2 + m_u \quad (4.2)$$

$$m = D (\phi - \phi_u) + m_u \quad (4.3)$$

ただし、 ϕ_u : m_u の時の曲率 Φ_u を、軸力無しの降伏曲率 Φ_y で除して無次元化したもの

m_u : 最大曲げモーメント M_u を降伏モーメント M_y で除して無次元化したもの

D : 劣化勾配

(2) 最大点 (ϕ_u, m_u) の近似

最大曲げモーメント時の曲率 ϕ_u と幅厚比パラメータ R 、最大曲げモーメント m_u と R との関係を探ると、それぞれ図 4.2 と図 4.3 に示すような結果が得られた。

軸力比 n を変化させてもほぼ直線関係を保っていることがわかる。そこで図において、最小2乗法を用いて ϕ_u, m_u を次式で直線近似した。

$$\phi_u = \alpha_\phi R + \beta_\phi \quad (4.4)$$

ただし、 $\alpha_\phi = -49.351 n^2 + 16.701 n + 2.842$

$$\beta_\phi = 50.909 n^2 - 19.019 n + 4.592 \quad (4.5)$$

$$m_u = \alpha_m R + \beta_m \quad (4.6)$$

ただし、 $\alpha_m = -1.688 n - 0.478$

$$\beta_m = 0.388 n + 1.376 \quad (4.7)$$

以上で曲げモーメントの最大点 (ϕ_u, m_u) を幅厚比パラメータ R と軸力比 n で表すことができた。これを式(4.2)に代入すれば近似曲線が得られることになる。

(3) 最大曲げモーメント m_u 以降の劣化曲線の近似

劣化曲線は解析結果の劣化勾配 D を最小2乗法で近似し、幅厚比パラメータ R と軸力比 n の関数で次のように表した。

$$D = \alpha_D R^2 + \beta_D R + \gamma_D \quad (4.8)$$

ただし、

$$\alpha_D = -5.561 n^2 + 2.419 n + 0.0208$$

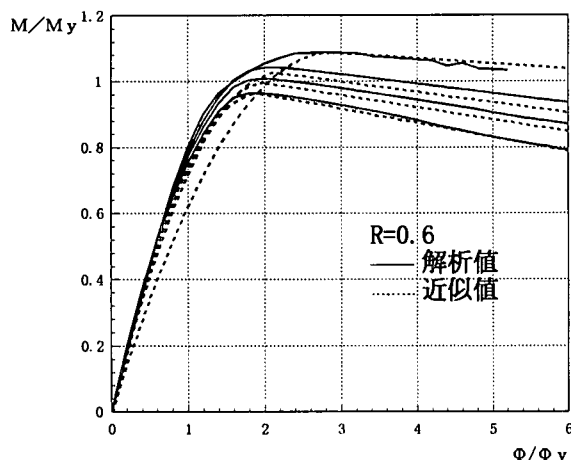
$$\beta_D = 8.101 n^2 - 3.658 n - 0.105 \quad (4.9)$$

$$\gamma_D = -3.0413 n^2 + 1.213 n + 0.035$$

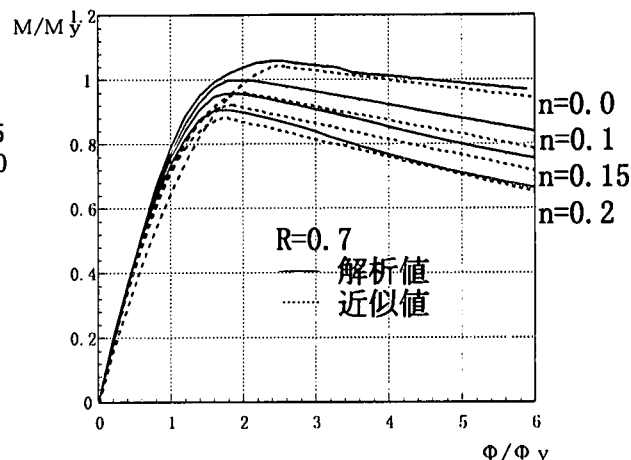
以上で劣化勾配 D を幅厚比パラメータ R と軸力比 n で表すことができた。これを式(4.3)に代入して直線式が得られる。ここに α, β, γ は式(4.4)、(4.6)、(4.8)の係数と軸力比 n の関係を最小2乗法で近似した関数である。

(4) 近似値と解析値の比較

前述のようにして求めた近似曲線と解析値の比較を幅厚比パラメータ $R=0.6$ と 0.7 の場合について図 4.5 に示す。軸力が無いいわゆる純曲げの場合、初期勾配に差があるが、最大曲げモーメント及び劣化曲線もよく対応している。また、軸力がある場合には、初期勾配及び劣化勾配もよく対応しており、近似がうまく行われていることがわかる。なお、今後、残留応力を考慮した補剛付き鋼管短柱の解析を行い、同様な手法を用いれば箱形断面の場合と同じように近似可能と思われる。



(a) R=0.6



(b) R=0.7

図4.5 近似値と解析値との比較

5. 結論

一定軸力を受ける無補剛鋼箱形鋼断面及び鋼円形断面短柱が、静的曲げ荷重を受ける場合の耐荷力及び挙動を弾塑性変位解析法を用いて行った。そして、解析結果より、鋼箱形断面の無次元化した曲げモーメントと曲率との関係を近似式で表し、解析結果と比較検討を行ない、次のような結果が得られた。

- 1) 箱形断面短柱では、軸力比 N/N_y もしくは幅厚比パラメータ R 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大きくなるのが分かった。
- 2) 円形断面短柱では径厚比パラメータが大きくなると最大曲げ強度低下する傾向は箱形と同様であった。
- 3) 一定軸力と曲げを受ける鋼箱形断面の曲げモーメントと曲率関係を近似式 ($m-n-\phi$ 曲線) でモデル化して提案した。
- 4) 単調載荷の近似式と解析結果を比較検討した結果、軸力がある場合には非常によい対応が見られ、提案した近似式の有効性が見られた。

謝辞： 数値解析の一部については松村新也君（現熊本大学大学院）にご協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（共通編、鋼橋編，1994.，耐震設計編，1996.）

- 2) 山尾敏孝・崎元達郎：板要素とはり要素の結合による薄肉造物の有限変位弾塑性解析，構造工学論文集，Vol.32A，pp.291-301，1986.
- 3) Yamao, T. and Sakimoto, T.: Nonlinear Analysis of Thin-Walled Structures by a Coupled Finite Element Method. Proc. of JSCE, No. 374/I-6, pp.57-66, 1986.
- 4) Yabuki, T., Arizumi, Y. and Yashiro, S.: Ultimate Strength and its Practical Evaluation of Cylindrical Steel Shell Panels under Various Compression, Journal of Structural Mech. and Earthquake Eng., JSCE, No.489/I-27, pp.37-47, 1994.
- 5) 有住康則・矢吹哲哉・八代茂：圧縮と曲げを受ける円筒パネルの極限強度に関する研究、構造工学論文集、Vol.41A，pp.337-348，1995
- 6) 森島伸吾：内部にコンクリートを充填した角形鋼管の局部座屈強度に関する研究、熊本大学提出平成5年度修士論文，1994.
- 7) 山田正史：一定軸力を受ける鋼箱形断面部材の曲げ耐荷力解析，熊本大学提出平成7年度卒業論文，1996.
- 8) 鈴木敏郎・金子洋文：有限要素法による部材構成板要素の座屈及び座屈後挙動の大変形解析，日本建築学会論文報告集，第316号，1982.

(1997年3月31日受付)

AN EVALUATION OF BENDING MOMENT- CURVATURE RELATIONS OF STEEL BRIDGE PIERS

Toshitaka YAMAOKA, Hiroshi MATSUDA and Yasunori ARIZUMI

The present study is aimed at presenting a rational method for evaluating bending moment-curvature relations of steel bridge piers subjected to axial and horizontal loads. An elasto-plastic large displacement FEM is used to analyze the ultimate bending strength and behavior of steel box and cylinder stub-columns composed of plates with various width-to-thickness ratios. Based on the numerical results, bending moment-curvature relations of box stub-columns are derived as a function of both width-to-thickness parameter and axial load ratio.