

隅角部の曲面が箱形断面部材の軸圧縮特性に及ぼす影響

Influence of Round Corners on Axial Compressive Properties of Box-Section Members

大賀水田生*, 竹村慎一郎**, 今村覚***

Mitao OHGA, Shinichiro TAKEMURA and Satoru IMAMURA

*正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

**学生員 愛媛大学大学院理工学研究科博士後期課程 生産工学専攻 (同上)

***学生員 愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程 環境建設工学専攻 (同上)

In this paper, the influences of round corners on axial compressive properties of the box-section members, such as, nonlinear behavior, yield and ultimate strength, and energy absorption capacity are examined by the finite element method. In this method, so-called 9-node isoparametric degenerated shell element with independent displacement and rotation degrees of freedom is used. The Green Lagrange strain definition and the Prandtl-Reuss stress-strain relation following the von-Mises yield criterion are applied to incorporate the geometrical and material nonlinearity. The box-section members without longitudinal stiffeners are adopted as analytical models, in the numerical examples. The influences of round corners of cross section on axial compressive properties are examined with different sizes of the round corner radius.

Key Words : *box-section member with round corners, nonlinear behavior, yield strength, ultimate strength, energy absorption capacity, axial loads*

1. はじめに

現在, 箱形断面鋼製橋脚柱の断面隅角部を円弧状とすることにより, 橋脚の耐荷力が上昇し, 変形能に優れた構造になるということがこれまでの実験的, 理論的研究を通じて明らかになっている^{1)~3)}. 隅角部を曲面とした鋼製橋脚柱 (以下「R 付き橋脚柱」と記す) は, このような力学的なメリットに加え, 近年重要視されている景観性の面においても従来の箱形断面柱の場合と比較して優れていることから, 都市内の高架構造物においてしばしば採用されるようになってきた. しかし, R 付き橋脚柱の適切な断面設計を行う際, 補剛板および補剛材により構成される箱形断面柱とは異なり, 鋼曲面板を隅角部に導入していることから, 断面隅角部の曲面の大きさ (以下「曲率半径」と記す) など断面形状の変化が部材の力学的な挙動に及ぼす影響を正確に把握する必要があると考えられる. しかしながら, 今日まで行われてきた R 付き橋脚柱に関する研究は個々の断面形状を対象としたものが多く, これらの断面形状の変化が部材の力学的な挙動に及ぼす影響を詳細に検討した研究はあまり行われていない. 奈良ら⁴⁾ は, 無補剛断面部材を対象に隅角部の曲率半径の大きさを変えて FEM 耐荷力解析を行い, 断面形状の変化が部材の極限圧

縮強度に及ぼす影響を明らかにするとともに, 断面形状の変化が強度に与える影響を考慮した極限圧縮強度の簡易評価法を提案し, その妥当性および有効性について検討している. 著者ら⁵⁾ は, 無補剛および補剛断面部材の両方を対象に隅角部の曲率半径の大きさが部材の座屈強度および座屈モードに及ぼす影響について伝達マトリックス法を用いて検討している.

本研究では, R 付き橋脚柱に関する基礎的な研究として, 無補剛箱形断面鋼柱を対象に曲率半径の大きさを変化させて FEM 耐荷力解析を行い, 隅角部の曲率半径の大きさが軸圧縮力を受ける場合での部材の非線形挙動, 降伏強度, 極限強度およびエネルギー吸収能に与える影響について考察を行う.

なお, 本研究で対象とした解析モデルに導入した初期たわみの形状については, 部材の局所的な変形と全体的な変形を組み合わせたものを用いているが, 部材の局所的な変形においては伝達マトリックス法(TMM)により得られた部材の座屈時の変形形状を導入している. これは, TMMにより得られた座屈時の変形形状を解析モデルに導入して FEM 耐荷力解析を行った場合, 従来の三角関数による初期たわみを導入した場合と比較して部材の極限荷重が

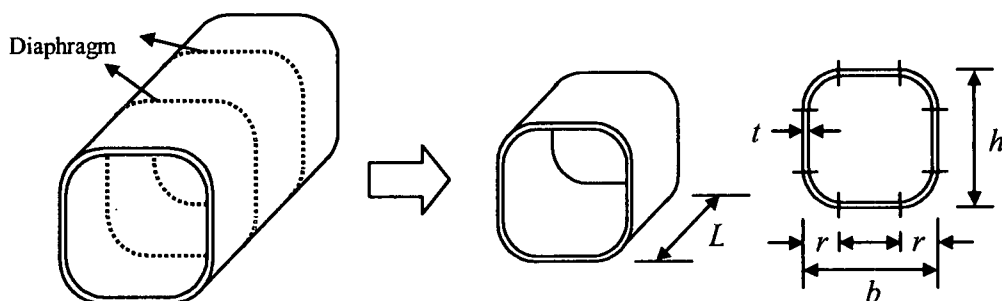


図-1 隅角部を曲面とした箱形断面部材

小さく、また極限荷重以降の挙動についても安定した解が得られることが明らかとなっているためである^{6), 7)}。

TMM は本来 1 次元問題に対する解析法であるが、1 方向に三角関数を導入することにより板パネルなどの 2 次元問題に^{8), 9)}、さらに薄肉断面部材を構成する板パネル間の状態量を関係付ける座標変換マトリックスを導入することにより薄肉断面部材に拡張されている^{10) ~ 12)}。本研究では、板およびシェルパネルに対する格間伝達マトリックスを組み合わせて用いることにより、伝達マトリックス法を隅角部を曲面とした箱形断面部材の座屈解析に適用している。

2. 解析モデルおよび解析手法

2.1 FEM 耐荷力解析

本研究での FEM 耐荷力解析では、9 節点を有するアイソパラメトリック退化シェル要素を用いており、解析では幾何学的および材料学的非線形性を考慮している。幾何学的非線形挙動はラグランジュ法による増分理論に基づいている。また材料学的非線形挙動は、von-Mises の降伏条件に従うものとするとともに、Prandtl-Reuss の応力-ひずみ関係を用いており、材料構成則は等方硬化則に従うものとしている。なお非線形計算は荷重増分法を用いているが、各荷重増分段階における載荷法としては、極限荷重以降において安定した解が得られること等の理由から、部材端部に一定の変位を与える方法(変位増分法)を用いている。

2.2 解析モデル

(1) 解析モデルの形状

本研究では、図-1 に示すような断面隅角部を曲面とした無補剛箱形断面鋼柱を対象に橋脚のダイアフラム間を解析した。解析モデルの諸元を表-1 に示す。また、比較のために隅角部が曲面でない通常の箱形断面部材($r/b=0.0$)の場合についても検討した。なお、表-2 には箱形断面部材の細長比・幅厚比パラメータを示している。

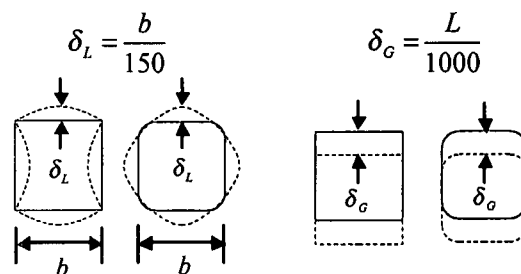
解析モデルの形状については断面の対称性を考慮して 1/2 断面を解析対象とし、要素分割については断面方向に

表-1 解析モデルの諸元

Width b (mm)	600
Height h (mm)	600
Thickness t (mm)	8
Length L (mm)	360, 720, 1080, 1440
Round Corner Radius r (mm)	0, 60, 120, 180
Height-Width Ratio h/b	1.0
Thickness-Width Ratio t/b	0.013
Length-Width Ratio L/b	0.6, 1.2, 1.8, 2.4
Round Corner Radius -Width Ratio r/b	0.0, 0.1, 0.2, 0.3

表-2 箱形断面部材($r/b=0.0$)におけるパラメータ

L/b	細長比パラメータ λ	幅厚比パラメータ R
0.6	0.022	1.63
1.2	0.044	1.82
1.8	0.067	1.84
2.4	0.089	1.82



(a) 局所的な初期たわみ (b) 全体的な初期たわみ

図-2 初期たわみの形状および大きさ

20 要素、部材軸方向に $L/b=0.6, 1.2, 1.8, 2.4$ でそれぞれ 6, 12, 18, 24 要素としている。

なお、解析モデルの鋼種は SM570 を想定しており、降伏応力は公称降伏応力度 450.8MPa ($4,600 \text{ kgf/cm}^2$) としている。

(2) 初期不整

解析モデルに導入した初期不整については初期たわみのみを考慮しており、その形状は部材断面を構成している各パネルの局所的な変形(図-2(a)の点線)および半波長の変形を部材全体に与えたはりとしての全体的な変形(図-2(b)の点線)を組み合わせたものとしている。また、図-2

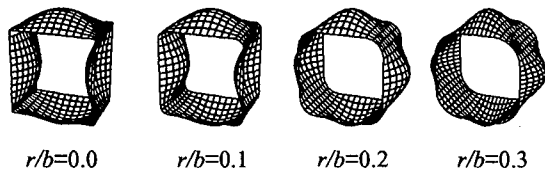


図-3 TMMにより得られた最小座屈時の変形形状

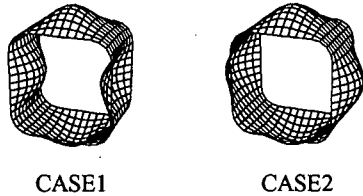


図-4 形状の異なる座屈モード

の実線はモデル図を表している。なお、部材の局所的な変形については、図-3 に示すような伝達マトリックス法により得られた最小座屈荷重に対する変形形状を用いている。

ところで、図-3 より明かなように、最小座屈荷重に対する変形形状は同一の形状ではなく、隅角部の曲率半径の大きさにより異なる2種類の変形形状を示している。そこで、この2種類の座屈時の変形形状(図-4:CASE1,CASE2)について、座屈強度の比較およびこれらをFEM耐荷力解析での初期たわみとして用いた場合の部材の非線形挙動および極限強度の検討を行った。表-3 に伝達マトリックス法により得られた各部材の CASE1 および CASE2 に対応する座屈係数 $k(=b^2\sigma_x t/(\pi^2 K))$, $K = Et^3/(12(1-\nu^2))$ の比較を、図-5 に部材長比 $L/b=1.8$ 、曲率比 $r/b=0.1, 0.3$ での荷重-変位曲線の比較を示している。表-3 から明かなように、最小座屈荷重に対する変形形状は、 $r/b=0.0, 0.1$ で CASE1, $r/b=0.2, 0.3$ では CASE2 となっている。また、図-5 から明かなように、各部材の極限強度は部材に導入した初期たわみの形状の違いにより大きく異なっており、最小座屈荷重に対する変形形状を初期たわみとして導入した場合、より小さな極限強度となっている。これらのことより、図-3 に示す最小座屈荷重時での変形形状をFEM耐荷力解析での初期たわみとして用いることが妥当と考えられる。

初期たわみの大きさについては、道路橋示方書¹³⁾に規定されている製作誤差の許容値(初期たわみ振幅: $\delta_L = b/150$, $\delta_g = L/1000$)としている(図-2)。

なお、残留応力については、軸方向荷重による各部材の応力分布状態を検討するため考慮していない。

2.3 伝達マトリックス法

本研究では、FEM耐荷力解析に導入する局所的な初期たわみとして座屈時の変形形状を用いている。本節では、

表-3 各部材の座屈係数 $k(L/b=1.8)$

	$r/b=0.0$	$r/b=0.1$	$r/b=0.2$	$r/b=0.3$
CASE1	4.04	5.43	11.53	19.40
CASE2	7.05	8.02	10.41	17.63

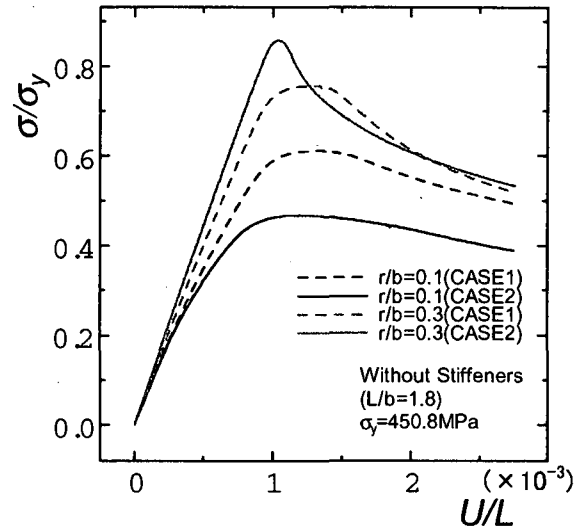


図-5 荷重-変位曲線($L/b=1.8$)

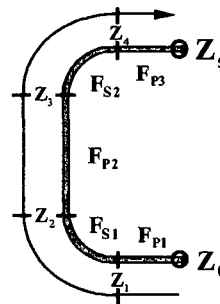


図-6 状態量の伝達

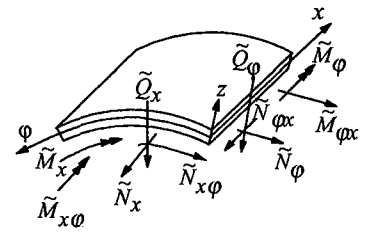


図-7 シェルパネル

この座屈解析に用いた伝達マトリックス法について簡単に述べる。

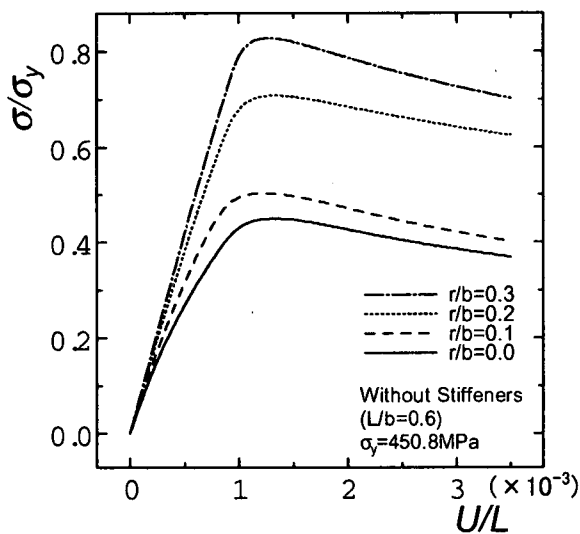
図-6 に示すような隅角部を曲面とした箱形断面部材を構成する板およびシェルパネルに対する格間伝達マトリックス F_P および F_S を掛け合わせることで、部材両端の状態量 Z_5 および Z_0 間の関係式が得られる^{10, 11)}。

$$Z_5 = F_{P3}F_{S2}F_{P2}F_{S1}F_{P1}Z_0 = UZ_0 \quad (1)$$

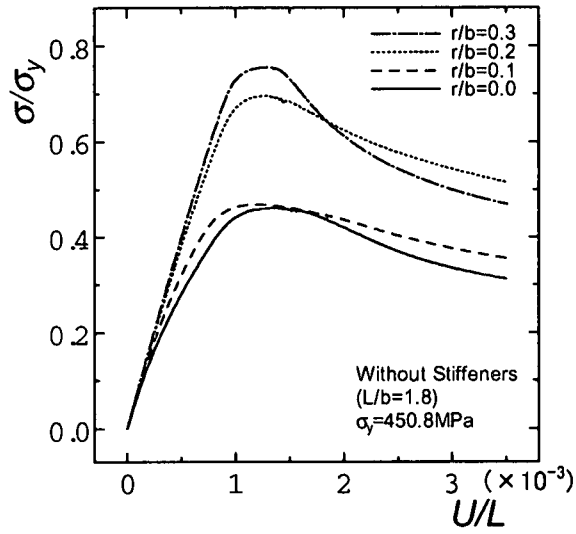
ここに、 U : 伝達マトリックス、

$Z = \{\tilde{w}, \tilde{\phi}, \tilde{M}_\phi, \tilde{V}_\phi, \tilde{u}, \tilde{N}_\phi, \tilde{N}_{\phi x}\}^T$, $\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}$: x, ϕ, z 方向変位, $\tilde{\phi}$: 回転角, $\tilde{N}_\phi, \tilde{N}_{\phi x}$: 面内力, $\tilde{M}_\phi$: 曲げモーメント, $\tilde{V}_\phi = \tilde{Q}_\phi + \tilde{M}_{\phi x}$: 換算せん断力, $\tilde{Q}_\phi$: せん断力,

$\tilde{M}_{\phi x} = \frac{\partial}{\partial x}$ (図-7 参照)



(a) $L/b=0.6$



(b) $L/b=1.8$

図-8 荷重-変位曲線

ここで、両端の境界条件(両端とも対称: $\tilde{\varphi}_\varphi = \tilde{V}_\varphi = \tilde{v} = \tilde{N}_{\varphi\varphi} = 0$)を考慮し、式(1)において、初期状態量 $\mathbf{Z}_0$ が 0 でない列及び最終状態量 $\mathbf{Z}_5$ が 0 となる行を引き出すことにより次式を得る。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{w}_0 \\ \tilde{M}_{\varphi 0} \\ \tilde{u}_0 \\ \tilde{N}_{\varphi 0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

または

$$\mathbf{U}' \mathbf{Z}'_0 = 0 \quad (3)$$

式(3)が非自明な解を持つためには係数マトリックス $\mathbf{U}'$ の行列式 $|\mathbf{U}'|$ が

$$|\mathbf{U}'| = 0 \quad (4)$$

となることが必要であり、式(4)が座屈条件式となる。

次に、式(4)において求めた座屈荷重及び座屈モード数を用いて格間伝達マトリックスを再び作成する(式(2))。しかしながら式(4)から明らかなように、式(3)の係数マトリックスの行列式 $|\mathbf{U}'|$ は 0 となるため、この方程式の解は未定となり解を求めることはできない。そこで、式(2)において一番目の初期未知状態量 $\tilde{w}_0$ を $\tilde{w}_0 \equiv 1$ と仮定し、式(2)を変形することにより次式を得る。

$$\begin{bmatrix} a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{M}_{\varphi 0} \\ \tilde{u}_0 \\ \tilde{N}_{\varphi 0} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{31} \\ a_{41} \end{bmatrix} \quad (5)$$

または、

$$\mathbf{U}'' \mathbf{Z}''_0 = \mathbf{a} \quad (6)$$

この方程式を解くことにより、一番目の状態量 $\tilde{w}_0 \equiv 1$ に対する相対的な初期未知状態量を決定することができる。求めた初期状態量を用い、再度伝達操作を行いながら各節点での状態量(変形形状)を決定する。

3. 解析結果

3.1 非線形挙動に及ぼす影響

図-8は部材長比 $L/b=0.6, 1.8$ での荷重-変位曲線を、図-9, 10は降伏荷重時、極限荷重時、極限荷重以降での極限荷重の90%および80%での部材および部材断面の変形図を示している。なお、図-8の縦軸には各部材の平均応力 σ を降伏応力 $\sigma_y (=450.8\text{MPa})$ で除した値を、横軸には軸方向変位 U を部材長 L で除した値をとっている。

(1) $L/b=0.6$ での検討

図-8(a)から明らかなように、隅角部を曲面とした箱形断面部材($r/b=0.1, 0.2, 0.3$)の強度は、通常の箱形断面部材($r/b=0.0$)の場合と比較して大きくなっており、その傾向は曲率半径が大きいほど顕著となっている。

部材および部材断面の変形形状は、図-9に示すように、降伏荷重時、極限荷重時、極限荷重以降のいずれの場合においても、初期たわみと同様の変形モードを示している。

(2) $L/b=1.8$ での検討

図-8(b)から明らかなように、隅角部を曲面とした箱形断面部材($r/b=0.1, 0.2, 0.3$)の強度は、 $L/b=0.6$ の部材の場合と同様、通常の箱形断面部材($r/b=0.0$)の場合と比較して大きくなっており、その傾向は曲率半径が大きいほど顕著となっている。しかしながら、極限荷重以降の荷重の低下が $L/b=0.6$ の場合と比較して大きくなっている。

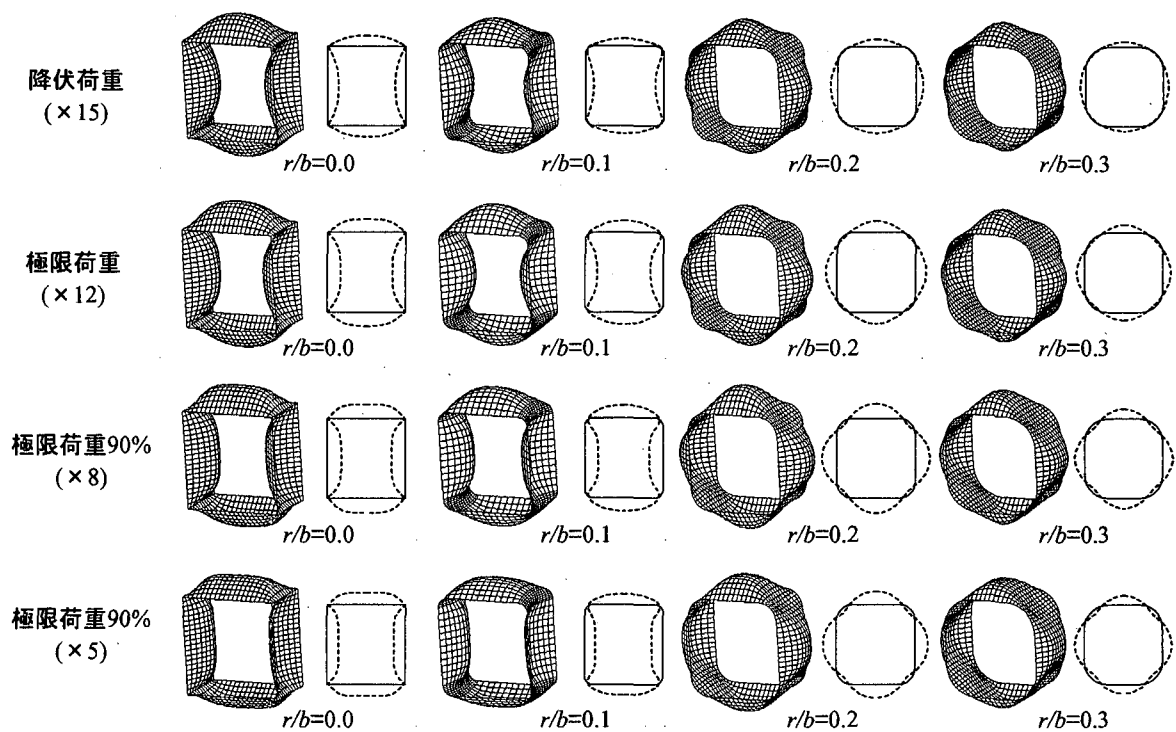


図-9 部材および部材断面の変形形状($L/b=0.6$)

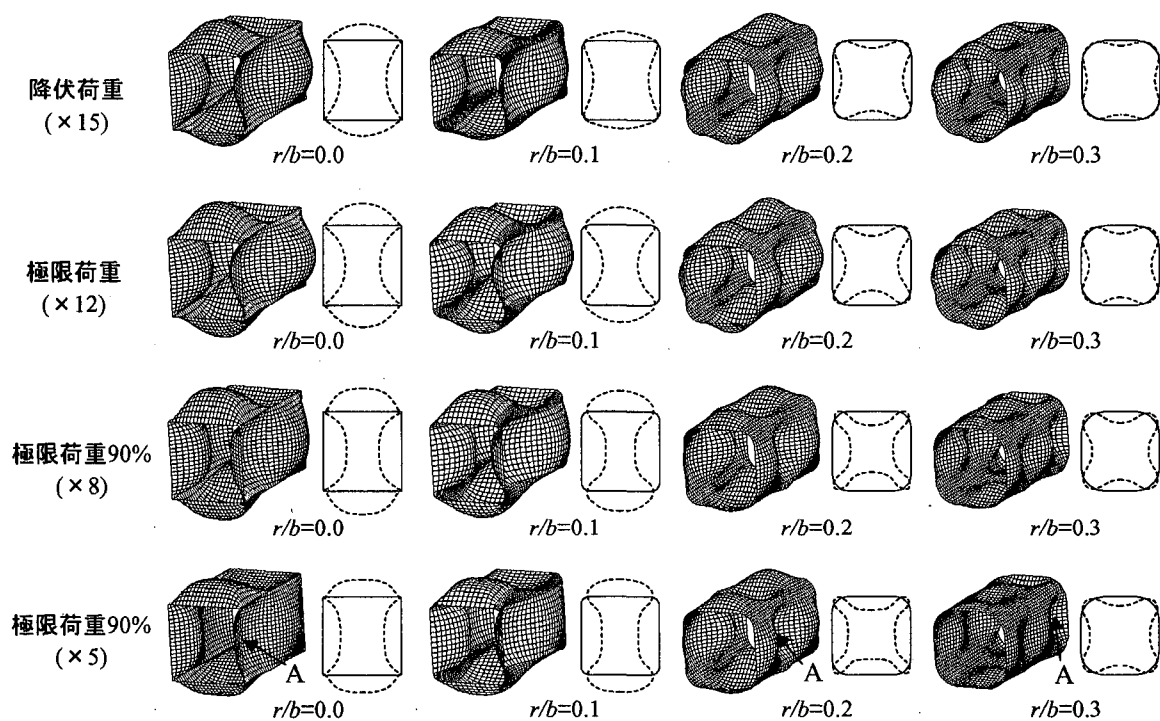


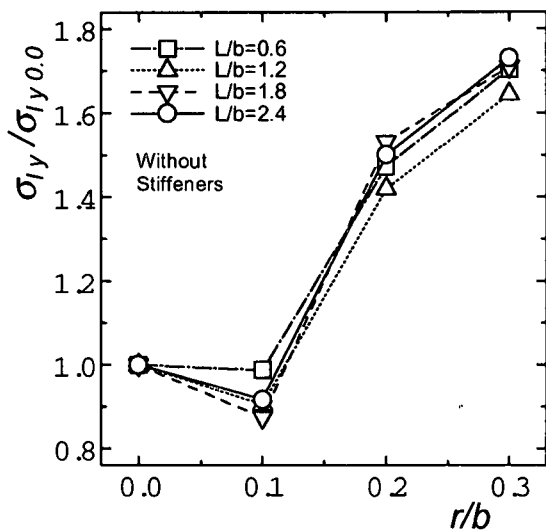
図-10 部材および部材断面の変形形状($L/b=1.8$)

部材および部材断面の変形形状は、図-10に示すように、降伏荷重時および極限荷重時には、部材長比 $L/b=0.6$ の場合と同様、初期たわみと同様の変形モードを示しているが、極限荷重以降においては、 $r/b=0.1$ の場合を除いて変形モードの偏在化が生じており($r/b=0.0$ では部材手前側端部(点 A)、 $r/b=0.2$ では部材中央部(点 A)、 $r/b=0.3$ で部材奥行き側端部(点 A)での変形が他の部分と

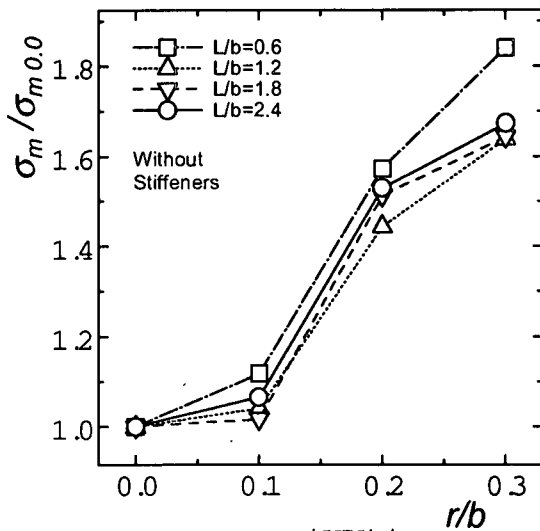
比較して大きくなっている)、この変形モードの偏在化が極限荷重以降で部材の強度の低下が大きくなる原因だと考えられる。なお、曲率比 $r/b=0.1$ の場合は、明確な変形モードの偏在化は見受けられない。

3.2 降伏強度および極限強度に及ぼす影響

(1) 降伏強度に関する検討



(a) 降伏強度



(b) 極限強度

図-11 部材強度と曲率比の関係

図-11(a)は各部材に初降伏が発生する荷重強度(以下「降伏強度」と称す)と曲率半径の大きさとの関係を、図-12は降伏強度での各部材の変形形状および応力分布を示している。なお、図-11(a)の縦軸には降伏強度での各部材の平均応力 σ_{ly} を通常の箱形断面部材($r/b=0.0$)の降伏強度での平均応力 $\sigma_{ly0.0}$ で除した値を、横軸には曲率比 r/b をとっている。

図-11(a)から明らかなように、曲率比 $r/b=0.1$ の場合、部材の降伏強度は部材の長さに関係なく通常の箱形断面部材の場合と比較して小さくなっている。また、 $r/b=0.1$ の場合での部材の応力分布は、図-12に示すように、通常の箱形断面部材の場合と比較して均一化されているが、比較的早い荷重段階で部材端部の隅角部に降伏が発生している。このことが、曲率比 $r/b=0.1$ の部材の降伏強度が、通常の箱形断面部材の場合と比較して小さくなる原因と考えられる。

曲率比 $r/b=0.2, 0.3$ の場合、図-11(a)から明らかなように、部材の降伏強度は部材の長さに関係なく通常の箱形断面部材の場合と比較してかなり大きくなっており、その傾向は曲率半径が大きくなるほど顕著となっている。また、降伏強度での各部材の変形形状と応力分布は、図-12に示すように、曲率比 $r/b=0.1$ の場合と同様、シェルパネルの端部に降伏が生じているが、さらにシェルパネルの大部分において降伏応力に近い応力を生じている。これは、シェルパネルが部材断面を占める割合が大きくなることにより、板パネルの面外変形に対するシェルパネルの剛性(ねじれ抵抗)が大きくなるためと考えられる。また、板パネルにおいても部分的に降伏応力に近い応力が生じており、軸方向荷重に対して部材は断面全体で支えるものと考えられ、これらのことが、曲率半径が大きくなるにともない部材の降伏強度が大きくなる要因と考えられる。

(2) 極限強度に関する検討

図-11(b)は各部材の極限強度と曲率半径の大きさとの

関係を、図-13は極限強度での部材の応力分布を示している。なお、図-11(b)の縦軸には極限強度での各部材の平均応力 σ_m を通常の箱形断面部材($r/b=0.0$)の極限強度での平均応力 $\sigma_{m0.0}$ で除した値を、横軸には曲率比 r/b をとっている。

曲率比 $r/b=0.1$ の場合、図-11(b)から明らかなように、部材の極限強度は部材の長さに関係なく通常の箱形断面部材の場合と比較して若干大きくなっている。また、極限強度での部材の応力分布は、図-13に示すように、隅角部に一様に降伏が生じている通常の箱形断面部材と異なり、シェルパネルに部分的に降伏が生じており、降伏強度の場合と同様、通常の箱形断面部材の場合と比較して隅角部への応力集中が緩和されている。

曲率比 $r/b=0.2, 0.3$ の場合、図-11(b)から明らかなように、部材の極限強度は部材の長さに関係なく通常の箱形断面部材の場合と比較してかなり大きくなっており、その傾向は曲率半径が大きくなるほど顕著となっている。また、極限強度での各部材の応力分布は、図-13に示すように、シェルパネル全体に降伏が生じており、また、板パネルにおいてもパネル全体に均一に高い応力が生じている。これらのことが、曲率半径が大きくなるにともない降伏強度の場合と同様、部材の極限強度が大きくなる要因と考えられる。

3.3 エネルギー吸収能に及ぼす影響

3.1において述べたように、極限荷重以降に変形モードの偏在化が生じることを考慮して極限荷重時に着目し、曲率半径の大きさが部材のエネルギー吸収能に及ぼす影響について検討する。なお、部材の極限強度時でのエネルギー W_m は次式で表される。

$$W_m = \int_0^{U_m} N dU$$

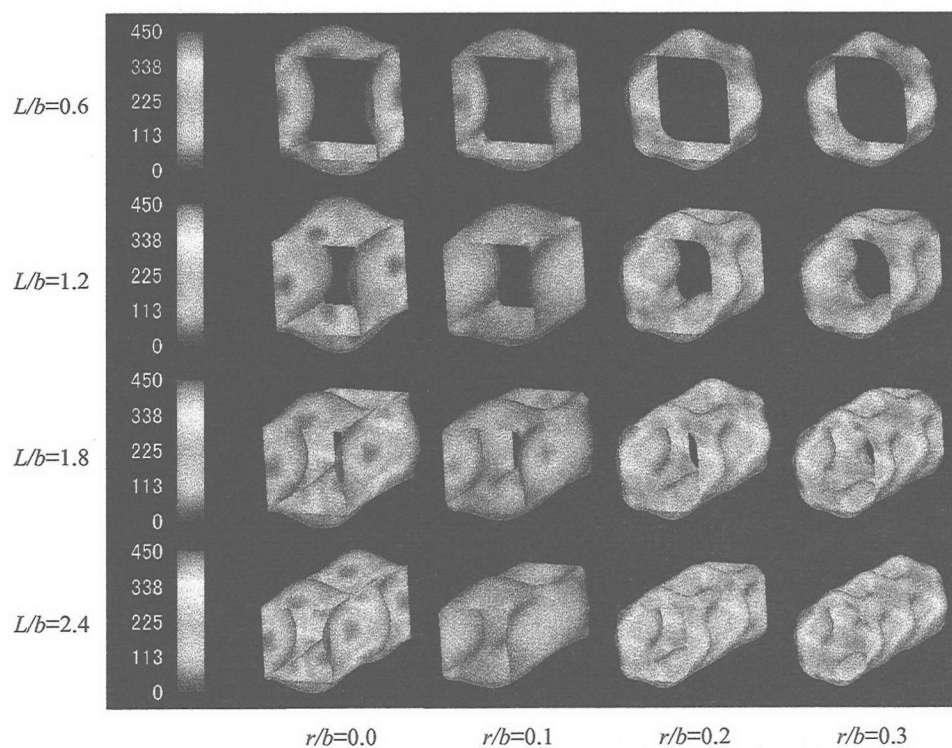


図-12 降伏強度での各部材の変形形状および応力分布

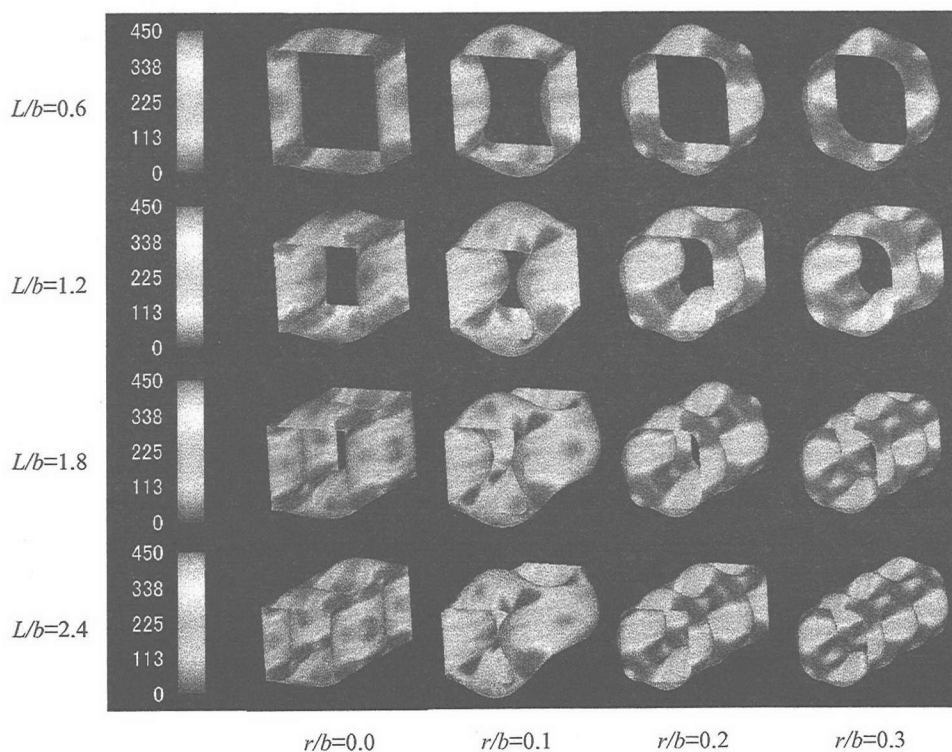


図-13 極限強度での各部材の変形形状および応力分布

ここに、 U_m :極限荷重時での軸方向変位、 N :部材の軸力。

図-14 は各部材の持つエネルギー吸収能と曲率半径の大きさとの関係を示している。なお、図-14 の縦軸には隅角部を曲面とした部材のエネルギー吸収能 W_m を通常の

箱形断面部材($r/b=0.0$)でのエネルギー吸収能 $W_{m0.0}$ で除した値を、横軸には曲率比 r/b をとっている。

曲率比 $r/b=0.1$ の場合、図-14 から明らかなように、部材長比 $L/b=0.6$ の場合のエネルギー吸収能は、通常の箱形

断面部材の場合と比較して若干大きくなっているが、他の部材長比($L/b=1.2, 1.8, 2.4$)では、逆に通常の箱形断面部材の場合と比較して小さくなっている。

一方、曲率比 $r/b=0.2, 0.3$ の場合、部材の長さによって部材のエネルギー吸収能は大きく異なっているが、いずれの長さの部材においても通常の箱形断面部材の場合と比較してエネルギー吸収能は大きくなっており、その傾向は曲率半径が大きいほど増大している。

4 まとめ

本研究では、隅角部の曲率半径の大きさが軸圧縮力を受ける箱形断面部材の非線形挙動、降伏強度、極限強度およびエネルギー吸収能に及ぼす影響について考察するため、曲率半径の大きさを種々変化させてFEM耐荷力解析を行った。

本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- 1) 曲率比 $r/b=0.1$ の場合、部材の降伏強度、極限強度およびエネルギー吸収能は、通常の箱形断面部材($r/b=0.0$)の場合と比較してほぼ同程度であり、この程度の曲率半径の大きさでは、部材の強度および変形能の増大は期待できない。
- 2) 曲率比 $r/b=0.2, 0.3$ の場合、部材の降伏強度、極限強度およびエネルギー吸収能は、通常の箱形断面部材($r/b=0.0$)の場合と比較して大きくなっており、隅角部を曲面とすることにより部材の強度および変形能の増大が期待できる。

参考文献

- 1) 中井博・北田俊行・松本雅治・坂口三代治・武井昭洋：コーナー部を円弧状とした柱部材の圧縮耐荷力に関する実験的研究，土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，pp.160-161，1993 年 9 月。
- 2) 能登宥恩・林暢彦：各種橋脚断面形状の耐荷力の検討，土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，pp.596-597，1997 年 9 月。
- 3) 北田俊行・中井博・徳林宗孝・坂口三代治・川副孝行：コンクリートを充填し，コーナー部に曲率を設けた鋼製橋脚中の耐荷力と変形性能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.51-60，2000 年 3 月。
- 4) 奈良敬，笹嶋純司：隅角部に丸みを持つ鋼管柱断面の極限圧縮強度の評価法，鋼構造年次論文報告集，第 5 巻，pp.141-148.1997 年 11 月。
- 5) 大賀水田生・竹村慎一郎・重松恒美：隅角部に曲

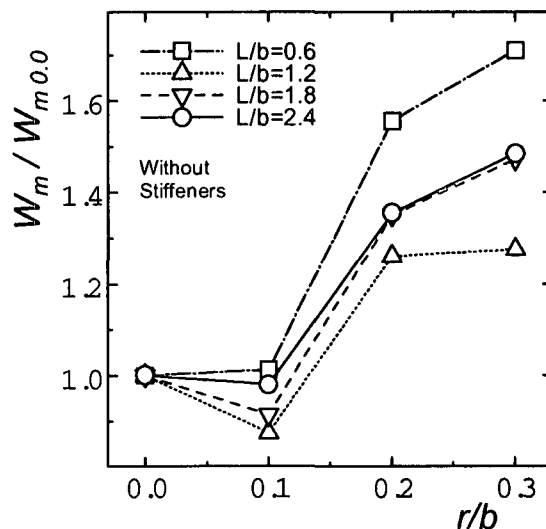


図-14 エネルギー吸収能と曲率比の関係

率を有する薄肉断面部材の線形座屈解析，鋼構造年次論文報告集，第 9 巻，pp.497-504，2001 年 11 月。

- 6) 大賀水田生・高上顕・山田克巳：FEM 耐荷力解析における初期変形に関する研究，愛媛大学工学部紀要，第 17 巻，pp.123-131，1998 年 2 月。
- 7) 大賀水田生・高上顕・崎浜忍：座屈時の変形モードを初期不整として用いた薄肉断面部材の耐荷力解析，構造工学論文集，Vol.45A，pp.157-164，1999 年 3 月。
- 8) Urig,R. : Elastostatik und Elastokinetik in Matrizen-Schreibweise, Belrin, Springer-Verlag, 1973.
- 9) Tesar,A. and Fillo,L. : Transfer Matrix Method, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 10) Ohga,M., Kawaguchi,K. and Shigematsu,T. : Buckling analysis of thin-walled members with closed cross sections, Thin-walled Structures, 22(1), pp.51-70, 1995.
- 11) Ohga,M., Shigematsu,T. and Kawaguchi,K. : Buckling analysis of thin-walled members with variable thickness, J.Struct. Engrg, ASCE, 121(6), pp.919-924, 1995.
- 12) Ohga, M., Hara, T. and Kawaguchi, K. : Buckling mode shapes of thin-walled members, Computers & Structures, Vol.54, No.4, pp.767-773, 1995.
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I.共通編，II.鋼橋編，1996 年 8 月。

(2002 年 4 月 19 日受付)