

## 軸力変動を受ける鋼製補剛箱形断面部材の弾塑性曲げ挙動

### Elasto-plastic bending behavior of stiffened steel box sections under axial force fluctuation

○林 浩二郎<sup>1</sup>      中村 聖三<sup>2</sup>      稲吉 紘彰<sup>3</sup>      高橋 和雄<sup>4</sup>      呉 慶雄<sup>5</sup>  
Kojiro HAYASHI    Shozo NAKAMURA    Hiroaki INAYOSHI    Kazuo TAKAHASHI    Qingxiong WU

**ABSTRACT** Although the elasto-plastic bending behavior of stiffened steel box sections under constant axial force has already been reported, the behavior under axial force fluctuation has not been clearly revealed. In this study, a series of elasto-plastic finite displacement analyses was conducted by setting the width-thickness ratio of stiffened panel, slenderness ratio of stiffeners, initial and final axial forces as the main variable parameters. Based on the results, the influence of these parameters on the bending capacity, ductility and absorbed energy was examined.

**Keywords:** 補剛箱形断面, 軸力変動, 限界ひずみ, 弾塑性有限変位解析

*Stiffened box section, Axial load fluctuation, Failure strain, Elasto-plastic finite displacement analysis*

#### 1. はじめに

平成7年1月17日に発生した阪神・淡路大震災により、高速道路や新幹線、さらに地下鉄などの都市施設が大きく崩壊し、高架橋を中心に靱性が高いと思われていた鋼製橋脚にも被害を生じた<sup>1)</sup>。

大地震に対する土木構造物の弾塑性挙動を解明するには、実験的あるいは数値解析的な検討が必要であるが、実験設備や費用等の制約があり後者のほうが有効な手段となってくる。一般に、巨大地震などの大きな外力を受ける構造物の挙動は、幾何学および材料の非線形性を示す。近年、コンピュータの性能が飛躍的に向上するとともに、汎用解析ソフトウェアが普及し、研究のみならず耐震設計の実務においても、構造物の非線形解析が数多く行われている。こうした解析は、構造物の応答を算定するためのものと、その保有性能を決定するためのものとに大別されるが、実務において実施されるのは主として前者である。

構造物の安全性の評価では、一般に力または変形を照査指標とする。鋼構造物の場合には、変形の中でも変位、あるいはひずみで照査する方法が推奨されている<sup>2)</sup>。いずれの場合にも照査指標の許容される限界値が必要であるが、ひずみで照査する場合の限界値については、Gaoら<sup>3)</sup>、鄭ら<sup>4)</sup>の研究がある。そこでは、純圧縮または圧縮と曲げを受ける箱形断面および円筒断面の部材セグメント(短柱)に対して、汎用非線形構造解析ソフトウェアABAQUSを用いた弾塑性有限変位解析結果に基づく経験式が提案されている。いずれも、部材軸方向のある長さの平均垂直ひずみ(円筒断面に対しては最外縁ひずみ、箱形断面に対しては圧縮フランジ板のひずみ)で表されており、単調載荷解析から得られる95%強度点に対応する平均ひずみから導かれたものである。また、平成14年3月に改訂された道路橋示方書・同解説<sup>5)</sup>では、単柱式補剛箱形および円筒断面鋼製橋脚の繰り返し載荷実験結果から帰納的に導かれた終

<sup>1</sup> 工学士	長崎大学大学院 生産科学研究科	学生	(〒852-8521 長崎市文教町1番14号)
<sup>2</sup> 博(工)	長崎大学 工学部社会開発工学科	助教授	(〒852-8521 長崎市文教町1番14号)
<sup>3</sup> 工学士	東急建設株式会社		
<sup>4</sup> 工博	長崎大学 工学部社会開発工学科	教授	(〒852-8521 長崎市文教町1番14号)
<sup>5</sup> Ph.D	長崎大学 工学部社会開発工学科	助手	(〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

局ひずみが示されている<sup>6)</sup>。しかし、これらの提案式は軸力と曲げを考慮しているものの、軸力が変動する場合の限界ひずみを与えるものではない。ラーメンやアーチなどは、その面内に水平地震動が作用した場合、曲げとともに変動軸力を受けるため、軸力変動の影響を考慮した各種断面に対する限界ひずみの算定式の確立が望まれる。

本研究では、Gao ら<sup>3)</sup>、鄭<sup>4)</sup>らの研究を参考に、軸力が線形的な増加をする鋼製補剛箱形断面材について、補剛板の幅厚比パラメータや補剛材の細長比パラメータ、軸力変動率、補剛材剛比および最終軸力などをパラメトリックに変化させた弾塑性有限変位解析を行い、各パラメータが耐荷力や変形能（限界ひずみ）、そして吸収エネルギーに及ぼす影響を調査した。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析対象モデル

#### 2.1.1 解析モデルの諸元

本研究では、既往の研究<sup>6)</sup>を参考に表-1に示す補剛板の幅厚比パラメータ  $R_f$  が 0.35 から 0.80 までの 10 種類のモデルを作成し、補剛板の板厚  $t$  と補剛材の板厚  $t_s$  を一律 20mm として解析を行う。断面形状は、補剛材を一边に 3 本均等に配置した正方形箱形断面とし、縦横比  $A$  は短柱の最小強度となる 0.7 とする。なお、補剛板幅などの諸数値は式(1)~(5)より算出して用いている。

$$R_f = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{4n^2\pi^2}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{Kh}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2)$$

$$\bar{\lambda}_s = \frac{L_d}{r_s \pi \sqrt{Q}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (3)$$

$$Q = \frac{1}{2R_f} \left[ \beta - \sqrt{\beta^2 - 4R_f} \right] \leq 1.0 \quad (4)$$

$$\beta = 1.33R_f + 0.868 \quad (5)$$

ここで、 $b$ ：補剛板幅、 $t$ ：板厚、 $\sigma_y$ ：降伏点、 $E$ ：弾性係数、 $\nu$ ：ポアソン比、 $n$ ：サブパネル数、 $K$ ：有効座屈長係数(片持柱では  $K=2$ )、 $h$ ：供試体の柱としての長さ、 $b_s$ ：補剛材高、 $t_s$ ：補剛材板厚、 $L_d$ ：ダイアフラム間隔、 $r_s$ ：補剛材 1 本を含む  $T$  型断面の断面 2 次半径、 $Q$ ：縦補剛材で囲まれた板パネルの局部座屈強度である。モデルは鋼材 SS400 を想定し、 $\sigma_y=235\text{N/mm}^2$ 、 $E=2.06 \times 10^5\text{N/mm}^2$ 、 $\nu=0.3$  とする。応力-ひずみ関係は図-1 に示すようにトリリニアモデル( $E_{st}=E/40$ 、 $\varepsilon_{st}=10\varepsilon_y$ )としている。

#### 2.1.2 解析モデル

解析には MARC K7.3<sup>7)</sup>を用いる。解析時間を短縮させるため高さ方向の対称性を考慮し、

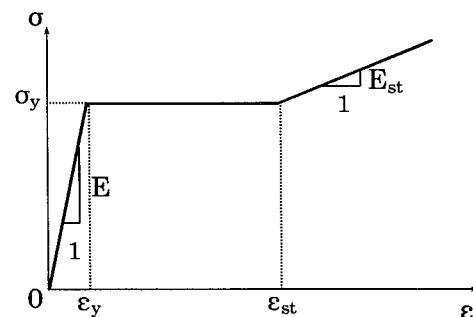


図-1 応力-ひずみ曲線

表-1 解析モデルの諸元

No	$R_f$	$\bar{\lambda}_s$	$\gamma/\gamma^*$	$\bar{\lambda}$	$L_d$ (mm)	$h$ (mm)	$b$ (mm)	$t$ (mm)	$b_s$ (mm)	$t_s$ (mm)
1	0.35	0.18	2.84	0.35	1103	9928	1576	20	185	20
2	0.40	0.21	2.73	0.35	1261	11431	1801	20	188	20
3	0.45	0.24	2.67	0.35	1419	12930	2027	20	192	20
4	0.50	0.32	1.95	0.35	1576	14479	2252	20	176	20
5	0.55	0.29	2.99	0.35	1734	15897	2477	20	211	20
6	0.60	0.58	0.89	0.35	1892	17572	2702	20	140	20
7	0.65	0.50	1.49	0.35	2049	19003	2927	20	172	20
8	0.70	0.46	2.24	0.35	2207	20433	3153	20	203	20
9	0.75	0.48	2.47	0.35	2364	21910	3378	20	215	20
10	0.80	0.61	1.75	0.35	2522	23461	3603	20	194	20

解析対象部材の上半分をシェル要素(No.75)で、図-2のようにモデル化する。要素75は、全体座標系での変位と回転角を自由度として有する4節点厚肉シェルである。座標および変位、回転角には双1次の内挿関数が用いられている。面内ひずみは変位成分から、曲率は回転角成分から計算される。面外方向のせん断ひずみは、要素各辺の midpoint で計算され数値積分点へ内挿される。

要素分割については事前にその影響を検討し、ほぼ収束解が得られたと思われる高さ方向10分割、サブパネル12分割、補剛材3分割とした。モデルの下端は対称条件からZ軸方向変位、およびX、Y軸回りの回転を固定し、上端については平面保持の法則が成り立つような拘束条件を与えている。

### 2.1.3 初期不整

今回の解析では、構成要素の補剛板に初期不整として以下に示すような初期たわみと溶接による残留応力を考える。初期不整を考慮したのはより正確な解析を行うためであるが、その影響については後述する。

#### (a) 初期たわみ

初期たわみは、図-3に示すように補剛板の全体的なたわみ $\delta_G$ と補剛材間のサブパネルの局所的なたわみ $\delta_L$ の和として与える。たわみ形状は $\delta_G$ と $\delta_L$ のそれぞれについて、最大値をダイアフラム間隔の1/1000、縦補剛材間隔の1/150とする正弦波とする。そのため、モデルのフランジにおける初期たわみは、以下の式で求められる。

$$\delta = \delta_G + \delta_L \quad (6)$$

$$\delta_G = \frac{L_d}{1000} \sin\left(\frac{\pi}{L_d} y\right) \cos\left(\frac{\pi}{b} z\right) \quad (7)$$

$$\delta_L = \frac{b/n}{150} \sin\left(\frac{\pi}{L_d/m} y\right) \cos\left(\frac{\pi}{b/n} z\right) \quad (8)$$

ここで、 $m$ : 補剛板長さ方向の初期たわみの半波数、 $n$ : 補剛材間のサブパネル数(=4)である。なお、参考文献<sup>3)</sup>よりダイアフラム間隔を $0.7b$ としているので $m=3$ となる。

#### (b) 残留応力

溶接による残留応力は、図-4に示すように、補剛材と断面端部の溶接部に隣接する要素で

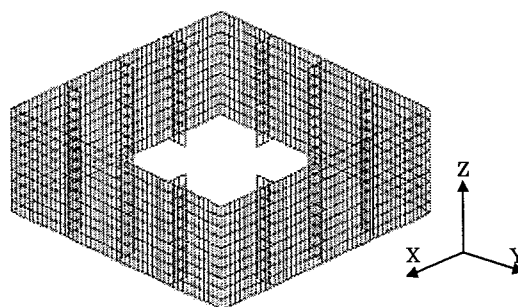


図-2 解析モデル

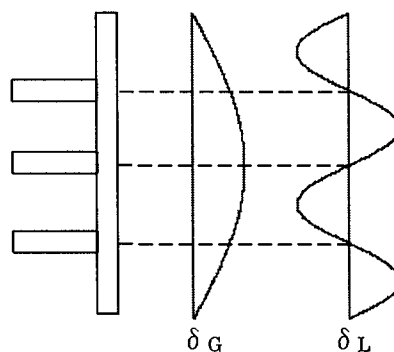


図-3 初期たわみ

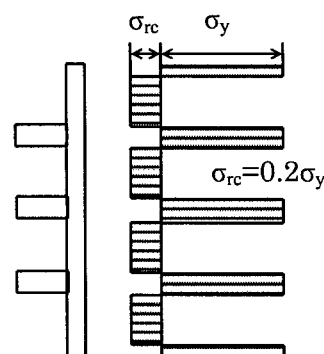


図-4 残留応力の分布

は引張残留応力として降伏点 $\sigma_y$ を、その他の要素には圧縮残留応力 $0.2\sigma_y$ を与える。また、残留応力は部材の高さ方向には一様に生じているとする。なお、今回の解析においては、補剛材における残留応力は考慮していない。

## 2.2 解析条件

### 2.2.1 载荷条件

モデル上端中心部に、以下に示すような軸力 $P$ と回転角 $\theta$ を同時に与える。

#### (a) 軸力 $P$

初期軸力 $P_i$ から最終軸力 $P_f$ まで時間(回転

角)に対して線形に増加させる。今回の解析では、軸力変動の大きさを表すパラメータとして式(9)で定義される $\alpha$ を用いる。

$$P_i = \frac{1}{\alpha} P_f \quad (9)$$

最終軸力  $P_f$  の最大値は、現実的な値として降伏軸力の 6 割程度までを考え  $0.2P_y$ ,  $0.4P_y$ ,  $0.6P_y$  の 3 通りについて調査する。軸力変動の大きさは最大でも初期軸力の 3 倍程度を想定し、3 種類の  $P_f$  に対して  $\alpha$  を 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 と変化させる。 $\alpha=1.0$  は、一定軸力が作用していることを示す。

#### (b) 回転角 $\theta$

モデル上端断面中心部に、全体座標系の Y 軸周りに回転角  $\theta$  を与える。断面に作用する曲げモーメントは、 $\theta$  に対する反力として与えられる。

#### 2.2.2 軸力変動条件

表-2 には、今回の解析で用いた最終軸力  $P_f$ 、初期軸力  $P_i$  と  $\alpha$  の組み合わせを示している。軸力が最終軸力  $P_f$  に到達する点については図-5 に示すように軸力変動がない場合に曲げモーメントが最大から 95% まで低下した時間(回転角)に一致するように増加させる。さらに、最終軸力到達後は、一定値を保つものとする。

#### 2.3 その他の解析条件

解析オプションにおいて、UPDATE LANGRANGE PROCEDURE と LARGE DISPLACEMENT を使用した。UPDATE LANGRANGE PROCEDURE は移動ラグランジュ手法を使用するためのオプションであり、この手法を用いることにより、変形した後の要素の形状で要素剛性マトリックスの作成が行われる。LARGE DISPLACEMENT はすべての大変形問題あるいは座屈問題を解析する場合に必要なものであり、大変形の効果を剛性に反映させるために、幾何剛性マトリックスと初期応力剛性マトリックスが計算され、解析に考慮される。収束条件は最大残差力/最大反力  $\leq 0.01$  とし、収束計算法として Newton-Raphson 法を用いる。また降伏条件としては von Mises の降伏条件を用いる。主な解析仕様を表-3 に示す。

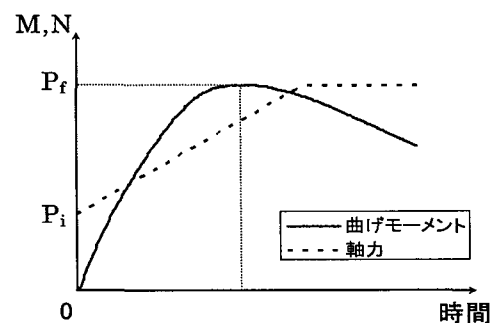


図-5 荷重方法

表-2  $P_f$ ,  $P_i$  と  $\alpha$  の組み合わせ

$P_f$	$\alpha$	$P_i$
$0.2P_y$	1.0	$0.20P_y$
	1.5	$0.13P_y$
	2.0	$0.10P_y$
	3.0	$0.07P_y$
$0.4P_y$	1.0	$0.40P_y$
	1.5	$0.27P_y$
	2.0	$0.20P_y$
	3.0	$0.13P_y$
$0.6P_y$	1.0	$0.60P_y$
	1.5	$0.40P_y$
	2.0	$0.30P_y$
	3.0	$0.20P_y$

表-3 主な解析仕様

項目	解析仕様
解析プログラム名	MARC K7.3
解析モデル	3次元シェル構造
使用要素	4節点シェル要素
積分点	面内2×2, 板厚方向5
応力評価点	積分点
応力-ひずみ曲線	トリニア
降伏条件	von Mises
幾何学的非線形性	定式化: Updated Lagrangian
初期条件	初期たわみ, 残留応力: あり
収束計算法	Newton-Raphson法
収束条件	最大残差力/最大反力 $\leq 0.01$

### 3. 解析結果と考察

#### 3.1 概要

今回の検討では、まず、解析結果の妥当性を検証するため、軸力一定 ( $\alpha=1.0$ ) の場合について文献<sup>4)</sup>との比較を行った。その結果、幅厚比パラメータ  $R_f$  が 0.5 以上のモデルについてはその誤差は 10 パーセント程度以下となった。一

方それ以下の  $R_f$  では、幅厚比パラメータが小さくなるに従い、本解析結果と文献との相違が拡大する傾向が認められた。しかし本研究は、弾塑性曲げ挙動に対する軸力変動の影響を調査することを目的としており、相対的な比較を行うには問題ないと判断した。

この章ではまず、対象部材の弾塑性挙動に及ぼす初期不整の影響について検討し、次に幅厚比パラメータ、軸力変動率、最大軸力の各パラメータを変化させて行ったパラメトリック解析の結果をもとに、耐荷力と変形能、そして吸収エネルギーに及ぼす軸力変動の影響について考察する。

### 3.2 初期不整の影響

補剛板の幅厚比パラメータ  $R_f$  が異なる 10 種類の解析モデルの中から、 $R_f=0.35, 0.50, 0.65$ ,  $\alpha=1.0, 2.0$ ,  $P_f=0.6P_y$  の場合について、初期不整を考慮した場合と考慮しなかった場合における最大曲げモーメント  $M_u$  と、それに対する回転角  $\theta_u$  を表-4 に示す。なお、下付きの添字  $i$  は初期不整なしの場合を示している。また、図-6 には各モデルの  $M-\theta$  関係を示す。なお、縦軸、横軸はそれぞれ以下の式(10), (11)で算出される降伏曲げモーメント  $M_y$ , 降伏回転角  $\theta_y$  で無次元化している。

$$M_y = \frac{\sigma_y I}{e} \quad (10)$$

$$\theta_y = \frac{\sigma_y L}{2Ee} \quad (11)$$

ここに、 $\sigma_y$ : 降伏点、 $I$ : 断面 2 次モーメント、 $e$ : 縁距離、 $L$ : 部材長である。

表-4 より、初期不整の影響を考慮することで、最大曲げモーメントは、軸力が変動しない場合には減少し、変動する場合には増加していることがわかる。その割合は、増加、減少ともに 10%程度であり、それほど大きいものではない。一方、最大曲げモーメントに対する回転角については、軸力変動の有無に関わらず初期不整を考慮することにより増加している。その影響は補剛板の幅厚比パラメータ  $R_f$  が大きい場合に顕著であり、最大で約 45%の増加となっている。総じて、初期不整は最大曲げモーメントにはあまり影響せず、回転角に対して顕著な影響を及ぼすと言える。

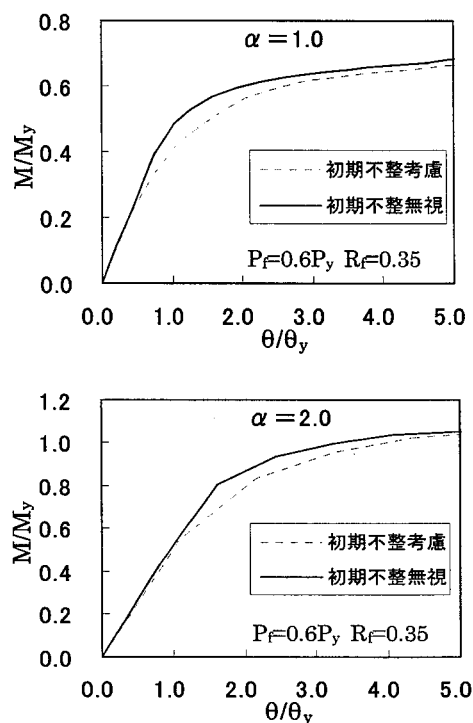


図-6 初期不整の影響

表-4 初期不整の影響

(a)  $\alpha=1.0$

$R_f$	$M_u/M_{ui}$	$\theta_u/\theta_{ui}$
0.35	0.88	0.94
0.50	0.97	1.32
0.65	0.96	1.18

(b)  $\alpha=2.0$

$R_f$	$M_u/M_{ui}$	$\theta_u/\theta_{ui}$
0.35	1.04	1.02
0.50	1.10	1.45
0.65	1.05	1.44

以上のように、初期たわみ及び残留応力の 2 種類の初期不整は解析結果、特に変形性能に大きな影響を及ぼしているため、初期不整を考慮することは必要であると考ええる。

### 3.3 $M-\theta$ 関係

ここでは、 $R_f=0.40, 0.55, 0.75$ ,  $P_f=0.6P_y$  のモデルについて、縦軸に曲げモーメント  $M$ , 横軸に回転角  $\theta$  をとり、それぞれ降伏曲げモーメント  $M_y$ , 横軸を降伏回転角  $\theta_y$  で無次元化した  $M-\theta$  関係を図-7 に示す。グラフには、軸力変動率  $\alpha$  の影響を検討するため  $\alpha=1.0, 1.5, 2.0$ ,

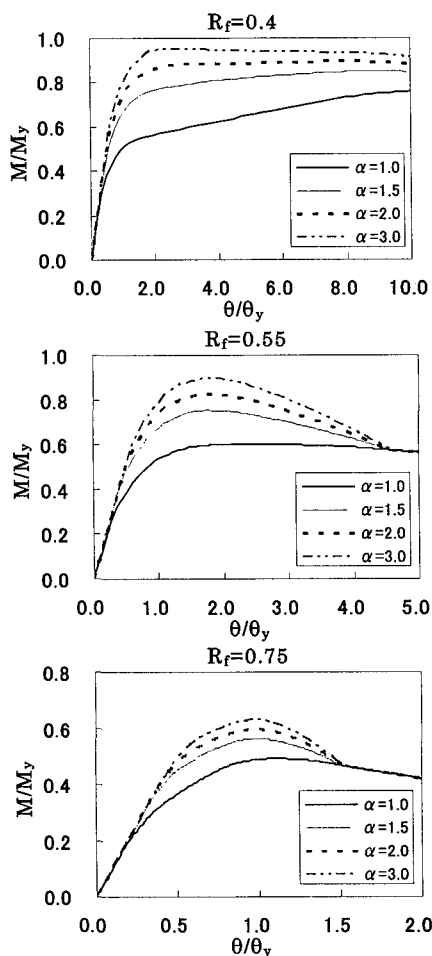


図-7  $M-\theta$  関係

3.0 の場合をあわせて示している。図-8 には解析モデル  $R_f=0.35$ ,  $\alpha=2.0$  において軸力が最終軸力に到達したときに対応する変形図を変形倍率 1 倍で示しているが、すべてのモデルにおいて同様な座屈モードを示していることを確認した。今回解析したモデルのように、軸力が線形的な増加をする場合の  $M-\theta$  関係について共通しているのは、軸力変動率  $\alpha$  の値が大きくなるにつれ、曲げモーメントの最大値となる点が左上に推移していることである。これは最大耐荷力は増加するが、それに対する変形は小さくなるということを示している。

### 3.4 軸力変動率の影響

#### 3.4.1 耐荷力

図-9 には、最大曲げモーメント  $M_u$  に対する軸力変動率  $\alpha$  の影響について示している。軸力変動率  $\alpha$  が増加すると、最大曲げモーメント

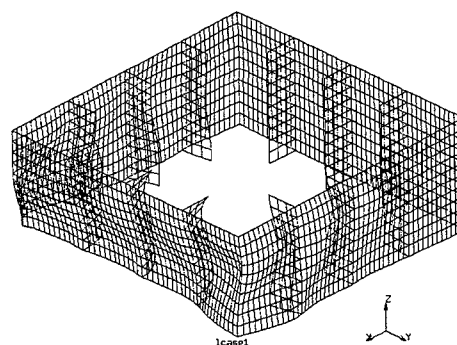


図-8 解析モデルの変形図

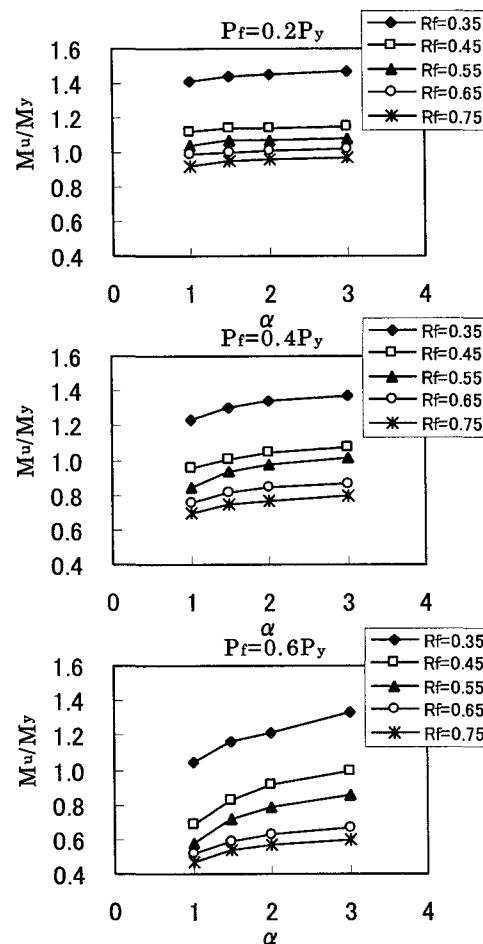


図-9 耐荷力に及ぼす  $\alpha$  の影響

$M_u$  は増加している。最終軸力  $P_f$  が  $0.2P_y$ ,  $0.4P_y$  の場合にはあまり大きな増加は見られないが、 $0.6P_y$  の場合には  $\alpha$  の値の増加とともに  $M_u$  は大きくなり、 $\alpha=1.0$  と  $\alpha=3.0$  の場合を比較すると約 1~2 割の増加が見られる。従って、軸力変動率の違いが耐荷力に及ぼす影響としては、最終軸力が大きく、補剛板の幅厚比パラメータが小さい場合に顕著に現れることがわかる。

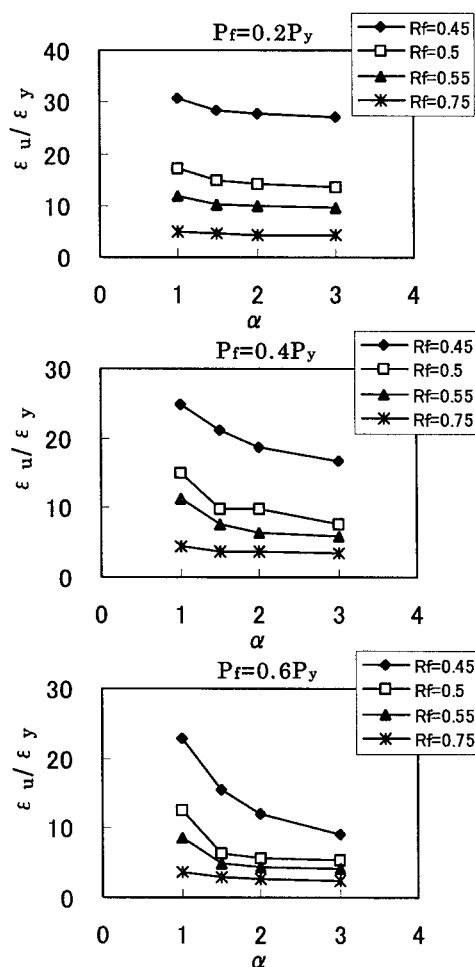


図-10 変形能に及ぼす $\alpha$ の影響

### 3.4.2 変形能

図-10 には、限界ひずみに対する軸力変動率 $\alpha$ の影響を3種類の最終軸力について示している。ここでは、曲げモーメントが最大値より95%まで低下した点のモデル上端圧縮側最外縁の鉛直変位より算出した平均ひずみを限界ひずみ $\varepsilon_u$ とした。

軸力変動率が増加すると変形能が低下しているのがわかる。特に補剛板の幅厚比パラメータが小さいほど、その影響が顕著に現れている。また、最終軸力が大きくなるほど変形能の低下が大きくなっており、 $\alpha=1.5$ を境として低下量がなだらかになっている。

### 3.4.3 吸収エネルギー

ここでの吸収エネルギー $U$ は、図-11 に示すように最大耐荷力に達するまでに曲げモーメントがなす仕事とする。図-12 には、吸収

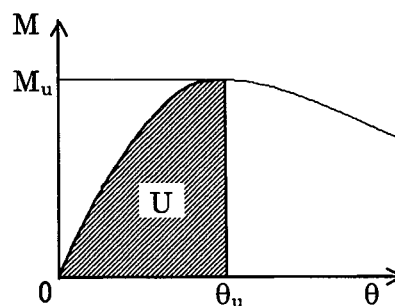


図-11 吸収エネルギー

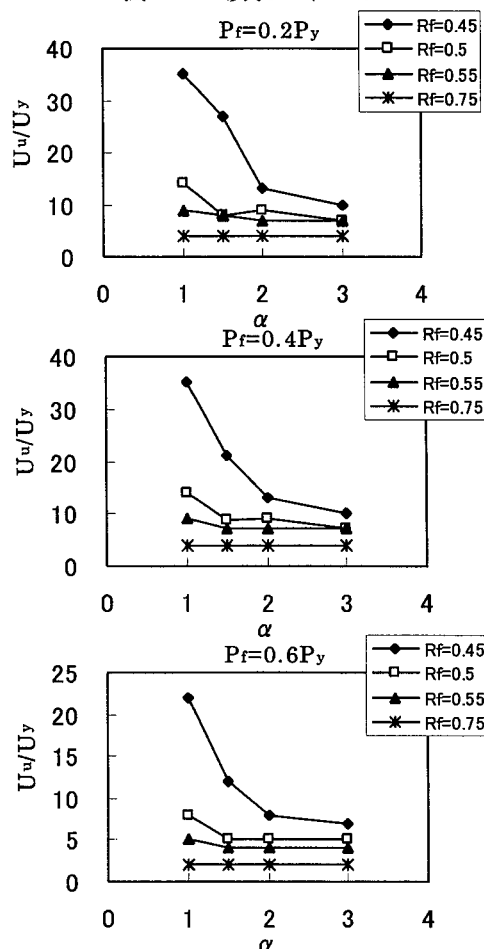


図-12 吸収エネルギーに及ぼす $\alpha$ の影響  
エネルギー $U$ に対する軸力変動率 $\alpha$ の影響について示す。

軸力変動がある場合には軸力も仕事をすることになるが、ここでは無視している。同図では得られた吸収エネルギーを式(12)で表される $U_y$ で無次元化して示している。 $U_y$ は軸力が作用せず曲げモーメントのみが作用した場合に、弾性範囲内で解析モデルに蓄えられるエネルギーを表わす。

$$U_y = \frac{1}{4} \left( \frac{\sigma_y}{e} \right)^2 \frac{LI}{E} \quad (12)$$

ここに、 $L$ : モデル長、 $I$ : モデル上端面の断面 2 次モーメント、 $e$ : モデル上断面中心からの縁距離である。

軸力変動率が増加すると吸収エネルギーが減少している。その傾向は最終軸力が大きく、補剛板の幅厚比パラメータが小さいほど顕著であり、最終軸力が  $0.2P_y$  の場合や補剛板の幅厚比パラメータ  $R_f$  が  $0.5$  を超えるような場合にはほとんど認められない。これは前項で扱った変形能と同じ傾向であり、軸力変動率  $\alpha$  が  $2.0$  を超えてからはあまり変化しないものの  $1.0$  から  $1.5$  の間で著しい低下を示している。図-9 のように、幅厚比パラメータ、最終軸力が大きいモデル以外では、軸力変動率  $\alpha$  による最大曲げモーメントの著しい変化は見られないことから、吸収エネルギーの低下は主に変形能の低下に起因するものと推測することができる。

#### 4. 結論

本研究では、曲げと共に軸力の変動を受ける鋼製補剛箱形断面部材に着目し、補剛板の幅厚比パラメータ、軸力変動率、および最終軸力をパラメトリックに変化させた弾塑性有限要素解析を行い、各パラメータが耐荷力や変形能、吸収エネルギーに及ぼす影響について調査した。以下に本研究で得られた主な知見を示す。

ただし、これらは最終軸力が等しいという条件下で、軸力変動の影響を検討した本研究の範囲内での結論である。

- (1) 軸力が変動すると、一定軸力の場合と比較して耐荷力は増加し、変形能は減少する。
- (2) 最終軸力が大きくなるほど軸力変動の影響は顕著に現れ、耐荷力は増加し、変形能および吸収エネルギーは減少する。
- (3) 限界ひずみは軸力変動が大きくなるにつれて低下する。その傾向は最終軸力が大きいほど、幅厚比パラメータが小さいほど著しい。
- (4) 最終軸力が大きいほど吸収エネルギーは小さくなるが、その変化率は  $\alpha$  が小さい領域で大きく、 $\alpha$  が  $2$  を超えるとほとんど変化しない。

今回の研究では軸力変動を生じる場合の最終軸力の到達点の設定において、一定軸力が作用した状態で曲げモーメントが最大の  $95\%$  まで低下した時に合わせたが、実際の終局状態を想定した場合、曲げモーメントが最大に達したと同時に、軸力も最大となることが考えられる。しかし、本解析では必ずしも曲げモーメントと軸力のピークが一致しておらず、より現実に即した载荷方法を考える必要がある。さらに、断面形状や繰返し载荷を含む载荷条件、補剛材の初期不整などの影響についても詳細な検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会: 鋼構造物の安全性の調査報告 (阪神大震災における鋼構造物の被害報告と今後の耐震設計について), 1995.5.
- 2) 土木学会・JSSC: 鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高度化, 土木学会鋼構造委員会・鋼構造物の耐震検討小委員会, 日本鋼構造協会・次世代土木鋼構造研究特別委員会・鋼橋の耐震設計小委員会, 2000.4.
- 3) Shengbin Gao, Tsutomu Usami and Hanbin Ge: Ductility of steel short cylinders in compression and bending, Journal of Engineering. Mechanics, ASCE, 124(2), pp.176~186, 1998
- 4) 鄭沂, 葛漢彬, 宇佐美勉: 鋼構造物の強度と変形能の統一的評価法, 第 3 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.25~32, 2001.1
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.3.
- 6) 葛漢彬, 河野豪, 宇佐美勉: 圧縮と曲げを受ける鋼部材セグメントの終局ひずみと鋼アーチ橋の動的耐震照査への応用, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.1479-1488, 2004.3.
- 7) MARC Analysis Research Corporation: MARC Version K7 Manual, Volume A~E, 1997.8.