

軸力と繰返し二軸曲げ荷重を受ける鋼構造部材断面の 弾塑性挙動について

その2：薄肉中空円形断面の特性

修行 稔*・満崎 彰 吾*
花井 正 実*

Inelastic Behavior of Steel Column Segments under Cyclic Biaxial Bendings and Axial Force Part 2 : Characteristics of the Hollow Circular Section

by

Minoru SHUGYO, Shogo MITSUZAKI and Masami HANAI
(Department of Structural Engineering)

The inelastic behaviors of hollow circular section under the constant axial forces are investigated in terms of the transformations of the yield surfaces presented by the parameters P/P_y , M_x/M_{px}^* , and M_y/M_{py}^* , in which P_y , M_{px}^* , and M_{py}^* are the yield axial force and the plastic moments under the monotonic uniaxial loadings respectively.

The experiments and the numerical analyses for various loading paths are performed and the resultant moment-curvature relations are compared with each other to show good agreement. Furthermore, the characteristics of the subsequent yield surfaces for three values of constant axial force are discussed.

1. 序

前報¹⁷⁾において、軸圧と二軸曲げを繰返して任意に負荷できる実験装置およびそれに対応する数値解析法について説明し、軸圧の無い場合の二つの例について実験および解析結果の比較をして、この数値解析法が実際の部材断面の繰返し弾塑性的挙動を高い精度で予測し得ることを示した。

本報では、上記の実験法と数値解析法によって薄肉中空円形断面の定軸圧下での力学的性状を明らかにする。軸圧 P は、断面の降伏軸力を P_y として $P = -0.014P_y$, $-0.214P_y$, $-0.414P_y$ の三種類とし、主

として降伏曲面の変形および移動の様相という観点から詳細に検討する。

2. 実験結果と数値解析結果の比較

2.1 軸力がある場合の実験方法

Fig. 1 に実験装置の正面図を再掲する。ある軸力 P の存在のもとで油圧ジャッキ(f)によって試験体(a)が変形したとすると、試験体(a)の中心軸が軸力 P の軸線からはずれるため、軸力 P によるモーメントを考慮する必要がある。そこで、次の様にして軸力のある場合に試験体(a)に加わる真のモーメントの値を計算した。まず、試験体(a)の固着される上下の(c)の中央部に歪ゲ

ージ(h)を各々8枚貼付して、曲げモーメントの主軸方向(2方向)への曲げ変形をそれぞれ4枚ゲージ法で検出できるようにしておき、軸力の無い場合の実験でロード・セル(g)の値とこの歪ゲージ(h)の出力とを校正しておく。試験体(a)が円弧として変形するとしてその曲率から、上下の(h)を結ぶ線からの(a)の中心軸の平均の変位 δ_x (又は δ_y)を計算する。すると、試験体(a)に加わる真のモーメント(平均値) M_x (M_y)は、(h)によって計算されるモーメント M_{hx} (M_{hy})と δ_x (δ_y)および軸力Pによって

$$\left. \begin{aligned} M_x &= M_{hx} + P\delta_x \\ M_y &= M_{hy} + P\delta_y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

となる。(1)式によって計算されるモーメントの値を用いることにより、球面座(d)の摩擦力の影響も除去できる。

また、軸力がある場合の試験体は114.3 ϕ ×4.5 tのSTK 41材とし、曲率は変位計によって計測した。

2.2 実験結果と数値解析結果の比較

Fig. 2 に一定軸力 $P = -0.214P_y$ のもとでの二軸曲げ～曲率関係の比較例を示す。負荷過程はそれぞれ図中に示してある。Fig. 3 は同じく一定軸力 $P = -0.414P_y$ の場合である。前報で示した軸力が無い場合と同じく両者は良い一致をみせている。

3. 繰返し荷重による降伏曲面の変化

3.1 降伏応力の定義

降伏曲面を得るためには、実験あるいは数値解析によって得られるモーメント～曲率関係から降伏応力

定めねばならない。一般に、連続体における降伏応力はある一定量の相当塑性ひずみを生ずる時の応力として定義されるが、連続体内部の塑性ひずみ量を記述するのとは異なり、曲率と軸歪を引数とした相当塑性ひずみの確定した定義はまだなされていないように考えられる。

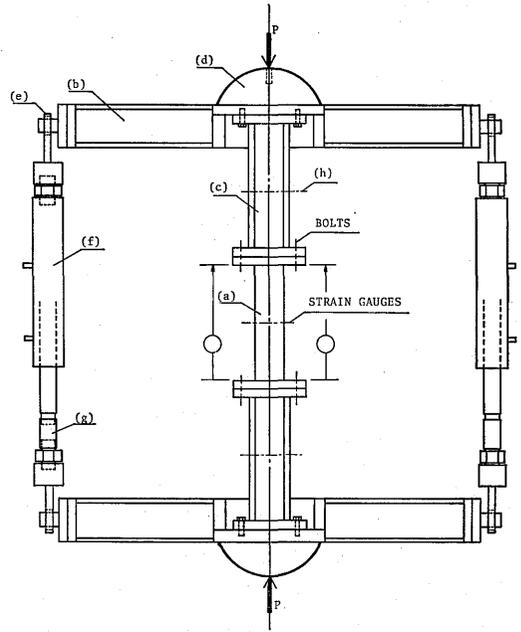


Fig. 1 Front View of Test Setup

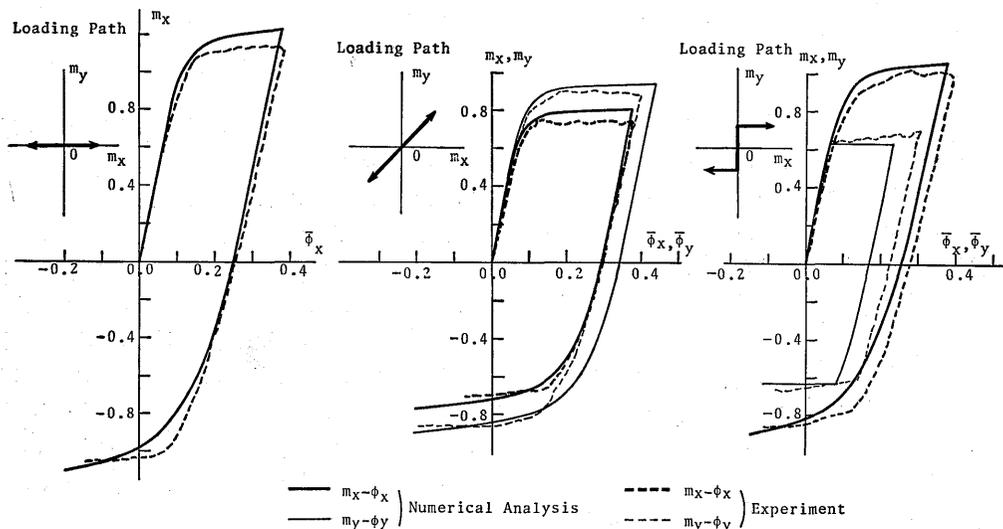


Fig. 2 Moment ~ Curvature Relationships ($P = -0.214P_y$)

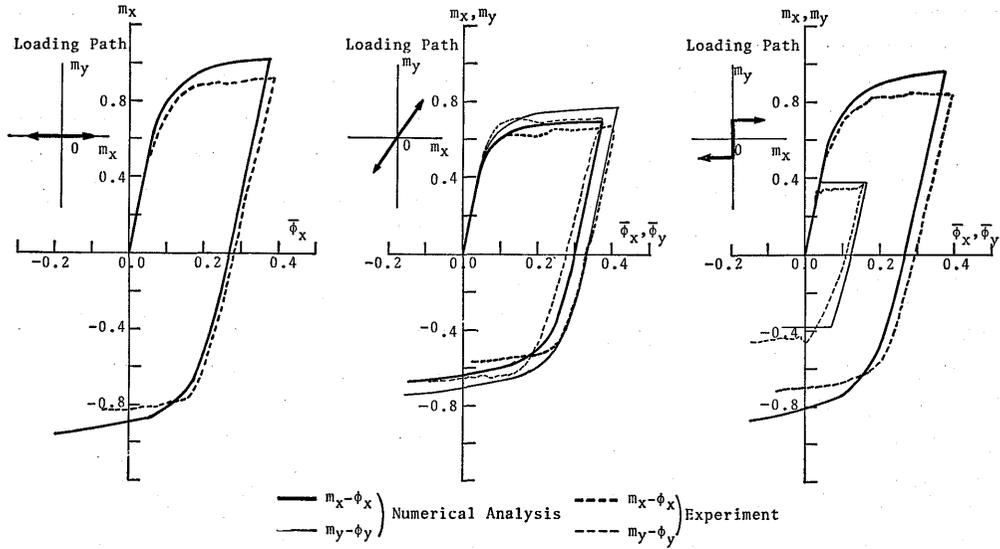


Fig. 3 Moment ~ Curvature Relationships ($P = -0.414P_y$)

本論では降伏応力を近似的な値として次のような方法で決定した。すなわち、二方向の曲げモーメントによって両方向に変形が生ずるが、この両者のうち変形の大きい方の残留曲率が、無軸圧一方方向負荷時に断面が降伏し始める時の曲率 (ϕ_{px} または ϕ_{py}) に等しい時のモーメントを降伏応力とした。これを図示したのが Fig. 4 である。図の P 点のモーメントが初期の降伏応力であり、前負荷を与えた後逆方向に負荷した時の降伏応力は S 点または R 点 (モーメントが O' 付近から再び増加する場合) のモーメントとなる。ただし、図において $\phi_p = \phi_s = \phi_R$ である。

3.2 初期降伏曲面

Fig. 5 に上記の方法で決定した降伏応力による初期降伏曲面を示す。W. F. Chen 等のテキスト¹⁸⁾

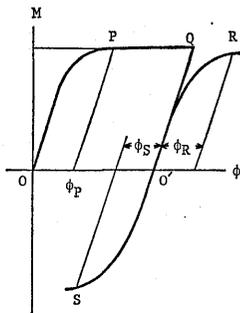


Fig. 4 Definition of the Yield Stress

にも述べてある通り、降伏面は $M_x/M_{px}^* \sim M_y/M_{py}^*$ 平面における円となり、実験値と数値解析値はよく一致している。ここで、無次元化の基準となる M_{px}^* , M_{py}^* は軸圧の無い状態で x 方向または y 方向へモーメントを負荷した時の数値解析結果から 3.1 に述べた方法で決定した降伏応力であって、断面の上下端が最初に降伏する時の値 M_{px} , M_{py} との関係は $M_{px}^* = 1.28 M_{px}$, $M_{py}^* = 1.28 M_{py}$ となる。本稿では鋼管を用いているため $M_{px}^* = M_{py}^*$ である。

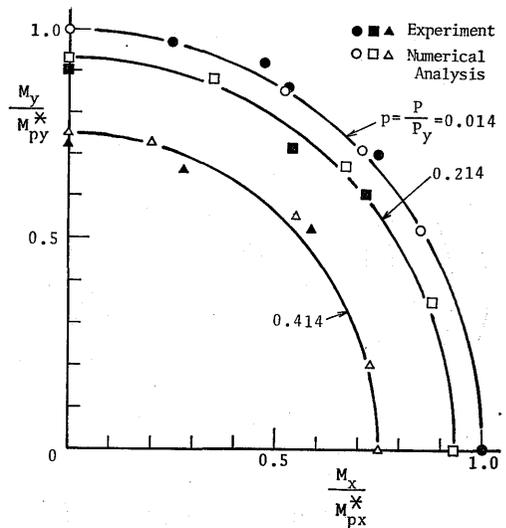


Fig. 5 Initial Yield Surface

3.3 後続降伏曲面

本論では、前負荷を与えた後の降伏曲面を後続降伏曲面と呼ぶことにし、荷重が繰返されることによって順次得られる後続降伏曲面をそれぞれ二次降伏面、三次降伏面、……、と称する。

Fig.6.1~6.3に軸力 $P = -0.014P_y$ の場合, Fig.7.1~7.3に $P = -0.214P_y$ の場合, Fig.8.1~8.3に $P = -0.414P_y$ の場合の二次降伏曲面を示す。

図中、I で示した点が前負荷の方向への降伏点である。最小の軸力が0.0 でなく $-0.014P_y$ となっているのは、実験装置の上部球面座、上部アーム、4個の油圧ジャッキの自重が試験体に加わるためである。図において白丸は実験値、黒丸は数値解析値を表わす。また、各点についている矢印は塑性ひずみ増分ベクトルの方向を示している。実験値、数値解析値とも降伏曲面にはほぼ垂直である。 $P = -0.214P_y$, $P = -0.414P_y$ も同様な傾向なので、数値解析値は図示していない。

前負荷の方向はそれぞれの図中にも示してあるが、次の順序で行った。

- (1) 軸力 P を負荷して一定値とする。
- (2) P と M_y (または M_x) を負荷して一定値とする。
- (3) P と M_y (または M_x) が一定値を保つように制御しながら M_x (または M_y) を増加させる。

従ってFig.6.2, 7.2, 8.2の比例負荷の場合、実験においては微小荷重増分による階段状負荷を行っている。

また、前負荷の大きさは x 方向の変形量で制御した。すなわち、全ての場において ϕ_x が $3.75\phi_{px}$ に達したら

除荷させ (Fig.2~3参照), Fig.6~8にみられるそれぞれの点の方向へ逆負荷もしくは再負荷して3.1に示した方法で降伏応力を決定した。実験は一点につき一体であり、試験体のバラツキ等を考慮すれば、 $P = -0.214P_y$ の時に全体的にやや低目の値を与える傾向はあるが、本数値解法によって良好な予測が可能であることがわかる。

3.4 降伏曲面の形状変化に関する考察

軸力の有無に拘らず、初期降伏曲面に較べて全体的に半径が縮小するのが顕著な特徴であろう。特に、軸力の無視し得る場合 ($P = -0.014P_y$) には形状の変形もかなり見られ、前負荷の方向にやや出っ張り、逆の方向には扁平になる。これらの性状は明らかにパウジンガー効果に起因するものである。

しかし、軸力 $P = -0.214P_y$ の場合は初期降伏曲面とほぼ相似の形状を保ち、 $P = -0.414P_y$ の場合は逆に、前負荷による降伏点と原点とを結ぶ軸上に長径を持つ楕円に近い形状となる。これらは軸方向平均歪の影響である。

白鳥ら¹⁹⁾は、比例負荷で前ひずみを与えた時の多軸応力空間 (σ_x, σ_y, τ) における後続降伏曲面について詳細に検討し、同じ大きさの比例負荷で前ひずみを与えた後、主応力方向を前負荷と同じ方向にして定めた降伏曲面の形状は、 π 平面では互いに合同となることを検証した。 ($M_x/M_{px}^*, M_y/M_{py}^*, P/P_y$) 空間でもこれと同様な性質があるかどうかを検討するために、Fig.6.1~8.3をそれぞれ等軸力面上で原点を中心として回転させ、原点と最初の降伏点を結ぶ方

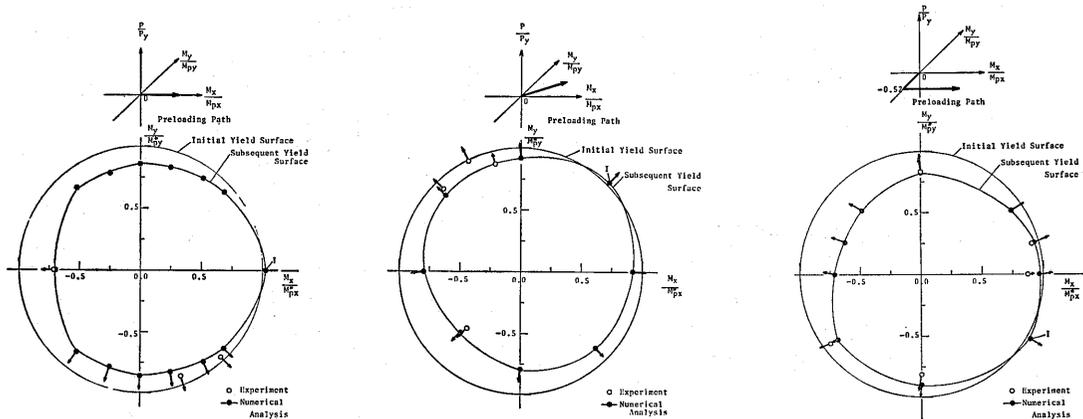


Fig. 6.1

Fig. 6.2

Fig. 6.3

Fig. 6 Subsequent Yield Surface and Directions of Plastic Strain Increment Vector ($P = -0.014P_y$)

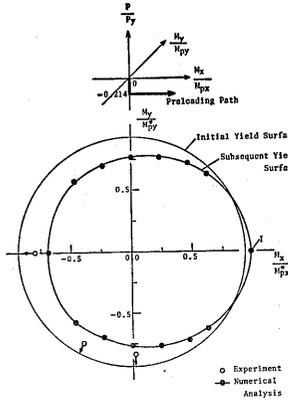


Fig. 7.1

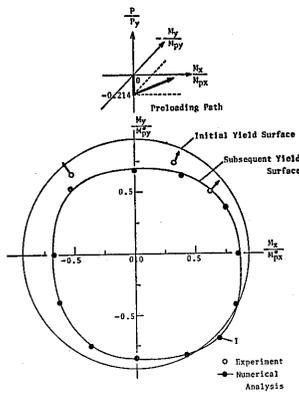


Fig. 7.2

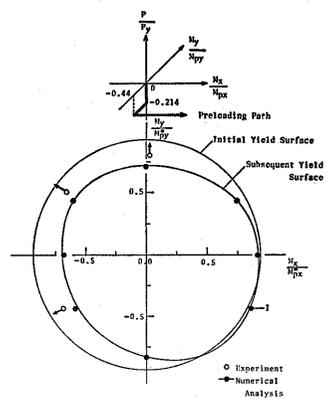


Fig. 7.3

Fig. 7 Subsequent Yield Surface and Directions of Plastic Strain Increment Vector ($P = -0.214P_y$)

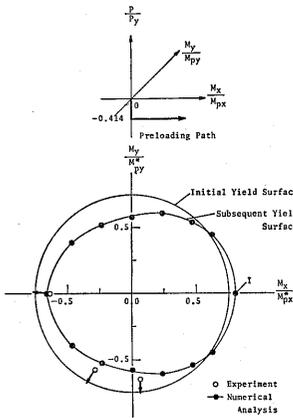


Fig. 8.1

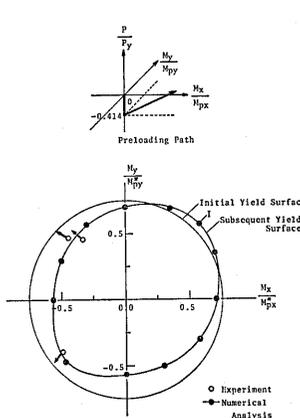


Fig. 8.2

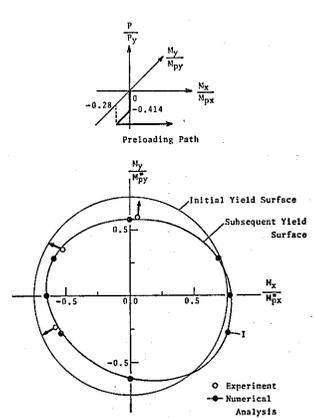


Fig. 8.3

Fig. 8 Subsequent Yield Surface and Directions of Plastic Strain Increment Vector ($P = -0.414P_y$)

向を一致させてこれを横軸にして各降伏点を表示したのが Fig. 9~11 である。座標軸の M_x/M_{px}^* , M_y/M_{py}^* は、最初からこの座標軸に一致している Fig. 6.1, Fig. 7.1 および Fig. 8.1 以外の降伏点に関しては意味を持たない。これらの図から、等軸面上の後続降伏面は、前荷荷による変形量がほぼ同じであれば前荷荷の方向に関係なくほとんど同一の形状となることがわかる。また Fig. 9~11 には軸力 $P/P_y = -0.014, -0.214$ および -0.414 の下で $M_y/M_{py}^* = 0.0$ の一定値に保ったまま、 ϕ_x が $3.75\phi_{px}$ に達するまで荷荷し、この点で除荷して逆方向に荷荷し、 $\phi_x = -3.75\phi_{px}$ まで変形させた後の三次の降伏面を黒四角の点で示す。これらの三次降伏面は二次降伏面と向きが逆になり若干移動するが、形状的には二次降伏面とほとんど同じであり、初期降伏面から二次降伏面への変化ほどの顕著な相違はみられない。

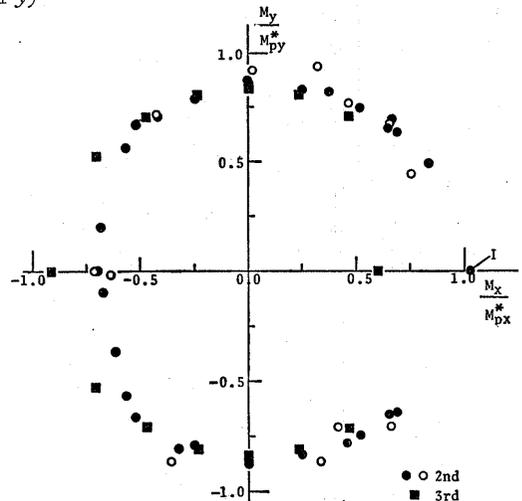


Fig. 9 Comparison of Subsequent Yield Points for Various Preloading Paths, and a 3rd Yield Surface. ($P = -0.014P_y$)

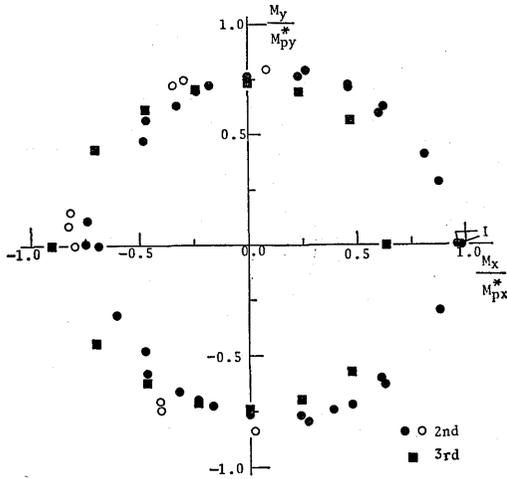


Fig.10 Comparison of Subsequent Yield Points for Various Preloading Paths, and a 3rd Yield Surface. ($P = -0.214P_y$)

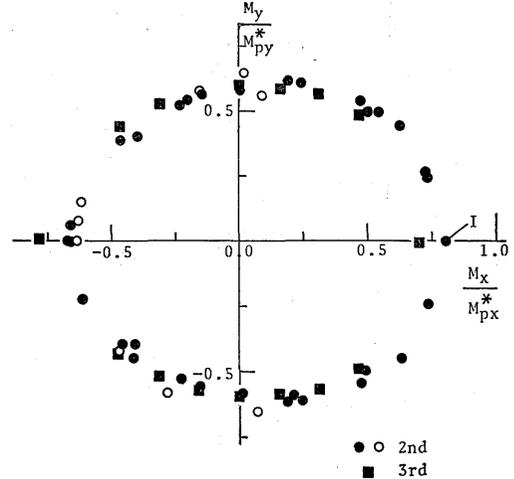


Fig.11 Comparison of Subsequent Yield Points for Various Preloading Paths, and a 3rd Yield Surface. ($P = -0.414P_y$)

4. 結語

本論文では、前報¹⁷⁾において述べた実験装置および数値解析法を用いて、薄肉円形断面の一定軸力下における繰返し二軸曲げ挙動を、主として前負荷を受けた後の降伏曲面の変化の様相という点から検討した。定軸力としては降伏軸力の約0.2倍と0.4倍を考え、前負荷は比例負荷二種類、一般負荷一種の計三種類とした。

結果として次の様なことが判明した。

- (1) 本数値解法は、定軸力の下での鋼管の繰返し二軸曲げ挙動を良好な精度で予測し得る。
- (2) 前負荷を与えた後の二次の降伏面は、バウシinger効果により軸力の有無に拘らず全体的にその径が縮小するが、形状の変化は軸力により異なる。軸力の無い場合は前負荷と逆方向に扁平になるが、軸力が増加するにつれて扁平度は減少し、逆に原点と前負荷の方向とを結ぶ軸を長径とする楕円となる傾向がある。しかし、いずれの場合もそれほど大きな変化ではない。
- (3) 等軸力面上の二次降伏面は、前負荷による変形量

がほぼ同じであれば前負荷の方向に関係なくほとんど同一の形状となる。

- (4) 二次降伏後の塑性ひずみ増分ベクトルは、二次降伏面に対する法線性をほぼ満足している。
- (5) 三次降伏面の形状は二次降伏面とはほぼ同じであり、初期降伏面から二次降伏面への形状変化のような顕著な変化はない。

参考文献

- 17) 修行・久保・満崎・花井：軸力と繰返し二軸曲げ荷重を受ける鋼構造部材断面の弾塑性挙動について、その1：実験方法および解析方法、長崎大学工学部研究報告、第10号、1977
- 18) W. F. Chen and T. Atsuta: Theory of Beam-Columns, Vol. 1, Vol. 2, McGraw-Hill, 1977
- 19) 白鳥・池上・金子：バウシinger効果を考慮した異方性降伏曲面、日本機械学会論文集（第一部）第39巻 第318号、1973