

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

修 行 稔*・久 保 由 男*
満 崎 省 吾*・花 井 正 実*

Inelastic Behavior of Steel Column Segments under Cyclic Biaxial Bending and Axial Force Part1: Experimental and Analytical Methods

by

Minoru SHUGYO Yoshio KUBO
Shogo MITSUZAKI Masami HANAI

(Department of Structural Engineering)

The elastic-plastic behaviors of metal column segments under cyclic biaxial loading and constant axial force are studied by the experiments and numerical analysis. The loads considered are an axial force, two bending moments about the principal axes and a bimoment and the corresponding deformations are an axial strain at the centroid of the section, two bending curvatures about the principal axes and a warping curvature. The numerical analysis is done by the step-iteration method using a tangent stiffness given by W. F. Chen and T. Atsuta. In the analysis, the nonlinear stress-strain behaviors of fibers, i. e. the strain hardening and Bauschinger effect, are considered.

In part 1, the experimental and analytical methods are shown and the propriety of analytical method is examined by a few example, and after part 2, the behaviors of hollow circular section and H-section are discussed.

1. 序

鋼構造立体骨組の三次元的弾塑性挙動の解析法に関しては既に多くの研究がなされており^{1)~4)}、中でも塑性関節法は簡便さ、組織的であるなどの点から汎用性が高い。しかし、塑性関節法を使用する場合、塑性関節の力学的性質の設定如何によって結果の精度が大きく左右されることは論を俟たない。このため、いわゆる

材料非線形性に起因する部材断面の三次元的弾塑性挙動を解明しようとする実験的理論的研究が多数行われてきており^{5)~13)}、初期降伏面の形状(降伏条件式)については精細な結果が示されている。立体架構の解析にはこれらの結果が援用され、塑性流れ理論の導入によって三次元的挙動を解析するのが一般的な方法のようである。しかし、従来の解析例はほとんどが一方向

* 構造工学科

負荷に対する挙動についてであり、除荷の発生を許容してはいるが、地震動等によって実際の構造物に負荷されるとされる繰返し荷重に対する応答を高精度に解析し得る迄には至っていない。繰返し荷重の下での立体架構の弾塑性挙動を塑性関節法を用いて解析するには、部材断面が多軸荷重下で様々な繰返し荷重を受ける時の後続降伏面の形状、塑性流れ則の変化の様相等が定量的に知られねばならないが、現在のところこの点に関連した研究はH形断面の後続降伏面の変化を論じたWai F. ChenとT. Atsutaの研究¹²⁾の他は著者の知る限り無いように思われる。Chenらの論文は、素材の繰返し引張圧縮応力～歪特性が精度よく得られるならば、繊維の集合体としての部材断面の軸力と二軸曲げ荷重下の繰返し弾塑性挙動が定量的に高精度に得られることを示唆している。

一方、著者の一人は鋼素材の単軸繰返し応力～歪特性の予測に関する研究を続けており、既に軟鋼、50キロ級高張力鋼等に関しては、数本程度の簡単な引張圧縮試験を行って実験式を得ることによって、任意の繰返し負荷過程に対する応力～歪関係を電子計算機によって自動的に精度よく予測し得ることを示した^{14)~16)}

本研究は、定軸圧のもとで繰返し二軸曲げ荷重を受ける薄肉中空円形断面とH形断面の弾塑性挙動を実験と数値解析の両面から明らかにしようとするもので、数値解析は前述の電子計算機による素材の繰返し応力～歪特性の予測法とChenらの方法とを結合させて行う。まず、その1において実験方法と解析方法を示し、若干の実験結果と計算結果の比較を行って解析方法の妥当性を検討した後、その2以降において、薄肉中空円形断面とH形断面の挙動について個別に検討を加える。

2. 実験方法

2-1 試験体

試験体の形状をFig.1 (a), (b)に示す。(a)は薄肉円形断面柱で、 $101.6\phi \times 3t$ の断面寸法を持つSTK41材であり、(b)は $H-100 \times 100 \times 6 \times 8$ のSS41材である。両者とも試験体寸法にノコ切断の後、約600°C 1時間の応力焼鈍を行い、両端部に厚さ30mmの鋼板を溶接した。また、同じ材料からJIS1号またはJIS12号の引張試験片を採取した。

2-2 実験装置

実験装置をFig. 2とFig. 3に示す。試験体(a)は装置のアーム(b)の軸方向に断面主軸を合わせて、試験

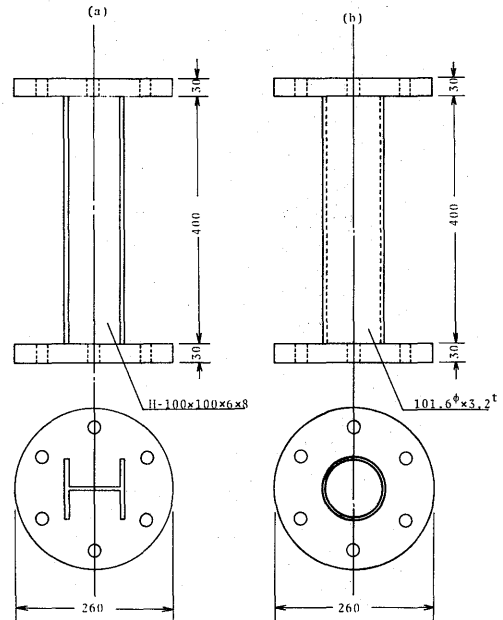


Fig. 1 Test Specimens.

体に較べて充分剛な(c)の端部に高力ボルトで固着される。試験体の中心軸の延長上には球面(d)が取付けられ、球面の中心は試験体中心軸とアーム(b)の中心軸との交点に合せてある。上部アームの先端には、自動調心コロ軸受け(e)を介して引張圧縮10トン形のオイル・ジャッキ(f)と引張圧縮両用のロード・セル(g)が取付けられ、やはり自動調心コロ軸受けを介して下部アームに接続されている。全く同様な形でアームの他の端部がそれぞれ接続されており、計4個の同一規格のオイル・ジャッキとロード・セルが使用されている。各オイル・ジャッキはそれぞれ相対するジャッキと一組となって負荷される。即ち、各ジャッキは引張負荷用と圧縮負荷用の二つのシリンダーを持っているが、一つのジャッキの引張用シリンダーは組となるジャッキの圧縮用シリンダーと、圧縮用シリンダーは引張用シリンダーと、それぞれ耐圧ゴムホースで連絡され一個の引張圧縮用ポンプで負荷される様になっている。これにより、試験体には一つの主軸回りの繰返し純粋曲げ荷重が一個のポンプで負荷できる訳である。同時に、ジャッキをこの様に接続することにより、試験体の軸方向の伸縮に関してはポンプの状態如何に拘らずジャッキの抵抗はほとんど無いことになり、試験体の曲げ変形等によって生ずる軸方向の変形に対する考慮は必要ない。

なお、実験装置のアームには $H-150 \times 150 \times 7 \times 10$

を用い、試験体中心軸から自動調心コロ軸受けの中心部迄の距離は790mmである。

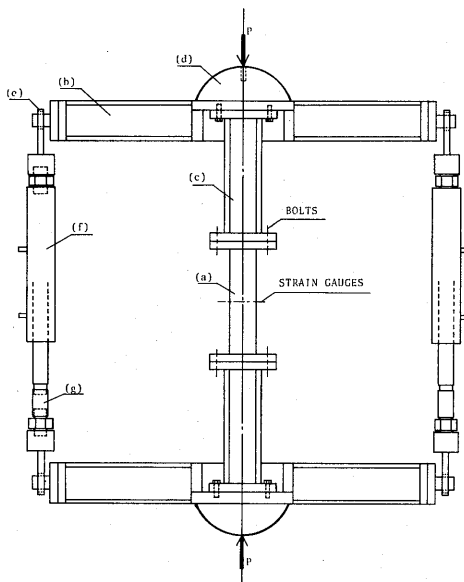


Fig. 2 Front View of Test Setup.

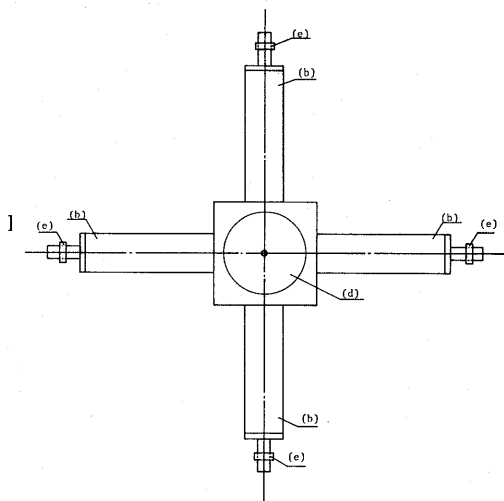


Fig. 3 Plane View of Test Setup.

2-3 実験方法

実験装置の保持および軸力の負荷にはサーボコントロール式200トン万能試験機を用いた。まず、試験機のテーブルに試験機の中心軸に中心を合わせて下部球面座を置き、その上に下部アームを設置する。次に、試

験機クロスヘッドに上部球面座を取付け、球面座の中心にあけられた穴を通して上部アームの球面の中心にネジ込まれた鋼棒によって上部アームを吊り上げる。上部アームの端部にオイル・ジャッキとロード・セルを、また、断面主軸をアームの軸と一致させながら試験体を高力ボルトで固定する。この時、上部アーム、オイル・ジャッキ、ロード・セル、試験体は試験機クロスヘッドによって吊り上げられた形となっている。試験体には、軸方向歪と二軸方向の曲率を測定するための歪ゲージが中央断面に16~30枚貼付してあるが、この時点で試験機とロード・セルおよび歪測定器の零調整を行っておく。

試験機クロスヘッドを静かに降ろし、試験体断面主軸を下部アームの軸と一致させて高力ボルトで固定し、下部アームの端部とロード・セル下端を荷重が加わらない様注意しながら接合する。実験装置を保持するため試験機によって無視できる程度(約50kg)の極く小さな圧縮荷重を加え、自動制御装置によって荷重一定値制御とする。上部の球面の中心にネジ込まれている鋼棒を抜き取れば実験準備は終了し、軸力(圧縮力)、二軸方向の曲げ荷重を任意に組合せた繰返し負荷実験が可能となる。軸力は万能試験機の計力機で、曲げモーメントはロード・セルで、また試験体の軸歪、曲率はデジタル自動歪測定器で測定した歪値から計算する。

3. 解析方法

3-1 解析上の仮定

解析に当たって次のように仮定する。

- (1) 断面の垂直応力以外の応力成分は無視できる。
- (2) 断面の形は変形後も不変であり平面を保つ。ただし、H形断面についてはそりによる変形も考慮する。
- (3) 断面の不安定状態は生じない。

なお、素材の応力~歪特性は次の項で述べるような、過去の履歴の影響を含めて電子計算機で予測される、実際の挙動に極めて近いと考えられる非線形のものを用いる。

3-2 材料の応力~歪特性

著者の一人が既に報告した¹⁵⁾ように、軟鋼に関しては五本程度の簡単な引張圧縮試験を行って単純引張曲線と一つの実験式を得ることにより、その材料の任意の繰返し荷重下での応力~歪特性が電子計算機によって予測し得る。しかし、ここで使用している鋼材は薄肉

の鋼管あるいはH形鋼であり、これらから切り出された試験片での引張圧縮試験は困難なので、単純引張試験のみを行って文献¹⁵⁾で示された鋼種のうち単純引張曲線の特性がより似ている方の実験式を用いることにする。本法によって得られる応力～歪履歴曲線の弾性域、降伏棚および除荷域は直線式で表示され、単純引張の歪硬化域および逆方向負荷時のBauschinger効果域はベキ関数で近似される。

3-3 解析法

二軸対称薄肉断面の図心を原点とし、対称軸をそれぞれX、Y座標とする。断面の無次元一般化応力と無次元一般化歪として、軸力、二つの対称軸回りの曲げモーメントおよびそりモーメントとそれぞれに対応する変形を考え、それらの増分を次のように置く。

$$\dot{\mathbf{f}} = \begin{Bmatrix} \dot{p} \\ \dot{m}_x \\ \dot{m}_y \\ \dot{m}_\omega \end{Bmatrix}; \quad \dot{\boldsymbol{\delta}} = \begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_0 \\ \dot{\phi}_x \\ \dot{\phi}_y \\ \dot{\omega} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} p &= P/P_y = \frac{1}{A\sigma_y} \int \sigma dA \\ m_x &= M_x/M_{px} = \frac{D/2}{I_x\sigma_y} \int \sigma Y dA \\ m_y &= M_y/M_{py} = \frac{B/2}{I_y\sigma_y} \int \sigma X dA \\ m_\omega &= M_\omega/M_{p\omega} = \frac{BD/4}{I_\omega\sigma_y} \int \sigma XY dA \\ \bar{\varepsilon}_0 &= \varepsilon_0/\varepsilon_{0y} = \varepsilon_0/\varepsilon_y \\ \bar{\phi}_x &= \phi_x/\phi_{px} = \frac{D/2}{\varepsilon_y} \phi_x \\ \bar{\phi}_y &= \phi_y/\phi_{py} = \frac{B/2}{\varepsilon_y} \phi_y \\ \bar{\omega} &= \omega/\omega_p = \frac{BD/2}{\varepsilon_y} \omega \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 σ_y と ε_y は素材の引張降伏力と降伏歪、 B 、 D はそれぞれ断面の幅と高さであり、 P_y 、 M_{px} 、 M_{py} 、 $M_{p\omega}$ 、 ε_{0y} 、 ϕ_{px} 、 ϕ_{py} 、 ω_p はそれぞれ断面の初期降伏値である。今、無次元量

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma} &= \sigma/\sigma_y; & \bar{\varepsilon} &= \varepsilon/\varepsilon_y; \\ x &= X/(B/2); & y &= Y/(D/2) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

を導入し、断面の歪分布が $\bar{\varepsilon}_r$ を残留歪として二次の多項式

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_0 + y\bar{\phi}_x + x\bar{\phi}_y + xy\bar{\omega} + \bar{\varepsilon}_r \quad (4)$$

で表わされると考えれば、 $\dot{\mathbf{f}}$ と $\dot{\boldsymbol{\delta}}$ の間に

$$\dot{\mathbf{f}} = \mathbf{K}\dot{\boldsymbol{\delta}} \quad (5)$$

の関係が成り立つ。

ここに、

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \int \bar{E}_t \frac{da}{A} & \int \bar{E}_t y \frac{da}{A} \\ \int \bar{E}_t y \frac{da}{I_x} & \int \bar{E}_t y^2 \frac{da}{I_x} \\ \int \bar{E}_t x \frac{da}{I_y} & \int \bar{E}_t xy \frac{da}{I_y} \\ \int \bar{E}_t xy \frac{da}{I_\omega} & \int \bar{E}_t xy^2 \frac{da}{I_\omega} \\ \int \bar{E}_t x \frac{da}{A} & \int \bar{E}_t xy \frac{da}{A} \\ \int \bar{E}_t xy \frac{da}{I_x} & \int \bar{E}_t xy^2 \frac{da}{I_x} \\ \int \bar{E}_t x^2 \frac{da}{I_y} & \int \bar{E}_t x^2 y \frac{da}{I_y} \\ \int \bar{E}_t x^2 y \frac{da}{I_\omega} & \int \bar{E}_t x^2 y^2 \frac{da}{I_\omega} \end{bmatrix} \quad (7)$$

ただし、 $\bar{E}_t = E_t/E$ 、即ち \bar{E}_t は素材の応力～歪曲線の傾き E_t を弾性係数 E で無次元化したものであり、 $da = dx dy$ 、 $\bar{A} = \iint dx dy$ 、 $\bar{I}_x = \iint y^2 dx dy$ 、 $\bar{I}_y = \iint x^2 dx dy$ 、 $\bar{I}_\omega = \iint x^2 y^2 dx dy$ である。

(7)式を接線剛性として用いることにより、荷重増分～反復法によって任意の繰返し荷重下の断面の挙動を解析することが出来る。実際の解析に際してはFig. 4あるいはFig. 5の如く断面を分割し、各繊維に前節で述べた様な各々の履歴に基づいて予測される応力

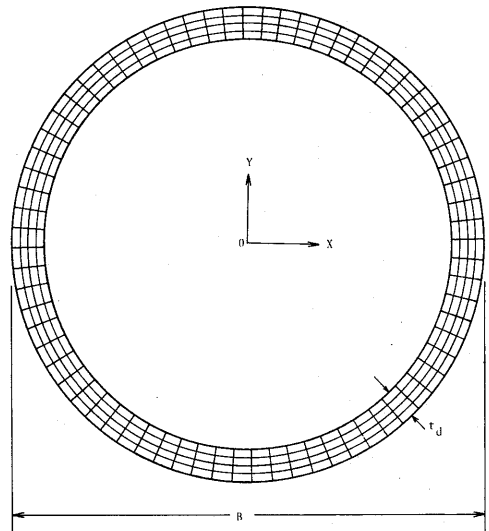


Fig. 4 Holler Circular Section Divided into Finit Elements.

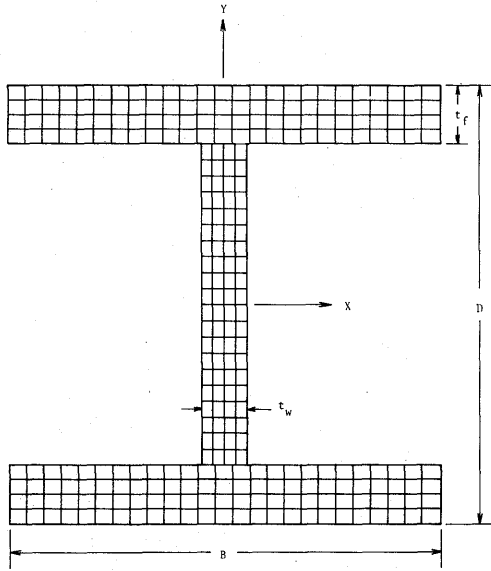


Fig. 5 Wide-Flange Section Divided into Finite Elements.

～歪関係を適用して行う。

解析上の注意点として、繰返し荷重によって負荷径路が折れ曲がる場合、新しい負荷の方向へ微小な test load を加え、折れ曲がる直前での接線剛性によって test load に対応する歪増分を計算し、それを現在の歪値に加えた新しい歪分布によって計算される断面剛性を、折れ曲がり後の最初の接線剛性として使用せねばならない。つまり、断面上の各繊維に除荷が生じるか否かを test load によって判別する必要がある。

4. 実験例および解析例

解析法の妥当性を検証するため、鋼管に対する実験結果とそれに対応する解析結果との比較を以下に示す。

Fig. 6 は鋼管より採取した JIS12号試験片による引張試験の結果である。機械的性質を Table 1 に示す。単純引張曲線の加工硬化域の表示式は

$$\sigma = 73.30\epsilon^{0.322} + 12.00 \quad (8)$$

であり、これは文献¹⁵⁾の M1 の特性に類似しているので、応力～歪履歴曲線の予測には M1 の実験式を用いた。

実験に使用した鋼管は Fig. 1 (a) に示すような 101.6φ×3t のものであるが、計算に用いた断面は 100φ×4t である。若干の相違があるが、実験結果、計算結果とも断面の諸定数で無次元化されているのでこの影響は少ないと考え、無視した。また、実験結果に

おける曲率は、各歪ゲージから計算される曲率の平均値をとった。

Fig. 7～8 にそれぞれ図中に示された負荷径路に対する実験結果と解析結果を示す。両者はよく一致して

Table 1 Mechanical Properties of Material

σ_y (kg/mm ²)	ϵ_{st}	E (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)
32.8	0.020	0.217×10^5	41.9

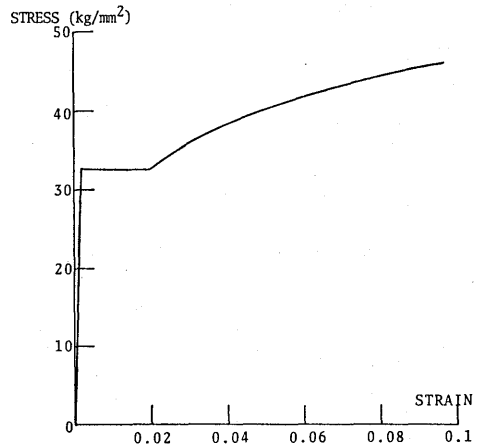


Fig. 6 Monotonic Stress-Strain Curve of Material.

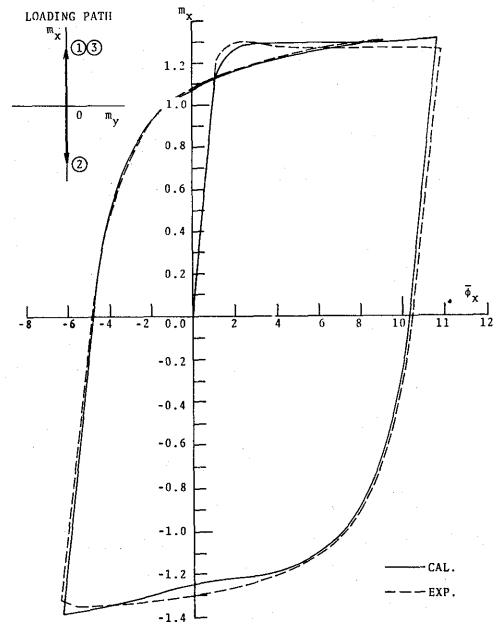


Fig. 7 M~φ Relation of Hollow Circular Section.

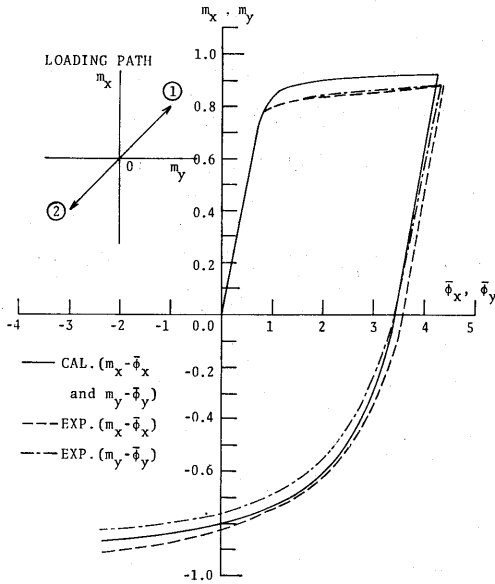


Fig. 8 $M \sim \phi$ Relations of Hollow Circular Section.

おり、本解析法によって二軸対称薄肉断面の繰返し荷重の下での挙動が高精度に計算し得ることが判る。

5. 結 語

鋼構造立体架構の三次元的弾塑性挙動を塑性関節法を用いて解析する場合の基礎となる、部材断面が多軸応力下で繰返し荷重を受ける時の後続降伏面の形状、塑性流れ則の変化の様相等を定量的に把握するための研究の一環として、本報では、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解析法について説明し、二例について実験と解析の比較をして、ここで示した解析法が二軸対称薄肉断面の多軸繰返し荷重の下での挙動を高精度に計算し得ることを示した。次報以降において、鋼管、H形鋼の断面についてその塑性的挙動を実験と解析の両面から詳細に述べる。

参考文献

- 1) 成岡・服部・加藤・後藤・上田：骨組構造解析，コンピューターによる構造工学講座II-1-B，日本鋼構造協会編，培風館。
- 2) 児島・平尾・矢野：立体骨組の一弾塑性解析，土木学会論文報告集，第240号，1975年8月。
- 3) 藤本，岡田：鋼構造骨組の三次元弾塑性挙動に関する研究(その1)，(その2)，(その3)，日本建築学会論文報告集，第244号，第245号，第246号，1976年6月，7月，8月。
- 4) 五十嵐・辻岡・広瀬・宇野：鋼構造立体骨組の弾塑性挙動に関する研究(II：解析方法)，日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)，1976年10月。
- 5) 藤田・吉田・大勝：二軸曲げを受ける柱の弾塑性解析(その1)，日本造船学会論文集，第126号，1969年12月。
- 6) 坂本・渡辺・井元・宮村：二軸曲げを受ける鋼構造部材の塑性耐力に関する考察 [II]，日本建築学会論文報告集，第176号，1970年10月。
- 7) 坂本・渡辺：二軸曲げを受ける鋼構造部材の塑性耐力に関する実験的考察，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，1971年11月。
- 8) S. Santathadaporn and W. F. Chen: Interaction Curves for Sections under Combined Biaxial Bending and Axial Force, Welding Research Council, Bulletin No. 148, Feb. 1970.
- 9) G. A. Morris and S. J. Fennes: Aproximate Yield Surface Equation, J. of EM. Div., ASCE, Vol. 95, No. EM4, Aug., 1969.
- 10) W. F. Chen and T. Atsuta: Interaction Equations for Biaxially Loaded Sections, J. of ST. Div., ASCE, Vol. 98, No. ST5, May, 1972.
- 11) S. Santathadaporn and W. F. Chen: Tangent Stiffness Method for Biaxial Bending, J. of ST. Div., ASCE, Vol. 98, No. ST1, Jan., 1972.
- 12) W. F. Chen and T. Atsuta: Inelastic Response of Column Segments under Biaxial Loads, J. of EM. Div., ASCE, Vol. 99, No. EM4, Aug. 1973.
- 13) N. Tebedge and W. F. Chen: Design Criteria for H-Columns under Biaxial Loading, J. of ST. Div., ASCE, Vol. 100, No. ST3, March, 1974.
- 14) J. Suhara, M. Shugyo, J. Fukuda and H. Nagano: The Stress-Strain Behaviours of Mild Steel under Complex Loading History, Rep. of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu Univ., Vol. 23, No. 72, July, 1975.
- 15) M. Shugyo: The Stress-Strain Behaviors of Mild Steels under Complex Low Cycle Loads, Proc. of 20th Japan Congress on Materials Research, March, 1977.
- 16) 修行稔：鋼構造部材の弾塑性応力および変形等に及ぼす荷重履歴の影響——高張力鋼の特性について——，西部造船会会報，第53号，1977年3月。