

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3：H形断面の特性

修行 稔*・山下 務*・永藤 政敏*

Inelastic Behavior of Steel Column Segments under Cyclic Biaxial Bendings and Axial Force Part 3: Characteristics of a H-section

by

Minoru SHUGYO, Tsutomu YAMASHITA and Masatoshi NAGAFUJI
(Department of Structural Engineering)

The inelastic behavior of a H-section under the constant axial forces are investigated. Characteristics of the moment-curvature relations and the subsequent yield surfaces for three values of constant axial thrust are discussed.

Synthesizing the results for a hollow circular section and a H-section, it becomes evident that the predicted behaviors of the sections under a constant axial thrust by the use of tangent stiffness matrix, where the nonlinear and non-stationary hysteretic stress-strain relations of fibers are calculated using the monotonic stress-strain curves of the materials and the previously reported empirical equations for mild steels, agree well with the experimental results.

1. 序

前報²⁰⁾に引き続き、本報では一定軸圧下におけるH形断面の繰返し弾塑性性状を明らかにする。その1²⁰⁾でも述べたが、近年、繰返し荷重を受けるH形鋼柱および立体骨組の弾塑性域における挙動については極めて多くの研究があり、それらの解析法についても単一梁柱の高精度な解析を主たる目的とする方法から骨組の解析に適用できる様簡便さに主眼を置いた方法までいろいろなもの提案されている^{1)~5),21)}。しかしながら、いずれも解析の基礎としての素材の応力~歪関係は、bi-linear形又はtri-linear形が使用されて

おり、特に、非定常な繰返し変形の解析に適用した場合、その結果の信頼度はかなり低くなるものと考えられる。これに関連し、非定常な繰返し荷重を受ける鋼素材の歪硬化やパウソング効果等を正確に予測しようとする試みが近年いくつか見受けられる^{22),23)}。横尾等²⁴⁾は、Ramberg-Osgood関数の係数を前負荷過程までの最大応力振幅の関数とすることで非定常応力~歪履歴曲線を計算し、接線剛性法を用いて軸力と一軸曲げを受ける梁柱の挙動を解析しているが、軸力と二軸曲げを受ける構造部材の解析に高精度の応力~歪履歴曲線を適用し、実験との対応を考察した例は未だ見

昭和55年10月1日受理

* 構造工学科

られない。

本論は、H形断面の力学的性状を実験及び高精度の繰返し応力～歪関係の予測法に基づく数値積分によって明らかにするものであるが、著者が別に報告した、立体骨組の弾塑性解析法の信頼性を判断するための基礎資料にもなるので、実験は種々の負荷径路に対する二軸曲げモーメント～曲率関係の数値解析結果との比較という点に主眼を置いて行い、予測結果の精度を検証したのち、降伏曲面の変化の様相について主に数値解析によって検討する。一定軸力 P は断面の降伏軸力を P_y として、 $P = -0.02P_y$ 、 $P = -0.22P_y$ 、 $P = -0.42P_y$ の三種類とした。

2. 実験結果と数値解析結果との比較

2.1 実験

試験体は $H-100 \times 100 \times 6 \times 8$ の SS41 材である。試験体形状寸法はその 1²⁰⁾の Fig. 1 に示してある。Fig. 1 に JIS 5 号試験片によるフランジとウェブの単純引張試験結果を示す。その機械的性質は Table 1 の通りである。単純引張曲線の加工硬化域の最小二乗法による表示式はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= 112.1e^{0.143} - 32.04 \text{ [kg/mm}^2\text{]} \text{ (フランジ)} \\ \sigma &= 251.6e^{0.0383} - 178.7 \text{ [kg/mm}^2\text{]} \text{ (ウェブ)} \end{aligned} \right\} (1)$$

となる。

実験装置および実験方法は文献(20)と全く同様である。最小軸力が 0.0 でなく $-0.02P_y$ となっているのは、実験装置上部の自重および装置保持のための軸力が試験体に加わるためである。

2.2 数値解析

素材の繰返し応力～歪履歴曲線の予測には、本来 4 本程度の 1 サイクル引張圧縮試験が必要なのであるが¹⁵⁾、薄肉の部材から切り出された試験片による引張圧縮試験は困難なので、鋼管の場合と同様に、単純引張曲線とそれに準ずる部分は式(1)を用い、その他の部分は文献(5)の $M1$ の実験式を用いて予測を行った。

数値積分のための断面分割図はその 1 の Fig. 5 に示したが、本解析法を直接骨組の弾塑性挙動の解析に適用する際の実用的な分割数ということも考慮して、本論では Fig. 2 に示す様な断面分割とした。

2.3 実験結果と数値解析結果の比較

Fig. 3 に一定軸力 $P = -0.02P_y$ のもとでの二軸曲げ～曲率関係を示す。負荷過程はそれぞれ図中に示してある。Fig. 4 は同じく $P = -0.22P_y$ 、Fig. 5 は同じく $P = -0.42P_y$ の場合である。図中、 m_x 、 m_y 、 $\bar{\phi}_x$ 、 $\bar{\phi}_y$ はそれぞれその 1²⁰⁾の式(2)および(3)式に与え

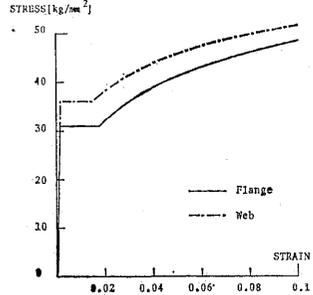


Fig. 1 Monotonic Stress-Strain Curves of Material

Table 1 Mechanical Properties of Material

Specimen	σ_y (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	ϵ_y ($\times 10^{-6}$)	ϵ_{St} ($\times 10^{-6}$)	E (kg/mm ²)
Flange	31.0	45.1	1483	17860	2.09
Web	36.1	48.2	1727	16100	2.09

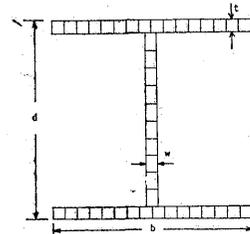


Fig. 2 H-Section Divided into Finite Elements

られている無次元化曲げモーメントおよび無次元化曲率であって、太線が $m_x \sim \bar{\phi}_x$ 関係、細線が $m_y \sim \bar{\phi}_y$ 関係を表わし、実線は数値解析値、破線は実験値である。

Fig. 3 において弱軸のみの負荷の場合、2 サイクル目の解析値が実験値をかなり下まわっているが、これはここで用いた繰返し応力～歪履歴曲線の予測法が、歪振幅が小さい場合には繰返し軟化を表現することに対応している。今回用いた試験体に対しては、繰返し軟化をやや過大に評価する傾向があると考えられる。Fig. 4 および Fig. 5 の軸力がある場合にも同様のことがいえる。また全体的な傾向として Fig. 3～Fig. 5 から明らかな様に、軸力が大きくなる程、bi-linear 的性格が強まってくることがわかる。

試験体のバラツキ等も考慮すれば、2.2 で述べた数値

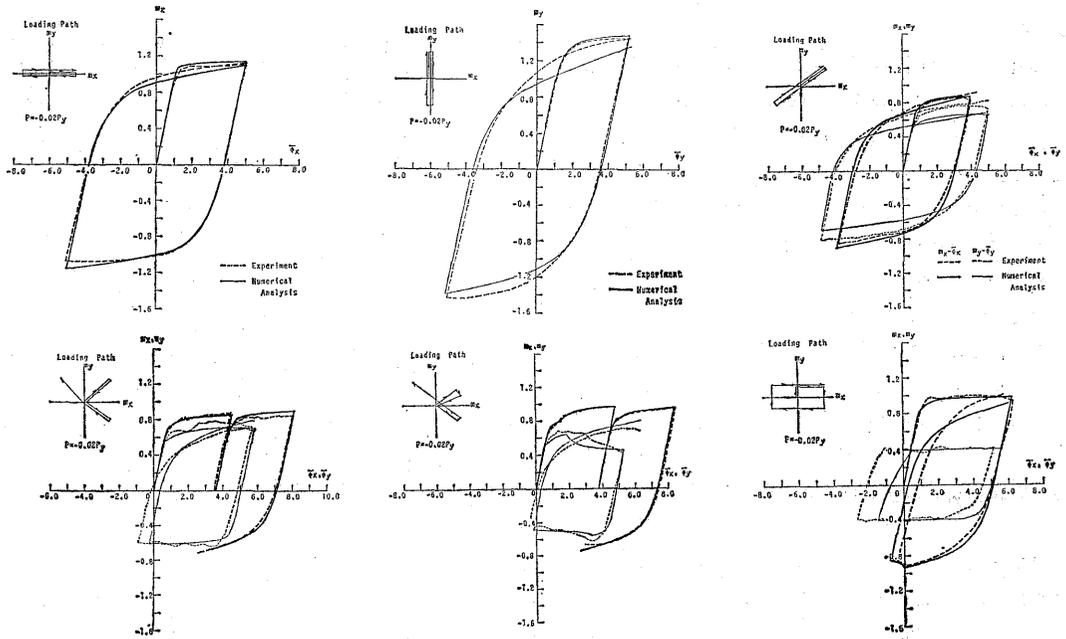


Fig. 3 Moment~Curvature Relationships ($P = -0.02 P_y$)

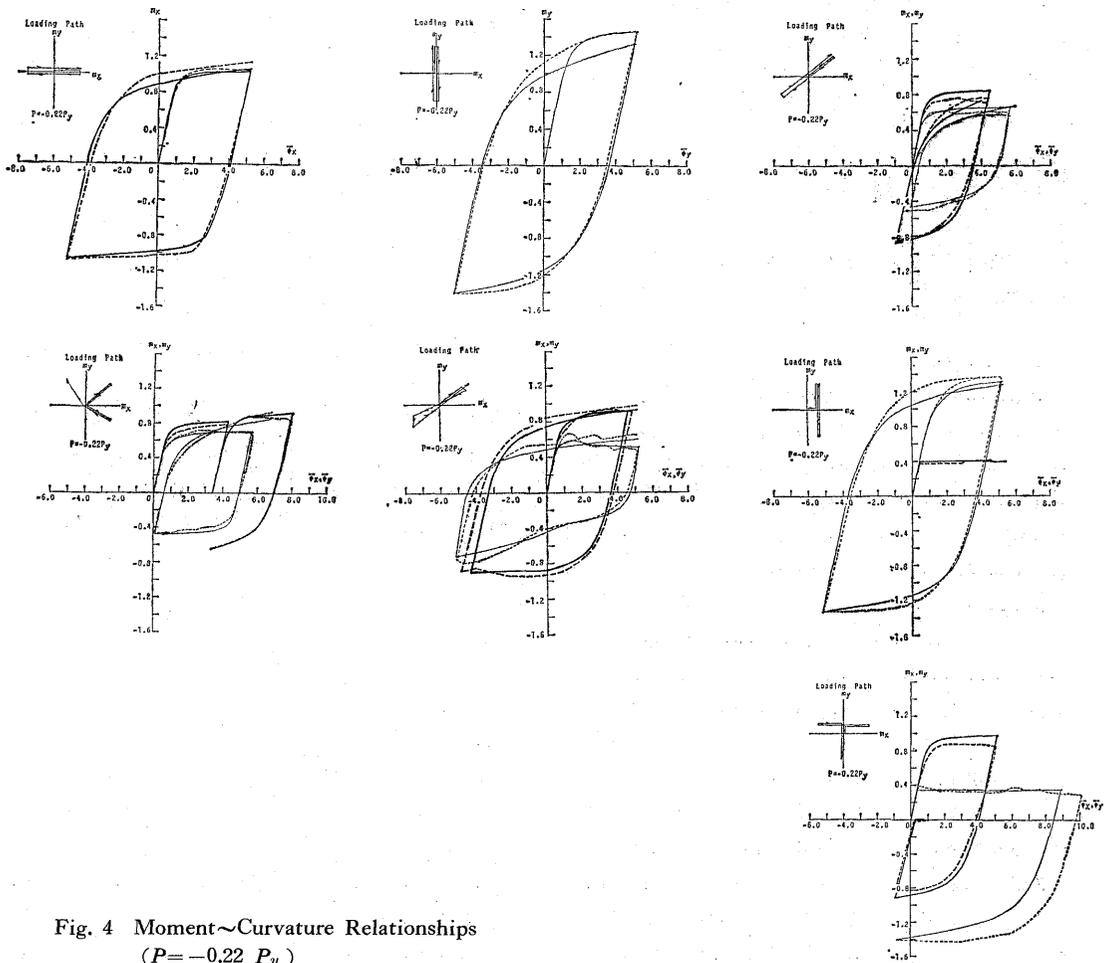


Fig. 4 Moment~Curvature Relationships ($P = -0.22 P_y$)

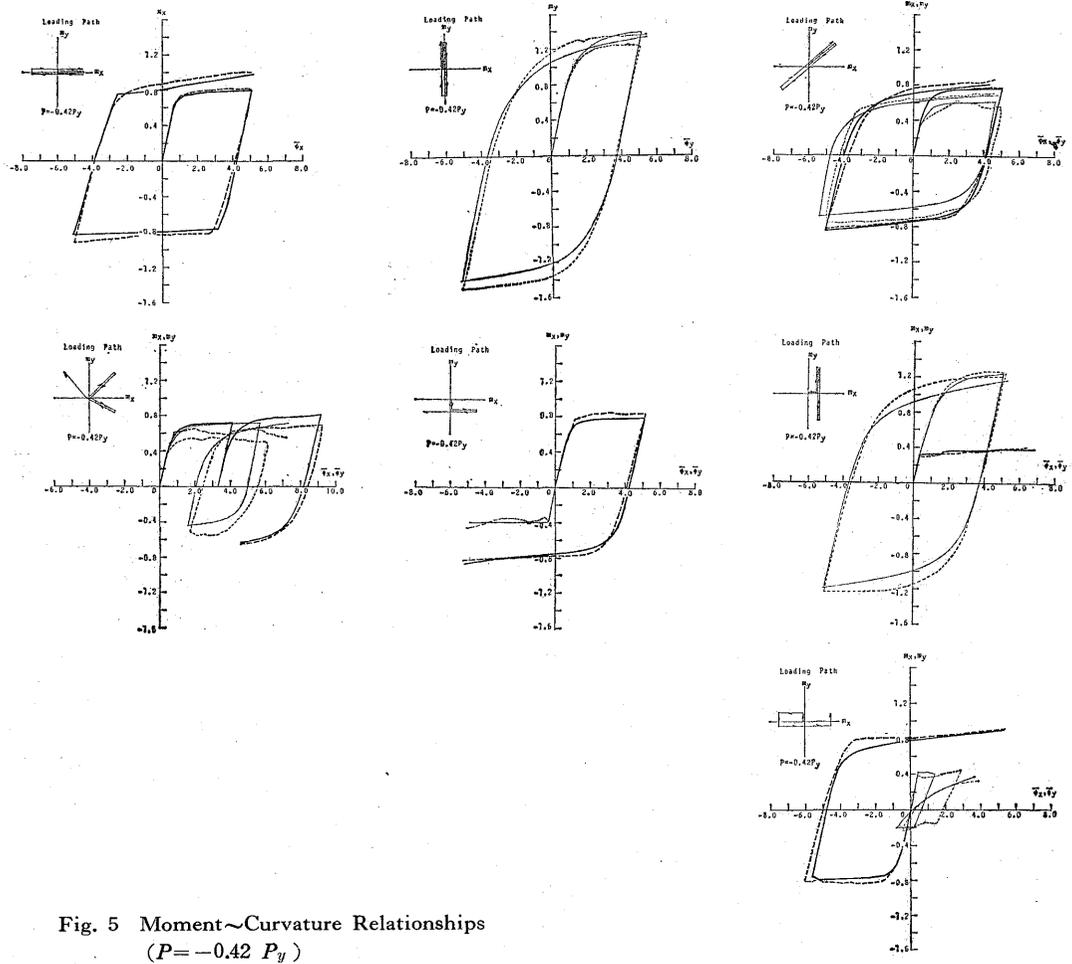


Fig. 5 Moment~Curvature Relationships
($P = -0.42 P_y$)

解析法によれば素材の単純引張試験を行うだけで極めて精度良く H 形断面の二軸繰返し曲げ挙動を予測し得ると言える。

3. 繰返し荷重による降伏曲面の変化

3.1 初期降伏曲面

降伏曲面を得るために必要な降伏応力の決定法は鋼管の場合と同様である。すなわち、ある弾性的な状態を基準としてその状態から強軸弱軸両方向に生じた変形のうち、大きい方の塑性曲率が無軸圧一方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。

Fig. 6 にこの方法で決定した降伏応力による初期降伏曲面を示す。無次元化の基準となっている M_{px}^* , M_{py}^* は、軸圧の無い状態で強軸方向または弱軸方向へ曲げモーメントを負荷した場合の数値解析結果から上に述べた方法で決定した降伏応力であって、断面の上下端が降伏する時の値 M_{px} , M_{py} との関係は $M_{px}^* = 1.12M_{px}$, $M_{py}^* = 1.41M_{py}$ となる。

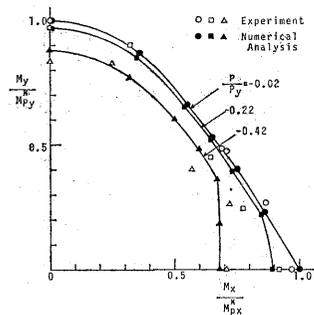


Fig. 6 Initial Yield Surface

3.2 後続降伏曲面

Fig. 7 に軸力 $P = -0.02P_y$ の場合、Fig. 8 に $P = -0.22P_y$ の場合、Fig. 9 に $P = -0.42P_y$ の場合の二次降伏曲面を示す。前負荷の方向は図中に示しているが、強軸のみ、弱軸のみおよび強軸弱軸方向への比例負荷の三種類とした。図中、I で示した点が前負荷の方向への降伏点である。また、白丸は実験値、

黒丸は数値解析値を表わす。最小軸力が 0.0 でなく $-0.02P_y$ となっているのは、前述のように実験装置の上部の自重と実験装置保持のための軸力が存在するためである。負荷の順序は鋼管の場合と同様であり、従って強軸弱軸両方向へ比例的に負荷する場合は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。前負荷の大きさは変形の大きい方向の変形量で制御した。すなわち、いずれの場合も ϕ_x もしくは ϕ_y がそれぞれ $5.0\phi_{px}$ または $5.0\phi_{py}$ に達したら除荷し、曲げモーメントを零にした後、Fig. 7~9 にみら

れるそれぞれの方向へ逆負荷または再負荷して3.1に示した方法で降伏応力を決定した。なお、実験は一点につき一体である。実験点が少なく、 $P=-0.42P_y$ の場合にやや数値解との一致が悪いが、Fig. 3に示した結果も考え合わせれば、H形断面についても本数値解法によってその挙動を良好に予測できると言える。また、各点についている矢印は塑性歪増分ベクトルの方向を示す。全体的に降伏曲線にほぼ垂直であるが、弱軸方向への増分がやや大きくなる傾向があるようである。

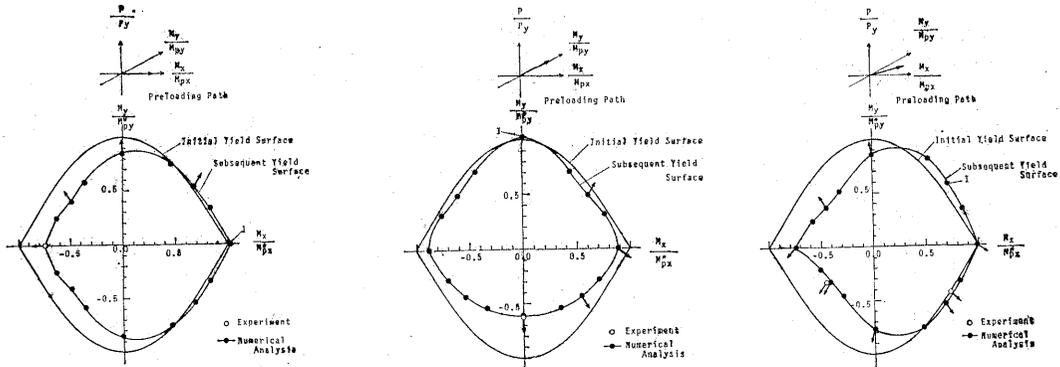


Fig. 7 Subsequent Yield Surface and Directions of Plastic Strain Increment Vector ($P=-0.02P_y$)

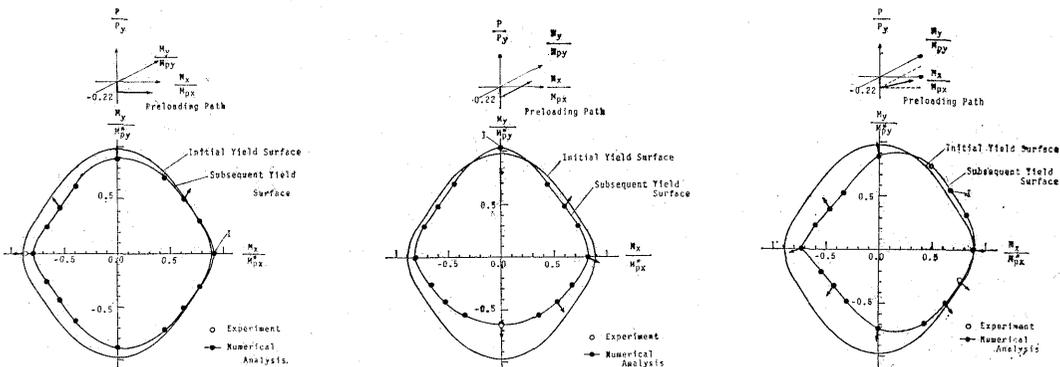


Fig. 8 Subsequent Yield Surface and Directions of Plastic Strain Increment Vector ($P=-0.22P_y$)

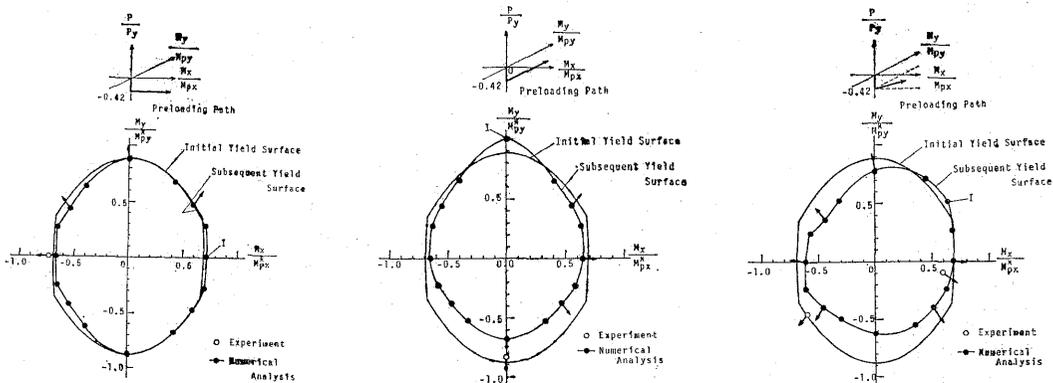


Fig. 9 Subsequent Yield Surface and Directions of Plastic Strain Increment Vector ($P=-0.42P_y$)

3.3 降伏曲面の形状変化に関する考察

バウジング効果のため初期降伏曲面に較べて全体的に寸法が縮小する性質は鋼管と同様であるが、初期降伏曲面そのものが回転対称でないためバウジング効果の現われ方に強軸方向と弱軸方向でかなりの相異がみられる。軸力の有無に拘らず、強軸方向の前負荷後の降伏曲面は寸法の縮小はあるものの形状そのものの変化はほとんどないのに対し、弱軸方向へ前負荷された後の降伏曲面は形状の変化が無視できない。これに伴って、強軸弱軸両方向へ前負荷を受けた後の降伏曲面は複雑な形状となっており、特に軸力が大きい程変化は著しい。以上の事情および Fig. 3~Fig. 5 で明らかな様に、強軸方向のみの繰返し載荷においては曲げモーメント~曲率履歴曲線が bi-linear 的性格を強く示すことを考えれば、強軸方向変形が支配的な場合は、*H*形断面の塑性的挙動を初期降伏面から二次降伏面への軟化を考慮しつつ Prager²⁵⁾、あるいは Ziegler²⁶⁾の移動硬化モデルで表現することも可能であると考えられる。しかし、弱軸方向変形が支配的もしくは二軸性が強い変形の場合は、移動硬化モデルでは誤差が増大することは避けられない。

4. 結語

以上、*H*形断面の一定軸力下における繰返し二軸曲げ挙動を実験および数値解析によって調べ、数値解析の予測精度、前負荷を受けた後の降伏曲面の変化の様相という観点から検討した。定軸力は降伏軸力の0.02倍、0.22倍および0.42倍を採用し、前負荷は強軸のみ、弱軸のみ、強弱両軸への比例負荷の三種類とした。前報で述べた鋼管断面の特性を包含して結論を述べると次の通りである。

- (1) 本論で扱ったような素材の引張圧縮試験が困難な部材でも、それが軟鋼である限り、単純引張曲線さえ得られれば、文献(15)に示した軟鋼に共通の実験式を用いてその材料の非定常な繰返し応力~歪履歴曲線の予測が可能であり、また、これを用いた断面分割・数値積分法によれば、鋼構造部材断面の非定常繰返し荷重のもとでの三次元的な挙動を良好な精度で予測することができる。
- (2) *H*形断面の場合、前負荷を与えた後の二次降伏曲面は、バウジング効果により全体的に軟化することは鋼管断面と同様であるが、形状変化には軸力よりも強軸弱軸の異方性による影響が大きく、強軸方向前負荷の場合ほとんど形状の変化が無いのに対し、弱軸方向前負荷の場合かなりの変化がみられる。
- (3) 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。

- (4) *H*形断面において強軸方向変形が支配的な場合は、その挙動を移動硬化モデルで表現することも可能であるが、*H*形断面において弱軸曲げ成分が大きくなるような場合、および鋼管断面ではモデル化によるかなりの誤差が予測される。(その2, 4.結語(2)~(5)参照)

謝 辞

本研究に際し貴重な御助言を賜った、広島大学工学部教授花井正実博士に感謝の意を表する。

なお、数値計算には長崎大学情報処理センター FA COM M-180II AD を使用した。

参 考 文 献

- 20) 修行稔, 久保由男, 満崎彰吾, 花井正実; 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, 長崎大学工学部研究報告第10号, pp. 41~46, 昭和53年2月, その2, 同第12号, pp. 39~44, 昭和54年2月
- 21) 藤本盛久, 緑川光正; 鋼構造立体骨組の動的弾塑性応答に関する研究, その1 *H*形断面柱および箱形断面柱からなる1層1スパン剛接立体骨組, 日本建築学会論文報告集第282号, pp. 9~21, 昭和54年8月
- 22) Y. Yokoo, T. Nakamura and Y. Kawada: Non-Stationary Hysteretic Uniaxial Stress-Strain Relations of a Wide Flange Steel (Part I), 日本建築学会論文報告集, 第259号, pp. 53~66, 1977
- 23) Y. Yokoo and T. Nakamura: Non-Stationary Uniaxial Stress-Strain Relations of a Wide Flange Steel (Part II), 日本建築学会論文報告集, 第260号, pp. 71~82, 1977
- 24) Y. Yokoo, T. Nakamura, S. Kamagata and I. Kosako: Analysis of a Beam-Column Obeying Hysteretic Uniaxial Stress-Strain Relations, Summaries of Technical Papers of 1977 annual Meeting of AIJ, pp. 1025~1026
- 25) W. Prager: A New Method of Analyzing Stresses and Strains in Work-Hardening Plastic Solids, Jour. of Applied Mechanics, Trans. ASME, Dec. 1956, pp. 493~496
- 26) H. Ziegler: A Modification of Prager's Hardening Rule, Quart. Applied Mechanics, Vol. 17, No 7, 1959, pp. 55~65