繰返し変動曲げを受けるH型鋼柱の弾塑性・崩壊挙動

ON ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR OF STRUCTURAL STEEL BEAM-COLUMN WITH H-CROSS SECTION SUBJECTED TO REPEATED VARIABLE BENDING

近藤 一夫*, 中倉 健介**, 王 学鋒***, 花井 正実****

Kazuo KONDOH, Kensuke NAKAKURA, Xue-Feng WANG and Masami HANAI

Elasto-plastic and collapse behavior of structural steel beam-columns with H-cross section subjected to repeated variable bending around the strong axis under a constant axial force are analytically and unifiedly investigated.

A new method, its basic ideas and fundamental formulation are given in the authors' previous papers, is applied to a beam-column with H-cross section under repeated variable bending, and the explicit expressions for the elasto-plastic behavior are derived. Several specific characteristics of the H-cross section are indicated in comparison with the rectangular one. Also, the incremental collapse limits, which are related to divergence phenomenon of the axial strain, are examined.

Keywords : steel beam-column, H-cross section, repeated variable bending, elasto-plastic behavior, incremental collapse

鋼柱, H型断面, 繰返し変動曲げ, 弾塑性挙動, 漸増塑性崩壊

1. 緒 言

本報告は, 正負対称型の変動領域を有する繰返し変動曲げを受ける一定軸圧下鋼柱断面の弾塑性, 崩壊挙動を解析的に明らかにすることを目的とした文献1)の続編であり, 強軸回りの繰返し変動曲げを受けるH型柱断面の挙動を明らかにした結果について報告する。

文献1)では, 本研究で用いる解析手法およびその基礎式を示すとともに, i) 軸ひずみは, 軸力が正の場合には, 繰返し変動曲げの変動領域の大きさを表すパラメータである $\hat{\kappa}^*$ の増大とともに単調に増加し, 逆に, 軸力が負の場合には, 単調に減少すること, ii) 降伏後の接線係数が0で, 軸力が非零の場合, 軸ひずみが降伏ひずみに達し, 断面全体が弾塑性(C)状態か交番塑性状態に, あるいは, 弾塑性(T)状態か交番塑性状態となった時, 軸ひずみの発散による漸増塑性崩壊が生じること, iii) 一方, 降伏後の接線係数が正の場合には, 軸ひずみの発散は生じず, $\hat{\kappa}^*$ を ∞ とした時の軸ひずみの極限值は, $\hat{\epsilon}_0 = (n/e_t)$ (ここに, $\hat{\epsilon}_0$: 降伏ひずみで無次元化された軸ひずみ, n : 降伏軸力で無次元化された軸力, e_t : ヤング係数で無次元化された降伏後の接線係数)

となること, iv) $\hat{\kappa}^* - m^*$ 関係 (ここに, m^* : 降伏モーメントで無次元化された抵抗モーメント) は, 軸力に対する依存性は全くなく, 柱断面の形状, 寸法および降伏後の接線係数が与えられれば, 一義的に定まり, また, それは, 軸力0の単調載荷時の曲率-曲げモーメント関係と同じものとなること, 等の一定軸力下で, 正負対称型の繰返し変動曲げを受ける柱断面のいくつかの一般的特性を明らかにした。また, この手法を, 最も単純で扱いやすい長方形柱断面に適用し, i) 降伏軸力で無次元化された軸力が0.5以上の場合, 柱断面は極めて危険な状態となり, 降伏曲率以下の繰返し曲げを受けた場合にも, 非常に大きな軸ひずみが生じること, ii) 無次元化された降伏後の接線係数: e_t が1/200程度の場合, ひずみ効果の影響が顕著に表れるのは, 大きな軸ひずみが生じた後であり, 降伏ひずみの数倍程度の範囲内では, その効果はあまり期待できないこと, iii) $\hat{\kappa}^* - m^*$ 関係は, 軸力の影響は全く受けないが, 軸ひずみの発散に伴う漸増塑性崩壊時の抵抗モーメントの値は, 単調載荷時の場合と同様, 軸力の増加とともに, 大幅に低下してること, 等のことを明らかにした。

* 広島大学工学部 助教授・工博

** 広島大学大学院 大学院生

*** 広島大学大学院 大学院生・工修

**** 広島大学工学部 教授・工博

Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Hiroshima Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Hiroshima Univ.

Graduate Student, Graduate School of Hiroshima Univ., M. Eng.

Prof., Faculty of Engineering, Hiroshima Univ., Dr. Eng.

本報告では、文献1)に示した手法を、より一般的に用いられているH型柱断面が、強軸回りの繰返し変動曲げを受ける場合に適用し、その弾塑性、崩壊挙動を、数値解析によらず、陽な形で求める。また、軸ひずみを許容限界内に納めるための $\hat{\kappa}^*$ の限界値を示し、H型柱断面がこの種の荷重を受ける場合、文献1)に示した長方形柱断面に比べ、さらに危険な状態となることを明らかにする。

2. 正負対称型繰返し変動曲げと一定軸力を受けるH型柱断面

本報告で対象とするのは、Fig.1に示すような、一定軸力の下で、正負対称な領域内に任意に変動する強軸回りの繰返し変動曲げを受ける理想化されたH型柱断面であり、陽な形でその弾塑性応答を求めるため、前報と同様、以下のような仮定を採用する。

- 1) H型柱の変形は、断面剛の仮定に基づく、通常のはり・柱理論に従う。
- 2) 柱断面に生じる内力は、一定軸力と繰返し変動曲げモーメントのみとし、せん断力の影響は無視する。
- 3) ひずみ-応力関係は、降伏後の接線係数を正、または0とするBi-linear型とする。また、ひずみ硬化則として、移動硬化則を採用し、荷重の繰返しに伴うひずみ-応力関係の劣化、軟化等の現象は生じないものとする。

また、後の議論の展開を容易にするため、次式のような無次元化量を導入する。

$$\begin{aligned}\hat{\varepsilon} &= (\varepsilon/\varepsilon_y), \quad \hat{\varepsilon}_0 = (\varepsilon_0/\varepsilon_y), \quad \hat{\sigma} = (\sigma/\sigma_y) \\ \hat{\kappa} &= (\kappa/\kappa_y), \quad n = (N/N_y), \quad m = (M/M_y) \\ \hat{t}_f &= (t_f/H), \quad \hat{t}_w = (t_w/B), \quad e_t = (E_t/E) \\ \xi &= (y/H) \dots \dots \dots (1. a-j)\end{aligned}$$

また、

$$\begin{aligned}n_y &= (N_y/(\sigma_y \cdot B \cdot H)) = 1 - (1 - \hat{t}_w) \cdot (1 - 2 \cdot \hat{t}_f) \\ m_y &= (M_y/(\sigma_y \cdot B \cdot H^2)) = \frac{1}{6} \cdot [1 - (1 - \hat{t}_w) \cdot (1 - 2 \cdot \hat{t}_f)^2] \\ m_0 &= (M_0/(\sigma_y \cdot B \cdot H^2)) = \frac{1}{4} \cdot [1 - (1 - \hat{t}_w) \cdot (1 - 2 \cdot \hat{t}_f)^2] \\ &\dots \dots \dots (2. a-c)\end{aligned}$$

Fig.1 Beam-Column with H-Cross Section Subjected to Repeated Variable Bending around the Strong Axis under Constant Axial Force

ここに、

ε : ひずみ, ε_y : 降伏ひずみ, ε_0 : 軸ひずみ
 σ : 応力, σ_y : 降伏応力, κ : x 軸回りの曲率
 κ_y : x 軸回りの降伏曲率, N : 軸力
 N_y : 降伏軸力, M : x 軸回りの曲げモーメント
 M_y : x 軸回りの降伏モーメント
 M_0 : x 軸回りの全塑性モーメント

t_f : フランジ厚, t_w : ウェブ厚, H : 柱せい

B : 柱幅, E_t : 降伏後の接線係数, E : ヤング係数であり、軸力、軸ひずみは、引張側を、また、曲げモーメント、曲率は、柱断面の $\xi=1/2$ 側が凸となる場合を正とする。

さて、このH型柱断面は、外乱として、前述のように、次式のような一定軸力と正負対称型の変動領域を有する x 軸（強軸）回りの繰返し曲げ（曲率）を受けるものとする。

$$n = \text{一定}, \quad -\hat{\kappa}^* \leq \hat{\kappa} \leq \hat{\kappa}^* \dots \dots \dots (3. a, b)$$

ここに、 $\hat{\kappa}^* (\geq 0)$ は、繰返し変動曲げの変動領域の大きさを表すパラメータであり、 $\hat{\kappa}$ は、0 から単調に増加する $\hat{\kappa}^*$ の各値に対して、 $\hat{\kappa} = \hat{\kappa}^*$ および $\hat{\kappa} = -\hat{\kappa}^*$ を含む(3. b)式で与えられる領域内を、任意に、また、定常状態に達するまで、無限に繰り返されるものとする。

一方、定常状態到達後の軸ひずみおよび曲げモーメントの応答領域は、 $\hat{\kappa}$ の変動領域を正負対称としているから、

$$\hat{\varepsilon}_0 = \hat{\varepsilon}_0(\hat{\kappa}^*), \quad -m^* \leq m \leq m^* \dots \dots \dots (4. a, b)$$

となる。ここに、 $m^* (\geq 0)$ は、降伏モーメントで無次元化された抵抗モーメントの値であり、また、(4. a)式は、無次元化された軸ひずみ： $\hat{\varepsilon}_0$ は領域を有さず、 $\hat{\kappa}^*$ の関数として一義的に定まることを意味している。

また、H型柱断面の任意点のひずみおよび応力の応答領域も、それぞれ、次式のように表される。

$$\hat{\varepsilon}_{\min} \leq \hat{\varepsilon} \leq \hat{\varepsilon}_{\max}, \quad \hat{\sigma}_{\min} \leq \hat{\sigma} \leq \hat{\sigma}_{\max} \dots \dots \dots (5. a, b)$$

ここに、

$$\hat{\varepsilon}_{\min} = \hat{\varepsilon}_0 - \hat{\varepsilon}_{\text{amp}}, \quad \hat{\varepsilon}_{\max} = \hat{\varepsilon}_0 + \hat{\varepsilon}_{\text{amp}} \dots \dots \dots (6. a, b)$$

また、

$$\hat{\varepsilon}_{\text{amp}} = 2 \cdot |\xi| \cdot \hat{\kappa}^* \dots \dots \dots (7)$$

であり、($\hat{\varepsilon}_{\min}$, $\hat{\varepsilon}_{\max}$) および ($\hat{\sigma}_{\min}$, $\hat{\sigma}_{\max}$) は、(4. a)式および(7)式から容易に知れるように、 ξ に関して対称となる。

文献1)に従い、 $-1 < \hat{\varepsilon}_{\min}$ かつ $\hat{\varepsilon}_{\max} < 1$ の時を『弾性状態』、 $\hat{\varepsilon}_{\max} - \hat{\varepsilon}_{\min} < 2$ で $\hat{\varepsilon}_{\min} \leq -1$ の時を『弾塑性(C)状態』、 $\hat{\varepsilon}_{\max} - \hat{\varepsilon}_{\min} < 2$ で $1 \leq \hat{\varepsilon}_{\max}$ の時を『弾塑性(T)状態』、また、 $2 \leq \hat{\varepsilon}_{\max} - \hat{\varepsilon}_{\min}$ の時を『交番塑性状態』と呼ぶことにすると、軸力一定の下では、軸ひずみ： $\hat{\varepsilon}_0$ は、 $\hat{\kappa}^*$ の増大とともに、単調に増加($n > 0$ の時)あるいは減少($n < 0$ の時)し、一旦、降伏曲面上に達した $\hat{\sigma}_{\min}$ あるいは $\hat{\sigma}_{\max}$ が、再び、弾性の状態に戻ることはない

から、各応力状態における $(\hat{\varepsilon}_{\min}, \hat{\varepsilon}_{\max}) - (\hat{\sigma}_{\min}, \hat{\sigma}_{\max})$ 関係は、それぞれ、次式のように表される¹⁾。

(弾性状態)

$$\hat{\sigma}_{\min} = \hat{\varepsilon}_{\min}, \quad \hat{\sigma}_{\max} = \hat{\varepsilon}_{\max} \quad \dots\dots\dots (8. a, b)$$

(弾塑性 (C) 状態)

$$\left. \begin{aligned} \hat{\sigma}_{\min} &= e_t \cdot \hat{\varepsilon}_{\min} - (1 - e_t) \\ \hat{\sigma}_{\max} &= (\hat{\varepsilon}_{\max} - \hat{\varepsilon}_{\min}) + e_t \cdot \hat{\varepsilon}_{\min} - (1 - e_t) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9. a, b)$$

(弾塑性 (T) 状態)

$$\left. \begin{aligned} \hat{\sigma}_{\max} &= e_t \cdot \hat{\varepsilon}_{\max} + (1 - e_t) \\ \hat{\sigma}_{\min} &= (\hat{\varepsilon}_{\min} - \hat{\varepsilon}_{\max}) + e_t \cdot \hat{\varepsilon}_{\max} + (1 - e_t) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10. a, b)$$

(交番塑性状態)

$$\left. \begin{aligned} \hat{\sigma}_{\min} &= e_t \cdot \hat{\varepsilon}_{\min} - (1 - e_t) \\ \hat{\sigma}_{\max} &= e_t \cdot \hat{\varepsilon}_{\max} + (1 - e_t) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (11. a, b)$$

一方、 $(\hat{\sigma}_{\min}, \hat{\sigma}_{\max})$ は ξ に関して対称であることを利用すると、 n および m^* は、それぞれ、次式のように表される。

$$\begin{aligned} n &= \frac{1}{n_y} \cdot \left(\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2} - \hat{t}_f} \hat{\sigma}_r \cdot d\xi + \int_{\frac{1}{2} - \hat{t}_f}^{\frac{1}{2}} \hat{\sigma}_r \cdot d\xi \right) \\ m^* &= \frac{1}{m_y} \cdot \left(\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2} - \hat{t}_f} \hat{\sigma}_{amp} \cdot \xi \cdot d\xi + \int_{\frac{1}{2} - \hat{t}_f}^{\frac{1}{2}} \hat{\sigma}_{amp} \cdot \xi \cdot d\xi \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (12. a, b)$$

ここに、

$$\hat{\sigma}_r = \frac{1}{2} \cdot (\hat{\sigma}_{\min} + \hat{\sigma}_{\max}), \quad \hat{\sigma}_{amp} = \frac{1}{2} \cdot (\hat{\sigma}_{\max} - \hat{\sigma}_{\min}) \quad \dots\dots\dots (13. a, b)$$

であり、本研究では、 $\hat{\varepsilon}$ を繰返し変動外乱としているから、交番塑性以外の応力状態については、 $\hat{\sigma}_r$ は、固定荷重である一定軸力に対する応答をふくめた残留応力、一方、 $\hat{\sigma}_{amp}$ は、 $\hat{\varepsilon}$ に対する弾性応答応力の応答領域幅という物理的意味がある。

(8. a, b) 式—(11. a, b) 式を (13. a, b) 式に代入、(6. a, b) 式の関係を用いて整理すると、各応力状態における $\hat{\sigma}_r$ 、 $\hat{\sigma}_{amp}$ は、 $\hat{\varepsilon}_0$ および (7) 式で定義される $\hat{\varepsilon}_{amp}$ により、次式のように表される。

(弾性状態)

$$\hat{\sigma}_r = \hat{\varepsilon}_0, \quad \hat{\sigma}_{amp} = \hat{\varepsilon}_{amp} \quad \dots\dots\dots (14. a, b)$$

(弾塑性 (C) 状態)

$$\left. \begin{aligned} \hat{\sigma}_r &= e_t \cdot \hat{\varepsilon}_0 + (1 - e_t) \cdot \hat{\varepsilon}_{amp} - (1 - e_t) \\ \hat{\sigma}_{amp} &= (14. b) \text{ 式} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (15. a, b)$$

(弾塑性 (T) 状態)

$$\left. \begin{aligned} \hat{\sigma}_r &= e_t \cdot \hat{\varepsilon}_0 - (1 - e_t) \cdot \hat{\varepsilon}_{amp} + (1 - e_t) \\ \hat{\sigma}_{amp} &= (14. b) \text{ 式} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (16. a, b)$$

(交番塑性状態)

$$\left. \begin{aligned} \hat{\sigma}_r &= e_t \cdot \hat{\varepsilon}_0 \\ \hat{\sigma}_{amp} &= e_t \cdot \hat{\varepsilon}_{amp} + (1 - e_t) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (17. a, b)$$

(7) 式、(12. a, b) 式および (14. a, b) 式—(17. a, b)

式が、一定軸力の下で正負対称型の変動領域を有する強軸回りの繰返し変動曲げを受ける H 型柱断面の変形を支配する基礎式である。

3. H 型柱断面に生じる 9 つの変形状態

本節と次節では、前節に示した基礎式を用いて、H 型柱断面全体についての $(n, \hat{\varepsilon}^*) - (\hat{\varepsilon}_0, m^*)$ 関係を求めてみる。なお、ここでは、簡単化と実用上の観点から、文献 1) で扱った長方形柱断面の場合と同様、 $n \leq 0$ の場合についてのみ考える。

さて、文献 1) で指摘したように、 $n \leq 0$ の場合、柱断面の各ポイントの応力状態は、 $\hat{\varepsilon}^*$ の増大とともに、(弾性状態) → (弾塑性 (C) 状態) → (交番塑性状態) と移行してゆき、一度、弾塑性 (C) 状態あるいは交番塑性状態となったポイントが、再び、弾性状態あるいは弾塑性 (C) 状態となることはない。したがって、H 型柱断面全体としては、断面全体が弾性状態の場合、弾性状態と弾塑性 (C) 状態が混在する場合、弾性状態、弾塑性 (C) 状態および交番塑性状態の 3 つの状態が混在する場合、断面全体が弾塑性 (C) 状態の場合、弾塑性 (C) 状態と交番塑性状態が混在する場合の計 5 つの変形状態が出現することになり、2 つ以上の応力状態が同じ断面上に混在する場合には、図心軸に近い方から、(弾性状態)、(弾塑性 (C) 状態)、(交番塑性状態) の並びとなる。本研究では、これらの 5 つの変形状態を、それぞれ、[状態 I]、[状態 II]、[状態 III]、[状態 IV] および [状態 V] と呼ぶ。

ところで、H 型断面では、2 つ以上の応力状態が同じ断面上に混在する場合には、各応力状態の境界がフランジ部分にあるのかあるいはウェブ部分にあるのかを明確に区別しておく必要があり、今、これを、状態を表すローマ数字の右下に、該当の境界がフランジ部分にある場合には f 、ウェブ部分にある場合には w の添え字を付して表すことにすると、2 つの応力状態が混在する [状態 II] および [状態 V] については、それぞれ、([状態 II]_f), [状態 II]_w) および ([状態 V]_f), [状態 V]_w) の 2 つが、また、3 つの応力状態が混在する [状態 III] には、([状態 III]_f), [状態 III]_w), [状態 III]_{ww}) の 3 つの異なる状態が表れる。ここに、[状態 III] についての最初の添え字は、弾性状態と弾塑性 (C) 状態の境界、一方、2 番目の添え字は、弾塑性 (C) 状態と交番塑性状態の境界についてのものである。

以上の結果を整理すると、一定軸圧縮力の下で強軸回りの繰返し変動曲げを受ける H 型柱断面には、以下に示す 9 つの変形状態が出現することになる。

[状態 I] : 断面全体が弾性状態の場合

[状態 II] : 弾性状態と弾塑性 (C) 状態が同じ断面内に混在し、その境界がフランジ内にある場

Fig. 2 Nine Strained States Appearing in H-Cross Section Subjected to Repeated Variable Bending under Constant Axial Force

合

- [状態 II_w] : 弾性状態と弾塑性 (C) 状態が同じ断面内に混在し、その境界がウェブ内にある場合
- [状態 III_{ff}] : 弾性状態、弾塑性 (C) 状態および交番塑

性状態の 3 つの応力状態が同じ断面内に混在し、2 つの境界が共にフランジ内にある場合

- [状態 III_{wf}] : 弾性状態、弾塑性 (C) 状態および交番塑

性状態の3つの応力状態が同じ断面内に混在し、弾性状態と弾塑性 (C) 状態の境界がウェブ内に、一方、弾塑性 (C) 状態と交番塑性状態の境界がフランジ内にある場合

[状態Ⅲ_{ww}] : 弾性状態、弾塑性 (C) 状態および交番塑性状態の3つの応力状態が同じ断面内に混在し、2つの境界が共にウェブ内にある場合

[状態Ⅳ] : 断面全体が弾塑性 (C) 状態の場合

[状態Ⅴ_f] : 弾塑性 (C) 状態と交番塑性状態が同じ断面内に混在し、その境界がフランジ内にある場合

[状態Ⅴ_w] : 弾塑性 (C) 状態と交番塑性状態が同じ断面内に混在し、その境界がウェブ内にある場合

各変形状態における $(n, \hat{\kappa}^*) - (\hat{\varepsilon}_0, m^*)$ 関係は (7) 式, (12. a, b) 式および (14. a, b) 式—(17. a, b) 式を用いて、次のように定式化される (Fig. 2 参照)。

[状態Ⅰ] $0 \leq \hat{\kappa}^* < 1$ で $0 \leq (-\hat{\varepsilon}_0) < 1 - \hat{\kappa}^*$ の場合であり、断面全体が弾性状態であるから、

$$(-n) = -\frac{2}{n_y} \left[\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2} - \hat{t}_f} (14. a) \text{ 式} \cdot d\xi + \int_{\frac{1}{2} - \hat{t}_f}^{\frac{1}{2}} (14. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right] = (-\hat{\varepsilon}_0) \dots (18. a)$$

したがって、

$$(-\hat{\varepsilon}_0) = (-n) \dots (18. b)$$

また、

$$m^* = \frac{2}{m_y} \left[\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2} - \hat{t}_f} (14. b) \text{ 式} \cdot \xi \cdot d\xi + \int_{\frac{1}{2} - \hat{t}_f}^{\frac{1}{2}} (14. b) \text{ 式} \cdot \xi \cdot d\xi \right] = \hat{\kappa}^* \dots (18. c)$$

[状態Ⅱ_f] $0 \leq \hat{\kappa}^* < 1$ で $1 - \hat{\kappa}^* \leq (-\hat{\varepsilon}_0) < 1 - (1 - 2 \cdot \hat{t}_f) \cdot \hat{\kappa}^*$ の場合であり、 $0 \leq \xi < 1/2 - \hat{t}_f$ および $1/2 - \hat{t}_f \leq \xi < (1 - (-\hat{\varepsilon}_0))/(2 \cdot \hat{\kappa}^*)$ の領域が弾性状態、 $(1 - (-\hat{\varepsilon}_0))/(2 \cdot \hat{\kappa}^*) \leq \xi \leq 1/2$ の領域が弾塑性 (C) 状態であるから、

$$\begin{aligned} (-n) &= -\frac{2}{n_y} \left[\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2} - \hat{t}_f} (14. a) \text{ 式} \cdot d\xi + \int_{\frac{1}{2} - \hat{t}_f}^{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \cdot (1 - (-\hat{\varepsilon}_0))} (14. a) \text{ 式} \cdot d\xi + \int_{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \cdot (1 - (-\hat{\varepsilon}_0))}^{\frac{1}{2}} (15. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right] \\ &= (-\hat{\varepsilon}_0) - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot ((-\hat{\varepsilon}_0) + \hat{\kappa}^* - 1)^2 \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \dots (19. a) \end{aligned}$$

(19. a) 式を $(-\hat{\varepsilon}_0)$ について解くと、

$$(-\hat{\varepsilon}_0) = 1 - \left(1 - n_y \cdot \frac{1}{1 - e_t} \right) \cdot \hat{\kappa}^* - \frac{1}{1 - e_t}$$

$$\begin{aligned} &\cdot [2 \cdot n_y \cdot (1 - e_t) \cdot (1 - (-n))] \cdot \hat{\kappa}^* + n_y \\ &\cdot (n_y - 2 \cdot (1 - e_t)) \cdot \hat{\kappa}^{*2}]^{1/2} \dots (19. b)^{(注1)} \end{aligned}$$

また、

$$m^* = (18. c) \text{ 式} \dots (19. c)$$

[状態Ⅱ_w] $0 \leq \hat{\kappa}^* < 1$ で $1 - (1 - 2 \cdot \hat{t}_f) \cdot \hat{\kappa}^* \leq (-\hat{\varepsilon}_0) < 1$ の場合であり、 $0 \leq \xi < (1 - (-\hat{\varepsilon}_0))/(2 \cdot \hat{\kappa}^*)$ の領域が弾性状態、 $(1 - (-\hat{\varepsilon}_0))/(2 \cdot \hat{\kappa}^*) \leq \xi < 1/2 - \hat{t}_f$ および $1/2 - \hat{t}_f \leq \xi \leq 1/2$ の領域が弾塑性 (C) 状態であるから、

$$(-n) = -\frac{2}{n_y} \left[\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \cdot (1 - (-\hat{\varepsilon}_0))} (14. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right.$$

$$\left. + \hat{t}_w \cdot \int_{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \cdot (1 - (-\hat{\varepsilon}_0))}^{\frac{1}{2} - \hat{t}_f} (15. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right.$$

$$\left. + \int_{\frac{1}{2} - \hat{t}_f}^{\frac{1}{2}} (15. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right]$$

$$= (-\hat{\varepsilon}_0) - (1 - e_t) \cdot ((-\hat{\varepsilon}_0) + \hat{\kappa}^* - 1)$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot \left[\left(\frac{1}{2} \cdot \hat{t}_w + 2 \cdot (1 - \hat{t}_w) \cdot \hat{t}_f \right) \cdot \hat{\kappa}^* \right. \\ &\left. - \frac{1}{2} \cdot \hat{t}_w \cdot (1 - (-\hat{\varepsilon}_0))^2 \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \right] \dots (20. a) \end{aligned}$$

上式を $(-\hat{\varepsilon}_0)$ について解くと、

$$\begin{aligned} (-\hat{\varepsilon}_0) &= 1 + n_y \cdot \frac{e_t}{1 - e_t} \cdot \frac{1}{\hat{t}_w} \cdot \hat{\kappa}^* - \left[2 \cdot n_y \cdot \frac{1}{1 - e_t} \cdot \frac{1}{\hat{t}_w} \right. \\ &\cdot (1 - (-n)) \cdot \hat{\kappa}^* + \left\{ \left(n_y \cdot \frac{e_t}{1 - e_t} \cdot \frac{1}{\hat{t}_w} \right)^2 - 2 \cdot \frac{1}{\hat{t}_w} \right. \\ &\cdot \left(n_y - \frac{1}{2} \cdot \hat{t}_w - 2 \cdot (1 - \hat{t}_w) \cdot \hat{t}_f \right) \cdot \hat{\kappa}^{*2} \left. \right\}^{1/2} \left. \right] \dots (20. b) \end{aligned}$$

また、

$$m^* = (18. c) \text{ 式} \dots (20. c)$$

[状態Ⅲ_{ff}] $1 \leq \hat{\kappa}^* < 1/(1 - 2 \cdot \hat{t}_f)$ で $0 \leq (-\hat{\varepsilon}_0) < 1 - (1 - 2 \cdot \hat{t}_f) \cdot \hat{\kappa}^*$ の場合であり、 $0 \leq \xi < 1/2 - \hat{t}_f$ および $1/2 - \hat{t}_f \leq \xi < (1 - (-\hat{\varepsilon}_0))/(2 \cdot \hat{\kappa}^*)$ の領域が弾性状態、 $(1 - (-\hat{\varepsilon}_0))/(2 \cdot \hat{\kappa}^*) \leq \xi < 1/(2 \cdot \hat{\kappa}^*)$ の領域が弾塑性 (C) 状態、 $1/(2 \cdot \hat{\kappa}^*) \leq \xi \leq 1/2$ の領域が交番塑性状態であるから、

$$\begin{aligned} (-n) &= -\frac{2}{n_y} \left[\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2} - \hat{t}_f} (14. a) \text{ 式} \cdot d\xi + \int_{\frac{1}{2} - \hat{t}_f}^{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \cdot (1 - (-\hat{\varepsilon}_0))} (14. a) \text{ 式} \cdot d\xi + \int_{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \cdot (1 - (-\hat{\varepsilon}_0))}^{\frac{1}{2} - \hat{t}_f} (15. a) \text{ 式} \cdot d\xi + \int_{\frac{1}{2} - \hat{t}_f}^{\frac{1}{2}} (17. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right] \\ &= (-\hat{\varepsilon}_0) - \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot [(-\hat{\varepsilon}_0) \\ &- \left(1 - \frac{1}{2} \cdot (-\hat{\varepsilon}_0) \right) \cdot (-\hat{\varepsilon}_0) \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*}] \dots (21. a) \end{aligned}$$

上式を $(-\hat{\varepsilon}_0)$ について解くと、

$$(-\hat{\varepsilon}_0) = 1 - \left(1 - n_y \cdot \frac{1}{1 - e_t} \right) \cdot \hat{\kappa}^*$$

$$-\left[1-\left(1-n_y \cdot \frac{1}{1-e_t}\right) \cdot \hat{\kappa}^*\right]^2 \\ -2 \cdot n_y \cdot \frac{1}{1-e_t} \cdot (-n) \cdot \hat{\kappa}^* \Big]^{1/2} \dots\dots\dots (21. b)$$

また,

$$m^* = \frac{2}{m_y} \cdot \left[\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2}-\hat{t}_f} (14. b) \text{ 式} \cdot \xi \cdot d\xi \right. \\ \left. + \int_{\frac{1}{2}-\hat{t}_f}^{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*}} (14. b) \text{ 式} \cdot \xi \cdot d\xi \right. \\ \left. + \int_{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*}}^{\frac{1}{2}} (17. b) \text{ 式} \cdot \xi \cdot d\xi \right] \\ = \hat{\kappa}^* - \frac{1}{m_y} \cdot (1-e_t) \cdot \left(\frac{1}{6} \cdot \hat{\kappa}^* - \frac{1}{4} + \frac{1}{12} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^{*2}} \right) \\ \dots\dots\dots (21. c)$$

[状態 III_w] $1 \leq \hat{\kappa}^* < 1/(1-2 \cdot \hat{t}_f)$ で $1-(1-2 \cdot \hat{t}_f) \cdot \hat{\kappa}^* \leq (-\hat{\varepsilon}_0) < 1$ の場合であり, $0 \leq \xi < (1-(-\hat{\varepsilon}_0))/(2 \cdot \hat{\kappa}^*)$ の領域が弾性状態, $(1-(-\hat{\varepsilon}_0))/(2 \cdot \hat{\kappa}^*) \leq \xi < 1/2 - \hat{t}_f$ および $1/2 - \hat{t}_f \leq \xi < 1/(2 \cdot \hat{\kappa}^*)$ の領域が弾塑性 (C) 状態, $1/(2 \cdot \hat{\kappa}^*) \leq \xi \leq 1/2$ の領域が交番塑性状態であるから,

$$(-n) = -\frac{2}{n_y} \cdot \left[\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \cdot (1-(-\hat{\varepsilon}_0))} (14. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right. \\ \left. + \hat{t}_w \cdot \int_{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \cdot (1-(-\hat{\varepsilon}_0))}^{\frac{1}{2}-\hat{t}_f} (15. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right. \\ \left. + \int_{\frac{1}{2}-\hat{t}_f}^{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*}} (15. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right. \\ \left. + \int_{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*}}^{\frac{1}{2}} (17. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right] \\ = e_t \cdot (-\hat{\varepsilon}_0) + \frac{1}{n_y} \cdot (1-e_t) \\ \cdot \left[\hat{t}_w \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot (-\hat{\varepsilon}_0) \right) \cdot (-\hat{\varepsilon}_0) \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \cdot (1-\hat{t}_w) \cdot \left| 1 - (1-2 \cdot \hat{t}_f) \cdot \hat{\kappa}^* \right|^2 \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \right] \\ \dots\dots\dots (22. a)$$

上式を $(-\hat{\varepsilon}_0)$ について解くと,

$$(-\hat{\varepsilon}_0) = 1 + n_y \cdot \frac{1}{1-e_t} \cdot \frac{1}{\hat{t}_w} \cdot \hat{\kappa}^* - \left[\left(n_y \cdot \frac{1}{1-e_t} \cdot \frac{1}{\hat{t}_w} \right)^2 \right. \\ \cdot \hat{\kappa}^{*2} + 2 \cdot n_y \cdot \frac{1}{1-e_t} \cdot \frac{1}{\hat{t}_w} \cdot (1-(-n)) \cdot \hat{\kappa}^* \\ - 2 \cdot \frac{1}{\hat{t}_w} \cdot \left\{ \left(n_y - \frac{1}{2} \cdot \hat{t}_w - 2 \cdot (1-\hat{t}_w) \cdot \hat{t}_f \right) \cdot \hat{\kappa}^{*2} \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{2} \cdot (\hat{\kappa}^* - 1)^2 \right\} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (22. b)$$

また,

$$m^* = (21. c) \dots\dots\dots (22. c)$$

[状態 III_{ww}] $1/(1-2 \cdot \hat{t}_f) \leq \hat{\kappa}^*$ で $0 \leq (-\hat{\varepsilon}_0) < 1$ の場合であり, $0 \leq \xi < (1-(-\hat{\varepsilon}_0))/(2 \cdot \hat{\kappa}^*)$ の領域が弾性状態, $(1-(-\hat{\varepsilon}_0))/(2 \cdot \hat{\kappa}^*) \leq \xi < 1/(2 \cdot \hat{\kappa}^*)$ の領域が弾塑性 (C) 状態, $1/(2 \cdot \hat{\kappa}^*) \leq \xi < 1/2 - \hat{t}_f$ および $1/2 - \hat{t}_f \leq \xi \leq 1/2$ の領域が交番塑性状態であるから,

$$(-n) = -\frac{2}{n_y} \cdot \left[\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \cdot (1-(-\hat{\varepsilon}_0))} (14. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right. \\ \left. + \hat{t}_w \cdot \int_{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \cdot (1-(-\hat{\varepsilon}_0))}^{\frac{1}{2}-\hat{t}_f} (15. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right. \\ \left. + \hat{t}_w \cdot \int_{\frac{1}{2}-\hat{t}_f}^{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*}} (17. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right. \\ \left. + \int_{\frac{1}{2}-\hat{t}_f}^{\frac{1}{2}} (17. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right] \\ = e_t \cdot (-\hat{\varepsilon}_0) + \frac{1}{n_y} \cdot (1-e_t) \\ \cdot \hat{t}_w \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot (-\hat{\varepsilon}_0) \right) \cdot (-\hat{\varepsilon}_0) \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \dots\dots\dots (23. a)$$

上式を $(-\hat{\varepsilon}_0)$ について解くと,

$$(-\hat{\varepsilon}_0) = 1 + n_y \cdot \frac{e_t}{1-e_t} \cdot \frac{1}{\hat{t}_w} \cdot \hat{\kappa}^* \\ - \left[\left(1 + n_y \cdot \frac{e_t}{1-e_t} \cdot \frac{1}{\hat{t}_w} \cdot \hat{\kappa}^* \right)^2 \right. \\ \left. - 2 \cdot n_y \cdot \frac{1}{1-e_t} \cdot \frac{1}{\hat{t}_w} \cdot (-n) \cdot \hat{\kappa}^* \right]^{1/2} \dots\dots\dots (23. b)$$

また,

$$m^* = \frac{2}{m_y} \cdot \left[\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*}} (14. b) \text{ 式} \cdot \xi \cdot d\xi \right. \\ \left. + \hat{t}_w \cdot \int_{\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*}}^{\frac{1}{2}-\hat{t}_f} (17. b) \text{ 式} \cdot \xi \cdot d\xi \right. \\ \left. + \int_{\frac{1}{2}-\hat{t}_f}^{\frac{1}{2}} (17. b) \text{ 式} \cdot \xi \cdot d\xi \right] \\ = \hat{\kappa}^* - \frac{1}{m_y} \cdot (1-e_t) \cdot \left(m_y \cdot \hat{\kappa}^* + m_0 - \frac{1}{12} \cdot \hat{t}_w \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^{*2}} \right) \\ \dots\dots\dots (23. c)$$

ここに, m_0 は, (2. c) 式で定義される量である。

[状態 IV] $0 \leq \hat{\kappa}^* < 1$ で $1 \leq (-\hat{\varepsilon}_0)$ の場合であり, 断面全体が弾塑性 (C) 状態であるから

$$(-n) = -\frac{2}{n_y} \cdot \left[\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2}-\hat{t}_f} (15. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right. \\ \left. + \int_{\frac{1}{2}-\hat{t}_f}^{\frac{1}{2}} (15. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right] \\ = (1-e_t) + e_t \cdot (-\hat{\varepsilon}_0) - (1-e_t) \cdot \left[1 - \frac{1}{n_y} \right. \\ \left. \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \hat{t}_w + 2 \cdot (1-\hat{t}_w) \cdot \hat{t}_f \right\} \cdot \hat{\kappa}^* \right] \dots\dots\dots (24. a)$$

上式を $(-\hat{\varepsilon}_0)$ について解くと,

$$(-\hat{\varepsilon}_0) = \frac{1}{e_t} \cdot \left[(-n) - (1-e_t) + (1-e_t) \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{n_y} \right. \right. \\ \left. \left. \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \hat{t}_w + 2 \cdot (1-\hat{t}_w) \cdot \hat{t}_f \right) \cdot \hat{\kappa}^* \right\} \right] \dots\dots\dots (24. b)$$

また,

$$m^* = (18. c) \text{ 式} \dots\dots\dots (24. c)$$

[状態 V_f] $1 \leq \hat{\kappa}^* < 1/(1-2 \cdot \hat{t}_f)$ で $1 \leq (-\hat{\varepsilon}_0)$ の場合であり, $0 \leq \xi < 1/2 - \hat{t}_f$ および $1/2 - \hat{t}_f \leq \xi < 1/(2 \cdot \hat{\kappa}^*)$ の領域が弾塑性 (C) 状態, $1/(2 \cdot \hat{\kappa}^*) \leq \xi \leq 1$ の領域が交番塑

性状態であるから、

$$\begin{aligned}
 (-n) = & -\frac{2}{n_y} \left[\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2}-\hat{t}_f} (15. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right. \\
 & + \int_{\frac{1}{2}-\hat{t}_f}^{\frac{1}{2}-\frac{1}{\hat{\kappa}^*}} (15. a) \text{ 式} \cdot d\xi \\
 & \left. + \int_{\frac{1}{2}-\frac{1}{\hat{\kappa}^*}}^{\frac{1}{2}} (17. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right] \\
 = & e_t \cdot (-\hat{\varepsilon}_0) + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot [\hat{t}_w + (1 - \hat{t}_w) \\
 & \cdot \{1 - (1 - 2 \cdot \hat{t}_f) \cdot \hat{\kappa}^*\}^2] \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \dots \dots \dots (25. a)
 \end{aligned}$$

上式を $(-\hat{\varepsilon}_0)$ について解くと、

$$\begin{aligned}
 (-\hat{\varepsilon}_0) = & \frac{1}{e_t} \cdot \left[(-n) - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot \{\hat{t}_w + (1 - \hat{t}_w) \right. \\
 & \cdot \{1 - (1 - 2 \cdot \hat{t}_f) \cdot \hat{\kappa}^*\}^2\} \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \left. \right] \dots \dots \dots (25. b)
 \end{aligned}$$

また、

$$m^* = (21. c) \text{ 式} \dots \dots \dots (25. c)$$

[状態 V_w]^{註2)} $1/(1 - 2 \cdot \hat{t}_f) \leq \hat{\kappa}^*$ で $1 \leq (-\hat{\varepsilon}_0)$ の場合であり、 $0 \leq \xi < 1/(2 \cdot \hat{\kappa}^*)$ の領域が弾塑性 (C) 状態、 $1/(2 \cdot \hat{\kappa}^*) \leq \xi < 1/2 - \hat{t}_f$ および $1/2 - \hat{t}_f \leq \xi < 1/2$ の領域が交番塑性状態であるから、

$$\begin{aligned}
 (-n) = & -\frac{2}{n_y} \left[\hat{t}_w \cdot \int_0^{\frac{1}{2}-\hat{t}_f} (15. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right. \\
 & + \hat{t}_w \cdot \int_{\frac{1}{2}-\hat{t}_f}^{\frac{1}{2}-\frac{1}{\hat{\kappa}^*}} (17. a) \text{ 式} \cdot d\xi \\
 & \left. + \int_{\frac{1}{2}-\frac{1}{\hat{\kappa}^*}}^{\frac{1}{2}} (17. a) \text{ 式} \cdot d\xi \right] \\
 = & e_t \cdot (-\hat{\varepsilon}_0) + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot \hat{t}_w \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \\
 & \dots \dots \dots (26. a)
 \end{aligned}$$

上式を $(-\hat{\varepsilon}_0)$ について解くと、

$$\begin{aligned}
 (-\hat{\varepsilon}_0) = & \frac{1}{e_t} \cdot \left\{ (-n) - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot \hat{t}_w \cdot \frac{1}{\hat{\kappa}^*} \right\} \\
 & \dots \dots \dots (26. b)
 \end{aligned}$$

また、

$$m^* = (23. c) \dots \dots \dots (26. c)$$

なお、完全弾塑性材の場合には、断面全体が弾塑性 (C) 状態あるいは交番塑性状態となった時、軸ひずみの発散による漸増塑性崩壊が生じるため、[状態 IV] および [状態 V_f]、[状態 V_w] は表れない。

与えられた軸圧縮力、0 から単調に増加する $\hat{\kappa}^*$ について、これらの 9 つの変形状態を適宜組み合わせれば、初期状態から塑性崩壊状態にいたるまでの H 型柱断面の弾塑性挙動を追跡することができる。

4. 軸圧縮力と繰返し変動曲げを受ける H 型柱断面の弾塑性、崩壊挙動

本節では、前節で導いた 9 つの変形状態を組み合わせ

ることにより、一定軸圧下で、正負対称型の繰返し変動曲げを受ける H 型柱断面の弾塑性、崩壊挙動を明らかにする。

ところで、文献 1) で扱った長方形柱断面では、軸力の大きさの相違により、その変形挙動は、3 つの遷移パターンに分けられ、いずれの遷移パターンが出現するかを決定する分岐軸力は、交番塑性限界に達すると同時に $(-\hat{\varepsilon}_0) = 1$ となり、断面全体が弾塑性 (C) 状態となる時の軸力および繰返し変動曲げを受ける以前に、軸力のみで全断面が降伏する降伏軸力であった。この遷移パターン分けは、本報告で扱う H 型柱断面についてもほぼ準用できるが、前節で述べたように、H 型柱断面では、3 つの応力状態の境界がフランジ部分にあるかウェブ部分にあるかを区別する必要がある。そのため、長方形柱断面における 2 つの分岐軸力のほかに、以下に示す 2 つの分岐軸力を考える必要がある。1 つは、フランジとウェブの境目が交番塑性状態に達すると同時に $(-\hat{\varepsilon}_0) = 1$ となり、フランジ全体が交番塑性状態、ウェブ全体が弾塑性 (C) 状態となる時の軸力であり、他の 1 つは、交番塑性限界に達すると同時に、フランジとウェブの境目が弾塑性 (C) 状態となり、フランジ全体が弾塑性 (C) 状態、ウェブ全体が弾性状態となる時の軸力である。

今、交番塑性限界に達すると同時に、断面全体が弾塑性 (C) 状態となる時の降伏軸力で無次元化された軸力の絶対値を n_1 、フランジとウェブの境目が交番塑性状態に達すると同時に、ウェブ全体が弾塑性 (C) 状態となる時の無次元化された軸力の絶対値を n_2 、また、交番塑性限界に達すると同時に、フランジとウェブの境目が弾塑性 (C) 状態となる時の無次元化された軸力の絶対値を n_3 とすると、 $(\hat{\kappa}^* = 1, (-\hat{\varepsilon}_0) = 1)$ 、 $(\hat{\kappa}^* = 1/(1 - 2 \cdot \hat{t}_f), (-\hat{\varepsilon}_0) = 1)$ および $(\hat{\kappa}^* = 1, (-\hat{\varepsilon}_0) = 1 - 2 \cdot \hat{t}_f)$ を、(25. a) 式、(26. a) 式および (22. a) 式に代入することにより、 n_1 、 n_2 および n_3 は、それぞれ、次式のように表される。

$$\begin{aligned}
 n_1 = & \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot \left\{ \frac{1}{2} \cdot \hat{t}_w + 2 \cdot (1 - \hat{t}_w) \cdot \hat{t}_f^2 \right\} + e_t \\
 n_2 = & \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot \hat{t}_w \cdot \left(\frac{1}{2} - \hat{t}_f \right) + e_t \\
 n_3 = & 2 \cdot \frac{1}{n_y} \cdot \hat{t}_f \cdot \{ \hat{t}_w \cdot (1 - 2 \cdot \hat{t}_f) + (1 + e_t) \cdot \hat{t}_f \} \\
 & \dots \dots \dots (27. a-c)
 \end{aligned}$$

なお、上式より、 $(n_2, n_3) \leq n_1$ となることは容易に知れるが、 n_2 と n_3 の間の大小関係は、 $\hat{t}_f$ 、 $\hat{t}_w$ および e_t の値により異なってくる。

さて、弾性状態と弾塑性 (C) 状態の境界あるいは弾塑性 (C) 状態と交番塑性状態の境界は、まず、柱断面の両端辺に発生し、 $\hat{\kappa}^*$ の増大とともに、順次、断面内部へ移動していくことを想起すれば、一定軸圧下で正負

対称型の繰返し変動曲げを受けるH型柱断面の挙動は、これらの n_1 , n_2 , n_3 および無次元化された降伏軸力を分岐軸力として、以下に示すような5つの遷移パターンに分けられる。

【遷移パターンⅠ】 $0 \leq (-n) < \text{Min}(n_2, n_3)$ の場合^{註3)}

ここに、 $\text{Min}()$ および後出の $\text{Max}()$ は、それぞれ、かっこの中の値の最小値および最大値の意である。

【遷移パターンⅡ】 $\text{Min}(n_2, n_3) \leq (-n) < \text{Max}(n_2, n_3)$ の場合であり、 n_2 と n_3 の大小関係により、次の2つのケースに分けられる。

○ $n_3 \leq n_2$ の場合

○ $n_2 < n_3$ の場合

なお、以後、【遷移パターンⅡ】の内、 $n_3 \leq n_2$ の場合を【遷移パターンⅡ₁】、一方、 $n_2 < n_3$ の場合を【遷移パターンⅡ₂】と呼ぶことにする。

【遷移パターンⅢ】 $\text{Max}(n_2, n_3) \leq (-n) < n_1$ の場合

【遷移パターンⅣ】 $n_1 \leq (-n) < 1$ の場合

【遷移パターンⅤ】 $1 \leq (-n)$ の場合

ここに、 $\hat{\kappa}^*|_{(\alpha)}^{(\beta)}$ は、[状態(α)] から [状態(β)] への状態変化が生じる時の $\hat{\kappa}^*$ の値であり、それぞれ、次のように与えられる^{註4)}。

$$\hat{\kappa}^*|_{ff}^{ff} = \frac{1 - (-n)}{(1 - 2 \cdot \hat{t}_f) + 2 \cdot \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot \hat{t}_f^2}$$

$$\hat{\kappa}^*|_{ff}^{ff} = \frac{1}{1 - e_t} \cdot \frac{1 - (-n)}{1 - \frac{1}{n_y} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \hat{t}_w + (1 - \hat{t}_w) \cdot \hat{t}_f^2 \right)}$$

$$\hat{\kappa}^*|_{ff}^{ff} = \frac{1}{1 - 2 \cdot \hat{t}_f} \cdot \frac{1}{2 \cdot n_y - (1 - e_t) \cdot (1 + 2 \cdot \hat{t}_f)} \cdot \langle -(1 - e_t) - n_y \cdot (1 - (-n)) + [(1 - e_t) - n_y \cdot (1 - (-n))]^2 - (1 - e_t) \cdot (1 - 2 \cdot \hat{t}_f) \cdot [(1 - e_t) \cdot (1 - 2 \cdot \hat{t}_f) - 2 \cdot n_y]^{1/2} \rangle$$

$$\hat{\kappa}^*|_{ff}^{ff} = \hat{\kappa}^*|_{ff}^{ff} = \frac{1}{1 - 2 \cdot \hat{t}_f}$$

$$\hat{\kappa}^*|_{ff}^{ff} = \frac{1}{1 - e_t} \cdot \frac{1}{1 - 4 \cdot m_0} \cdot \langle (1 - e_t) - n_y \cdot (1 - (-n)) - [(1 - e_t) - n_y \cdot (1 - (-n))]^2 - (1 - e_t)^2 \cdot (1 - 4 \cdot m_0) \rangle^{1/2}$$

$$\hat{\kappa}^*|_{ff}^{ff} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n_y} \cdot \frac{1 - e_t}{(-n) - e_t} \cdot \hat{t}_w \dots \dots \dots (28. a-f)$$

また、よく知られているように、弾性限界および交番塑性限界における $\hat{\kappa}^*$ の値は、それぞれ、

$$\hat{\kappa}^* = 1 - (-n) : \text{弾性限界}, \hat{\kappa}^* = 1 : \text{交番塑性限界} \dots \dots \dots (29. a, b)$$

である。

なお、完全弾塑性材については、【遷移パターンⅠ】から【遷移パターンⅣ】のいずれの遷移パターンについても、 $(-\hat{\epsilon}_0) = 1$ となった時点で、軸ひずみの発散による漸増塑性崩壊が生じる。また、 $1 \leq (-n)$ の場合については、繰返し曲げを受ける以前に、軸力のみで即時塑性崩壊状態となるから、【遷移パターンⅤ】は表れない。

無次元化されたフランジ厚： $\hat{t}_f$ およびウェブ厚： $\hat{t}_w$ を、共に、0.05 としたH型柱断面についての結果を、比較対象のため、脚注5) に示した理想サンドイッチ柱断面および文献1) に示した長方形柱断面についての結果とともに、Fig. 3 から Fig. 6 に示す。

Fig. 3 は、降伏後の接線係数を0とした完全弾塑性材について、 $(-n)$ の値を0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 および0.8 と変化させた時の $\hat{\kappa}^*$ と無次元化された軸ひずみ： $(-\hat{\epsilon}_0)$ との関係を示したものであり、 $\hat{\kappa}^*$ と無次元化さ

Fig. 3 $\hat{\kappa}^* - (-\hat{\varepsilon}_0)$ Relations in Ideal Elasto-Plastic Beam-Column

Fig. 4 $\hat{\kappa}^* - m^*$ Relations in Ideal Elasto-Plastic Beam-Column

れた抵抗モーメント： m^* との関係は，Fig. 4に与えている。一方，Fig. 5(a-d)およびFig. 6は， $(-n)$ が0.1, 0.2, 0.4および0.8の場合について，無次元化された降伏後の接線係数： e_t を1/1000, 1/500, 1/200, 1/100, 1/50と変化させた時のひずみ硬化材についての結果であり，Fig. 5(a, b)には，比較的変形の小さい段階での $\hat{\kappa}^*$ と無次元化された軸ひずみとの関係を，また，Fig. 5(c, d)には， $e_t=1/200$ および1/50の場合について，変形の非常に大きい段階までの $\hat{\kappa}^* - (-\hat{\varepsilon}_0)$ 関係を示している。さらに，Fig. 6には， $\hat{\kappa}^*$ と m^* との関係を示している。なお，このH型柱断面は， $(-n)=0.05$ の場合は【遷移パターンⅠ】で， $(-n)=0.1$ および0.2の場合には，それぞれ，【遷移パターンⅡ，】および【遷移パター

Fig. 5(a) $\hat{\kappa}^* - (-\hat{\varepsilon}_0)$ Relations in Strain-Hardening Beam-Column

Fig. 5(b) $\hat{\kappa}^* - (-\hat{\varepsilon}_0)$ Relations in Strain-Hardening Beam-Column

ンⅢ】で，また， $(-n)=0.4, 0.6, 0.8$ の場合は，すべて，【遷移パターンⅣ】で，変形が進行する。

完全弾塑性材の場合， $(-n)$ の値が0.05および0.1の場合には，弾性限界に達した付近から軸ひずみが急増し，その後， $\hat{\kappa}^* = 1/(1 - 2 \cdot \hat{t}_f) \cong 1.11$ 付近で，一旦 hardening が生じ，安定化の方向に推移するが，軸ひずみが1に近くなるにつれて再び softening に転じ， $(-\hat{\varepsilon}_0)=1$ となった時点で，漸増塑性崩壊が生じる。一方，軸力が大きい場合には，このような hardening の現象は生じず，軸ひずみは，弾性限界に達した直後から， $\hat{\kappa}^*$ の増大とともに急激に増加し続け，そのまま漸増塑性崩壊となる。また，漸増塑性崩壊時の $\hat{\kappa}^*$ の値も，軸力が大きくなるにつれて，大幅に低下してくる。こうした軸力が大きい

Fig. 5(c) $\hat{\kappa}^* - (-\hat{\epsilon}_0)$ Relations in Strain-Hardening Beam-Column ($e_t = 1/200$)

Fig. 5(d) $\hat{\kappa}^* - (-\hat{\epsilon}_0)$ Relations in Strain-Hardening Beam-Column ($e_t = 1/50$)

Fig. 6 $\hat{\kappa}^* - m^*$ Relations in Strain-Hardening Beam-Column

場合には、弾性限界に達した後、軸ひずみは急激に増加し続け、漸増塑性崩壊に至るという現象は、長方形柱断面にも見られるが、H型柱断面では、無次元化されたフランジ厚に対するウェブ厚の比： $(\hat{t}_w/\hat{t}_f)$ が小さいほど、より顕著に表れ、ウェブ部分の寄与を無視し、フランジ

部分を一点に集約した理想サンドイッチ柱断面については、 $(-n)$ の値のいかんにかかわらず、弾性限界に達した後、直ちに、漸増塑性崩壊状態となる。

ひずみ硬化材の場合には、 $(-\hat{\epsilon}_0) = 1$ となっても、ひずみ硬化の影響で、軸ひずみの発散は生じないが、弾性限界から $(-\hat{\epsilon}_0) = 1$ の状態に至るまでの挙動は、完全弾塑性材の場合とほぼ同様であり、完全弾塑性材に対する漸増塑性崩壊限界付近では、軸ひずみは、かなり急激に増加する。その後、ひずみ硬化の影響が表れ、安定した $\hat{\kappa}^* - (-\hat{\epsilon}_0)$ 関係を示し、 $(-\hat{\epsilon}_0)$ の値が $(-n)/e_t$ に近くなるにつれて hardening が生じ、 $\hat{\kappa}^* \rightarrow \infty$ とした時の無次元化された軸ひずみの値は、 $(-n)/e_t$ に漸近していくが、顕著な hardening の現象が表れるのは、大きな軸ひずみが生じて後であり、それに至るまでの勾配も、長方形柱断面に比べ、はるかに小さい。特に、先に述べた理想サンドイッチ柱断面では、弾性限界から無次元化された極限の軸ひずみである $(-n)/e_t$ に達するまで $e_t/(1-e_t)$ という非常に小さい勾配で推移し、また、hardening 現象も、全く生じない。

一方、 $\hat{\kappa}^* - m^*$ 関係は、文献1)で指摘したように、軸力0の単調載荷の場合の曲率-曲げモーメント関係と同じであり、見かけ上、軸力の影響は全く受けないが、Fig. 4 から知れるように、軸ひずみの発散による漸増塑性崩壊限界時の抵抗モーメントの値は、軸力の増大とともに、大幅に低下してくる。また、図心軸に近い部分の柱幅を小さくした分、降伏モーメントに達して後の抵抗モーメントの増加も、長方形柱断面に比べ、小さくなる。

5. 漸増塑性崩壊限界について

一定軸力の下で正負対称型の繰返し変動曲げを受ける鋼柱では、 $\hat{\kappa}^*$ の増大と共に、軸ひずみ： $(-\hat{\epsilon}_0)$ が単調に増加し続け、軸力の値のいかんによっては、非常に危険な状態となる。本節では、前節に示した結果を基に、H型柱断面の軸ひずみを許容限界内に納めるための $\hat{\kappa}^*$ の限界値を明らかにする。

文献1)と同様、降伏ひずみで無次元化された許容の限界軸ひずみの絶対値を $\hat{\epsilon}_0^*$ と表し、簡単化と実用上の観点から、

$$\hat{\epsilon}_0^* \geq 1 \quad (30)$$

とする。

さて、許容の限界軸ひずみを (30) 式としているから、3節に示した9つの変形状態の内、 $(-\hat{\epsilon}_0) \geq 1$ である [状態IV], [状態V] あるいは [状態V_w] のいずれかの変形状態でH型柱断面は許容限界の軸ひずみに達する。いずれの状態でも許容限界の軸ひずみに達するかは、軸力の大きさにより定まる。

今、 $\hat{\kappa}^* = 1$ および $(-\hat{\epsilon}_0) = \hat{\epsilon}_0^*$ を式 (24. a), あるいは式 (25. a) に、また、 $\hat{\kappa}^* = 1/(1 - 2 \cdot \hat{t}_f)$ および $(-\hat{\epsilon}_0) =$

$\hat{\varepsilon}_0^*$ を式 (25. a), あるいは式 (26. a) に代入し, その時の無次元化された軸力の絶対値: (n_1^*, n_2^*) を求めると,

$$\left. \begin{aligned} n_1 + e_t \cdot (\hat{\varepsilon}_0^* - 1) &\equiv n_1^* \\ n_2 + e_t \cdot (\hat{\varepsilon}_0^* - 1) &\equiv n_2^* \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (31. a, b)$$

となる。ここに, n_1 および n_2 は, それぞれ, (27. a, b) 式で与えられる, 交番塑性限界に達すると同時に $(-\hat{\varepsilon}_0) = 1$ となる場合の無次元化された軸力の絶対値およびフランジとウェブの境目が交番塑性状態に達すると同時に $(-\hat{\varepsilon}_0) = 1$ となる場合の無次元化された軸力の絶対値である。 n_1^* は, 許容の限界軸ひずみに達すると同時に [状態Ⅳ] から [状態Ⅴ_J] の状態変化が, また, n_2^* は, 同じく, 許容の限界軸ひずみに達すると同時に [状態Ⅴ_J] から [状態Ⅴ_w] の状態変化が生じる時の無次元化された軸力の絶対値であるから, $(-n)$ が n_2^* よりも小さい場合には, [状態Ⅴ_w] で, $n_2^* < (-n) \leq n_1^*$ の場合には, [状態Ⅴ_J] で, また, $(-n)$ が n_1^* よりも大きい場合には, [状態Ⅳ] で, 許容の限界軸ひずみに達する。許容の限界軸ひずみに達した時の $\hat{\kappa}^*$ の値は, (24. b) 式, (25. b) 式および (26. b) 式の左辺の $(-\hat{\varepsilon}_0)$ を $\hat{\varepsilon}_0^*$ に置き換え, これらの諸式を $\hat{\kappa}^*$ について解けば求められる。なお, 文献1) で明らかにしたように, $\hat{\kappa}^*$ を無限大とした時の軸ひずみの極限値は, $(-\hat{\varepsilon}_0) = (-n)/e_t$ となるから, $(-n)/e_t \leq \hat{\varepsilon}_0^*$, すなわち, $(-n) \leq e_t \cdot \hat{\varepsilon}_0^*$ の場合には, $\hat{\kappa}^*$ の限界値は無限大となる。また, $(-n) > 1 + e_t \cdot (\hat{\varepsilon}_0^* - 1)$ の場合には, 繰返し曲げを受ける以前に, 軸力のみで許容の限界軸ひずみに達しているため, 不能となる。

以上の結果を整理すると, $\hat{\kappa}^*$ の限界値は, 次式のように表される。

$0 \leq (-n) \leq e_t \cdot \hat{\varepsilon}_0^*$ の場合

$$\hat{\kappa}^* = \infty \dots\dots\dots (32. a)$$

$e_t \cdot \hat{\varepsilon}_0^* < (-n) \leq n_2^*$ の場合

$$\hat{\kappa}^* = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot \frac{\hat{t}_w}{(-n) - e_t \cdot \hat{\varepsilon}_0^*} \dots\dots\dots (32. b)$$

$n_2^* \leq (-n) \leq n_1^*$ の場合

$$\begin{aligned} \hat{\kappa}^* &= n_y \cdot \frac{1}{1 - e_t} \cdot \frac{1}{1 - 4 \cdot m_0} \cdot \left\langle ((-n) - e_t \cdot \hat{\varepsilon}_0^*) \right. \\ &\quad + \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot (1 - n_y) - \left[((-n) - e_t \cdot \hat{\varepsilon}_0^*) \right. \\ &\quad + \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \cdot (1 - n_y)^2 - \frac{1}{n_y} \cdot (1 - e_t) \\ &\quad \left. \left. \cdot (1 - 4 \cdot m_0) \right]^{1/2} \right\rangle \dots\dots\dots (32. c) \end{aligned}$$

$n_1^* \leq (-n) \leq 1 + e_t \cdot (\hat{\varepsilon}_0^* - 1)$ の場合

$$\hat{\kappa}^* = \frac{1}{1 - e_t} \cdot \frac{1 - (-n) + e_t \cdot (\hat{\varepsilon}_0^* - 1)}{1 - \frac{1}{n_y} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \hat{t}_w + 2 \cdot (1 - \hat{t}_w) \cdot \hat{t}_f^2 \right]} \dots\dots\dots (32. d)$$

$1 + e_t \cdot (\hat{\varepsilon}_0^* - 1) < (-n)$ の場合

$$\text{不 能} \dots\dots\dots (32. e)$$

Fig. 7(a) Incremental Collapse Limits of Ideal Elasto-Plastic Beam-Column

Fig. 7(b) Incremental Collapse Limits of Ideal Elasto-Plastic Beam-Column

なお, 完全弾塑性材の場合には, 許容の限界ひずみに達する以前の $(-\hat{\varepsilon}_0) = 1$ となった時点で, 軸ひずみの発散が生じ, 漸増塑性崩壊状態となるが, 無次元化された降伏後の接線係数である e_t を 0 とし, (32. d) 式の成立範囲を表す式中の 2 番目の等不等号を不等号に, また, 同じく, (32. e) 式の成立範囲を表す式中の不等号を等不等号に変更すれば, (31. a, b) 式および (32. a-e) 式で与えられる $\hat{\kappa}^*$ の限界値は, そのままの形で用いることができる。

無次元化されたフランジ厚: $\hat{t}_f$ を 0.05 の一定とし, 無次元化されたウェブ厚: $\hat{t}_w$ の値を 0.05, 0.025, 0.0125, 0.0 と変化させた場合および $\hat{t}_f, \hat{t}_w$ を, 共に, 0.05, 0.025, 0.0125 とした場合の完全弾塑性材に対する漸増塑性崩壊限界を, 長方形柱断面についての結果¹⁾

Fig. 8(a) Incremental Collapse Limits of Strain-Hardening Beam-Column ($e_t=1/200$)

Fig. 8(b) Incremental Collapse Limits of Strain-Hardening Beam-Column ($e_t=1/50$)

とともに、Fig. 7(a, b) に示す。また、Fig. 8(a, b) には、無次元化された降伏後の接線係数： e_t が 1/200 および 1/50 の場合について、許容の限界軸ひずみ： $\hat{\epsilon}_0^*$ を、1.0, 2.0, 5.0 および 10.0 とした時の $\hat{t}_f = \hat{t}_w = 0.05$ の H 型柱断面についての漸増塑性崩壊限界を、理想サンドイッチ柱断面および長方形柱断面についての結果^(注5), 1)とともに、示している。

これらの結果より、H 型柱断面における $\hat{\kappa}^*$ の限界値は、長方形柱断面に比べはるかに小さく、特に、 $(-n)$ の値が (27. a) 式で与えられる n_1 よりも大きい場合には、降伏曲率以下の繰返し曲げを受けた場合にも巨大な軸ひずみが生じ、柱断面は非常に危険な状態となること、無次元化されたフランジ厚に対するウェブ厚の比を小さく

くするほど、 $\hat{\kappa}^*$ の限界値は低下して、柱断面はより危険な状態となり、特に、 $\hat{t}_w=0$, $\hat{t}_f \rightarrow +0$ とした理想サンドイッチ柱断面については、弾性限界が完全弾塑性材に対する漸増塑性崩壊限界となること、一方、この比が同じであれば、フランジ厚、ウェブ厚を変化させても、 $\hat{\kappa}^*$ の限界値に及ぼす影響は小さいこと、ひずみ硬化の影響は、 e_t の値が 1/50 とかなり大きい場合には多少期待できるが、標準的な 1/200 の場合については、ひずみ硬化の影響が表れるのは、大きな軸ひずみが生じた後であり、降伏ひずみの数倍程度では、その効果は小さいこと、等

6. 結 び

本報告では、文献 1) に示した手法をより一般的に用いられている H 型柱断面に適用し、一定軸圧の下で正負対称型の変動領域を有する強軸回りの繰返し変動曲げを受ける H 型柱断面の弾塑性、崩壊挙動を、数値解析によらず、陽な形で明らかにした。また、この結果を基に、軸ひずみを許容限界内に納めるための $\hat{\kappa}^*$ の限界値を示した。得られた結論は、以下のように要約できる。

- 1) 一定軸圧の下で強軸回りの繰返し変動曲げを受ける場合、H 型柱断面は、文献 1) に示した長方形柱断面に比べても、はるかに危険な状態となり、無次元化された軸力： $(-n)$ が (27. a) 式で与えられる n_1 よりも大きい場合には、降伏曲率以下の繰返し曲げを受けた場合にも、巨大な軸ひずみが生じる。
- 2) 無次元化されたフランジ厚： $\hat{t}_f$ に対するウェブ厚： $\hat{t}_w$ の比が小さいほど、H 型柱断面はより危険な状態となり、特に、 $\hat{t}_w=0$, $\hat{t}_f \rightarrow +0$ とした理想サンドイッチ柱断面については、弾性限界が完全弾塑性材に対する漸増塑性崩壊限界となる。
- 3) $\hat{\kappa}^* - (-\hat{\epsilon}_0)$ 関係に及ぼすひずみ硬化の影響は、長方形柱断面の場合と同様、無次元化された降伏後の接線係数： e_t が大きいほど強く、また、無次元化された軸力が小さいほど軸ひずみが小さい段階で表れるが、通常の鋼構造用鋼材に見られる $e_t=1/200$ 程度の場合、無次元化された軸ひずみ： $(-\hat{\epsilon}_0)$ の値は、 $\hat{\kappa}^*$ の増大とともに、極限值である $(-n)/e_t$ に急速に漸近するため、降伏ひずみの数倍程度の範囲内では、 $(-n)$ が非常に小さい場合を除いて、その効果はほとんど期待できない。
- 4) $\hat{\kappa}^* - m^*$ 関係は、見かけ上、軸力の影響を全く受けないが、軸ひずみの発散による漸増塑性崩壊時の抵抗モーメントの値は、 $(-n)$ の値が大きいほど、また、無次元化されたフランジ厚に対するウェブ厚比が小さいほど、低下してくる。

注

1) (19. a) 式を $(-\hat{\epsilon}_0)$ について解くと、

$$(-\hat{\varepsilon}_0)=1-\left(1-n_y \cdot \frac{1}{1-e_t}\right) \cdot \hat{x}^* \\ \pm \frac{1}{1-e_t} \cdot [2 \cdot n_y \cdot (1-e_t) \cdot (1-(-n)) \cdot \hat{x}^* \\ + n_y \cdot (n_y - 2 \cdot (1-e_t)) \cdot \hat{x}^{*2}]^{1/2}$$

となるが、 $\hat{x}^*=1-(-n)$ の時、 $(-\hat{\varepsilon}_0)=1-(-n)$ とならなければならないことより、右辺第3項の符号はマイナスとなる。なお、 $(-\hat{\varepsilon}_0)$ を求める際のこうした操作は、(20. b) 式—(23. b) 式についても同様である。

- 2) [状態Ⅴ_{ww}]については、逐次計算法による解析結果を基に、既に、五十嵐、松井、吉村らによって議論されており、(26. b, c) 式は、文献2) に与えられている結果と一致する。
- 3) $(-n)=0$ の場合、常に、 $(-\hat{\varepsilon}_0)=0$ となるため、[状態Ⅱ_r]、[状態Ⅲ_{ww}] および [状態Ⅴ_{ww}] は表れず、最終的には、[状態Ⅲ_{ww}] で、変形が進行する。また、[状態Ⅲ_{rr}] および [状態Ⅲ_{ww}] は、弾性状態と交番塑性状態のみが混在し、その境界が、それぞれ、フランジ内およびウェブ内にある状態となるが、本報告では、文献1) と同様、 $(-n)=0$ の場合を、 $(-n) \rightarrow +0$ の極限状態であると考え、【遷移パターンⅠ】に含ませている。
- 4) 例えば、 $\hat{x}^*|_{\text{II}_r}^{\text{III}_{ww}}$ は、 $0 \leq \hat{x}^* < 1$ で、フランジとウェブの境目が弾塑性(C)状態となる時の $\hat{x}^*$ の値であるから、 $(-\hat{\varepsilon}_0)=1-(1-2 \cdot \hat{t}_r) \cdot \hat{x}^*$ を(19. a) 式、あるいは、(20. a) 式に代入、 $\hat{x}^*$ について解けば、(28. a) 式となる。状態変化の生じる他の $\hat{x}^*$ の値についても、同様な操作を行えば、(28. b-f) 式が求まる。
- 5) ウェブ部分の寄与を無視し、フランジ部分を $\xi=\pm 1/2$ に集約して考える理想サンドイッチ柱断面では、 $\xi=\pm 1/2$ における応力状態の変遷にのみ注目すればよく、その $(n, \hat{x}^*)-(\hat{\varepsilon}_0, m^*)$ 関係は、 $(-n)=1$ を分岐軸力として、次式のように、簡潔に表される。

○ $0 \leq (-n) < 1$ の場合

$0 \leq \hat{x}^* < 1-(-n)$ の時(弾性状態)

$$(-\hat{\varepsilon}_0)=(-n), \quad m^*=\hat{x}^* \dots \dots \dots (A1. a, b)$$

$1-(-n) \leq \hat{x}^* < 1$ の時(弾塑性(C)状態)

$$(-\hat{\varepsilon}_0)=\frac{1}{e_t} \cdot [(-n)+(1-e_t) \cdot \hat{x}^*-(1-e_t)]$$

$$m^*=(A1. b) \text{ 式} \dots \dots \dots (A2. a, b)$$

$1 \leq \hat{x}^*$ の時(交番塑性状態)

$$(-\hat{\varepsilon}_0)=\frac{1}{e_t} \cdot (-n), \quad m^*=e_t \cdot \hat{x}^*+(1-e_t)$$

$$\dots \dots \dots (A3. a, b)$$

○ $1 \leq (-n)$ の場合

$0 \leq \hat{x}^* < 1$ の時(弾塑性(C)状態)

$$(-\hat{\varepsilon}_0)=(A2. a) \text{ 式}, \quad m^*=(A1. a) \text{ 式}$$

$$\dots \dots \dots (A4. a, b)$$

$1 \leq \hat{x}^*$ の時(交番塑性状態)

$$(-\hat{\varepsilon}_0)=(A3. a) \text{ 式}, \quad m^*=(A3. b) \text{ 式}$$

$$\dots \dots \dots (A5. a, b)$$

また、漸増塑性崩壊限界は次式となる。

$0 \leq (-n) \leq e_t \cdot \hat{\varepsilon}_0^*$ の時

$$\hat{x}^*=\infty \dots \dots \dots (A6)$$

$e_t \cdot \hat{\varepsilon}_0^* \leq (-n) \leq 1+e_t \cdot (\hat{\varepsilon}_0^*-1)$ の時

$$\hat{x}^*=\frac{1}{1-e_t} \cdot [e_t \cdot \hat{\varepsilon}_0^*-(-n)+(1-e_t)] \dots \dots \dots (A7)$$

$1+e_t \cdot (\hat{\varepsilon}_0^*-1) < (-n)$ の時

$$\text{不 能} \dots \dots \dots (A8)$$

参考文献

- 1) 近藤一夫、王 学鋒、中倉健介、花井正実：繰返し変動曲げを受ける鋼柱の弾塑性・崩壊挙動、日本建築学会構造系論文報告集、第434号、pp.59~74、1992。
- 2) Igarashi, S., Matsui, C., Yoshimura, K. and Matsu-mura, K. : Inelastic Behavior of Structural Steel Sections Under Alternative Loading (Part 1) and (Part 2), Trans. A. I. J., No. 169, pp. 53~62, 1970 and No. 170, pp. 39~50, 1970.

(1992年7月10日原稿受理、1992年11月20日採用決定)