

## 曲げをうける鋼 I 形断面の塑性限界 幅厚比に関する研究

永藤 壽宮\*・羽田政浩\*\*  
(平成 8 年 10 月 31 日受理)

### A Analytic Study Of Plastic Limiting Width-Thickness Ratios Of Steel I-Sections In Bending

Toshimiya NAGATO, Masahiro HANEDA

The definition and classification of cross-sectional strength concerning width-thickness ratio of plate element are required in the development of advanced limit state design code of steel structures.

In this paper the limiting width-thickness ratios for plastic strength of steel I-section in bending are investigated by the analysis of F.E.M. Comparison of the numerical results and current design codes are discussed.

#### 1. はじめに

現在の道路橋示方書を力学条項の拠り所としている『鋼構造物設計指針』<sup>1)</sup>は、鋼構造一般の設計に用いるので、道路橋以外の構造物には安全側に偏ってしまう傾向にありいかに述べる規定については修正を必要としている。

1) 断面構造板要素の幅厚比に関しては、塑性設計限界幅厚比、塑性限界幅厚比及び、降伏限界幅厚比の規定。

2) 部材座屈に関する細長比に対しては、塑性設計限界細長比とそ制限かい細長比の規定ただし塑性限界細長比は、中厚肉断面部材にたいしては、降伏限界細長比とする。

そこで、本研究では、3次元弾性有限変位プログラムを用いた数値解析により現行の許容応力度設計法において強度の基準となっている初期降伏強度から終局強度までの挙動特性を明らかにし、各種の部材が終局強度にたいして、一様な安全性を確保できるように力学条項を整えるとともに必要な板要素の幅厚比の塑性限界について検討することにした。

#### 2. 解析モデルの選定

##### (1) 構造区分<sup>5)</sup>

骨組構造物の構造区分は部材断面の局部座屈に関する幅厚比パラメーターと部材の細長比パラメーターに応じて分けられる。図-1では最も詳細な構造区分を模式的に表している。各区分にたいして適用される構造解析法及び強度照査法をまとめると以下の通りである。

\*環境都市工学科 助教授

\*\*東日本鉄工株式会社

- 領域 1 : 極厚肉断面のストックリーな部材により構成された構造で、塑性解析（塑性設計法）の適用が可能な領域。
- 領域 2 : 厚肉断面のストックリーな部材により構成された構造で、構造解析は弾性解析によるが断面の塑性強度について照査する。
- 領域 3 : 厚肉断面のスレンダーな部材に構成された構造で、安定照査式と塑性断面強度について照査する。構造解析は弾性解析による。
- 領域 4 : 中厚肉断面のストックリーな部材で構成された構造物で、断面強度は降伏強度にとる。構造解析は弾性解析による。
- 領域 5 : 中厚肉断面のスレンダーな部材で構成された構造物で、部材の強度については安定照査式と降伏強度で照査する。構造解析は弾性解析による。
- 領域 6 : 薄肉断面のストックリーな部材で構成された構造物で、局部座屈強度を照査する。構造解析は弾性解析による。
- 領域 7 : 薄肉部材のスレンダーな部材で構成された構造物で、部材座屈と局部座屈の連成強度を照査する。構造解析は弾性強度による。

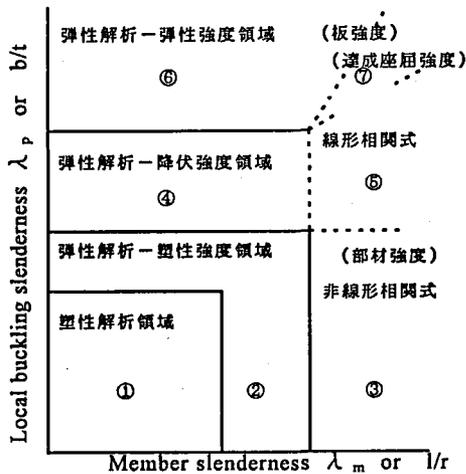


図-1 構造区分

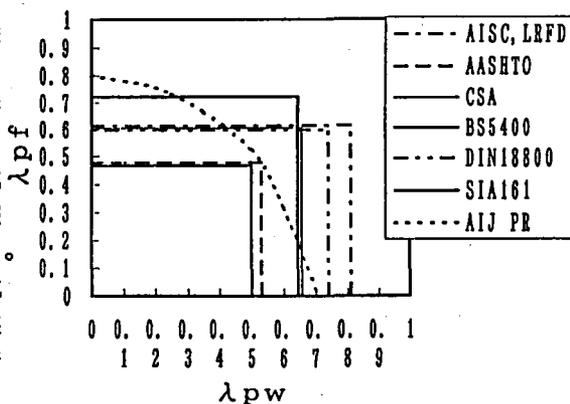


図-2 代用的設計基準の塑性限界

(2) 供試体

断面構成板要素の限界幅厚比として塑性設計限界幅厚比、塑性限界幅厚比及び降伏限界幅厚比の3種類を規定することになる。その際に本研究では板要素間の相互拘束効果を考慮して断面としての限界幅厚比を与えると考えた。まげをうけるI形断面の限界幅厚比は代表的設計基準では、表-1のように与えられている。その基準の塑性限界のフランジの幅厚比パラメータ  $\lambda_{pf}$  ウェブの幅厚比パラメータ  $\lambda_{pw}$  を平面上に描くと図-2のようになる。板要素の個々に限界幅厚比を与えると長方形の領域で断面強度の区分が表せる。

表-1 各国スぺックの限界幅厚比

Specification	Limiting Slenderness Ratio	
	フランジ $\lambda_{fp}$	ウェブ $\lambda_{wp}$
AISC	0.613	0.809
LRFD	0.613	0.809
AIJ PR	*	*
AASHTO	0.476	0.531
CSA	0.603	0.657
BS5400	0.466	0.5
DIN18800	0.597	0.742
SIA161	0.722	0.645

\* interaction formula of F.L.B. and W.L.B.

表-2 供試体寸法と力学パラメータ

Model	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
$\lambda_{pf}$	0.45	0.50	0.50	0.55	0.55	0.60	0.55	0.60	0.60	0.65
$\lambda_{pw}$	0.10	0.10	0.15	0.15	0.20	-0.60	0.25	0.25	0.30	0.30
$t_w$ (cm)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
$b$ (cm)	35.6743	32.2826	39.0120	35.6473	42.3768	39.0120	42.3768	39.0120	45.7415	42.3768
$t_f$ (cm)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
$L$ (cm)	25.2322	25.2322	37.8493	37.8493	50.4644	50.4644	63.0804	63.0804	75.6965	75.6965
$A_w/A_f$	0.7078	0.7016	0.9702	1.0617	1.1908	1.2936	1.4886	1.6189	1.6549	1.7865
$\alpha$	1.4128	1.2794	1.0307	0.9418	0.8397	0.7731	0.6718	0.6184	0.6043	0.5599
$k$	1.1337	1.1384	1.1268	1.1331	1.1278	1.1342	1.1371	1.1445	1.1484	1.1475
NY	58.8886	51.9883	96.7540	89.4706	144.5483	134.8510	188.1091	175.8956	249.2380	234.7674
NP	64.4054	59.1826	152.9540	101.3895	163.0182	152.8540	213.8030	201.4213	284.2275	269.3261
N/NP	0.9965	1.0011	0.6958	1.0018	0.8948	1.0015	0.9939	1.0051	0.8971	1.0033

Model	No. 11	No. 12	No. 13	No. 14	No. 15	No. 16	No. 17	No. 18	No. 19	No. 20
$\lambda_{pf}$	0.65	0.60	0.65	0.60	0.65	0.60	0.55	0.15	0.10	0.60
$\lambda_{pw}$	0.35	0.35	0.40	0.40	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.50
$t_w$ (cm)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
$b$ (cm)	45.7415	42.3768	45.7415	42.3768	45.7415	42.3768	39.0120	12.0942	0.7285	42.3768
$t_f$ (cm)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
$L$ (cm)	88.3126	88.3126	100.9287	100.9287	113.5448	113.5448	113.5448	113.5448	113.5448	126.1609
$A_w/A_f$	1.9397	2.0840	2.2065	2.3817	2.4823	2.6194	2.8105	0.3884	13.0071	2.9771
$\alpha$	0.5179	0.4788	0.4532	0.4199	0.4028	0.3732	0.3438	0.1065	0.0760	0.3359
$k$	1.1584	1.1581	1.1804	1.1685	1.1701	1.1786	1.1881	1.1395	1.1797	1.1803
NY	391.2882	284.3377	358.3641	338.9973	414.4698	382.8844	370.899	186.6158	174.8302	451.3982
NP	348.6084	329.2854	413.5216	393.7889	484.8729	462.8126	440.6523	283.3788	241.2997	536.3886
N/NP	0.9964	1.0047	0.8889	1.0043	0.8979	1.0019	1.0047	1.0113	1.0087	0.9961

Model	No. 21	No. 22	No. 23	No. 24	No. 25	No. 26	No. 27	No. 28	No. 29	No. 30
$\lambda_{pf}$	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
$\lambda_{pw}$	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
$t_w$ (cm)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
$b$ (cm)	39.0120	35.6473	32.2826	28.8178	25.5531	22.1884	18.8237	15.4589	12.0934	0.7295
$t_f$ (cm)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
$L$ (cm)	126.1609	126.1609	126.1609	126.1609	126.1609	126.1609	126.1609	126.1609	126.1609	126.1609
$A_w/A_f$	3.2339	3.5391	3.9880	4.3827	4.8372	5.6859	6.7923	8.1618	10.4315	14.4523
$\alpha$	0.3032	0.2828	0.2559	0.2292	0.2025	0.1759	0.1492	0.1225	0.0959	0.0692
$k$	1.1981	1.2099	1.2214	1.2354	1.2515	1.2702	1.2921	1.3188	1.3494	1.3889
NY	427.194	492.8897	378.7854	354.4813	330.3771	304.1729	281.6887	257.7845	233.5803	208.3581
NP	611.8097	487.2298	462.8488	508.4885	413.4810	388.9010	364.3211	334.7412	319.1813	290.5813
N/NP	0.9986	1.0088	1.0022	1.0034	1.0039	1.0036	1.0031	1.0017	0.9985	0.9923

Model	No. 31	No. 32	No. 33	No. 34	No. 35	No. 36	No. 37
$\lambda_{pf}$	0.5	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
$\lambda_{pw}$	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
$t_w$ (cm)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
$b$ (cm)	35.6473	32.2826	28.8178	25.5531	22.1884	18.8237	15.4589
$t_f$ (cm)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
$L$ (cm)	138.7770	138.7770	138.7770	138.7770	138.7770	138.7770	138.7770
$A_w/A_f$	3.8831	4.2888	4.7880	5.4389	6.2545	7.3725	8.9771
$\alpha$	0.2589	0.2328	0.2084	0.1841	0.1599	0.1356	0.1114
$k$	1.2187	1.2313	1.2455	1.2617	1.2804	1.3021	1.3276
NY	458.9917	433.2883	406.8454	388.8222	369.3988	348.7758	308.1527
NP	508.4857	533.4861	508.4885	478.4878	452.4815	425.4815	388.4883
N/NP	0.9917	0.9922	0.9925	0.9923	0.9914	0.9939	0.9974

フランジ幅厚比パラメータ：

$$\lambda_{f,r} = \frac{b'}{t_f} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_y}{k_f \pi^2 E}}$$

ウェブ幅厚比パラメータ：

$$\lambda_{f,w} = \frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)\sigma_y}{k_w \pi^2 E}}$$

h：ウェブ高，b：フランジ高，b'：フランジ突出幅，tw：ウェブ高，tf：フランジ高，  
 $\sigma_y$ ：降伏応力度，L：垂直補剛材，Aw：ウェブ断面積，Af：フランジ断面積，  
 S：フランジ幅・ウェブ高比，k：形状係数，My：降伏モーメント，Mp：全塑性モーメント

本建築学会の基準のみ楕円状の断面強度区分となっている。

計画したモデルの幅厚比パラメータの範囲は、ほぼ全ての設計基準の塑性限界幅厚比の範囲を包含するように決定した。表-2に供試体の寸法及び力学パラメータを掲げる。表中の記号は以下に示された通りである。また、表中の記号におけるLは道路橋示方書で規定されている横倒れ座屈強度限界の1/2の長さ(L=2.25b)またはウェブ高(L=H)とし断面強度の低いほうを用いた。

### 3. 解析における仮定

#### (1) 材料特性

材料特性はSS41を使用し、表-3に示すデータを用いる。このデータは、種々の材料試験結果をもとに実測値に近いデータを用いた。

#### (2) 応力-ひずみ関係

ひずみ硬化を考慮した3次元有限変位プログラムを用いる際、ひずみ硬化域での応力-ひずみ関係をどの様に考えるかが問題である。本研究では既存の研究を参考にして次式および

表-3 入力材料データ

E	G	$\nu$	$\sigma_y$	B	n	$\epsilon_h$	$\epsilon_t$	$k_f$	$k_w$
2.119E06	8.100E05	0.287	3.141E03	0.488	0.268	0.0211	0.211	0.425	23.9

図-3に示すような指数関数をひずみ硬化域での応力-ひずみ関係に用いた。

弾性域 ( $\epsilon < \epsilon_y$ ) .....  $\sigma/\sigma_y = \epsilon/\epsilon_y$

踊り場 ( $\epsilon_y \leq \epsilon < \epsilon_h$ ) .....  $\sigma/\sigma_y = 1.0$

ひずみ硬化域 ( $\epsilon \geq \epsilon_h$ )

$$\sigma/\sigma_y = B (\epsilon/\epsilon_y)^n$$

ここに、

$\sigma$ ：降伏応力 (kg f/cm<sup>2</sup>)

$\epsilon$ ：降伏ひずみ

$\epsilon_h$ ：ひずみ硬化開始ひずみ

B：ひずみ硬化係数，n：ひずみ硬化指数

#### (3) 初期不整

図-4、図-5に示すように、残留応力および初期たわみの最大値は溶接I形断面の実測

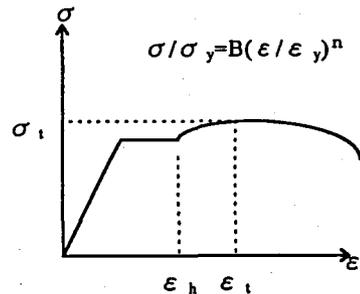


図-3 応力ひずみ関係図



①変位適合条件

$$d=f(x,y) \quad : \text{変位関数} \\ =Fa \quad (1)$$

このプログラムでは、

$$u=a_1+a_2x+a_3y \\ v=a_4+a_5x+a_6y \\ w=a_{11}+a_{12}L_1+a_{13}L_2+a_{14}L_1L_2+a_{15}L_1L_3+a_{16}L_2L_3+a_{17}(L_1L_1^2-L_2L_1^2)+a_{18}(L_2L_3^2-L_3L_2^2)+a_{19}(L_3L_1^2-L_1L_3^2) \\ ds=Fa \quad (2)$$

(1) (2) 式より

$$d=FFds \quad (3)$$

N:形状係数

一方ひずみと変位の関係より

$$\epsilon=Cd \quad \leftarrow \text{Kirchhoff-Love の仮定} \dots \dots \text{平面保持} \quad (4)$$

(3) (4) 式より

$$\epsilon=Bd, \quad \rightarrow \text{有限要素内でひずみは一定分布、即ち一定ひずみ要素} \quad (5)$$

②材料構成則

$$\sigma=D \epsilon \quad (6)$$

・平面応力状態における弾性の剛度マトリックス

$$D_e = E / (1 - \nu^2) \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \nu) / 2 \end{bmatrix}$$

←平面応力問題

板厚が平面の広がりに対して十分小さい場合には、板厚方向の応力ガ面内  
応力に対して無視できる。そこで、面内応力についてのみ考察する。

←等質当方で Hooke の法則を適用

・降伏条件式

Von Mises の降伏条件式

$$F(\sigma)=\sigma_y \quad (8)$$

$$F(\sigma)=\sigma_{eq} = (\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{0.5} \quad (9)$$

・塑性化要素の応力-ひずみ関係

$$d\epsilon = d\epsilon_0 + d\epsilon_p \quad (10)$$

【完全弾塑性体】

図-8 のとおり

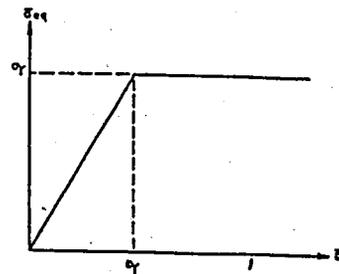
【Prandtl-Reuse の仮定に従う】

$$dE = d\lambda \cdot \partial F / \partial \sigma \quad (11)$$

【Associated flowrule (関数流れ則) に従う】

マトリックス  $D_{ep}$  を求める。(  $\sigma = D_{ep} \epsilon$  )

$$F=G \quad (12) \quad \text{図-8 理想化された相当応力度ひずみ}$$



F: 負荷関数

G: 塑性ポテンシャル関数

以上の仮定から塑性要素の剛度

・ ひずみ反転の判定

d λ にて判定

③力のつり合い条件

・ 直接力のつり合い条件を用いて定式化するもの……直接剛性法

・ 接点力を有限要素に作用する外力とみなして、仮想変位の原理等を用い、変分原理により定式化するもの

面外変形が無い場合の定式化例

(5) 式より

$$\delta \epsilon = B \cdot \delta ds \tag{13}$$

仮想変位の原理より

$$\delta ds(fs + \Delta fs) = \int_V \delta \epsilon (\sigma + \Delta \sigma) dV \tag{14}$$

(5) (6) 式から

$$\Delta \sigma = B \cdot \sigma ds \tag{15}$$

(13) (15) 式を (14) 式に代入し、これが任意の  $\delta ds$  で

$$fs = K_{ss} \Delta ds + \int_A B^T \sigma dA \tag{16}$$

$$\text{ここに } K_{ss} = t \int_A B^T DB dA \tag{17}$$

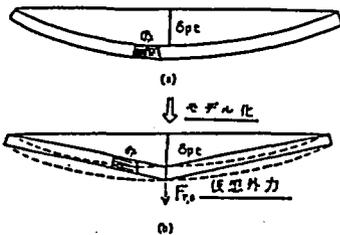


図-9 残留応力の取り扱い

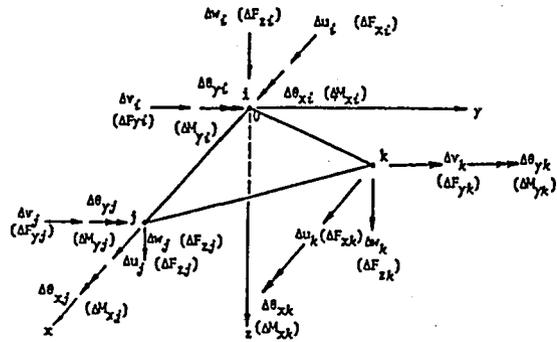


図-10 要素座標系, 接点変位増分及び接点力増分

変位増分ベクトル  $\Delta ds$  が生じる以前においては、今考えている要素がつりあい状態にあるとすると式 (16) において、 $\Delta ds$  および  $\Delta fs$  を 0 とおくと、次式が成立する。

$$fs = t \int_A B^T \sigma dA \tag{18}$$

(18) 式を (16) 式に代入すると、次の関係式が成立する。

$$\Delta fs = K_{ss} \Delta d_1$$

ここに

$$\Delta fs = \{ \Delta F_{11}; \Delta F_{21}; \Delta F_{31}; \Delta F_{12}; \Delta F_{22}; \Delta F_{32} \}$$

$$\Delta ds = \{ \Delta u_1; \Delta v_1; \Delta u_2; \Delta v_2; \Delta u_3; \Delta v_3 \}$$

面外変形を含む場合の定式化も同様にして

$$\Delta f_i = k_i \Delta d_i$$

ここに、

$$\Delta f_i = \{\Delta f_{i1}; \Delta f_{i2}\}$$

$$\Delta d_i = \{\Delta d_{i1}; \Delta d_i\}$$

$$\Delta f_{i1} = \{\Delta F_{i1}; \Delta F_{i2}; \Delta F_{i3}; \Delta F_{i4}; \Delta F_{i5}; \Delta F_{i6}\}$$

$$\Delta d_{i1} = \{\Delta u_i; \Delta v_i; \Delta u_j; \Delta v_j; \Delta u_k; \Delta v_k\}$$

$$\Delta f_{i2} = \{\Delta M_{i1}; \Delta M_{i2}; \Delta M_{i3}; \Delta M_{i4}; \Delta M_{i5}; \Delta M_{i6}; \Delta M_{i7}; \Delta M_{i8}; \Delta M_{i9}\}$$

$$\Delta d_{i2} = \{\Delta \theta_{i1}; \Delta \theta_{i2}; \Delta \theta_{i3}; \Delta \theta_{i4}; \Delta \theta_{i5}; \Delta \theta_{i6}; \Delta \theta_{i7}; \Delta \theta_{i8}; \Delta \theta_{i9}\}$$

④その他

- ・ 残留応力及び初期たわみを同時に有する板の場合には、図-9に示すように仮想外力を接点に加えることによって、初期たわみに変化を与えないようにする。
- ・ 板厚方向への塑性化の広がりやを考慮できるように、図-11に示すように層割し、各層内では応力分布および剛度マトリックスは直線分布であると仮定する。
- ・ 各板要素は初期状態において、xy、yz、あるいはzx平面上のいずれかにある必要がある。その他の平面上に要素がある場合には、少々改良が必要である。
- ・ 非線型方程式の解法においては、本研究では、修正ニュートン・ラフソン法を用いた。また、このプログラムにおける剛性マトリックスとつり合い力の計算過程を抜き出して図-12(a)(b)に示す。このプログラムの解析結果の信頼性については中沢・山口の実験データを実際に計算しており、実測値に近いデータが得られている。

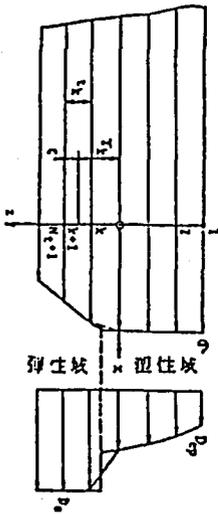
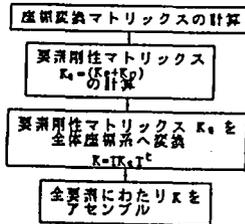


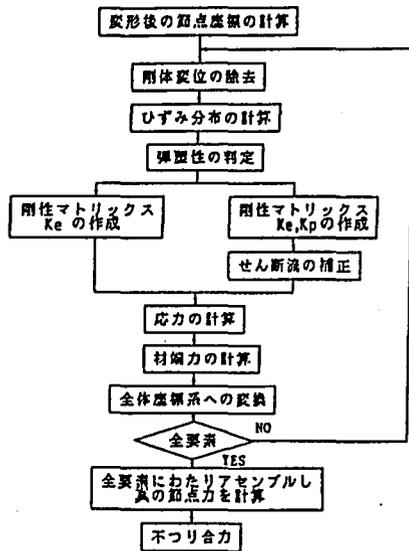
図-11 層割り

剛性マトリックスの計算過程



(a)

つり合い力の計算過程



(b)

図-12 フローチャート

(3) 強制変位量

3次元有限変位プログラムを用いる際に断面が曲げ圧縮を受ける場合の荷重方法を図-13に示す。この時、計算結果がより正確に出力されるように、回転変位を各々の供試体で変化させて行った。

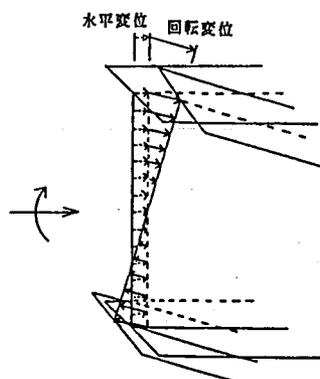


図-13 荷重方法

5. 作用モーメントの増大に伴う各分割要素の塑性域の拡大

ウェブとフランジのそれぞれの無次元幅厚比の相違が、崩壊過程でどのような影響を与えるかを、ウェブとフランジの相対的な幅厚比が大きく異なる2つの数値モデル ( $\lambda_{pf}=0.5, \lambda_{pw}=0.1$ ) ( $\lambda_{pf}=0.1, \lambda_{pw}=0.5$ ) を用いて考察してみる。(図-14,15)

前に述べた通り、各要素は板厚方向に5分割されているので、1つの要素において全てが塑性域に達すれば ■ 1つでも弾性域があれば ■ で示す。

これらの図を見ても明らかのように、どちらの場合においても荷重荷重のステップが進むにつれ塑性域がフランジ部分を最初に次第に拡大していくことが観察できる。

次に、図-14と図-15の(a)すなわち、同じ荷重荷重の Step 6 について比較してみる。さてこの図-15(a)の数値計算モデルにおいては、ウェブに比較しフランジの方が無次元幅厚比が大きくなっているが、これはフランジの曲げ剛性の効果が図-14の場合に比べ大きいということであり、図-14においてウェブが受け持っている力をフランジが負担しておりこの事はウェブの弾性域の範囲が広く取れているということにつながっている。

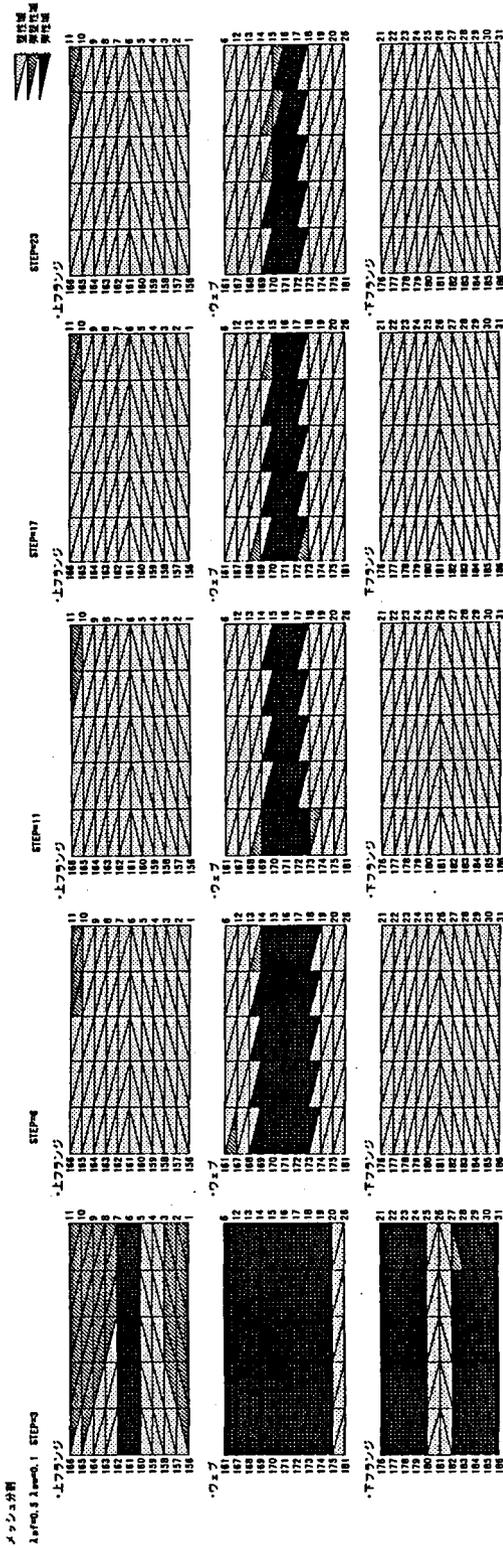
またこの弾性域が広いということや、それに加えて Step6 の段階で上フランジの結合部に弾性域がまだ残っているということから、当然のことであるが、フランジとウェブの幅厚比においてはフランジの幅厚比が低い(すなわちフランジの幅厚が厚い)ほど、ウェブとの相互拘束効果によりウェブの剛性低下を遅らせるという現象があることが観察できた。

6. 考察

得られた各数値モデルにおける  $M/M_p$  の値を図-16(a)に示す。これらの値より  $M/M_p=1.0$  の点を推定し結ぶことによって図-16(b)に示したような  $M/M_p=1.0$  の近似線がえられる。

$M/M_p=1.0$  の近似線を公称力より約 14.4%大きい降伏応力度を用いたことを考慮し、各国スベックと比較すると AASHTO 及び BS5400 が比較的近い形状を示しているのではないかと予想できる。そこでこの近似線をほかの各国スベックと同じように2本の直線で近似してみる。

(図-16(c)近似線は、 $\lambda_{pf}=0.496, \lambda_{pw}=0.461$  の2直線となるがこれを各国スベックと比較すると、 $\lambda_{pf} \leq 0.496$  の範囲では AASHTO がかなり近い値を示した、 $\lambda_{pw} \leq 0.46$  の範囲では BS5400 が比較的近い値を示している。



(e)

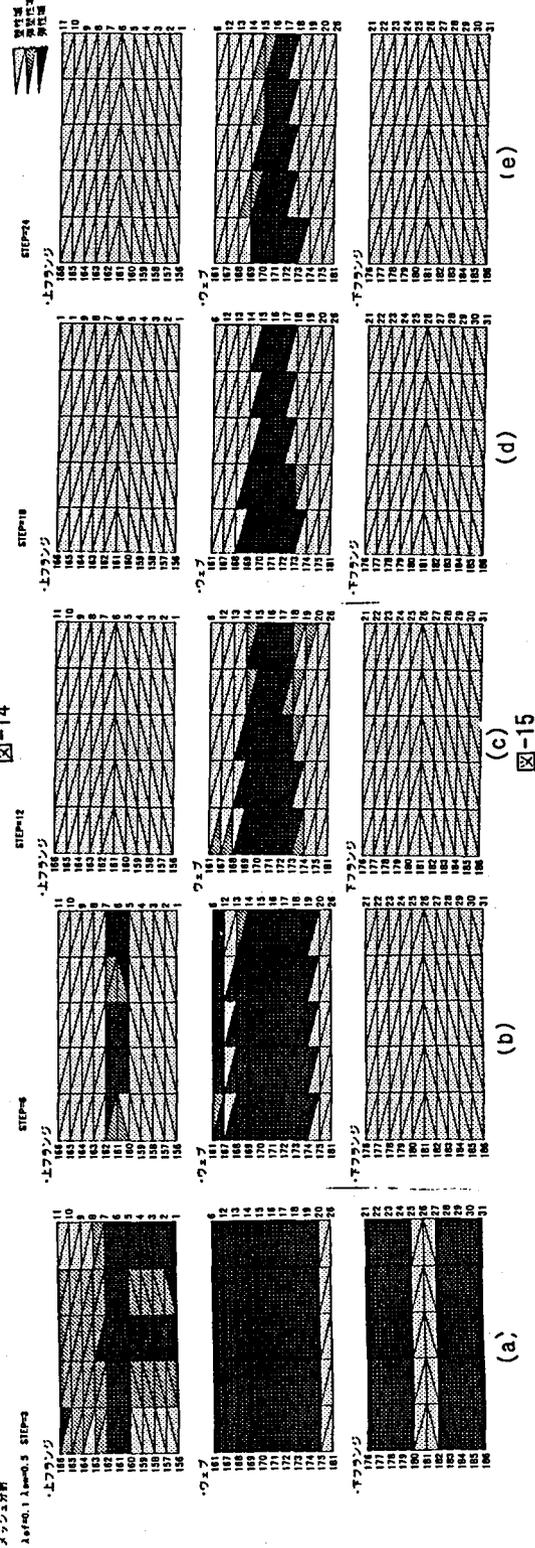
(d)

(c)

(b)

(a)

図-14



(e)

(d)

(c)

(b)

(a)

図-15

図を見ても明らかなように他の全てのスぺックにおいては大きなウェブの幅厚比の使用を認めており、また、フランジにおいてもBSとAASHTO以外は大きなフランジ幅厚比の使用を認めている。

塑性設計限界幅厚比及び塑性限界幅厚比についてはまだ2～3の各国スぺックしか規定しておらず、日本道路橋示方書においても規定がないので、早急に規定する必要がある。そこでこの本研究により得られた塑性限界幅厚比を更に確認して提案する。

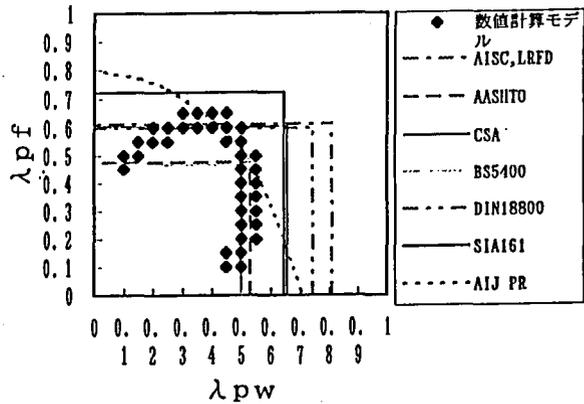


図-16(a) 塑性限界幅厚比

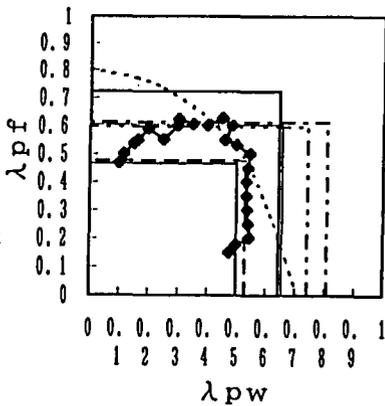


図-16(b) 塑性限界幅厚比

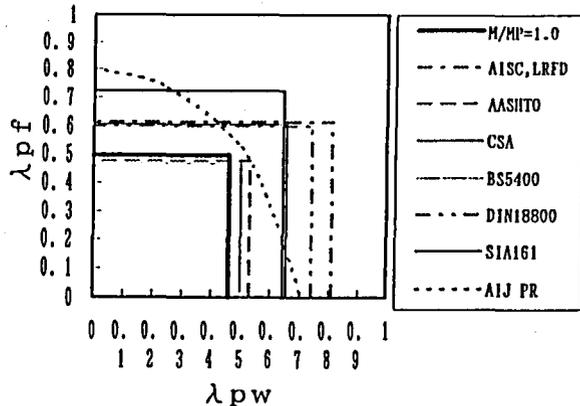


図-16(c) 塑性限界幅厚比

参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造物設計指針，1987.
- 2) 奈良 敬：内面力を受ける鋼板及び補鋼板の極限強度に関する研究，P.69～78,1986,
- 3) 土木学会；座屈設計ガイドライン，1987.10
- 4) 中沢俊彦，山口 哲：曲げを受ける鋼型断面の降伏限界幅厚比に関する研究，1993. 3
- 5) 西村宜男，奈良 敬：鋼構造部材および要素の塑性強度の有効利用に関する研究，1991.3

終わりに本研究は、平成8年度教育先端設備費を受けて完成できました。関係者の方々に深く感謝いたします。