

I-67

曲げ圧縮を受ける鋼I形断面の強度と限界幅厚比

大阪大学大学院 学生員 大崎史淳

大阪大学工学部 正会員 西村宣男

1. まえがき 鋼骨組構造物を対象とした限界状態設計規準においては、薄肉断面部材から塑性設計を可能とする厚肉断面部材までを含んだ部材強度の包括的評価法を確立する必要がある。また一般の鋼骨組構造物の部材には曲げモーメントと軸力とが同時に作用する場合が多く、現行の各設計規準では、板要素の幅厚比や部材の細長比などを用いて、作用応力分布に応じた限界値を与え部材強度を評価している。本研究では鋼I形断面に曲げと圧縮が作用する場合について、降伏強度や塑性強度などの断面強度区分を明確にするために、曲げと軸力の組合せ状態に応じた構成板要素の限界幅厚比について検討した。解析には立体板構造を対象とし、ひずみ硬化を考慮した弾塑性有限変位解析プログラムを用いた。また、限界状態設計法を導入している設計規準の中で、組合せ荷重状態に対する限界幅厚比を規定しているS I A 161の条項と解析結果の比較考察も行った。

2. 単一板の幅厚比パラメータ 単一板の幅厚比パラメータ $\bar{\lambda}_p$ は次式で与えられる。

$$\bar{\lambda}_{pf} = \frac{b'}{t_f} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k_f \pi^2} \frac{\sigma_y}{E}} \quad \bar{\lambda}_{pw} = \frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k_w \pi^2} \frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

ここに、 $\bar{\lambda}_{pf}$:フランジ幅厚比パラメータ、 $\bar{\lambda}_{pw}$:ウェブ幅厚比パラメータ、 σ_y :降伏応力度、 E :ヤング係数
 ν :ポアソン比、 b :フランジ幅、 b' :フランジ突出幅、 t_f :フランジ板厚、 h :ウェブ高、 t_w :ウェブ板厚
 またフランジ座屈係数は $k_f=0.425$ とし、ウェブ座屈係数は上下縁応力比 σ_1/σ_2 をパラメータとして
 $k_w=4.0$ (純圧縮)から $k_w=23.9$ (純曲げ)の間を補間する関数¹⁾として次式を適用した。

$$\begin{cases} -1 \leq \sigma_1/\sigma_2 \leq 0 \cdots k = 10(\sigma_1/\sigma_2)^2 - 6.27\sigma_1/\sigma_2 + 7.63 \\ 0 \leq \sigma_1/\sigma_2 \leq 1 \cdots k = 8.4/(\sigma_1/\sigma_2 + 1.1) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 σ_1 :ウェブの上縁応力、 σ_2 :ウェブの下縁応力

3. 限界状態 各限界状態は次式のように作用する曲げモーメントと軸力との相関式²⁾で表わされる。

a) 降伏限界 $N/N_y + M/M_y = 1.0 \quad (3)$

b) 塑性限界
$$\begin{cases} 0 \leq N/N_y \leq 1/(1+2bt_f/h/t_w) \text{ の時} \\ \frac{(1+2bt_f/h/t_w)^2}{1+4bt_f(h+t_f)/h^2/t_w} (N/N_y)^2 + M/M_p = 1.0 \\ 1/(1+2bt_f/h/t_w) \leq N/N_y \leq 1.0 \text{ の時} \\ N/N_y + \frac{1+(1+(h+2t_f)/h) \times 2bt_f/h/t_w}{2((h+2t_f)/h)(1+2bt_f/h/t_w)} M/M_p = 1.0 \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 N_y :降伏軸力、 M_y :降伏モーメント、 M_p :全塑性モーメント、 N :作用軸力、 M :作用モーメント

4. 応力-ひずみ関係 ひずみ硬化を考慮した弾塑性有限変位解析プログラムを用い

る際、次式に示すような指数関数³⁾をひずみ硬化域での応力-ひずみ関係に用いた。

$$\begin{cases} \text{弾性領域} (\varepsilon < \varepsilon_y) \cdots \sigma/\sigma_y = \varepsilon/\varepsilon_y \\ \text{踊り場} (\varepsilon_y \leq \varepsilon < \varepsilon_H) \cdots \sigma/\sigma_y = 1.0 \\ \text{ひずみ硬化域} (\varepsilon \geq \varepsilon_H) \cdots \sigma/\sigma_y = B(\varepsilon/\varepsilon_y)^n \end{cases} \quad (5)$$

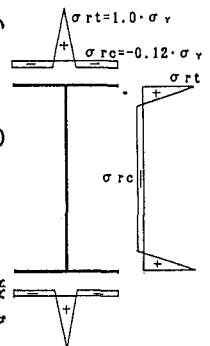
ここに、降伏応力度: $\sigma_y=2850$ (kgf/cm²)、ひずみ硬化開始ひずみ: $\varepsilon_H=0.0211$

降伏ひずみ: ε_y 、ひずみ硬化係数: $B=4.876$ 、ひずみ硬化指数: $n=2.682$

5. 初期不整 図-1~2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形断面の実測データの平均値⁴⁾を用いた。またウェブの初期たわみの波形は、純曲げ

解析では一端固定、他端単純支持のはりの座屈モードと同じとし、純圧縮を受ける場合図-1 残留応力分布は単純正弦 1/2波とした。また曲げ圧縮を受ける場合は作用する曲げモーメントと軸力の組合せ状態に応



じて、純曲げおよび純圧縮を受ける場合に用いた波形を合成したものとした。部材軸方向の初期たわみ形状は正弦 1/2 波形とした。

6. 極限強度解析 鋼種として SS41 を用いフランジとウェブの断面積比を $A_w/A_f=2.0$ として断面が純曲げ、純圧縮および曲げ圧縮を受ける場合について、フランジの幅厚比パラメータを3通りに定め、それらに対してウェブの幅厚比パラメータを変化させて解析を行った。さらに、作用軸力と作用モーメントの関係 $c=(N/N_y)/(M/M_y)$ の値を 0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 の5通りに変化させ解析を行った。

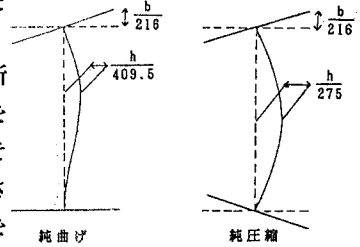


図-2 初期たわみ

表-1 解析モデルの諸元(降伏限界)

c	λ_{rf}	λ_{rw}	h	t _w	b	t _f	L	s	k
0.0	0.8494	0.8173	103.11	1.0	38.885	1.328	87.432	0.3771	1.1404
0.0	0.6361	0.9808	123.73	1.0	38.890	1.877	83.003	0.2391	1.1413
0.0	0.4228	1.1987	151.23	1.0	33.239	2.270	74.324	0.2202	1.1430
0.2	0.8718	0.7628	79.365	1.0	34.621	1.148	77.898	0.4382	1.1435
0.2	0.6538	0.9263	96.371	1.0	33.083	1.457	74.391	0.3431	1.1445
0.2	0.4359	1.0897	113.37	1.0	29.339	1.932	66.012	0.2588	1.1470
0.5	0.8718	0.8173	89.413	1.0	32.411	1.071	72.324	0.4699	1.1448
0.5	0.6538	0.8718	74.040	1.0	29.043	1.275	65.346	0.3923	1.1472
0.5	0.4359	0.9808	83.295	1.0	25.220	1.651	58.745	0.3028	1.1504
1.0	0.8718	0.7628	54.338	1.0	28.750	0.946	54.398	0.5225	1.1474
1.0	0.6538	0.8718	82.169	1.0	28.855	1.188	59.375	0.4288	1.1491
1.0	0.4359	0.9808	69.340	1.0	23.153	1.510	52.093	0.3310	1.1528
2.0	0.8718	0.8173	51.059	1.0	27.870	0.918	51.059	0.5458	1.1481
2.0	0.6538	0.8718	54.483	1.0	24.981	1.090	54.483	0.4587	1.1507
2.0	0.4359	0.9263	57.867	1.0	21.106	1.371	47.488	0.3847	1.1552
5.0	0.8718	0.6538	38.792	1.0	23.735	0.775	38.792	0.8451	1.1520
5.0	0.6538	0.7628	42.824	1.0	22.235	0.985	42.824	0.5180	1.1537
5.0	0.4359	0.7628	42.824	1.0	18.249	1.178	47.080	0.4251	1.1538
∞	0.8718	0.5449	28.122	1.0	20.815	0.678	48.834	0.7401	1.1558
∞	0.6538	0.5449	28.122	1.0	18.095	0.777	40.714	0.8435	1.1801
∞	0.4359	0.5449	28.122	1.0	14.889	0.948	33.458	0.5287	1.1874

表-2 解析モデルの諸元(塑性限界)

c	λ_{rf}	λ_{rw}	h	t _w	b	t _f	L	s	k
0.0	0.8383	0.3289	41.244	1.0	24.593	0.838	55.335	0.5983	1.1493
0.0	0.6272	0.4359	54.992	1.0	24.593	1.118	55.335	0.4472	1.1492
0.0	0.4142	0.4359	54.992	1.0	20.080	1.389	45.181	0.3851	1.1548
0.2	0.8718	0.2724	28.345	1.0	20.895	0.878	47.014	0.7372	1.1555
0.2	0.6538	0.2724	28.345	1.0	18.165	0.780	40.870	0.6408	1.1600
0.2	0.4359	0.2724	28.345	1.0	14.928	0.950	33.583	0.5288	1.1670
0.5	0.8718	0.2179	18.510	1.0	18.384	0.545	38.214	0.9178	1.1622
0.5	0.6538	0.2179	18.510	1.0	14.778	0.628	33.250	0.7384	1.1678
0.5	0.4359	0.2179	18.510	1.0	12.181	0.781	27.383	0.8570	1.1784
1.0	0.8718	0.2179	15.542	1.0	15.608	0.458	35.114	1.0041	1.1855
1.0	0.6538	0.2179	15.542	1.0	13.585	0.572	30.588	0.8741	1.1712
1.0	0.4359	0.2179	15.542	1.0	12.447	0.780	28.005	0.8407	1.1752
2.0	0.8718	0.2724	17.020	1.0	18.307	0.522	38.891	0.9581	1.1838
2.0	0.6538	0.2724	17.020	1.0	14.192	0.600	31.931	0.8338	1.1893
2.0	0.4359	0.3289	20.424	1.0	12.748	0.801	28.884	0.8242	1.1741
5.0	0.8718	0.4359	24.528	1.0	19.474	0.830	43.815	0.7393	1.1577
5.0	0.6538	0.4359	24.528	1.0	18.933	0.724	38.100	0.8904	1.1824
5.0	0.4359	0.4359	24.528	1.0	13.921	0.881	31.322	0.9875	1.1701

ここに、 $c=(N/N_y)/(M/M_y)$, $s=b/h$, $k=M_y/M_x$ (形状係数)

荷重状態での、降伏および塑性限界付近の解析モデルの断面諸元を掲げる。

7. 限界幅厚比

極限強度の解析結果から各フランジ幅厚比パ

ラメータに対して式(3)および式(4)の値が 1.0 となるウェブの幅厚比パラメータをそれぞれ降伏および塑性限界幅厚比として、各限界幅厚比を c の値を傾きに、ウェブの幅厚比パラメータを原点からの距離とする極座標で表すと図-3 のようになる。ここで横軸は断面が純曲げを受ける場合の降伏および塑性限界幅厚比、縦軸は断面が純圧縮を受ける場合の降伏限界幅厚比の解析結果を示している。これより荷重状態が純圧縮に近づくとき降伏および塑性限界幅厚比が大きく変化することが分かる。

これは軸力が卓越すると、ウェブの幅厚比パラメータを小さくしても極

限強度が増加せずほぼ一定になることから各限界状態に達するウェブの

限界幅厚比パラメータの変化が大きいためである。また、Swiss の鋼構造

設計規準⁵⁾では、降伏限界幅厚比はあらゆる板要素について一定値 0.9

と定めている。降伏限界モデルについて SIA161 の条項に照らして

断面区分を調べた結果を表-3 に示す。ここで断面区分は降伏および塑

性限界幅厚比を用いて以下の3通りに区分する。領域A(弾性強度領域)

: 極限強度<降伏強度, 領域B(降伏強度領域): 降伏強度≤極限強度<

全塑性強度, 領域C(塑性強度領域): 極限強度>全塑性強度。これより

フランジおよびウェブの幅厚比パラメータがともに 0.8 に近いモデル

では、フランジ、ウェブとも SIA の降伏限界幅厚比の規定を満足して

いるが、極限強度は降伏強度を越えていないことが分かる。またフランジの幅厚比パラメータが小さいモデル

で、ウェブの幅厚比パラメータが SIA の規定を満足していなくても、極限強度が降伏強度を越えた場合

もあった。これらのことより、降伏限界幅厚比はフランジとウェブの幅厚比パラメータの相関関係を考慮し

て規定する必要があると思われる。参考文献 1) 土木学会: 座屈設計ガイドライン第8章, 1987. 2)

同左: 第7章. 3) 奈良敬: 面内力を受ける鋼板および補鋼板の極限強度に関する研究, 1986. 4) 土木学

会: 座屈設計ガイドライン第4章, 1987. 5) Swiss Standard: SIA161, Steel Structures, 1979.

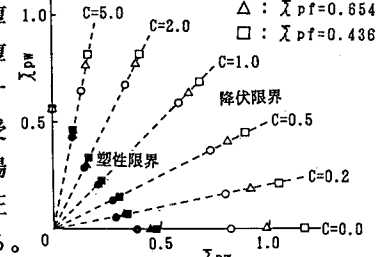


図-3 限界幅厚比

表-3 降伏限界モデルの SIA161 による断面区分の検討

c	λ_{rf}	λ_{rw}	M/M_y	N/N_y	式(3)	SIA
0.0	0.8494	0.8173	0.9890	...	0.9890	領域B
0.0	0.6361	0.9808	0.9597	...	0.9597	領域A
0.0	0.4228	1.1987	1.0042	...	1.0042	領域A
0.2	0.8718	0.7628	0.8409	0.1680	1.0089	領域B
0.2	0.6538	0.9263	0.8420	0.1547	0.9987	領域A
0.2	0.4359	1.0897	0.8384	0.1568	0.9952	領域A
0.5	0.8718	0.8173	0.9547	0.3313	0.9980	領域B
0.5	0.6538	0.8718	0.6748	0.3372	1.0120	領域B
0.5	0.4359	0.9808	0.6713	0.3355	1.0068	領域A
1.0	0.8718	0.7628	0.5078	0.5073	1.0181	領域B
1.0	0.6538	0.8718	0.5050	0.5051	1.0102	領域B
1.0	0.4359	0.9808	0.4977	0.4978	0.9953	領域A
2.0	0.8718	0.8173	0.8208	0.8438	0.9647	領域B
2.0	0.6538	0.8718	0.8319	0.8675	0.9994	領域B
2.0	0.4359	0.9263	0.8324	0.8670	0.9994	領域A
5.0	0.8718	0.6538	0.1688	0.8383	1.0029	領域B
5.0	0.6538	0.7628	0.1888	0.8390	1.0058	領域B
5.0	0.4359	0.7628	0.1721	0.8684	1.0385	領域B