

曲線 I 桁の降伏関数について

九州大学 正会員 今井富士夫 九州大学 正会員 太田 俊昭
九州大学 学生員 〇岩隈 良弘 九州大学 学生員 田島 孝敏

1. まえがき 組合せ負荷を受ける I 桁の降伏関数では、通常 St.Venantのねじりは微少であるとして、この項は無視されている¹⁾。しかしながら、曲線 I 桁などの曲げとねじりを受ける構造物の崩壊過程において、塑性ヒンジ発生点でそりが解放され、St.Venantのねじりが増大することが考えられるので、著者らは、曲げと曲げねじりおよび St.Venantのねじりモーメントから成る降伏関数を、フランジ・腹板ともに同一材種のものについて提案してきた²⁾。ここでは、フランジと腹板の材種が異なるハイブリッドな薄肉 I 桁の降伏関数を誘導し、これまでの降伏関数をも含めて、モデル実験によってえられたデータを基に検討する。

2. 曲線 I 形断面の降伏関数

2・1 仮定 本降伏関数の誘導で使用した仮定は次の通りである。(1) 材料は完全弾塑性体とし、その降伏規準はMisesの降伏規準に従うものとする。(2) 主桁・横桁の降伏関数に寄与する応力度のうち、垂直応力度 σ は曲げと曲げねじりモーメントによるものと考え、せん断応力度 τ は St.Venantのねじりによるものとし、そりによるそれは無視する。(3) 崩壊に至る過程で、主桁・横桁の局部座屈や横倒れ座屈は生じないものとする。

2・2 降伏関数の誘導 曲線 I 桁を対象とする場合、仮定(3)に従えばその構成力として、曲げモーメント M 、曲げねじりモーメント M_w 、および St.Venantのねじりモーメント T_s が考えられる。いま、I 形断面の極限状態での垂直およびせん断応力度分布は、図-1の(a)、(d)となる。図-1の(b)と(c)は、曲げおよび曲げねじりモーメントの応力成分の分布を理想化して示したものである。これらの図から、各断面力と応力度との関係は、薄肉断面であることを考慮すれば、次式で与えられる。

$$M = \sigma_1 \cdot A_1 \cdot h [(2\delta - 1) + \alpha \cdot c / 4] \quad (1)$$

$$M_w = \sigma_1 \cdot A_1 \cdot h \cdot b \cdot \delta (1 - \delta) \quad (2)$$

$$T_s = \tau_1 \cdot A_1 \cdot t_1 (1 + \beta \cdot c \cdot t / 2) \quad (3)$$

ここに、 $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$ 、 $\beta = \tau_2 / \tau_1$ 、 $c = A_2 / A_1$ 、 $t = t_2 / t_1$ 、 A は断面積を、 t は板厚を表す。添字 1, 2 はフランジ、腹板に関する項を示す。

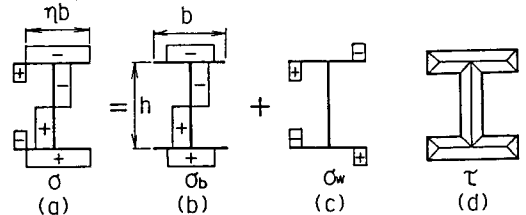


図-1 断面極限状態における応力分布

ここで、 M, M_w, T_s をそれぞれに対応する完全塑性モーメント M_p, M_{wp}, T_p で無次元化すれば、次式となる。

$$m = M / M_p = \bar{\sigma}_1 \cdot [(2\delta - 1) + \alpha \cdot c / 4] / (1 + n \cdot c / 4) \quad (4)$$

$$m_w = M_w / M_{wp} = \bar{\sigma}_1 \cdot 4 \delta (1 - \delta) \quad (5)$$

$$t_s = T_s / T_p = \bar{\tau}_1 \cdot (2 + \beta \cdot c \cdot t) / (2 + n \cdot c \cdot t) \quad (6)$$

上式において、 $n = \sigma_{2y} / \sigma_{1y} = \tau_{2y} / \tau_{1y}$ 、 $\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 / \sigma_{1y}$ 、 $\bar{\tau}_1 = \tau_1 / \tau_{1y}$ 、添字 y は降伏を意味する。式(4)、(5)より δ を消去すると、

$$16 |m_w| \bar{\sigma}_1 = -(4 + n \cdot c)^2 \cdot m^2 + 2 \alpha \cdot c (4 + n \cdot c) |m| \bar{\sigma}_1 - (\alpha^2 \cdot c^2 - 16) \bar{\sigma}_1^2 \quad (7)$$

また、仮定(1)の降伏条件から、 $d = (2 + n \cdot c \cdot t) / (2 + \beta \cdot c \cdot t)$ とすると、 $\sigma_1 = (1 - d^2 t_s^2)^{1/2}$

ここで、 $\alpha = \beta = n$ と仮定すると、腹板に関するMisesの降伏条件も満足する。以上、(4)、(6)より曲線 I 形ハイブリッド桁の降伏関数が次のように誘導される。

$$f(m, m_w, t_s) = (4 + n \cdot c)^2 \cdot m^2 - 2 n \cdot c (4 + n \cdot c) |m| \sqrt{1 - t_s^2} + (n^2 \cdot c^2 - 16) \cdot (1 - t_s^2) + 16 |m_w| \sqrt{1 - t_s^2} = 0 \quad (8)$$

以下、上記の降伏関数 $f(m, m_w, t_s)$ を f_0 とし、上式において $t_s = 0$ とした降伏関数 $f(m, m_w)$ を f_1 とする。

3. 実験との比較

3・1 供試体

実験で用いた供試体は、フランジと腹板の材種が異なるハイブリッドな円弧桁 (MODEL-A) と、フランジと腹板が同一材種の円弧桁 (MODEL-B) を作製した。特に、MODEL-A では腹板の座屈防止を考え、かつ曲げ耐荷力に腹板の影響が現れるように $\sigma_{2y} > \sigma_{1y}$ とした。

さらに、実験において、初期塑性ヒンジ発生荷重と終局荷重との差が大きくなるように、図-2 に示すように両端近傍のフランジ幅を幾分削ったものも作製した。これらの断面諸元をまとめたものが表-1 である。

ここで、MODEL A-1, B-1 は等断面桁、MODEL A-2, B-2 は変断面桁を表わしている。また、実験は両端固定ばりの中央点に単一集中荷重を載荷する形式で行われた。

3・2 実験結果および考察 これらの終局荷重についてまとめたものが、表-2 である。ここに、 P_0 は降伏関数 f_0 による終局荷重、 P_1 は降伏関数 f_1 によるもの、また、 P_{ex} は実験値を表わす。表より、両者の理論解は実験値に対し、やや下回る傾向がみられる。また、等断面桁の MODEL A-1, B-1 では降伏関数の違いによる終局荷重の差はそれほど見受けられないが、変断面桁の MODEL A-2, B-2 では、 f_1 に対して f_0 の終局荷重は実験に対する比で 4% 程度低くなっている。

図-3 は、MODEL A-1 の荷重-変形図を示したものである。図より、実験値は理論解に対して、弾性域にて変位に 8% 程度の差が生じている。このことは、理論上の完全固定条件が実験では与えられていないことを示すものである。このために、理論と実験の終局荷重および変形に差異が生じたものと考えられる。(実験桁は、実際には回転支持バネ系であると考えられる。この系による終局荷重の値は、完全固定の解より大きくなる。)

また、変断面桁にて f_0 と f_1 の差が生じた原因について考える。図-4 は、MODEL A-2, B-2 についての f_0 に対する固定端部 (初期塑性ヒンジ点) の応力経路を示したものである。応力経路図から明らかなように、本降伏関数の場合、 $m_w=0$ となった後に t_0 は急増し、 m は減少していく。ところが、 f_1 の場合、 $m_w=0$ 以降は $m=1.0$ の一定値となる。したがって、 $m_w=0$ 後の曲げモーメントの再配分が両者で異なるため、 $m_w=0$ となるとき荷重と終局荷重に開きが生ずる場合には、両者の解の差は増大することになる。

<参考文献>

- 1) Daddazio, R.P.; Proc. of ASCE, EM, Vol. 109, No. 2, 1983
- 2) 今井 他; 構造工学論文集, Vol. 32A, 1986

表-1 断面諸元

	MODEL-A		MODEL-B	
SPAN (cm)	200.0		200.0	
ANGLE (Degree)	30		20, 19	
断面	D-D E-E	F-F	D-D E-E	F-F
EI (kg・cm ²)	6.445×10 ⁸	4.345×10 ⁸	4.145×10 ⁸	2.798×10 ⁸
GJ (kg・cm ²)	1.113×10 ⁸	7.840×10 ⁷	1.301×10 ⁸	1.006×10 ⁸
ECu (kg・cm ⁴)	2.977×10 ⁹	7.413×10 ⁸	1.889×10 ⁹	4.670×10 ⁸
M ₀ (kg・cm)	1.977×10 ⁹	1.415×10 ⁹	1.483×10 ⁹	1.035×10 ⁹
T ₀ (kg・cm)	7.057×10 ³	5.263×10 ³	7.069×10 ³	5.309×10 ³
M _{wp} (kg・cm ²)	3.013×10 ⁵	1.193×10 ⁵	2.376×10 ⁵	9.359×10 ⁴
c・n	1.286	2.058	1.021	1.634

表-2 終局荷重

	A-1	A-2	B-1	B-2
P ₀ (kg)	6695	5038	5260	4110
P ₁ (kg)	6734	5260	5261	4290
P _{ex} (kg)	7300	5700	5590	4400
P ₀ /P _{ex} (%)	91.6	88.4	94.1	93.4
P ₁ /P _{ex} (%)	92.5	92.3	94.1	97.5

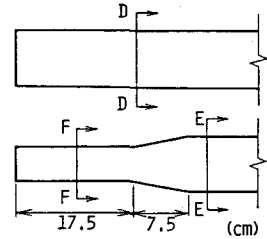


図-2 供試体

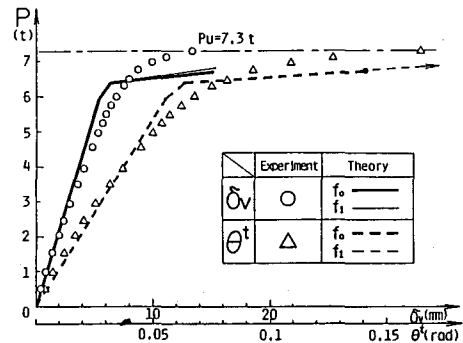


図-3 荷重-変形図

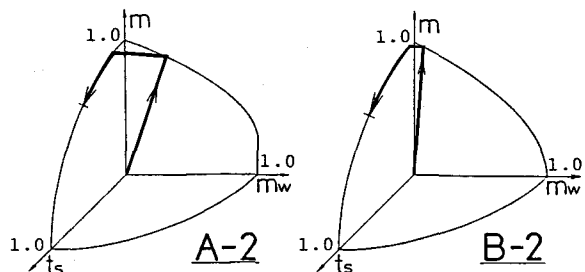


図-4 応力経路図