

関西大学工学部 正会員 堂垣正博
 松尾橋梁(株) 正会員 藤井伸彦
 関西大学工学部 正会員 三上市藏

1. まえがき 薄肉断面部材の全体座屈と局部座屈の連成問題は、静的強度の評価はもとより、耐震性評価の観点からも極めて重要である。わが国の道路橋示方書¹⁾では、連成強度の評価が積公式でなされている。ここでは、圧縮力を受ける鋼H形柱の幾何学的・材料的非線形挙動を差分法によって明らかにし、その断面強度と柱強度をQ-factor法や積公式に適用し、柱の連成圧縮強度の評価法を検討する。また、それらを実験結果と比較し、評価法の妥当性を検証する。

2. 理論式 フランジの自由突出幅 b_f 、厚さ t_f 、腹板の幅 b_w 、厚さ t_w のFig.1に示す長さ a の短柱、およびFig.2に示す

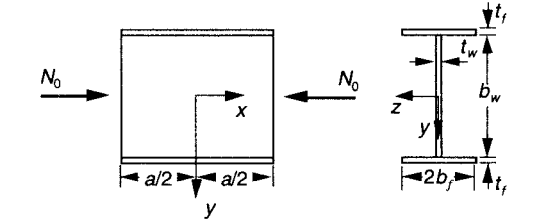


Fig.1 短い鋼H形圧縮柱

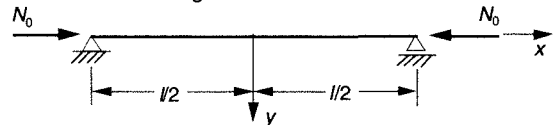


Fig.2 圧縮を受ける鋼H形柱

長さ l の柱の幾何学的・材料的非線形挙動を明らかにする。圧縮力を受ける鋼H形短柱および長柱の解析に際し、つぎの仮定を設ける。すなわち、1) Kirchhoff-Loveの仮定。2) フランジと腹板はともに完全弾塑性体からなり、ひずみ硬化しない。3) 降伏を von Mises の等価応力で判定し、降伏後の応力-ひずみの関係にZieglerの移動硬化則を準用する。ただし、圧縮力を受ける鋼H形短柱の理論式の誘導は文献2)に譲り、ここでは鋼H形長柱の理論式のみを述べる。

(1) 釣り合い式：弾塑性状態における柱の x 、 y 、 z 方向の力の釣り合い式および x 軸まわりのねじりに関する釣り合い式をLinあるいはMassonnetの弾塑性理論を適用して誘導すれば、

$$N_{x,x} - N_x^p = 0,$$

$$M_{z,x} + N_x^p \bar{v}_{,xx} - M_z^e \bar{\phi}_{,xx} - M_{y,x} \bar{\phi}_{,x} - (M_{z,x}^p + N_x^p \bar{v}_{,xx} - M_z^p \bar{\phi}_{,xx} - M_{y,x}^p \bar{\phi}_{,x}) = 0,$$

$$M_{y,x} + N_x^p \bar{w}_{,xx} - M_y^e \bar{\phi}_{,xx} - M_{z,x}^e \bar{\phi}_{,x} - (M_{y,x}^p + N_x^p \bar{w}_{,xx} - M_y^p \bar{\phi}_{,xx} - M_{z,x}^p \bar{\phi}_{,x}) = 0,$$

$$M_{x,x} - M_y^e \bar{v}_{,xx} + M_z^e \bar{w}_{,xx} + W_{cp} N_x^p \bar{w}_{,xx} - M_{y,x}^e \bar{v}_{,x} + M_{z,x}^e \bar{w}_{,x} - (M_{x,x}^p - M_y^p \bar{v}_{,xx} + M_z^p \bar{w}_{,xx} + W_{cp} N_x^p \bar{w}_{,xx} - M_{y,x}^p \bar{v}_{,x} + M_{z,x}^p \bar{w}_{,x}) = 0 \quad (1)$$

を得る。ここに、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$ はそれぞれ y および z 方向の全たわみで、初期たわみ v_0 、 w_0 と荷重によるたわみ v 、 w の和である。 N_x は軸力、 M_z 、 M_y は z および y 軸まわりの曲げモーメント、 M_θ はそりモーメント、および M_x はねじりモーメントである。 $W_{cp} = I_{cp}/A$ で、 I_{cp} は断面極2次モーメントである。また、上添字 e と p 付きの断面力はそれぞれ弾塑性域にある部材を全断面弾性として求められる断面力と、弾性断面力を修正し真の断面力を得るための仮想的な断面力を表す。仮想的な断面力は、弾性応力で計算される von Mises の等価応力が降伏点応力を超える場合、その超過量を断面全体にわたって積分して求められる。なお、コンマに続く下添字はそれに関する微分を表す。

(2) 境界条件式：単純支持された部材の両端に圧縮力を作用させてもよいが、ここではそれと等価な強制変位 u_0 をつぎのように与え、両端での境界条件とする。すなわち

$$u = -u_0, \quad v = 0, \quad M_z = 0, \quad w = 0, \quad M_y = 0, \quad \phi = 0, \quad M_\theta = 0 \quad (2)$$

3. 数値解析法 短い鋼H形柱の力の釣り合い式、境界条件式および連続条件式²⁾と、鋼H形長柱の力の釣り合い式(1)および境界条件式(2)に差分法を適用し、多元連立の非線形代数方程式に変換する。これを増分法と修正Newton-Raphson法を併用した混合法で解き、非線形解を求める。なお、数値解析結果が広範なH形部材に適用できるように、諸式を無次元化した。

4. 数値計算結果とその考察 広範な数値解析の前に、鋼H形の短柱と長柱に対する差分分割数、板厚方向の層数と解

の関係を調べた結果、部材軸方向に20分割、フランジと腹板をそれぞれ幅方向に14分割、および短柱解析の場合には板厚方向を8層に分割すればよいことがわかった。ただし、鋼材はSM400材で、降伏点応力 $\sigma_p=2,400\text{kgf/cm}^2$ 、弾性係数 $E=2.1 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ とした。また、初期不整は、実測値の平均値相当とした。

(1) 断面強度：H形断面にはさまざまな寸法の形状が考えられるが、ここではフランジと腹板がほぼ同時に圧縮座屈すると思われる形状とした。すなわち、腹板の縦横比 $a/b_s=1$ 、断面形状比 $b_w/b_f=3$ 、フランジと腹板の幅厚比パラメータ $b_{ftw}/b_w t_f=0.363$ に対し、鋼H形短柱の終局圧縮強度を求め、Fig.3を得た。ここに、横軸の等価幅厚比パラメータ R_{fw} は久保⁴⁾が提案したフランジと腹板の幅厚比パラメータ R_f 、 R_w の相乗平均 $R_{fw}=\sqrt{R_f R_w}$ である。広範な解析から

$$\frac{N_{ult}}{N_p} = \frac{3}{4R_{fw}^{2/3}} \quad 0.65 \leq R_{fw} \quad (3)$$

の断面強度式を提案する。図中には、西村ら³⁾、久保ら⁴⁾、山尾ら⁵⁾の強度式も示した。図から明らかなように、本強度曲線は西村ら、久保ら、山尾らの提案強度式とは多少異なるものの、よい相関にある。

(2) 柱強度：さきと同じ断面形状で、柱の終局圧縮強度を求めれば、Fig.4を得る。図中には、本解析に基づいて誘導した柱の終局圧縮強度曲線

$$\frac{N_c}{N_p} = \frac{1}{2\lambda^2} \left[1 + 0.215(\lambda - 0.2) + \lambda^2 - \sqrt{\{1 + 0.215(\lambda - 0.2) + \lambda^2\}^2 - 4\lambda^2} \right] \quad (4)$$

諸外国の基準強度曲線、および実験結果も示す。本強度式はすべての曲線に比べ、やや上界の値を呈しているが、これは、初期不整に実測値の平均値相当を与えたためである。したがって、よい相関にある。

(3) 連成強度の簡易評価法：Hancock⁶⁾、山尾ら⁷⁾、青木ら⁸⁾の実験供試体を対象に、式(3)の断面強度式と式(4)の柱強度式をQ-factor法および積公式に適用して柱の連成圧縮強度を求めれば、Fig.5を得る。図の(b)から明らかなように、式(4)の柱強度式と式(3)の断面強度式をQ-factor法に適用すれば、精度よく連成座屈強度を評価することができる。

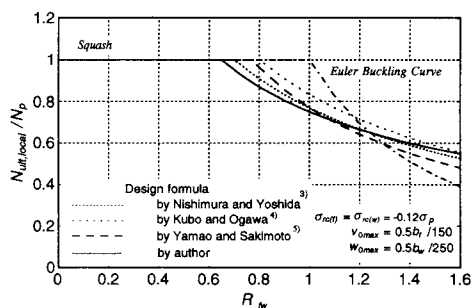


Fig.3 短い柱の圧縮強度曲線

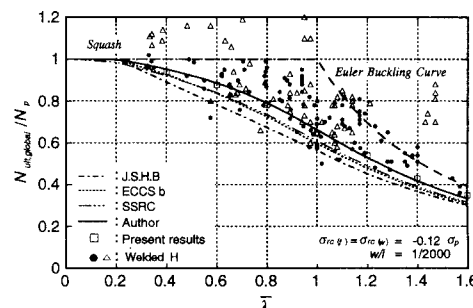


Fig.4 局部座屈を無視した鋼H形鋼柱の終局強度曲線

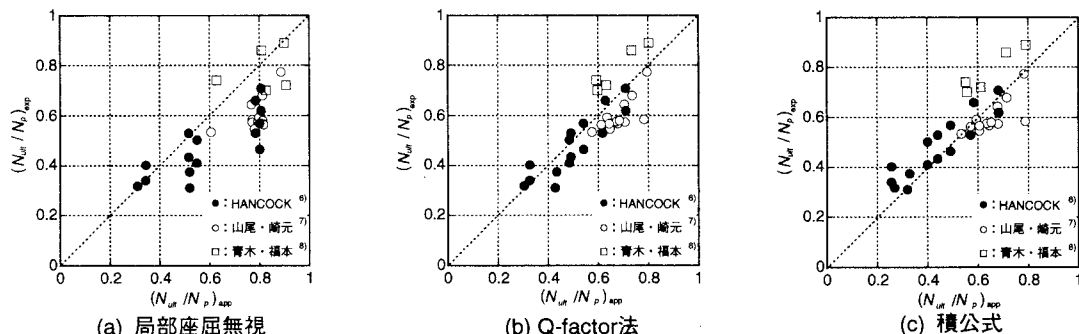


Fig.5 局部座屈を無視した柱の終局強度、およびQ-factor法と積公式による連成座屈強度の実験値との比較

参考文献 1)日本道路協会編：道路橋示方書・同解説(I 共通編，II 鋼橋編)，1994-2。2)堂垣・藤井・三上：構造工学論文集，Vol.43A，1997-3。3)西村・吉田：土木学会論文集，No.398，pp.311-318，1988-10。4)久保・小川：構造工学論文集，Vol.37A，pp.83-91，1991-3。5)山尾・崎元：土木学会論文集，No.380/I-7，pp.331-339，1987-4。6)Davids, A. J. and Hancock, G. J.: Jour. of the Struct. Div., ASCE, Vol.112, No.ST10, pp.2281-2297, 1986。7)山尾・崎元：土木学会論文集，No.380/I-7，pp.383-390，1987-4。8)青木・福本：構造工学論文集，Vol.34A，pp.161-170，1989-3。