

名城大学理工学部 正員 久保 全 弘
名古屋大学工学部 正員 福本 啓 士

1. まえがき

先に発表した文献⁽¹⁾では溶接組立による鋼U形断面桁の純曲げによる横倒れ座屈実験を行い、荷重-変形状、崩壊形、曲げ耐力などについて調べた。その結果、U形断面桁の横倒れ耐力を支配する崩壊機構として、圧縮フランジの固定長間による横倒れ座屈形式と桁断面全体の横倒れ座屈形式とがえられた。本報告では、これらの座屈形式の相関関係を明らかにするために、板要素の局部座屈と部材の全体座屈との曲げ圧縮による連成座屈解析を行った。

2. 解析方法

(1) 解析上の仮定 ①純曲げを受ける真直な等断面桁とする。②材料の応力-ひずみ関係は線形とする。③断面内の曲げにもなうせん断変形は無視する。④断面を構成する板要素間の接合角度は不変とする。⑤断面内の任意点の変位は、はり理論による変位成分と板曲げ理論による変位成分との重ね合せであるとする。

(2) 基本式 図-1 に示すように、U形断面桁の全体座屈座標系ととり、はり理論による変位成分を考える。また、図-2 のように板要素の局所座標系ととり、板曲げ理論による変位成分を考える。さらに、U形断面を構成する板要素は図-3 のような板幅 b_p をもつ帯板要素に分割して取り扱う。

桁の座屈形の全ポテンシャルエネルギー π_p は内部ひずみエネルギー V と外力の位置エネルギー W との和によって与えられる。

$$\pi_p = V + W \quad \text{--- (1)}$$

ここで、仮定①より、断面内の任意点 Q の変位は

$$u_Q = u^B + u^P, \quad v_Q = v^B + v^P \quad \text{--- (2)}$$

によって表わす。内部ひずみエネルギー V は各変位成分の連成項を無視すると、通常のはり理論による桁のひずみエネルギー V^B と板曲げ理論による板の曲げひずみエネルギー V^P との和によって近似的に表わせる⁽²⁾。すなわち、

$$V = V^B + V^P \quad \text{--- (3)}$$

$$V^B = \frac{1}{2} \int_0^L [B_Y u_0'^2 + C_w \phi'^2 + C_t \phi'^2] dz$$

$$V^P = \sum_p \frac{D_p}{2} \int_0^L \int_0^{b_p} [(w_{p,zz} + w_{p,yy})^2 - 2(1-\nu)(w_{p,zz}w_{p,yy} - w_{p,zy}^2)] dz dy$$

ここに、 D_p は板剛度、 ν はポアソン比であり、また w_p は帯板要素の板曲げ変位関数、 $\sum_p$ は左右の上フランジと腹板、および下フランジの帯板要素について総和することを意味している。次に、外力の位置エネルギー W は

$$W = - \int_0^L \sigma dL dy \quad \text{--- (4)}$$

ここに、 σ 、 dL は横断面の微小断面 dA に働く曲げによる垂直応力 ($\sigma = \frac{M_x}{I_x} Y$)、およびその点での細帯片の伸縮量をそれぞれ表わしている。式(4)に式(2)を代入し、整理すると次式がえ

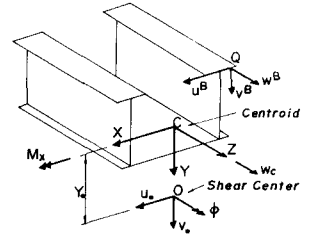


図-1

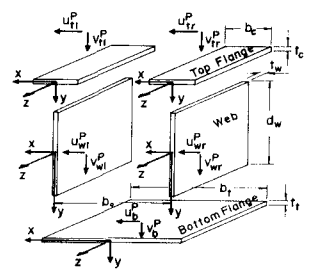


図-2

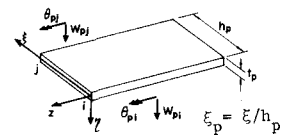


図-3

られる。 $W = W^B + W^P + W^{BP} \quad \text{--- (5)}$

$$W^B = -\frac{1}{2} \int_0^L \left[-2M_x u_0' \phi' + M_x \beta_x \phi'^2 \right] dz$$

$$W^P = -\frac{1}{2} \int_0^L \int_A \sigma \left[\left(\frac{du^P}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dv^P}{dz} \right)^2 \right] dA dz$$

$$W^{BP} = -\int_0^L \int_A \sigma \left[\left(\frac{du^B}{dz} \right) \left(\frac{du^P}{dz} \right) + \left(\frac{dv^B}{dz} \right) \left(\frac{dv^P}{dz} \right) \right] dA dz$$

(3) 座屈形の仮定 純曲げを受ける桁のせん断中心に関する横倒れ変形量を次式によって仮定する。 $u_0 = \sum_{n=1}^{\infty} u_n f_n(z), \quad \phi = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n f_n(z) \quad \text{--- (6)}$

ここに、両端単純支持桁では、 $f_n(z) = \sin n\pi z/L$ 、両端固定支持桁では、 $f_n(z) = 1 - \cos 2n\pi z/L$ である。

図-3 に示す帯板要素 i の変位関数 w_p の近似式として、次式を仮定する。

$$w_p = (1 - 3\xi_p^2 + 2\xi_p^3) w_{pi} + (\xi_p - 2\xi_p^2 + 3\xi_p^3) \theta_p \theta_{pi} + (3\xi_p^2 - 2\xi_p^3) w_{pj} + (-\xi_p^2 + 3\xi_p^3) \theta_p \theta_{pj} \quad \text{--- (7)}$$

ここに、 $w_{pi} = \sum_{n=1}^{\infty} w_{pin} f_n(x)$, $\theta_{pi} = \sum_{n=1}^{\infty} \theta_{pin} f_n(x)$, $w_{pf} = \sum_{n=1}^{\infty} w_{pf n} f_n(x)$, $\theta_{pf} = \sum_{n=1}^{\infty} \theta_{pf n} f_n(x)$

(4) 座屈条件式 (6), (7) の変位関数を式(1)に代入して全ポテンシャルを求め、停留化を行い、一般の有限要素法と同様に板曲げ節線の変位の拘束条件を考慮して全要素にわたって重ね合わせることににより、座屈条件式がえられる。 $[K]\{R\} - \lambda[K_G]\{R\} = 0$ (8)

3. 解析結果と考察

数値計算は図-4 に示すU形断面寸法からなる単純支持桁について行った。図-4 は縦軸に座屈モーメント M_{cr} 、横軸に桁長さ L ととり、腹板間隔を $b_0 = 0.5\text{m} \sim 2.5\text{m}$ と変化させた場合の座屈曲線を示している。図中の実線は断面不変とした場合の横座屈曲線であり、○印を付した実線が無補剛桁に対して求めた連成座屈曲線である。数値計算では、左右の圧縮フランジを2等分割づつ、左右の腹板を4等分割づつ、引張フランジを6分割し、合計18箇の帯板要素を考えた。また、変位関数の三角級数項は $n=6$ まですべて検討した。図中の腹板間隔 $b_0 = 2\text{m}$ の座屈曲線において、桁長さの変化にともなうえられた典型的なU形横断面の座屈モードを描くと図-5 のようである。この座屈曲線は桁長さの短い範囲ではモード(a)の腹板座屈によって支配され、これに対して長い範囲ではモード(c)の横倒れによる全体座屈によって支配されている。また、両者の中間ではモード(b)の圧縮フランジの横ねじり座屈によって支配されていることがわかる。図-4 の一々線線線で示す水平線は圧縮フランジの水平曲げ剛度およびねじり剛度を考慮した場合の腹板の最小曲げ座屈強度である。この引張フランジを固定とみなした腹板座屈強度によって精度よく推定できるようである。腹板間隔 b_0 が大きくなると、腹板の曲げ応力分布が不利となり、腹板座屈強度は低下している。図-6 は腹板の幅厚比 d_w/t_w が全体座屈におよぼす影響を調べたものである。強度低下は腹板の幅厚比が $d_w/t_w > 200$ 程度になると大きくなっている。図-7 は腹板と下フランジに対する補剛材が断面変形をともなう全体座屈におよぼす効果を調べたものである。縦軸には座屈モーメント M_{cr} ととり、横軸に補剛材の曲げ剛度と腹板あるいは下フランジの板剛度との比 I_r/I_b をとって表わしてある。この図から、全体座屈の断面変形を防止するためには、下フランジに補剛材を配置するよりも、左右の腹板に対する鉛直補剛材を配置した方が効果があることがわかる。したがって、実際の桁橋構造では鉛直補剛材が桁高さ程度の間隔で配置されていることを考えると、横倒れによる全体座屈に対する断面変形の影響はほとんど無視できると思われる。

4. あとがき

本研究では板要素の断面変形を考慮した場合のエネルギー近似式を導き、これに有限帯板法を適用して曲げ弾性座屈解析を行った。そして、U形断面桁の曲げ圧縮による板要素の局部座屈と横倒れによる全体座屈との相関曲線を求めることができた。参考文献 1) 久保・福本: U形断面桁の曲げ座屈実験, 第30回土木学会年次学術講演要集。2) Rajasekaran, S. and Murray, D. W., "Coupled Local Buckling Wide-Flange Beam-Columns," Proc. ASCE, Vol. 99, ST6, 1973.

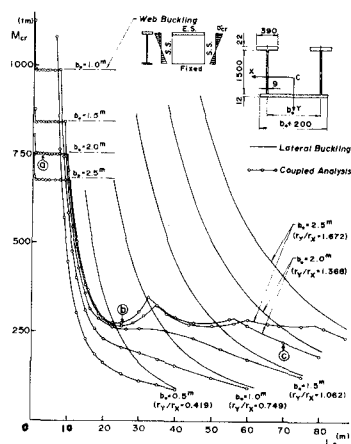


図-4

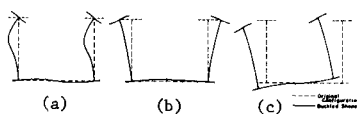


図-5

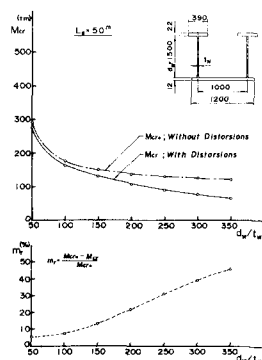


図-6

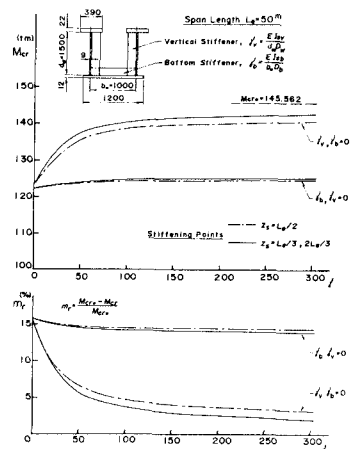


図-7