

(株)総合技術コンサルタント 正会員 宮花 邦宏
 関西大学工学部 正会員 三上 市蔵
 関西大学工学部 正会員 米沢 博

1. まえがき 最近、長大スパン橋に鋼箱桁が採用されることが多く、その部材として薄板に多数の補剛材を配置した補剛板が用いられるのが普通である。補剛腹板あるいは圧縮補剛フランジの局部座屈および補剛板としての部分座屈に関する研究は多数見受けられる。補剛腹板と圧縮補剛フランジとが一体となって連成座屈する場合については弾性座屈を対象にした研究¹⁾はあるが、非弾性座屈を対象にした研究は見当たらないようである。ここでは、多数の補剛材を有する箱桁が曲げを受け、補剛腹板および圧縮補剛フランジが一体となって非弾性連成座屈する場合を解析する。また、先に報告した実験結果²⁾を用いて、この理論の妥当性を検討する。

2. 解析方法 箱桁が曲げを受け、ダイヤフラムあるいはラーメン構造の間隔 l の間で腹板と圧縮フランジとが連成座屈するものとする。補剛腹板および圧縮補剛フランジを直交異方性板とみなす。補剛材で囲まれた板パネルおよび補剛材の局部座屈は連成座屈が起るまで生じないものとする。任意の断面は変形後も平面を保持するものとし、圧縮・引張フランジのひずみは腹板の圧縮・引張縁のひずみに等しいものとする。任意の位置 y_1 のひずみは $\epsilon_x = (\alpha y_1/b_1 - 1)\epsilon_0$ となる。ここに、 α は中立軸の位置を示す定数で、 $-\epsilon_0$ は圧縮フランジの作用ひずみである。腹板は引張フランジによって拘束を受けるが、非弾性域になることを考慮して腹板下端は単純支持されているものとする。腹板、圧縮フランジとも載荷辺は単純支持されているものとする(図-1)。また、桁曲げによって生じる腹板面内変位および圧縮フランジのたわみは無視する。

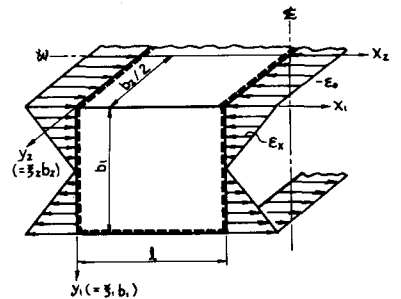


図-1

直交異方性変剛板が非弾性座屈した場合のたわみ曲面の微分方程式は次のようになる。

$$D_{ii} \frac{\partial^4 w_i}{\partial x_i^4} + 2(D_{ii} + 2D_{xyi}) \frac{\partial^4 w_i}{\partial x_i^2 \partial y_i^2} + D_{yi} \frac{\partial^4 w_i}{\partial y_i^4} + 2 \left[\frac{\partial D_{ii}}{\partial x_i} \frac{\partial^3 w_i}{\partial x_i^3} + \frac{\partial D_{ii}}{\partial y_i} \frac{\partial^3 w_i}{\partial y_i^3} + 2 \frac{\partial D_{xyi}}{\partial x_i} \frac{\partial^3 w_i}{\partial x_i^2 \partial y_i} + \left(\frac{\partial D_{ii}}{\partial x_i} + 2 \frac{\partial D_{xyi}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial^3 w_i}{\partial x_i \partial y_i^2} + \frac{\partial D_{yi}}{\partial y_i} \frac{\partial^3 w_i}{\partial y_i^3} \right] \\ + \left(\frac{\partial D_{ii}}{\partial x_i^2} + \frac{\partial D_{ii}}{\partial y_i^2} \right) \frac{\partial^3 w_i}{\partial x_i^2} + 4 \frac{\partial D_{xyi}}{\partial x_i \partial y_i} \frac{\partial^3 w_i}{\partial x_i \partial y_i} + \left(\frac{\partial D_{yi}}{\partial y_i^2} + \frac{\partial D_{ii}}{\partial x_i^2} \right) \frac{\partial^3 w_i}{\partial y_i^2} = 0 \quad (i=1, 2) \quad (1)$$

ただし、 w_i は直交異方性板 i のたわみ、 $\bar{w}_i$ は補剛板 i を直交異方性板 i に換算した場合の板厚である。 $\bar{\sigma}_{xi}$ は x_i 方向の作用応力で、ひずみ ϵ_x を用いてRichard³⁾が与えた応力-ひずみ関係式 $\bar{\sigma}_x = E\epsilon / [1 + E\epsilon / \sigma_y]^{1/n}$ 、(E は弾性係数、 σ_y は降伏応力、 n は形状係数)によって求まる。 $\bar{D}_{ii} = \bar{D}_{ii} D_{ii}$ 、 $\bar{D}_{yi} = \bar{D}_{yi} D_{yi}$ 、 $\bar{D}_{ii} = \bar{D}_{ii} D_{ii}$ 、 $\bar{D}_{xyi} = \bar{D}_{xyi} D_{xyi}$ で、 $\bar{D}$ は非弾性域における剛度、 D は弾性域における剛度、 $\bar{t}$ は低減係数でBleich⁴⁾の理論を準用する。また、 D_{ii} 、 D_{yi} および $D_{ii} + 2D_{xyi}$ はそれぞれ x_i 方向、 y_i 方向曲げ剛度および有効ねじり剛度であり、 $i=1$ の場合は腹板を、 $i=2$ の場合は圧縮フランジを示す。ここで、腹板の応力は x_1 方向に一樣、圧縮フランジの応力は x_2 方向、 y_2 方向に一樣とし、腹板および圧縮フランジのたわみを載荷辺における境界条件を満足する関数 $w_i = \sum_{m=1}^{\infty} f_i(\xi_i) \sin(m\pi x_i/l)$ 、 $\xi_i = y_i/b_i$ で表わすと式(1)は f_i に関する常微分方程式に変換できる。

差分法を用い、断面の垂直軸に関する対称性を考え、1/2断面を解析する。弾性座屈の厳密解¹⁾に対する差分解の精度を調べたところ腹板を40分割、圧縮フランジの半分を20分割した場合に解の誤差は0.2%以内であったので、この分割を採用した。

3. 解析結果 補剛腹板の剛度と腹板主板の剛度との比を $D_{x1}/D_{o1}=D_{y1}/D_{o1}=20$, $D_{h1}/D_{o1}+2D_{zy1}/D_{o1}=1$, 圧縮補剛フランジの剛度と圧縮フランジ主板の剛度との比を $D_{x2}/D_{o2}=50$, $D_{y2}/D_{o2}=100$, $D_{h2}/D_{o2}+2D_{zy2}/D_{o2}=1$ とした場合の計算結果を示す。ただし, M_{cr} は座屈モーメント, M_{yf} は圧縮フランジ全断面降伏モーメントで, いずれも腹板水平補剛材の断面積を無視した。

圧縮フランジ主板と腹板主板の剛度比を $D_{x2}/D_{o1}=8$ とし, フランジ幅と腹板高の比が $b_2/b_1=0.5\sim1.5$ の範囲の座屈荷重曲線を図-2(a)に, $b_2/b_1=0.5, 1, 1.5$ の場合の最小座屈荷重を与える腹板縦横比 l/b_1 に対する理論座屈モードを図-2(b)に示す。 b_2/b_1 の値が増すと, すなわち箱断面が縦長から横長になるに伴い座屈荷重は低下し, 有効座屈長は長くなる。また, 理論座屈モードからは, 縦長断面($b_2/b_1=0.5$)の場合には腹板座屈が卓越し, 正方形断面($b_2/b_1=1$)の場合には腹板とフランジが同時に座屈し, 横長断面($b_2/b_1=1.5$)の場合にはフランジ座屈が卓越していることが分かる。

次に, 圧縮フランジの剛度と腹板の剛度との関係が座屈荷重に及ぼす影響を図-3に示す。フランジ剛度が腹板剛度に比べてそれ程大きくない場合にはフランジ座屈が卓越し, この場合にはフランジ剛度を増すことによって座屈荷重は増大する。フランジ剛度と腹板剛度との比がある値以上になると腹板座屈が卓越し, フランジ剛度を増加しても座屈荷重は増加しない。フランジ座屈が卓越する場合の有効座屈長は長く, 腹板座屈が卓越する場合のそれは短い。

4. 理論値と実験値の比較 先に, スパン8m, 桁高1.5m, 腹板間隔1mの全溶接鋼箱桁模型(図-4)に対する曲げ破壊実験を行った。試験パネルの長さは2m, 圧縮フランジには縦方向に9本, 横方向に4本の補剛材が, 腹板には水平方向に5本, 垂直方向に4本の補剛材が配置されている。この結果と理論値を比較すると表-1のようになる。崩壊モーメント M_{ult} を次式のように考える。

$$M_{ult} = M_{yf}^* (M_{cr} / M_{yf})$$

ここに, M_{yf}^* は箱桁の全断面(腹板水平補剛材を含む)に対する断面2次モーメントを用いて計算した圧縮フランジ主板中央面降伏モーメントである。理論値は実験値に対して6%以内の安全側の値として求まり, 本理論を用いて多数の補剛材を有する鋼箱桁の曲げ耐荷力を十分な精度で推定することが可能であると考えられる。

- 1) 米沢・三上: 箱桁の弾性座屈について, 土木学会論文集, No.120, 1965-8. 2) 三上・堂垣・宮花・米沢: 多数の補剛材を有する箱桁の曲げ耐荷力実験, 関西支部年次学術講演会, 1979. 3) Richard and Blacklock: Finite element analysis of inelastic structures, AIAA Journal, Vol. 7, No.3, Mar., 1969. 4) Bleich: Buckling Strength of Metal Structures, McGraw-Hill, New York, 1952.

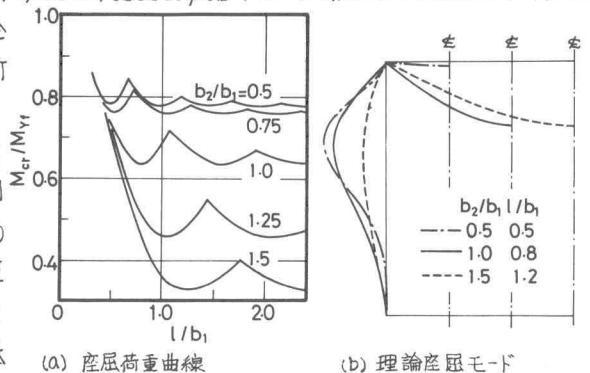


図-2

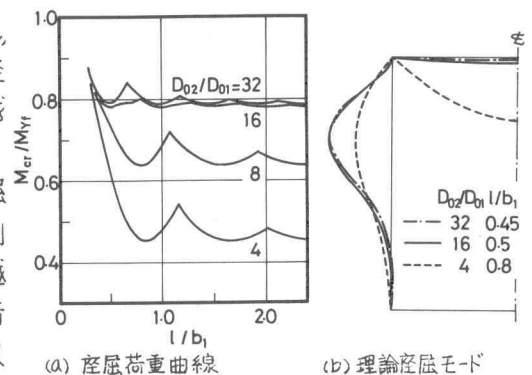


図-3

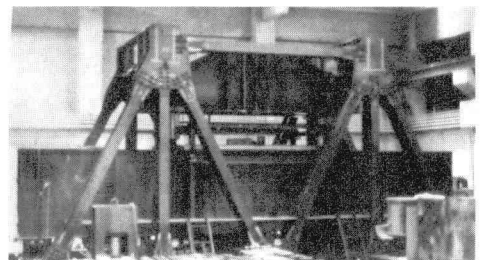


図-4

表-1

Model No.	Observed (M_{ult}/M_{yf}^*)	Predicted (M_{cr}/M_{yf})		Observed Predicted
		D	T	
6-1	0.976	1.037	0.959	1.02
6-3	1.036	1.034	0.978	1.06

D; Buckling between diaphragms

T; Buckling between transverse stiffeners