

I-62

部分縁荷重を受けるプレート・ガーダーの終局強度

榎栗本鐵工所 正会員○岸上信彦

関西大学工学部 正会員 米澤 博

関西大学工学部 正会員 堂垣正博

1. まえがき 桁の送り出し架設時のように、薄肉構造の境界の一部に局所的な荷重が作用すれば、薄板にはクリッピングと呼ばれる局部座屈が生ずることはよく知られている。部分縁荷重を受けるプレート・ガーダーの終局強度に関する理論的および実験的研究は数多くなされている¹⁾。これらのうち、幾何学的かつ材料的非線形性を考慮し、複合非線形解析からプレート・ガーダーの変形性状と終局強度を明らかにした研究は比較的少ない^{2) 3)}。ここでは部分縁荷重が作用するプレート・ガーダーを対象に、初期たわみや残留応力がその非線形挙動と終局強度に及ぼす影響を弾塑性有限変位解析によって明らかにする。

2. つり合い式と境界条件 図-1に示す長さ a 、幅 b 、厚さ t の腹板と、幅 b_f 、厚さ t_f の上下フランジからなる2軸対称断面のプレート・ガーダーが幅 c の部分縁荷重を受ける場合を次の仮定のもとに解析する。すなわち、1) Kirchhoff-Loveの仮定。2) 腹板とフランジとはともに完全弾塑性体からなり、ひずみ硬化を生じない。3) 部材の降伏は von Misesの降伏判定式に従う。4) フランジの局部座屈は考えない。

(1) 弾塑性時のつり合い式：弾塑性状態における腹板の x 、 y 、 z 方向の力のつり合い式をLin, Massonnetの方法に従って誘導すれば、

$$(N_x^e, x + N_{xy}^e, y) - (N_x^p, x + N_{xy}^p, y) = 0 \quad (1)$$

$$(N_{xy}^e, x + N_y^e, y) - (N_{xy}^p, x + N_y^p, y) = 0 \quad (2)$$

$$M_x^e, xx + 2M_{xy}^e, xy + M_y^e, yy + N_x^e \bar{w}, xx + 2N_{xy}^e \bar{w}, xy + N_y^e \bar{w}, yy - (M_x^p, xx + 2M_{xy}^p, xy + M_y^p, yy + N_x^p \bar{w}, xx + 2N_{xy}^p \bar{w}, xy + N_y^p \bar{w}, yy) = 0 \quad (3)$$

となる。ここに、 $\bar{w}$ は腹板の全たわみで、初期たわみ w_0 と荷重によるたわみ w の和で与えられる。 N_x 、 N_y は x および y 方向の膜力、 N_{xy} は膜せん断力である。 M_x 、 M_y は x および y 方向の曲げモーメント、 M_{xy} はねじりモーメントである。上添字 e 、 p はそれぞれ任意の荷重下で弾塑性状態のプレート・ガーダーを弾性状態と仮定して求められる腹板の断面力と、弾塑性域での真の断面力を得るために弾性断面力を低減する仮想断面力を示す。仮想断面力は、弾性断面力から計算される von Misesの等価応力が降伏点応力を越える場合、その超過量を板厚方向に数値積分して求められる。コンマに続く添字はそれに関する偏微分を表す。

(2) 境界条件：腹板は垂直補剛材上で単純支持され、その辺で x 方向の軸圧縮力や面内曲げモーメントを受けないものとすれば、

$$u \mp u_a \pm (y-b/2) \phi = 0, \quad v = v_s, \quad \bar{w} - w_0 = 0, \quad \bar{w}, xx - w_0, xx = 0$$

$$\int_0^b N_x^e dy + N_{fu}^e + N_{fl}^e - \left(\int_0^b N_x^p dy + N_{fu}^p + N_{fl}^p \right) = 0, \quad \int_0^b N_x^e y dy + N_{fl}^e b - \left(\int_0^b N_x^p y dy + N_{fl}^p b \right) = 0 \quad (4)$$

となる。ここに、 u 、 v は x および y 方向の変位、 v_s は垂直補剛材辺に与えられる鉛直方向変位、 u_a および ϕ は垂直補剛材辺で軸力および面内曲げモーメントがゼロとなるように決定される面内変位および面内回転角である。また、上式の第5および第6式はこの辺上で軸力と面内曲げモーメントがともにゼロとなる条件で、 N_{fu} 、 N_{fl} はそれぞれ上下フランジの軸力である。複号のうち、上段の符号は $x=a/2$ 辺で、下段の符号は $x=-a/2$ 辺で用いられる。下フランジ辺のうち支持されていない部分($c/2 \leq |x| \leq a/2$)、ならびに上フランジ辺での x 、 y および z 方向の力のつり合いとねじりに関するつり合いから、

$$N_{f, x} \pm N_{xy}^e - (N_{f, x} \pm N_{xy}^p) = 0$$

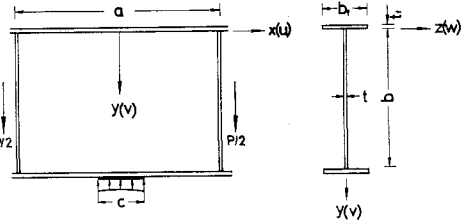


図-1

$$\begin{aligned}
 M_{rz}^e,_{xx} \pm N_y^e + N_f^e v,_{xx} \mp N_{xy}^e v,_{xx} - (M_{rz}^p,_{xx} \pm N_y^p + N_f^p v,_{xx} \mp N_{xy}^p v,_{xx}) &= 0 \\
 M_{ry}^e,_{xx} \pm M_y^e,_{yy} \pm 2M_{xy}^e,_{xy} + N_f^e \bar{w},_{xx} \mp N_{xy}^e \bar{w},_{xx} \\
 - (M_{ry}^p,_{xx} \pm M_y^p,_{yy} \pm 2M_{xy}^p,_{xy} + N_f^p \bar{w},_{xx} \mp N_{xy}^p \bar{w},_{xx}) &= 0 \\
 M_y^e \mp M_t^e,_{xx} - (M_y^p \mp M_t^p,_{xx}) &= 0
 \end{aligned} \quad (5)$$

を得る。ここに、 N_f は上下フランジの軸力、 M_{rz} 、 M_{ry} 、 M_t はそれぞれ上下フランジの弱軸および強軸回りの曲げモーメントとねじりモーメントである。また、複号のうち、上段の符号は上フランジ辺で、下段の符号は下フランジ辺で用いられる。一方、下フランジ辺のうち桁が支持されている部分では、 x 方向の力のつり合いとフランジが y および z 方向に固定されている条件を考えれば、次式が得られる。

$$N_f^e,_{xx} - N_{xy}^e - (N_f^p,_{xx} - N_{xy}^p) = 0, \quad v = 0, \quad \bar{w} - w_0 = 0, \quad \bar{w},_{yy} - w_0,_{yy} = 0 \quad (6)$$

(3) 数値解析法：数値解析には差分法を用い、多元連立非線形代数方程式を修正Newton-Raphson法により解く。なお、多元連立一次方程式の解法に三角分解法を用い、演算時間の短縮を図った。また、すべての式を無次元化し、解析結果が広範なプレート・ガーダーに適用可能なようにした。

3. 数値解析結果 広範な数値計算を実施する前に、差分分割数や板厚方向の分割数と解の精度を調べた結果、腹板を x 、 y 方向にそれぞれ20分割、板厚方向に10分割、フランジを幅および厚さ方向にそれぞれ10、6分割すれば、精度のよい結果の得られることが分かった。腹板とフランジはいずれもSM41材からなり、降伏点応力 $\sigma_p = 2400 \text{ kgf/cm}^2$ 、ヤング率 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ とした。

縦横比 $a/b = 1$ 、腹板の幅厚比 $b/t = 150$ 、フランジと腹板の断面積比 $b_f t_f / bt = 0.5$ 、フランジの幅厚比 $b_f / t_f = 25$ で、 x 、 y 方向にともに一半波の正弦波の初期たわみの最大値が $w_{0\max} = b/2500$ の場合、荷重幅 $c/a = 0.1 \sim 0.5$ に対する $x=0, y=3b/4$ での腹板のたわみ w/t と荷重 $P/2Q_y$ の関係は図-2のようになる。ここに、 Q_y は腹板の降伏せん断力を、●は初期降伏を、▼は最高荷重を示す。荷重によるたわみはいずれの荷重幅でも初期たわみの方向に起きる。初期たわみが存在しているため、初期の荷重段階から面外の変形が生ずるが、その量は極めて少なく、荷重とともにほぼ線形的に増加する。また、荷重の幅が狭いと、幅の広い場合に比べて荷重レベルの低い段階で初期降伏が起きる。いずれの荷重幅でもある荷重に達すると、急に面外の変形が発達する。変形が急増する近傍で腹板のクリッピング座屈の特徴が顕著に現れるようになる。荷重幅が小さい場合にはクリッピング座屈が生じた後の後座屈領域が少ない。これはプレート・ガーダー全体の剛性が完全に発揮されず、局部的に崩壊することを意味する。

次に、幅厚比が $b/t = 125 \sim 250$ の場合に対して終局荷重と荷重幅の関係を示せば、図-3のようになる。幅厚比が125および150の場合、荷重幅が0.1から0.2の間でかなりの強度の増加が認められる。0.2以上では他の幅厚比の場合と同様、終局強度は荷重幅とともにほぼ直線的に増大する。幅厚比が大きいと、荷重幅の相違による強度の差異が減少し、支持する幅を大きく

しても幅厚比の小さい場合ほどその効果が現れない。その他の結果については講演会当日に述べる。

参考文献 1)三上市蔵：第9章 座屈設計ガイドライン，土木学会編，pp.193-233，1987-10. 2)Weimar, K. and E. Ramm : ECCS Colloquium on Stability of Plate and Shell Structures, Ghent University, 6-8 April, pp.79-84, 1987. 3)清水・吉田・田代：第42回土木学会年次学術講演会講演概要集，I-58，1987-9.

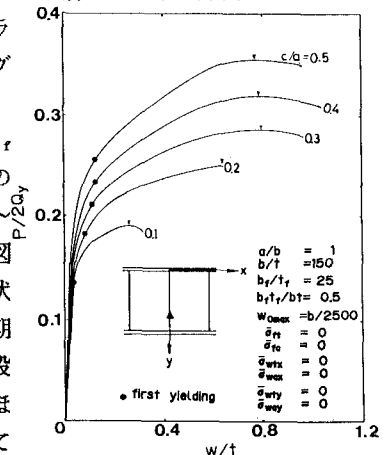


図-2

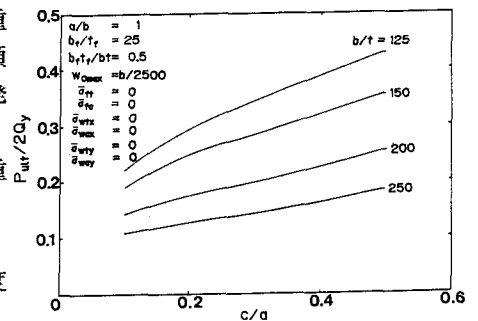


図-3