

I-63

腹板の局部変形を考慮したプレート・ガーダーの終局曲げ強度

㈱日本構造橋梁研究所 正会員○関川 利雄

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 鋼構造に対する限界状態設計法の実現に向け、数多くの終局強度解析や実験的研究が精力的に実施されている。曲げを受ける腹板パネルの終局強度解析はすでに行われているが、フランジをも含めたプレート・ガーダーとしての変形性状や終局曲げ強度を弾塑性有限変位解析から求めようとする試みは比較的少ない。ここでは垂直補剛材間のプレート・ガーダーを上下フランジで弾性支持および弾性回転拘束された腹板にモデル化し、純曲げを受ける場合のプレート・ガーダーの複合非線形挙動を理論的に調べる。腹板の幅厚比、フランジの断面積および幅厚比、初期たわみならびに残留応力などがプレート・ガーダーの非線形挙動や終局曲げ強度に及ぼす影響を明らかにする。

2. 基礎式と境界条件式 Fig. 1に示す長さ a 、幅 b 、厚さ t の腹板と、幅 b_f 、厚さ t_f のフランジからなる二軸対称断面のプレート・ガーダーが純曲げを受ける場合、その複合非線形解析を次の仮定の下に行う。

1) Kirchhoff-Love の仮定。2) 部材は完全弾塑性体で、ひずみ硬化は考えない。3) 部材の降伏は von Mises の降伏判定式に従う。

弾塑性状態での腹板の x 、 y および z 方向の力のつり合い式を Lin, Massonnet の方法により誘導すれば、

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

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

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

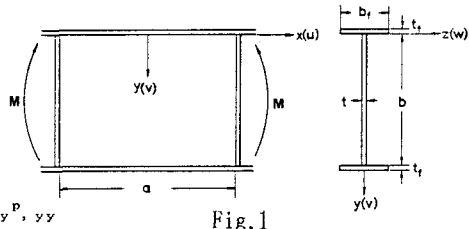


Fig.1

が得られる。ここに、 $\bar{w}$ は初期たわみ w_0 と荷重によるたわみ w の和すなわち全たわみである。 N_x 、 N_y は x 、 y 方向の膜力、 N_{xy} は膜せん断力、 M_x 、 M_y は x 、 y 方向の曲げモーメントおよび M_{xy} はねじりモーメントである。上添字 e は弾塑性状態の腹板を弾性のままに仮定して Hooke の法則と弾性有限変位場のひずみ-変位関係式から求められる断面力を、上添字 p は断面内の塑性化を考慮し、弾性断面力を低減するための仮想断面力を示す。仮想断面力は、弾性断面力から求められる von Mises の等価応力が降伏点応力 σ_p 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。また、コンマに続く添字はそれに関する偏微分を表す。

腹板は垂直補剛材上で単純支持され、純曲げの状態にあるものと仮定すれば、境界条件式が

$$u \pm u_a = \mp \phi (y - b/2), N_s^e, y \pm N_{yx}^e - (N_s^p, y \pm N_{yx}^p) = 0, \bar{w} - w_0 = 0, \bar{w}, xx - w_0, xx = 0, \int_0^b N_x^e dy + N_f^e \Big|_{y=0} + N_f^e \Big|_{y=b} - \left(\int_0^b N_x^p dy + N_f^p \Big|_{y=0} + N_f^p \Big|_{y=b} \right) = 0 \quad \dots (4)$$

のように得られる。ここに、 ϕ は載荷辺での $y=b/2$ 点回りの面内回転角で、桁が鉛直下方に変位するように作用する方向を正とする。 u_a は載荷辺で軸力が生じないための未知変位で、上式の最後の式を満足するように決定される。 N_s 、 N_f はそれぞれ垂直補剛材とフランジの軸力である。また、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。

腹板が上下フランジで弾性支持および弾性回転拘束されるものと仮定すれば、次の境界条件式を得る。

$$\begin{aligned} N_f^e, x \pm N_{xy}^e - (N_f^p, x \pm N_{xy}^p) &= 0, \\ M_{fz}^e, xx \pm N_y^e + N_f^e v, xx \mp N_{xy}^e v, x - (M_{fz}^p, xx \pm N_y^p + N_f^p v, xx \mp N_{xy}^p v, x) &= 0, \\ M_{fy}^e, xx \pm M_y^e, y \pm 2M_{xy}^e, x + N_f^e \bar{w}, xx \mp N_{xy}^e \bar{w}, x \\ - (M_{fy}^p, xx \pm M_y^p, y \pm 2M_{xy}^p, x + N_f^p \bar{w}, xx \mp N_{xy}^p \bar{w}, x) &= 0, \\ M_y^e \mp M_t^e, x - (M_y^p \mp M_t^p, x) &= 0 \end{aligned} \quad \dots (5)$$

ここに、 M_{fz} 、 M_{fy} はそれぞれフランジの弱軸および強軸回りの曲げモーメント、 M_t は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。

数値解析法に差分法を用い、修正Newton-Raphson法で非線形解を求める。安定的に解を得るため、Lagrangeの補間法や加速Jacobi法などを用いた。なお、数値解析結果が広範なプレート・ガーダーに適用できるように、諸式を無次元化表示し解析した。

3. 数値解析結果 腹板での x 、 y および z 方向の分割数、フランジでの分割数など解の関係を調べた結果、腹板を x 、 y 方向に20、板厚方向に10分割、フランジを幅と板厚方向にそれぞれ10、6分割すれば、精度の良い解の得られることが分かった。初期たわみとして、 x 、 y 方向に半波の正弦波を仮定し、その最大値を現行道路橋示方書の制限値 $w_{0max}=b/250$ とした。なお、降伏点応力 $\sigma_p=2400\text{kgf/cm}^2$ 、縦弾性係数 $E=2.1\times 10^6\text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ とした。

フランジの断面積がプレート・ガーダーの終局曲げ強度に及ぼす影響を調べるため、桁両端での回転角 ϕ と曲げモーメント M/M_p の関係を描けば、Fig. 2を得る。ここに、 M_p は各桁の全塑性モーメントである。いずれの桁とも $M/M_p \leq 0.5$ までは M と ϕ は線形関係にあるが、その後徐々に桁の剛性が低下して崩壊に至る。次に、桁の終局曲げ強度曲線を描くと、Fig. 3を得る。ここに、縦軸は終局曲げ強度と桁の降伏モーメント M_y の比を、横軸は座屈パラメータ R を示す。ただし、横軸の R に含まれる k は周辺単純支持腹板の弾性曲げ座屈係数で、最小値23.9を用いた。また、残留応力は考慮しなかった。図から明らかなように、 $R \geq 1$ になれば、フランジの断面積が小さい場合のほうが座屈パラメータの相違による終局強度の低下が大きい。

残留応力の有無による桁両端での回転角 ϕ と曲げモーメント M/M_p の関係はFig. 4となる。残留応力を考慮しない場合、桁が初期降伏に達するまでの M と ϕ の関係は線形的である。初期降伏後、桁の剛性は急に失われる。一方、残留応力を考慮すれば、最初の荷重段階から引張フランジの一部や腹板と引張フランジの接合部は降伏に達している。このため、荷重の増加とともに塑性域が徐々に広がるようになり、荷重の低い段階から $M-\phi$ 曲線に非線形性が現われる。しかし、圧縮フランジの一部に引張残留応力があるため、桁の強度に大いに関係のある圧縮フランジの降伏が全体に及ばない。この結果、残留応力を考慮した場合のほうがしなない場合に比べて桁の終局強度は約1.5%程高くなった。桁中央断面での塑性域の拡がりにはFig. 5のようである。残留応力を考慮しない場合、B点からC点へ荷重が増えると、フランジに塑性域が現われ、桁の剛性が急に失われることが分かる。一方、残留応力を考えた場合、引張フランジには早くから塑性域が現われる。しかし、圧縮フランジでは荷重が増えても引張残留応力により圧縮フランジ全体には降伏域が進展しない。

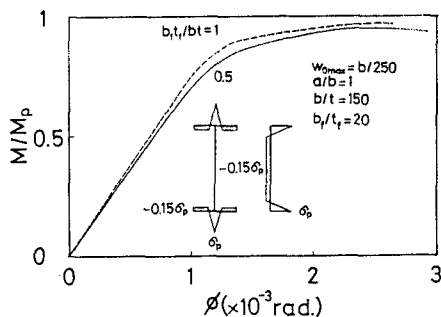


Fig. 2

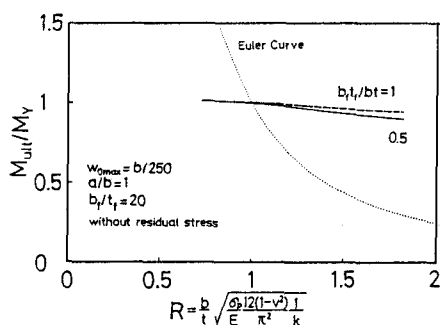


Fig. 3

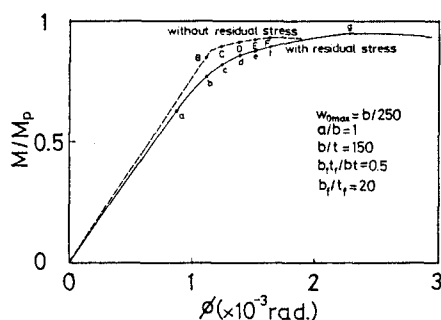


Fig. 4

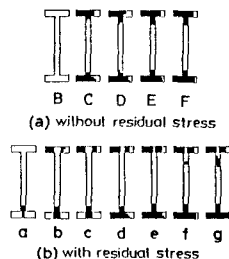


Fig. 5