

1. まえがき 左右で大きさの異なる曲げモーメントとそれにつり合うせん断力が作用するプレートガーダー腹板の終局強度に関する理論的研究は、現在までのところ、あまりなされていない¹⁾。ここでは、連続桁の中間支点近傍のプレートガーダーを対象に、垂直補剛材間の腹板、上下フランジおよび水平補剛材からなる桁一パネルを上下フランジと水平補剛材で弾性支持および弾性回転拘束された薄板にモデル化し、幾何学的・材料的非線形性を考慮した腹板、上下フランジおよび水平補剛材の連成挙動を明らかにする。広範なパラメトリック解析を行い、せん断力と曲げモーメントの割合、初期たわみ、水平補剛材の曲げ剛比などが桁一パネルの非線形挙動と終局強度に及ぼす影響を調べる。

2. 基礎式 図-1に示す長さ a 、幅 b 、厚さ t の腹板、幅 b_f 、厚さ t_f の上下フランジおよび上フランジから距離 b' に設けられた幅 b_h 、厚さ t_h の水平補剛材からなる垂直補剛材間の桁一パネルが左右で大きさの異なる曲げとそれにつり合うせん断力を受ける場合の複合非線形解析をつぎの仮定のもとに行う。すなわち、①Kirchhoff-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 の等価応力に従う。

(1) つり合い式：弾塑性状態の腹板の x 、 y 、 z 方向の力のつり合い式をLinおよびMassonnetの弾塑性理論に従って誘導すれば

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

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

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

を得る。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 はそれぞれ x および y 方向の膜力、 N_{xy} は膜せん断力、 M_x および M_y はそれぞれ 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。断面力につけられた上添字 e と p はそれぞれ桁の一部が降伏し弾塑性状態にあっても桁の全断面が弾性のままであると仮定して求められる断面力と、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である。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_f を超える場合、その超過量を板厚方向に数値積分して求められる。また、コンマに続く下添字はそれに関する偏微分を表す。

(2) 境界条件：左右で大きさの異なる曲げモーメントとそれにつり合うせん断力を受ける腹板は垂直補剛材上で単純支持されるものとすれば、 $x=0$ において

$$u=0, \quad N_s^e{}_{,y} + N_{xy}^e - (N_s^p{}_{,y} + N_{xy}^p) = 0, \quad \bar{w} - w_0 = 0, \quad \bar{w}_{,xx} - w_{0,xx} = 0 \quad (4)$$

ただし、 $x=0$ 、 $y=b$ では $u=0$ 、 $v=0$ とする。ここに、 N_s は垂直補剛材の軸力である。また、 $x=a$ において

$$u=(b/2-y)\phi, \quad v-v_a=0, \quad \bar{w}-w_0=0, \quad \bar{w}_{,xx}-w_{0,xx}=0 \quad (5)$$

のようになる。ここに、 ϕ は $x=a$ 辺での中立軸まわりの面内回転角で、時計まわりを正とする。 v_a はせん断力と等価な作用の鉛直方向変位で、次式を満足するように求められる。

$$\psi_M(M/M_p) - \psi_S(S/S_p) = 0 \quad (6)$$

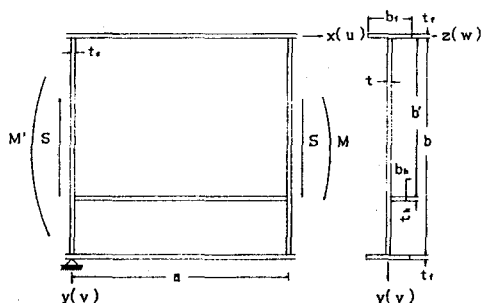


図-1

ここに、 M と M_p はそれぞれ $x=a$ での中立軸まわりの桁の面内曲げモーメントと全塑性モーメントを、 S と S_p はそれぞれ $x=a$ における腹板のせん断力と全塑性せん断力である。 ψ_m と ψ_s は荷重係数である。

つぎに、腹板が上下フランジによって弾性支持および弾性回転拘束されているものとするれば

$$\begin{aligned} N_f^e \pm N_{xy}^e - (N_f^p \pm N_{xy}^p) &= 0 \\ M_{fz}^e \pm N_y^e + N_f^e v_{xx} \mp N_{xy}^e v_{x,x} - (M_{fz}^p \pm N_y^p + N_f^p v_{xx} \mp N_{xy}^p v_{x,x}) &= 0 \\ M_{fy}^e \pm M_{y,y} \pm 2M_{xy}^e \pm N_f^e \bar{w}_{xx} \mp N_{xy}^e \bar{w}_{x,x} - (M_{fy}^p \pm M_{y,y} \pm 2M_{xy}^p \pm N_f^p \bar{w}_{xx} \mp N_{xy}^p \bar{w}_{x,x}) &= 0 \\ M_y^e \mp M_{\theta}^e \pm (M_y^p \mp M_{\theta}^p) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

の境界条件を得る。ここに、 N_f はフランジの軸力、 M_{fz} と M_{fy} はそれぞれフランジの弱軸および強軸まわりの曲げモーメント、 M_{θ} はねじりモーメントである。また複号のうち、上段は上フランジ辺、下段は下フランジ辺で用いられる。

(3) 連続条件：上フランジから距離 b' にある水平補剛材で区切られた2枚の腹板パネルのうち、上フランジ側をパネル1、もう一方をパネル2とすると、水平補剛材上で両パネルの x 、 y および z 方向の変位と y 方向のたわみ角が連続する。すなわち

$$u_h = u_1 = u_2, \quad v_h = v_1 = v_2, \quad \bar{w}_h - w_{0h} = \bar{w}_1 - w_{01} = \bar{w}_2 - w_{02}, \quad \bar{w}_{h,y} - w_{0h,y} = \bar{w}_{1,y} - w_{01,y} = \bar{w}_{2,y} - w_{02,y} \quad (8)$$

また、水平補剛材に作用する 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を考えると

$$\begin{aligned} N_h^e \pm (N_{x1}^e - N_{x2}^e) - \{N_h^p \pm (N_{x1}^p - N_{x2}^p)\} &= 0 \\ M_{hz}^e \pm (N_{y1}^e - N_{y2}^e) + N_h^e v_{xx} + (N_{x1}^e - N_{x2}^e) v_{x,x} - \{M_{hz}^p \pm (N_{y1}^p - N_{y2}^p) + N_h^p v_{xx} + (N_{x1}^p - N_{x2}^p) v_{x,x}\} &= 0 \\ M_{hy}^e \pm (M_{y1}^e \pm M_{y2}^e) - 2(M_{x1}^e \pm M_{x2}^e) + N_h^e \bar{w}_{xx} + (N_{x1}^e - N_{x2}^e) \bar{w}_{x,x} \\ - \{M_{hy}^p \pm (M_{y1}^p \pm M_{y2}^p) - 2(M_{x1}^p \pm M_{x2}^p) + N_h^p \bar{w}_{xx} + (N_{x1}^p - N_{x2}^p) \bar{w}_{x,x}\} &= 0 \\ M_{\theta}^e \pm (M_{y1}^e - M_{y2}^e) - \{M_{\theta}^p \pm (M_{y1}^p - M_{y2}^p)\} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 N_h は水平補剛材の軸力、 M_{hz} と M_{hy} はそれぞれ水平補剛材の弱軸および腹板の中立軸まわりの曲げモーメント、 M_{θ} はねじりモーメントである。ただし、下添字 h 、1、2はそれぞれ水平補剛材、パネル1およびパネル2を表す。

(4) 数値計算法：上述のつり合い式、境界条件式および連続条件式を変位表示し、それらに差分法を適用すれば、多元連立の非線形代数方程式を得る。それを増分法と修正Newton-Raphson法の混合法で解けば、非線形解を得る。なお、多元連立一次方程式の解法には三角分解法を用い、演算時間を短縮した。また、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した。

3. 数値解析結果 3種類の曲げモーメントとせん断力の

組合せ荷重が作用する場合、桁一パネルの右端での曲げモーメント M/M_p と面内回転角 ϕ の関係を描けば図-2を得る。ここに、水平補剛材の曲げ剛比 γ は道路橋示方書で定められる必要最小曲げ剛比 γ^* の5倍とした。また、初期たわみとして、 x および y 方向に半波の正弦波を仮定した。なお、降伏点応力 $\sigma_y = 2400 \text{ kgf/cm}^2$ 、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。図から明らかなように、初期降伏までの曲げモーメントと面内回転角の関係はほぼ線形である。また、せん断力が働くようになると、強度は低下する。その作用が強くなるほど強度は大きく下がり、初期降伏が早く現れるようになる。

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) 中沢・倉西：構造工学論文集，Vol.37A，1991-3。

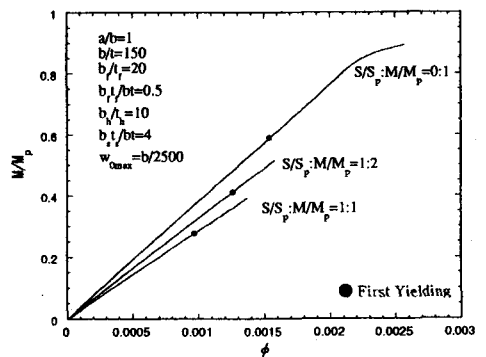


図-2