

建設省 近畿地方建設局 正会員○井上 顕史
 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 近年、初期不整を有する圧縮板や圧縮補剛板の幾何学的・材料的非線形解析は比較的多くなされてきたが、数枚の補剛パネルからなる連続補剛板の複合非線形解析はほとんどなされていないようである〔1〕。ここでは、圧縮補剛板の非線形解析法に基づき〔2〕、初期たわみおよび残留応力を有し、一方向圧縮を受ける連続補剛板の弾塑性有限変位解析を行った結果について述べる。横補剛材が非線形挙動や耐荷力に及ぼす影響を明らかにするため、横補剛材間の縦方向に補剛された板をそれと等価な直交異方性板に置換し、その接合部が支持ばりで弾性支持されているものとみなし、数枚の補剛パネルからなる連続直交異方性板として解析する。数値計算結果から、初期たわみ、残留応力、横補剛材曲げ剛度、縦横比などが連続補剛板の変形挙動や耐荷力に及ぼす影響を明らかにする。

2. 弾塑性有限変位理論 Fig. 1 に示すような連続補剛板に初期たわみ w_0 と残留応力 σ_0 が生じ、x方向に圧縮される場合を考える。以下の仮定のもとに解析する。1) Kirchhoff-Loveの仮定。2) 部材は完全弾塑性体とし、ひずみ硬化は考えない。3) 支持ばり間の補剛パネルがx方向にのみ補剛され、その方向に圧縮されることを勘案し、主板および補剛材部分とも $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ の応力を単独に用いて降伏判定する。それぞれの応力が降伏点応力 σ_p あるいは $\sigma_p/\sqrt{3}$ に達すると塑性が発生するものとする。

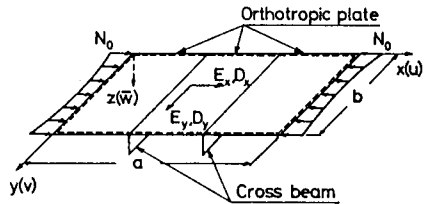


Fig. 1

(1) 基礎微分方程式：筆者はすでに圧縮補剛板の非線形挙動と耐荷力が明らかになる弾塑性有限変位解析法を発表した〔2, 3〕。この方法はLin, Massonnetの弾塑性解析法に基づくもので、弾性有限変位場のつり合い式に断面の塑性化を表す仮想荷重項を付加して解析するものである。すなわち、弾塑性状態での断面力表示のx, y, z方向の力のつり合い式は次のように与えられる。ただし、仮想荷重項には下線を施した。

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

$$N_{xyi,x}^e + N_{yiy}^e - \underline{N_{xyi,x}^p} - \underline{N_{yiy}^p} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$M_{xi,xx}^e + 2 M_{xyi,xy}^e + M_{yiy,yy}^e + N_{xi}^e \bar{w}_{i,xx} + 2 N_{xyi}^e \bar{w}_{i,xy} + N_{yiy}^e \bar{w}_{i,yy} - \underline{M_{xi,xx}^p} - 2 \underline{M_{xyi,xy}^p} - \underline{M_{yiy,yy}^p} - \underline{N_{xi}^p} \bar{w}_{i,xx} - 2 \underline{N_{xyi}^p} \bar{w}_{i,xy} - \underline{N_{yiy}^p} \bar{w}_{i,yy} = 0 \dots\dots (3)$$

ここに、 $\bar{w}_i$ は直交異方性板i (i = 1 ~ n: nはパネル数)のz方向の全たわみである。上添字eの断面力は連続補剛板が弾塑性状態にある場合に弾性状態を仮定して求められる膜力、膜せん断力と曲げ、ねじりモーメントであり、弾性有限変位場の式から求められる。また、上添字pの断面力は断面の塑性化を評価する仮想断面力で、弾性断面力から求められる応力 $\sigma_{xi}^e, \sigma_{yi}^e, \tau_{xyi}^e$ が降伏点応力を超過した場合、その超過量の板厚方向の数値積分から求められる。ただし、 σ_{xi}^e は縦補剛材とその間隔 b_y の主板からなるT断面部分で考え、Fig. 2の残留応力を加えて降伏判定する。さらに、除荷作用が考慮できる工夫をし、仮想断面力を算定する。なお、上式の上添字中、コンマに続く添字はそれに関する偏微分を表す。

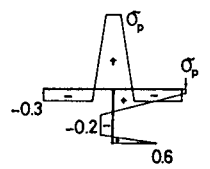


Fig. 2

結局、弾性状態仮定の変位表示の断面力を式(1)~(3)に代入すれば、非線形三元連立偏微分方程式を得る。

(2) 境界および連続条件：面内変形の境界条件として、 $x=0$ 辺で $u=N_{xy}=0$ 、 $x=a$ 辺で $u=-u_m$ の圧縮強制変位と $N_{xy}=0$ とする。 $y=0$ 、 b の側辺では $N_{yi}=N_{xyi}=0$ とする。面外変形に対しては周辺単純支持を仮定する。面内変形に関する連続条件として、支持ばりの面内変形への影響を考えず、 x と y 方向の変位、 x 方向膜力、膜せん断力がそれぞれ接合部で連続するものとする。面外変形に対しては、たわみとたわみ角が連続し、両補剛パネルの x 方向曲げモーメントと反力がそれぞれねじりモーメントと分布荷重として支持ばりに作用するものとする。ただし、支持ばりは弾性挙動するものとして取扱った。

3. 数値計算法 式(1)~(3)は非線形連立偏微分方程式であり、境界および連続条件のもとに厳密解を求めることは非常に難しい。ここでは差分法を用い、非線形多元連立一次方程式に変換後、解の収束を早めるパラメータを用いて反復解を求めることにした。また、塑性化の影響を式(1)~(3)に示す下線部の仮想荷重として扱うことにより板剛度を含む多元連立一次方程式の係数行列は各荷重段階ごとに常に不変となるため、方程式を演算時間の節約できる三角分解法によって解いた。

4. 数値計算結果 差分法の精度を調べた結果、パネル当たり x 、 y 方向に12分割すればよいことが分かった。また、本法では簡易な降伏条件を用いたが、圧縮力が作用する補剛板の場合には本条件と von Mises の条件による弾塑性解はほとんど変わらなかった。以下の計算では、Fig. 2 の残留応力と横補剛材間で x および y 方向に一半波の正弦波の初期たわみを用いる。また、横補剛材曲げ剛比 B_r/bD_y と最大初期たわみ w_{0max}/a_t は道路橋示方書の必要最小剛比 r_t^* と許容初期たわみ量 0.001 を基準にした。ただし、 a_t は横補剛材間隔である。なお、鋼材は S S 41 ($\sigma_p=24\text{kg/mm}^2$) とし、 $\nu=0.3$ で計算した。

$w_{0max}/a_t=0.0005, 0.001, 0.002$ の横補剛材上で節となる2半波の初期たわみを有する連続補剛板の場合、残留応力の有無による端部の平均圧縮応力とたわみの関係はFig. 3 のようになる。残留応力のない場合には初期たわみが大きいほど初期降伏応力、最高応力はともに低下するが、残留応力のある場合には初期たわみの大きさに関係なく、それらはほぼ一定値を示す。また、 $w_{0max}/a_t=0.001$ の場合に対する初期降伏時と終局時の $y=b/2$ 断面上のたわみ分布をFig. 4 に示す。この分布図によれば、初期降伏後、残留応力のない場合には負の初期たわみを有するパネル側が負の方向に、残留応力のある場合には正の初期たわみを有するパネル側が正の方向にそれぞれ著しく変形する。

次に、 $0.5 \leq a/b \leq 1.5$ の範囲に対して残留応力の有無による縦横比と初期降伏応力および最高応力の関係を示すとFig. 5を得る。残留応力のない場合には縦横比の増加とともに強度低下が生ずるが、残留応力のある場合には縦横比に無関係で最高強度はほぼ一定値を示す。

1) Komatsu, S., S. Nara and T. Kitada: Elasto-plastic analysis of orthogonally stiffened plates with initial imperfections under compression, Computers & Structures, Vol. 11, pp. 429-437, 1980. 2) Dogaki, M. and H. Yonezawa: Elasto-plastic analysis of stiffened rectangular plates with initial deflection under compression, Theoretical and Applied Mechanics, Univ. of Tokyo Press, Vol. 33, pp. 415-425, 1984. 3) 本田・米澤・堂垣：土木学会第38回年次学術講演会講演概要集，I-129，1983-9.

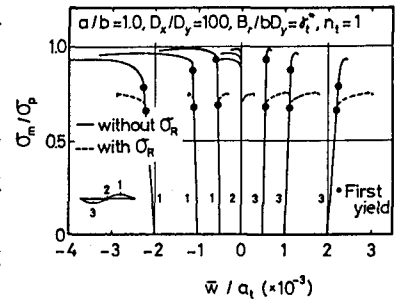


Fig. 3

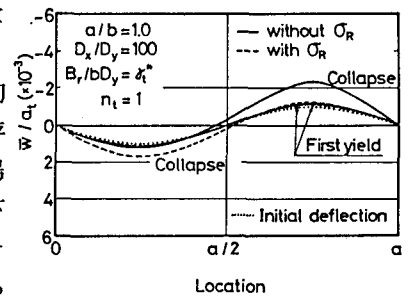


Fig. 4

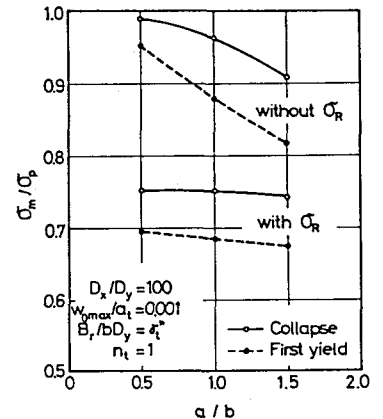


Fig. 5