

I-46

残留応力を考慮した I 形断面曲線桁の非弾性有限変位挙動

早稲田大学大学院	学生員	○	末武義崇
早稲田大学理工学部	正員		平嶋政治
早稲田大学理工学部	正員		依田照彦
早稲田大学大学院	学生員		工藤浩司

1. まえがき

I 形断面曲線桁の曲げ耐荷力特性は桁の弾塑性的な挙動に大きく支配されるため、解析にあたっては幾何学的非線形性のみならず材料非線形性をも考慮した、非弾性有限変位解析を実施することが必要不可欠である。そのため、最近では塑性流れを考慮した研究^{1)~3)}がなされるようになってきた。しかし、その数は非常に少なく、桁の曲げ耐荷力特性については検討課題が多く残されている。たとえば、I 形断面曲線桁を板殻構造物と見なし、残留応力をも考慮して解析を行った研究に藤井・大村の研究²⁾があるが、残留応力の有無が桁の力学的挙動や耐荷力特性に及ぼす影響については不明確なままである。

本報告では、同一モデルに対して残留応力を考慮した場合と考慮しない場合のそれぞれについて非弾性有限変位解析を実施し、両者の挙動、耐荷力、塑性域の進展状況等の比較を行った。解析手法としては、幾何学的非線形性を考慮した既往のHerrmannの混合法⁴⁾を基礎にして、塑性流れによる材料非線形性が考慮できるように再定式化を行った混合型有限要素法³⁾を用いている。

2. 有限要素定式化

筆者らは、塑性流れによる材料非線形性を考慮するにあたって、以下の仮定を導入した。(1) 構成則はReuss の流れ則に従う。(2) 降伏曲面はvon Mises 型の降伏関数で表現できる。(3) ひずみ硬化則としてZiegler の移動硬化則を用いる。以下の仮定に基づく、いわゆるZienkiewicz - 山田の式を構成方程式として採用し、文献⁴⁾を基礎にして次のような増分要素方程式を誘導した³⁾。

$$\begin{bmatrix} A_{mm} + C & b^T H^T + A_{mb} \\ H b + A_{mb}^T & -G_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta M_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta f - \Delta f^* \\ -\Delta \Phi \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 A_{mm} は面内剛性、 C は初期応力、 H は力の釣り合い、 G_{bb} は曲げを表現するマトリックスであり、 u は節点変位、 f は節点力、 M_n 、 Φ は要素境界における曲げモーメントと回転角を表わすベクトル、 Δf^* は非線形性によって各ステップ毎に生ずる不平衡力を表わしている。 A_{mb} は塑性流れの発生によって曲げと膜力が連成した結果生ずるマトリックスであり、 A_{mm} 及び G_{bb} にも塑性の効果が含まれている。なお、塑性域の板厚方向への広がりを評価するために各要素を9層に層割りをした。非線形解析に伴う収束計算については、不平衡力が与えられた増分荷重の1.0%以下になるまで実施し、増分ステップの進行に伴って誤差が累積することを防ぐために、各ステップの最終不平衡力を次ステップに繰り越すことにした。今回の解析手法の

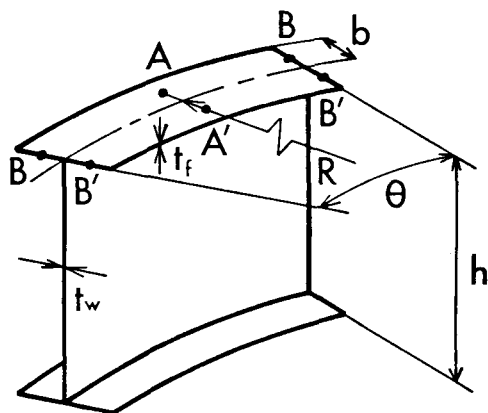


図1. 解析モデル

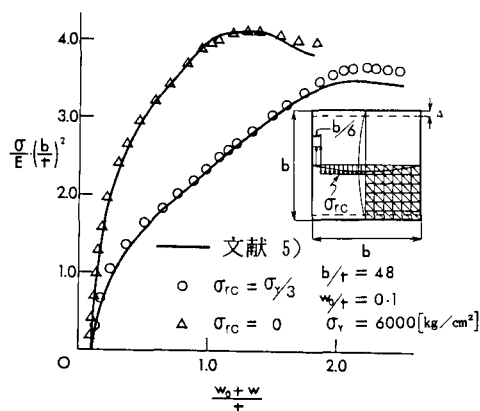


図2. 正方形平板の圧縮耐荷力解析

妥当性を検証するために正方形平板の圧縮耐荷力解析を実施して既往の文献⁵⁾の結果との比較を行った。解析モデルの寸法、初期たわみ、降伏応力、有限要素分割、残留応力の分布等は解析結果とともに図2に併記してある。図2を見ると、残留応力を考慮した場合も考慮しない場合も、挙動、耐荷力ともに文献⁵⁾の結果と一致しているようすがわかる。

3. 解析モデル

対象とした解析モデルを図1に示す。モデルの寸法は曲率パラメータ $Z=7.15$: $Z=h^2\sqrt{1-\nu^2}/R\cdot t_w$ 、ウェブ幅厚比 $h/t_w=150$ 、ウェブ縦横比 $R\theta/h=1.0$ 、フランジ幅厚比 $b/t_w=12$ 、フランジとウェブの断面積比 $A_f/A_w=1.0$ である。材料定数はYoung率 $E=2.1\times 10^6$ [Kg/cm²]、Poisson比 $\nu=0.3$ とし、鋼材はSS41を想定し降伏応力 $\sigma_y=2400$ [Kg/cm²] とした。また単軸状態の応力-ひずみ関係は、降伏後平坦な領域を経てからひずみ硬化を生ずるようなtri-linearな関係を仮定した。残留応力の分布は図3に示すとおりであり、フランジ、ウェブともに矩形分布とし、自己平衡条件を満足するものとした。荷重としてはフランジ部で一様分布、ウェブ部で線形分布する応力を与え、曲げを作用させた。境界条件はフランジ端部で曲げモーメント及び B 、 B' 点の面外変位が零、ウェブ端部で曲げモーメント及び面外変位を零とし、ウェブ端辺が上下方向に伸縮しないものとした。

4. 結果及び考察

解析結果を図4、5に示す。図4に残留応力を考慮した場合としなかった場合の圧縮フランジの回転挙動の変化を示した。グラフは縦軸にパネル端部のモーメントを降伏モーメントで割って無次元化した量を、横軸に圧縮フランジ中央辺(A-A')辺の回転角をとって図示してある。図から明らかに、残留応力を考慮すると考慮しない場合に比べ若干耐荷力が低下することがわかる。数値的には低下率は5%程度であり、それほど大きな低下は見られなかった。残留応力を考慮した場合の塑性域の進展状況を図5に示す。図5を見ると、図3の残留応力の分布に対応して塑性域が広がっているようすがわかる。

本報告では、前節で述べたように一種類のモデルについてのみ解析を行ったので、残留応力の影響を定量的に論ずることはできないが、今後解析例を増やしつつI形断面曲線桁の曲げ耐荷力特性に及ぼす残留応力の影響を明らかにしていきたいと考えている。

参考文献：1) 樋渡・倉西，土木学会論文集，1984-10. 2) 藤井・大村，構造工学論文集，1987-3. 3) 末武・平嶋・依田，構造工学論文集，1987-3. 4) 和田・滝，他，日本機械学会論文集，1987-3. 5) 小松・北田・宮崎，土木学会論文報告集，1975-12.

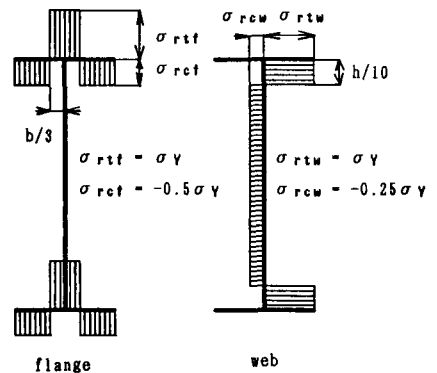


図3. 残留応力の分布

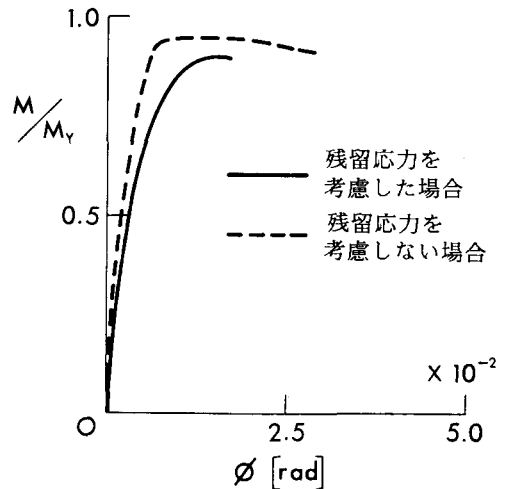


図4. フランジの挙動に対する残留応力の影響

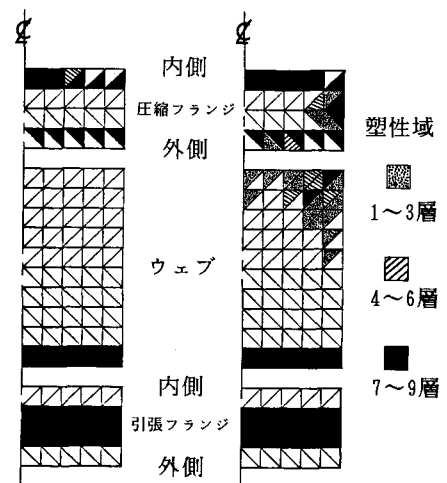


図5. 塑性域の進展状況（残留応力考慮）