

I-82 混合法を用いた I 形曲線桁の耐荷力解析

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

1. まえがき

I 形曲線桁の静力学的挙動に関する研究は、弾性解析に基づく研究が多く^{1), 2)}、材料非線形性を考慮した研究は少ない。現在では、弾性解析のみによって I 形曲線桁の耐荷力を求めることは不可能とされており、塑性流れを考慮した弾塑性解析の実施が強く望まれている。本研究では、幾何学的非線形性を考慮した既往の Herrmann の混合法³⁾を基礎に、塑性流れが考慮できるように要素方程式の再定式化を計り、垂直補剛材で挟まれた I 形曲線桁の 1 パネルについて弾塑性有限変位解析を実施し、耐荷力に及ぼす各種パラメータの影響を調べた。

2. 要素方程式

文献³⁾においては、有限要素定式化にあたって考慮されている非線形性は幾何学的非線形性のみであったが、本報告では塑性流れによる材料非線形性をも考慮し、次のような要素方程式を誘導した。

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

ここに、 A_{mn} は面内剛性、 C は初期応力、 H は力の釣り合い、 G 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それぞれ表わすベクトル、 R_f は前ステップまでの残差を表わしている。 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_{mn} 及び G にも塑性の影響が含まれている。塑性流れを考慮するにあたって以下の仮定を導入した。(1) 応力-ひずみ関係は Drucker の仮定に基づく流れ則に従う。(2) 降伏曲面は Mises 型の降伏関数で表現される。(3) ひずみ硬化則として Ziegler の移動硬化則を用いる。以上の仮定に基づく応力-ひずみマトリックス D^{ep} として次式を用いた⁴⁾。

$$D^{ep} = D^e - \frac{D^e \{ \partial F / \partial \sigma \} \{ \partial F / \partial \sigma \}^T D^e}{H_k' / \sigma_v + \{ \partial F / \partial \sigma \}^T D^e \{ \partial F / \partial \sigma \}} \quad (2)$$

ここに D^e : 弾性応力-ひずみマトリックス、 F : 降伏関数、 σ : 応力ベクトル、 σ_v : 降伏応力、 H_k' : 移動硬化率であり、 H_k' は単軸状態の応力-塑性ひずみ曲線の接線係数として与えられる。なお、塑性域の板厚方向への広がりを評価するために要素を 9 層に分割した。収束計算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た。

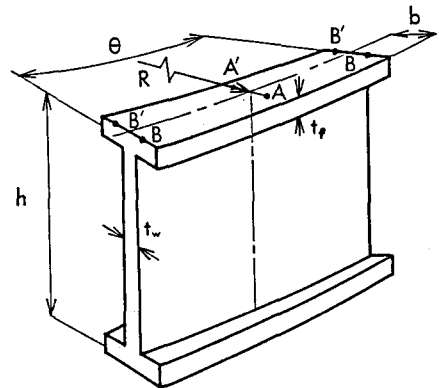


図1. 解析モデル

表1. 解析モデルの分類

Type	曲率パラメータ Z	中心角 θ	幅厚比 h/t _w	使用鋼材
1	7.15	0.05	150	SS41
2	4.29	0.03	150	SS41
3	2.15	0.015	150	SS41
4	3.18	0.033	100	SM50Y

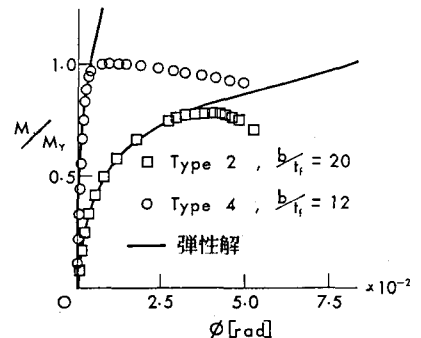


図2. 圧縮フランジの回転挙動(A-A'辺)

3. 解析モデル

対象としたI形曲線桁パネルを図1に示す。モデルは曲率パラメータ Z ($= h\sqrt{1-\nu^2}/Rt_w$)、中心角 θ 、ウェブ幅厚比 h/t_w 、使用鋼材によって表1のように4つのタイプに分類した。フランジの幅厚比 b/t_f は20のモデルを中心として解析したが、Type 1, 4については $b/t_f = 12$ のモデルについても解析を行った。ウェブのアスペクト比はいずれも1.0、Young率 $E = 2.1 \times 10^6$ [kg/cm²]、Poisson 比 $\nu = 0.3$ とした。降伏応力 σ_y はSS41で $\sigma_y = 2400$ [kg/cm²]、SM50Yで $\sigma_y = 3600$ [kg/cm²] とし、単軸状態の応力-ひずみ関係としてSS41については降伏後平坦な領域を経てひずみ硬化を生ずる tri-linear なモデルを、SM50Y については降伏後直ちにひずみ硬化を生ずる bi-linear なモデルをそれぞれ考えた。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が零とした。

4. 結果及び考察

図2～5に解析結果を示す。図2～4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')の回転角をそれぞれとって図示してある。図2において、今回の解析結果のうち代表的なものを選んで弾性解との比較を行った。図から明らかなように、弾性解析では求まらなかった耐荷力が、弾塑性解析を実施することによって明確になることがわかる。図3にはType 1, 4について、フランジの幅厚比の異なるモデルの解析結果を図示してある。図から、フランジの幅厚比の増大に伴って桁の耐荷力が低下し、ウェブの幅厚比によっても耐荷力に差異を生ずる様子がみられる。曲率のみが異なるモデルの結果を比較したのが図4である。図より、曲率の増大によっても耐荷力が若干低下することがわかる。図5に塑性域の進展状況を示した。図を見ると圧縮フランジとウェブの接合辺を中心に塑性域が広がっている様子がわかる。また、今回の解析を通じて、鋼材がSS41のモデルはひずみ硬化領域に達しないことがわかった。

5. まとめ

以上の解析結果から、I形曲線桁の耐荷力解析に対する弾塑性解析の必要性が確認され、フランジやウェブの幅厚比が桁の耐荷力に大きく影響することがわかった。また、鋼材としてSS41を使用する場合には、材料を完全弾塑性体と見なして解析しても良いと考えられる。

参考文献 1) 樋渡, 倉西: 曲げを受けるI型断面弾性プレートガーダーの有限変位挙動について, 土木学会論文集, 1984-10.

2) 大村, 藤井, 平尾: 曲げを受ける曲線桁の非線形断面変形挙動

と耐荷力について, 第40回年講, 1985-9. 3) 和田, 滝, 他: 混合要素を用いた板、かくの増分法による幾何学的非線形解析, 日本機械学会論文集(A), 1984-4. 4) 山田: 塑性・粘弾性, 培風館, 1984.

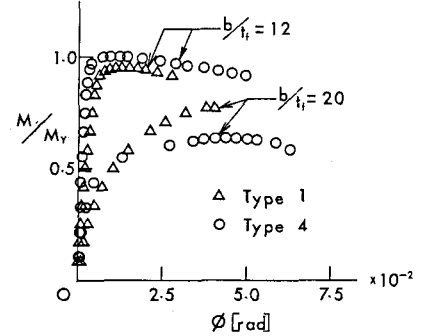


図3. フランジの幅厚比の影響

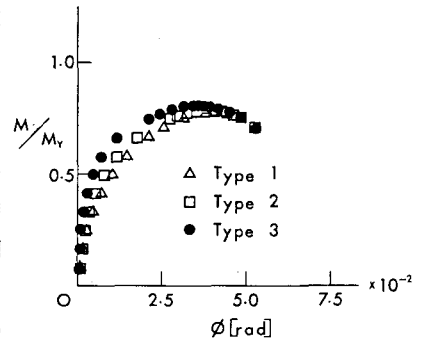


図4. ウェブの曲率の影響
($b/t_f = 20$ の場合)

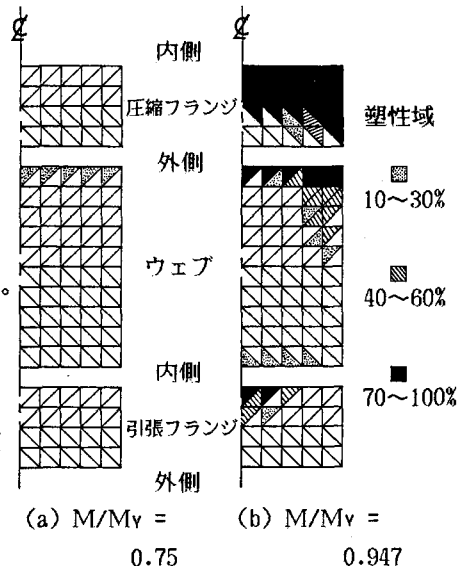


図5. 塑性域の進展状況