

早稲田大学理工学部	正 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

近年、各種土木構造物に対し、複合非線形性を考慮した弾塑性有限変位解析を実施することにより、その耐力特性を明らかにしようとする研究報告が多く見受けられるようになってきた。最近では骨組構造物だけでなく、複数の薄板によって構成された構造物を対象とした耐力解析も行われている。一方、土木構造物は、その供用期間中に種々の繰返し変動荷重を受けることになるため、繰返し荷重下における耐力挙動を調べることも重要な課題の一つである。本報告では、繰返し荷重を受ける薄板集成構造物の一例である、両振り曲げを受ける I 形断面曲線桁を解析対象として選択し、繰返し载荷による耐力力の低下や、残留変形の影響について検討を行った。その際、数値計算に伴って生ずる、応力増分や負荷履歴パラメータ増分に関する誤差を補正し、各増分区間の最終状態に対応する応力点が、降伏曲面上の点となるよう配慮した。本報告では、Potts および Gens¹⁾ によって提案された方法を、Ziegler 則に従う移動硬化弾塑性体に適用可能となるように改良し、実際の数値計算に応用した。

2. 補正計算理論

今、ある増分区間の計算が終了し、その区間の最終状態に対応する応力 σ^{ij} 、原点移動量 α^{ij} およびその増分区間における塑性ひずみ増分 $\Delta \varepsilon^{(p)ij}$ が求まっているとする。これらはいずれも見かけの量であり、誤差を伴うから、それぞれ補正量 $\hat{\sigma}^{ij}$ 、 $\hat{\alpha}^{ij}$ 、 $\hat{\varepsilon}^{(p)ij}$ を加え、補正する必要がある。その際、Potts および Gens¹⁾ は、弾性率テンソル $E^{(e)ijkl}$ を用いた次式

$$\hat{\sigma}^{ij} = -E^{(e)ijkl} \hat{\varepsilon}^{(p)lk} \quad (1)$$

を仮定し独立な補正量を減らすと共に、法線則との類似によって $\hat{\varepsilon}^{(p)ij}$ をただ 1 つのパラメータで表示する方法を提案した。本報告では、この Potts-Gens の方法¹⁾ を修正し、 $\hat{\varepsilon}^{(p)ij}$ を次式で定めることにした。

$$\hat{\varepsilon}^{(p)ij} = 3 \hat{\Lambda} \tilde{\Sigma}^{ij}; \quad \tilde{\Sigma}^{ij} \equiv \sigma^{ij} - \alpha^{ij} \quad (2)$$

ここに、「 $\hat{\cdot}$ 」は偏差成分を表す。文献 1) での議論は一般論であり、具体的な材料を想定したものではない。このため、例えば移動硬化弾塑性体の原点移動量に関する補正量 $\hat{\alpha}^{ij}$ の算定法等については、何ら記述がなされておらず、別途に考察する余地がある。ここでは、Ziegler の移動硬化則との類似から、次式によって $\hat{\alpha}^{ij}$ を算定することとした。

$$\hat{\alpha}^{ij} = 2 \hat{\Pi}_k (\sigma/\sigma_Y) \hat{\Lambda} \tilde{\Sigma}^{ij} \quad (3)$$

ここに、 $\hat{\Pi}_k$ および $\hat{\sigma}$ は、見かけの応力状態 $\tilde{\Sigma}^{ij}$ に対応する移動硬化率および相当応力である。式 (2) を考慮し、式 (1)・(3) を真の応力状態 Σ^{ij} ($\equiv \tilde{\Sigma}^{ij} + \hat{\sigma}^{ij} - \hat{\alpha}^{ij}$) が満たすべき条件式、すなわち、

$$(3/2) \Sigma^{ij} \Sigma^{ij} - \sigma_Y^2 = 0 \quad (4)$$

に代入して $\hat{\Lambda}$ について整理すれば、次の 2 次方程式が得られる。

$$4(\hat{\Pi}_k + 3G)^2 \hat{\Lambda}^2 - 4(\hat{\Pi}_k + 3G) \hat{\Lambda} + 1 - (\sigma_Y/\sigma)^2 = 0; \quad \hat{\Pi}_k \equiv \hat{\Pi}_k(\sigma/\sigma_Y) \quad (5)$$

式 (5) を解いてパラメータ $\hat{\Lambda}$ を決定すれば、各補正量を定めることができる。但し、式 (5) は 3 次元等方体の決定方程式であり、薄板問題のように平面応力場を仮定した場合には若干修正する必要がある。

3. 解析モデル

解析対象とした桁パネルの全体図を図 1 に示す。寸法は曲率パラメータ Z ($=h^2\sqrt{1-\nu^2}/R \cdot t_w$) = 7.15、ウェブ幅厚比 150、フランジ幅厚比 12、フランジ/ウェブ断面積比 1、ウェブ縦横比 1 である。材料定数は Young 率 2.06×10^5 [MPa]、Poisson 比 0.3、降伏応力 235 [MPa] とした。载荷条件は両振り载荷とし、径路上の最高

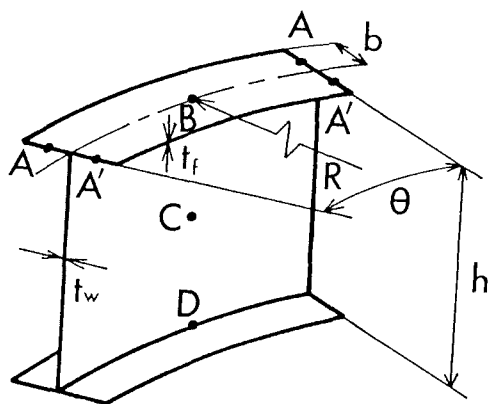


図1. 桁パネル全体図

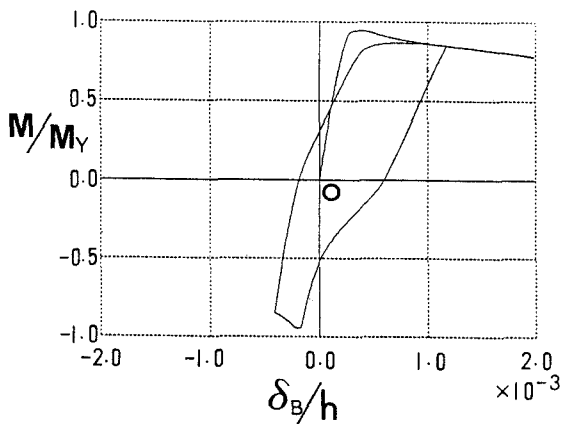


図2. 鉛直方向の荷重-変位曲線(点B)

荷重の9割の点から繰返し径路に入るものとした。

4. 解析結果および考察

解析パネルの鉛直方向変位に関する解析結果を図2～4に示す。図は縦軸に無次元化モーメント、横軸に桁パネルの点B、C、D(図1)の鉛直方向変位を桁高で割って無次元化した量をそれぞれとって表示してある。図から明らかなように、繰返し载荷を実施すると耐荷力が著しく低下することがわかる。特に、処女径路においては急激に最高荷重に至るのに対し、繰返し径路においては零荷重レベルにおける残留変形が影響を及ぼす結果、幾何学的非線形性が卓越し、緩やかにに極限点に達する様子が観察される。図2および図4を比較すると、桁パネル上下の鉛直方向変位は、各々が圧縮側になったときに著しく増大する。これは、桁の圧縮側における、ウェブパネルの面外変位が増大した結果である。ここで示した3つの図は、いずれも桁の鉛直方向変位に関する結果であるが、着目する点や変位の方によって、繰返し载荷に伴って種々の変形曲線を描くことが明らかになり、薄板集成構造物特有の繰返し弾塑性有限変位挙動を把握することができた。

5. まとめ

式(5)に基づく補正計算手法を用いた結果、板厚方向に設けた各分点の応力状態を、正確に降伏曲面上の点として表現することができた。また、本報告の手法をI形断面曲線桁の繰返し曲げ解析に適用し、薄板集成構造物としての繰返し耐荷力挙動をとらえることができた。

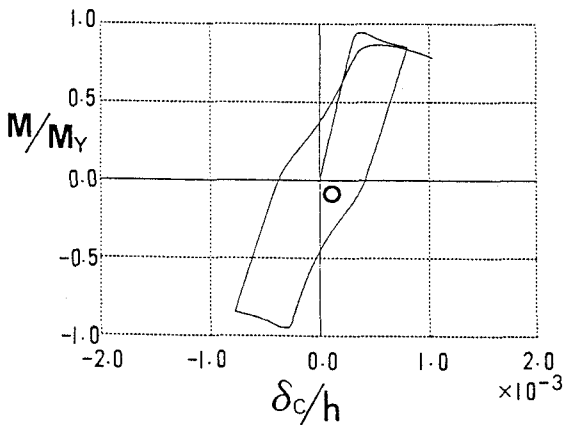


図3. 鉛直方向の荷重-変位曲線(点C)

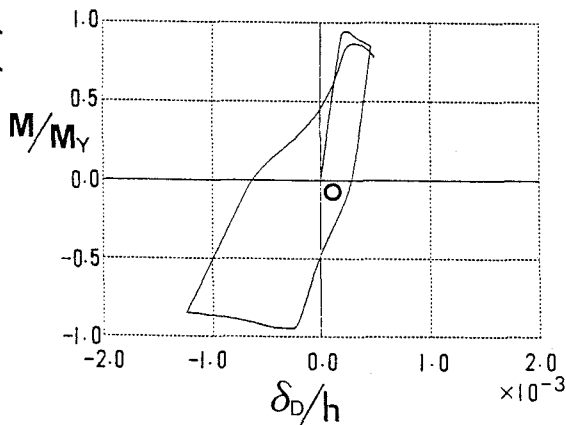


図4. 鉛直方向の荷重-変位曲線(点D)

参考文献 1) Potts, D.M. and Gens, A. : Correcting for Yielding Surface Drift in Elasto-Plastic Finite Element Analysis, Numerical Methods for Non-Linear Problems, Vol.2, PINERIDGE PRESS, 1984.