

## I - 81

繰り返し引張・圧縮を受ける板要素の弾塑性有限変位解析  
—修正二曲面モデルの応用—

|          |    |       |
|----------|----|-------|
| 三菱重工業(株) | 正員 | ○坂野 茂 |
| 名古屋大学    | 正員 | 宇佐美勉  |
| 名古屋大学    | 正員 | 水野英二  |

## 1. 緒言

繰り返し外力が作用する薄板の局部座屈解析においては、ひずみ1%前後の降伏棚域からひずみが2%以上のひずみ硬化域へ移行するときの繰り返し挙動を、十分に評価できる構成モデルが必要となる。名古屋大学では、Dafalias・Popovの二曲面モデルの基本的な考え方を改めることなく、まず一軸応力下でのモデルの開発を行い、それを一般応力状態へ拡張した[1]。本研究では、この修正二曲面モデルを用いて、純圧縮・引張の繰り返し荷重を受ける板要素に対して、有限要素法による弾塑性有限変位解析を行い、現在よく用いられている、完全弾塑性、等方便硬化則、移動硬化則などを有する塑性力学モデルの解析結果と比較した。

## 2. 解析方法

本研究では、複合非線形問題を取り扱う。平面応力場を仮定し、要素は3節点離散キルヒホッフ要素、定式化はApproximate Updated Lagrangian Formulation (AULF) によって行った[2]。構造解析汎用プログラムFEAPを用い、変位増分法で解析した。

Fig.1のような初期たわみと残留応力を考慮した4辺単純支持の板要素が繰り返し圧縮・引張力を受ける場合の挙動を解析した。板の境界条件は4辺単純支持で、載荷辺は常に直線を保ちX軸方向の面内変位は一定とする。板の初期たわみは $\delta = \delta_0 \cdot \cos(\pi X/l) \cdot \sin(\pi Y/b)$ で与え、 $\delta_0 = b/450$ とした。残留応力はX軸方向では一定であり、引張残留応力を降伏応力 $\sigma_y$ 、圧縮残留応力を $\sigma_{rc}$ とし、 $\sigma_{rc}/\sigma_y = 1/3$ である。幅厚比 $b/t = 40$ 、アスペクト比 $l/b = 0.7$ 、要素分割は $4 \times 4$ の等分割とし、構造の対称性から板の1/4で解析を行った(Fig.1参照)。

修正二曲面モデル(Two-Surface Model, 2.S.M)のパラメータは降伏棚を有する鋼材SS400のもの[1]とし、完全弾塑性モデル(Perfect Elasto-Plastic Model, P.E.P)、移動硬化則モデル(Kinematic Hardening model, KINE)、等方便硬化則モデル(Isotropic Hardening model, ISO)との比較を行った。降伏応力 $\sigma_y = 274.4 \text{ MPa}$ 、ヤング率 $E = 207.7 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.29$ は各モデル共通とし、等方便硬化および移動硬化のひずみ硬化率 $H' (= d\sigma/d\epsilon^p)$ は共に、 $2.48 \text{ GPa}$ とした。一軸状態の応力-ひずみ関係をFig.2に示す。

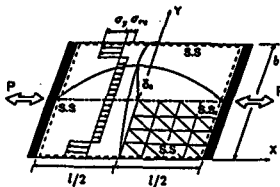


Fig.1 Simply supported plate

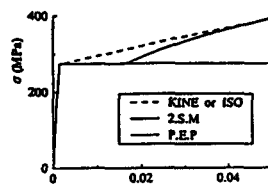
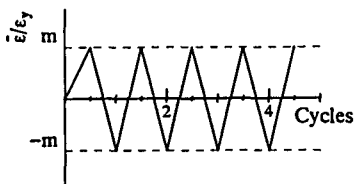
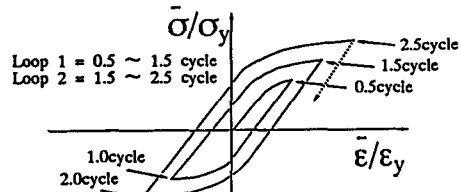


Fig.2 Stress-strain curves in the uniaxial case

載荷経路は、Fig.3(a)に示す定振幅載荷で解析を行った。サイクルおよびループの定義をFig.3(b)に示す。ここで、 $m = (\text{平均ひずみの最大値 } \bar{\epsilon}_{max}) / (\text{降伏ひずみ } \epsilon_y)$ である。 $m = 2, 4$ の2パターンで行い、最大サイクル数は4.5とした。また、解析結果の図において、平均応力、平均ひずみは、すべて圧縮を正とすることに注意されたい。

(a) Constant displacement amplitude( $m=2,4$ )

(b) Definition of cycles and loops

Fig.3 Loading program

### 3. 解析結果

解析結果（振幅  $m = 4$ ）の平均応力-平均ひずみ関係を Fig.4(a)、平均応力-板中央のたわみ関係を Fig.4(b) に示す。平均応力-平均ひずみ関係については、二曲面モデル以外のモデルは互によく似た形状の曲線を描いている。それらの曲線は、引張の最大平均ひずみから圧縮の最大平均ひずみに移るとき、二曲面モデルのような緩やかな曲線を描かず、線形区間（弾性域）が長く、特に2回目の圧縮の時には、最大耐荷力後の劣化の割合が大きい。これらの原因として、次のことが考えられる。バイリニア型モデルは、弾性域から塑性域に移る時、剛性が不連続に大きく変わる。二曲面モデルはバウジンガー効果（弾性域の減少）が大きく表れるが、他のモデルは移動硬化以外バウジンガー効果がなく、また移動硬化も二曲面モデルほどバウジンガー効果が表現できない。

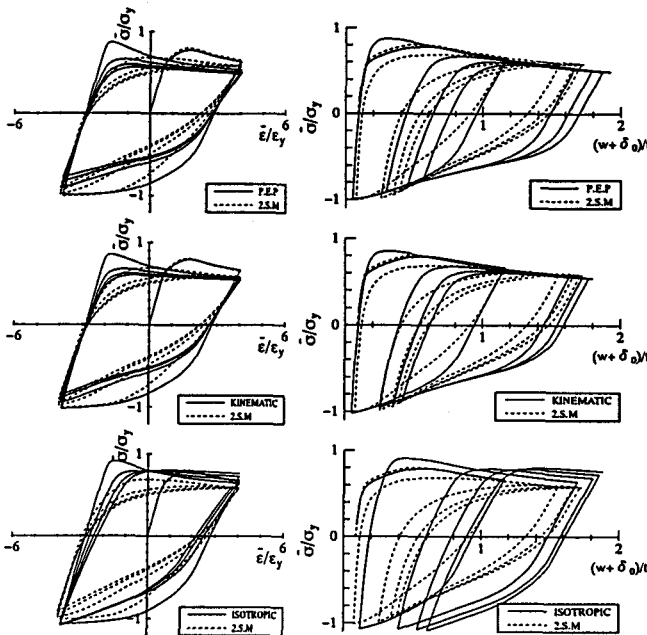
Fig.5 に  $m = 4$  についての、 $i$  サイクルの最大耐荷力  $\bar{\sigma}_{pi}$ （圧縮を正、引張を負）を示す。圧縮側の重要な特徴として、二曲面モデルを除いて各モデルは、0.5 サイクルより 1.5 サイクルの方が耐荷力が大きくなっていることが挙げられる。サイクルごとの最大平均応力は、サイクル挙動を表す重要な値であるが、繰り返し載荷挙動全体を、より反映する値として履歴吸収エネルギー（ $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$  履歴曲線の囲む面積）が考えられる。Fig.6 の横軸はループ番号であり、縦軸はループ番号  $i$  で吸収したエネルギー量  $E_i$  であり、 $E_0 = \frac{\sigma_y \epsilon_y}{2}$  で無次元化してある。ここで、 $\sigma_y$  は降伏応力、 $\epsilon_y$  は降伏ひずみである。図より次のことが分かる。どの載荷経路も、二曲面の履歴吸収エネルギー量が常に最も小さな値となっている。 $m = 4$  の場合は、 $m = 2$  に比べると、エネルギー吸収量の減少が大きい。Fig.5 の圧縮側の最大耐荷力は、二曲面モデルと、移動硬化および完全弾塑性モデルとはサイクル数が増えると同じぐらいの値になる。しかし、履歴曲線 (Fig.4) が異なるので、エネルギー吸収量では、サイクル数（ループ番号）が増えても、モデルのエネルギー吸収量の差は小さくならず、わずかに大きくなる。

### 4. あとがき

より詳しい解析結果は講演当日述べる。

#### 参考文献

- 1) Shen, C. ら：土木学会論文集, 1993 年 7 月
- 2) 加藤正宏：名古屋大学修士論文, 1989 年 3 月



(a) Average stress-average strain (b) Average stress-deflection

Fig.4 Comparison between two-surface model and other models

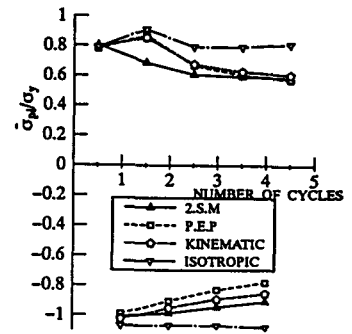


Fig.5 Load carrying capacity( $m=4$ )

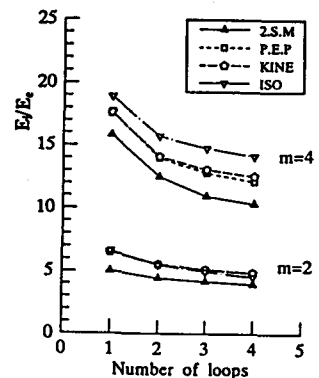


Fig.6 Energy absorption capacity