繰り返し面内力を受ける鋼板の弾塑性解析

岐阜大学大学院　学生員○服部松利
岐阜大学工学部　正　員　森脇良一
岐阜大学工学部　正　員　奈良　敬

1．研究目的　道路橋示方書の許容応力度設計法を、より合理的で実際の構造物に適し、構造物の限界状態に対して安全性を評価し設計する方法である限界状態設計法へと移行する方向に向かいつつある。

耐震設計の観点から、激震時における構造物の破壊・破損に至るまでの変形能が重要な指標の一つとして注目されることが多くなってきた。しかし、その多くは、単調載荷から得られる変形能の指標であり、実際の地震動の繰り返し外力を想定した繰り返し載荷試験から得られる新しい指標が必要となってくる。繰り返し荷重を受ける鋼構造物の挙動を実験によって明らかにすることは重要であるが、挙動を支配するパラメータを変化させるパラメトリック・スタディを行うことは、多大な労力を要し、研究コストなどの面からも困難を伴う。そこで、このような繰り返し載荷が可能な解析法を開発する必要がある。

本研究では、繰り返し荷重下の鋼材の構成則をモデル化するにあたり、一般によく用いられているZieglerの移動硬化モデルを改良した等方移動硬化モデルを採用し、鋼構造物の構成要素である鋼板を対象として、その繰り返し面内荷重下での極限挙動を解明する手段としての解析法を開発する。

2．解析方法　解析方法は、文献1)による弾塑性有限変位解析法に、繰り返し荷重作用時に起こるBauschinger効果をモデル化した等方移動硬化則を導入した。

（1）仮定　次の仮定に基づき、構成則モデルを導入する。

①降伏は、von Misesの降伏条件に従う。
②降伏曲面は、移動・拡大を考える。
③降伏曲面の移動は Ziegler 則に従うものとする。
④塑性状態における応力ひずみ関係はPrandtle-Reuss の塑性流れ則に従う。

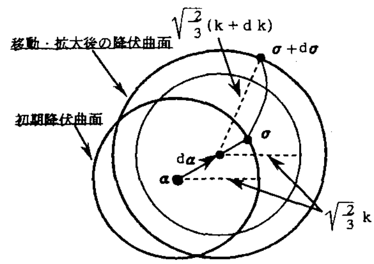

図-1　偏差応力空間模式図

（2）等方移動硬化則の定式化　仮定①より、von Mises 降伏条件を用いて降伏条件式を偏差応力で表わすと、

$$f=\{(3/2)(\boldsymbol{\sigma}'-\boldsymbol{\alpha}')^{T}(\boldsymbol{\sigma}'-\boldsymbol{\alpha}')\}^{1/2}-k=0 \qquad (1)$$

ここで、$\boldsymbol{\sigma}'$は、偏差応力を$\boldsymbol{\alpha}'$は、降伏曲面の中心の位置を k は、降伏曲面の大きさを表わすパラメータである。

中心の移動は、Zieglar 則に従い、降伏曲面の中心と降伏曲面上の応力点を結んだ方向に降伏曲面が移動するものと仮定すると、

$$d\boldsymbol{\alpha}=d\mu(\boldsymbol{\sigma}-\boldsymbol{\alpha}),\ d\mu>0 \qquad (2)$$

降伏曲面の移動と拡大が起こると

$$f(\boldsymbol{\sigma}'+d\boldsymbol{\sigma}'-(\boldsymbol{\alpha}'+d\boldsymbol{\alpha}'),k+dk)=0 \qquad (3)$$

式(3)に式(2)を代入し、$d\mu$についての２次方程式を解くことにより中心の移動を求める。

また、全ひずみ硬化率をH_A'、移動ひずみ硬化率をH_k'、等方硬化率をH'とすると、

$$H_k'=(1-\chi)H_A \quad , \quad H'=\chi H_A \qquad (4)$$

ここでχは等方硬化と移動硬化の比で、$\chi=1$のとき等方硬化を表わし、$\chi=0$のときは移動硬化となる。

（3）弾塑性応力ひずみマトリックス　等方移動硬化を表す弾塑性応力ひずみマトリックスは、文献2)により、

$$\mathbf{D}_{ep}=\mathbf{D}_e-[\mathbf{D}_e\{\partial f/\partial\boldsymbol{\sigma}\}\{\partial f/\partial\boldsymbol{\sigma}\}^{T}\mathbf{D}_e]/[(H'+H_k')+\{\partial f/\partial\boldsymbol{\sigma}\}^{T}\mathbf{D}_e\{\partial f/\partial\boldsymbol{\sigma}\}] \qquad (5)$$

ここに、$\mathbf{D}_{ep}$：弾塑性応力ひずみマトリックス、$\mathbf{D}_e$：弾性応力ひずみマトリックスである。

<u>（4）応力ひずみマトリックスの一般化</u>　相当応力σ_v、相当ひずみε_vに直された応力ひずみ関係を図-2のようにモデル化した場合、Dの一般形は、次式で表わされる。

$$D = \alpha D_e + (\beta - \alpha) D_p + (1 - \beta) D_H \qquad (6)$$

ここに、D_pは、式(5)の$H' + H_k'$を0としたときのD_{ep}、D_Hは式(5)の$H + H_k'$をひずみの関数とした場合のD_{ep}である。またαとβは、それぞれ次式で表わされる。

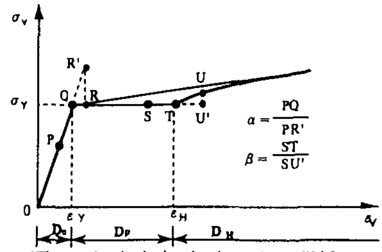

図-2　相当応力-相当ひずみ関係

α =（降伏に至るまでのひずみ増分）／（全ひずみ増分）　（$0 \leq \alpha \leq 1$）　(7)

β =（ε_Hに至るまでのひずみ増分）／（全ひずみ増分）　（$0 \leq \beta \leq 1$）　(8)

<u>3．数値計算例と考察</u>　文献3)と比較するために式(4)のχを0とおいた移動硬化のみの状態で解析を行った。相当応力と相当ひずみの関係もバイリニアとし 式(5)の$H' + H_k'$を一定とした。さらに式(6)で$\beta = \alpha$とおき、応力ひずみマトリックスを$D = \alpha D_e + (1 - \alpha) D_H$とした。また、解析モデルは、図-3に示すように周辺単純支持板とし、変形の対称性を利用して三角形要素分割部分のみとりだした。要素分割は8×8とした。

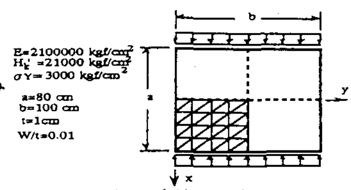

図-3　解析モデル

まず、平均応力と平均ひずみの関係を比較してみた。図-4および図-5は、それぞれ矢尾ら3)および本法による数値計算結果である。両図から本解析結果の方が圧縮側の極限強度が少し高めにでており、また、圧縮から引っ張りに移り変わるときの曲線の変化が少し異なることがわかる。しかし、全体としての挙動をみると、繰り返し回数が増えるごとに曲線のループが一定のループに収束することや、圧縮側、引張側ともに極限強度が徐々に下がってくるなどの傾向が同じようにうかがえた。平均応力と平均たわみの図についても同様な傾向がみられた。また、移動硬化が行われているかどうかを確認するために、各三角形要素について主応力と降伏曲面の中心の移動を調べてみた。その結果の一例として、中心付近の要素について両者を図-6と図-7に示す。図-7から主応力がvon Misesの初期降伏曲面から少しはみ出し硬化領域に入っていることがわかる。また、図-7が、同じ要素で同じ状態の降伏曲面の中心の移動を表したものであり、移動硬化が行われたことが確認された。

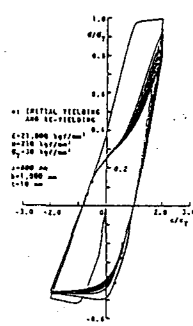
図-4　平均応力平均ひずみ関係

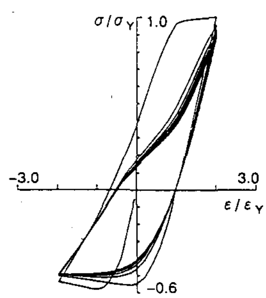

図-5　平均応力平均ひずみ関係

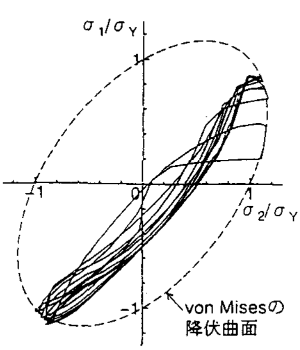

図-6　中心付近要素の主応力図

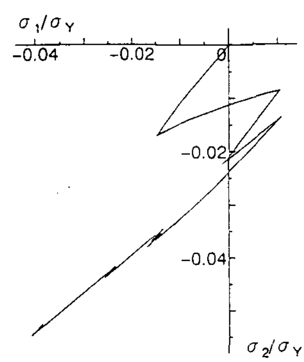

図-7　降伏曲面の中心の移動

<u>4．結論</u>　構成則として等方移動硬化則を導入した弾塑性有限変位解析法を開発し、移動硬化のみ考慮した数値計算例を示し、文献3)の計算結果と比較した。今後、他の数値計算例についても実施していく予定である。

<u>参考文献</u>

1) 奈良敬,出口恭司,小松定夫：ひずみ硬化を考慮した圧縮板の極限強度に関する研究,構造工学論文集,Vol.33A 1987年3月.

2) 山田嘉昭：塑性・粘弾性,有限要素法の基礎と応用シリーズ,培風館, 1980.

3) Yao,T.and Nikolov,P.I. : Numerical Experiment on Buckling/Plastic Collapse Behavior of Plates under Cyclic Loading ,U.S.-Japan Seminar on Cyclic Buckling of Steel Structures and Structural Elements under Dynamic Loading Conditions,Preliminary Report, Osaka,1-3,July,1991.