I－89　繰り返し面内力を受ける鋼板の弾塑性挙動

西日本旅客鉄道㈱　正　員○服部松利
㈱帝国建設コンサルタント　正　員　森脇良一
岐阜大学工学部　正　員　奈良　敬

１．はじめに　道路橋示方書では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、より合理的に構造物の安全性を評価するには、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指標の方が良いように思われる。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、研究遂行上困難を伴うので、繰り返し載荷が表現可能な解析手段を用いるたほうが良いように思われる。

本研究では、繰り返し荷重下の鋼材の構成則として、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弾塑性有限変位解析法に導入し、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について計算を行った。

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等方移動硬化則を導入したものを用いた。

（１）仮定　次の仮定に基づき、構成則モデルを導入する。

①von Misesの降伏条件に従う。
②降伏曲面については、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塑性状態での応力とひずみ関係はPrandtle-Reuss の塑性流れ則に従う。

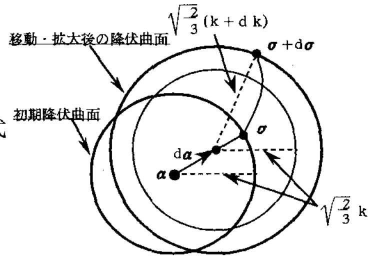

図-1　偏差応力空間模式図

（２）構成方程式　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、

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

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、

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

（３）弾塑性応力－ひずみマトリックス　応力増分とひずみ増分の関係は次式のようになる。

$$d\boldsymbol{\sigma}=\mathbf{D}_{ep}d\boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

ここで、弾塑性応力－ひずみマトリックス$\mathbf{D}_{ep}$は、平面応力場に適応しても比較的簡単に式変形のできる山田2)のものを用いる。

$$\mathbf{D}_{ep}=\mathbf{D}_{e}-[\mathbf{D}_{e}\{\partial f/\partial\boldsymbol{\sigma}\}\{\partial f/\partial\boldsymbol{\sigma}\}^{T}\mathbf{D}_{e}]/[(H'+H_{K}')+\{\partial f/\partial\boldsymbol{\sigma}\}^{T}\mathbf{D}_{e}\{\partial f/\partial\boldsymbol{\sigma}\}] \quad (4)$$

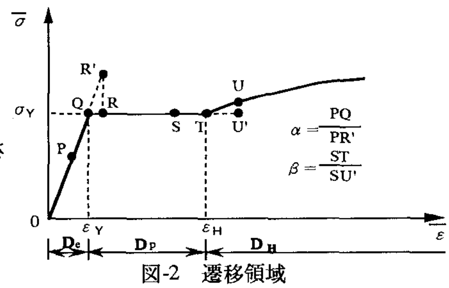

図-2　遷移領域

単調載荷の場合の例として、相当応力$\bar{\sigma}$、相当ひずみ$\bar{\varepsilon}$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。

$$\mathbf{D}=\alpha\mathbf{D}_{e}+(\beta-\alpha)\mathbf{D}_{p}+(1-\beta)\mathbf{D}_{H} \quad (5)$$

ここに、$\mathbf{D}_p$は、式(4)の$H'+H_k'$を０としたときの$\mathbf{D}_{ep}$、$\mathbf{D}_H$は式(4)の$H'+H_k'$をひずみの関数とした場合の$\mathbf{D}_{ep}$である。またαとβは、それぞれ次式で表わされる。

$$\alpha=（降伏に至るまでのひずみ増分）/（全ひずみ増分）\quad(0\leq\alpha\leq1) \quad (6)$$

$$\beta=（\varepsilon_Hに至るまでのひずみ増分）/（全ひずみ増分）\quad(0\leq\beta\leq1) \quad (7)$$

ここで　ひずみ硬化曲線は次式を用いる。

$$\bar{\sigma}/\sigma_Y=B(C+\bar{\varepsilon}/\varepsilon_Y)^{n} \quad (8)$$

ここで、B,n,C：ひずみ硬化定数

（４）等方硬化と移動硬化の起こる条件　累積相当塑性ひずみを用い、等方硬化と移動硬化の起こる条件を次のように定める。

累積相当塑性ひずみは、次式で表される3)。

$$\phi(\boldsymbol{\varepsilon}^{p}-\boldsymbol{\eta},\rho)=2/3(\boldsymbol{\varepsilon}^{p}-\boldsymbol{\eta})^{T}(\boldsymbol{\varepsilon}^{p}-\boldsymbol{\eta})-\rho^{2}=0 \quad (9)$$

ここで、$\varepsilon^{p}=\int d\varepsilon^{p}$、$\eta$ ：曲面の中心、ρ ：曲面の半径の（2/3）$^{1/2}$倍をそれぞれ表わす。

本研究では近似的に、降伏曲面の大きさをを境界曲面と同じように累積相当塑性ひずみの関数とみなし、累積相当塑性ひずみが増えるとき、すなわち式(9) で

$$\phi\left(\varepsilon^{p}+d\varepsilon^{p}-\eta、\rho\right)>0 \tag{10}$$

となる時のみ降伏曲面が拡大する、すなわち、等方硬化がおこなわれるとする。

また、塑性ひずみが進行する場合でも累積相当塑性ひずみが増えないとき、すなわち式(9)で

$$\phi\left(\varepsilon^{p}+d\varepsilon^{p}-\eta、\rho\right)\leq 0 \tag{11}$$

となる時、降伏曲面の大きさは拡大しない、すなわち、移動硬化がおこなわれるとする。

３．計算例　上術の解析理論で２の（１）～（３）は数値計算を実行しで妥当性を検証した4)。今回はさらに２の（４）の条件を加えて、数例の数値計算を実行した。

（１）平板の計算例　仮定した材料の挙動が、実際の計算によってどう表現されるのかを調べるために、平板モデルとして計算を行った。すなわち、変位の自由度は面内変位のみとした。また、材料はSM570を想定し、材料定数は次のようにした。

σ_Y=4600kgf/cm^2、σ_U=5800kgf/cm^2、

ε_H=0.0123、ε_U=0.0868

B =0.755、n =0.163、C =0.0

なお、繰り返し変位は、$\varepsilon/\varepsilon_Y$が +1 、-3 、+5 、-7 、+9 、-11 ・・・というように順に振幅が拡大するように与えた。

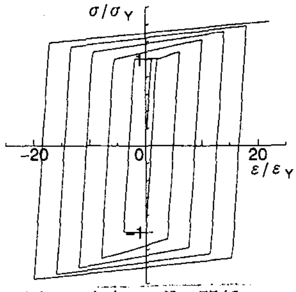

図-3　応力-ひずみ関係

（２）板の座屈挙動の計算例　解析モデルは文献4)を参考とし、図-4に示すようにした。a/bは0.5である。境界条件は、周辺単純支持とし、解析モデルの対称性を利用し、解析部分は図で三角形要素に分割した、全体の1/4の部分とした。また要素分割は、図に示すように、X軸方向に３分割、Y軸方向に４分割の３×４分割とした。変位の与え方は、図のように板面に平行に繰り返し変位を与えた。次の計算例は、材料としてSS400を想定し解析した。材料の特性値は以下の通りである。

σ_Y=2400kgf/cm^2、σ_U=4100kgf/cm^2、ε_H=0.02、ε_U=0.197

B =0.397、n =0.324、C =0.0

繰り返し変位のパターンはECCS5)に準拠しU/U$_Y$が±1、±2、±3、±4 ・・・と言うよう順に振幅が拡大するようにあたえ、各振幅での繰り返し回数は、３回ずつとした。幅厚比パラメータＲが0.5の場合の結果を図-5と図-6に示す。

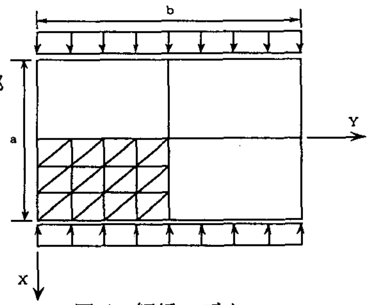

図-4　解析モデル

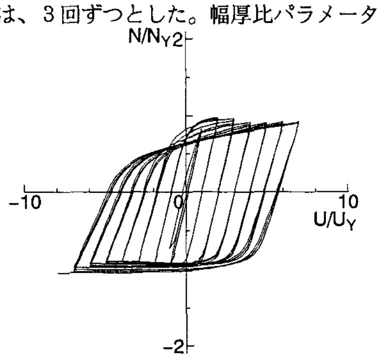

図-5　荷重-変位関係

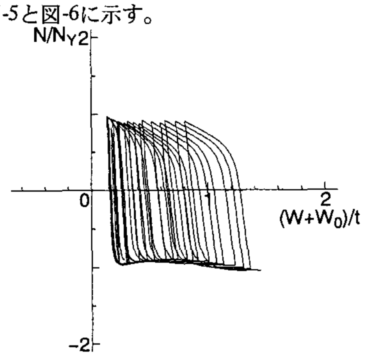

図-6　荷重-たわみ関係

４．まとめ　鋼材の構成則として、等方移動硬化則を弾塑性有限変位解析法に導入し、繰り返し面内荷重下での極限挙動について計算を行った。なおその他の計算例および詳細な考察については講演当日に行う予定である。

参考文献

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：有限要素法の基礎と応用シリーズ,塑性・粘弾性,1980.

3)　Chi Shen,Eiji Mizuno,Tsutomu Usami : Development of a Cyclic Two-Surface Model For Structural Steels With Yield Plateau,NUCE Research Report,No.9302,March,1993.

4)服部松利,森脇良一,奈良　敬：繰り返し面内力を受ける鋼板の弾塑性解析,平成5年度土木学会中部支部年次学術講演会概要集Ⅰ-19,平成5年3月.

5)　梅村哲男：鋼材特性を考慮した鋼板の極限圧縮強度に関する研究,岐阜大学修士論文,1991年2月.

6)　ECCS : Study on Design of Steel Building in Earthquake Zone First Edition,1986.