

武蔵工業大学 正会員 皆川 勝 武蔵工業大学 正会員 西脇威夫

武蔵工業大学 正会員 増田陳紀 武蔵工業大学 学生員 斎藤哲郎

1. はじめに

著者等は、地震等による激しい荷重履歴をうけた鋼構造物の、その後の挙動を把握することを目的として、鋼素材の材料試験を実施しデータの蓄積を行ってきた。本報告では、その研究の一環として、非弾性域における履歴効果を考慮した応力-ひずみ関係を多曲面理論〔1〕,〔2〕に基づいてモデル化し、従来明らかにされているとはいえない材料特性を求めるための実験方法ならびにその結果の評価方法を提案し、SM58Q鋼材に対して本方法を試行した結果を示す。

2. 多曲面理論による応力-ひずみモデル

履歴応力-ひずみ挙動は、多曲面理論によれば応力空間に定義される一連の多曲面によって表現され、各曲面はその大きさ K と中心座標 $\{\alpha\}$ によって代表される。 K および $\{\alpha\}$ はそれぞれの径路における応力反転点からの相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_p$ の関数である。文献〔1〕においては、曲面の大きさ K は履歴効果のない場合の K_a 、履歴効果が定常的となった場合の K_b および累積相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_p$ のみによって変化する係数 W を用いて表現されている。この手法によれば、降伏棚とひずみ硬化域を有する処女応力-ひずみ曲線から、バウシinger効果が表われるなだらかな曲線への移り変わりを適切に表現することはできない。

本研究では、累積相当塑性ひずみが降伏棚終了時の塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_{pst}$ に達したときの曲面の大きさ K_{ab} を基本となる材料特性として新たに導入し、次式によって曲面の大きさを表わすものとした。

$$K = \begin{cases} W_1 \cdot K_a + (1 - W_1) \cdot K_{ab} & ; 0 \leq \bar{\varepsilon}_p < \bar{\varepsilon}_{pst} \\ W_2 \cdot K_{ab} + (1 - W_2) \cdot K_b & ; \bar{\varepsilon}_{pst} \leq \bar{\varepsilon}_p \end{cases} \quad \text{--- (1)}$$

降伏棚域において除荷が生じた場合($0 \leq \bar{\varepsilon}_p < \bar{\varepsilon}_{pst}$)、逆負荷領域においては初期降伏より弱い降伏現象が現れるが、これは累積相当塑性ひずみの増加による W_1 の減少に伴って曲面の大きさ K が K_a から K_{ab} へと遷移することによって表現することができる。また、 $\bar{\varepsilon}_{pst} \leq \bar{\varepsilon}_p$ の領域においては、降伏棚に類する現象は現れないことから、なめらかな曲線を表わされる関数 K_{ab} と K_b に重み係数 W_2 を乗ずることによって曲面の大きさ K を表わすことができる。このようにすると、曲面の大きさは $\bar{\varepsilon}_p$ および $\bar{\varepsilon}_p$ の関数となり、 $K = K(\bar{\varepsilon}_p, \bar{\varepsilon}_p)$ と表わされる。

一方、曲面の中心座標 $\{\alpha\}$ も K と同様に $\bar{\varepsilon}_p$ と $\bar{\varepsilon}_p$ の関数として表わされる。 $\{\alpha\}$ は、相当塑性ひずみが $\bar{\varepsilon}_p$ に対応する曲面の累積相当塑性ひずみが $\bar{\varepsilon}_p + d\bar{\varepsilon}_p$ における曲面の大きさ $K_i = K(\bar{\varepsilon}_p + d\bar{\varepsilon}_p, \bar{\varepsilon}_p)$ と、相当塑性ひずみが $\bar{\varepsilon}_p + d\bar{\varepsilon}_p$ に対応する曲面の累積相当塑性ひずみが $\bar{\varepsilon}_p$ における曲面の大きさ $K_j = K(\bar{\varepsilon}_p, \bar{\varepsilon}_p + d\bar{\varepsilon}_p)$ の関係、および応力負荷の方向を表わすベクトル $(\{\dot{\sigma}\} - \{\dot{\alpha}\})/K$ を用いて、次式によって履歴の進展に伴って更新される(〔1〕)。

$$\{\alpha_i\} = \{\alpha_j\} + \frac{\{\dot{\sigma}\} - \{\dot{\alpha}\}}{K} \times |K_j - K_i| \quad \text{--- (2)}$$

これら K および $\{\alpha\}$ の概念を用いて、相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_p$ および累積相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_p$ を状態変数とする応力-ひずみモデルが構成される。

3. 材料特性の評価方法およびSM58Q鋼材に対する適用例

上記の考えに従って履歴応力-ひずみ挙動を推定するためには、対象となる鋼材の基本的な材料特性である K_a

K_{ab} , K_b , W_1 および W_2 を実験から求めなければならない。本研究において使用した試験片の形状・寸法を図-1に示す。

$\bar{\epsilon}_p$ および $\bar{\epsilon}_{pi}$ が履歴効果の程度を示す状態変数であり、シガも単軸応力問題から多軸応力問題への拡張が相当応力と相当塑性ひずみの概念によってなし得るとすれば、上記の各特性値は単調引張試験と唯一回の荷重反転を含む数本の引張圧縮試験のみによって求めることができる。図-2に材料特性を得るために実施した試験の結果を応力-塑性ひずみ曲線で示す。なお、試験はひずみ速度を0.01%/secとしてひずみ制御にて行った。

荷重反転点における曲面の大きさ K_i の算出方法を図-3に示す。反転点 O' を原点として $\bar{\sigma}$ - $\bar{\epsilon}_{pi}$ および $\bar{\sigma}'$ - $\bar{\epsilon}_{pi}'$ 座標を図のように設定し、 $\bar{\epsilon}_{pi}$ と $\bar{\epsilon}_{pi}'$ とが等しい点における応力 $\bar{\sigma}$ と $\bar{\sigma}'$ より、 K_i は次式から $\bar{\epsilon}_{pi}$ の関数として算出される。

$$K_i = [\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_{pi}) + \bar{\sigma}'(\bar{\epsilon}_{pi}')] / 2 \quad \text{--- (3)}$$

定義より、 K_a および K_{ab} はそれぞれ単調荷重時および降伏棚終了時での曲面の大きさであり、図-4(a)および(b)に上記により求めた結果を示す。また、 K_b としては反転点でのひずみが5%の場合の曲面の大きさを採用した。これを図-4(c)に示す。

このように、各荷重反転点における K_i および K_a 等の材料特性が定まれば、式(1)から重み係数の値が各々の累積塑性ひずみに対して求まる。図-5は得られた重み係数を縦軸に、累積塑性ひずみを横軸にとり示したものである。 W_2 に関しては実験結果(図中の○印)より $\bar{\epsilon}_p$ に対して一次式で近似した。また、 W_1 については W_2 と同様に一次式で表わせると仮定した。以上により求めた重み関数を同図中に示す。

上記の方法によって、数本の試験片による基本的な単軸試験により鋼材の履歴応力-ひずみ関係を表す材料特性を決定することができる。なお、本報告で示した方法によって応力-ひずみ関係を数値シミュレーションした結果と実験より得られた応力-ひずみ関係の適合性については講演当日発表する。

(参考文献)

- [1] Petersson, H and Popov, E.P., "Constitutive Relations for Generalized Loadings", Proc. ASCE, Vol. 103, No. EM4, pp. 611-627, 1977.
- [2] Popov, E.P. and Petersson, H., "Cyclic Metal Plasticity: Experiments and Theory", Proc. ASCE, Vol. 104, No. EM6, pp. 1371-1388, 1978.

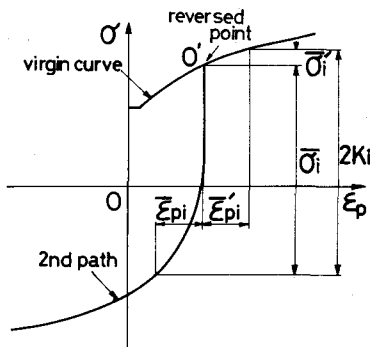


図-3 K_i の算出方法.

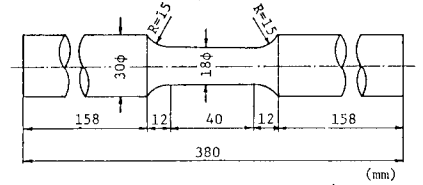


図-1 引張試験片の形状・寸法.

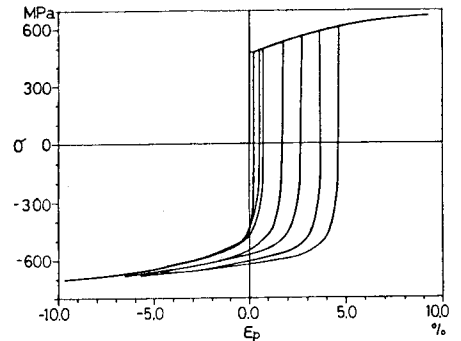


図-2 材料特性を求めるための試験結果.

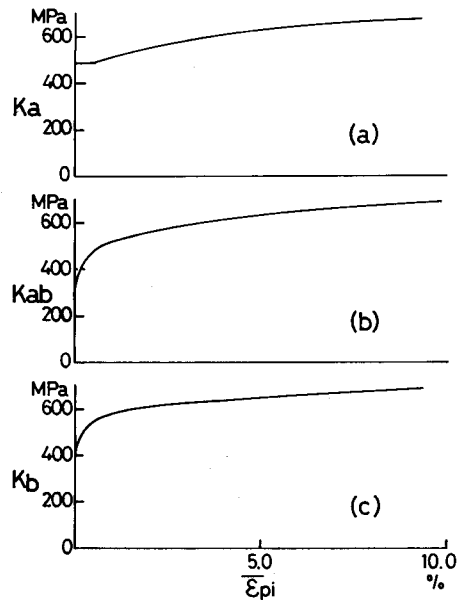


図-4 材料特性 K_a , K_{ab} および K_b .

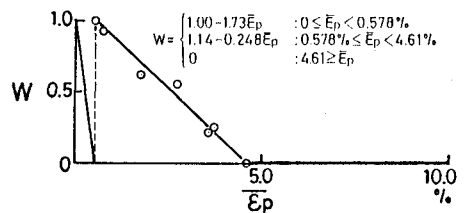


図-5 重み関数