

名古屋 大学 学生員 ○杉浦 昇征
 名古屋 大学 正 員 水野 英二
 名古屋 大学 正 員 福本 秀士

1. まえがき

地震などによる動的な荷重が作用するもとの構造物の破壊性状、限界状態を論じた研究は数多くあるが、そこでは一般に構造材料特性として、静的な応力-ひずみ関係が用いられている。しかしながら鋼材などの構造材料の応力-ひずみ関係に及ぼすひずみ速度の影響に関する研究報告によると、弾性係数およびポアソン比に関してはその影響はほとんど見られないが、一方降伏強度および引張強度などにおいては影響があり、静的な値に比べてかなりの上昇が見られる。それゆえ構造物の動的安定問題を取り扱うにあたり、動的な応力-ひずみ関係を考慮して土木構造物の安全性信頼性を再検討する必要がある。そこで本研究では、その手始めとしてひずみ速度の影響を考慮した2.3の力学モデルについてその利点・欠点を論じるとともに、これら力学モデルの土木材料への適用について論ずる。

2. 力学モデル

力学モデルの開発は、実験的および理論的(粘塑性理論もしくは熱力学の理論)立場より行なわれて来た。それら力学モデルは、ひずみ速度の影響ばかりでなくクリープおよび応力緩和なども評価することができる。代表的な力学モデルには以下のものがある。

① Perzyna Model¹⁾(1963)

これは材料を弾性・粘塑性体と仮定することによって以下のように粘塑性ひずみ速度を定義する。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_{ij} &= \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \\ \dot{\epsilon}_{ij}^p &= \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \\ F &= f(\sigma_{ij}) K(\bar{\epsilon}_p) - 1 \\ \langle \Phi(F) \rangle &= \Phi(F) ; F > 0 \\ &= 0 ; F \leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで σ_{ij} は応力、 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 、 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 、 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ はそれぞれひずみ速度、弾性ひずみ速度、粘塑性ひずみ速度、 γ は粘性係数、 $f(\sigma_{ij}) - K(\bar{\epsilon}_p) = 0$ ($\bar{\epsilon}_p$; 相当粘塑性ひずみ、 K ;

硬化パラメータ)は静的降伏関数、また $\Phi(F)$ は実験結果より定められる任意の関数である。

このモデルは単調荷重におけるひずみ速度の影響、クリープおよび応力緩和現象を表現できる。しかしこのモデルはBauschinger効果を表現できない。そこでこのモデルの拡張として、静的降伏関数を $f(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) - K(\bar{\epsilon}_p) = 0$ (α_{ij} は移動硬化を表わすパラメータ)とすることによってBauschinger効果を表現することができる。

② Kratochvil & Dillon Model²⁾(1970)

これは内部状態変数を有する熱力学と転移論を基礎としている。内部状態変数を材料の微視的な欠陥(dislocation)を表わすパラメータとして用いている。内部状態変数・応力・温度などを変数とする応答関数を定めて、これに熱力学の第2法則をあてはめて得られる支配方程式を解くことで材料の挙動を表現する。材料の挙動を巨視的又微視的に実際現象と対応させることができる点では有利であるが、一連の支配方程式を解くにあたって非常に労力を有する。

③ Endochronic Model³⁾(1971)

熱力学を基礎としている点では、②のモデルと類似しているが、降伏関数を持たないという点で上記のようなモデルとは根本的に異なる。現在塑性理論を基礎としているモデルでは降伏を示す降伏関数、又載荷・除荷を示す載荷関数なるものを定める必要があり、これらの定め方により材料の挙動に関して異なった結果が得られる。よってここではtime scale τ なるものを導入することでこの点を避けて通る。time scale τ は変形履歴に依存するパラメータで次のように表わされる。

$$d\tau^2 = P_{ijkl} d\epsilon_{ij} \cdot d\epsilon_{kl} \quad (2)$$

ここで P_{ijkl} は4階のテンソル(正値)、 ϵ_{ij} はひずみテンソルである。

また外部時間 t を含めて以下のような intrinsic

time measure dt なるものを導入することで変形速度依存をも評価できる。

$$d\sigma^2 = \alpha^2 d\epsilon^2 + \beta^2 dt^2 \quad (3)$$

ここで α, β はパラメータである。

3. Perzyna Modelにおける構成式

式(1)において $\Phi(F) = \exp(F) - 1$ 、また降伏関数として Von Mises type を採用し $(f(\sigma_{ij}) = J_2^{1/2}, J_2 = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}, \sigma_{ij}$ は偏差応力)。また完全弾塑性とし仮定した時、以下のような構成式を得る。これによると現在の応力・ひずみ速度がわかれば、ひずみ増分に対して線形な応力増分を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \sigma_{ij} &= D_{ijkl} (\Delta \epsilon_{kl} - \Delta \epsilon_{kl}^p) \\ \dot{\sigma}_{ij} &= D_{ijkl} (\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}_{kl}^p) \\ \Delta \epsilon_{ij}^p &= \dot{\epsilon}_{ij}^p \Delta t + \frac{1}{2} \dot{\epsilon}_{ij}^p \Delta t^2 \\ \dot{\epsilon}_{ij}^p &= \gamma \left\{ \exp\left(\frac{J_2}{K} - 1\right) - 1 \right\} \frac{\sigma_{ij}}{J_2} \\ \dot{\epsilon}_{ij}^p &= \left[\gamma \left\{ \exp\left(\frac{J_2}{K} - 1\right) \right\} \frac{1}{2KJ_2} - \gamma \left\{ \exp\left(\frac{J_2}{K} - 1\right) - 1 \right\} \frac{\sigma_{ij}}{J_2^2} \right] \\ &\quad - \left[\frac{\gamma}{J_2} \right] S_{min} \sigma_{ij} \dot{S}_{min} + \gamma \left\{ \exp\left(\frac{J_2}{K} - 1\right) - 1 \right\} \frac{\dot{J}_2}{J_2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで Δt は時間増分、 $\Delta \sigma, \Delta \epsilon$ はそれぞれ応力増分、ひずみ増分、 D_{ijkl} は弾性材料定数、また dot は時間微分を示す。

4. Perzyna Modelにおける数値シミュレーション

Perzyna Model を一次元問題に適用した。ここでは文献(5)の実験結果より γ を最小二乗法により定めた。Fig. 1 はひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0$ (静的)、5, 10, 20 (cm/cm/sec) における単純引張下の応力-ひずみ曲線である。それぞれのひずみ速度において、降伏点応力は静的なものに比べて7%, 13%, 25%の上昇が見られる。またこれらの曲線は $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e, \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p, \dot{\epsilon} \approx \dot{\epsilon}^p$ の3つの部分からなる。

土木構造物において存在しうるひずみ速度を想定して Fig. 2 のような時間によって変化するひずみ速度を受ける単一部材の引張・圧縮に関する応力-ひずみ曲線を Fig. 3 に示す。ここで点線は静的降伏強度である。またそれぞれの図において特定の時間に対応する点を A, B, C で示す。

5. 結果・考察

上記の計算結果より静的および動的な応力-ひずみ関係の差を認めることができる。衝撃を受ける部材の安定問題および動的解析にこれらの力学モデルを取り入れることは十分意義あることと思われる。

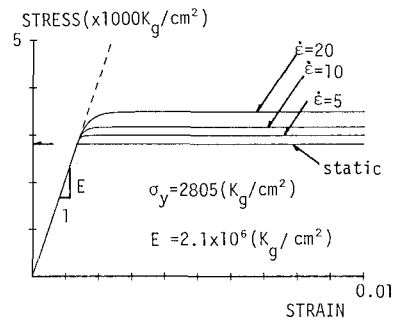


Fig. 1 Stress-Strain Relation with Different Strain Rates

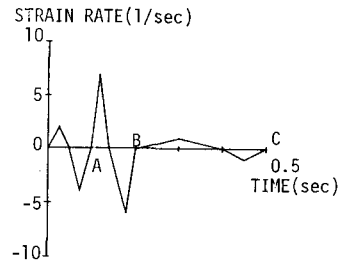


Fig. 2 Time-Strain Rate Diagram

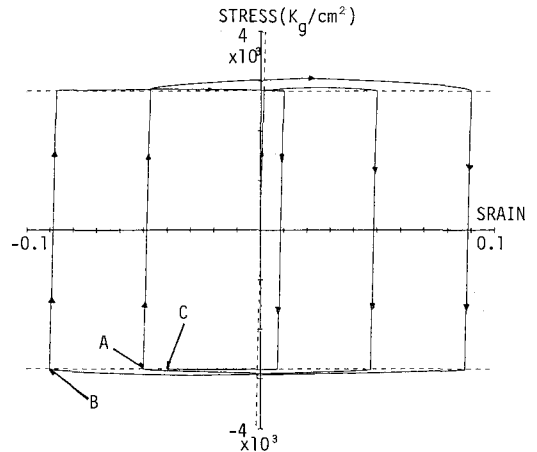


Fig. 3 Stress-Strain Relation Predicted by Perzyna Model

<参考文献>

- 1) Perzyna, P.; The Constitutive Equations for Rate Sensitive Plastic Materials, Quart. Appl. Math., 20 (1963), pp. 321~332
- 2) Aris Phillips and H.C. Wu; Theory of Viscoplasticity, Int. J. Solids and Structures, Vol. 9 (1973), pp. 15~30
- 3) J. Kratochvil and O.W. Dillon; Thermodynamics of Crystalline Elastic-Visco-Plastic Materials, J. Appl. Physics, Vol. 41 (1970), pp. 1470~1479
- 4) K.C. Valanis; A Theory of Viscoplasticity without A Yield Surface Part I, II Arch. Mech. 23 (4) 1971, pp. 517~551
- 5) D.S. Clark and P.E. Duwez; The Influence of Strain Rate on Some Tensile Properties, Proc. ASTM 50 (1950), pp. 560~575