

大阪大学工学部 正会員 阿部 信 晴

大阪大学工学部 学生会員 ○野 呂 好 幸

1. まえがき

本報告では、ひずみ軟化を表現できる弾粘塑性モデルを2成分混合体理論に基づいて誘導し、その適用性を有限要素解析結果により検討している。

2. 2成分混合体理論

2成分混合体理論では材料の内部構造変化（内部構造の劣化）の影響を平均的に記述するために材料要素の挙動を2つの成分、非損傷成分と損傷成分による寄与に分解する。非損傷成分（体積 V_n ）と損傷成分（体積 V_d ）からなる体積 $V(=V_n + V_d)$ の粘土要素を考えると、要素全体の平均応力とその速度は、

$$\sigma_{ij} = (1-r)\sigma^n_{ij} + r\sigma^d_{ij} \quad (1)$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = (1-r)\dot{\sigma}^n_{ij} + r\dot{\sigma}^d_{ij} - \dot{r}(\sigma^n_{ij} - \sigma^d_{ij}) \quad (2)$$

ここに、 r は要素の劣化の程度を表す損傷パラメータであり、次式で定義されている。

$$r = \frac{V_d}{V} \quad (3)$$

また、2成分間に拡散あるいは化学的な相互作用がなければ、2成分のひずみは等しいと仮定することができる。すなわち、

$$\epsilon^n_{ij} = \epsilon^d_{ij} = \epsilon_{ij} \quad (4)$$

3. 弾粘塑性ひずみ軟化モデル

2成分混合体理論に基づくひずみ軟化モデルを導くために、「損傷成分はせん断変形に抵抗せず、体積圧縮変形に対してのみ抵抗する。その圧縮特性は非損傷成分の特性に等しい」と仮定すると、損傷成分の応力は、

$$\sigma^d_{ij} = p^n \delta_{ij} \quad (5)$$

非損傷成分の構成関係を流動曲面モデルで与える。

$$\dot{\sigma}^n_{ij} = \left[D_{ijkl} - \frac{D_{ijmn} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{op}} D_{opkl}}{\frac{\partial F}{\partial p} + \frac{\partial F}{\partial \sigma_{pq}} D_{pqrs} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{rs}}} \right] \left\{ \dot{\epsilon}^n_{kl} - \frac{\partial F}{\partial t} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \right\} \\ = \bar{D}_{ijkl} (\dot{\epsilon}^n_{kl} - \dot{\epsilon}^{nc}_{kl}) \quad (6)$$

(2)式に(4)～(6)式を代入することにより、要素の平均応力は、

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_{ij} &= (1-r)\dot{\sigma}^n_{ij} + r\dot{p}^n \delta_{ij} - \dot{r}(\sigma^n_{ij} - p^n \delta_{ij}) \\ &= (1-r)\bar{D}_{ijkl}(\dot{\epsilon}^n_{kl} - \dot{\epsilon}^{nc}_{kl}) \\ &\quad + r\bar{D}_{opkl}(\dot{\epsilon}^n_{kl} - \dot{\epsilon}^{nc}_{kl}) - \dot{r}S^n_{ij} \\ &= [(1-r)\bar{D}_{ijkl} + r\bar{D}_{opkl}](\dot{\epsilon}^n_{kl} - \dot{\epsilon}^{nc}_{kl}) - \dot{r}S^n_{ij} \\ &= \bar{D}_{ijkl}(\dot{\epsilon}^n_{kl} - \dot{\epsilon}^{nc}_{kl}) - \dot{r}S^n_{ij} \\ &= \bar{D}_{ijkl}(\dot{\epsilon}_{kl} - \dot{\epsilon}^{nc}_{kl}) - \dot{r}S^n_{ij} \quad (7) \end{aligned}$$

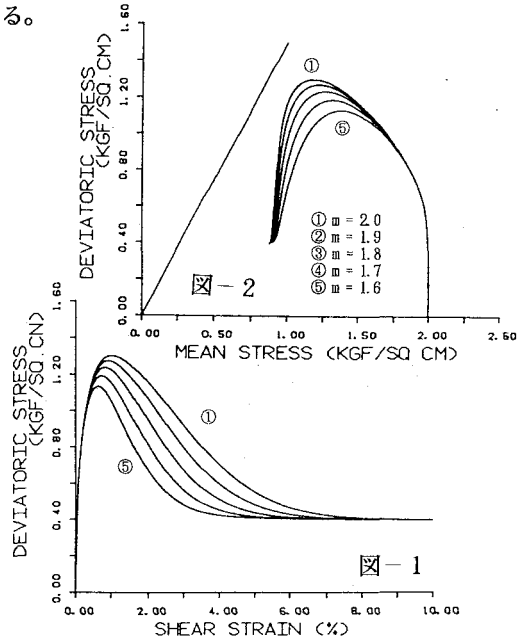
損傷パラメータは粘塑性せん断ひずみの関数とし、次式で与えるものとする。

$$r = r_u [1 - \exp \{-h(\gamma^{vp} - K)^n\}] \quad (8)$$

応力～ひずみの増分関係は次式となる。

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{ij} &= \bar{D}_{ijkl} \left(\Delta \epsilon_{kl} - \Delta t \frac{\partial F}{\partial t} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{kl}} \right) - \Delta r S^n_{ij} \\ &= \bar{D}_{ijkl} \Delta \epsilon_{kl} - (\Delta t L_{ij} + \Delta r S^n_{ij}) \quad (9) \end{aligned}$$

図-1, 2は、カムクレイモデルを用いて導いたたひずみ軟化モデルの非排水三軸圧縮試験における応力～ひずみ関係、有効応力経路を示したものである。



4. 有限要素ひずみ軟化解析

図-1, 2に示すモデル ($m=1.8$)を用いて有限要素法による弾粘塑性非排水ひずみ軟化解析を行った。解析対象は、剛性板によりひずみ制御で圧縮載荷される平面ひずみ供試体(幅・高さ共に10cm)であり、底面は完全拘束、右側面は水平変位を拘束、載荷板と供試体間の摩擦はないものとしている。圧縮速度は、0.03, 0.3, 3.0 %/minである。

図-3は載荷板の平均応力とひずみの関係を示したものであるが、顕著なひずみ軟化挙動と圧縮速度の影響が認められる。図-4は圧縮過程での供試体内部のせん断ひずみの分布を示している。圧縮抵抗のピークを越えて軟化域に入ると急速にひずみの局所化が生じることがわかる。局所化の進展は圧縮速度に依存している。図-5は圧縮ひずみ0.84%での供試体の変形を示したものである。

5. まとめ

2成分混合体モデルでは $\tilde{D}_{ijk}$ がつねに正値をとるので、通常の弾粘塑性解析法によっても安定なひずみ軟化解析を行うことができる。

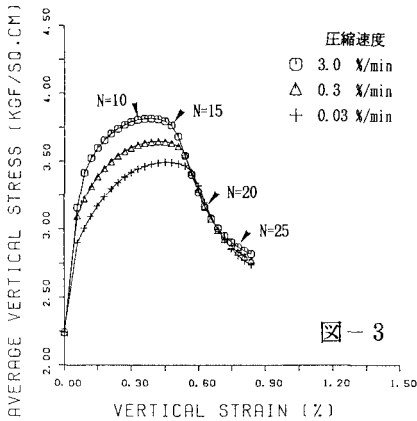


図-3

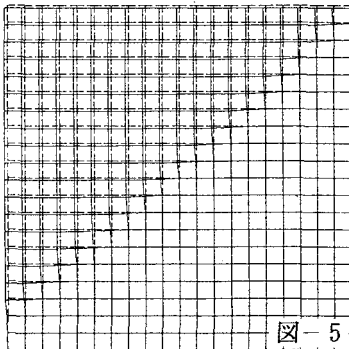


図-5

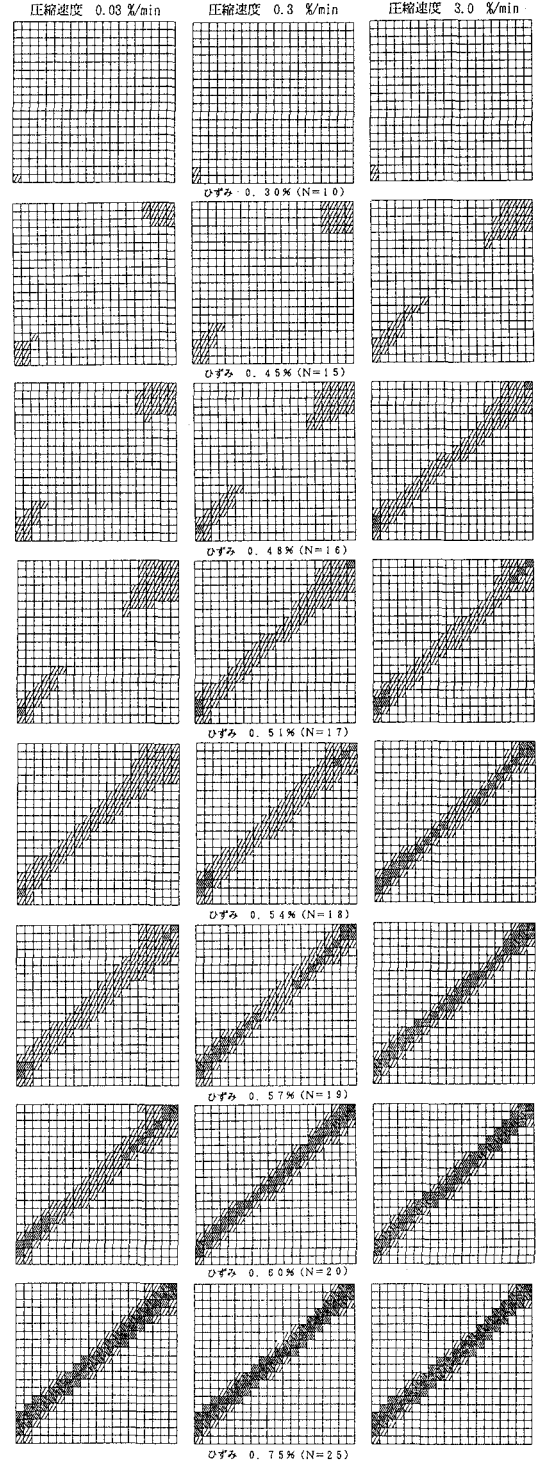


図-4