

神戸大学自然科学研究科 学生会員 金 永民

神戸大学大学院 学生会員 ○三木秀朗

神戸大学工学部 正会員 櫻井春輔

1. はじめに 地盤材料が荷重を受けると、塑性変形の進行に伴い不均一で変形が集中する領域を生じ、これが成長して破壊に至る。このようなひずみの局所化現象を連続体力学に基づく局所形の構成式を用いて、有限要素法により数値シミュレーションする場合、解析結果がメッシュサイズに大きく依存する。材料の変形挙動は、材料の特性及び変形条件に依存した固有のものであり、局所化する領域の大きさは材料固有の特性長さに依存する。このような問題点を解決するために、材料の特性長さを含む非局所理論が提案されている。非局所理論は種々提案されているが、ここでは Bazant らによる積分平均化理論を大変形理論に導入し、平面ひずみの一軸圧縮数値シミュレーションを行い、メッシュ依存性の除去、重み関数の影響、せん断帯の幅と特性長さの関係について検討する。

2. 解析手法の概要 ここでは、積分平均化理論を弾塑性モデルの塑性ひずみの大きさを決める λ に適用する。

$$\bar{\lambda}(\underline{x}) = \frac{1}{V_r(\underline{x})} \alpha(\underline{x} - \underline{s}) \lambda(\underline{s}) dV \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}(\underline{x}) : & \text{非局所化した } \lambda & V : & \text{全体積} & \underline{s} : & \text{任意点の座標ベクトル} \\ V_r(\underline{x}) = & \int_V \alpha(\underline{x} - \underline{s}) dV & \alpha : & \text{重み関数} \end{aligned}$$

本研究では重み関数 α の影響を検討するために、 $\alpha = 1$ の一定重み関数と誤差関数（正規分布関数）や Bell 型関数²⁾などの滑らかな関数を用い、その結果を比較する。

$$\begin{aligned} \text{誤差関数: } \alpha(\underline{x} - \underline{s}) = & e^{-\frac{(k|\underline{x} - \underline{s}|/l)^2}{2}} \quad (\text{if } |\underline{x} - \underline{s}| < 2l) & \text{Bell 型関数: } \alpha(\underline{s} - \underline{x}) = & \left[1 - \left(\frac{|\underline{x} - \underline{s}|}{\rho_0 l} \right)^2 \right]^2 \quad (\text{if } |\underline{x} - \underline{s}| < \rho_0 l) \\ = & 0 \quad (\text{if } |\underline{x} - \underline{s}| \geq 2l) & = & 0 \quad (\text{if } |\underline{x} - \underline{s}| \geq \rho_0 l) \\ (k=2.0, \text{ 二次元の場合}) & & (\rho_0 = 0.9086, \text{ 二次元の場合}) & \end{aligned}$$

式(1)の $\bar{\lambda}(\underline{x})$ は要素のガウス点の λ を用いて、近似的に次のガウス積分法により計算する。

$$\bar{\lambda}(\underline{x}) = \frac{1}{V_r(\underline{x})} \tilde{\lambda}(\underline{x}) \quad \text{nel: 考えているガウス点から距離 } 2l \text{ (} \rho_0 l \text{) 以内にある要素数}$$

ここで、

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}(\underline{x}) = & \sum_{i=1}^{nel} \sum_{j=1}^{nint} \alpha(\underline{x} - \underline{s}_{ij}) \lambda(\underline{s}_{ij}) W_j \det J_{ij} & \text{nint: 要素当たりの積分点の数} \\ & \underline{s}_{ij}: \text{要素 } i \text{ の積分点 } j \text{ の座標ベクトル} \\ V_r(\underline{x}) = & \sum_{i=1}^{nel} \sum_{j=1}^{nint} \alpha(\underline{x} - \underline{s}_{ij}) W_j \det J_{ij} & W_j: \text{積分点 } j \text{ の重み} \\ & J_{ij}: \text{要素 } i \text{ の積分点 } j \text{ のヤコビアン} \end{aligned}$$

3. 有限要素解析結果と考察 λ に積分平均化理論を適用することにより、一軸圧縮平面ひずみ実験をシミュレートする。

ここでは、現在の変形状態を基準とする Update Lagrange 法を用いて大変形弾塑性有限要素法で解析する。von-Mises 関連流れ則を用い、変形の対称性を考慮して第 1 象限のみを解析する（図-1）。供試体の上端面の水平方向の変位は固定し、鉛直方向に強制的に変位を与える。解析結果のメッシュ依存性を検討するために、同じ供試体を Crossed-Triangle 要素で 4-4、8-8、10-10 に分割する。使用した材料係数を表-1 に示す。まず、非局所形（8-8、 $l=1.0$ ）に関して、重み関数として $\alpha = 1$ 、誤差関数、Bell 型関数を用いたときの応力-ひずみ関係、軸ひずみが 0.25% のときの $\alpha - \alpha$ 断面の相当塑性ひずみ分布を図-2 に示す。これらの図より、誤差関数と Bell 型関数の場合はほぼ等しい結果となり、計算時間も短縮されるため、これ以後、非局所形の重み関数として Bell 型関数を用いる。次に、メッシュ依存性を検討するために、4-4、8-8、10-10 の 3 つの場合の

局所形・非局所形 ($l=1.0$) の応力-ひずみ関係、相当塑性ひずみ分布を図-3、4に示す。この図より、非局所形の場合はメッシュ依存性を除去できることがわかる。次に、特性長さを $l=1.0, 2.0, 3.0$ と変化させたときの結果を図-5に示す。それぞれの場合のせん断帯の幅 w と l の関係を図-6に表す。この図より、 w と l はほぼ比例関係にあることがわかる。

参考文献

1) Bazant, z.p. and Lin, Feng-Bao :
Non-Local Yield Degradation, International Journal
For Numerical Methods In Engineering, vol. 26,
pp.1805-1823, 1988 2) Bazant, z.p. and Ozbolt, j :
Microplane Model for Progressive Fracture,
Damage, and Size Effect in Structures, Journal of
Engineering Mechanics, 116(11), pp. 2485-2505, 1990

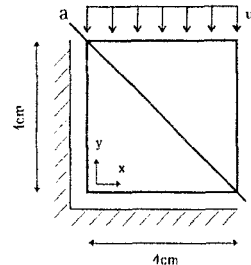
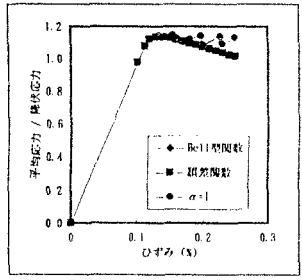


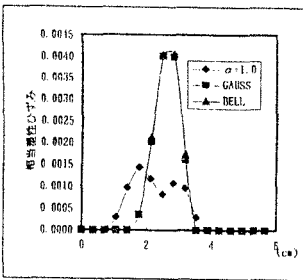
表-1 使用した材料定数

弾性係数	$E=30000\text{kg/cm}^2$
ポアソン比	$\nu=0.3$
粘着力	$c=0$
内部摩擦角	$\phi=30^\circ$
降伏応力	$\sigma_y=36\text{kg/cm}^2$
線形軟化係数	$h=1000\text{kg/cm}^2$

図-1 対称破壊モード解析モデル

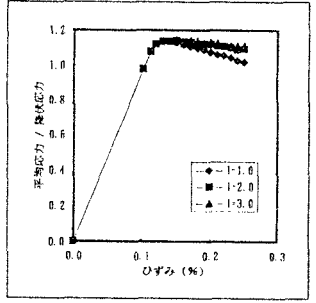


(a) 応力-ひずみ関係

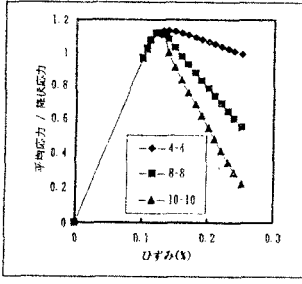


(b) 相当塑性ひずみ分布

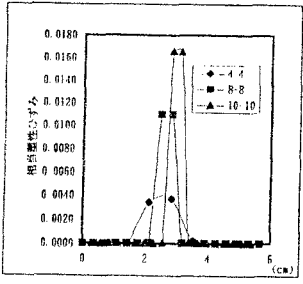
図-2 重み関数の影響



(a) 応力-ひずみ関係

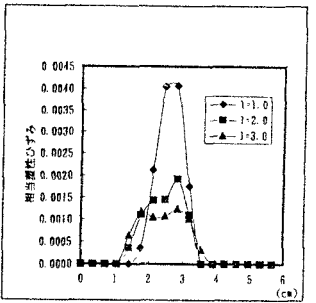


(a) 応力-ひずみ関係

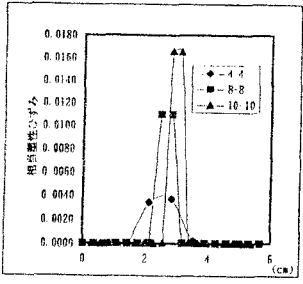


(b) 相当塑性ひずみ分布

図-3 メッシュ依存性 (局所形)



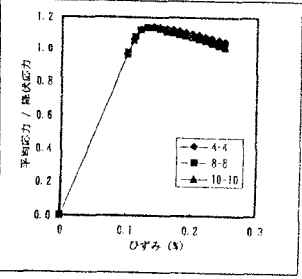
(a) 応力-ひずみ関係



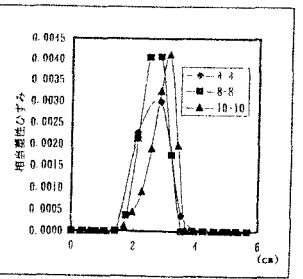
(b) 相当塑性ひずみ分布

図-3 メッシュ依存性 (局所形)

図-5 特性長さの影響



(a) 応力-ひずみ関係



(b) 相当塑性ひずみ分布

図-4 メッシュ依存性の除去 (非局所形)

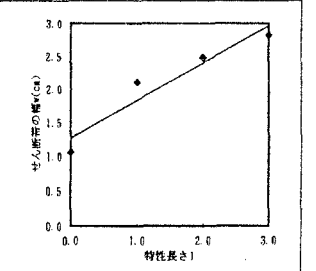


図-6 せん断帯の幅と特性長さの関係