

## 材料内の微視すべりによる非線形挙動

（株）フジタ技術センター 仲沢 武志

### 1. まえがき

本文では、土質材料における非線形挙動がいわゆる「せん断帯」のようなメカニズムの発生や進展によると考えられることから、すべりをモデル化した構成則を考える。白戸等<sup>1)</sup>は、この流れですべりを伴う大変形弾塑性構成則を得ているが、ここでは、簡略化したモデルでの解析を実施するために微小変形の枠内で考えることとし、すべりの発生・進展の状況や構造物全体の挙動を把握する。

### 2. 構成則

ここでは地盤材料の非弾性挙動の要因をすべりに限定し、図1よりすべり面上でのひずみが次式であらわせるものとする<sup>2)</sup>。

$$d_{ij} = P_{ij} d \quad \text{ここに、} P_{ij} = 1/2(\sin \theta_j + \sin \theta_i) + \tan \theta \sin \theta_{ij} \quad (1)$$

ここに、 $\theta_i$ ,  $\theta_j$  は図1に示すようにすべりの方向を規定するベクトルであり、 $d$  はそこでのすべり変形の増分である。また、 $\theta$  はダイレイタンシー角を表すが、ここでは簡単のため内部摩擦角に一致させることとする。

また、すべりの発生条件を次式の Mohr-Coulomb の基準で考える。

$$\tau = C - \sigma_n \cdot \tan \theta \quad (2)$$

さらに、すべりの進展条件  $d$  も Mohr-Coulomb の基準に従うものとするれば、すべりの発生基準と進展条件は次式のようになる。

$$ijP_{ij} = C \text{ (発生条件)}; d_{ij} P_{ij} = h d \text{ (進展条件)} \quad (3)$$

これより、すべりが発生した後の進展則は次式のように得られる。

$$d_{ij} = P_{ij} C_{ijkl} d_{kl} / m \quad (4)$$

ここに、 $m = h + P_{ij} C_{ijkl} P_{kl}$  である。これらより、すべりを考慮した構成則は、次式のように得られる。

$$d_{ij} = (C_{ijkl} - C_{ijmn} P_{mn} P_{op} C_{opkl} / m) d_{kl} \quad (5)$$

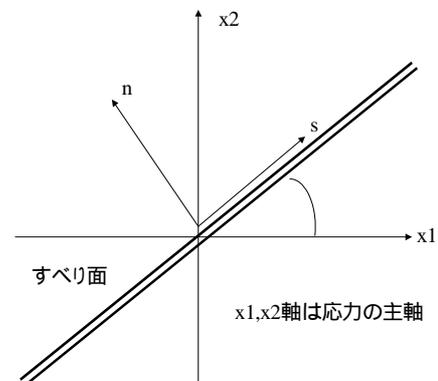


図1 すべりの模式

### 3. すべりの進展方向

Mohr の基準における破壊面は、Mohr 平面上の  $\sigma$  軸から  $(90^\circ + \theta)/2$  と考えられている。また、Mohr 平面上の  $\sigma$  軸は応力の主軸と考えられることから、考えている座標系にすべり面を変換するには、 $-(90^\circ + \theta)/2$  だけ回転させることとなる<sup>3)</sup>。ここに、 $\theta$  は主応力方向を表す。

### 4. 解析例

解析例として、1軸圧縮試験と古典的な極限解析の代表例である押し込み問題を実施する。なお、ここでは簡単のため一種の硬化係数であるパラメータ  $h$  をゼロとした。

#### 1) 平面ひずみ圧縮試験

解析対象の有限要素メッシュを図2に示す。解析対象の寸法は横10cm：縦20cmとした。境界条件としては、下端を完全固定、上端は水平方向に固定した上で鉛直方向に強制変位を与えた。解析対象の側面は完全な自由状態とした。終局段階における計算結果の様子を図3に示す。この図では、ほぼ入力した破壊角度に沿ってすべり線らしき応力分布が現れている。なお、この図は、 $\theta = 20^\circ$  のときの完全固定における解析結果である。また、反力・変位関係を図4に示す。この反力・変位関係では、巨視的に内部摩擦角が大きくなるにつれて、完全流れ状態から塑性硬化状態に移行するような挙動が示されている。

#### 2) 押し込み問題

押し込み問題における有限要素メッシュを図5に示す。境界条件として、下端完全固定、側面は水平方向固定とした。また載荷面は、水平方向固定、鉛直方向に強制変位を与えた。解析結果を図6に示す。すべり域を図6に表示したが、古典的なすべり面らしき領域が形成されている。また、載荷面での反力・変位関係を図7に示す。反力・変位関係は、その最終段階で若干複雑な挙動を示している。

キーワード：微視すべり、構成則、有限要素法

連絡先 〒243-0125 神奈川県厚木市小野 2025-1 TEL:(046)250-7095 FAX:(046)250-7139

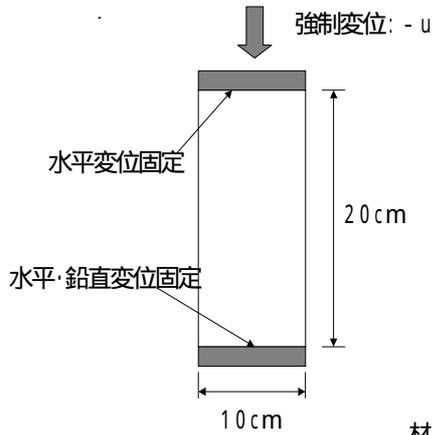


図2 解析対象(圧縮試験)

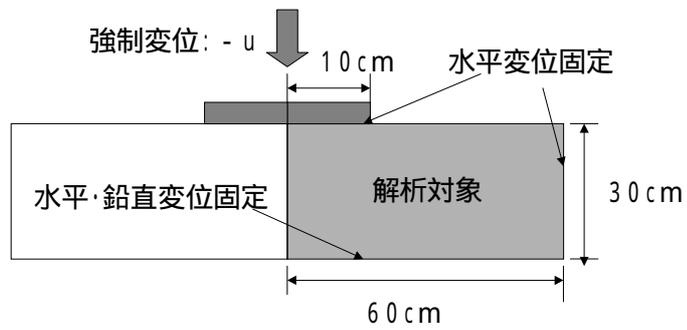
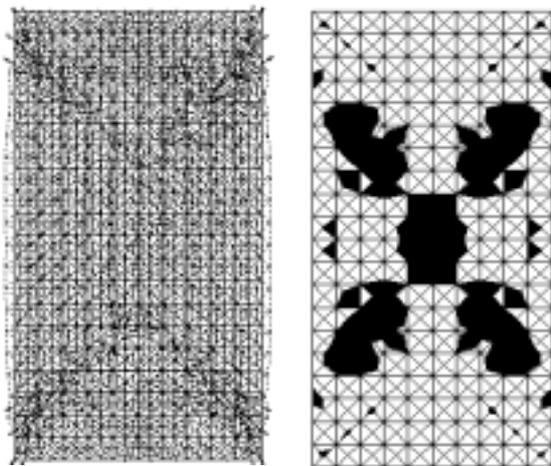


図5 解析対象(押し込み問題)

材料物性:  $E = 50\text{kgf/cm}^2$   $\nu = 0.4$   $C = 0.5\text{kgf/cm}^2$



(a)変形と最大主応力 (b)すべり域

図3 圧縮試験の解析結果(  $\theta = 20^\circ$  )

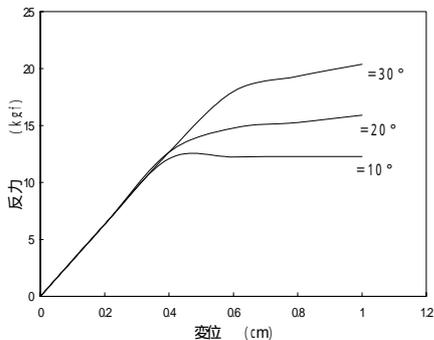


図4 反力 荷重面変位  
(圧縮試験: 平面ひずみ)

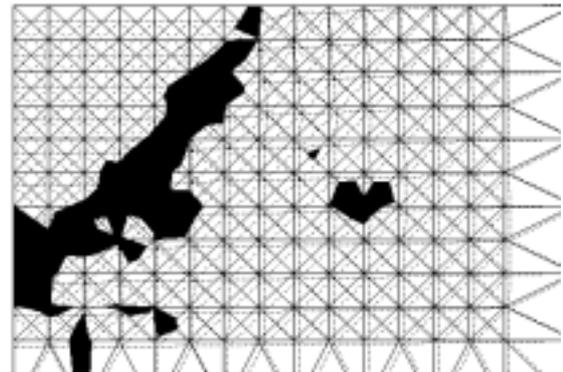


図6 押し込み問題における解析結果(すべり域)

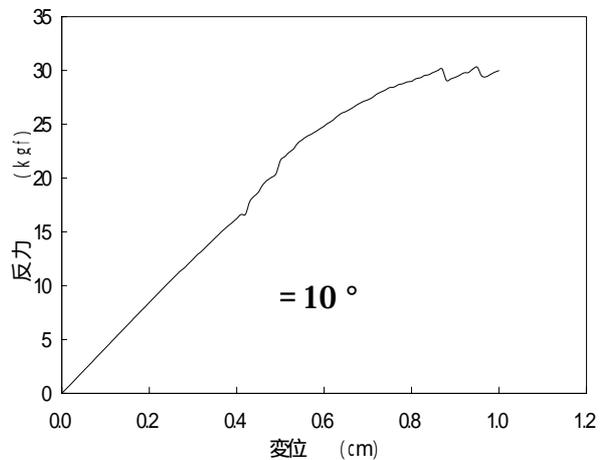


図7 反力 荷重面変位  
(押し込み問題)

5. あとがき

内部のすべりが材料の非弾性挙動を表すモデルを、微小変形の枠内において定式化し、その解析例を示した。微小変形の枠内においても、ある程度の数値解が得られることが分かったが、従来の塑性論との比較等ここでの構成式の特徴をさらに調べる必要はある。

参考文献

- 1)白戸、岩熊: 微視すべりを組み込んだ構成モデルとその大変形問題への応用,土木学会論文集, No.598/ -44,1998
- 2)S.Nemat-Nasser: On Finite Plastic Flow of Crystalline Solids and Geomaterials, Journal of Applied Mechanics, Vol.50,1983
- 3)ST.Pietruszczak&Z.Mroz: Finite Element Analysis of Deformation of Strain-Softening Materials, Int.J. Numer. Methods Eng., Vol.17,1981