

# III-90

## 多曲面モデルを用いた異方圧密粘土の排水変形解析

広島大学 工学部 正会員 ○森脇 武夫  
 広島大学 大学院 学生員 木口 基  
 広島大学 工学部 正会員 網干 寿夫

### 1. まえがき

現在提案されている構成式の多くは、等方圧密された正規圧密粘土に対するものであり、これらのモデルを異方圧密粘土に適用するには様々な問題がある。特に、せん断方向が反転する場合は実際の挙動と定量的および定性的にも一致しないことが報告されている。<sup>1), 2)</sup> そこで本研究では、異方圧密された飽和粘土の変形特性を著者らが提案する多曲面モデル<sup>3)</sup>を用いてどの程度表現できるか検討する。

### 2. 多曲面モデルを用いた構成式

この解析で用いたモデルは、Hroz<sup>4)</sup>、Prevost<sup>5)</sup>によって提案されている塑性硬化係数場モデルおよびHrozら<sup>6)</sup>によって提案されている境界曲面モデルを参考にした複数の負荷曲面を持つ多曲面モデルである。このモデルでは、等方圧密された正規圧密粘土の変形特性を比較的良好に表わしているとされる修正Cam-Clayモデルをベースとし、新たに増えるパラメータを最小限に抑え、従来から使用されてきたパラメータがそのまま使えるようにしている。

#### 1) 負荷曲面

このモデルでは、塑性変形を生じせしめる応力空間を規定する負荷曲面と塑性ひずみ増分方向を規定する塑性ポテンシャル曲面が一致するとする関連流れ則を採用し、弾性域を規定する降伏曲面は無限小の大きさに縮小しており弾性成分は事実上無いものとする。そして、これまで弾性域とされて来た負荷曲面の内側にも除荷径路に対する負荷曲面を考え、塑性ひずみを考慮しようというものである。負荷曲面 $f_i$ は、

$$f_i = (p - \alpha_{pi})^2 + (q - \alpha_{qi})^2 / M^2 - a_i^2 = 0 \quad (1)$$

と表されるものと仮定する。図-1に示すように、まず最初の正規圧密状態では、第一の負荷曲面 $f_1$ が塑性変形によって拡大する。この場合、 $\alpha_{q1} = 0$ 、 $\alpha_{p1} = a_1 = p_c / 2$ とすれば、修正Cam-Clayモデルの負荷曲面（修正Cam-Clayモデルでは降伏曲面と負荷曲面が一致している）と一致する。そして、この負荷曲面 $f_1$ に対して点Aで除荷となるような径路が与えられると、負荷曲面 $f_1$ の内側に新たに除荷径路に対する負荷曲面 $f_2$ が形成され点Aで負荷曲面 $f_1$ に接しながら拡大していく( $f_2'$ )。さらに、負荷曲面 $f_2'$ に対して点Bで除荷となるような径路が与えられると、今度は負荷曲面 $f_2'$ の内側にまた新たに負荷曲面 $f_3$ が形成され、点Bで $f_2'$ に接しながら拡大すると考える。そして、塑性ひずみ増分方向は関連流れ則を採用することによって、それぞれの負荷曲面の法線方向として次式で与えられる。

$$(d\gamma/dv)^p = (q - \alpha_{qi}) / (p - \alpha_{pi}) / M^2 = \xi_i / M^2 \quad (2)$$

ここで、 $\xi_i = (q - \alpha_{qi}) / (p - \alpha_{pi})$ と定義する。

#### 2) 硬化パラメータ

このモデルでは、全ての負荷曲面に対して $(d\gamma/dv) = \text{一定}$ の変形が生じるとき、即ち等方圧密や一次元圧密での載荷・除荷・再載荷の際に $d\gamma = K \cdot dp/p$ なる関係が成立するものとする。このような場合では、本モデル

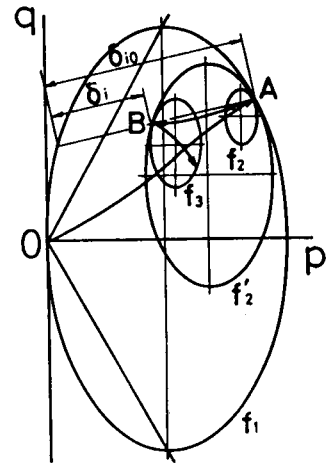


図-1 負荷曲面

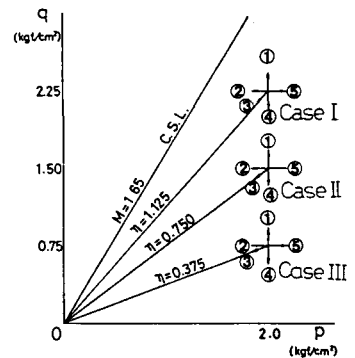


図-2 応力経路

ルでは弾性成分をを考慮していないため、式(2)より $\xi_i$  = 一定の圧縮といえる。従って、若干の演算の後、負荷曲面の大きさを表す硬化パラメータ $a_i$ と塑性ひずみの関係は、

$$da_i = \frac{1}{2 \cdot k_i} \cdot \left(1 + \frac{\xi_i^2}{H^2}\right)^{1/2} \cdot p \cdot \delta v \quad (3.a)$$

または、

$$da_i = \frac{H^2}{2 \cdot k_i} \cdot \left(\frac{1}{\xi_i^2} + \frac{1}{H^2}\right)^{1/2} \cdot p \cdot \delta \gamma \quad (3.b)$$

として与えられる。また、硬化係数 $k_i$ は次式で与える。

$$k_i = k_{i-1} + \left(\frac{\kappa}{1+e_0} - k_{i-1}\right) \cdot \left(\frac{\delta_i}{\delta_{i0}}\right)^\beta \quad (4)$$

ただし、 $k_i = \lambda / (1+e_0)$ であり、 $\delta_i$ と $\delta_{i0}$ は図-1に示すように負荷曲面の拡大の程度を表すものである。

### 3) 応力~ひずみ関係式

式(1)で示した負荷曲面と式(3)で示した硬化則とPragerの適合条件を用いると、ひずみ増分は次式で与えられる。

$$dv = \frac{2 \cdot k_i \cdot (dp + \frac{\xi_i}{H^2} dq) \cdot \left(1 + \frac{\xi_i^2}{H^2}\right)^{1/2}}{p \cdot \left(1 + \frac{\xi_i^2}{H^2}\right) \cdot \left\{\left(1 + \frac{\xi_i^2}{H^2}\right)^{1/2} + \left(1 + \frac{\xi_i^2}{H^2}\right)^{1/2}\right\}} \quad (5)$$

$$d\gamma = \frac{2 \cdot k_i \cdot \left(\xi_i \cdot dp + \frac{\xi_i^2}{H^2} \cdot dq\right) \cdot \left(1 + \frac{\xi_i^2}{H^2}\right)^{1/2}}{H^2 \cdot p \cdot \left(1 + \frac{\xi_i^2}{H^2}\right) \cdot \left\{\left(1 + \frac{\xi_i^2}{H^2}\right)^{1/2} + \left(1 + \frac{\xi_i^2}{H^2}\right)^{1/2}\right\}} \quad (6)$$

ここで、 $\xi_{i-1}$ は現在考えている負荷曲面 $f_i$ とひとつ前の負荷曲面 $f_{i-1}$ が接している点 $(q_{i-1}, p_{i-1})$ と中心 $(\alpha_{q_{i-1}}, \alpha_{p_{i-1}})$ より $\xi_{i-1} = (q_{i-1} - \alpha_{q_{i-1}}) / (p_{i-1} - \alpha_{p_{i-1}})$ で求められる。

### 3. 解析結果

図-3~5は、図-2に示すような応力経路が与えられたときの挙動をこのモデルを用いて解析した結果である。なお、解析に用いた土質パラメータは、 $\lambda = 0.2464$ ,  $\kappa / \lambda = 0.081$ ,  $M = 1.65$ ,  $\beta = 0.05$ で、広島粘土に対するものである。

経路②での破壊は、Hvorslev面を考慮する必要があるが、そのパラメータを決定するのが容易でないため、本解析では便宜的に限界状態線よりdry側の負荷曲面を用いて解析している。解析では、経路①、②、④は破壊するまで、経路③、⑤は平均有効応力がそれぞれ0.1kgf/cm<sup>2</sup>、3.0kgf/cm<sup>2</sup>となるまで計算している。また、実験値は実験装置等の制約から与えられた経路の条件が守られている範囲のデータがプロットしてある。従って、経路②では完全に破壊してはならず、経路④では主応力差がゼロとなるまでのデータである。

これらの図において、解析値は実際の挙動を比較的良好に表現していると考えられ。

〔参考文献〕 1) Sekiguchi, et al, Proc. 9th ICSMFE, Spec. Sess. 9, pp. 229-238, 1977 2) 森脇・他、第20回土質工学研究発表会概要集、pp. 397-398, 1985 3) 森脇・他、第41回土木学会講演概要集、Ⅲ-150, 1986 4) Mroz, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 15, pp. 163-175, 1967 5) Prevost ASCE, Vol. 104, EM5, pp. 1177-1194, 1978 6) Mroz, et al, Geotechnique, Vol. 29, No. 2, pp. 1-34, 1979

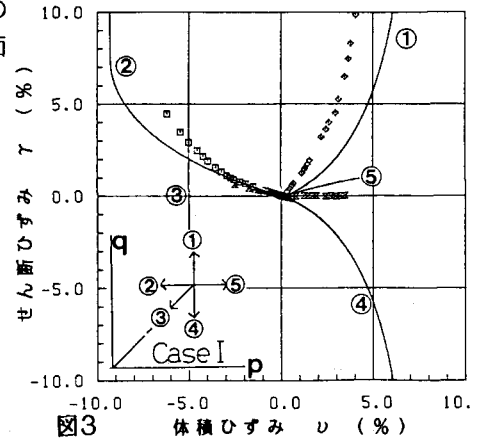


図3

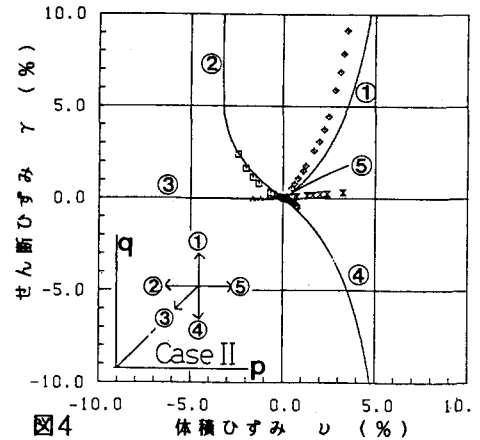


図4

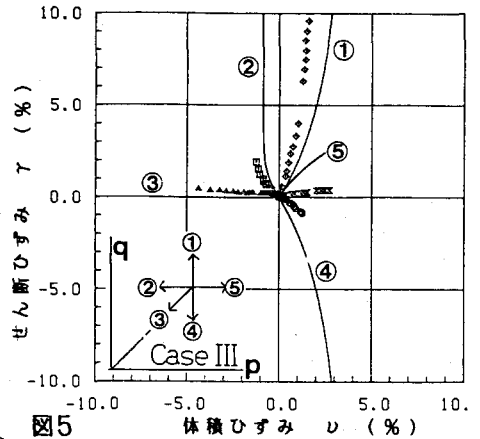


図5