

山口大学工学部 正員 ○安福規之 兵動正幸
 正員 村田秀一
 学生員 西川明宏 中田幸男

1. まえがき

著者らは、過去に軸対称条件下における砂の弾塑性構成式の提案を行ってきた¹⁾。本報告は、実際の地盤の変形・安定解析へ導入することを目的として、軸対称条件下において既に示している構成式を相異なる三主応力状態へ拡張することを試みたものである。本モデルの特徴は、従来のモデル同様応力ひずみ挙動の拘束圧依存性の表現に主きをおいていることに加えて、破壊特性や降伏特性の中間主応力依存性と初期の圧密履歴によって誘導される応力誘導異方性の表現に注目しているところにある。

2. 提案モデルの概要

提案モデルは、図-1に示すように関連しない流れ則に基づいて導かれたものであり、降伏関数 f 、塑性ポテンシャル関数 g 、破壊包絡線 (η_p の評価)、硬化パラメータ及び硬化則の仮定 ($ln k - ln p$ 関係) に特徴を有するものである。

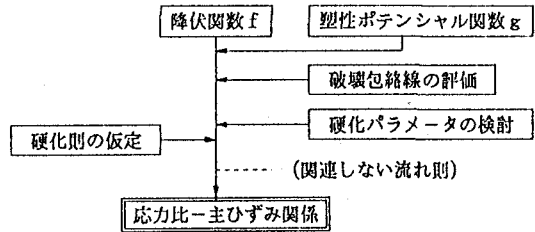


図-1 提案モデルの概要

3. 降伏関数・塑性ポテンシャル関数

軸対称条件下においてすでに定式化されている降伏関数¹⁾に、降伏特性のロードアングル依存性と応力誘導異方性の特色を取り入れることを試みており、結果として、相異なる三主応力状態における降伏関数 f は、式 (1) で与えている。

$$f = p^2 - pp_0 + \frac{3}{2N^2} [(S_{ij}-p\alpha_{ij})(S_{ij}-p\alpha_{ij}) + (p_0-p)p\alpha_{ij}\alpha_{ij}] = 0 \quad (1)$$

ここで、 N は降伏曲線の勾配が0となるときの応力比で規定され、降伏特性の中間主応力依存性を表すために、式 (2) で示す修正されたロードアングル θ^* の関数として与えている。

$$N(\theta^*) = N_c \cdot g_L(\theta^*) = N_c \cdot \frac{A}{[A^2 \cos^2[(3/2)\theta^*] + \sin^2[(3/2)\theta^*]]^{1/2}} \quad (2)$$

ここで、 A は、 N_0/N_c で定義される材料定数であり、 N_c は三軸圧縮状態の時の N の値、 N_0 は三軸伸張状態の時の N の値である。もし、 $A=1$, $\alpha=0$ ($\alpha = [3\alpha_{ij} \cdot \alpha_{ij}/2]^{1/2}$) とすると $g_L(\theta^*)$ は、 π 面上で円となり提案モデルの降伏曲面は、Drucker-Prager タイプの降伏曲面に一致する。図-2に A の値の違いによる π 面上での降伏曲面の形状を示す。なお、 $S_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij}$ は軸差応力テンソルであり、 θ^* には $\cos(3\theta^*) = (2/3) \cdot J^*_3 / 2q^{*3}$ の関係がある。また、 $q^* = [3(S_{ij}-p\alpha_{ij})(S_{ij}-p\alpha_{ij})/2]^{1/2}$ 、 $J^*_3 = (S_{ij}-p\alpha_{ij})(S_{jk}-p\alpha_{jk})(S_{ki}-p\alpha_{ki})/3$ でそれぞれ定義される。

また、塑性ポテンシャル関数 g についても降伏関数 f と同様に、ロードアングル依存性を導入するために式 (3) で与えている。

$$g = p^2 + \frac{3}{2M^2} [(S_{ij}-p\alpha_{ij})(S_{ij}-p\alpha_{ij}) - p^2 \alpha_{ij}\alpha_{ij}] = \text{const.} \quad (3)$$

ここで、 M は塑性ひずみ増分比の勾配が0となるときの応力比であり、 M 値もまた、 N 値と同様にロードアングル θ^* の関数として式 (4) で規定している。

$$M(\theta^*) = M_c \cdot g_L(\theta^*) \quad (4)$$

4. 破壊包絡線

軸対称条件下におけるピーク時の応力比は、拘束圧の増加とともに低下する。提案モデルでは、その特徴を踏まえた上で、さらにロードアングル依存性を示すものとして相異なる三主応力状態におけるピーク時の応力比を規定している。その式形は式(5)で表される。

$$\begin{aligned} \eta_p &= \alpha_{hc} \cdot g_L(\theta) & \dots & p < p_h \\ \eta_p &= \alpha_{pc} \cdot g_L(\theta) \left(\frac{p}{p_a}\right)^{b-1} & \dots & p_h < p < p_l \\ \eta_p &= M_c \cdot g_L(\theta) & \dots & p > p_l \end{aligned} \quad (5)$$

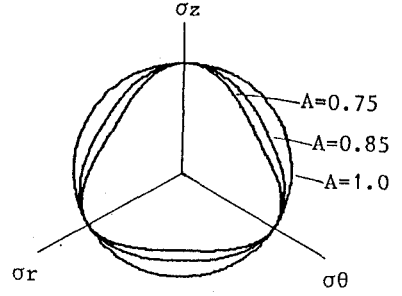


図-2 pi面上での降伏曲面の形状

5. 硬化パラメータの検討¹⁾

硬化パラメータの展開式 dk^p は、塑性せん断ひずみ増分が拘束圧に影響されることから式(6)で与えている。また、 χ は、土の硬化に対する塑性せん断成分の関わり方を決める重要なパラメータであり、これは、土(砂)が破壊状態において完全塑性材料として挙動するという仮定に基づいて、以下のように決定される。

$$dk^p = d\varepsilon^p_{ij} \delta_{ij} + \chi \eta \left[\frac{2}{3} de^p_{ij} de^p_{ij} \right]^{1/2} \quad \chi = \frac{- \left[\frac{\partial g}{\partial p} \right]}{\eta_p \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{\partial g}{\partial S_{k1}} \cdot \frac{\partial g}{\partial S_{k1}} \right]^{1/2}} \quad \text{at } \eta = \eta_p \quad (6)$$

6. 提案モデルの検証

提案モデルの検証は、異方圧密を受けた秋穂砂の応力比-主ひずみ関係の予測により行った。この試験は、 $\theta = 0^\circ$ 方向に応力比0.6で $p = 0.2\text{MPa}$ まで異方圧密した後、応力比一定で $p = 0.1\text{MPa}$ まで除荷し、さらに、 p 一定の条件で静水圧軸まで戻した状態から、種々な θ 値の基で行った p 一定、 θ 一定試験である。図-3は、 θ が 0° (三軸圧縮状態)、 15° 、 30° 、 60° (三軸伸張状態)の場合の予測値と実測値の比較を示している。図より、提案モデルは、相異なる三主応力状態における応力比-主ひずみ関係をうまく表現しているといえる。

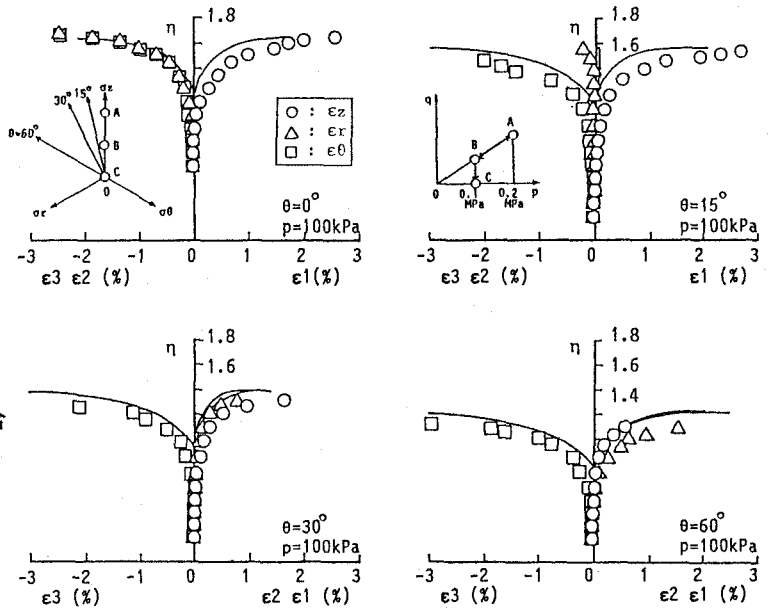


図-3 p一定、 θ 一定試験によって観察された応力比と主ひずみの関係 ($\theta = 0^\circ$ 方向に過圧密比2の異方圧密除荷履歴を受けた秋穂砂の場合)

7. まとめ

本報告は、従来、軸対称条件下において提案されたモデルを相異なる三主応力状態下へ拡張することを試みたものである。提案モデルは、等方圧密あるいは種々な方向への異方圧密履歴を受けた砂の応力比-主ひずみ関係や主ひずみが顕著に生じ始める応力状態を相異なる三主応力状態下においてうまく表現できることを確かめた。

《 参考文献 》

- 1) 安福、村田、兵動、小西 (1990) : 第25回土質工学研究発表会, pp.495-498.