

Infinite Nesting Surfaces モデルの飽和粘土地盤の動的挙動への適用

東海大学工学部 正員 O 兵動正幸
九州大学工学部 " 山内豊隆

1. まえがき

土が繰返しせん断を受けるとき、その変形挙動は初期応力状態およびその後の応力経路に強く依存することが知られている。具体的には、残留間隙水圧（または体積ひずみ）、初期せん断による残留ひずみ、有効応力の変動に伴うヒステリシスの変化などが負荷条件によって異なってくる。このような現象を表現するためには、要方硬化の概念の導入が不可欠と考えられ、これを表わすモデルとしては、移動硬化モデルが適していると思われる。近年 Mroz ら¹⁾は、移動硬化と等方硬化を組み合わせた複合硬化則を表わす Infinite Nesting Surfaces モデル（以下 INS モデルと呼ぶ）を提案し、繰返し載荷時の土の挙動を表現する試みを行っている。このモデルによれば、載荷時のみならず除荷時においても塑性変形が生じ、ためらなヒステリシスを表現でき、どのような初期応力状態から出発しても Masing 則を満足しつつ、それぞれ異なる塑性挙動を表わすことができる。しかしながら、Mroz らは実際の土の挙動との対応を十分に示しておらず、このモデルのパラメータの意味も不明瞭である。本報は、この INS モデルを用いて p - q 面上で数値解析を行い、飽和粘土の非排水繰返し三軸試験結果と比較して、モデルの適合性を検討するものである。

2. INS モデルの理論構成

INS モデルにおいては、応力空間における応力点の移動はすべて負荷ととらえられ、無数の降伏面が生じ、またこれらの降伏面のほかに常に降伏面を取り囲むもう一つの曲面が考えられる。この曲面は、以前の荷重履歴または圧密条件によって決まるもので、これを圧密面と呼ぶ。圧密面の形状は楕円であり次式で表わされる。

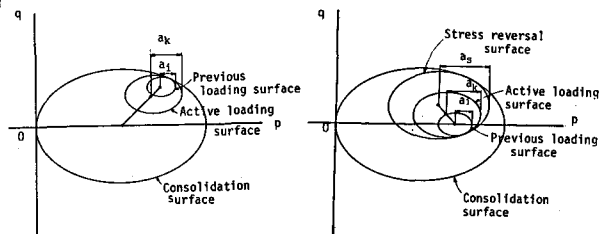
$$F(p, q, \eta^p) = (p-c)^2 + q^2/m^2 - a^2(\eta^p) = 0 \quad \dots (1)$$

ここに、 m : 楕円の偏心率、 a : 楕円の長軸半径、 $\eta = 1/(1+e)$ 、 $p = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3$ 、 $q = \sigma_a - \sigma_r$ 。また、降伏面は応力点が移動することによってその点を通るように形成され、圧密面と相似な楕円となり次式で表わされる。
 $f(p, q, \alpha_p, \alpha_q, \eta^p) = (p-\alpha_p)^2 + (q-\alpha_q)^2/m^2 - a_0^2(\eta^p) = 0 \quad \dots (2)$ ここに、 α_p, α_q : 楕円の中心座標、 a_0 : 楕円の長軸半径。流し則は、関連流し則が適用され、塑性せん断ひずみ、体積ひずみはそれぞれ次のようになる。
 $d\epsilon_p^p = 1/K_p \cdot m_p d\sigma_m \quad \dots (3) \quad d\epsilon_v^p = 1/K_p \cdot m_p d\sigma_m \quad \dots (4)$

ここに、 $m_p = (p-\alpha_p)/G_f$ 、 $m_q = (q-\alpha_q)/G_f m^2$ 、 $G_f = [(p-\alpha_p)^2 + (q-\alpha_q)^2/m^2]^{1/2}$ 、 $d\sigma_m = m_p dp + m_q dq$ 。降伏楕円の位置、大きさは図-1に示されるような法則にしたがい決定される。すなわち、圧密楕円内を応力点が移動する場合は図の2通りのケースが考えられ、現在の応力点を通る楕円は、1つ前の降伏楕円の中心と圧密楕円（または応力折り返し面）の中心とを結ぶ線上に中心が来るように決定される。圧密楕円の半径 a は、次式のように塑性間隙比 e^p の関数形で表わされ、 e^p の変化によって拡大、縮小する。また降伏面もそれに応じて拡大、縮小する。

$$a = a_0 \exp[(e_0 - e^p)/(\lambda - K)] \quad \dots (5)$$

ここに、 λ, K : それぞれ、 e - $\log p$ 曲線の載荷・除荷曲線から求まる定数。また、繰返し載荷に伴う材料の劣化を表現するために降伏面の移動を考慮し次式で表わされる。



(a) 圧密面内の単調負荷 (b) 応力が反転する場合
図-1 降伏面の決定方法

$$d[\alpha_i - \{\alpha_i\}] = [\alpha_i - \{\alpha_i\}][da(e^p)/a(e^p) - d\eta] \quad \dots (6) \quad \text{ここに, } \eta = \xi\gamma,$$

$$\gamma = (\gamma_0 + \gamma_u \eta \epsilon_A) / (1 + \eta \epsilon_A), \quad \gamma_u = \gamma_0 [1 + \tau(a_i/a)], \quad \epsilon_A = |\int d\epsilon_p|, \quad \xi, \gamma_0, \eta, \tau: \text{定数.}$$

INSモデルでは、降伏面の位置、大きさによって式(3)、(4)の硬化係数が変化し、次式で表わされる。

$$K_p = K_{PB} + (K_{PO} - K_{PB}) R_i^{(\gamma R_i + 1)} \quad \dots (7) \quad \text{ここに, } R_i = 1 - a_i/a, \quad K_{PO}, K_{PB}: \text{それぞれ最大}$$

折返し点および圧密直線上の硬化係数。以上のように、INSモデルは $\lambda, \kappa, K_{PO}, \xi, \gamma_0, \eta, \tau$ の7個のパラメータを有し、これを適宜決めやる必要がある。

3. 数値計算

INSモデルを用いて、則圧一定の非排水繰返し三軸試験をシミュレートした。図-2に初期拘束圧196 kN/m²、振幅98 kN/m²における片振り、両振りの計算結果を示す。上は定数値に用いたパラメータの値は図中に示す。計算は20サイクルまで行ったものであるが、両振り、片振りの特徴が良く現われている。パラメータの決定方法は以下のような方法によった。まず、 $\xi = 0$ 、すなわちP軸上で応力点を移動させてみた。結果は、等方圧密、除荷の試験結果と対比して図-3に示している。この場合、除荷曲線の形状が K_{PO}, γ_0 の影響を大きく受けるので、これらの値をここで決定した。図-3(a)、(b)よりそれぞれ、 $K_{PO} = 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\gamma_0 = 10$ が採用された。次に、同じ粘土に対する非排水繰返し三軸試験結果(片振り、

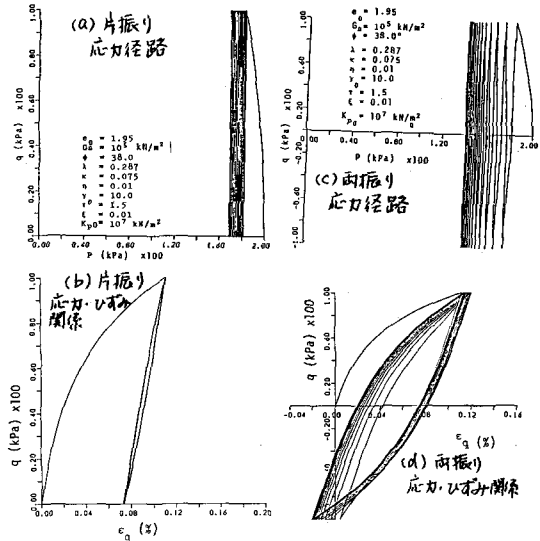


図-2 繰返し三軸試験のシミュレーション

繰返し回数3600回、他は図-2のものと同一条件)と対比して他のパラメータを求めた。ここでは降伏面の移動を支配するパラメータ ξ (式6)を小さくしてその影響を除いた。 τ の値を1.5に固定すると γ_0 から2.5 γ_0 までの値をとりうる。このように決めると残りは η だけになる。 η の変化による残留ひずみ ϵ_p 、間隙水圧 u の変化が図-4、5に示される。図に示される程度、

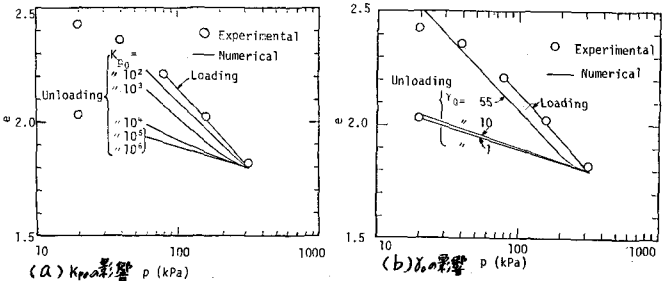


図-3 等方圧密、除荷試験のシミュレーション

み ϵ_p 、間隙水圧 u の変化が図-4、5に示される。図に示

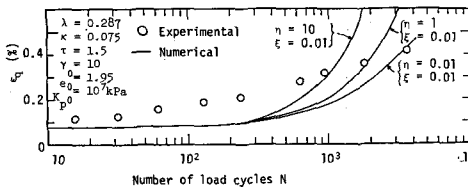


図-4 繰返し回数と残留ひずみの関係

近は度であるが、 $\eta = 1$ の場合からひずみ水圧とも最終値で実験値に近くなる。

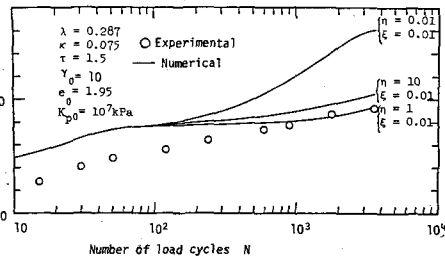


図-5 繰返し回数と間隙水圧の関係

謝辞: ここに用いた実験データは、すべて西日本工科大学一哉教授よりいただいたものである。また同教授には、貴重な意見をいただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献: 1) Z. Mroz et al.: Geotechnique, Vol. 31, No. 4, pp. 451-469, 1981.