

1. はじめに

Biot の圧密理論の定式化は Sandhu ら¹⁾によって Gurtin の変分原理に基づく解法が提案され、我が国では横尾ら²⁾が独自に Sandhu らと類似な方法でこの問題の定式化に成功した(横尾・Sandhu の解法)。その後 Christian は微小な時間増分ごとの体積ひずみの推移を連続の式の差分化で表し、釣合い方程式と連立させる解法を提案した(Christian の解法)。また Zienkiwicz ら³⁾は、仮想仕事の原理を適用して Biot 式の定式化に成功し(Zienkiwicz の解法)、関連流動則、非関連流動則にかかわらず土の数値モデルの適用が可能となり、実務で三次元圧密解析が用いられる条件が整ってきている。しかし我国で本解析を行う場合、Cam-Clay モデルを導入した program code を用いることがほとんどで、この場合粘土層の他に、砂層やシルト層を含む互層地盤への適用が難しい点や、側方変位が過大に評価される点が指摘されている。

そこで筆者らは Zienkiwicz 解法を framework とし、土の構成式には、熊ら⁴⁾が開発した、粘性土、砂質土にかわりなく適用できる「二重負荷型双曲線モデル」を基礎に、「塑性圧縮量の評価部分を改良したモデル」を導入した「圧密解析 program code」を開発し、いくつかのモデル計算を行ったので、以下にそれらの結果をまとめた⁴⁾。

2. 二重負荷型双曲線モデル⁴⁾の概要

本モデルは、ひずみ増分を弾性特性と塑性特性に分け、さらに塑性部分を塑性圧縮と塑性せん断に分けて考える。すなわち式(1)に示す様に、全ひずみ増分 ($d\varepsilon_{ij}$) を弾性ひずみ増分 ($d\varepsilon_{ij}^e$)、塑性圧縮ひずみ増分 ($d\varepsilon_{ij}^{pc}$)、塑性せん断ひずみ増分 ($d\varepsilon_{ij}^{ps}$) に分けて考える。

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^{pc} + d\varepsilon_{ij}^{ps} \quad \dots (1)$$

弾性特性は、均質等方材料を仮定してポアソン比(ν)とヤング率 (E) を用いて表現する。

$$\nu = \nu_0 \cdot \{1 - \sigma_m / (D_c + \sigma_m)\} \quad \dots (2)$$

ν_0 , D_c は実験定数である。また、ヤング率を式(3)に表わす。ここに E_0 , E_N は実験定数で、 p_a は無次元化のための単位応力である。

$$E = E_0 \cdot (\sigma_m / p_a)^{E_N} \quad \dots (3)$$

塑性圧縮部分の負荷関数 (f_c) には、静水圧軸に直交する π 面($f_c = I_1$)を用い、また κ_0 は初期状況を表す定数である(今回は $\kappa_0 = 0$)。

$$F_c = f_c - (\kappa_{c0} + \kappa_{ch}) = 0 \quad \dots (4)$$

さらに圧縮の構成則を導入し実験より得られる $f - \log(p)$ 関係を用いて、硬化パラメータ κ_{ch} を求める。ここに、 κ_{ch} は次式で表わし、 C_c は圧縮指数である。

$$\kappa_{ch} = 3 \cdot 10^{(f - f_v)/C_c} \quad \dots (5)$$

正規圧密域では C_{cs} 、過圧密域では C_{ck} を用いる。また、透水係数 k は

$$k = A_k \cdot \sigma_m^{B_k} \quad (A_k, B_k : \text{係数}) \quad \dots (6)$$

SD 打設域ではドレーンピッチと粘土層厚の比の二乗を A_k に乗じて透水係数を補正した。

一方塑性せん断ひずみは、 $\sigma_m -$ 図-1 $f - \log(p)$ 関係定・平面ひずみ試験結果から弾性部分(γ_{oc1}^e)を差し引いて得た「 $\gamma_{oc1}^p \sim \tau_{oc1}$ 関係」から双曲線関数と仮定して式(7)で表わした。

$$\tau_{oc1} = 1 / (1 / (G_{oc1-0} \cdot \gamma_{oc1}^p) + R_f / \tau_{oc1-f}) \quad \dots (7)$$

$$R_f = \tau_{oc1-f} / B_a \quad (B_a : \text{双曲線の漸近線}) \quad \dots (8)$$

式中 G_{oc1-0} と R_f はそれぞれ $\gamma_{oc1}^p \sim \tau_{oc1}$ 関係の初期勾配、破壊強度比である。 τ_{oc1-f} はモール・クーロン則に基づく最大せん断応力である。

3. FEM 定式化

有限要素離散化では Biot 理論の定式化において Zienkiwicz 流の手法(仮想仕事の原理)を用いた。また間隙水の流れに関連した基礎式についての離散化は、連続条件とダルシー則を用い、これに Galerkin 法を適用して変位と間隙水圧に関するマトリックスを求めた(式(9))。

$$\begin{bmatrix} [K_1] & [K_3] \\ [K_3]^T & -\alpha \Delta t [K_2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Theta_q(t + \Delta t) \\ \Theta_p(t + \Delta t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ [K_3]^T & \Delta t(1 - \alpha)[K_2] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Theta_q(t) \\ \Theta_p(t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} R_q \\ R_p \end{Bmatrix} \quad \dots (9)$$

この式より時間が Δt だけ増加したときの変位と間隙水圧が求まる。

4. 材料パラメータの設定

解析に用いた材料定数は海底地盤(GL-10m)試料の圧密試験、三軸 CU 試験結果より設定した。図-2 に解析地盤条件を、表-1 に材料定数一覧表を示す。 E , ν , c , ϕ , γ' , C_{ck} , C_{cs} は実験定数、 N は鉛直方向の透水係数 k_y と水平方向の透水係数 k_x の比で今回は $N=1$ とした。盛土部分のパラメータは盛土材料の実験値を用いている。盛土は盛土形状として計算を行い、その荷重は 10 分割して载荷する。

単位:cm, SD : サンドドレーン領域

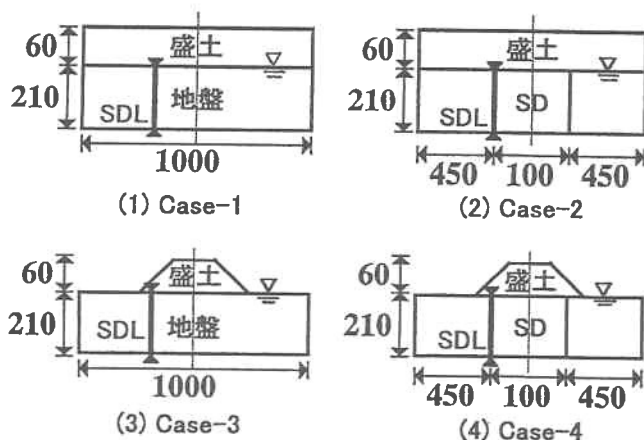
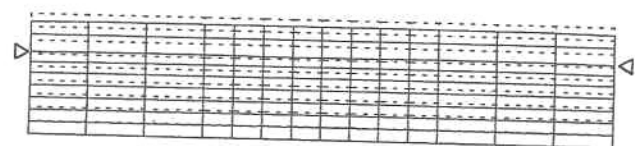


図-2 解析地盤条件

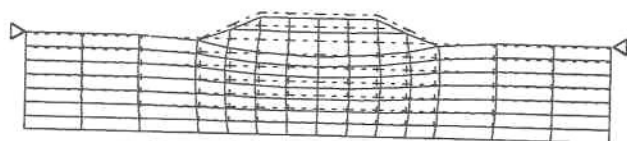
表-1 材料定数一覧表

	原地盤		盛土
	未改良地	改良地	
ν	0.3	0.3	0.35
$E(\text{kgf/cm}^2)$	200	200	50
EN	1.037	1.037	1.037
$\gamma'(\text{kgf/cm}^3)$	0.0008	0.0008	0.0019
e_0	1.763	1.763	-
Ccs	0.728	0.728	-
Cck	0.027	0.027	-
Goct	8.849	8.849	-
Gn	0.9016	0.9016	-
$c(\text{kgf/cm}^2)$	0.12	0.12	0
$\phi(^{\circ})$	23.67	23.67	30
μ	0.25	0.25	-
Rf	0.92	0.92	-
Ak	0.0111	0.111	10
Bk	-0.003	-0.003	-
$N=kx/ky$	1	1	1
$\sigma_{mc}(\text{kgf/cm}^2)$	0.473	0.473	-

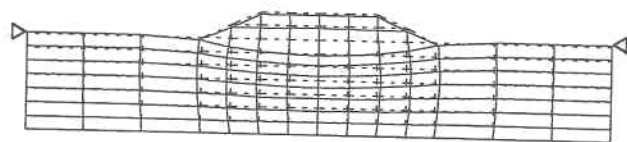
図中△印: 地表面



(1) Case-1, Case-2*



(2) Case-3



(3) Case-4

図-3 全体変形図

Case-1, Case-2 の変形図は同じであったため同一の図で示す。

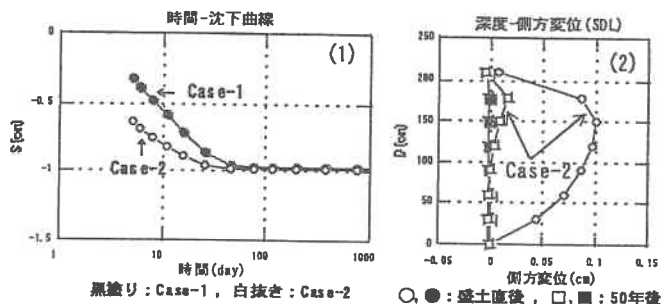


図-4 Case-1, Case-2 比較

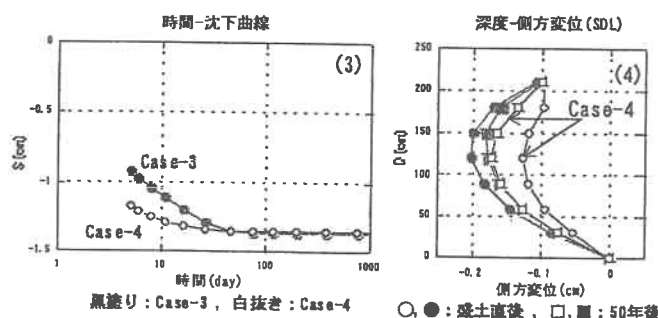


図-5 Case-3, Case-4 比較

Cas-1 と 2 は、一次元圧密解析である。最終状態の変形は SD の有無にかかわらずまったく一致した。もちろん時間～沈下曲線は SD の有る場合の方が早い。SD が打設していない周辺からの排水流入のため、その影響を受ける。また中央線から左側位置の側方変位は、Case-1 がまったく一次元的に沈下しているのに対して、Case-2 の場合は、一旦 SD 側に引き込まれたものが、時間と共にほぼ原位置に変形が戻るといふ挙動を示す。この挙動は SD 部分の圧密が早く進むためと解釈できる。なお沈下量については一次元圧密解析結果と一致することを、また Case-1 では間隙水圧にマンデル・クレイヤー現象が生じていることを確認している。これに対し、Case-3 の場合の側方変形は、載荷直後に外側に変形したものが、最終状態では内側に移動する。一方 Case-4 では、SD の影響で載荷直後よりも最終状態では外側に移動している様子が理解できる。

以上三次元圧密現象が解析で適切に表現できており、数値モデルおよび Biot 式の program 化は適切であると判断した。今後さらに実地盤の状況に近づけた解析を行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) Sandhu R.S. and E.L. Wilson : Finite-Element Analysis of Seepage in Elastic Media, Proc. ASCE, Vol. 95, EM3, pp. 641~652, 1969
- 2) 横尾義貴・山肩邦男・長岡弘明 : Finite Element Method Applied to Biot's Consolidation Theory, Soils and Foundations, Vol. 11, No. 1, pp. 29~46, 1971
- 3) Zienkiewicz, O.C. and D.J. Naylor : Finite Element Studies of Soils and Porous Media, Lectures on Finite Element Method in Continuum Mechanics, The Univ. of Alabama, pp.459~493, 1973
- 4) 熊潔 : 二重負荷型双曲線モデルの開発と浅い基礎の支持力及び軟岩斜面安定解析への適用, 3, 2002

第Ⅳ部門

Ⅳ－ 1 ～Ⅳ－37