

1. 個別要素法を用いた計算

昨年度の研究発表に続いて、本報では、供試体中の体積歪みを用いて間隙水圧の発生を検討し、固体-液体相互作用を表現した間隙水圧連成型個別要素法を用いて、非排水三軸圧縮試験の数値実験を行った結果を報告する。昨年度の報告との違いは、粒状体要素間の回転に関して抑制させる機械要素を導入したことである。以下に計算手法を示す。

図1に二つの粒子における衝突もしくは接触時に発揮される力の伝達系の概念図を示す。垂直方向、接線方向、並びに回転方向に弾性バネならびに粘性ダッシュポットを設定している。さらには、接線方向には摩擦スライダを設定し、すべり摩擦を表現する。

回転方向の弾性バネならびに粘性ダッシュポットによる抑制効果は次の通り与える

$$[E_i^r] = K_r [\omega_i] \cdot \Delta t \quad \text{式 1}$$

$$[D_i^r] = \eta_r [\omega_i] \quad \text{式 2}$$

半径 R の粒状体要素を中心に、半径 2R の計測球要素を設定することにより間隙水圧を表現することとする。間隙水圧は、計測要素の平均体積歪みを基に算出する。

体積歪み速度は次の式3で表される。

$$\epsilon_v = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33} \quad \text{式 3}$$

ここで、 $\epsilon_{11}$ 、 $\epsilon_{22}$ 、 $\epsilon_{33}$ は、体積歪み速度の x、y、z 軸方向成分である。体積歪み速度の成分の計算方法を以下に示す。

1つの計測要素と衝突または接触している粒状体要素ならびに交差している壁要素の合計 (N 個) の平均速度および中心位置を次の式4のように算出する。

$$\bar{v}_i = \frac{\sum v_i}{N}, \quad \bar{x}_i = \frac{\sum x_i}{N} \quad \text{式 4}$$

ここで、下付添え字 i は、x、y、z 軸方向成分を表す 1~3 までの値をとる。それぞれの粒状体要素の平均値からの相対速度ならびに相対中心位置を次の式5のように算出する。

$$\tilde{v}_i = v_i - \bar{v}_i, \quad \tilde{x}_i = x_i - \bar{x}_i \quad \text{式 5}$$

また、歪み速度成分を用いて、式6のように相対速度を推定する。

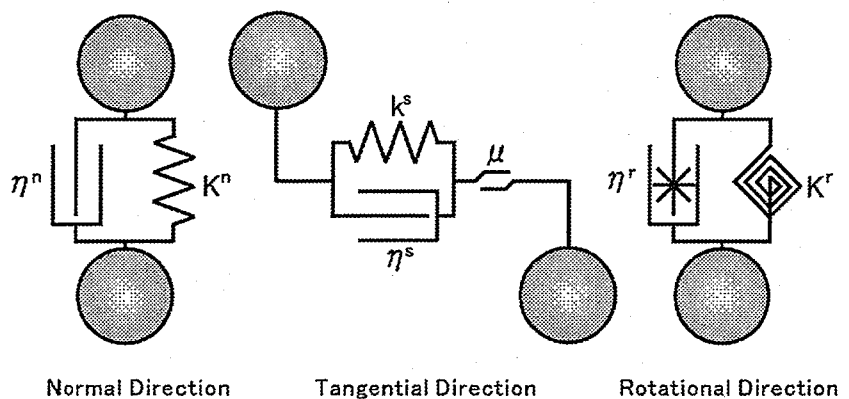


図1 導入した機械要素

表1 入力パラメータ

パラメータ	入力値
供試体高さ	10 cm
供試体直径	5 cm
球要素直径	1 cm
球要素密度	2.573 g/cm <sup>3</sup>
球要素間 $K_n$	$5.0 \times 10^6$ N/m
球要素間 $K_s$	$5.0 \times 10^6$ N/m
球要素間 $K_r$	$7.0 \times 10$ Nm
摩擦係数	0.60
球要素間 $\eta_n$	$2.3 \times 10^5$ Ns/m
球要素間 $\eta_s$	$1.1 \times 10^5$ Ns/m
球要素間 $\eta_r$	$1.0 \times 10^{-3}$ Nms
最小主応力	20 kPa
水の弾性係数	$2.3 \times 10^6$ N/m <sup>2</sup>
軸圧縮速度	1 cm/sec
透水係数	$1.6 \times 10^{-1}$ cm/sec

$$\tilde{v}_i = \varepsilon_{ij} \tilde{x}_j \quad \text{式 6}$$

推定値と実測値の差を最小にする歪み速度テンソルを次の式 7 で求める。

$$\sum_N \varepsilon_{ij} \tilde{x}_i \tilde{x}_j = \sum_N \tilde{v}_i \tilde{x}_j \quad \text{式 7}$$

間隙水圧の変化は、体積歪み変化の値を用いて算出し、計測要素中の粒状体要素および壁要素の中心に作用する力として計算する。

$$F_b = (P + \Delta P)A = (P + E_v \varepsilon_v) \pi R^2 \quad \text{式 8}$$

$$F_w = (P + \Delta P)A = (P + E_v \varepsilon_v) \pi \{(2R)^2 - L^2\} \quad \text{式 9}$$

ここで、 $\Delta P$  は  $\Delta t$  間に発生した間隙水圧の変化、 $L$  は壁要素の中心からの距離である。

計測要素  $m$  および  $n$  間の間隙水の流れはダルシー則に従うものとする。

$$\Delta Q_{mn} = k \pi R^2 \frac{P_n - P_m}{\rho g L_{mn}} \Delta t \quad \text{式 10}$$

間隙水の移動に伴う圧力変化の総量は以下で算出される。

$$P_m = \sum_N \Delta P_{mn} = \sum_N \frac{E_v \Delta Q_{mn}}{V_m} \quad \text{式 11}$$

## 2 数値計算結果

入力したパラメータ値を表-1 に示す。種々の初期間隙比に形成した供試体に対する非排水圧縮試験において発揮された有効応力表示でのピーク内部摩擦角を図 2 に示す。図 2 には、回転抑制を与えた場合ならびに与えない場合の両条件下での結果を示している。その結果、初期間隙比が 0.85 よりも小さい密な供試体の試験では、回転に抑制を与えても与えなくてもピーク有効内部摩擦角の大きさに大きな違いは認められなかった。また、その値は、初期間隙比が小さくインターロッキングが強くなると、大きな有効内部摩擦角が得られる結果となった。初期間隙比が 0.85 よりも大きな粗の供試体の試験では、得られたピーク有効内部摩擦角は大きくばらつく結果となった。これは、過剰間隙水圧が大きく上昇し有効垂直応力が小さくなると、わずかな有効垂直応力の変化でも内部摩擦角の算出値に大きな違いを及ぼすことの影響が強いと考えられる。つまり、この問題を解決するためには、数値シミュレーションで発生させる粒状体要素の数を大幅に増やして高精度に水の移動を計算することにより、より実際の土に近い状態を再現することが必要と考えられる。

図 3 に初期間隙比と定常状態時における偏差応力の関係を示す。回転抑制を入れない試験では、臨界間隙比 0.85 が認められた。しかし、回転抑制を入れた試験では、初期間隙比が 0.87 以下では直線の関係が認められ、実際の土の結果と調和的な関係になった。

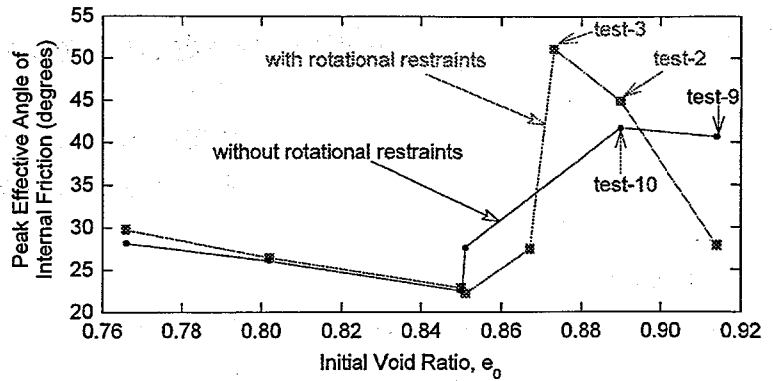


図 2 内部摩擦角と間隙比の関係

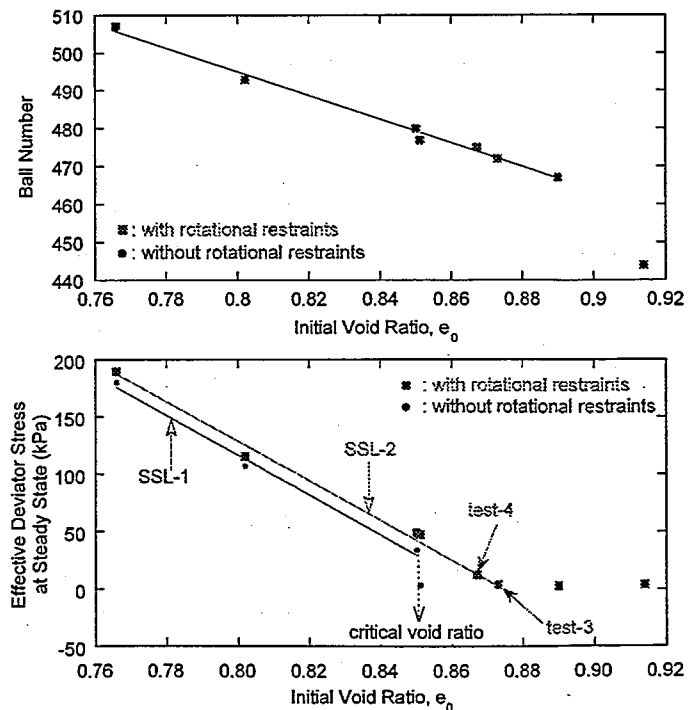


図 3 球要素数および定常状態時の偏差応力と間隙比の関係