

## 1 個別要素法を用いた計算

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。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。垂直および接線の両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。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。

図2に計測要素の概念図を示す。半径  $R$  の粒状体要素を中心に、半径  $2R$  の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1で表される。

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \quad \text{式1}$$

ここで、 $\varepsilon_{11}$ 、 $\varepsilon_{22}$ 、 $\varepsilon_{33}$ 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2のように算出する。

$$\bar{v}_i = \frac{\sum_N v_i}{N}, \quad \bar{x}_i = \frac{\sum_N x_i}{N} \quad \text{式2}$$

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3のように算出する。

$$\tilde{v}_i = v_i - \bar{v}_i, \quad \tilde{x}_i = x_i - \bar{x}_i \quad \text{式3}$$

また、歪み速度成分を用いて、式4のように相対速度を推定する。

$$\tilde{v}_i = \varepsilon_{ji} \tilde{x}_j \quad \text{式4}$$

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5で求める。

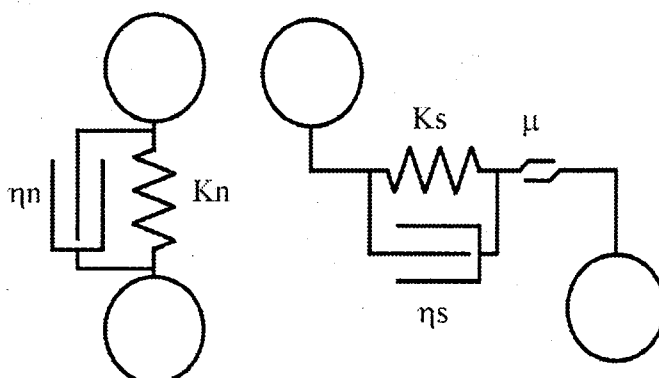


図1 球要素間の力の伝達系

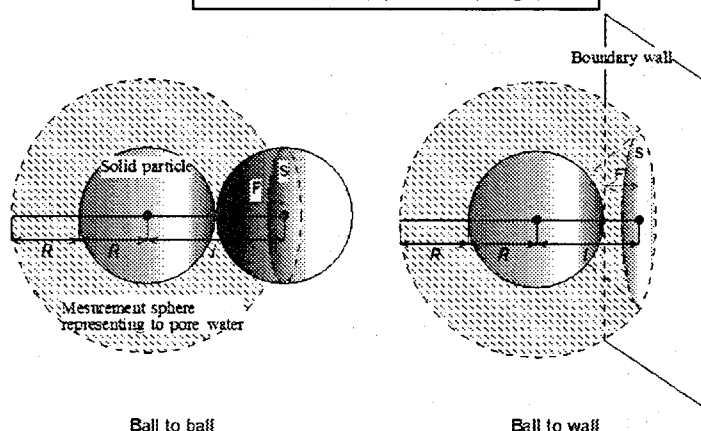


図2 間隙水を示す計測球要素の概念図

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 Kn	5.0×10 <sup>6</sup> N/m
球要素間 Ks	5.0×10 <sup>6</sup> N/m
摩擦係数	0.59
球-壁要素間 Kn	5.0×10 <sup>6</sup> N/m
最小主応力	20 kPa
水の弾性係数	2.3×10 <sup>6</sup> N/m <sup>2</sup>
軸圧縮速度	1 cm/sec
透水係数	1.6×10 <sup>-1</sup> cm/sec

$$\sum_N \varepsilon_i \tilde{x}_i \tilde{x}_j = \sum_N \tilde{v}_i \tilde{x}_j \quad \text{式5}$$

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。

$$F_b = (P + \Delta P)A = (P + E_v \varepsilon_v) \pi R^2 \quad \text{式6}$$

$$F_w = (P + \Delta P)A = (P + E_v \varepsilon_v) \pi \{(2R)^2 - L^2\} \quad \text{式7}$$

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。

$$\Delta Q_{mn} = k \pi R^2 \frac{P_n - P_m}{\rho g L_{mn}} \Delta t \quad \text{式8}$$

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。

$$P_m = \sum_N \Delta P_{mn} = \sum_N \frac{E_v \Delta Q_{mn}}{V_m} \quad \text{式9}$$

## 2 数値計算結果

入力したパラメータ値を表1に示す。供試体は、初期圧密時の間隙比が0.98(粗)および0.80(密)の2種類に形成した。図3に圧縮試験を実施した際に得られた有効応力経路を示す。粗の供試体では

(図3a)、有効応力経路が圧縮開始から左方向に移動し、過剰間隙水圧の発生—有効垂直応力の低下が認められた。一方、密の供試体では(図3b)、有効応力経路は右上方向へ移動した。負の間隙水圧が発生し、有効垂直応力が全垂直応力よりも大きな値を示し、その結果、せん断抵抗も大きな値となった。この結果は、砂に対する三軸圧縮試験で確認されている、粗の供試体での contractive

deformation、密の供試体での dilative deformation と同じ結果を示しており、非常に粗い結果ながら砂の非排水三軸圧縮挙動を数値計算で再現することに成功した。

## 3 今後に向けて

現在は、球要素の直径が1cmと大きく、供試体中の要素数が少ない。計算時間との関連もあるが、粒径を小さくすることにより供試体中の要素数の数を増やし、実際の砂供試体に近いものを考えたい。また、供試体中の水の流れを現在はダルシー則で与えているが、層流以外の効果も組み込んだモデルを構築していく予定である。

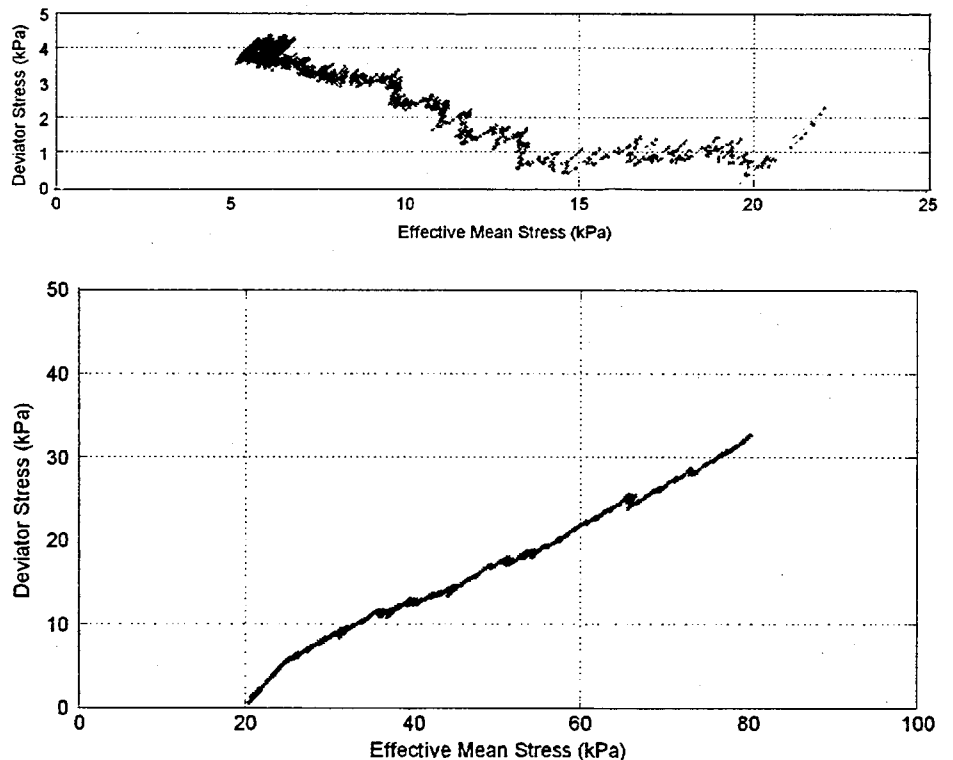


図3 有効応力経路 a:粗供試体 ( $e_0=0.98$ )、b:密供試体 ( $e_0=0.80$ )