

九州大学大学院 学○大嶺 聖
九州大学工学部 正 落合 英俊

1. まえがき

著者らは、混合土を構成するマトリックス(細粒子と水から成る部分)と粗粒子に着目し、混合土の圧縮特性を粗粒子およびマトリックスの特性から評価する手法を示した¹⁾。本文では、その考え方を混合土のせん断特性に拡張し、実験結果との比較により、その妥当性を検証した。

2. 混合土の応力-ひずみ関係の誘導

土要素に作用する応力を偏差成分と等方成分に分けた場合、それらの応力は、軸対称圧縮状態で、それぞれ次のせん断応力および平均主応力で表される。

$$q = \sigma_1 - \sigma_3, \quad p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$$

さらに、q および p に対応するひずみは、それぞれ次のせん断ひずみおよび体積ひずみで表される。

$$d\gamma = 2(d\epsilon_1 - d\epsilon_3)/3, \quad dv = d\epsilon_1 + 2d\epsilon_3$$

このとき、混合土の応力増分-ひずみ増分関係が、次式で表されるものとする。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{\gamma} \\ d\bar{v} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

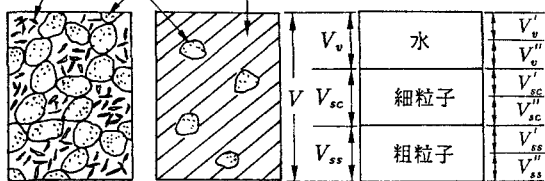
ここで、[]は、2×2型の行列を表す。

式(1)の[D]を求めるために、次の仮定の下で成立する混合土の応力-ひずみ関係を考察する。なお、応力は、すべて有効応力とする。

<仮定①>混合土は、粗粒子同士が互いに接触し骨格を形成している状態(構造Ⅰ)と粗粒子同士が接触せずにマトリックス中に浮いた状態(構造Ⅱ)にある二つの構造がある割合で混在している。

このときの混合土の構成模式図を図-1に示す。混合土の間隙状態を表すために、次の体積量を定義する。

細粒子 粗粒子 マトリックス(細粒子+水)



<構造Ⅰ>

<構造Ⅱ>

構造Ⅰ: $V' = V_v' + V_{sc}' + V_{ss}'$

構造Ⅱ: $V'' = V_v'' + V_{sc}'' + V_{ss}''$

図-1 混合土の構成模式図

i) 細粒分含有率: $F = V_{sc}/(V_{ss} + V_{sc})$

ii) 混合土中に占める構造Ⅰの体積含有率: $R = V'/V$

iii) 構造Ⅱにおけるマトリックスの体積含有率:

$$f^* = (V'' - V_{ss}'')/V''$$

ここで、V, V', V''(=V-V'), V_{ss} , V_{sc} および V_{ss}'' は、それぞれ混合土、構造Ⅰ、構造Ⅱ、粗粒子、細粒子および構造Ⅱにおける粗粒子の体積である。

<仮定②>構造Ⅰに作用する応力はすべて粗粒子骨格に伝わり、その応力-ひずみ関係は、粗粒子のみのそれと表される。

<仮定③>構造Ⅱに作用する応力はすべてマトリックスに伝わり、その応力-ひずみ関係は、マトリックスのみのそれと表される。

すなわち、粗粒子骨格およびマトリックスの応力増分-ひずみ増分関係は、F=0および100%の場合のそれを用いて、それぞれ次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}_s \\ d\bar{v}_s \end{Bmatrix} = [D_s] \begin{Bmatrix} d\bar{q}_s \\ d\bar{p}_s \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}^* \\ d\bar{v}^* \end{Bmatrix} = [D^*] \begin{Bmatrix} d\bar{q}^* \\ d\bar{p}^* \end{Bmatrix} \quad (3)$$

<仮定④>混合土の応力およびひずみは、いずれも混合土全体の体積についての平均値とする。

混合土の平均応力 $\bar{\sigma}_{ij}$ は、粗粒子骨格の平均応力 $\bar{\sigma}_{sij}$ ($= \int_V \sigma_{sij} dV'/V'$) およびマトリックスの平均応力 $\bar{\sigma}^*_{ij}$ ($= \int_V \sigma^*_{ij} dV''/V''$) を用いて、次のように表される。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \int_V \sigma_{ij} dV/V = (\int_V \sigma_{sij} dV' + \int_V \sigma^*_{ij} dV'')/V = R\bar{\sigma}_{sij} + (1-R)\bar{\sigma}^*_{ij} \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (4)$$

式(4)を用いると、混合土のせん断応力および平均主応力の増分は、次のように表される。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} = R \begin{Bmatrix} d\bar{q}_s \\ d\bar{p}_s \end{Bmatrix} + (1-R) \begin{Bmatrix} d\bar{q}^* \\ d\bar{p}^* \end{Bmatrix} \quad (5)$$

また、構造Ⅰの変形は粗粒子骨格の変形になり、構造Ⅱの変形は、粗粒子を剛体と考え、すべてマトリックス部分の変形になる。このとき、混合土の平均ひずみ $\bar{\epsilon}_{ij}$ は、粗粒子骨格の平均ひずみ $\bar{\epsilon}_{sij}$ ($= \int_V \epsilon_{sij} dV'/V'$) およびマトリックスの平均ひずみ $\bar{\epsilon}^*_{ij}$ ($= \int_V \epsilon^*_{ij} dV''/(V'' - V_{ss}'')$) を用いて、

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \int_V \epsilon_{ij} dV/V = (\int_V \epsilon_{sij} dV' + \int_V \epsilon^*_{ij} dV'')/V = R\bar{\epsilon}_{sij} + f^*(1-R)\bar{\epsilon}^*_{ij} \quad (6)$$

と表される。式(6)を用いると、混合土のせん断ひずみおよび体積ひずみ増分は、次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{\gamma} \\ d\bar{v} \end{Bmatrix} = R \begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}_s \\ d\bar{v}_s \end{Bmatrix} + f^*(1-R) \begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}^* \\ d\bar{v}^* \end{Bmatrix} \quad (7)$$

一方、粗粒子骨格の応力増分とマトリックスの応力増分関係が、次式のように表されるものとする。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{q}_s \\ d\bar{p}_s \end{Bmatrix} = [b] \begin{Bmatrix} d\bar{q}^* \\ d\bar{p}^* \end{Bmatrix} \quad (8)$$

ここで、[b]は、粗粒子骨格とマトリックスの応力の分担割合を表すパラメータである。式(5)と式(8)を連立させると、粗粒子骨格およびマトリックスの応力増分と混合土の応力増分の関係は、それぞれ次のように表される。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{q}_s \\ d\bar{p}_s \end{Bmatrix} = \{R[I] + (1-R)[b]^{-1}\}^{-1} \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{Bmatrix} d\bar{q}^* \\ d\bar{p}^* \end{Bmatrix} = \{R[b] + (1-R)[I]\}^{-1} \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

ここで、[I]は単位行列を表す。したがって、粗粒子骨格およびマトリックスの応力増分は、Rおよび[b]を用いて表される。この[b]を求めるために、次の仮定を用いる。

<仮定⑤>せん断応力および平均有効応力によって成される構造Iの粗粒子骨格および構造IIのマトリックスの単位体積当りの仕事量は、それぞれ等しい。

すなわち、

$$\begin{bmatrix} \bar{q}_s & 0 \\ 0 & \bar{p}_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}_s \\ d\bar{v}_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{q}^* & 0 \\ 0 & \bar{p}^* \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}^* \\ d\bar{v}^* \end{Bmatrix} \quad (11)$$

式(11)に式(2)および(3)を代入すると、

$$\begin{bmatrix} \bar{q}_s & 0 \\ 0 & \bar{p}_s \end{bmatrix} [D_s] \begin{Bmatrix} d\bar{q}_s \\ d\bar{p}_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{q}^* & 0 \\ 0 & \bar{p}^* \end{bmatrix} [D^*] \begin{Bmatrix} d\bar{q}^* \\ d\bar{p}^* \end{Bmatrix} \quad (12)$$

となる。さらに、式(8)を式(12)に代入すると、

[b]は、次のように表される。

$$[b] = [D_s]^{-1} \begin{bmatrix} \bar{q}^*/\bar{q}_s & 0 \\ 0 & \bar{p}^*/\bar{p}_s \end{bmatrix} [D^*] \quad (13)$$

したがって、[b]は、[D_s]、[D*]を用いて表される。

<混合土の応力-ひずみ関係> 混合土の応力増分とひずみ増分の関係は、式(9)、(10)を式(2)、(3)に代入し、さらに、式(2)、(3)を式(7)に代入することにより、次式で求められる。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{\gamma} \\ d\bar{v} \end{Bmatrix} = [R[D_s]\{R[I] + (1-R)[b]^{-1}\}^{-1} + f^*(1-R)[D^*]\{R[b] + (1-R)[I]\}^{-1}] \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

したがって、混合土の応力増分-ひずみ増分関係は、[D_s]、[D*]、すなわち、粗粒子およびマトリックス

の特性を用いて表される。また、式(14)は、粗粒子骨格のみ(R=1)およびマトリックスのみ(R=0)の場合、それぞれ式(2)および(3)に帰着する。

3. 計算結果と実験結果の比較

式(14)による計算結果とカオリンと豊浦砂の混合土の非排水三軸圧縮試験の結果を図-2および図-3に示す。[D_s]および[D*]は、F=0および100%の応力比(q/p*)-せん断ひずみ関係および間隙水圧(Δu)-せん断ひずみ関係をそれぞれ双曲線近似し、さらにd \bar{v} =d \bar{v}_s =d \bar{v}^* =0の条件を用いて決定した。また、パラメータRおよびf*の値は、圧密終了時の間隙比eと細粒分含有率Fの関係から算定した¹⁾。なお、F=0%の粗粒子のみの供試体は、できるだけ緩詰めとなるように空中落下法で作成し、F=30, 50, 100%の供試体は、予圧密法で作成した試料を用いた。また、バックプレッシャーは2.0kgf/cm²、圧密圧力は2.0kgf/cm²とした。

計算結果による混合土の応力比-せん断ひずみ関係および間隙水圧-せん断ひずみ関係は、いずれも実験結果と比較的良好一致を示す。

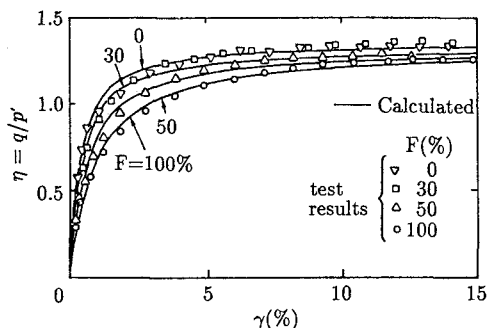


図-2 混合土の応力比とせん断ひずみの関係

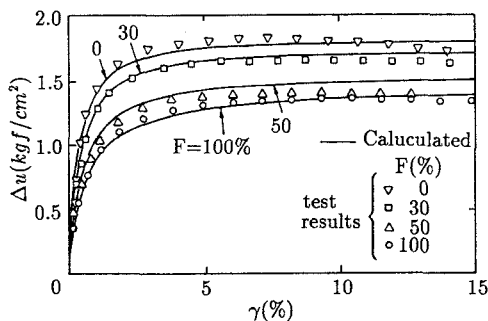


図-3 混合土の間隙水圧とせん断ひずみの関係

<参考文献> 1)大嶺他(1991):"砂と粘土の混合土の圧縮特性",第26回土質工学会研究発表会(投稿中).