

混合土の応力-ひずみ関係に関する一考察

九州大学 工学部 学○大嶺 聖 正 落合 英俊
正 林 重徳 学 北尾 秀光

1. まえがき

著者は、砂と粘土の中間的な性質を持つ土の応力-ひずみ関係式を求めるために、砂と粘土の混合土の一次元圧縮および三軸圧縮状態における応力-変形特性を考察してきた。本文は、混合土を構成する粗粒子とマトリックス(細粒子と水からなる部分)に着目して、混合土の応力-ひずみ関係を誘導し、三軸圧縮試験の結果との比較によりその妥当性を検証したものである。

2. 混合土の応力-ひずみ関係の誘導

混合土の応力-ひずみ関係を求めるための基本的な考え方を図-1に示す。以下に、その概要を述べる。

1) 応力とひずみのパラメータ 三軸圧縮状態における応力とひずみのパラメータとして、次式を用いる。また、応力は、すべて有効応力を表すものとする。

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \cdots (1), \quad p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3 \cdots (2)$$

$$d\gamma = 2(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3)/3 \cdots (3), \quad dv = d\varepsilon_1 + 2d\varepsilon_3 \cdots (4)$$

混合土内部では応力とひずみが分布していると考え、平均的な値を表す場合には、上付きバーを用いる。また、粗粒子骨格およびマトリックスに対しては、それぞれ添字 s および m を用いて表す。

2) 粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率 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(粗粒子骨格)と接触していない状態(マトリックス部分)にある二つの構成要素がある割合で混在しているものとする。このとき、これらの割合を直接測定することは困難であるので、ここでは、粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率を、混合土の構造骨格の考察をもとにして得られた次式を用いて評価する。

$$f_c = 1/[1 + 1/(1 + e_{cg}) \{1/(100/F_r) - 1/(100/F_s - 1)\}] \cdots (5), \quad R = (1 - f_c)^2 \cdots (6)$$

ここで、 F は、細粒分含有率、 F_r は、粗粒子のみの場合と類似した特性を示すときの境界の細粒分含有率、 e_{cg} は、 $F=100\%$ の場合の間隙比である。

3) 粗粒子骨格およびマトリックスの材料特性 粗粒子骨格とマトリックスは、正規圧密状態にあり、また、粗粒子骨格については、ゆる結めの状態にあるものとする。このとき、粗粒子骨格とマトリックスが、次に示すような応力-ひずみ関係を持つ材料である場合を考える。

p 一定で q が変化するときの応力比 $\eta (=q/p)$ と γ の関係および応力比-ひずみ増分比の関係が、次式によって表されるものとする。

$$\gamma = -k[\eta + M \ln\{1 - (\eta/M)\}] \cdots (7), \quad \eta = M - dv/d\gamma \cdots (8)$$

ここで、 M は、限界状態の応力比、 k は、 $\eta = M/2$ の点におけるせん断ひずみ-応力比関係の接線勾配を表す。式(7)、(8)および q 一定で p が変化する場合の体積圧縮係数 m_v を用いると、せん断ひずみ増分および体積ひずみ増分は、それぞれ次のように表される。

$$d\gamma = \{k\eta/(M - \eta)\} d\eta \cdots (9), \quad dv = m_v dp + k\eta d\eta \cdots (10)$$

3) 応力分担割合の評価 混合土に作用する応力は、粗粒子骨格とマトリックスの体積についての平均値として、次のように表されるものとする。

$$d\bar{\sigma}_{ij} = R d\bar{\sigma}_{ij}^s + (1 - R) d\bar{\sigma}_{ij}^m \cdots (11)$$

このとき、粗粒子骨格とマトリックスの応力増分の関係として次式を導入する。

$$d\bar{\sigma}_{ij}^s = b d\bar{\sigma}_{ij}^m \cdots (12)$$

ここで、 b は、粗粒子骨格とマトリックスの応力分担割合を表すパラメータである。式(11)、(12)を用いると

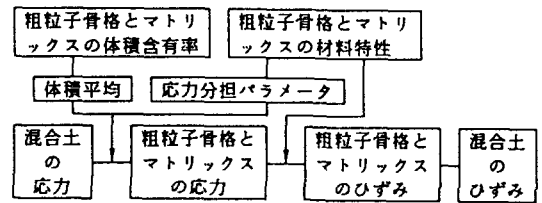


図-1 混合土の応力-ひずみ関係を求めるための基本的な考え方

粗粒子骨格およびマトリックスの応力増分は、それぞれ次のように表される。

$$d\sigma_{sij}=[b/(b-1)R+1]d\sigma_{ij} \cdots (13), \quad d\sigma^*_{ij}=[1/((b-1)R)+1]d\sigma_{ij} \cdots (14)$$

このときのbを求めるために、粗粒子骨格とマトリックスの単位体積当りの仕事量増分が等しいと仮定する。すなわち、等方応力状態(q=0)におけるパラメータb(=b₀)およびp一定でqが変化するときのbは、それぞれ次のように表される。

$$b_0=(m_v^*/m_{vs})^{1/2} \cdots (15), \quad b=(k^*M^*)/(k_sM_s) \cdots (16)$$

但し、式(16)のbを求める際に、 $\bar{\eta}_s/M_s=\bar{\eta}^*/M^*=\bar{\eta}/M$ の関係をを用いた¹⁾。式(15)のb₀は、m_v^{*}とm_{vs}の比が大きくなるほど、また、式(16)のbは、k^{*}とk_sの比あるいはM^{*}とM_sの比が大きくなるほど粗粒子骨格に作用する応力の分担割合が大きくなることを意味している。

4) 混合土の応力-ひずみ関係 混合土のひずみは、粗粒子骨格とマトリックスの体積についての平均値として、次のように表されるものとする。

$$d\bar{\epsilon}_{ij}=Rd\epsilon_{sij}+f_c d\epsilon^*_{ij} \cdots (17)$$

このとき、式(9)、(10)の粗粒子骨格とマトリックスの応力-ひずみ関係、式(13)、(14)および式(17)を用いると、混合土の応力増分-ひずみ増分関係は、粗粒子およびマトリックスの特性を用いて次のように表される。

$$d\bar{\sigma}=\{k\bar{\eta}/(M-\bar{\eta})\}d\bar{\eta} \cdots (18), \quad d\bar{\nu}=m_v d\bar{p}+k^*\bar{\eta}d\bar{\eta} \cdots (19)$$

ここで、 $k=(k_sM_sR+k^*M^*f_c)/M$, $k'=(k_sM_s^2R+k^*M^{*2}f_c)/M^2$

$$m_v=\{m_{vs}bR+m_v^*f_c\}/\{(b-1)R+1\}$$

5) 混合土の限界状態の応力比 p一定でqが変化する場合の粗粒子骨格およびマトリックスの応力比は、式(15)、(16)の応力分担パラメータを用いると、それぞれ次のように表される。

$$\bar{\eta}_s=b\{[(b_0-1)R+1]/[b_0\{(b-1)R+1\}]\}\bar{\eta} \cdots (20), \quad \bar{\eta}^*=\{[(b_0-1)R+1]/[(b-1)R+1]\}\bar{\eta} \cdots (21)$$

粗粒子骨格とマトリックスの単位体積当りの仕事量が等しいと仮定した場合、粗粒子骨格とマトリックスが同時に限界状態に達する($\bar{\eta}=M$ のとき、 $\bar{\eta}_s=M_s$ 、 $\bar{\eta}^*=M^*$)と考えられる。このときの混合土のMは、式(20)、(21)よりb₀を消去することによって次のように表される。

$$M=\{(b-1)R+1\}/\{bR/M_s+(1-R)/M^*\} \cdots (22)$$

式(22)は、R=1の粗粒子のみの場合、M=M_s、R=0のマトリックスのみの場合、M=M^{*}となる。

3. 計算結果と実験結果の比較

等方圧密圧力2.0kgf/cm²で圧密した後、非排水三軸圧縮試験を行った場合の豊浦砂とカオリンの混合土の応力比とせん断ひずみの関係を図-2に示す。計算に用いた定数は、M_s=1.347、k_s=0.014、M^{*}=1.270、k^{*}=0.033であり、それぞれ豊浦砂とカオリンの応力比-せん断ひずみ関係より求めた。図で示されるように、計算結果は、混合土の応力比-せん断ひずみ関係を良く表すことができる。限界状態の応力比Mと細粒分含有率Fの関係を図-3に示す。F=0%の場合のMは、粗粒子骨格の応力比M_sに等しく、F=100%の場合のMは、マトリックスの応力比M^{*}に等しい。混合土のMは、Fの減少に伴い、次第にF=0%のときの値に近づいていく。計算結果は、このような混合土の傾向を表現することができる。

【参考文献】1)大嶺ら(1992)：混合土の非排水せん断における応力-ひずみ関係，九大工学集報，第65巻，第2号(投稿中)

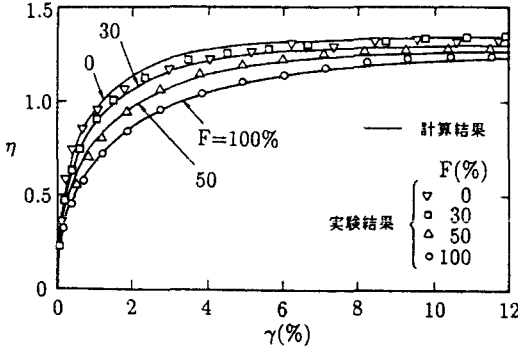


図-2 混合土の応力比とせん断ひずみの関係

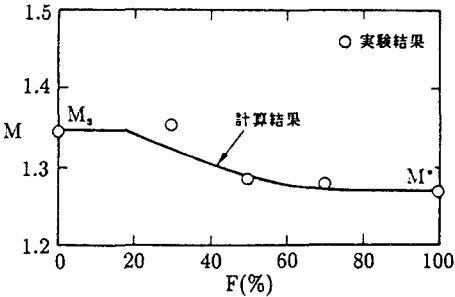


図-3 限界状態の応力比と細粒分含有率の関係