

DOI: 10.11779/CJGE201509008

高掺砂率膨润土混合土膨胀特性及其膨胀量预测

孙文静, 刘仕卿, 孙德安, 魏振飞

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要: 膨润土与砂混合土中掺砂率的高低会引起混合土膨胀特性的差异。对纯膨润土及其低掺砂率混合土, 浸水膨胀完成后蒙脱石孔隙比 e_m 与竖向应力 σ_v 在双对数坐标内呈唯一线性关系。对高掺砂率混合土, 在较小荷载下浸水, 不会形成砂骨架, $e_m - \sigma_v$ 线性关系仍成立; 在较大荷载下浸水, 会形成砂骨架, 砂骨架形成后, e_m 与 σ_v 间不再满足该线性关系。利用砂骨架孔隙比的概念可确定不同掺砂率混合土形成砂骨架时对应的起偏应力及混合土能够形成砂骨架的临界掺砂率。砂骨架形成前, 砂颗粒被蒙脱石包围, 外力由蒙脱石承担, 最终变形量由试样中单位体积蒙脱石的含量决定。砂骨架形成后, 竖向应力最终由砂骨架和蒙脱石共同承担, 提出了确定不同掺砂率下两者承担比例的方法, 进而可确定砂骨架形成后的膨胀变化量, 预测结果与膨胀试验结果吻合较好。该方法可以预测高掺砂率混合土的浸水膨胀量。

关键词: 膨润土与砂混合土; 蒙脱石孔隙比; 砂骨架孔隙比; 起偏应力; 临界掺砂率; 膨胀预测

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)09-1620-07

作者简介: 孙文静(1981-), 女, 山东青岛人, 博士, 高级实验师, 硕士生导师, 主要从事非饱和土力学的研究工作。

E-mail: wjsun@shu.edu.cn.

Swelling characteristics of bentonite-sand mixtures with a high sand mixing ratio and its prediction

SUN Wen-jing, LIU Shi-qing, SUN De-an, WEI Zhen-fei

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The mixing ratio of sand influences the swelling characteristics of bentonite-sand mixtures. As for the pure bentonite and bentonite-sand mixtures with low sand mixing ratio, the relation between montmorillonite void ratio e_m and vertical stress σ_v is a unique line in their logarithmic coordinates. However, for the mixtures with high sand mixing ratio, sand skeleton will not be formed when the specimen is wetted under a small vertical stress, and the linear relation between e_m and σ_v is still satisfied. When the stress is larger than 'deviation starting stress', the sand skeleton is formed and e_m value deviates from the line. According to the concept of sand skeleton void ratio, the 'deviation starting stress' when the sand skeleton is formed can be determined for the mixtures with different sand mixing ratios, and the range of sand mixing ratio in which the sand skeleton may be formed can also be obtained. Before sand skeleton comes into being, sand particles are surrounded by montmorillonite, hence the vertical stress is mainly burdened by montmorillonite, and the swelling quantity at full saturation including swelling deformation and swelling pressure is determined by the montmorillonite content per unit volume. After the sand skeleton is formed, the vertical stress is burdened by the montmorillonite and sand skeleton. A method is proposed to determine the load sharing ratio burdened by the two parts, and subsequently, the swelling can be obtained after the sand skeleton is formed. The proposed method is testified by the swelling test results, and it can predict the swelling variations due to wetting for the mixtures with high sand mixing ratios.

Key words: bentonite-sand mixture; montmorillonite void ratio; sand skeleton void ratio; deviation starting stress; critical sand mixing ratio; swelling prediction

0 引 言

深层地质处置库在施工完成后, 随着地下水位的复位, 膨润土与砂混合土在荷载和浸水的共同作用下产生膨胀变形, 并对周围岩体产生膨胀压力的作用^[1]。

因此, 膨润土与砂混合土的膨胀特性是评估深层地质

基金项目: 国家自然科学基金项目(41102163, 41572284); 岩土力学与工程国家重点实验室开放课题项目(2013008)

收稿日期: 2014-08-04

处置工程长期性能的重要指标。如何预测不同掺砂率下膨润土与砂混合土由非饱和状态到饱和状态的膨胀量, 是深层地质处置工程中亟待解决的关键问题。

国内外许多专家学者研究了不同膨润土及其与砂混合土的膨胀特性, 比如 FEBEX 膨润土^[1]、Kunigel V₁ 钠基膨润土^[2-5]、Calcigel 钙基膨润土^[6]、MX80 膨润土^[7]、高庙子钠基膨润土^[8-11]、高庙子钙基膨润土^[12]、信阳膨润土^[13]、黑山膨润土^[14]、汤山膨润土^[15]。

目前, 有关膨润土及其与砂混合土浸水膨胀特性的研究多集中于纯膨润土或低掺砂率混合土, 较少涉及高掺砂率的情况。而在深层地质处置工程中, 高掺砂率混合土也在承担重要的角色, 比如加拿大 AECL 建议采用膨润土与砂干质量比为 50:50 的高密度混合土作为缓冲/回填材料^[16]; 日本 JNC 拟采用膨润土与砂干质量比为 30:70 的混合土作为回填材料^[17]。另外, 在城市垃圾卫生填埋场中, 在保证渗透系数满足设计要求的条件下会在其使用的本地砂土中添加膨润土作为水平防渗衬垫或帷幕防渗隔离墙^[18], 这种膨—砂复合土亦属于高掺砂率混合土。在这些工程应用中, 砂的加入在降低收缩性、优化热传导性和可施工性的同时, 也会降低膨润土的膨胀性, 进而影响其密封性能^[15]。同时, 在浸水完成后膨胀量预测方面, 有些学者用膨胀体积应变^[2]、蒙脱石孔隙比^[4-5]或有效黏土密度^[10]来定量计算, 而现有的高掺砂率混合土在高应力时的膨胀试验结果却不符合上述的定量函数关系。因此, 研究高掺砂率膨润土混合土的浸水膨胀特性并对其膨胀量进行预测是对全掺砂率范围混合土膨胀特性研究的补充, 并将为处置库中缓冲/回填材料以及垃圾填埋场中膨—砂复合土的配比提供科学依据。

本文首先基于不同掺砂率混合土的膨胀试验结果, 归纳了高掺砂率混合土的膨胀特性, 分析了其膨胀机理, 然后, 利用砂骨架孔隙比的概念确定了不同掺砂率混合土形成砂骨架时的竖向应力, 并给出了混合土能够形成砂骨架的掺砂率范围, 最后, 提出一个可以预测高掺砂率混合土在形成砂骨架后的膨胀量的方法, 并对该方法进行验证。

1 高掺砂率混合土的膨胀特性及膨胀机理分析

1.1 蒙脱石孔隙比 e_m 及 $e_m - \sigma_v$ 线性关系

膨润土膨胀主要是因为其中蒙脱石矿物的吸水膨胀引起的。浸水完成时, 单位体积蒙脱石吸水量是个常数^[4-5]。定义蒙脱石孔隙比 e_m 为浸水完成后试样中水的体积 V_w 与蒙脱石固体颗粒体积 V_m 之比, 表征浸水膨胀稳定时, 单位体积蒙脱石吸收的水分量, 即

$$e_m = \frac{V_w}{V_m} \quad (1)$$

利用饱和时 $e = G_s w$ (G_s 为混合土比重) 便可得到蒙脱石孔隙比 e_m 与浸水完成时的孔隙比 e_r 之间的关系:

$$e_m = \frac{e_r \rho_m}{\rho_s (1 - \alpha) \beta} \quad (2)$$

式中 ρ_m 为蒙脱石密度; ρ_s 为混合土密度; α 为混合土的掺砂率, β 为膨润土中蒙脱石质量百分比。

对纯膨润土及其低掺砂率混合土, 浸水完成后蒙脱石孔隙比 e_m 与竖向应力 σ_v 在双对数坐标内呈唯一的线性关系, 这一观点已由不同种类不同低掺砂率混合土的膨胀试验结果所证实, 如 Kunigel V₁ 钠基膨润土及其低掺砂率混合土^[4-5]、高庙子钠基膨润土及其与砂混合土^[8-11]、高庙子钙基膨润土^[12]、Calcigel 膨润土及其与砂混合土^[6]。图 1 只列举出了两种膨润土及其与砂混合土的 $e_m - \sigma_v$ 线性关系, 分别为纯 Kunigel V₁ 钠基膨润土和高庙子钠基膨润土与砂混合土的数据 (掺砂率为 0, 15% 和 30%)。

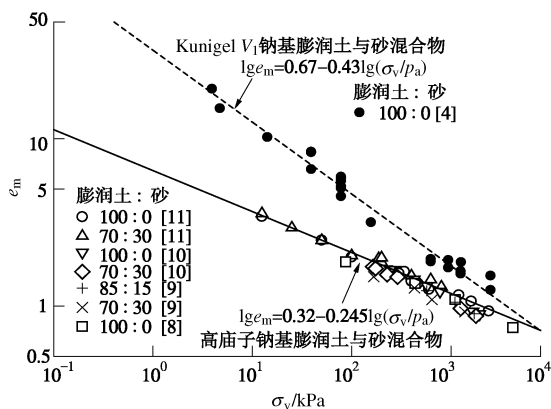


图 1 不同膨润土及其低掺砂率混合土的 $e_m - \sigma_v$ 关系

Fig. 1 $e_m - \sigma_v$ relationship of different bentonite-sand mixtures with low sand mixing ratio

由图 1 可得, 任意一种膨润土及其低掺砂率混合土, 其蒙脱石孔隙比与浸水时竖向应力在双对数坐标上的线性关系是唯一确定的, 该 $e_m - \sigma_v$ 线性关系可统一表达为

$$\lg e_m = a - b \lg \left(\frac{\sigma_v}{p_a} \right) \quad (3)$$

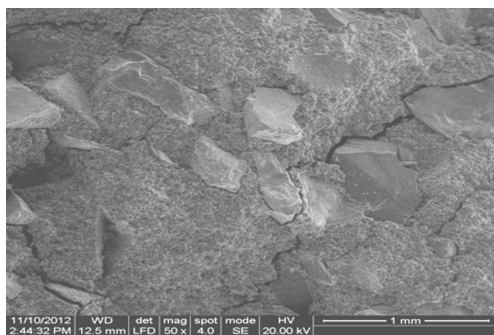
式中, p_a 是大气压力, a, b 为材料参数, 可以由不同竖向应力下的两个纯膨润土试样进行膨胀变形试验得到。式 (3) 表明试样在完全湿化时单位蒙脱石所吸收的水分量仅受竖向应力大小控制。

通过 $e_m - \sigma_v$ 线性关系, 可预测膨胀变形试验中不同低掺砂率混合土在不同竖向应力下由初始状态至浸水饱和状态产生的体变量。同时, 还可预测膨胀力试验中控制孔隙比始终不变状态下最终浸水完成时的最大膨胀力。

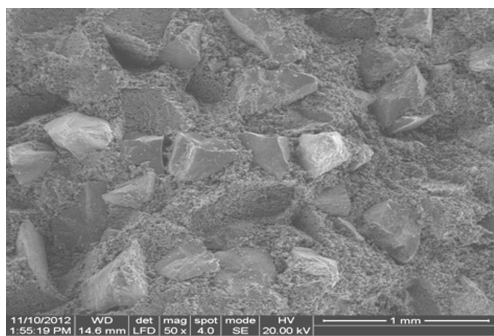
1.2 高掺砂率混合土的膨胀特性及膨胀机理分析

文献[19~21]利用扫描电镜的方法得到不同掺砂率高庙子钠基膨润土混合土试样的微观结构,图2为掺砂率分别为20%和50%的混合土SEM图片^[21]。可以看出,当掺砂率较小时,砂颗粒分散在膨润土基质中由膨润土包裹,彼此间互不接触,如图2(a);当掺砂率增大,混合土的结构发生明显的变化,砂颗粒间间距减小甚至彼此接触形成砂骨架,如图2(b),膨润土吸水膨胀后充满砂骨架孔隙。此时的浸水膨胀特性不同于上述纯膨润土及其低掺砂率混合土的膨胀特性。对于后者,浸水完成后砂颗粒被蒙脱石包围,外力仅由蒙脱石承担。而对高掺砂率混合土,因为单位体积内砂的比例较高,砂颗粒的作用不能忽略。

对高掺砂率 Kunigel V₁ 钠基膨润土混合土^[4-5]及高庙子钠基膨润土混合土^[11]的膨胀数据进行整理,发现在竖向荷载大于某一值后,蒙脱石孔隙比 e_m 值没有落在前述的 $e_m - \sigma_v$ 线上,而是出现了偏离,图3为高掺砂率 Kunigel V₁ 钠基膨润土混合土的 $e_m - \sigma_v$ 关系图。



(a) $\alpha=20\%$



(b) $\alpha=50\%$

图2 高庙子钠基膨润土掺砂混合土微观结构 SEM 照片^[21]

Fig. 2 SEM photos of microstructures of GMZ Na bentonite-sand mixtures^[21]

由图3可以看出,对不同高掺砂率混合土,在低应力范围内, $e_m - \sigma_v$ 线性关系依然成立;随着竖向应力的增大,对应的 e_m 值脱离该 $e_m - \sigma_v$ 线性关系,且混合土中掺砂率越大,脱离该线性关系时的竖向应力就越小。图4给出了某一高掺砂率混合土的 $e_m - \sigma_v$ 示意图。图中, σ_s 为起偏应力,对应的蒙脱石孔隙比为

e'_m 。当试样在 $\sigma_v = \sigma_s$ 时浸水,宏观体积变形使得砂颗粒恰好彼此接触,形成砂骨架;微观层面蒙脱石吸水膨胀,膨胀后的蒙脱石恰好充满砂骨架孔隙。此时,砂骨架所承受外力 $\sigma_{vs} = 0$,外力 σ_v 仍由蒙脱石承担,即 $\sigma_v = \sigma_{vm}$,并且,该时刻 $e_m - \sigma_v$ 线性关系仍然成立。

当试样在 $\sigma_v < \sigma_s$ 时浸水至饱和,砂骨架尚未形成, $e_m - \sigma_v$ 线性关系成立,竖向荷载由蒙脱石承担。当 $\sigma_v > \sigma_s$ 时,由于掺砂率较大,砂粒子在较大竖向应力作用下相互接触抵抗外部荷载,此时的宏观体积变形,并不像低掺砂率混合土由单位体积蒙脱石的含量决定,主要由砂骨架的变形决定。因此,在 e_m 与 σ_v 关系图上会出现向上偏离的现象,且掺砂率越大,越容易形成砂骨架,即形成砂骨架所对应的起偏应力越小。同时,砂粒之间的蒙脱石,在几乎不受外力的情况下吸水膨胀,直到蒙脱石胀满砂粒间的孔隙并承担一部分外荷载 σ_{vm} 为止。此时,尽管 e_m 与 σ_v 不满足 $e_m - \sigma_v$ 线性关系,但 e_m 与 σ_{vm} 仍满足该线性关系。

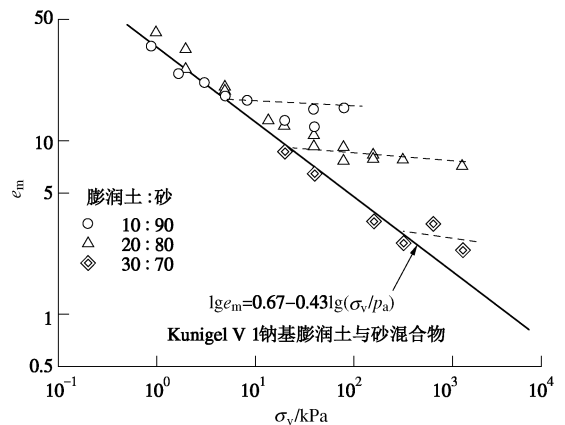


图3 高掺砂 Kunigel V₁ 钠基膨润土混合土 $e_m - \sigma_v$ 关系^[4-5]

Fig. 3 $e_m - \sigma_v$ relationship for Kunigel V₁ Na bentonite-sand mixture with high sand mixing ratio^[4-5]

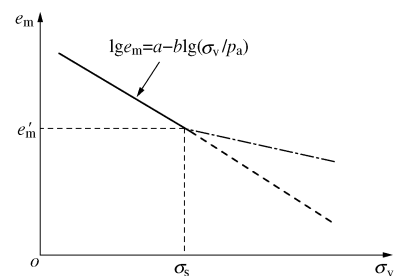


图4 高掺砂率混合土的 $e_m - \sigma_v$ 关系示意图

Fig. 4 $e_m - \sigma_v$ relationship of mixtures with high sand mixing ratio

2 起偏应力及临界掺砂率

如何定量的确定不同掺砂率混合土在形成砂骨架时对应的起偏应力 σ_s ? 文献[4, 5]采用砂骨架孔隙比 e_s 的概念,其定义为混合土中砂以外成分的体积 V_{other} 与砂颗粒体积 V_{sand} 之比:

$$e_s = \frac{V_{\text{other}}}{V_{\text{sand}}} \quad (4)$$

联合蒙脱石孔隙比的定义式 (1) 可得

$$e_m = Ae_s + B \quad (5)$$

其中, $A = \frac{\alpha\rho_m}{(1-\alpha)\beta\rho_{\text{sand}}}$, $B = -\left(1 + \frac{(1-\beta)\rho_m}{\beta\rho_{\text{nm}}}\right)$ 。式中, ρ_{nm} 为膨润土中非蒙脱石密度; ρ_{sand} 为砂粒密度。

混合土中砂颗粒刚好接触时, 砂骨架孔隙比等于砂的最大孔隙比^[4-5], 即 $e_s = e_{s\text{max}}$, $e_{s\text{max}}$ 可由土工试验得到。同时, 由图 3 可知, 此时 $e_m - \sigma_v$ 线性关系依然成立, 即 σ_s 与 e'_m 间仍满足式 (3), 即

$$\lg\left(\frac{\sigma_s}{\rho_a}\right) = \frac{1}{b}[a - \lg(Ae_{s\text{max}} + B)] \quad (6)$$

由上式可以求得不同掺砂率混合土在形成砂骨架时的起偏应力 σ_s 。

同时, 在砂骨架形成时, 除满足 $e_s = e_{s\text{max}}$ 外, 还应满足孔隙体积不小于零的条件, 即 $e_m \geq 0$, 基于上述两个条件, 利用式 (5) 可得混合土能够形成砂骨架的掺砂率范围, 即

$$\alpha \geq \alpha_s = -\frac{B\beta\rho_{\text{sand}}}{e_{s\text{max}}\rho_m - B\beta\rho_{\text{sand}}} \quad (7)$$

式中, α_s 为临界掺砂率。当掺砂率 $\alpha \geq \alpha_s$ 时, 随着竖向应力的增大, 混合土中才有可能形成砂骨架。而对于 $\alpha < \alpha_s$ 的混合土, 砂骨架不会形成, 在任何竖向应力下 $e_m - \sigma_v$ 线性关系均可满足。

以高掺砂率 Kunigel V₁ 钠基膨润土混合土的浸水膨胀试验为例, 通过式 (6) 计算得到不同掺砂率混合土在形成砂骨架时对应的起偏应力, 如图 5 所示 (其中, 计算所需参数取值分别为: $a=0.67$, $b=0.43$, $e_{s\text{max}}=1.0$ ^[4], $\beta=48\%$, $\rho_m=2.79 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{nm}}=2.79 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{sand}}=2.65 \text{ g/cm}^3$ ^[2]), 可以看出, 实测点与预测线吻合较好。利用式 (7) 计算得到 $\alpha_s = 48.9\%$, 即当 $\alpha \geq 48.9\%$ 时 Kunigel V₁ 钠基膨润土与砂混合土才有可能形成砂骨架。

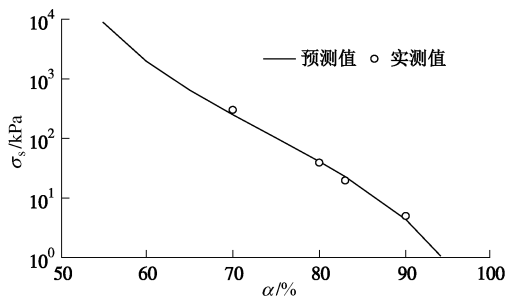


图 5 不同掺砂率混合土在形成砂骨架时对应的起偏应力 (Kunigel V₁ 钠基膨润土与砂混合土^[4-5])

Fig. 5 “Deviation starting stress” for Kunigel V₁ Na bentonite-sand mixture with different sand mixing ratios^[4-5]

3 砂骨架形成后的预测

砂骨架形成后, 竖向应力由砂骨架和蒙脱石共同承担, 即 $\sigma_v = \sigma_{\text{vm}} + \sigma_{\text{vs}}$ 。如何确定蒙脱石和砂骨架各自所承担的比例呢?

首先, 结合图 6 分析一下蒙脱石承担的力 σ_{vm} 。图 6 中 3 种混合土的掺砂率为 α_3 , α_2 , α_1 , 均大于临界掺砂率, $\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1 > \alpha_s$, 属于高掺砂率混合土, 对应的起偏应力分别为 σ_s^3 , σ_s^2 和 σ_s^1 , 且随着掺砂率的减小, 起偏应力增大, 即 $\sigma_s^3 < \sigma_s^2 < \sigma_s^1$, 图中实线 $e_m - \sigma_v$ 线性关系在掺砂率 $\alpha \leq \alpha_s$ 时始终成立。这里以 $\alpha = \alpha_1$ 的混合土进行说明, 当 $\sigma_v \leq \sigma_s^1$ 时, 砂骨架尚未形成, 竖向应力由蒙脱石承担, 即 $\sigma_{\text{vm}} = \sigma_v$; 当 $\sigma_v > \sigma_s^1$ 时, 假定蒙脱石承担竖向应力 σ_{vm} 随 σ_v 线性增大, 斜率为 k , 该斜率随着掺砂率 α 的减小而增大。当掺砂率 α 减小到临界掺砂率 α_s 或以下时, 砂骨架不会形成, 蒙脱石承担竖向应力, 此时, $k=1$ 。据此, 假定蒙脱石所承担外荷载 σ_{vm} 与总竖向应力的关系式为

$$\begin{cases} \sigma_{\text{vm}} = \sigma_v & \sigma_v \leq \sigma_s \\ \sigma_{\text{vm}} - \sigma_s = k(\sigma_v - \sigma_s) & \sigma_v > \sigma_s \end{cases} \quad (8)$$

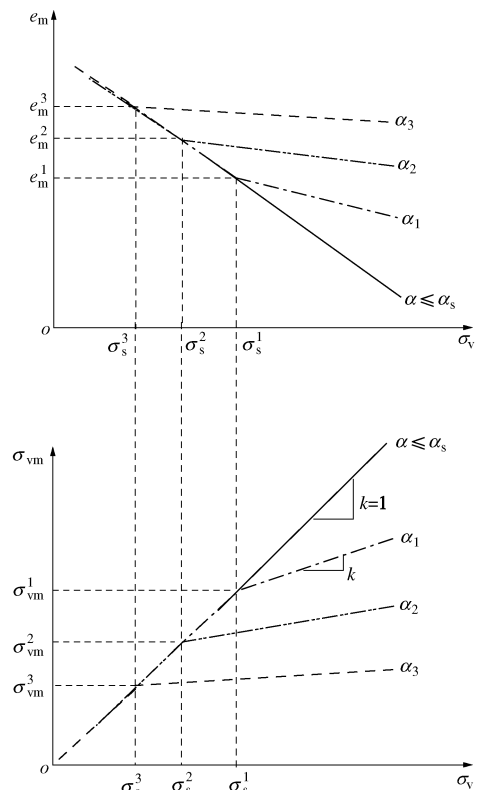


图 6 高掺砂率混合土的 $e_m - \sigma_v$ 及 $\sigma_{\text{vm}} - \sigma_v$ 关系 ($\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1 > \alpha_s$)

Fig. 6 $e_m - \sigma_v$ & $\sigma_{\text{vm}} - \sigma_v$ relations for mixtures with a high sand mixing ratio ($\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1 > \alpha_s$)

紧接着, 结合图 7 不同掺砂率混合土的 $\sigma_{\text{vs}} - \sigma_v$ 关系示意图分析一下砂骨架所承担的竖向应力 σ_{vs} 。几种混合土的掺砂率关系为 $100\% > \alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$, 对应

的起偏应力关系为 $0 < \sigma_s^3 < \sigma_s^2 < \sigma_s^1$ 。这里仍以 $\alpha = \alpha_1$ 的混合土进行说明, 当 $\sigma_v \leq \sigma_s^1$ 时, 砂骨架未形成, $\sigma_{vs} = 0$; 当 $\sigma_v > \sigma_s^1$ 时, 假定砂骨架承担竖向应力 σ_{vs} 随 σ_v 线性增大, 斜率随掺砂率的增大而增大, 这里假定斜率为 $1-k$, 以满足 $\sigma_v = \sigma_{vm} + \sigma_{vs}$ 的条件。当 $\alpha = 100\%$ 时, 全部荷载由砂骨架承担, $\sigma_{vs} = \sigma_v$, 斜率达到 1, 此时 $k=0$ 。据此, 假定砂骨架所承担外荷载 σ_{vs} 与总竖向应力的关系式为

$$\begin{cases} \sigma_{vs} = 0 & \sigma_v \leq \sigma_s \\ \sigma_{vs} = (1-k)\sigma_v - (1-k)\sigma_s & \sigma_v > \sigma_s \end{cases} \quad (9)$$

由上述分析可得, 斜率 k 与掺砂率 α 有关, 当 $\alpha \leq \alpha_s$ 时, $k = 1$; 当 $\alpha = 100\%$ 时, $k = 0$; 当 $\alpha_s < \alpha < 100\%$ 时, k 随 α 的增大而减小, 假定两者间满足指数关系, 即 $k = e^{\varphi(\alpha - \alpha_s)}$, 系数 φ 可由边界条件计算得到, 即当 α 接近于 100% 时, k 值趋近于 0。斜率 k 与掺砂率 α 间关系如图 8 所示, 其数学表达式为

$$k = \begin{cases} 1 & \alpha \leq \alpha_s \\ e^{\varphi(\alpha - \alpha_s)} & \alpha_s < \alpha < 100\% \\ 0 & \alpha = 100\% \end{cases} \quad (10)$$

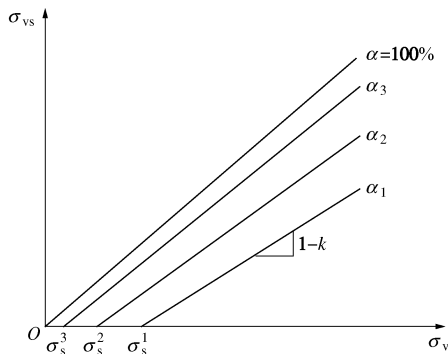


图 7 不同高掺砂率混合土的 $\sigma_{vs} - \sigma_v$ 关系示意图 ($100\% > \alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1 > \alpha_s$)

Fig. 7 Sketch of $\sigma_{vs} - \sigma_v$ relations for mixtures with different high sand mixing ratios ($100\% > \alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1 > \alpha_s$)

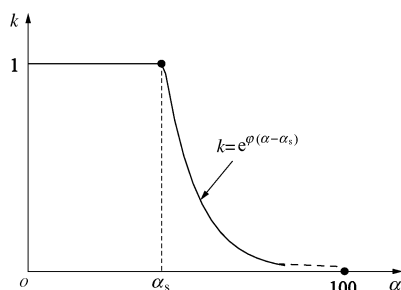


图 8 斜率 k 与掺砂率 α 间关系示意图

Fig. 8 Sketch of $k - \alpha$ relation

对于任意膨润土与砂混合物, 给定掺砂率 α , 即可根据式 (10) 确定斜率 k 值, 然后即可得出在任意竖向荷载 σ_v 作用下蒙脱石所承担的外荷载部分 σ_{vm} 。而

σ_{vm} 与 e_m 间仍满足 $e_m - \sigma_v$ 线性关系, 如图 9, 即

$$b = \frac{\lg e'_m - \lg e_m}{\lg \sigma_{vm} - \lg \sigma_s} \quad (11)$$

当砂骨架形成时, $e_s = e_{smax}$ 。同时, 由式 (2) 及式 (5), 可得形成砂骨架时混合土中水、蒙脱石、非蒙脱石及砂颗粒所占体积的比例, 假定砂骨架形成时体积为 V 。当竖向应力继续增大至 σ_v ($\sigma_v > \sigma_s$), 砂骨架被压缩, 孔隙中水分被挤出, 水的排出量为试样的体积变化量, 即 $\Delta V_w = \Delta V$ 。当竖向应力为 σ_v 时, 蒙脱石孔隙比为 e_m , 其表达为

$$e_m = e'_m - \frac{e'_m(1+e')}{e'} \frac{\Delta V}{V} \quad (12)$$

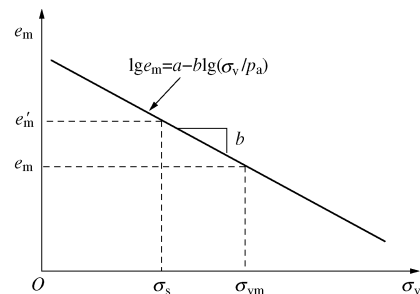
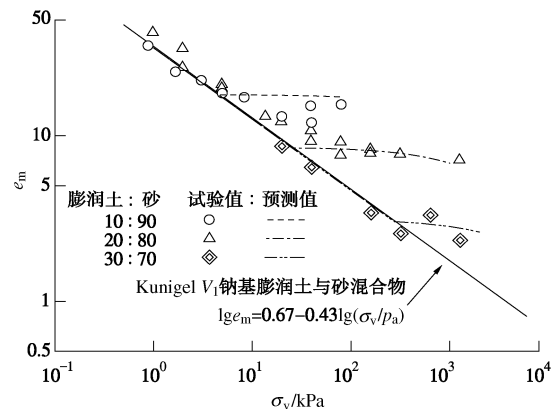


图 9 砂骨架形成后 $e_m - \sigma_{vm}$ 线性关系

Fig. 9 $e_m - \sigma_{vm}$ linear relation after formation of sand skeleton

由式 (11) 和 (12) 可得竖向应力由起偏应力 σ_s 增至 σ_v 的体积应变 $\Delta V/V$, 随即可得到给定掺砂率为 α 的混合土的蒙脱石孔隙比 e_m 和浸水完成后的孔隙比 e_f 。

图 10 为高掺砂率下 Kunigel V₁ 钠基膨润土混合土的膨胀试验结果及其预测 (系数 $\varphi = -13.5$)。图 10 (a) 为掺砂率分别是 70%, 80% 和 90% 混合土的 $e_m - \sigma_v$ 关系图, 可以看出预测结果能很好地反映不同掺砂率混合土的应力起偏点以及起偏之后的 $e_m - \sigma_v$ 关系。图 10 (b) 是掺砂率为 80% 的混合土在不同竖向力下浸水饱和的体变结果, 可以看出预测结果与实测数值基本一致。通过试验结果与预测结果的对比, 证实了该预测方法的合理性。



(a) $e_m - \sigma_v$ ($\alpha = 70\%, 80\%, 90\%$)

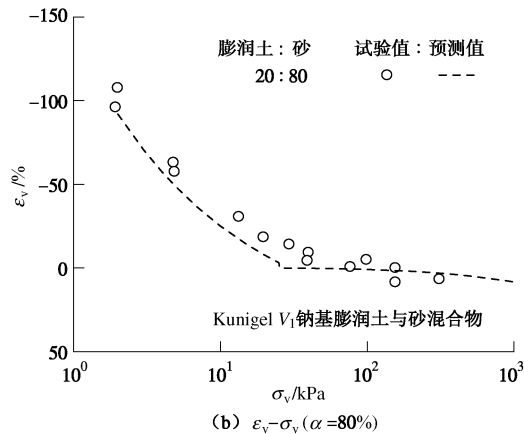


图 10 高掺砂率 Kunigel V₁ 钠基膨润土混合土的膨胀试验结果及其预测

Fig. 10 Swelling test results and prediction of Kunigel V₁ Na bentonite-sand mixture with a high sand mixing ratio

4 结 语

高掺砂率混合土(掺砂率不小于临界掺砂率)的膨胀特性不同于低掺砂率的, 本文研究了不同掺砂率下混合土的膨胀特性, 分析了高掺砂率混合土的膨胀机理, 确定了不同掺砂率混合土形成砂骨架时的起偏应力及混合土能够形成砂骨架的掺砂率范围, 提出了一个可以预测不同掺砂率混合土浸水膨胀量的方法, 通过对比高掺砂率混合土的膨胀试验结果与预测结果, 证实了该预测方法的正确性。

对膨润土及其低掺砂率混合土, 浸水完成后蒙脱石孔隙比与竖向应力在双对数坐标内呈唯一线性关系。对高掺砂率混合土, $e_m - \sigma_v$ 线性关系在低应力范围内依然成立, 可以利用该线性关系预测膨胀变形试验中的体变量及膨胀力试验中的最大膨胀力。随着竖向应力的增大, 砂骨架形成, 对应的 e_m 值脱离 $e_m - \sigma_v$ 线性关系, 砂粒间蒙脱石吸水膨胀, 最终胀满砂粒间孔隙并承担部分外荷载 σ_{vm} , σ_{vm} 与 e_m 间满足 $e_m - \sigma_v$ 线性关系。

砂骨架形成后, 竖向应力最终由蒙脱石和砂骨架共同承担。在确定好给定掺砂率下 $\sigma_{vm} - \sigma_v$ 线性关系的斜率后, 可得蒙脱石及砂骨架各自承担的竖向应力。由砂骨架形成时砂骨架孔隙比等于砂的最大孔隙比这一已知条件, 并借助蒙脱石孔隙比、砂骨架孔隙比的概念及 $e_m - \sigma_v$ 线性关系最终可得到给定掺砂率混合土的膨胀变化量。该方法扩展了 Sun 等^[5]的预测方法, 可以预测不同掺砂率膨润土混合土的浸水膨胀量, 并且未增加任何参数。

膨润土与砂混合土的微观结构特性研究, 对于解释混合土的浸水膨胀机理至关重要。在上述研究基础

上, 下一步拟开展不同掺砂率膨润土混合土在浸水过程中的微观变形规律的研究, 建立微观结构模型, 用于揭示掺砂率对膨润土-砂混合土的变形、强度及渗透特性的控制机制。

参考文献:

- [1] VILLAR M V, LLORET A. Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite[J]. Applied Clay Science, 2008, **39**(1/2): 38 - 49.
- [2] KOMINE H, OGATA N. Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal[J]. Soils and Foundations, 1999, **39**(2): 83 - 97.
- [3] XU Y F, MATSUOKA H, SUN D A. Swelling characteristics of fractal-textured bentonite and its mixtures[J]. Applied Clay Science, 2003, **22**(4): 197 - 209.
- [4] 崔红斌, 孙德安, 松岡元, 等. ベントナイトと砂との混合材の一次元的な浸水変形特性[J]. 土木学会論文集, 2004, **III/76**(764): 275 - 285. (CUI Hong-bin, SUN De-an, MATSUOKA Hajime and XU Yong-fu. Swelling characteristics of sand-bentonite mixtures under one-dimensional stress[J]. Proc of JSCE, 2004, **III/76**(764): 275 - 285. (in Japanese))
- [5] SUN D A, CUI H B, SUN W J. Swelling of compacted sand-bentonite mixtures[J]. Applied Clay Science, 2009, **43**(3): 485 - 492.
- [6] AGUS S, SCHANZ T. A method for predicting swelling pressure of compacted bentonites[J]. Acta Geotechnica, 2008(3): 125 - 137.
- [7] WANG Q, TANG A M, CUI Y J, et al. Experimental study on the swelling behaviour bentonite/claystone mixture[J]. Engineering Geology, 2012, **124**: 59 - 66.
- [8] 叶为民, SCHANZ T, 钱丽鑫, 等. 高压实高庙子膨润土 GMZ01 的膨胀力特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(增刊 2): 3861 - 3865. (YE Wei-min, SCHANZ T, QIAN Li-xin, et al. Characteristics of swelling pressure of densely compacted Gaomiaozi bentonite GMZ01[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(S2): 3861 - 3865. (in Chinese))
- [9] 秦冰, 陈正汉, 刘月妙, 等. 高庙子膨润土的胀缩变形特性及其影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(7): 1005 - 1010. (QIN Bing, CHEN Zheng-han, LIU Yue-miao, et al. Swelling-shrinkage behavior of Gaomiaozi bentonite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(7): 1005 - 1010. (in Chinese))

- [10] 张虎元, 崔素丽, 刘吉胜, 等. 混合型缓冲回填材料膨胀力试验研究[J]. 岩土力学, 2010(10): 3087 - 3095. (ZHANG Hu-yuan, CUI Su-li, LIU Ji-sheng, et al. Experimental study of swelling pressure of compacted bentonite-sand mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010(10): 3087 - 3095. (in Chinese))
- [11] 孙德安, 邵丽娜. 高庙子膨润土和砂混合物膨胀变形特性及其预测[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2013, 19(2): 197 - 202. (SUN De-an, SHAO Li-na. Swelling deformation characteristics of Gaomiaozhi bentonite-sand mixture and its prediction[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2013, 19(2): 197 - 202. (in Chinese))
- [12] SUN W J, LIU S Q, SUN D A, et al. Swelling characteristics and permeability of bentonite[C]// Unsaturated Soils: Research and Applications-Proceedings of the 6th International Conference on Unsaturated Soils. Sydney, UNSAT 2014, 2: 1211 - 1217.
- [13] 刘泉声, 王志俭. 砂-膨润土混合物膨胀力影响因素的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1054 - 1058. (LIU Quan-sheng, WANG Zhi-jian. Influence factors of sand-bentonite mixtures on the swelling pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1054 - 1058. (in Chinese))
- [14] 胡 畔, 杨 庆. 膨润土加砂混合物膨胀特征试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 453 - 458. (HU Pan, YANG Qing. Experimental study of swelling characteristics of bentonite-sand mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 453 - 458. (in Chinese))
- [15] 顾 凯, 施 斌, 唐朝生. 下蜀土-膨润土混合土的膨胀性试验及机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 125 - 129. (GU Kai, SHI Bin, TANG Chao-sheng. Experimental study and mechanisms of swelling properties of Xiashu-bentonite mixture[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(4): 125 - 129. (in Chinese))
- [16] AEC L. The disposal of Canada's nuclear fuel waste: engineered barriers alternatives (AECL-1078COG-93-8) [R]. Ontario: Atomic Energy of Canada Limited, 1994.
- [17] JNC. Project to establish the scientific and technical basis for HLW disposal in Japan. Supporting report 2: repository design and engineering technology (JNC TN 1400 99-022) [R]. Tokai-mura: Japan Nuclear Cycle Development Institute, 1999b.
- [18] 杜圣军. 卫生垃圾填埋场中膨-砂复合土渗透特性的研究[D]. 上海: 东华大学, 2007. (DU Sheng-jun. Research on bentonite-soil mixture's permeability characteristics in sanitary landfill[D]. Shanghai: Donghua University, 2007. (in Chinese))
- [19] 张虎元, 刘吉胜, 崔素丽, 等. 石英砂掺量对混合型缓冲回填材料抗剪强度的控制机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2533 - 2542. (ZHANG Hu-yuan, LIU Ji-sheng, CUI Su-li, et al. Controlling mechanism of quartz sand content on shear strength of bentonite-sand mixtures as buffer/backfill material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2533 - 2542. (in Chinese))
- [20] ZHANG M, ZHANG H Y, CUI S L, et al. Engineering properties of GMZ bentonite-sand as buffer/backfilling material for high-level waste disposal[J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2012; 16(10): 1216 - 1237.
- [21] 汪 龙, 方祥位, 孙发鑫, 等. 膨润土-砂混合型缓冲/回填材料土-水特征曲线研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2264 - 2270. (WANG Long, FANG Xiang-wei, SUN Fa-xin, et al. Test on soil-water characteristic curves of bentonite-sand mixtures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2264 - 2270. (in Chinese))