

# 膨润土加砂混合物非饱和三轴试验研究

李培勇<sup>\*1</sup>, 杨 庆<sup>2</sup>

(1. 大连交通大学 土木与安全工程学院, 辽宁 大连 116028;

2. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 采用 GDS 三轴仪试验系统对膨润土加砂混合物进行了饱和与非饱和状态下三轴固结排水剪切试验研究. 试验结果表明非饱和状态下膨润土加砂混合物的应力应变关系曲线与饱和状态下混合物的应力应变关系曲线具有相似的形态, 均为硬化型. 随着基质吸力或净围压力的增加, 最大偏应力均增大. 试样发生鼓状破坏, 并且无明显破坏带. 非饱和状态下膨润土加砂混合物的有效内摩擦角与饱和状态下的相近. 随着基质吸力的增加, 膨润土加砂混合物的总黏聚力增加, 体现了基质吸力对抗剪强度的贡献, 两者之间的关系可以采用含有非线性系数的关系式进行较好的表达, 进一步得到了非饱和状态下膨润土加砂混合物的抗剪强度公式.

**关键词:** 膨润土加砂混合物; 非饱和三轴试验; 抗剪强度

**中图分类号:** TU411.7   **文献标志码:** A

## 0 引言

高水平放射性核废物的深地处置是目前公认的处置高放射性废物的可行方法. 在高放射性废物的处置系统中, 将缓冲回填材料包裹在贮存罐四周, 可以起到缓冲围岩压力、堵塞围岩裂隙、阻滞核素迁移等作用. 膨润土具有低渗透性、强吸附性、高膨胀性等特性, 因而可作为处理高放射性废物的理想缓冲回填材料. 国内外学者近年对膨润土及其加砂混合物的静力学、膨胀特性及土水特性等开展了研究工作, 取得了一些成果<sup>[1~6]</sup>. Chen 等采用渗析法和水汽平衡法来控制吸力, 测定了高庙子膨润土的土水特征曲线, 并采用环境扫描电镜和压汞试验, 研究了高庙子膨润土在不同吸力下的持水特性及其微观结构<sup>[2]</sup>. 郁陈采用渗析法和汽相法的吸力控制方法测定了自由和侧限状态下高庙子膨润土的土水特征曲线, 并研究了其土水特征变化<sup>[7]</sup>. 秦冰等研究了干密度、竖向压力、浸泡液体及吸湿方式对高庙子膨润土膨胀变形特性的影响<sup>[8]</sup>.

但是, 已有的对膨润土加砂混合物的研究大多集中于膨胀变形特性以及基本物理化学特性等方面, 而对膨润土加砂混合物的抗剪强度特性和本构关系等方面的研究十分缺乏, 例如膨润土加砂混合物在三轴状态下抗剪强度特性、本构模型、热-水迁移模型、混合物与核废料之间的热化学反应等方面的研究亟需开展. 作为高放射性废物处置的缓冲回填材料, 膨润土加砂混合物是在一定的含水量下压实施工的, 处于非饱和状态, 吸力和含水率等的变化对膨润土加砂混合物的抗剪强度和变形等性质都有着显著的影响. 为此, 本文采用 GDS 三轴仪试验系统对膨润土加砂混合物进行非饱和状态下的三轴剪切强度试验研究, 通过在试验中控制不同的基质吸力, 对膨润土加砂混合物在非饱和状态下的抗剪强度特性进行研究与分析.

## 1 试验条件及方法

### 1.1 试验设备

GDS 三轴仪试验系统由 1 个 Bishop & Wesley 应力路径三轴仪、4 个压力控制仪、6 个传

收稿日期: 2009-03-04; 修回日期: 2011-01-15.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679015).

作者简介: 李培勇<sup>\*</sup>(1978-), 男, 大连理工大学 2008 届博士, 讲师, E-mail: dlutlpy@163.com; 杨 庆(1964-), 男, 教授, 博士生导师.

感器、1 个数据交换器和 1 台电脑组成。围压、轴压、孔隙气压力和孔隙水压力都可以独立控制。其与常规三轴仪相比具有以下特点：(1)可以同时测量孔隙水压力和孔隙气压力。(2)采用轴平移技术，扩大了吸力的测量和控制范围。(3)为了提高土样体变的测量精度，采用双压力室测量系统，如图 1 所示<sup>[9]</sup>。

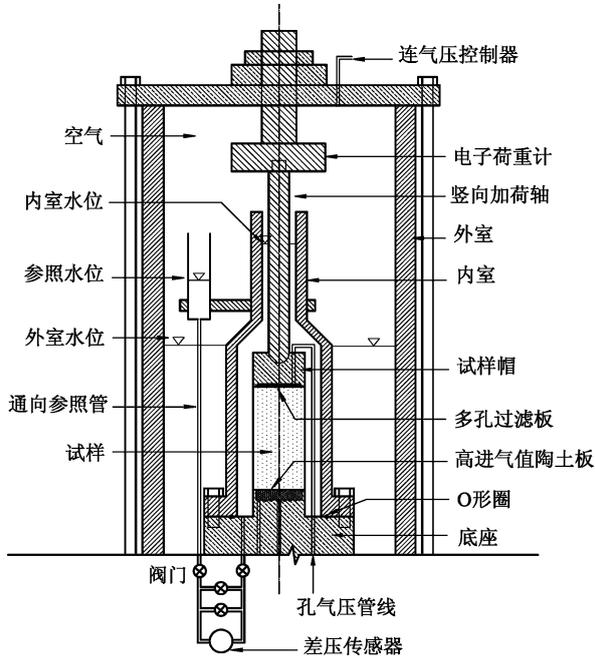


图 1 非饱和土双压力室测量系统

Fig. 1 A double-cell measuring system for unsaturated soils

为了达到精确的测量，在试验前对试验系统进行了仔细严格的标定。本文中采用与试验试样尺寸相同的刚体试样，在尽量清除所有可能气泡后，施加 50~500 kPa 的围压。在不同的围压下，模拟试验条件对测量系统进行了标定。

## 1.2 试样制备

本试验所采用的膨润土产于辽宁省黑山地区，为钙基膨润土，主要由蒙脱石和方石英组成，蒙脱石含量约为 81.6%<sup>[10]</sup>。图 2 为膨润土的 X-射线衍射图。通过扫描电子显微镜(SEM)可以观察到土的微观结构中颗粒与颗粒之间的联结情况，黑山钙基膨润土的扫描电子显微镜照片如图 3 所示。试验采用的砂为福建标准砂。

膨润土主要物理和化学性质为相对密度  $G_s = 2.42$ ，液限  $w_l = 99.7\%$ ，塑限  $w_p = 41.0\%$ ，自

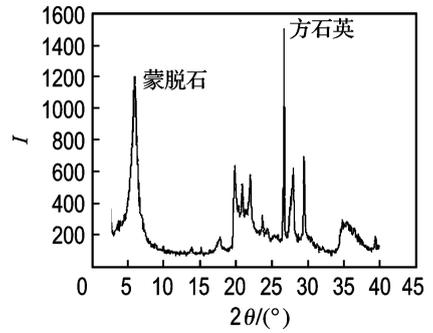


图 2 黑山钙基膨润土的 X-射线衍射图

Fig. 2 X-ray diffraction plot of Heishan calcium bentonite

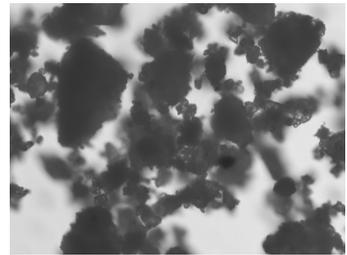


图 3 黑山钙基膨润土扫描电子显微镜照片

Fig. 3 The SEM photo of Heishan calcium bentonite

由膨胀率 76.5%，最佳含水率  $w_{opt} = 39.0\%$ ，最大干密度  $\rho_{dmax} = 1.124 \text{ g/cm}^3$ ，阳离子交换容量 45.62 mmol/100 g，pH 8.08。福建标准砂的主要物理性质为相对密度  $G_s = 2.643$ ，平均粒径  $d_{50} = 0.34 \text{ mm}$ ，不均匀系数  $C_u = 1.542$ ，最大干密度  $\rho_{dmax} = 1.74 \text{ g/cm}^3$ ，最小干密度  $\rho_{dmin} = 1.43 \text{ g/cm}^3$ ，最大孔隙比  $e_{max} = 0.848$ ，最小孔隙比  $e_{min} = 0.519$ 。

本试验中采用的膨润土加砂混合物由黑山钙基膨润土和福建标准砂混合而成，混合物试样中膨润土和标准砂的烘干质量各占混合物固体质量的 50%。膨润土和标准砂均在 105 °C 下烘干 48 h 后立刻称取所需质量，充分混合之后加蒸馏水制样，控制混合物的初始含水率为 19.5%，为达到水分的均衡，将制好的土样密封后，在恒温下平衡 7 d。三轴试样的尺寸为直径 39.1 mm、高度 80 mm、体积 96 cm<sup>3</sup>。试样的制作严格按照土工试验规程进行，控制试样的干密度为 1.51 g/cm<sup>3</sup>，在三瓣模和击实器中分 5 层击实，击实前每层土之间用刮土刀刮毛。制备好的试样具有相同的密实度和初始含水率，可以视为具有相同的初始状态。在真空锅中进行抽真空饱和，当真空度接近

$-1.03 \times 10^5$  Pa 后,继续抽气 12 h,之后注入无气水,静置 24 h,以保证试样充分饱和. GDS 非饱和三轴试验系统中,试样中基质吸力的控制是采用轴平移技术,这就要求试样中的水、气形态均处于连通状态. 试样经过充分饱和后,试样中孔隙水处于连通状态. 在非饱和土三轴试验中,当通过分别施加孔隙气压力和孔隙水压力来控制达到要求的吸力值时,就可以保证试样在吸力平衡过程中孔隙气均匀进入土体,孔隙水均匀排出,以保持孔隙水、孔隙气的连通状态.

### 1.3 试验方法

在 GDS 三轴仪试验系统上完成饱和与非饱和两种状态下的固结排水剪切试验. 饱和三轴固结排水剪切试验的主要目的是确定饱和膨润土加砂混合物的参数,以及非饱和状态下试样特性的参照零点,即与基质吸力为零时所对应的混合物强度特性. 非饱和三轴固结排水剪切试验则是研究在不同的基质吸力条件下膨润土加砂混合物的抗剪强度特性,并分析基质吸力对抗剪强度的影响情况. 非饱和三轴试验可以分为吸力平衡、等吸力固结和等吸力剪切 3 个阶段. 三轴试验的应力路径如图 4 所示.

变的 20%.

非饱和三轴试验中,在试样的顶部和底部分别施加孔隙气压力与孔隙水压力,两者的差值即为所要求的基质吸力值. 试样的初始状态均为饱和状态,初始基质吸力为零,在基质吸力平衡过程中试样将排水,基质吸力平衡阶段的稳定标准为 24 h 之内连续测得的排出水流变化总量小于  $20 \text{ mm}^3$ ,平衡时间约为 26 d 以上. 基质吸力平衡过程的应力路径如图 4 中的  $O \rightarrow O_1$ 、 $O \rightarrow O_2$  和  $O \rightarrow O_3$ . 控制的基质吸力分别为 50、100 和 200 kPa. 基质吸力平衡后,使试样在等吸力下固结稳定. 不同基质吸力条件下施加相同固结压力的应力路径如图 4 中的  $O_1 \rightarrow A_1$ 、 $O_2 \rightarrow A_2$  和  $O_3 \rightarrow A_3$ . 相同基质吸力条件下施加不同的固结压力的应力路径如图 4 中的  $O_1 \rightarrow C_1$ 、 $O_1 \rightarrow A_1$  和  $O_1 \rightarrow C_2$ . 所施加的固结压力为 50、100 和 200 kPa. 在等吸力剪切阶段,应变剪切速率取  $0.0026 \text{ mm/min}$ ,剪切至轴向应变为 20%,剪切时间约为 4 d. 不同基质吸力下的剪切应力路径如图 4 中的  $A_1 \rightarrow B_1$ 、 $A_2 \rightarrow B_2$  和  $A_3 \rightarrow B_3$ ,相同基质吸力和不同固结压力下的剪切应力路径为  $C_1 \rightarrow D_1$ 、 $A_1 \rightarrow B_1$  和  $C_2 \rightarrow D_2$ .

## 2 试验结果分析

饱和状态的膨润土加砂混合物的应力应变关系曲线为硬化型,如图 5 所示,随着所施加围压的增加,曲线的初始刚度和最大偏应力均增大,当轴向应变达到 15% 之后,各曲线达到稳定的最大偏应力. 由此得到膨润土加砂混合物的有效黏聚力  $c'$  和有效内摩擦角  $\phi'$  分别为 34.5 kPa、 $18.1^\circ$ . 非饱和状态的膨润土加砂混合物的应力应变关系曲线与饱和状态的混合物的应力应变关系曲线具有相似的形态,亦为硬化型,随着所施加围压和基质吸力的增加,关系曲线的初始刚度和最大偏应力均增大,最终关系曲线达到稳定的最大偏应力. 基质吸力为 50 kPa 的混合物的应力应变关系曲线如图 6 所示. 两种状态下试样均发生了鼓状破坏,但并无明显的破坏带,这是与膨润土加砂混合物良好的可塑性、压缩性和变形能力有关的,较高的可塑性和良好的变形能力保证了核废料的深地处置库免受外界荷载的影响和应力在整个处置系统内部的充分消散.

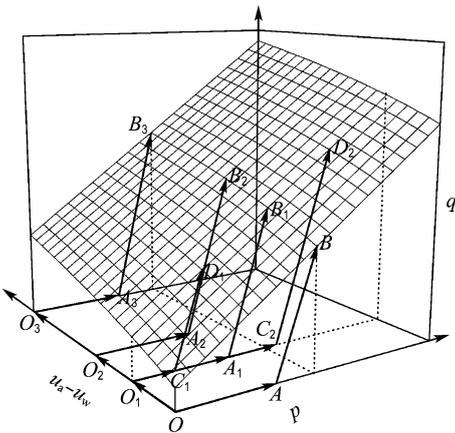


图 4 三轴试验应力路径

Fig. 4 The stress paths of triaxial tests

饱和三轴试验的应力路径如图 4 中在基质吸力为零的平面上  $O \rightarrow A \rightarrow B$ ,饱和试样在一定的围压下固结后,进行应变控制的排水剪切试验. 所施加的围压分别为 50、100 和 200 kPa. 为了进行有效比较,饱和与非饱和三轴试验采用相同剪切速率,采用非饱和状态下的剪切速率,剪切至轴向应

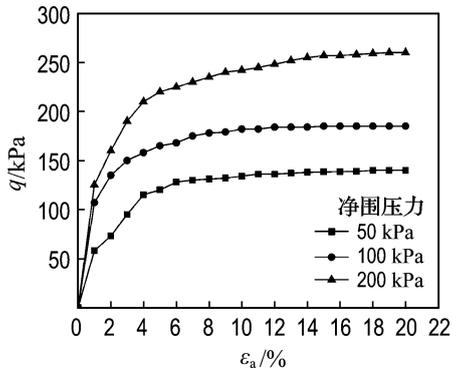


图 5 饱和膨润土加砂混合物的应力应变关系曲线

Fig. 5 The stress-strain curves of saturated bentonite-sand mixtures

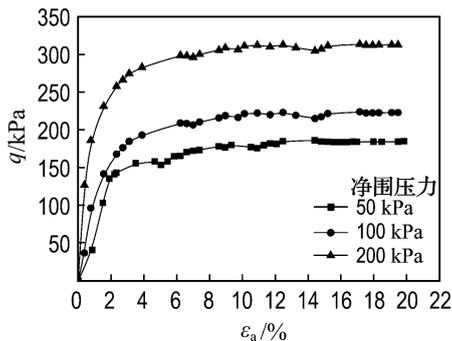


图 6 50 kPa 基质吸力下混合物的应力应变关系曲线

Fig. 6 The stress-strain curves of bentonite-sand mixtures with matrix suction of 50 kPa

非饱和状态膨润土加砂混合物三轴试验所得到的有效内摩擦角与饱和状态下的有效内摩擦角相近,约为  $18.1^\circ$ 。不同基质吸力下的膨润土加砂混合物的破坏包线如图 7 所示,其中  $\tau$  为剪应力,  $\sigma_n$  为净围压力。

由图 7 可见,随着基质吸力的增加,膨润土加砂混合物的破坏包线在剪应力轴的截距也不断增加,即总黏聚力  $c$  随着基质吸力增大而增大。不同基质吸力下所得到的混合物的总黏聚力如表 1 所示。

总黏聚力与基质吸力之间关系可以采用文献 [11] 所提出的含有非线性系数  $m$  的关系式来表达,并进一步得到膨润土加砂混合物的抗剪强度公式。总黏聚力  $c$  与基质吸力  $(u_a - u_w)$  之间的非线性关系可表示为式(1),相应的关系曲线如图 8 所示。

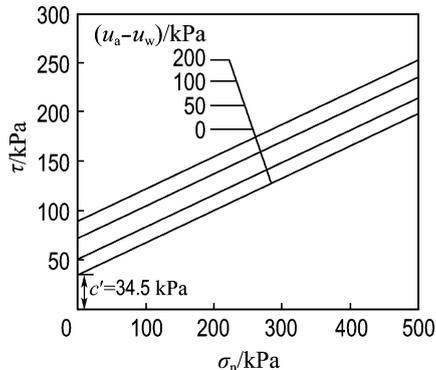


图 7 膨润土加砂混合物的破坏包线

Fig. 7 The failure envelopes of bentonite-sand mixtures on the  $\tau\text{-}\sigma_n$  plane

表 1 不同基质吸力下膨润土加砂混合物的总黏聚力

Tab. 1 Total cohesions of bentonite-sand mixtures with different matrix suctions

基质吸力/kPa	总黏聚力/kPa
0	34.50
50	50.45
100	69.67
200	89.02

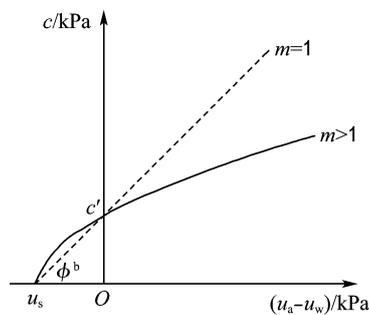


图 8 总黏聚力  $c$  与基质吸力  $(u_a - u_w)$  之间的关系曲线

Fig. 8 The curve of  $c$  versus  $(u_a - u_w)$

$$c = c' \left( 1 + \frac{u_a - u_w}{|u_s|} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

式中:  $u_s$  为曲线在基质吸力轴上的截距,  $|u_s|$  表示  $u_s$  的绝对值,在低基质吸力下,土体有较高的饱和度,因此有  $\phi^b = \phi'$ ,则可得到

$$|u_s| = \frac{c'}{\tan \phi^b} = \frac{c'}{\tan \phi'} \quad (2)$$

由此,总黏聚力可以表示成基质吸力的非线性函数,两者之间的非线性关系可以由非线性系数  $m$  来表达,当  $m = 1$  时,两者的关系变成线性关系,

当  $m > 1$  时, 两者的关系则变成非线性.  $m$  的变化可以表示出不同的非线性程度, 可以对不同类型土体的总黏聚力与基质吸力之间的非线性关系进行拟合. 非线性系数  $m$  不随着基质吸力的增加而变化, 能较好地反映出非饱和土体的抗剪强度或总黏聚力与基质吸力之间的非线性特征. 含有非线性系数的非饱和抗剪强度公式可以表示为

$$\tau_f = (\sigma - u_a) \tan \phi' + c' \left( 1 + \frac{u_a - u_w}{|u_s|} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

则膨润土加砂混合物的总黏聚力与基质吸力之间的关系可以表示为式(4), 式中非线性系数  $m$  为 1.09, 确定系数为 0.98, 关系曲线如图 9 所示.

$$c = 34.5 \left( 1 + \frac{u_a - u_w}{105.56} \right)^{\frac{1}{1.09}} \quad (4)$$

$$|u_s| = \frac{34.5}{\tan 18.1^\circ} = 105.56$$

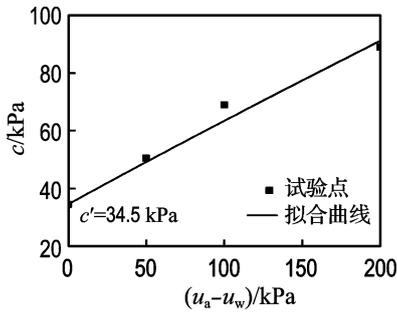


图 9  $m=1.09$  时膨润土加砂混合物总黏聚力  $c$  与基质吸力 ( $u_a - u_w$ ) 的关系曲线

Fig. 9 The curve of  $c$  versus ( $u_a - u_w$ ) of bentonite-sand mixtures when  $m = 1.09$

由图 9 可见, 含有非线性系数的关系式, 可以对总黏聚力与基质吸力之间的关系进行较好的表达. 相应地得到膨润土加砂混合物在非饱和状态下的抗剪强度公式为

$$\tau_f = (\sigma - u_a) \tan 18.1^\circ + 34.5 \left( 1 + \frac{u_a - u_w}{105.56} \right)^{\frac{1}{1.09}} \quad (5)$$

进一步采用含有非线性系数的非饱和抗剪强度公式对南阳膨胀土<sup>[12]</sup>、宁夏膨胀土<sup>[13]</sup>、压实页岩和漂砾黏土<sup>[14]</sup> 4 种类型非饱和土的抗剪强度试验成果进行验证分析, 可以得到 4 种非饱和土在非饱和状态下的抗剪强度公式依次为

$$\tau_f = (\sigma - u_a) \tan 21.2^\circ + 35 \left( 1 + \frac{u_a - u_w}{90.24} \right)^{\frac{1}{1.173}} \quad (6)$$

$$\tau_f = (\sigma - u_a) \tan 25^\circ + 36 \left( 1 + \frac{u_a - u_w}{77.20} \right)^{\frac{1}{1.646}} \quad (7)$$

$$\tau_f = (\sigma - u_a) \tan 24.8^\circ + 15.8 \left( 1 + \frac{u_a - u_w}{34.19} \right)^{\frac{1}{1.406}} \quad (8)$$

$$\tau_f = (\sigma - u_a) \tan 27.3^\circ + 9.6 \left( 1 + \frac{u_a - u_w}{18.60} \right)^{\frac{1}{1.275}} \quad (9)$$

分析表明, 含有非线性系数的非饱和土抗剪强度公式对 4 种非饱和土的抗剪强度试验成果均具有较好的拟合效果<sup>[11]</sup>. 对于不同类型的非饱和土, 非线性系数  $m$  有不同的值, 并且不随基质吸力的变化而变化, 是一个与土的性质有关的常数, 可以较好地反映出非饱和土抗剪强度的非线性特征, 使含有非线性系数的非饱和土抗剪强度公式具有较强的适用性.

### 3 结 论

(1) 非饱和状态下膨润土加砂混合物的应力应变关系曲线与饱和状态下的形态相似, 均为硬化型.

(2) 随着基质吸力或净围压力的增加, 最大偏应力增大. 非饱和状态下的膨润土加砂混合物的有效内摩擦角与饱和状态下的相近. 随着基质吸力的增加, 膨润土加砂混合物的总黏聚力增加, 两者之间的关系可以采用含有非线性系数的关系式进行较好的表达, 进一步得到了非饱和状态下膨润土加砂混合物的抗剪强度公式.

(3) 含有非线性系数的非饱和土抗剪强度公式适用于不同类型的非饱和土. 非线性系数  $m$  有不同的值, 并且不随基质吸力的变化而变化, 是一个与土的性质有关的常数, 能较好地反映出非饱和土抗剪强度的非线性特征, 使含有非线性系数的非饱和土抗剪强度公式具有较强的适用性.

### 参考文献:

- [1] 温志坚, 刘月妙. 缓冲/回填材料——膨润土研究国际进展[J]. 世界核地质科学, 2005, 22(3):158-162

- [2] CHEN Bao, QIAN Li-xin, YE Wei-min, *et al.* Soil-water characteristic curves of Gaomiaozi bentonite [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, **25**(4):788-793
- [3] 徐永福, 孙德安, 董平. 膨润土及其与砂混合物的膨胀试验[J]. **岩石力学与工程学报**, 2003, **22**(3):451-455
- [4] 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
- [5] 王志俭, 刘泉声. 密实砂-膨润土混合物膨胀特性的试验研究[J]. **岩土力学**, 2000, **21**(4):331-334
- [6] 温志坚, 神德敬. 高庙子钠基膨润土静力学性能初析[J]. **世界核地质科学**, 2005, **22**(4):211-214
- [7] 郁陈. 非饱和高庙子膨润土的体变特征及其微观机理[D]. 上海: 同济大学, 2006
- [8] 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
- [9] NG C W W, ZHAN L T, CUI Y J. A new simple system for measuring volume changes in unsaturated soils [J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, **39**(2):757-764
- [10] 侯梅芳, 马北雁, 万洪富, 等. 我国各地膨润土的矿物学性质[J]. **岩矿测试**, 2002, **21**(3):190-194
- [11] LI Pei-yong, YANG Qing, LUAN Mao-tian, *et al.* Study on nonlinearity of the shear of strength of unsaturated soils [C] // **Proceedings of the International Workshop on Constitutive Modelling**. Hong Kong: Advanced Technovation Limited, 2007: 355-359
- [12] 缪林昌, 殷宗泽. 非饱和土的剪切强度[J]. **岩土力学**, 1999, **20**(3):1-6
- [13] 徐永福. 非饱和膨润土结构性强度的研究[J]. **河海大学学报**, 1999, **27**(2):86-89
- [14] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1978, **15**: 313-321

## Study of unsaturated triaxial tests for bentonite-sand mixtures

LI Pei-yong<sup>\*1</sup>, YANG Qing<sup>2</sup>

( 1. School of Civil and Safety Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China;

2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** Studies on consolidated drained triaxial tests for bentonite-sand mixtures under saturated and unsaturated states are presented by utilizing GDS triaxial test system. Experimental results indicate that stress-strain curves of unsaturated bentonite-sand mixtures are similar to the curves of saturated bentonite-sand mixtures, which are hardening curves. Maximum deviatoric stress increases as matrix suction or net confining pressure increases. For all test samples, barrel deformation happens and no obvious shear failure area exists. Effective internal friction angles of bentonite-sand mixtures in two states are approximately equal. Total cohesion increases as matrix suction increases, which shows the influence of matrix suction on shear strength of mixtures. The relationship of total cohesion versus matrix suction can be denoted by the equation with nonlinear coefficient well. Then, a shear strength equation is obtained for unsaturated bentonite-sand mixtures.

**Key words:** bentonite-sand mixtures; unsaturated triaxial tests; shear strength