

DOI: 10.11779/CJGE201602024

孔隙液体对玻璃砂透明土强度特性影响研究

孔纲强^{1, 2}, 孙学谨^{1, 2}, 李 辉^{1, 2}, 曹兆虎^{1, 2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 玻璃砂透明土由一种玻璃砂(或称熔融石英砂)和与之折射率相一致的孔隙液体制配而成的新型人工合成透明土, 为岩土工程可视化模型试验方法提供技术支撑。开展混合油、溴化钙溶液、蔗糖溶液以及纯净水等不同孔隙液体所配制成的透明土的三轴固结排水(CD)试验, 分析该新型透明土材料的应力-应变关系曲线、体积变形等力学特性以及推导其邓肯-张模型参数。试验结果表明, 不同孔隙液体所配制成的透明土试样力学特性规律相似、数值上有所差异; 由蔗糖溶液配制成的透明土强度最大、由混合油配制成的透明土强度最小、由溴化钙溶液配制成的透明土强度值与水样熔融石英砂的强度相对更接近。

关键词: 透明土; 孔隙液体; 强度特性; 三轴试验

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)02-0377-08

作者简介: 孔纲强(1982-), 男, 浙江磐安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事桩-土相互作用及能量桩技术与应用方面的教学与研究工作。E-mail: gqkong1@163.com。

Effect of pore fluid on strength properties of transparent soil

KONG Gang-qiang^{1, 2}, SUN Xue-jin^{1, 2}, LI Hui^{1, 2}, CAO Zhao-hu^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A kind of new transparent soil, which is made of glass sand (also called as baked quartz) and pore fluid with the same refraction index, is used for geotechnical engineering visualization model tests. Based on the consolidated drained (CD) triaxial test method, the mechanical properties of transparent soil with different pore fluids (mixed oil, calcium bromide solution, sucrose solution and pure water) are investigated. The stress-strain curves, volume change and friction angles are measured and analyzed. The laboratory test results show that the mechanical properties of the transparent soil samples with different pore fluids are similar, while the values have some difference. Under the experimental conditions of this study, the strength of the transparent soil with sucrose solution pore fluid is the largest, at with mixed oil pore fluid is the smallest, and that with calcium bromide solution pore fluid is close to that with water pore fluid.

Key words: transparent soil; pore fluid; strength property; triaxial test

0 引 言

岩土工程量测技术中, 探索采用物理力学性质与天然土体相近的透明材料来模拟天然砂土(或黏土), 以开展可视化土体内部位移场和渗流场等的物理模型试验研究逐渐成为一种趋势^[1]。

近年来, 相关研究人员基于人工合成透明土材料和数字图像处理技术, 开展了系列研究并取得了一定的成果。目前, 国内外最常用的模拟“土”颗粒的透明固体材料为无定形二氧化硅和熔融石英砂两种。基于无定形二氧化硅材料模拟“土”颗粒, 液体石蜡和混合油等模拟孔隙液体制配成的透明土, 开展了沉桩贯入试验^[2-4]; 开展了隧道开挖过程中地表及土体内部位移场试验研究^[5]; 开展了污染物迁移过程模拟研

究^[6]; 开展了振动荷载作用下土与结构物动力相互作用研究^[7]。基于熔融石英砂材料模拟“土”颗粒, 混合油或溴化钙溶液等模拟孔隙液体制配成的透明土, 开展了沉桩贯入试验^[8-9]; 开展了隧道开挖过程模拟研究^[10]; 开展了土工格栅与透明土体在拉拔试验过程中接触面特性研究^[11]。基于全氟磺酸树脂(Nafion)材料模拟“土”颗粒, 三梨糖醇溶液模拟孔隙液体制配成的透明土, 开展了植物根系生长规律可视化模型试验^[12]。

然而, 与蓬勃发展的基于透明土材料和数字图像

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278170, 51478165)

收稿日期: 2015-04-03

处理技术方法的应用研究相比,针对人工合成透明土材料(尤其是针对基于熔融石英砂制配的透明土材料)的基本力学特性及其与天然土体的差异研究则相对较少。针对熔融石英砂的基本物理力学特性,相关研究人员开展了固结试验、渗透试验以及直剪试验等,并与天然砂性土或者黏性土进行对比分析^[13-17]。然而,已有研究成果中缺少针对不同孔隙液体制配成的透明土性质的差异比较研究,且采用纯净水替代孔隙液体制配成的试样进行试验,与实际所配置透明土材料存在一定的差异。

综上可知,目前可以调制成 1.4585 这样高折射率的、符合无色无味、透明、安全稳定、与固体颗粒不发生化学反应的液体溶液并不多见。因此,本文结合制配透明土的有机溶液(混合油)、无机溶液(溴化钙溶液)和糖类(蔗糖溶液)三类最具代表性的典型孔隙液体,和熔融石英砂制配成透明土试样,开展三轴固结排水(CD)试验研究;并进行熔融石英砂干样和饱和水样的试验进行对比分析;为基于透明土材料的岩土工程可视化模型试验方法提供技术支撑。

1 室内试验概况

1.1 “土”颗粒基本性质

试验所选用的材料为玻璃砂(也称熔融石英砂),由徐州新沂万和矿业有限公司生产,其折射率为 1.4585;与硅石凝胶材料相比,玻璃砂颗粒为有棱角的不规则形状,玻璃砂内部无大量的微细孔道,且本身具有杂质少、纯度高、材料本身具有更好的透明度等特点。玻璃砂粒径为 0.5~1.0 mm(该粒径是模型试验中最常用的粒径之一);根据《土工试验规程》^[18],玻璃砂颗粒的比重为 2.186、相对密度试验、用漏斗法测定最小干密度为 0.970 g/cm³,用振击法测定最大干密度为 1.274 g/cm³,试验试样控制相对密度为 60%(参考文献[10]应用研究中表明,当相对密度在 60%左右时,所制配成的透明土透明度最优)。熔融石英砂颗粒及其放大 80 倍实物图如图 1 所示。

1.2 孔隙液体基本特性

孔隙液体的选择需满足无色无味、透明、安全稳定、与固体颗粒不发生化学反应,折射率与相应的固体颗粒一致。本试验选择 3 种典型液体作为孔隙液体,分别为有机溶液代表 15 白油和正 12 烷混合油、无机溶液代表溴化钙溶液、糖类溶液代表蔗糖溶液;由阿贝折射仪测定液体折射率,使之与熔融石英砂一致的折射率 1.4585;试验室 25℃ 温度下,3 种典型液体的折射率与混合比(或浓度)的关系曲线如图 2 所示。



图 1 玻璃砂及其放大 80 倍实物图

Fig. 1 Photos of glass sand and 80 times image

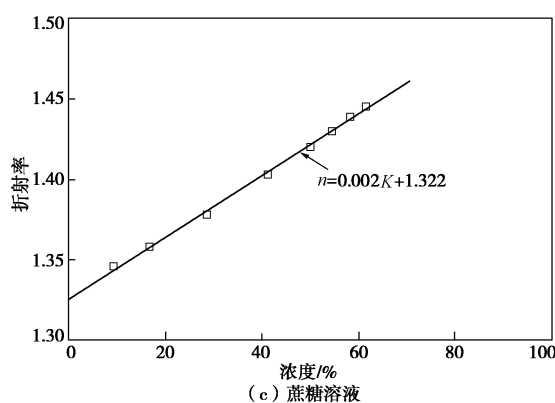
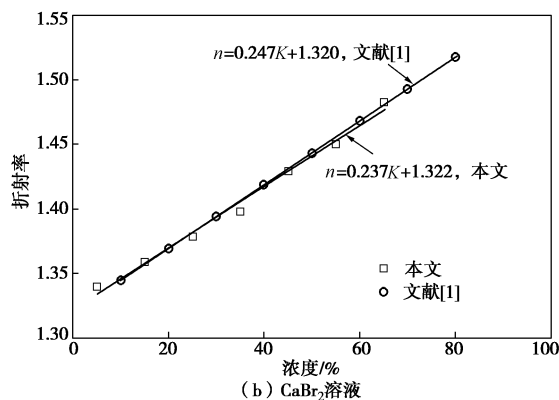
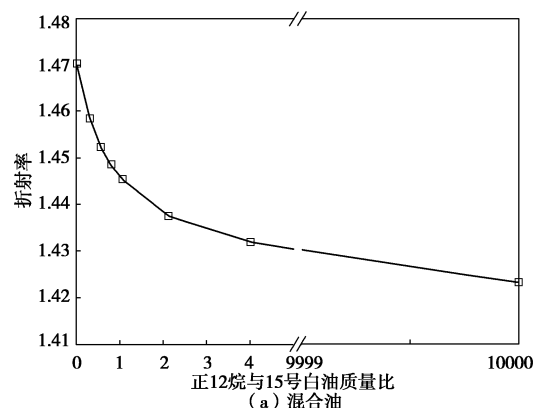


图 2 孔隙液体折射率与混合比(或浓度)关系曲线

Fig. 2 Curves of refractive index versus concentration

1.3 玻璃砂透明土的制备及三轴试验过程

选择玻璃砂,洗净烘干,去除杂质和水分;25℃ 时,制配孔隙液体,使其折射率达到 1.4585;将玻璃砂缓慢倾倒入混合油中,并用玻璃棒不断搅拌,保持液体水平面略高于玻璃砂颗粒表面;将试样放置于真

空箱中, 抽真空, 以去除试样中的气泡, 直到悬浮液透明为止; 根据模型槽体积和质量, 计算所配制成的透明土试样的相对密度。

试验试样按照《土工试验规程》^[18]扰动土样的制备程序和反压饱和法进行试样饱和; 在压力室底座上用对开模直接成样; 试验试样分 4 层击实, 每层玻璃砂的数量相等, 每装一层用击锤轻压使其接触密实, 再把接触面稍微刮擦一下, 使其每两层自然装样接触, 以免装样造成分层现象。由于孔隙液体黏度系数相对较大, 制配透明土的过程中易产生气泡, 难以完全饱和。考虑到本文采用的是 CD 试验, 在固结过程中, 随着总应力的增加, 孔隙液体压力消散, 有效应力增加, 孔隙比减小, 抗剪强度增加; 即试样的饱和度对 CD 试验结果影响相对较小。因此, 计算每级周围压力引起的孔隙液体压力增量, 当孔隙液体压力增量与周围压力增量之比 $\Delta u/\Delta \sigma_3 > 0.90$ 时, 认为试样饱和。

1.4 试验方案与工况设计

本试验使用的是 TSY10 型应变控制式常规三轴剪力仪。针对 3 种典型孔隙液体、相对密度为 60%、粒径为 0.5~1.0 mm 的玻璃砂透明土进行不同围压 (50, 100, 200, 400 kPa) 下的固结排水试验; 并针对该玻璃砂干样和饱和水样固结排水试验作为对比分析, 其参数设计如表 1 所示。

表 1 本文室内试验工况

| Table 1 Conditions of laboratory tests | | | | |
|--|-------|--------------------|---------------|------|
| 试样编号 | 孔隙液体 | 围压 σ_3 /kPa | 相对密度 D_r /% | 试验类型 |
| I | 混合油 | 50~400 | 60 | CD |
| II | 氯化钙溶液 | 50~400 | 60 | CD |
| III | 蔗糖溶液 | 50~400 | 60 | CD |
| IV | 纯净水 | 50~400 | 60 | CD |
| V | 干 样 | 100~200 | 60 | UU |

2 试验结果与分析

2.1 应力 - 应变关系

100 kPa 围压下, 不同孔隙液体所配制成的玻璃砂透明土应力 - 应变关系曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 同一应变下, 蔗糖溶液配制成的透明土偏应力最大、由混合油配制成的透明土偏应力最小、由氯化钙溶液配制成的透明土偏应力与水样熔融石英砂的应力值相接近。蔗糖溶液配制成的透明土偏应力的增加可能主要由于蔗糖溶液黏度大, 某种程度上限制了颗粒重新排列, 增加了抗剪力, 而混合油有润滑的作用, 减小了抗剪力。不同孔隙液体配制成的玻璃砂透明土偏应力峰值出现时对应的应变值大致相近。

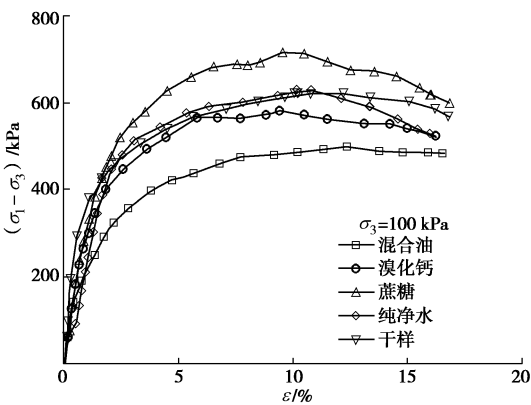
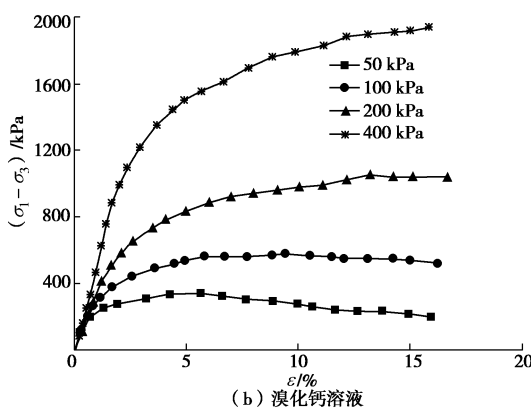
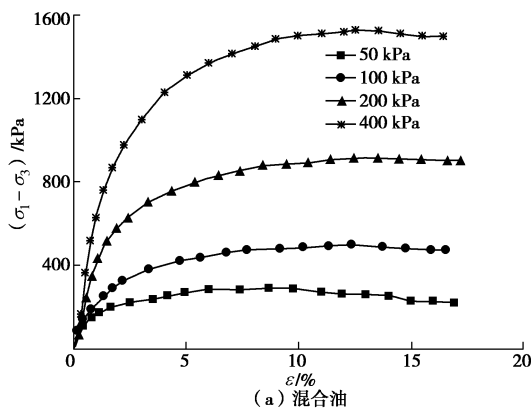


图 3 不同孔隙液体下试样应力应变曲线对比

Fig. 3 Curves of stress-strain with different pore fluids

不同孔隙液体配制成的玻璃砂透明土在不同围压下的应力 - 应变曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 不同孔隙液体的玻璃砂透明土应力应变曲线变化规律大致相近。增大围压, 偏应力峰值增大。此外, 在高压下试样应力应变曲线呈硬化型, 这主要是由于高压下颗粒的破碎, 细颗粒增加。在低压下均呈现偏应力峰值后应变软化现象, 但软化程度较弱。这是由于密砂受剪时, 一部分颗粒要滚过另一部分颗粒而产生相对错动, 需克服较大的咬合作用力, 故表现为较高的抗剪强度, 而一旦一部分颗粒绕过了另一部分颗粒, 结构变松, 抗剪能力减小, 因而表现为软化。这个现象与天然砂的性质类似。



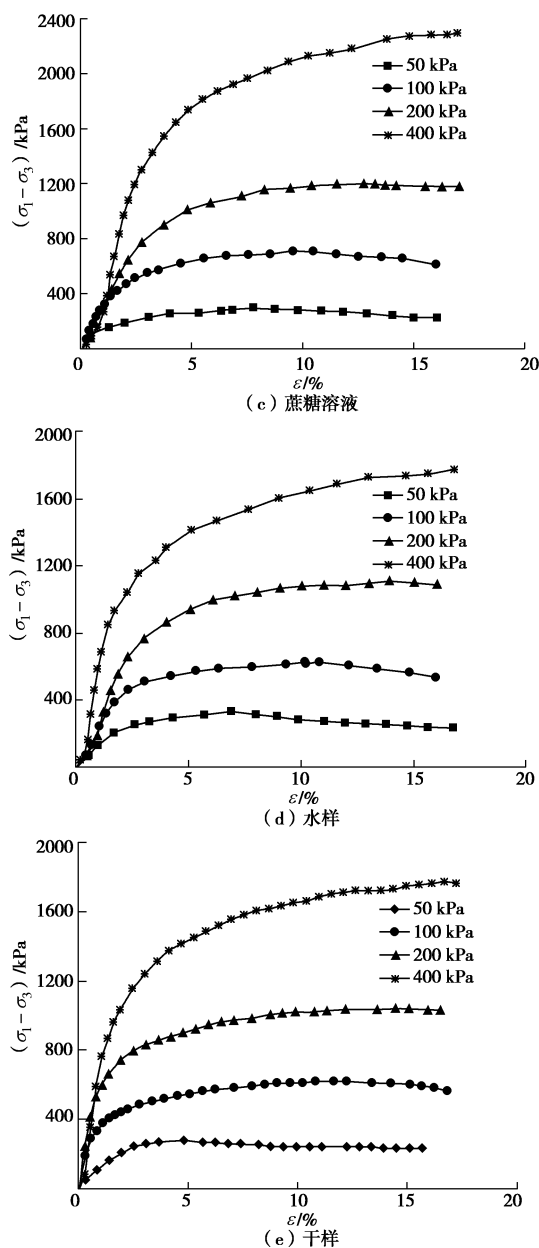


图4 不同围压下的应力-应变曲线

Fig. 4 Curves of stress-strain under different confining pressures

2.2 应力比的变化规律

本文由蔗糖溶液制配成的玻璃砂透明土与 Guzman 等^[17]蔗糖饱和样相应的应力比变化对比曲线 (100, 200 kPa 围压下) 如图 5 所示。由图 5 可知, 二者变化趋势大致相近, 应力比均随应变的增长先快速增长至一定值而后下降, 峰后呈现应变软化, 但二者曲线略有差异, 这主要是由于试样的粒径不同造成的 (参考文献[17]中试样粒径范围为 0.074~1.0 mm, 本文试样粒径范围为 0.5~1.0 mm)。

2.3 体变的变化规律

不同孔隙液体制配成的玻璃砂透明土在不同围压下的体变曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 不同孔隙液体的玻璃砂透明土体变规律大致相近。试样在低围压

下受剪时体积发生膨胀, 随着围压的增加, 土粒的破

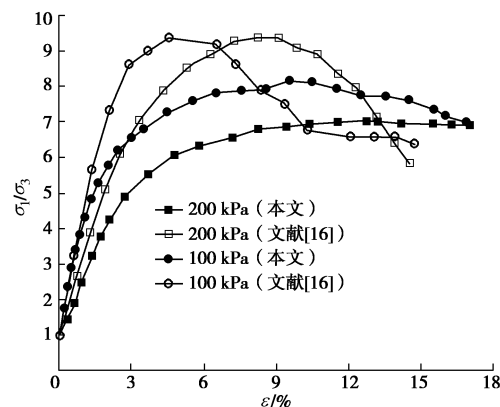
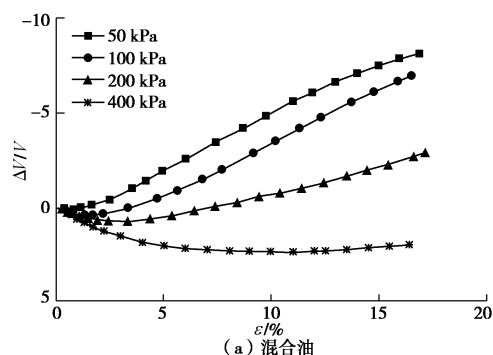
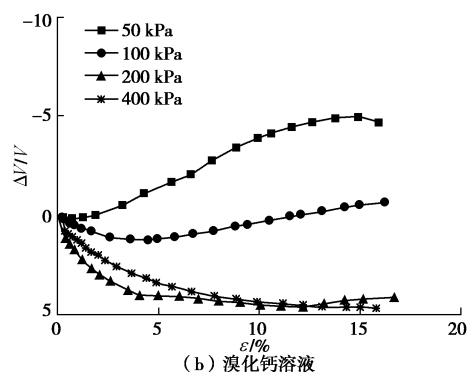


图5 蔗糖溶液试样应力比对比曲线

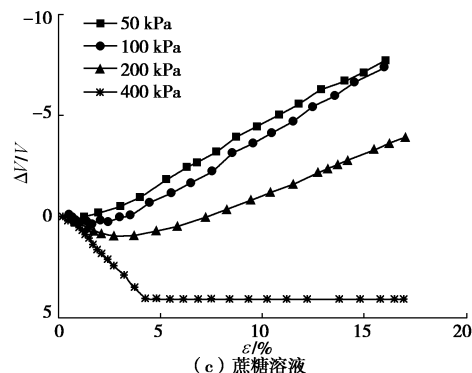
Fig. 5 Comparative curves of stress ratio of sucrose solution pore fluid



(a) 混合油



(b) 氯化钙溶液



(c) 蔗糖溶液

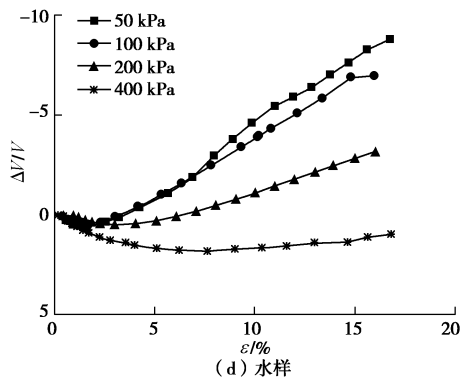


图6 不同围压下的体变曲线

Fig. 6 Curves of volume change under different confining pressures

不同孔隙液体制配成的玻璃砂透明土对应的体变曲线(100 kPa 围压下)如图7所示。由图7可知,混合油和蔗糖溶液制配成的玻璃砂透明土呈现更大的剪胀趋势,相比之下溴化钙溶液制配成的玻璃砂透明土趋势不是很明显,这很大程度上与孔隙液体的性质及橡皮膜嵌入对体变的影响有关。试验过程中发现混合油、蔗糖溶液与橡皮膜有明显的反应,橡皮膜变形较大,溴化钙溶液与橡皮膜几乎没有反应。这是由于橡胶易被油等有机溶剂溶胀,混合油、蔗糖溶液均属于有机溶剂,所以橡皮膜被溶胀,变形较大。而溴化钙溶液属于无机溶剂,不能使橡皮膜溶胀。另外,橡皮膜嵌入到试样侧表面中,并挤出孔隙中的水,从而使试样产生附加排水量。

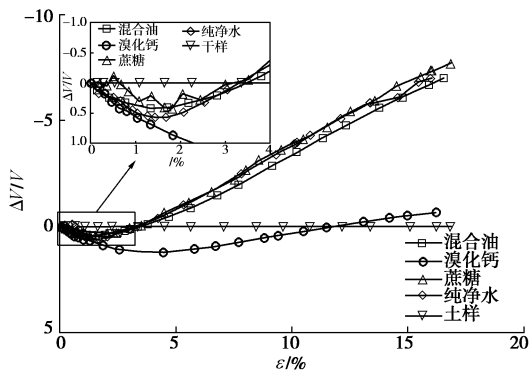


图7 孔隙液体对体变影响的对比曲线

Fig. 7 Comparative curves of volume change influenced by pore fluids

将本文用蔗糖溶液制配成的玻璃砂透明土与Guzman等[17]蔗糖饱和样相应的体变曲线(100, 200 kPa 围压下)进行对比,如图8所示。由图8可知,二者的剪胀趋势基本吻合,随着围压增加,剪胀趋势受到限制,且剪胀趋势均延续到较大的应变。但围压为100 kPa时,随着应变的增大,两者之间的差异明显,这主要是由于二者粒径范围存在差异,且试验仪器及试样制备等造成一定的误差。

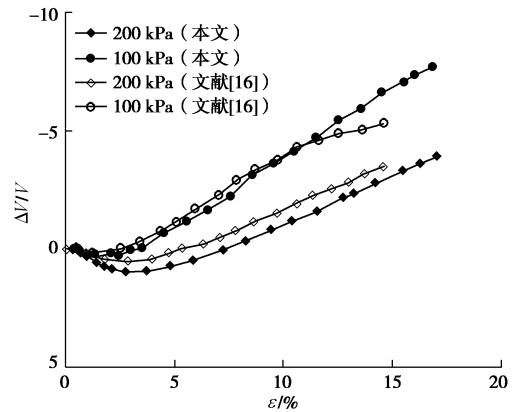


图8 蔗糖溶液试样体积变形对比曲线

Fig. 8 Comparative curves of volume change of sucrose solution pore fluid

2.4 临界状态线

常规的三轴模拟剪胀性材料的临界状态有些困难,因为在达到临界状态前,过多的变形导致加载不均匀,此外,剪胀对于应力路径的影响也很明显。如图9所示,临界状态线是由不同围压下,不同孔隙液体制配成的样模拟出来的,可以用于参考在三轴试验中达到破坏时的情况,由图9可知,不同孔隙液体制配成的玻璃砂透明样破坏线是基本重合的。

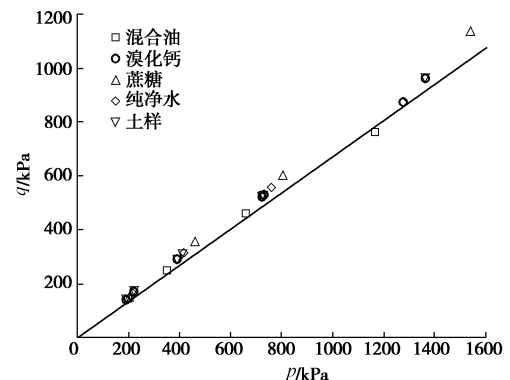


图9 临界状态线

Fig. 9 Critical state strength line on p versus q space from end points of tests

2.5 材料参数的确定

通过三轴试验确定邓肯张模型参数,可以实现该三轴试验数值模拟与试验结果对比验证,并可用于岩土工程的数值模拟中,如模拟路基沉降等问题。

(1) c , ϕ 的确定

不同孔隙液体所制配成的透明土试样峰值内摩擦角如表2所示,黏聚力为零。由表2可知,本文试验中所得到的不同孔隙液体制配成的玻璃砂透明土峰值内摩擦角的范围在 $48^\circ \sim 55^\circ$ 之间;混合油所制配成的透明土试样内摩擦角相对最小。本文所选用的玻璃砂固体颗粒棱角突出(如图1所示),试验所得内摩擦角值位于参考文献[19]里对于棱角突出的砂,内摩擦角范围在 $46^\circ \sim 57^\circ$ 之间的结论。

表 2 玻璃砂透明土试样固结排水剪切峰值内摩擦角
Table 2 Internal friction angles of transparent soil samples
obtained by CD tests

| 试样编号 | 孔隙液体 | 峰值内摩擦角/(°) |
|------|-------|------------|
| I | 混合油 | 48 |
| II | 溴化钙溶液 | 52 |
| III | 蔗糖溶液 | 50 |
| IV | 纯净水 | 55 |

以蔗糖溶液为例，本文中由蔗糖溶液制配成的玻璃砂透明土的强度包络线与 Guzman 等^[17]对比曲线如图 10 所示。由图 10 可知，在一定的围压范围，二者峰值强度包络线有明显的弯曲，围压较低时，峰值内摩擦角越大。本文和参考文献[17]中蔗糖溶液制配成的玻璃砂透明土的峰值内摩擦角和应力圆规律相似、数值相近且存在一定的差异，这主要是由于试样的粒径不同造成的（参考文献[17]中试样粒径范围为 0.074~1.0 mm，本文试样粒径范围为 0.5~1.0 mm）。蔗糖溶液所制配成的玻璃砂透明土均比天然砂的略大一些，这主要是由于透明土颗粒比较不规则，棱角突出等因素造成的。

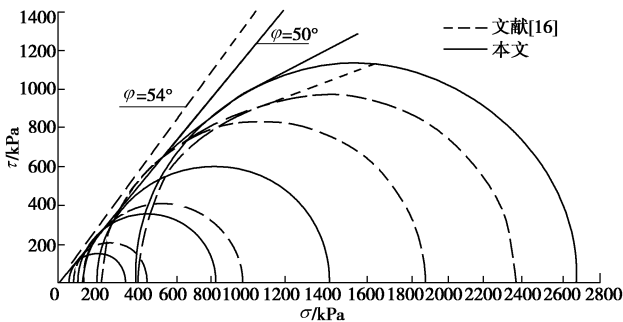


图 10 蔗糖溶液制配成的透明土固结排水剪切强度包络线
Fig. 10 Consolidated drained shear strength envelopes of transparent soil samples with sucrose solution pore fluid

(2) K , n , R_f 的确定

邓肯-张模型把三轴试验得到的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_a$ 关系曲线用双曲线来拟合：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_a}{a + b\varepsilon_a} \quad (1)$$

以混合油制配成的玻璃砂透明土为例，如图 11 所示， $\frac{\varepsilon_a}{\sigma_1 - \sigma_3}$ 为纵坐标， ε_a 为横坐标，将双曲线转换成直线，其斜率为 b ，截距为 a 。

其中， $a = \frac{1}{E_i}$ ， $b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_u}$ ， E_i 为初始切线模量， $(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 为主应力差渐近值， ε_a 为轴向应变。试验表明， E_i 随 σ_3 变化，点绘 $\lg(E_i/p_a)$ 和 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 的关系，如图 12 所示，近似为一直线，直线截距为 $\lg K$ ，斜率为 n ，于是有 $\lg(E_i/p_a) = \lg K + n \lg(\sigma_3/p_a)$ 。

$(\sigma_1 - \sigma_3)_u$ 表示 $\varepsilon_a \rightarrow \infty$ 时 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 的值，实际上，

ε_a 不可能趋向无穷大，达到一定值试样就破坏了，这时偏应力为 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ ，令

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_u} \quad (2)$$

式中， R_f 为破坏比，对不同 σ_3 有不同的破坏比，取平均值。

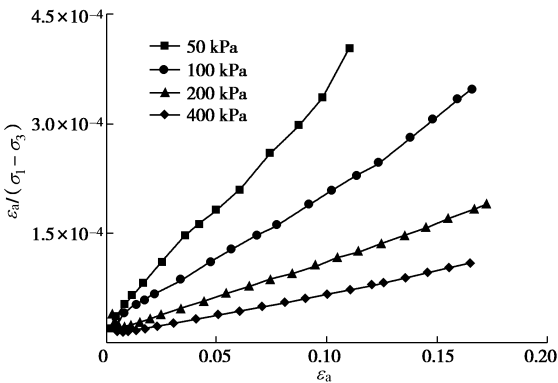


图 11 透明土试样应力与应变关系曲线（混合油）
Fig. 11 Curves of stress versus strain of transparent soil samples (mixed oil)

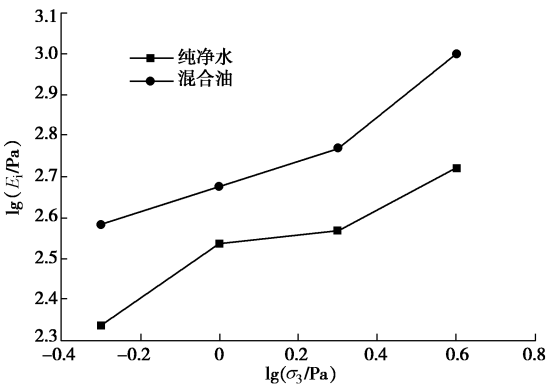


图 12 应力与初始模量关系曲线
Fig. 12 Curves of stress versus initial modulus

不同孔隙液体制配的透明土 K , n , R_f 值如表 3 所示。

表 3 玻璃砂透明土试样 K , n , R_f 值
Table 3 Values of K , n , R_f of transparent soil

| 试样编号 | 孔隙液体 | K | n | R_f |
|------|-------|--------|------|-------|
| I | 混合油 | 491.25 | 0.45 | 0.92 |
| II | 溴化钙溶液 | 374.97 | 0.42 | 0.89 |
| III | 蔗糖溶液 | 410.96 | 0.52 | 0.88 |
| IV | 纯净水 | 303.39 | 0.39 | 0.78 |

(3) G , F , D 的确定

三轴试验竖向加荷，侧向为膨胀应变， ε_r 为负值。把三轴试验得到的 $\varepsilon_a - -\varepsilon_r$ 关系曲线用双曲线来拟合：

$$\varepsilon_a = \frac{-\varepsilon_r}{f + D(-\varepsilon_r)} \quad (3)$$

以混合油制配成的玻璃砂透明土为例，如图 13 所示，图 13 (a) 以 ε_a 为纵坐标， $-\varepsilon_r$ 为横坐标；图

13 (b) 以 $\frac{-\varepsilon_r}{\varepsilon_a}$ 为纵坐标, $-\varepsilon_r$ 为横坐标, 将双曲线转换成直线, 斜率为 D , 截距为 f 。

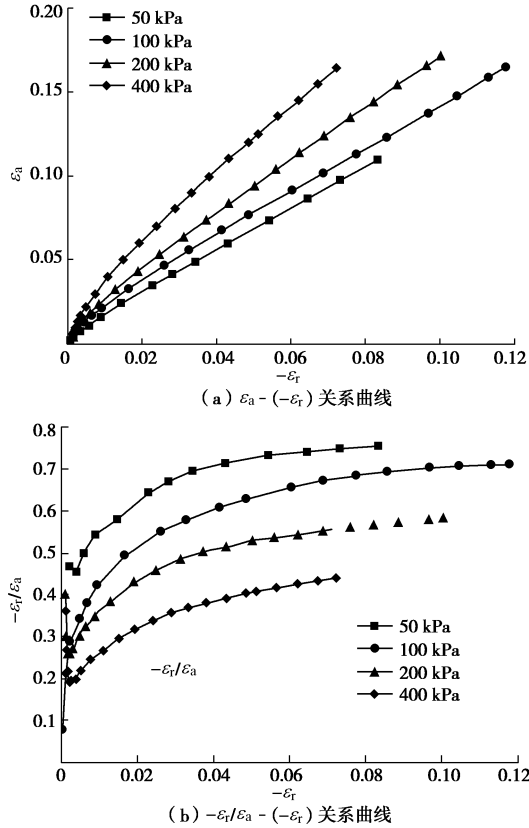


图 13 混合油制配成的透明土侧向应变与轴向应变间的关系
Fig. 13 Curves of lateral strain versus axial strain of transparent soil made of mixed oil

由式 (3) 可知, $-\varepsilon_r \rightarrow 0$ 时

$$f = \left(\frac{-\varepsilon_r}{\varepsilon_a} \right)_{\varepsilon_a \rightarrow 0} = \nu_i, \tag{4}$$

式中, ν_i 为初始切线泊松比, 对于不同的 σ_3 , 有不同的 ν_i 值。点绘 ν_i 与 $\lg(\sigma_3/p_a)$ 关系曲线, 近似为直线, 如图 14 所示。其截距为 G , 斜率为 F , 于是有 $\nu_i = G - F \lg(\sigma_3/p_a)$ 。

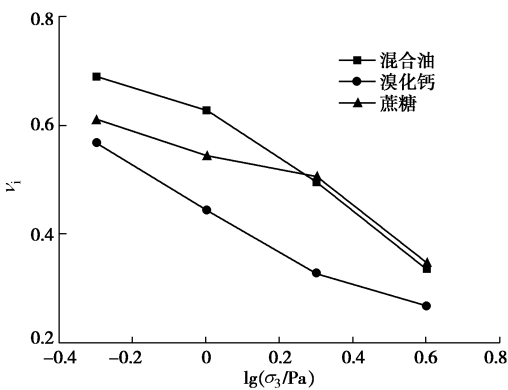


图 14 泊松比与应力关系曲线
Fig. 14 Curves of Poisson's ratio versus stress
不同孔隙液体配制的透明土 F, G, D 值如表 4

所示。

表 4 玻璃砂透明土试样 F, G, D 值

Table 4 Values of F, G, D of transparent soil

| 试样编号 | 孔隙液体 | F | G | D |
|------|-------|------|------|------|
| I | 混合油 | 0.39 | 0.59 | 3.48 |
| II | 溴化钙溶液 | 0.34 | 0.45 | 8.42 |
| III | 蔗糖溶液 | 0.27 | 0.54 | 4.33 |
| IV | 纯净水 | 0.37 | 0.59 | 4.67 |

3 结 论

本文基于三轴 CD 试验方法, 针对由混合油、溴化钙溶液、蔗糖溶液以及纯净水等不同孔隙液体所制配成的透明土试样力学特性开展对比试验研究, 可以得到如下结论:

- (1) 不同孔隙液体所制配成的透明土试样应力 - 应变关系曲线规律相似, 但是也存在一定的差异; 同等应变条件下, 由蔗糖溶液制配成的透明土应力值最大、由混合油制配成的透明土应力值最小、由溴化钙溶液制配成的透明土强度应力值与水样熔融石英砂的应力值相接近。
- (2) 本文试验条件下, 由于孔隙液体的差异, 混合油和蔗糖溶液制配成的玻璃砂透明土呈现更大的剪胀趋势, 同等情况下溴化钙溶液制配成的玻璃砂透明土趋势不是很明显。
- (3) 通过对三轴试验结果分析, 确定了不同孔隙液体配制的玻璃砂透明土在邓肯-张理论模型中的参数, 为该新型人工合成透明土的理论分析和数值模拟提供了一定的参考依据。

参考文献:

[1] 隋旺华, 高 岳. 透明土实验技术现状与展望[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 577 - 582. (SUI Wang-hua, GAO Yue. Status and prospect of transparent soil experimental technique[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 577 - 582. (in Chinese))

[2] HIRD C C, NI Q, GUYMER I. Physical modeling of deformations around piling augers in clay[J]. Géotechnique, 2011, 61(11): 993 - 999.

[3] STANIER S A, HIRD C C, BLACK J A. Enhancing accuracy and precision of transparent synthetic soil modeling[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2012, 12(4): 162 - 175.

[4] HOVER E D, NI Q, GUYMER I. Investigation of centerline strain path during tube penetration using transparent soil and particle image velocimetry[J]. Geotechnique Letter, 2013, 3(2): 37 - 41.

- [5] AHMED M, ISKANDER M. Analysis of tunneling-induced ground movements using transparent soil models[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2011, **137**(5): 525 - 535.
- [6] WELKER A, BOWDERS J, GILBERT R. Applied research using transparent material with hydraulic properties similar to soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 1999, **22**(3): 266 - 270.
- [7] 赵红华, 葛玉宁, 李鹏飞. 粒子测速技术和透明土在土与结构动力相互作用研究中的应用[J]. 西北地震学报, 2011, **33**(增刊 1): 148 - 154. (ZHAO Hong-hua, GE Louis, LI Peng-fei. Application of PIV and transparent soil in the study of the dynamic soil-structure interaction[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, **33**(S1): 148 - 154. (in Chinese))
- [8] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土材料的沉桩过程土体三维变形模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 395 - 400. (CAO Zhao-hu, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Model tests on 3-D soil deformation during pile penetration using transparent soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 395 - 400. (in Chinese))
- [9] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1564 - 1568. (CAO Zhao-hu, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Model tests on pipe pile penetration by using transparent soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1564 - 1568. (in Chinese))
- [10] SUN J L, LIU J Y. Visualization of tunneling-induced ground movement in transparent sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, **40**: 236 - 240.
- [11] EZZEIN F M, BATHURST R J. A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, **42**: 246 - 255.
- [12] DOWNIE H, HOLDEN N, OTTEN W, et al. Transparent soil for imaging the rhizosphere[J]. Plos One, 2012, **7**(9): 1 - 6.
- [13] 吴明喜. 人工合成透明砂土及其三轴试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (WU Ming-xi. Study on transparent synthetic sand and its triaxial test[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [14] EZZEIN F M, BATHURST R J. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, **34**(6): 590 - 601.
- [15] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土与标准砂变形特性对比三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1140 - 1146. (KONG Gang-qiang, LIU Lu, LIU Han-long, et al. Comparative analysis on the deformation characteristics of transparent glass sand and standard sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1140 - 1146. (in Chinese))
- [16] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土与标准砂土强度特性对比三轴试验[J]. 建筑材料学报, 2014, **17**(2): 250 - 254. (KONG Gang-qiang, LIU Lu, LIU Han-long, et al. Comparative analysis on the strength characteristics of transparent glass sand and standard sand[J]. Journal of Building Materials, 2014, **17**(2): 250 - 254. (in Chinese))
- [17] GUZMAN I L, ISKANDER M, SUESCUN-FLOREZ E, et al. A transparent Aqueous-saturated sand surrogate for use in physical modeling[J]. Acta Geotechnica, 2014, **9**(2): 187 - 206.
- [18] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [19] HOLTZ R D, KOVAKS W D. An introduction to geotechnical engineering[M]. 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 2010.

勘 误

本刊2016年第1期第100页孙奇¹, 董全杨¹, 蔡袁强^{1,2}, 王军¹, 胡秀青¹, 蔡瑛¹有误, 应为孙奇^{1,2}, 董全杨^{1,2}, 蔡袁强^{1,2}, 王军^{1,2}, 胡秀青^{1,2}, 蔡瑛^{1,2}; SUN Qi¹, DONG Quan-yang¹, CAI Yuan-qiang^{1,2}, WANG Jun¹, HU Xiu-qing¹, CAI Ying¹有误, 应为 SUN Qi^{1,2}, DONG Quan-yang^{1,2}, CAI Yuan-qiang^{1,2}, WANG Jun^{1,2}, HU Xiu-qing^{1,2}, CAI Ying^{1,2}, 特此勘误。

(本刊编辑部)