

# 透明土中孔隙液体折射率、黏度系数与稳定性

孔纲强<sup>1,2</sup>, 张鑫蕊<sup>1,2</sup>, 许文侯<sup>2</sup>, 孙学谨<sup>1,2</sup>

(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:** 为了探讨溶液作为制配透明土材料的可行性与稳定性, 并为相关模型试验选用提供参考依据, 针对二水氯化钙、焦磷酸钾、磷酸钾、六水氯化镁 4 种水溶型无机溶液和一种油溶型有机溶液 (15 号白油与正 12 烷混合物), 系统测定折射率、黏度系数与溶液质量比之间的关系; 采用目前模型试验中常用的氯化钙溶液、15 号白油与正 12 烷混合物两种典型孔隙液体进行了孔隙液体对橡皮膜变形和抗拉强度、孔隙液体对透明土中固体颗粒材料的影响试验。试验结果表明, 无机溶液折射率随质量比的增大呈线性增长, 而黏度系数随着质量比的增大呈非线性增长; 相同条件下氯化钙溶液和 15 号白油与正 12 烷混合物浸泡后橡皮膜长度变化率约分别为 0.47% 和 37.81%, 宽度变化率约分别为 -1.09% 和 40.50%, 抗拉强度分别降低约 14.0% 和 89.4%; 孔隙液体对熔融石英砂的影响较对无定形二氧化硅的影响要小, 15 号白油与正 12 烷混合物对固体颗粒的影响与氯化钙溶液基本相当。

**关键词:** 透明土; 孔隙液体; 折射率; 黏度系数; 浸泡试验

**中图分类号:** TU473; TU502      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2017)04-0025-05

**Refractive index, viscosity coefficient and stability of pore fluids in transparent soil//KONG Gangqiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Xinrui<sup>1,2</sup>, XU Wenbin<sup>2</sup>, SUN Xuejin<sup>1,2</sup>** (1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to verify the feasibility and stability of pore fluids used to manufacture transparent soil and provide references for relevant transparent soil model tests, the relationships of the refractive index and viscosity coefficient with the mass ratio of the solution were determined for four water-based inorganic solutions (calcium bromide, potassium pyrophosphate, potassium phosphate, and magnesium chloride hexahydrate) and one oil-based organic solution (the mixture of mineral oil No. 15 and dodecane). The calcium bromide solution and the mixture of mineral oil No. 15 and dodecane are two typical pore fluids in model tests. Experiments on the influence of the two pore fluids on the size deformation and tensile strength of latex membrane and solid granular particles were carried out. The results show that the refractive indices of the water-based inorganic solutions linearly increase with the mass ratio of the solution, and the viscosity coefficients nonlinearly increase with the mass ratio. Under the same conditions, the length change rates of the latex membranes after being immersed in the calcium bromide solution and the mixture of mineral oil No. 15 and dodecane are 0.47% and 37.81%, respectively, their width change rates are -1.09% and 40.50%, respectively, and their tensile strengths decrease by 13.5% and 89.4%, respectively. The effect of the pore fluids on the fused silica sand is smaller than that on the amorphous silica. The effect of the mixture of mineral oil No. 15 and dodecane on the solid particles is basically the same as that of the calcium bromide solution.

**Key words:** transparent soil; pore fluid; refractive index; viscosity coefficient; immersion test

近年来, 基于透明土材料的可视化模型试验方法逐渐得到重视与应用, 相关研究人员开展了沉桩贯入与桩-土相互作用<sup>[1-4]</sup>、隧道开挖<sup>[5]</sup>、植物根系生长<sup>[6]</sup>、土工格栅与土体拉拔特性<sup>[7-8]</sup>等土体内部位

移场问题, 污染物迁移<sup>[9]</sup>、注浆<sup>[10]</sup>等渗流场问题, 能量桩特性<sup>[11-12]</sup>等温度场问题以及透明岩体特性<sup>[13]</sup>的试验研究, 并取得了良好的应用效果。

人工合成透明土材料由透明固体颗粒模拟的

“土”颗粒和与透明固体颗粒折射率一致的孔隙液体模拟的“土”中孔隙水两相介质组成<sup>[14]</sup>。目前配制透明土的固体颗粒主要有无定形二氧化硅(amorphous silica)、硅胶(silica gel)、水族珠(hydrogel (aquabeads))、熔融石英砂(fused quartz)和硅酸镁锂(laponite)等5种<sup>[15]</sup>,且其固体颗粒折射率分布在1.333~1.458之间。配制透明土的孔隙液体主要可以分为水溶型无机溶液和油溶型有机溶液两大类<sup>[16]</sup>。Iskander等<sup>[17]</sup>最早采用白矿物油与烷烃混合物(油溶型有机溶液)、溴化钙溶液(水溶型无机溶液)模拟孔隙水。白矿物油与烷烃混合物在沉桩贯入、土工格栅与土体拉拔试验、能量桩等模型试验中得到大量运用<sup>[15, 7-8]</sup>;溴化钙溶液也在透明岩石注浆模型试验中得到应用<sup>[10]</sup>。针对孔隙液体的制配难易和黏度系数问题,隋旺华等<sup>[18]</sup>测定了溴化钙溶液的折射率;Zhao等<sup>[16]</sup>测定了多种不同组合的油溶型有机溶液黏度系数,并进行了与乳胶膜相互作用试验研究,发现了两种新的低黏度系数油溶型有机溶液;张仪萍等<sup>[19]</sup>测定分析了溴化钙、氯化钙、15号与3号白矿物油的折射率、黏度系数、平均色散值以及热敏感性等参数。

透明土试样配制中,选择孔隙液体要遵守3条主要准则:①折射率与固体颗粒相匹配且不与固体颗粒发生化学反应;②孔隙液体的黏度系数与天然土体中水的黏度系数相近;③对试验人员、模型槽及橡皮膜等影响小。已有研究表明部分孔隙液体对橡皮膜影响显著<sup>[20-21]</sup>,但针对透明土中孔隙液体对橡皮膜及透明土中固体颗粒影响的研究却相对较少。本文选择可模拟透明土孔隙液体的二水溴化钙、焦磷酸钾、磷酸钾、六水氯化镁4种水溶型无机溶液和15号白油与正12烷混合而成的1种油溶型有机溶液(以下简称混合油),系统测定折射率、黏度系数与溶液质量比之间的关系,探讨其作为配制透明土材料的可行性并为相关模型试验选用提供参考依据;结合目前模型试验中常用的二水溴化钙溶液、混合油两种孔隙液体,开展孔隙液体对橡皮膜变形及抗拉强度、对透明土中固体颗粒材料的影响规律研究,分析孔隙液体在配制透明土过程中的稳定性。

## 1 试验方法

### 1.1 孔隙液体选择

参照透明土试样配制中孔隙液体选择的3条准则,同时满足可溶解性,溶液为无色、安全稳定、无毒或者低毒且价格实惠、容易获得的要求,从溶液折射率尽量大的角度出发,选择二水溴化钙、焦磷酸钾、磷酸钾和六水氯化镁4种水溶型无机溶液作为试验

测定对象,并以目前模型试验中常用的混合油进行对比分析,4种饱和溶液最大折射率见表1<sup>[22]</sup>。

表1 饱和溶液最大折射率

溶液	化学式	最大折射率
二水溴化钙	CaBr <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	1.483
焦磷酸钾	K <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	1.436
磷酸钾	K <sub>3</sub> PO <sub>3</sub>	1.427
六水氯化镁	MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1.431
天然水	H <sub>2</sub> O	1.333

### 1.2 折射率与黏度系数测定

折射率测定试验采用上海物理光学仪器厂制造的2WAJ型阿贝折射仪,其技术参数如下:折射率测定范围1.300~1.700,折射率测定准确度0.0002,折射率最小分度值0.0005,糖量质量比测定范围0~95%,糖量质量比最小分度值0.25%。试验参照JJG 981—2014《阿贝折射仪标准块检定规程》进行。

黏度系数测定试验采用上海君翼仪器设备有限公司生产的国际上使用相对较广的1840芬氏黏度计(即改良奥氏黏度计),参照GB/T 22235—2008《液体黏度的测定》进行;去掉不正常数据,每组试验测定3次取平均值。

### 1.3 浸泡试验与拉拔试验

选择目前模型试验中最常用的无定形二氧化硅和熔融石英砂两种固体颗粒、最常用的溴化钙溶液和混合油两种孔隙液体进行浸泡试验,测试固体颗粒与孔隙液体、橡皮膜与孔隙液体之间的反应。浸泡试验中,二氧化硅在两种溶液中浸泡时溶液折射率均为1.4475,熔融石英砂和橡皮膜在两种溶液中浸泡时溶液折射率均为1.4585。

透明土试样配制中,需先进行三轴试验测试透明土材料的基本物理力学性质,图1给出了三轴试验熔融石英砂颗粒、变形后的橡皮膜及试验前后装在橡皮膜内的试样实物照片。浸泡试验橡皮膜采用南京岩石土壤仪器厂生产的广泛用于室内土工试验的三轴乳胶膜。浸泡试验前,先按设计尺寸(长(56.4±1.0)mm、宽(15.2±0.8)mm)裁剪橡皮膜并测量实际尺寸,称重固体颗粒质量,在容器内注入相应的孔隙液体;再将橡皮膜和固体颗粒分别浸泡入孔隙液体中,待达到设计的浸泡时间(48h)后,取出、擦干并测量橡皮膜尺寸,进行拉拔试验,将试验结果与预留的未浸泡的橡皮膜拉拔试验结果进行对比,获得强度降低率;取出固体颗粒并利用烘箱烘干,再称重。橡皮膜尺寸测量采用南京哈联工具有限生产的50分度格游标卡尺,拉拔试验采用法国安德洛TY10 CNR FT 500数显测力计;固体颗粒和孔隙液体电子质量称重精度为0.01g。

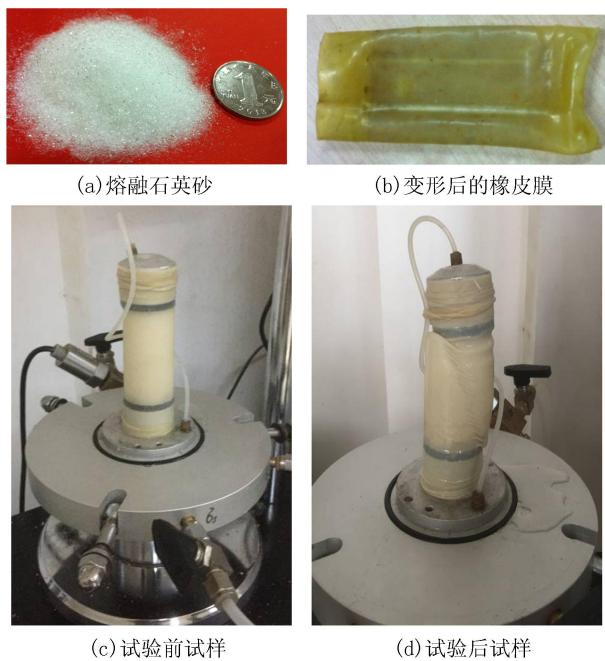


图1 透明土三轴试验实物

## 2 试验结果与分析

### 2.1 折射率

实验室温度(25℃)下,二水氯化钙、焦磷酸钾、磷酸钾和六水氯化镁4种水溶型溶液的折射率与溶液质量比关系曲线如图2所示,作为对比分析,图中给出了张仪萍等<sup>[19]</sup>实验得到的氯化钙和二水氯化钙溶液的折射率与溶液质量比关系曲线(实验温度30℃)。由图2可见,水溶型无机溶液折射率随着溶液质量比的增大而近似呈线性增长,当溶液达到饱和时,其相应的折射率也达到最大值。混合油在不同质量比(15号白油与正12烷的质量比值)情况下的折射率如图3所示。目前制配透明土的4种常用固体颗粒(水族珠、氯化钙、无定形二氧化硅、熔融石英砂)折射率分别为1.333、1.336、1.447和1.458。结合图2和图3可见,仅从折射率制配难易程度角度考虑时,当采用固体折射率相对较低的材

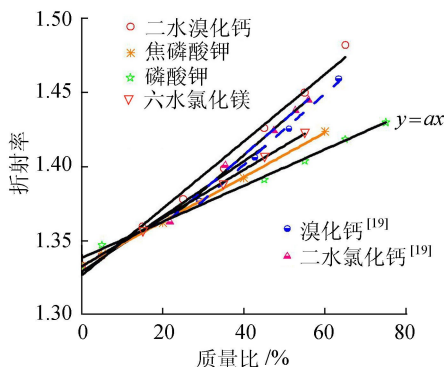


图2 孔隙液体折射率与水溶型无机溶液质量比关系曲线

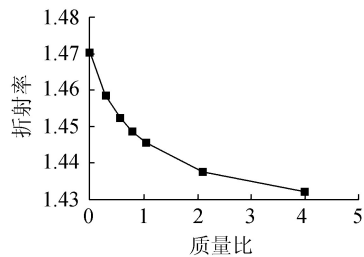


图3 孔隙液体折射率与混合油质量比关系曲线

料时,利用水溶型无机溶液相对比较容易制配;当采用固体折射率相对较高的材料时,利用油溶型有机溶液相对比较容易制配。

对于水溶型无机溶液,提高该溶液折射率的最大问题是该溶质溶解度问题(即溶液的饱和度限制了无机溶液的最大折射率值);然而,在一种溶质的水溶液达到饱和状态时,溶液还能溶解其他类型的溶质,从而可以提高整体溶液的折射率值。以磷酸钾溶液为例,当磷酸钾溶液达到折射率最大值时,分别添加苯甲酸钠、六偏磷酸钠、乙酸氨、硫酸氢氨、磷酸二氢钠和磷酸二氢氨等无机溶质,其折射率可以得到提高,具体可增加溶解的溶质类型、质量比以及所提高的折射率值见表2。可见,在制配透明土孔隙液体时,水溶型无机溶液也可以选择一种或者多种溶质混合制配,这可以有效拓展水溶型无机溶液的制配范围。

表2 饱和磷酸钾溶液中添加其他溶质引起的折射率提高值

添加的溶质	质量比/%	折射率提高值/%
苯甲酸钠	15	0.16
六偏磷酸钠	10	0.28
乙酸氨	10	0.30
硫酸氢氨	35	0.67
磷酸二氢钠	35	0.69
磷酸二氢氨	25	0.85

### 2.2 黏度系数

4种水溶型无机溶液的黏度系数与溶液质量比关系曲线如图4所示。由图4可见,溶液质量比对黏度系数有明显的影 响,孔隙液体的黏度系数随溶液质量比增大而呈非线性增长,质量比越大,黏度系

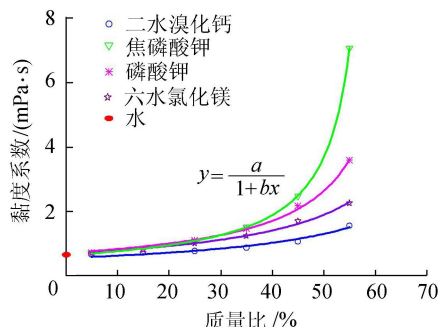


图4 孔隙液体黏度系数与水溶型无机溶液质量比关系曲线

数增加得越快;相同质量比下,二水氯化钙溶液的黏度系数最小、焦磷酸钾溶液最大。实验室温度(25℃)下,15号白油和正12烷的黏度系数分别为29.1 mPa·s和1.8 mPa·s,较天然纯净水的黏度系数(0.89 mPa·s)要大。

### 2.3 孔隙液体与橡皮膜的反应

孔隙液体的化学稳定性是选择模拟“土样”中孔隙液体的重要因素。透明土物理力学特性试验(如静三轴、动三轴以及共振柱等)过程中发现,橡皮膜与孔隙液体会发生化学反应,而且对于不同的孔隙液体,橡皮膜反应的剧烈程度及变形程度也存在差异,会影响试验的精度<sup>[16, 20]</sup>。因此,本文以目前模型试验中最常用的溴化钙溶液(代表水溶型无机溶液)和混合油(代表油溶型有机溶液)为例,开展橡皮膜在孔隙液体中浸泡前后(48 h)尺寸变化以及抗拉强度变化试验。

图5为浸泡试验前后橡皮膜实物照片,测试结果见表3。由表3可知,油溶型有机溶液与橡皮膜反应最为剧烈,橡皮膜长度和宽度增加到原来的1.4倍左右(长度和宽度平均变化率约为37.81%和40.50%),浸泡后强度降低约89.4%。而水溶型溴化钙溶液与橡皮膜反应程度相对较小,浸泡后尺寸变化率最大值为2.30%(长度和宽度平均变化率约

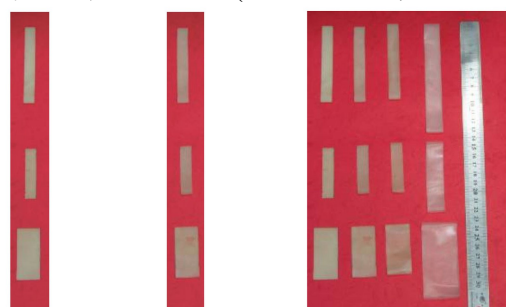


图5 浸泡试验前后橡皮膜对比

表3 浸泡试验前后橡皮膜尺寸与强度测试结果

浸泡液体	试样	长度			宽度			强度/N	强度降低/%
		试验前/mm	试验后/mm	变化率/%	试验前/mm	试验后/mm	变化率/%		
未浸泡	试样1	57.76			15.36			195.4	
	试样2	57.54			15.26			188.1	
溴化钙溶液	试样3	55.56	55.68	0.22	14.76	15.10	2.30	190.5	6.5
	试样4	56.24	56.64	0.71	16.12	15.40	-4.47	150.6	21.5
混合油	试样5	55.5	77.06	38.85	15.68	21.90	39.67	20.6	89.3
	试样6	57.18	78.20	36.76	14.86	21.00	41.32	20.2	89.5

表4 浸泡试验前后固体颗粒质量变化

浸泡液体	无定形二氧化硅			熔融石英砂		
	试验前质量/g	试验后质量/g	变化率/%	试验前质量/g	试验后质量/g	变化率/%
混合油	10.01	12.44	24.40	10.00	9.98	-0.20
溴化钙溶液	10.01	12.15	21.38	10.00	9.85	-1.50

为0.47%和-1.09%),强度降低平均值约为14.0%。这也部分解释了三轴试验过程中发现混合油配制的透明土抗剪强度比其他孔隙液体配制的透明土抗剪强度要低的现象<sup>[20-21]</sup>。

### 2.4 孔隙液体与固体颗粒的反应

将溴化钙溶液和混合油两种典型孔隙液体与无定形二氧化硅和熔融石英砂两种典型固体颗粒交叉混配,静置48 h后,烘干称重,并与浸泡之前的质量进行对比分析,结果见表4。由表4可知,孔隙液体对熔融石英砂的影响较对无定形二氧化硅的影响要小;混合油对固体颗粒的影响与溴化钙溶液基本相当(混合油影响值略高)。浸泡48 h后,熔融石英砂和无定形二氧化硅固体颗粒在溴化钙溶液孔隙液体中浸泡后质量变化率分别为-1.50%和21.38%,在混合油孔隙液体中浸泡后质量变化率分别为-0.20%和24.40%。

## 3 结论

a. 水溶型无机溶液折射率随溶液质量比增大近似呈线性增长,而黏度系数随溶液质量比的增大呈非线性增长,溶液质量比越大,黏度系数增长越快。

b. 水溶型的溴化钙无机溶液对橡皮膜的形状及抗拉强度影响相对较小;油溶型有机溶液对橡皮膜形状及抗拉强度影响相对较大。相同条件下橡皮膜在溴化钙溶液和混合油中浸泡后橡皮膜长度变化率约分别为0.47%和37.81%,宽度变化率约分别为-1.09%和40.50%,抗拉强度约分别降低14.0%和89.4%。因此,在进行相关透明土材料基本特性试验时,应考虑这一因素的影响。

c. 在一种溶质的水溶液达到饱和状态时,溶液中还能溶解其他类型的溶质,从而可以提高整体溶液的折射率。因此,在制配透明土孔隙液体时,水溶型无机溶液也可以选择一种或者多种溶质混合制配,这可以有效拓展水溶型无机溶液的制配范围。

d. 孔隙液体对熔融石英砂的影响较对无定形二氧化硅的影响要小,混合油对固体颗粒的影响与溴化钙溶液基本相当。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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 Zhaohu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, 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))
- [3] 齐昌广, 陈永辉, 王新泉, 等. 细长桩屈曲的透明土物理模型试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 828-838. (QI Changguang, CHEN Yonghui, WANG Xinquan, et al. Physical modeling study on buckling of slender pile using transparent soil [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 828-838. (in Chinese))
- [4] KONG Gangqiang, CAO Zhaohu, ZHOU Hang, et al. Analysis of pile under oblique pullout load using transparent soil models [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, 38(5): 725-738.
- [5] 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.
- [6] DOWNIE H, HOLDEN N, OTTEN W, et al. Transparent soil for imaging the rhizosphere [J]. *Plos One*, 2012, 7(9): 1-6.
- [7] EZZEIN F M, BATHURST R J. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2011, 34(6): 590-601.
- [8] BATHURST R J, EZZEIN F M. Geogrid and soil displacement observations during pullout using a transparent granular soil [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, 38(5): 673-685.
- [9] LO H, TABE K, ISKANDER M, et al. A transparent water-based polymer for simulating multiphase flow [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2010, 33(1): 1-13.
- [10] GAO Y, SUI W H, LIU J Y. Visualization of chemical grout permeation in transparent soil [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, 38(5): 774-786.
- [11] BLACK J A, TATARI A. Transparent soil to model thermal processes: an energy pile example [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, 38(5): 752-764.
- [12] SIEMENS G A, MUMFORD K G, KUCHARCZUK D. Characterization of transparent soil for use in heat transport

experiments [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, 38(5): 620-630.

- [13] 李元海, 林志斌. 透明岩体相似物理模拟试验新方法研究 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(11): 2030-2039. (LI Yuanhai, LIN Zhibin. Innovative experimental method based on development of transparent rock mass materials for physical tests [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(11): 2030-2039. (in Chinese))
- [14] 陈永辉, 齐昌广, 王新泉, 等. 透明土及其在岩土工程模型试验中的应用研究进展 [J]. *水利水电科技进展*, 2011, 31(6): 69-73. (CHEN Yonghui, QI Changguang, WANG Xinquan, et al. Overview on transparent soil and its application in model tests in geotechnical engineering [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2011, 31(6): 69-73. (in Chinese))
- [15] ISKANDER M, BATHURST R J, OMDIVAR M. Past, present, and future of transparent soils [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2015, 38(5): 557-573.
- [16] ZHAO H H, GE L, LUNA R. Low viscosity pore fluid to manufacture transparent soil [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2010, 33(6): 1-6.
- [17] ISKANDER M, LAI J, OSWALD C, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1994, 17(4): 425-433.
- [18] 隋旺华, 高岳, 刘金元. 透明土实验技术现状与展望 [J]. *煤炭学报*, 2011, 36(4): 577-582. (SUI Wanghua, GAO Yue, LIU Jinyuan. Status and prospect of transparent soil experimental technique [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(4): 577-582. (in Chinese))
- [19] 张仪萍, 李亮, 王思照. 透明土中孔隙流体的实验研究 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2014, 48(10): 1828-1834. (ZHANG Yiping, LI Liang, WANG Sizhao. Experimental study on pore fluid for forming transparent soil [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2014, 48(10): 1828-1834. (in Chinese))
- [20] 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.
- [21] 孔纲强, 孙学谨, 李辉, 等. 孔隙液体对玻璃砂透明土力学特性影响研究 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(2): 377-384. (KONG Gangqiang, SUN Xuejin, LI Hui, et al. Effect of pore fluid on strength properties of transparent soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(2): 377-384. (in Chinese))
- [22] 许文宾, 孔纲强, 高乾, 等. 人工合成透明土的孔隙流体折射率试验研究 [J]. *水利学报*, 2015, 46(增刊1): 360-365. (XU Wenbin, KONG Gangqiang, GAO Qian, et al. Experimental study on refractive index of pore fluid in transparent soil manufacture [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(Sup1): 360-365. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-08-08 编辑: 熊水斌)