

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.11.016

利用人工合成透明土的岩土物理模拟试验

齐昌广¹, 范高飞¹, 崔允亮², 张 强²

(1. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江大学城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310053)

摘 要: 结合粒子图像测速 (PIV) 和近景摄影技术, 建立了一种利用人工合成透明土的岩土物理模拟试验方法, 非侵入观测和记录了浅基础沉降 (SFS) 引起的土体变形, 并与利用天然土的传统模型试验进行了对比研究。透明土是由与熔融石英的折射率相匹配的孔隙溶液组成。采用激光面照射透明土模型并拍摄下 SFS 引起变形的数字图像, 利用基于 MATLAB 的 Geo-PIV 软件获得了所产生的位移场。试验结果对比分析显示: 与天然砂土中的相比, 在透明土中 SFS 引起的扰动区域较大, 最大剪应变扩大了约 1.5 倍, 表层隆起范围约增加了 30~50%; 然而透明土中土体单元的运动趋势总体上与天然砂土中的相似, 表明所建立的试验方法在机制研究上具有一定程度的适用性。

关 键 词: 岩土物理模拟; 透明土; 浅基础沉降 (SFS); 非侵入测量; 粒子图像测速 (PIV)

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 11-3157-07

Geotechnical physical model test using artificial synthetic transparent soil

QI Chang-Guang¹, FAN Gao-feng¹, CUI Yun-liang², ZHANG Qiang²

(1. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

2. Department of Civil Engineering, City College, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310053, China)

Abstract: By combining the technologies of particle image velocimetry (PIV) and close-range photogrammetry, a procedure for geotechnical physical modelling using artificial synthetic transparent soil is developed. The soil deformation caused by the shallow foundation settlement (SFS) are measured and recorded non-intrusively. The conventional model test using natural soils is employed for the purpose of comparison. The transparent soil is made of a pore solution, the refractive index of which is matched with the refractive index of fused quartz. Transparent soil model is sliced by using a laser light sheet and digital images of soil deformations caused by SFS are captured. The MATLAB-based software, Geo-PIV, is employed to obtain the generated displacement fields. The results show that the SFS-induced disturbance zone is enlarged in transparent soil, the maximum shear strain expands by about 1.5 times, and the range of surface heaving increases by 30-50% in transparent soil compared with those in natural soil; however, the movement trends of soil elements in transparent soils are generally similar to those in natural soils, indicating that the proposed modelling methodology has applicability to mechanism study to some extent.

Keywords: geotechnical physical simulation; transparent soil; shallow foundation settlement (SFS); non-intrusive measurement; particle image velocimetry (PIV)

1 引 言

随着 20 世纪 90 年透明土的出现及其在岩土工程物理模拟试验中的应用^[1-2], 使得非侵入测量土体内部变形成为可能。透明土是由透明的固体颗粒和折射率相匹配的孔隙溶液组成。Iskander 等^[3]、Liu 等^[4]、Sadek 等^[5]主要研究了无定形二氧化硅粉和无

定形二氧化硅胶的岩土特性, 无定形二氧化硅粉的内摩擦角在 19°~21° 之间, 无定形二氧化硅胶的内摩擦角在 29°~42° 之间。Ezzein 等^[6-7]近年发展了一种新的透明土, 由熔融石英、Krystol40 和 Puretol7 组成, Guzman 等^[8]则利用熔融石英和蔗糖溶液制成了最新一代的透明土。目前, 透明土已被用来研究一些岩土工程中的机制问题, 如渗流^[9-10]、

收稿日期: 2015-05-14

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (No.51508282); 浙江省自然科学基金青年基金项目 (No.LQ15E080002)。

Foundation item: Project supported by the Youth Science Fund Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No.51508282) and the Youth Fund Project supported by Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (Grant No.LQ15E080002).

第一作者简介: 齐昌广, 男, 1986 年生, 博士, 讲师, 主要从事基础工程、地基处理和透明土物理模拟试验等方面的研究。E-mail: qichangguang@163.com

浅基础^[11]和深基础^[12-13]等。为了研究透明土体-结构物间的相互作用, Sadek 等^[14]发展了一个非侵入测量透明土内部变形的系统。在该系统中, 使用激光面照射透明土模型形成散射光斑; 利用数码相机近距离拍摄下透明土-结构物相互作用过程中的散射光斑的变化过程; 采用数字图像相关 (digital image correlation, 简称 DIC) 软件对拍摄的数字图像进行分析可获得透明土-结构物相互作用的位移场和应变场, 而在本文中采用的则是 White 等^[15]发展的粒子图像测速 (particle image velocimetry, 简称 PIV) 软件 “Geo-PIV” 对图像进行分析处理的。DIC 和 PIV 都是通过计算和对比图像灰度的相关度来确定位移的大小和方向。当两个图像发生位移时, 图像灰度的相关函数峰值的位置即为两个图像之间的最佳匹配的位置, 也就是相对应的位移的大小和方向。当图像被分成许多较小的审讯窗口时, 通过计算各审讯窗口相关函数的峰值的位置可获得图像的整体位移场。

在岩土工程中, 浅基础是一种最为常见的基础模式。当前, 浅基础的承载特性、沉降计算方法和与土体的相互作用问题已得到了大量的研究^[16-24], 然而, 由于传统土体的非透明性, 使得无法连续观测和记录到浅基础沉降引起的土体内部中任意点的变形情况。

因此, 本文在 Sadek 等^[14]发展的非侵入测量方法的基础上, 建立了一种利用人工合成透明土的岩土物理模拟试验, 通过浅基础模型试验, 非侵入测量和记录了土体变形规律, 并与天然砂土中的土体变形规律进行了对比研究。

2 透明土的配制

试验中所采用的固体颗粒为熔融石英, 其特性如表 1 所示。Ezzein 等^[7]所报道的折射率为 1.458, 而 Guzman 等^[8]则认为其折射率为 1.457, 且不受温度的影响。

表 1 熔融石英、Krystol40 和 Puretol7 的特性

Table 1 Properties of fused quartz, Krystol40, and Puretol7

特性	熔融石英	特性	Krystol40	Puretol7
折射率	1.459	折射率/(21℃)	1.444	1.463
相对密度	2.2	密度/(g/cm ³)	0.798	0.836
泊松比	0.16	黏性(cSt)/(40℃)	3.4	12.2

为了检测本试验中所用熔融石英的折射率大小, 在 21℃ 恒温条件下进行了如图 1 所示的对比试验: 将打印好的数字表贴在约 102 mm 厚的装有透明土的模型槽后侧, 数字的大小代表着其字体的大

小, 为了对比槽后数字的清晰度, 设置了图 1(d)所示的空模型槽, 另外, 孔隙溶液的折射率也已标示在各图上方。可以看出, 折射率为 1.459 的孔隙溶液所得的透明土的透明性最好。试验所用的孔隙液体为 Kystol40 和 Puretol7 按照质量比 1:2.9 进行混合后的溶液, 其详细特性如表 1 所示。另外, 由于 Kystol40 和 Puretol7 的折射率对温度变化十分敏感, 因此, 透明土的配制及相关试验应在恒温室中进行。

试验中透明土的配置步骤如下: ① 将孔隙溶液倒入模型槽中, 溶液的高度应达到预想配制的透明土的高度; ② 为增加散射光斑, 将粒径为 0.2~0.3 mm 的反光颗粒“玻璃珠”掺入到熔融石英中并混合均匀, 反光颗粒所占体积不宜超过 3%; ③ 采用 2~4 mm 内径的漏斗引导熔融石英均匀倒入孔隙溶液中至颗粒达到预设的高度, 漏斗口宜紧靠孔隙溶液表面。按照上述方法配制的透明土饱和度可认为接近 100%, 且其最小和最大干密度分别为 0.963 g/cm³ 和 11 222 g/cm³。



图 1 在 21℃ 下孔隙溶液折射率对透明土透明性的影响
Fig.1 Effect of refractive ratios of pore fluid on transparency of transparent soil at 21℃

3 透明土物理模拟试验

3.1 试验装置

如图 2 所示, 透明土物理模拟试验装置包括:

透明土模型、光学试验平台、传动器、激光器、线发生器和数码相机。试验所用的模型槽的尺寸为：长×厚×高=203.2 mm×50.5 mm×114.3 mm，由有机玻璃制成，其折射率为 1.488，在模型中配制透明土，同时掺入体积比不超过 3% 的玻璃球以加强散斑效果。

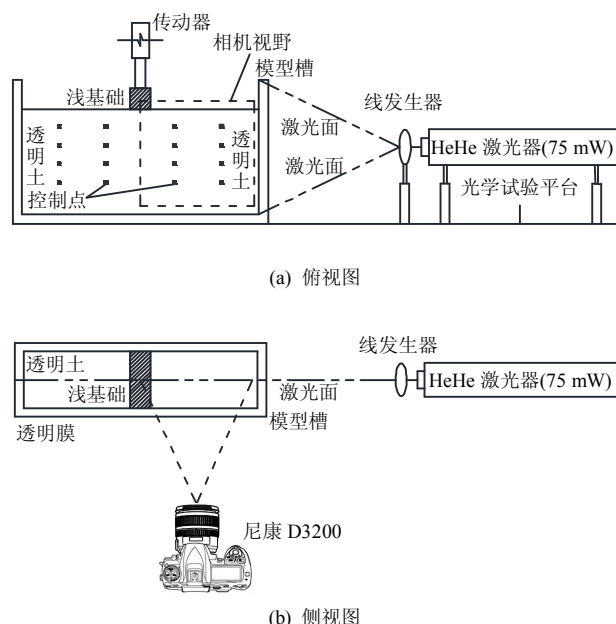


图 2 透明土模型试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental setup for model test using transparent soil

为检测透明土的透明性，在模型槽的后部放置一张透明性检测图画，从图 3 可以看出，即便在掺入玻璃球的情况下，透明土的透明性依然较好。另外，为便于图像的后处理，需要设置控制点，其设置方式是将设计好的控制点采用激光打印机打印在透明膜上，然后将带有控制点的透明膜贴在模型槽的外表面，如图 3 所示。

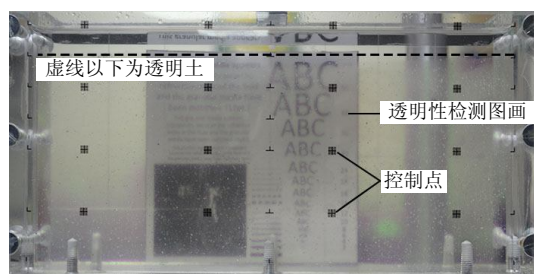


图 3 在 21 °C 下透过 51 mm 后的透明土模型看到的透明性检测图画(注：为加强散斑场在模型中掺入了玻璃球)

Fig.3 Transparency detection chart seen through 51 mm thick transparent soil model at 21 °C (Note: presence of glass beads in model to enhance speckles)

激光器采用的是功率为 75 mW 的氦氖 (HeNe)

激光器，通过线发生器可生成均匀分布的激光面，照射在透明土中便可形成散射光斑场，如图 4 所示，由于透明土并未完全理想的透明，故散射光斑的强度和密度均沿着激光投射方向递减。

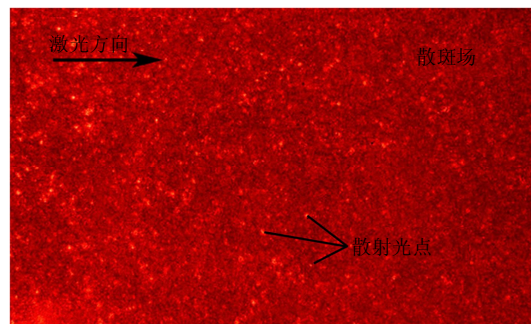


图 4 散射光斑示意图

Fig.4 Schematic diagram of scattering speckles

桩体打设和加载所采用的传动器的型号为 LACT10P-12V-20，其动力来源于 12 V 的铅酸蓄电池，通过反馈电路连接到电脑，并由界面控制软件来设置传动器的运动。

土体的变形过程采用尼康 D3200 相机进行拍摄，所得图像的大小约为 2 400 万像素，相机镜头面与土体变形面的距离为 275 mm，相机的拍摄采用远程红外控制。另外，按照 Ni 等^[12]提出的方法，调整相机镜头轴线，使其垂直于土体变形面。

3.2 试验内容和步骤

为了对比研究透明土体的岩土模拟特性，本文也进行了天然砂土的模型试验，所采用的透明土和天然砂土的粒径分布相近，如图 5 所示。试验中的浅基础模型的尺寸为：长×宽×高=50.8 mm×12.7 mm×25.4 mm，设模型的宽度为 2L。试验中透明土和天然砂土的设置高度均在 89~90 mm 之间，密度在

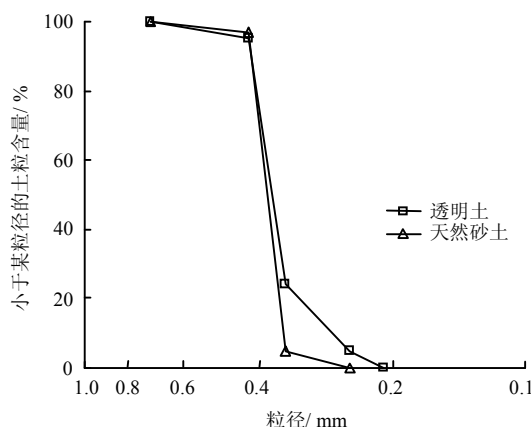


图 5 透明土和天然砂土的颗粒分布曲线

Fig.5 Particle size distributions of transparent soil and natural sand

70~80%之间。由于所采用的制作浅基础模型的材料为高强不透明的塑材,因此,本试验中只观测了如图2所示的浅基础模型一侧的土体变形。

另外,对于透明土模型试验,观测的是土体内部的变形,如图2所示;对于天然砂土的试验,观测到的是与模型槽内壁接触的外侧土体变形。

在设备布置好后,将浅基础模型与传力器连接好,并放置在配置好的透明土或天然砂土的表面上。试验中浅基础累积静压 12.7 mm,每次静压的增量为 0.635 mm。因此,每次试验中拍摄了 21 个图像。值得注意的是,透明土模型试验需在黑暗的环境中进行,以便产生更清晰的散斑场进行;而天然砂土模型试验需在光线较好的环境中进行。

3.3 图像处理和粒子图像测速 (PIV)

本文结合粒子图像测速 (PIV) 和近景摄影来记录浅基础沉降引起的土体变形。Geo-PIV 是由 White 等^[15]发展而来的,其操作步骤可简化为以下 4 步:(1) 关心的区域进行网格划分,如图 6 所示;(2) 划分的各网格进行 PIV 计算获取各网格的位移;(3) 像素坐标系转换为实物坐标系;(4) 取实物坐标系下的位移场和应变场。

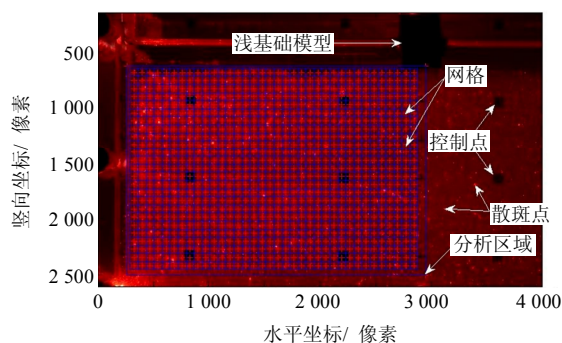


图6 Geo-PIV 中的典型网格划分

Fig.6 Typical meshes of Geo-PIV patches

在坐标转换过程中,透明土和模型槽折射率对坐标转换有一定的影响,如图7所示,在右边的空气中 $CD = C_2D_2$,而在左边的透明土介质中, $AB < A_2B_2$,因此,在坐标转换时需引入折射率修正系数 k 。

在右边的空气中,坐标转换系数 η 可表示为

$$\eta = \frac{C_1D_1}{CD} = \frac{C_1D_1}{C_2D_2} = \frac{A_1B_1}{A_2B_2} \quad (1)$$

在左边的透明土中,坐标转换系数 η' 则变为

$$\eta' = \frac{A_1B_1}{AB} = \eta \frac{A_2B_2}{AB} = \eta k \quad (2)$$

其中,折射率修正系数 k 可近似简化为

$$k = \frac{A_2B_2}{AB} = \frac{1}{\frac{l - (h + h')}{l} + \frac{h + h'}{(n^2/n')l} \frac{\cos^3 \alpha}{\left[1 - \frac{n'^2 \sin^2 \alpha}{n^4}\right]^{3/2}}} \quad (3)$$

式中: l 为镜头到实物面的垂直距离, $l = 275$ mm; h 为透明土的厚度, $h = 25.4$ mm; h' 为模型槽壁的壁厚, $h' = 12.7$ mm; n 为透明土的折射率, $n = 1.458$; n' 为模型槽的折射率, $n' = 1.488$; α 为观测点与镜头之间夹角, $\alpha = -15^\circ \sim 15^\circ$ 。按照公式 (3) 的计算结果,当 α 从 -15° 变化到 15° 时, k 值从 1.043 变化到 1.049,故本文中采用了平均值 1.046 作为折射率修正系数,修正后的 η' 值为 0.039 82。

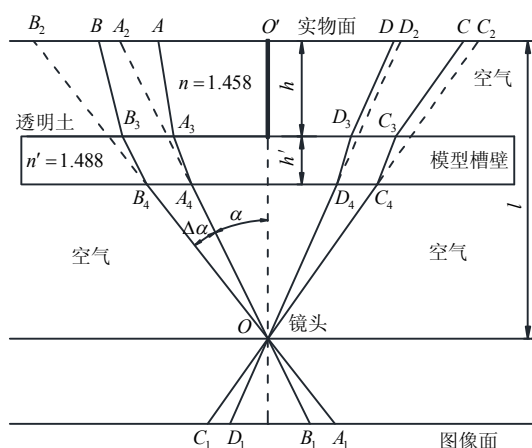


图7 折射率对坐标转换的影响

Fig.7 Effect of refractive indices on coordinate transformation

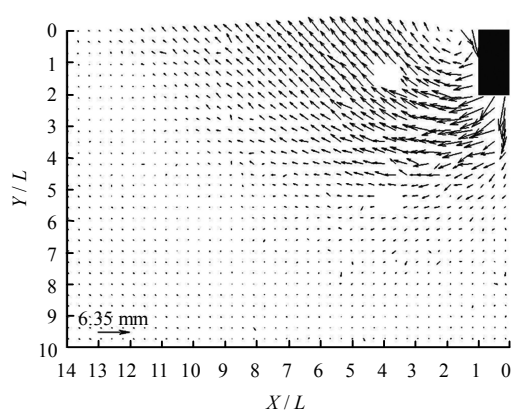
4 试验结果分析

4.1 位移向量场对比分析

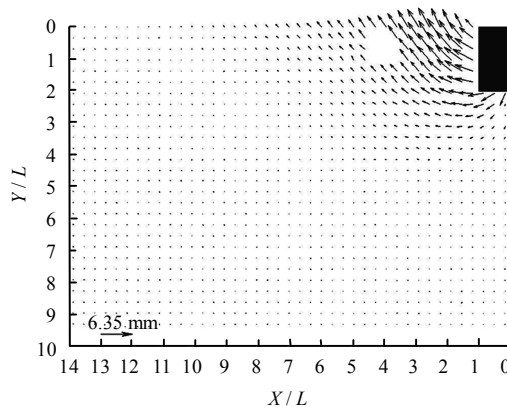
图8(a)和(b)分别为浅基础模型打设至 $2L$ 时在透明土和天然砂土中引起的累积位移向量,图9(a)和(b)则分别为对应的位移等值线图。整体来看,透明土和天然砂土中的土体单元的运动趋势相近。然而,在透明土中的浅基础沉降引起的扰动区域是比在天然土中的大得多,如图9所示,特别是在竖向,透明土中的影响区域是天然砂土中的 1.8 倍左右,而对于水平向则在 1.3 倍左右。从局部来看,在透明土中,靠近浅基础模型底部的土体单元呈向下和远离基础中心线的运动趋势;而在天然砂土中,相

对应位置处的土体单元则呈水平略向上的运动趋势。在远离模型中心 $2L$ 以外的区域内, 透明土和

天然砂土的土体单元均呈现向上且远离浅基础模型的运动趋势, 且在表层均表现出明显的隆起现象。



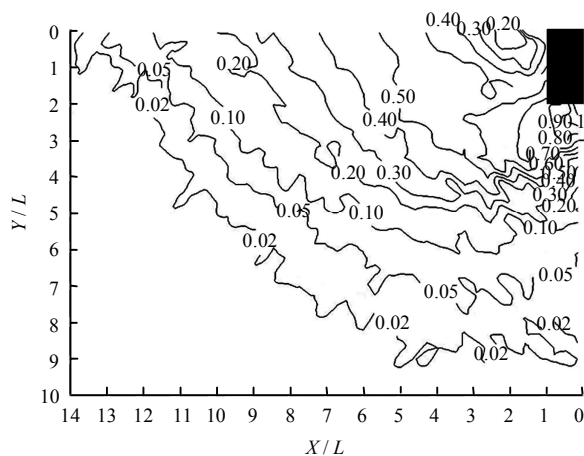
(a) 透明土



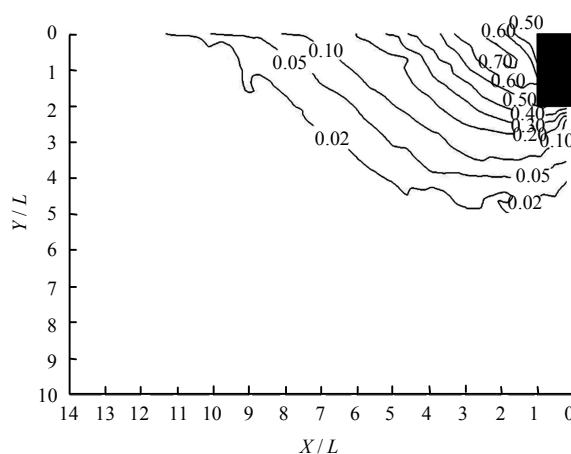
(b) 天然砂土

图 8 $S=2L$ 时在透明土和天然砂土中引起的累积位移向量图

Fig.8 Accumulative displacement vectographs in transparent soil and natural sand as $S=2L$



(a) 透明土



(b) 天然砂土

图 9 $S=2L$ 时在透明土及天然砂土中引起的归一化后的累积位移等值线

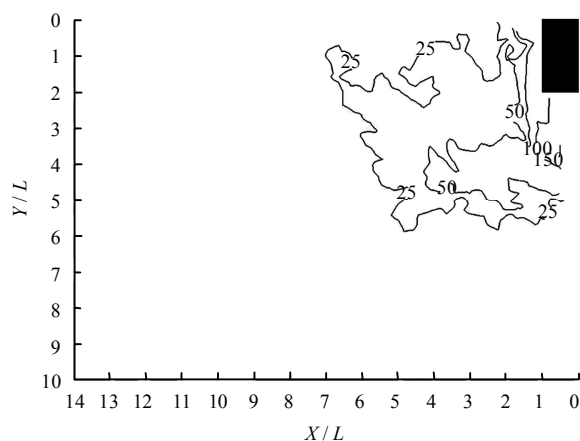
Fig.9 Normalized accumulative contours of displacement field in transparent soil and natural sand as $S=2L$

另外, 从图 9 还可以看出, 透明土中浅基础模型一侧的土体变形量小于天然砂土中的, 而浅基础模型底部的土体变形量则是透明土中的大于天然砂土中的。浅基础一侧的土体单元在透明土中的最大移动量约是天然砂土中的 0.7 倍, 而浅基础模型正下方的土体单元在透明土中的最大移动量是天然砂土的 2.5 倍左右。与透明土中的位移等值线的分布相比天然砂土中更加错综复杂, 但总体分布趋势相近。

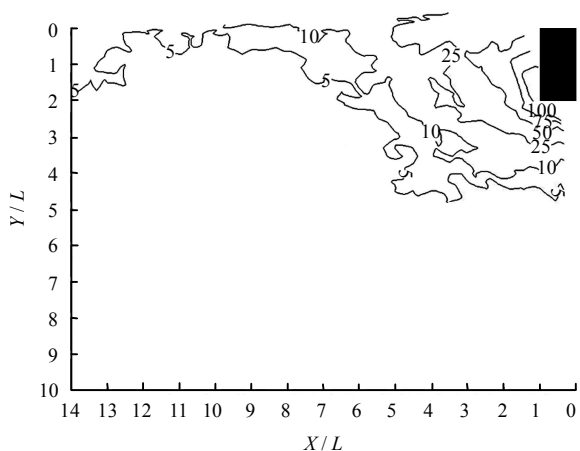
4.2 剪应变分布对比分析

图 10(a)和(b)分别为浅基础模型打设至 $2L$ 时在

透明土和天然砂土中引起的剪应变分布情况。可以看出, 透明土中, 剪应变大于 25% 的区域距离浅基础模型中心线约 $7L$, 而在天然砂土中, 则降为 $5L$, 前者为后者的 1.4 倍, 且剪应变随着离浅基础模型中心线距离的增加而减小。在透明土中观测到的最大剪应变为在天然砂土中的 1.5 倍, 且主要分布在浅基础模型的底部。另外, 需注意的是: 由于透明土模型中土体单元的运动相比天然砂土中的更为复杂 (如图 9 的位移等值线图所示), 较小的剪应变等值线, 如 5% 和 10%, 分布散乱, 较难在图中显示。



(a) 透明土



(b) 天然砂土

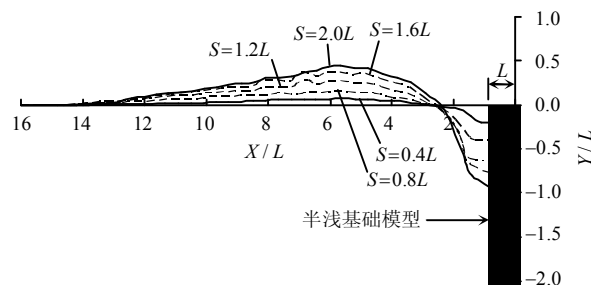
图 10 $S=2L$ 时在透明土及天然砂土中引起的剪应变(%)分布

Fig.10 Distributions of shear strain (%) in transparent soil and natural sand as $S=2L$

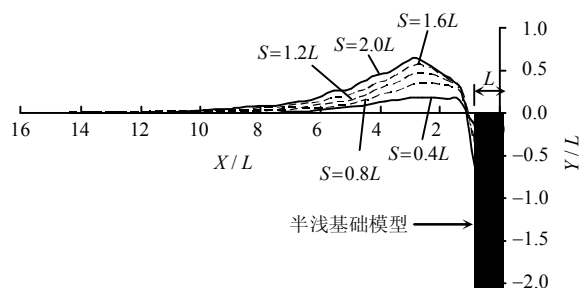
4.3 表面隆起对比分析

浅基础模型沉降过程在透明土和天然砂土中引起的表面隆起的变化如图 11 所示。从整体上看,透明土和天然砂土中的表面隆起轮廓线比较相近。当浅基础模型从 $0.4L$ 打设至 $2.0L$ 时,透明土模型中的地表隆起范围从 $12L$ 增加至 $14L$,而天然砂土模型中的则从 $7L$ 变化至 $12L$ 。透明土和天然砂土中的零隆起点和最大隆起点对应的位置不随浅基础模型的沉降增加而变化。在透明土中,零隆起点距离浅基础模型外边缘的距离约为 $1.63L$,而在天然砂土中,则约为 $0.13L$;透明土中最大隆起点距浅基础模型外边缘的距离约为 $6L$,约是天然砂土中的 2 倍。浅基础模型沉降 s 在透明土中为 $0.4L$ 、 $0.8L$ 、 $1.2L$ 、 $1.6L$ 和 $2.0L$ 时对应的最大隆起量相比天然砂土中的下降了 $28.7\% \sim 53.8\%$ 。另外,在靠近浅基础模型的外边缘处,浅基础沉降引起的在透明土中向

下拖动的幅度明显大于在天然砂土中的,这可能与在透明土中使用高黏度的孔隙流体有关。综上可知,在透明土模型中的表层隆起趋势与天然砂土的相近,但隆起半径约扩大了约 $1.3 \sim 1.5$ 倍。



(a) 透明土模型



(b) 天然砂土模型

图 11 透明土模型与天然砂土模型表面隆起的对比
Fig.11 Comparisons of surface heaving between transparent soil model and natural sand model

5 结 论

(1) 透明土和天然砂土的中土体单元的运动趋势总体上相近,然而,浅基础模型沉降在透明土中引起影响区域大于在天然砂土中的,特别是在竖向,前者是后者的约 1.8 倍;

(2) 透明土中剪应变大于 25% 的区域约为天然砂土中的 1.4 倍,同时,在透明土中观测到的最大剪应变为在天然砂土中的 1.5 倍;

(3) 透明土中的表层隆起趋势与天然砂土的相近,但前者的隆起范围约扩大了 $1.3 \sim 1.5$ 倍。

另外,尽管透明土模型试验所得结果与天然砂土中的存在一些差异,但是总体变形趋势相近,因此,本文所建立的利用人工合成透明土的岩土物理模拟试验方法在研究和解决某些岩土工程机制问题上仍具有一定程度的适用性。

参 考 文 献

- [1] ISKANDER M, LAI J, OSWALD C, et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*,

- ASTM, 1994, 17(4): 425—433.
- [2] ISKANDER M. Modeling with transparent soils, visualizing soil structure interaction and multiphase flow, non-intrusively[M]. New York: Springer, 2010.
- [3] ISKANDER M, LIU J, SADEK S. Transparent amorphous silica to model clay[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2002, 128(3): 262—273.
- [4] LIU J, ISKANDER M, SADEK S. Consolidation and permeability of transparent amorphous silica[J]. **Geotechnical Testing Journal, ASTM**, 2003, 26(4): 390—401.
- [5] SADEK S, ISKANDER M, LIU J. Geotechnical properties of transparent silica[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2002, 39(1): 111—124.
- [6] EZZEIN F M, BATHURST R J. Development of a geosynthetic pullout test apparatus with transparent granular soil[C]//2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference. [S. l.]: [s. n.], 2011.
- [7] EZZEIN F M, BATHURST R J. A transparent sand for geotechnical laboratory modeling[J]. **Geotechnical Testing Journal, ASTM**, 2011, 34(6): 590—601.
- [8] GUZMAN I L, ISKANDER M, SUESCUN E, et al. A transparent aqueous-saturated sand surrogate for use in physical modeling[J]. **Acta Geotechnica**, 2014, 9(2): 187—206.
- [9] MANNHEIMER R J, OSWALD C J. Development of transparent porous media with permeabilities and porosities comparable to soils, aquifers, and petroleum reservoirs[J]. **Ground Water**, 1993, 31(5): 781—788.
- [10] WELKER A L, BOWDERS J J, GILBERT R B. Applied research using transparent material with hydraulic properties similar to soil[J]. **Geotechnical Testing Journal, ASTM**, 1999, 22(2): 266—270.
- [11] ISKANDER M, LIU J. Spatial deformation measurement using transparent soil[J]. **Geotechnical Testing Journal, ASTM**, 2010, 33(4): 314—321.
- [12] NI Q, HIRD C C, GUYMER I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry[J]. **Géotechnique**, 2010, 60(2): 121—132.
- [13] STANIER S A, BLACK J A, HIRD C C. Enhancing accuracy and precision of transparent synthetic soil modelling[J]. **International Journal of Physical Modelling in Geotechnics**, 2012, 12(4): 162—175.
- [14] SADEK S, ISKANDER M, LIU J. Accuracy of digital image correlation for measuring deformations in transparent media[J]. **Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE**, 2003, 17(2): 88—96.
- [15] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry(PIV) and photogrammetry[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(7): 619—631.
- [16] WHITE D J. Contributions to Géotechnique 1948–2008: Physical modelling[J]. **Geotechnique**, 2008, 58(5): 413—421.
- [17] BYRNE B W, HOULSBY G T, MARTIN C M. Cyclic loading of shallow offshore foundations on sand[C]//Proceedings of International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. [S. l.]: [s. n.], 2002: 10—12.
- [18] HOULSBY G T. Modelling of shallow foundations for offshore structures[C]//International Conference on Foundations(ICOF). Dundee, Scotland:[s. n.], 2003: 11—26.
- [19] GAJAN S, KUTTER B L, PHALEN J D, et al. Centrifuge modeling of load-deformation behavior of rocking shallow foundations[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2005, 25(7): 773—783.
- [20] GAJAN S, KUTTER B L. Capacity, settlement, and energy dissipation of shallow footings subjected to rocking[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2008, 134(8): 1129—1141.
- [21] DASHTI S, BRAY J D, PESTANA J M, et al. Mechanisms of seismically induced settlement of buildings with shallow foundations on liquefiable soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE**, 2009, 136(1): 151—164.
- [22] RAYCHOWDHURY P, HUTCHINSON T C. Performance evaluation of a nonlinear Winkler-based shallow foundation model using centrifuge test results[J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 2009, 38(5): 679—698.
- [23] 曹兆虎, 孔纲强, 周航, 等. 基于透明土的静压楔形桩沉桩效应模型试验研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(5): 1363—1367+1374.
- CAO Zhao-hu, KONG Gang-qiang, ZHOU Hang, et al. Model test on installation effect of tapered piles in transparent soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(5): 1363—1367+1374.
- [24] 朱良峰, 李自成, 朱仝, 等. 基于数字地球平台的地质钻孔三维模拟与可视化[J]. **岩土力学**, 2014, 35(11): 3310—3316.
- ZHU Liang-feng, LI Zi-cheng, ZHU Tong, et al. 3D modeling and visualization of geological boreholes on digital earth platforms[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(11): 3310—3316.