

DOI: 10.11779/CJGE201408025

# 基于透明土的管桩贯入特性模型试验研究

曹兆虎<sup>1, 2</sup>, 孔纲强<sup>1, 2</sup>, 刘汉龙<sup>1, 2</sup>, 周航<sup>1, 2</sup>

(1. 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:** 由于受土塞效应等因素影响, 开口管桩和闭口管桩在贯入过程中的挤土效应存在明显的差异; 然而针对该两者贯入特性的研究相对较少。基于透明土和 PIV (Particle Image Velocimetry) 技术, 开发了相应的桩基贯入模型试验系统, 用于桩基贯入过程中桩周土体变形的非插入式测量。试验选用的透明土由玻璃砂和具有相同折射率的孔隙液体制成。该试验系统主要包括: 线性激光光源、CCD (Charge-Coupled Device) 相机、自动沉桩加载仪和计算机控制系统等。激光射入透明土, 和透明土之间的相互作用产生了独特的散斑场, 通过 CCD 相机摄取贯入过程中各个时刻散斑场变形的图片, 然后通过 PIV 技术对这些变形前后的图片进行处理, 即可得到整个土体位移场。分别进行了开口管桩和闭口管桩的桩基贯入试验, 得到了对应的土体位移场, 并对桩基贯入引起的桩周土体径向位移试验结果与圆孔扩张法、应变路径法等理论计算结果进行对比分析; 研究结果表明, 对于闭口管桩, 由于竖向位移的影响, 试验值比圆孔扩张法结果小, 其与应变路径法更为接近; 对于开口管桩, 由于沉桩过程中土塞作用, 试验值比圆孔扩张法大, 其影响不可忽略。

**关键词:** 开口管桩; 闭口管桩; 模型试验; 位移场; 透明土; PIV 技术

**中图分类号:** TU470      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2014)08-1564-05

**作者简介:** 曹兆虎(1986-), 男, 江苏盐城人, 博士研究生, 主要从事岩土工程可视化及桩基础方面的研究工作。E-mail: caozhaohuzj@sina.com。

## Model tests on pipe pile penetration by using transparent soils

CAO Zhao-hu<sup>1,2</sup>, KONG Gang-qiang<sup>1,2</sup>, LIU Han-long<sup>1,2</sup>, ZHOU Hang<sup>1,2</sup>

(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:** The squeezing effects of open-ended and closed-ended pipe piles are obviously different because of “soil plug”. However, the researches focused on this problem are relatively little. One small-scale model test system is developed to study the non-intrusive measurement of the soil deformation during pile penetration using the transparent soils and PIV (particle image velocimetry) technique. The transparent soils are manufactured by baked quartz with a pore fluid which has the same refraction index. The test system contains a line laser light, a CCD (charge-coupled device) camera, a loading machine and a computer. The whole displacement field during the pile penetration can be obtained as follows: a distinctive laser speckle pattern can be generated by the interaction between the laser and the transparent soils when the light goes through the transparent soils. Then a sequence of speckle pattern images are captured consecutively during the pile penetration by the CCD camera. Finally these images are analyzed by using PIV. The model tests on the penetration of an open-ended pipe pile and a closed-ended pipe pile are both carried out, and the data are compared with the results obtained by the cavity expansion method and strain path method. The results show that, for the closed-ended pipe pile, the radical displacements obtained by the model tests are smaller than those by the cavity expansion method, and are close to those obtained by the strain path method; for the open-ended pipe pile, the “soil plug” obtained by the model tests is larger than that obtained by the cavity expansion method.

**Key words:** open-ended pipe pile; closed-ended pipe pile; model test; displacement field; transparent soil; PIV technique

## 0 引言

预应力管桩广泛应用于建筑物的桩基础或软弱地基的复合地基加固, 在交通道路、海洋、堤坝和建筑工程中应用广泛; 与传统实心灌注桩相比, 预应力管桩在承载力和节约用料上具有一定的优越性。然而静

压管桩在贯入过程中的挤土效应对周围既有的建筑物

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51278170); 国家自然科学基金高铁联合基金项目(U1134207); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1125)

**收稿日期:** 2013-11-03

和地下管线等环境有重要影响, 且其工作原理相对更复杂: 在沉桩贯入的初始阶段, 土体进入桩管内的速率等于管桩贯入的速率; 随着贯入的进行, 桩管内土体与桩管内壁之间发展了足够大的摩擦力, 阻止了土体进一步进入管内, 此时桩产生了“闭塞效应”, 直至“完全闭塞”, 呈现闭口桩的特性<sup>[1]</sup>。为此国内外许多学者通过各种方法研究并探讨了管桩贯入过程中挤土效应的影响。这些方法主要有圆孔扩张理论、应变路径法、有限元法和模型试验等, 如郑俊杰等<sup>[2]</sup>在考虑闭塞效应的前提下, 利用圆孔扩张理论对管桩的挤土效应进行了分析研究; Azzouz 等<sup>[3]</sup>应用应变路径法对桩周土的扰动情况进行了研究, 并得到了桩端土体在贯入过程中的变形方式; 雷华阳等<sup>[4]</sup>利用有限元方法对管桩现场挤土效应进行了模拟并与测试结果进行了比较; Randolph<sup>[5]</sup>对打入黏土中的开口管桩和闭口管桩引起的水平位移进行了室内试验研究。

但是, 传统的室内试验和现场试验往往很难准确获得土体内部的变形, 因为预埋在土体中传感器容易受到外界环境的影响, 测试结果可靠度不高, 同时测点相对较少, 离散性较大。为了可视化土体内部的变形, Iskander 等<sup>[6]</sup>提出在室内试验中使用透明土来代替自然土, 从而实现了土体内部变形的可视化。Lehane 等<sup>[7]</sup>利用在透明土中预埋一系列小黑珠, 进行沉桩贯入试验, 通过相机追踪小黑珠的运动轨迹来反映土体位移。为了进一步反映整个位移场, 而不是某些固定点的位移, White 等<sup>[8-9]</sup>开发了 PIV 及图像测试技术并研究了桩在砂土中的贯入特性。

基于以上各种室内测试技术的优缺点, 本文联合使用透明土、PIV 及图像测试技术, 开发了相应的试验系统, 通过 CCD 相机对桩基贯入全过程进行连续拍摄, 然后通过 PIV 处理拍摄的图像, 得到开口管桩和闭口管桩贯入过程中土体内部变形的整个位移场。

## 1 室内试验系统介绍

### 1.1 主要装置

室内试验主要装置如图 1 所示, 包括光学平台、大功率激光、CCD 相机、自动沉桩加载仪、模型槽及模型桩。其中光学平台主要用于安放其他设备, 保持整个试验过程中各设备之间相对位置的固定; 同时可减少沉桩加载仪和外界环境所产生的振动, 提高试验可靠度, 减小误差。大功率激光为半导体片光源激光器, 最大功率为 2 W, 功率可调, 与透明土样干涉可产生比较清晰的散斑场, 原则上功率越大, 形成的散斑场越清晰。CCD 相机分辨率为 1280×960, 采用帧曝光, 曝光时间 100 us-30 s, 可通过自带软件调整为自动连续拍摄模式, 得到整个沉桩贯入过程的一系列图像。模型槽采用有机玻璃, 立方体, 上部开口, 尺

寸大小为 180 mm×180 mm, 壁厚 5 mm, 其中一侧面上标有一系列参考点, 用于像素坐标和物理坐标之间的转化, 高度为 265 mm, 其中底部厚 5 mm。模型桩也采用有机玻璃, 管桩内外壁均为光滑, 其工况见表 1。试验中, 每种工况均进行 2 次试验, 选取其中较清晰的图片进行分析。试验所采用的开口管桩和闭口管桩示意图如图 2 所示。

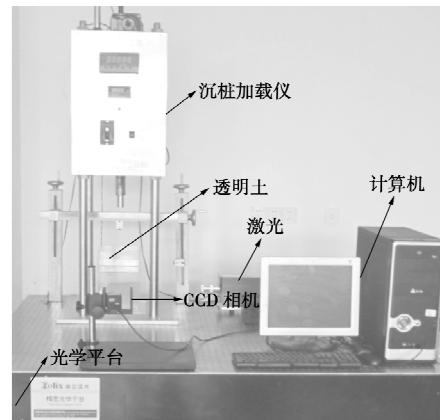


图 1 模型试验装置实物图  
Fig. 1 Picture of model test devices

表 1 模型试验工况

Table 1 Conditions of model tests

编号	桩型	外径/mm	壁厚/mm	接触
1	开口管桩	15	3	光滑
2	闭口管桩	15	15	光滑

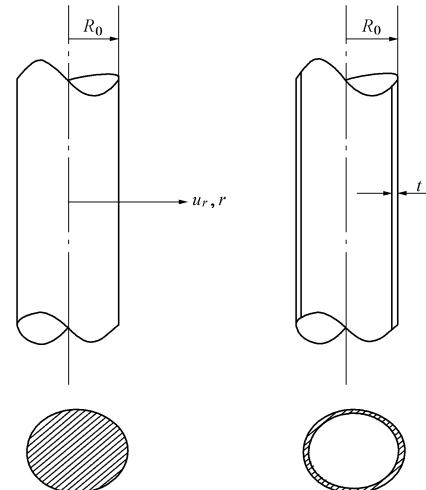


图 2 闭口管桩与开口管桩示意图  
Fig. 2 Sketches of closed- and open-ended pipe piles

### 1.2 透明土性质和模型桩

透明土主要是利用一定级配的颗粒材料和具有相同折射率的孔隙液体混合, 抽真空饱和而成。目前用来模拟天然砂土的颗粒材料包括无定型硅石凝胶和熔融石英砂; 孔隙液体主要包括烷烃类溶剂和矿物油按一定质量比的混合液体及溴化钙液体。Iskander 等<sup>[10]</sup>、笔者等<sup>[11]</sup>对相应配制的透明土进行了大量试验研究, 结果表明其能在一定程度上很好的模拟天然砂土, 并

应用在岩土模型试验中。本文在前面的基础上，选用玻璃砂作为颗粒材料，相比硅石凝胶和熔融石英砂，具有一定的优越性（硅石凝胶内部具有大量微细孔道，压缩性较大；熔融石英砂自身杂质多，影响配制效果）；孔隙液体采用正十二烷和十五号白油按质量比 1:4 的混合液体，其化学性质稳定。孔纲强等<sup>[12-13]</sup>针对玻璃砂配制的透明土与相应级配的天然砂土进行了基本性质的对比试验，结果表明两者基本性质相近，可广泛应用于岩土模型试验中。考虑到片光源的厚度及散斑场的清晰程度，本文采用的透明土粒径为 0.5~1 mm，最小干密度为 0.970 g/cm<sup>3</sup>，最大干密度为 1.274 g/cm<sup>3</sup>，比重为 2.186，相对密实度为 50%，内摩擦角（干样） $\varphi=37.3^\circ$ ，内摩擦角（油样） $\varphi=38.3^\circ$ 。透明土移至模型槽内后，在其上部放置与模型槽开口尺寸大小相等的有机玻璃板，板面钻有若干小孔，施加压力使试样达到相应的密实度，小孔用于排出多余液体，并用吸管吸出。由于孔隙液体的黏性较大，本文中对应透明土的渗透系数约为  $0.79 \times 10^{-4}$  m/s，而对应水饱和土体渗透系数约为  $4.5 \times 10^{-4}$  m/s。对于液体流动问题影响较大，但对于桩土接触问题，尤其是低速的沉桩过程，其影响则有限。寻找黏性较小，纯度较高，价格低廉同时能满足折射率要求的一种液体也是目前透明土研究中一个急需解决的技术难题。

### 1.3 PIV 技术简介

PIV 技术主要应用于流体速度的测量，对于土体的变形场，可以将其看成是速度很低的流场，因而可以通过 PIV 技术来测定土体的位移场。在 PIV 中，将土体变形前后摄取的灰度图像分割成许多网格，每一网格称之为 Interrogation 块。将变形前任一 Interrogation 块与变形后灰度图像进行全场匹配或相关计算，根据峰值相关系数确定该 Interrogation 块在变形前后的位移，由此可以得到该块的平均位移。对变形前所有 Interrogation 块进行类似运算，就可以得到整个位移场<sup>[14]</sup>。图像匹配的标准关联函数为

$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n)g(m + \Delta x, n + \Delta y) \quad (1)$$

式中  $M, N$  为图像块的长、宽； $f$  为  $t_1$  时刻图像中，某图像块中心点坐标  $(m, n)$  处的灰度值分布函数； $g$  为  $t_2$  时刻图像中，该图像块中心点坐标  $(m + \Delta x, n + \Delta y)$  处的灰度值分布函数； $\Delta x, \Delta y$  分别为  $x, y$  方向的位移增量。Sadek 等<sup>[15]</sup>对 PIV 在透明土变形测量中的精度进行了研究并进行了影响因素分析，结果表明 PIV 对于透明土变形的测量精度可靠。

### 1.4 试验其他事项

在桩基贯入试验的过程中还应该注意以下 5 点：

(1) 将 CCD 相机固定在相机支架上，支架固定在光学平台上，整个过程保持相机位置的静止。相机的镜

头轴线垂直于观察面，轴线的位置在玻璃面的垂直中心线上，调节相机的光圈和焦距，使视场宽度合适。

(2) 桩基贯入速率为 1 mm/s，桩基贯入过程中保持桩始终垂直，斜率不大于 0.5%。

(3) 桩基贯入前，摄取初始模型灰度图像作为参考图像，CCD 相机通过电脑控制，拍摄间隔为 1 s。

(4) 试验过程中，保证所在空间光线的稳定性和均匀性，避免光线差异带来的误差，且不受外界振源的干扰。

(5) 桩基贯入完成后，将 CCD 相机摄取的照片通过 PIV 分析软件进行后处理。

## 2 试验结果与分析

为了简化管桩贯入过程土塞效应的影响，本文只针对完全不闭塞情况和完全闭塞（闭口管桩）情况进行考虑，为了尽量忽略土塞对开口管桩的影响，管桩内壁保持光滑，同时由于孔隙液体为油体，因此可以近似认为管桩内壁与土体颗粒无摩擦力作用，但实际情况土塞依然产生。

### 2.1 桩周土体位移场

沉桩深度  $L$  从  $0 \sim 10R$  时，开口管桩和闭口管桩桩周土体的位移矢量图分别如图 3 (a)、(b) 所示。对于图 3 (b) 闭口管桩桩底沿径向处，由于散斑场较弱，结果得到的位移偏小。从图 3 可以看出，开口管桩桩侧的挤土位移以径向为主，而闭口管桩桩侧土体部分则产生斜向上运动，造成表面土体的隆起，由于测试技术所限，隆起量并未获得。

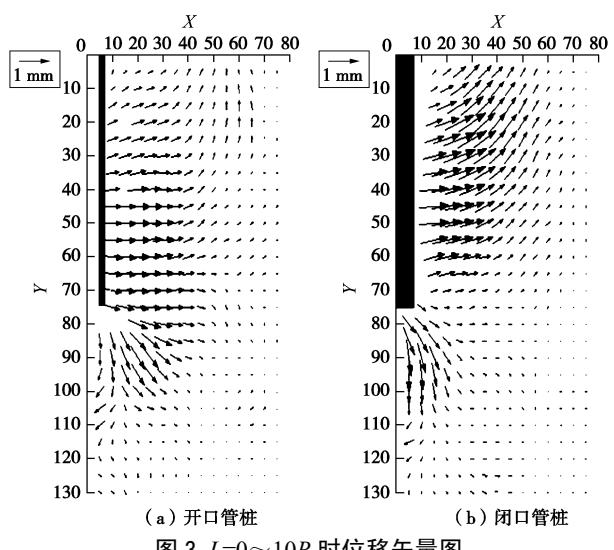


图 3  $L=0 \sim 10R$  时位移矢量图

Fig. 3 Displacement vectors from  $L=0$  to  $10R$

为了更直观地表示桩周土体位移场的大小，将试验结果描绘成位移轮廓图，并将相应坐标和位移大小通过桩半径  $R_0$  进行标准化。图 4 (a)、(b) 分别为开口管桩和闭口管桩所产生的水平位移轮廓图。由图 4 可以发现开口管桩产生的径向水平位移略小于闭口管

桩, 可能原因是开口管桩沉桩过程中产生部分土塞, 使得径向挤土位移增大。图 5(a)、(b) 分别为开口管桩和闭口管桩所产生的竖向位移轮廓图, 由图 5 可以发现开口管桩侧竖向位移比闭口管桩小, 同时开口管桩桩底土体的竖向位移也小于闭口管桩。

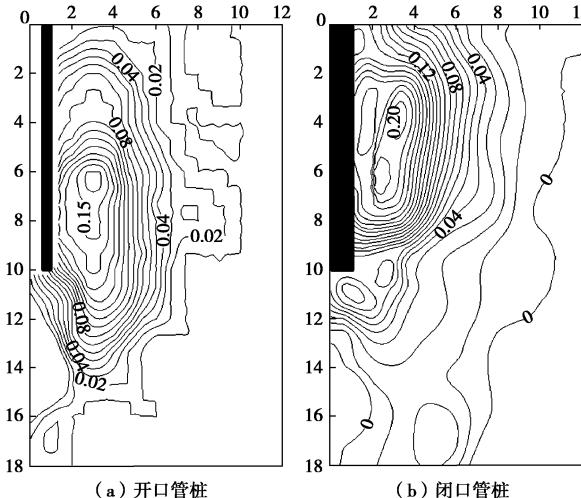


图 4  $L=0\sim 10R$  时水平位移轮廓图

Fig. 4 Horizontal displacement contours from  $L=0$  to  $10R$

## 2.2 与理论方法的对比分析

Randolph 等<sup>[5]</sup>对打入土体中的开口管桩和闭口管桩引起的径向位移进行了室内试验研究并根据径向体积平衡给出了开口管桩挤土位移的计算公式, 位移计算公式基于以下假设: ①土体体积在沉桩过程中没有发生变化; ②土体位移是径向的; ③沉桩只引起桩壁下的土体产生向外的位移。

对于闭口管桩:

$$\frac{u_r}{R_0} = \sqrt{\left(\frac{r}{R_0}\right)^2 + 1 - \frac{r}{R_0}} , \quad (2)$$

对于开口管桩:

$$\frac{u_r}{R_0} = \sqrt{\left(\frac{r}{R_0}\right)^2 + \rho} - \frac{r}{R_0} \approx \frac{\rho}{2} \cdot \frac{R_0}{r} , \quad (3)$$

式中,  $\rho = 1 - \left(\frac{R_0 - t}{R_0}\right)^2$ , 其他参数如图 2 所示。挤土位移的大小主要取决于管桩的直径和壁厚。

将闭口管桩的水平挤土位移试验数据与圆孔扩张法、应变路径法以及 Ni 等<sup>[16]</sup>模型试验数据进行比较, 如图 6 所示。本试验结果与 Ni 等模型试验结果相近, 但离桩身较近处两者的位移都偏小, 这是由于激光沿土层强度逐渐减弱, 靠近桩身处形成的散斑场较为模糊, 使得测试结果偏小。相比圆孔扩张法, 两者的结果与应变路径法更加接近, 这是由于圆孔扩张法只考虑了土体径向位移, 所以其值会比土体位移实际值偏大, 而应变路径法与实际情况更相符, 其考虑了竖向位移的影响。

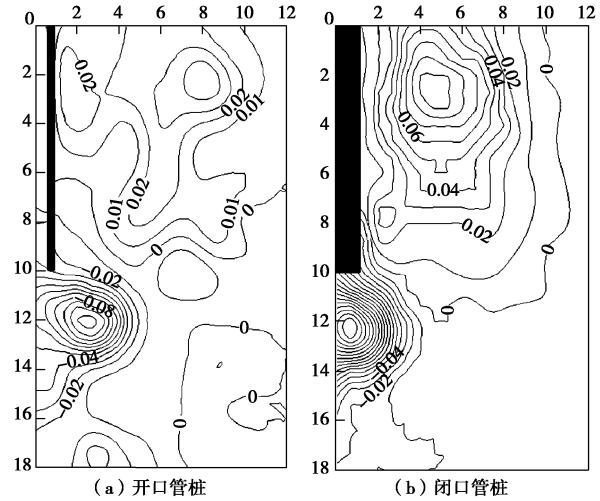


图 5  $L=0\sim 10R$  时竖向位移轮廓图

Fig. 5 Vertical displacement contours from  $L=0$  to  $10R$

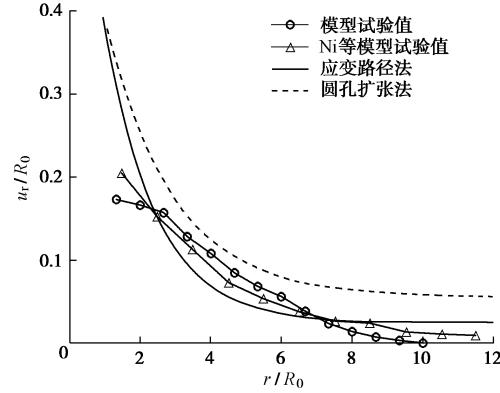


图 6 闭口管桩水平位移对比图

Fig. 6 Comparison of horizontal displacements induced by installation of closed-ended pipe pile

将开口管桩的水平挤土位移试验数据与圆孔扩张法以及 Liu 等<sup>[17]</sup>现场试验的数据进行比较, 如图 7 所示。本模型试验和现场试验土体水平位移值都比圆孔扩张法大, 说明无论模型试验还是现场试验, 开口管桩在沉桩过程中都发生了土塞现象, 造成了实际土体水平位移值增大, 所以开口管桩沉桩过程中考虑土塞对挤土位移的影响很有必要。

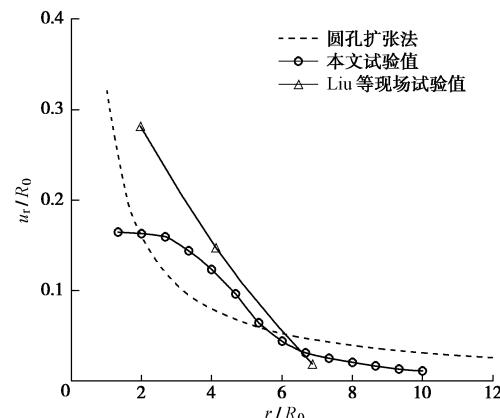


图 7 开口管桩水平位移对比图

Fig. 7 Comparison of horizontal displacements induced by installation of open-ended pipe pile

### 3 结 论

本文基于透明土和 PIV 技术开发了桩基贯入模型试验系统，对开口管桩和闭口管桩贯入过程中桩周土体的位移场进行了研究，并通过试验和理论计算结果的比较分析，可以得到以下结论：

(1) 基于透明土和 PIV 技术的试验系统对桩基贯入过程中桩周土体内部变形测量是可行的，相对传统的试验等方法，具有精度高，易操作，经济合理等优点，同时可以减少外界环境对试验过程的影响，可广泛应用于岩土工程中土体变形的测量与机理研究。

(2) 通过闭口管桩模型试验、圆孔扩张法和应变路径的比较分析得出，考虑竖向位移影响的应变路径法比只考虑径向位移的圆孔扩张法与实际情况更为接近。

(3) 通过开口管桩模型试验、现场试验和圆孔扩张法的比较分析得出，模型试验与现场试验值均比理论值大，说明沉桩过程中发生土塞，开口管桩逐渐显现闭口管桩的特性，现场沉桩过程中土塞效应的影响不可忽略。

此外，模型试验中存在的尺寸效应、边界条件等对测量精度的影响，需要进一步研究。

### 参 考 文 献：

- [1] PAIKOWSKY S G, WHITMAN R V, BALIGH M M. A new look at the phenomenon of offshore pile plugging[J]. *Marine Geotechnology*, 1989, **8**(3): 213 - 230.
- [2] 郑俊杰, 聂重军, 鲁燕儿. 基于土塞效应的柱形孔扩张问题解析解[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, **25**(增刊 2): 4004 - 4008. (ZHENG Jun-jie, NIE Chong-jun, LU Yan-er. Analytical solutions of cylindrical cavity expansion problems considering plugging effects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(S2): 4004 - 4008. (in Chinese))
- [3] AZZOUZ A S, BALIGH M M. Behavior of friction piles in plastic empire clays[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1984.
- [4] 雷华阳, 李肖, 陆培毅, 等. 管桩挤土效应的现场试验和数值模拟[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(4): 1006 - 1012. (LEI Hua-yang, LI Xiao, LU Pei-yi, et al. Field test and numerical simulation of squeezing effect of pipe pile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(4): 1006 - 1012. (in Chinese))
- [5] RANDOLPH M F, STEENFELT J S, WORTH C P. Effect of pile type on design parameters for driven piles[C]// Proceeding of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, 1979: 107 - 114.
- [6] 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.
- [7] LEHANE B M, GILL D R. Displacement fields induced by penetrometer installation in an artificial soil[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2004, **1**(1): 25 - 36.
- [8] 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.
- [9] WHITE D J, BOLTON M D. Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand[J]. *Géotechnique*, 2004, **54**(6): 375 - 397.
- [10] ISKANDER M, SADEK S, LIU Jin-yuan. Optical measurement of deformation using transparent silica to model sand[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2002, **2**(4): 13 - 26.
- [11] CAO Zhao-hu, LIU Jin-yuan, LIU Han-long. Transparent fused silica to model natural sand[C]// Pan-am CGS Geotechnical Conference. Toronto, 2011.
- [12] 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))
- [13] 孔纲强, 刘璐, 刘汉龙, 等. 玻璃砂透明土与标准砂强度特性对比试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2014, **17**(2): 250 - 255. (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 - 255. (in Chinese))
- [14] 余跃心. 基于透明介质和颗粒图像技术的土体变形测量研究进展[J]. *勘察科学技术*, 2005(6): 7 - 10. (SHE Yue-xin. Research progress in soil deformation measurement using transparent media and particle image velocimetry[J]. *Chinese Journal of Site Investigation Science and Technology*, 2005(6): 7 - 10. (in Chinese))
- [15] SADEK S, ISKANDER M, LIU Jin-yuan. Accuracy of digital image correlation for measuring deformations in transparent media[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2003, **17**(2): 88 - 96.
- [16] NI Qing, 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.
- [17] LIU Han-long, CHU Jian, DENG An. Use of large-diameter, cast-in situ concrete pipe piles for embankment over soft clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, **46**(8): 915 - 927.