DOI：10.11779/CJGE201608019

基于透明土的取土管贯入扰动变形试验研究

吴跃东[1, 2]，罗如平[3]，刘 坚[1, 2]，杨 冬[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. 江苏省岩土工程技术工程研究中心，江苏 南京 210098；3. 同济大学地下建筑与工程系 上海 200092）

摘 要：在岩土工程勘察取样过程中，取土管的贯入会引起土体的扰动变形，影响到对土体物理力学性质的准确评价。为了研究取土管贯入过程中土体扰动变形特性，基于透明土及 PIV 技术，开发了相应的取土管贯入模型试验系统，进行了取土管的贯入试验，得到了在取土管贯入过程中土体扰动变形场的分布特性。试验结果表明：土体扰动变形随着取土管贯入深度增大而增大，管外土体主要表现为斜向上的隆起变形；管内土体主要为向上的隆起变形，在深度方向最大变形位于取土管中间部位；不同截面处土体其变形规律基本一致，截面间土体剪切变形较小。

关键词：取土管；扰动变形；取土贯入；透明土；PIV 技术

中图分类号：TU470 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2016)08－1507－06

作者简介：吴跃东（1969－ ），男，福建云霄人，副教授，博士，主要从事岩土工程测试及软土地基处理研究。E-mail: hhuwyd@163.com。

Soil disturbance deformation induced by penetration of sampler tube based on transparent soils

WU Yue-dong[1, 2], LUO Ru-ping[3], LIU Jian[1, 2], YANG Dong[1, 2]

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Geotechnical Engineering Center of Jiangsu Province, Nanjing 210098, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: The soil disturbance deformation induced by penetration of sampler tube has a great influence on the accuracy of physical and mechanical evaluation of soils in the soil investigation engineering. A small-scale model test system is developed to study the non-intrusive measurement of the soil disturbance deformation characteristics during penetration of sampler tube using the transparent soils and PIV (particle image velocimetry) technique. Sampling penetration tests are conducted, and the soil deformation characteristics during penetration of sampler tube are obtained. The test results show that the soil disturbance deformation increases with the penetration depth of sampler tube, and the upheaval deformation of soils outside the sampler is dominated. The disturbance deformation of soils in the sampler is mainly upheaval, and the maximum upheaval deformation occurs at the middle of the sampler in the depth direction. The deformation distribution characteristics of soils on different sections in the sampler are nearly the same, and the shear strain of soils between adjacent sections is relatively small.

Key words: sampler; disturbance deformation; sampling penetration; transparent soil; PIV technique

0 前 言

在岩土工程勘察设计当中土样物理力学参数的确定是一项最为基础性的工作，土样参数的准确与否直接影响到工程地质的评价和岩土工程的设计、施工及其经济合理性。试样参数取得过高会使工程设计偏于危险，而试样参数选取过低又会导致工程设计过于保守，造成工程经济上的大量浪费[1]。

引起土样扰动的因素错综复杂，其中由取土管贯入引起的土样扰动变形是重要影响因素之一[2]。Clayton等[3]曾指出，在实际取土过程中，如果相关人员操作得当，则由取土管上拔及后续土样从取土管推出过程所产生的扰动变形相对取土管贯入所引起的土样扰动是很小的。在取土管贯入过程中，由于取土管挤土及摩擦作用，会对土样造成一定程度的扰动变形，从而影响到了对场地原位土样物理力学特性的准确评价。

对于取土管贯入引起的土样扰动变形，相关学者

基金项目：国家自然科学基金项目（51279049）；中央高校基本科研业务费项目（2015B25914）

收稿日期：2015－06－07

进行了一系列理论、数值模拟方面的研究[3-6]。Baligh等[4]把取土管贯入过程看作是无压缩变形、无黏滞性、无转动的液体沿不透水取土筒的流动过程，基于应变路径法分析了取土管贯入过程中取土管轴线处土体全过程应变。吴跃东等[5]基于圆孔扩张理论将取土管贯入过程假定为小圆孔沿取土管深度方向的扩展，并通过在取土管环向及深度方向的积分，得到了由于取土管贯入引起的土体扰动变形场。Clayton等[3]采用有限元程序LUSAS得到了取土管贯入过程中取土管轴线处土体应变变化特性，并与Baligh[4]解进行了对比分析，验证了数值分析的可行性。李家平等[6]采用ANSYS对取土管贯入过程进行了数值模拟，得到了管内外土体全过程应变场，并分析了取土管尺寸参数对土样扰动的影响。

为了研究方便，上述理论、数值模拟分析都对取土过程做了一定程度的简化假定，同时对土体本身也假定为无压缩、无黏滞性或弹性材料，因此上述分析与实际情况下土体扰动变形特性有所差别。通过试验方法获得取土管贯入过程中土样内部变形场的分布特性是一种较为可靠的研究手段。基于图像分析软件GEOPIV[7-8]，Yan等[9]研究了沿纵向对称剖开的半模取土管贯入高岭土中土样扰动变形场分布特性，并分析了取土管贯入对周边土样扰动范围的大小。然而由于模型箱边界的存在，模型箱边界对土体会产生一定的摩擦作用，从而对土体扰动变形场分布有所影响。为了可视化土体内部的变形，Iskander等[10-11]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。基于透明土和粒子图像测速（PIV）技术，Hover等[12]进行了不同上覆压力条件下取土管贯入试验，得到了取土管轴线处土体应变特性，总体而言，试验所得轴线处土样轴向应变较Baligh[4]解偏大。

本文基于室内模型试验，联合使用透明土、PIV图像测试技术，开发了相应的取土管贯入试验系统，通过相机对取土管贯入全过程进行连续拍摄，然后通过PIV技术处理所拍摄到的试验过程图像，得到在取土管贯入过程中管内外土样全过程变形场，并对其扰动变形分布特性进行了分析。

1 室内试验系统介绍

1.1 人工透明土

透明土的基本原理是通过采用折射率相同的孔隙液体来填充一定级配的透明颗粒的空隙，使得光线不会在透明颗粒材料界面发生反射或者折射，从而形成透明状的介质材料[13]。孔纲强等[14-15]采用透明玻璃砂作为颗粒材料，以正十二烷和白油作为孔隙流体材料配置出透明度较高的透明土，并分析了其相应的物理力学性质。试验结果表明采用这种方法所配置出的透明土与相应级配的天然砂土材料，基本物理力学性质相近，可以用来模拟砂土材料。

基于此，本试验采用江苏新沂矿业有限公司生产的玻璃砂作为颗粒材料，颗粒粒径为0.1～1.0 mm，其基本物理指标及颗粒级配特征见表1，2。孔隙流体材料为正十二烷与白矿油的混合液体，经过试验确定最优质量配合比为正十二烷：白矿油=1∶10.02，此时混合液体折射率为1.4585，所配置出的透明土透明度较高。

表 1 透明砂试样的基本物理指标

Table 1 Parameters of transparent sand in tests

试样	G_s	e_{min}	e_{max}	e	ρ_{dmin} /(g·cm^{-3})	ρ_{dmax} /(g·cm^{-3})
透明砂	2.20	0.32	0.92	0.68	1.16	1.67

表 2 透明砂试样颗粒级配

Table 2 Grain composition of transparent sand

试样	颗粒组成/%					C_c	C_u
	>1 mm	1～0.5 mm	0.5～0.25 mm	0.25～0.1 mm	<0.1 mm		
透明砂	0	70.6	25.7	3.7	0	1.08	2.02

1.2 试验装置

本试验中取土管为透明有机玻璃管，考虑到材料加工工艺及取土管在贯入过程中自身强度、刚度要求，试验所用取土管内径为30 mm，壁厚为2 mm。采用该尺寸取土管能防止取土管贯入过程中模型的边界效应，又能使得试验模型箱尺寸不至于过大，影响透明土的透明度。透明模型箱为有机玻璃，平面尺寸为150 mm×150 mm，高度为200 mm，试验时，取土管在模型箱中心处贯入。

如图1所示为本试验取土管贯入装置示意图，装置中导管竖直焊接在螺杆上，保证导杆在竖直方向能垂直贯入，不发生倾斜。在贯入导杆顶端安装一个定滑轮以作为拉绳收缩的支点，拉绳一端固定在导管的挂钩上，另一端固定在步进电机轮轴，通过收缩拉绳从而带动导杆的向下贯入。由于步进电机具有匀速、可控的优点因此可以实现取土管匀速贯入的要求。在本试验中通过控制步进电机的功率，取土管以4 mm/s的速度匀速贯入至透明土中。

另外需要特别注意的是，由于取土管上端是密封的，取土管内部空腔存在一定体积的空气，在取土管贯入过程中，空腔内的空气需要及时排除，否则很容易使得这部分空气压入到透明土中，使得透明土中存

有大量气泡，影响透明土的透明效果，为此，在每个取土管顶端侧壁上开设3个圆孔，以及时排除取土管空腔内的空气。

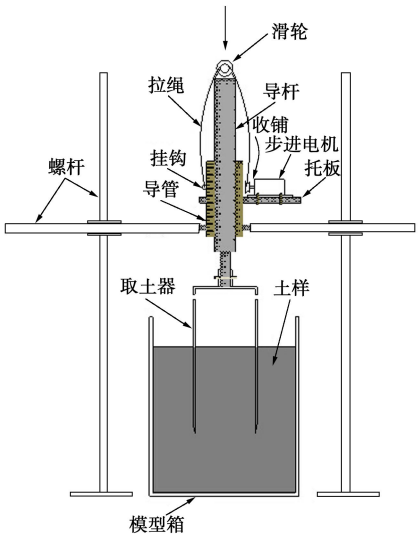


图 1 透明土试验贯入装置示意图

Fig. 1 Devices for transparent soil model tests

1.3 试验变形测试系统

如图2所示为面状激光切面透明土产生的激光散斑图。试验过程中，取土管在模型箱中心处按照一定的速度（4 mm/s）匀速贯入至透明土中，同时在模型箱侧边中间部位放置一面激光源，沿模型箱对称面切割透明土，这样在取土管贯入过程中，面激光源恰好沿着取土管半径方向切割透明土体。模型箱正前方平行模型箱布置一台相机，在取土管贯入过程中连续捕捉激光散斑面上的散斑运动特性，从而根据PIV分析软件得到散斑面上透明土颗粒的变形场分布特性。由模型的对称性可知，散斑面上土体颗粒变形场可以用来反映取土管贯入过程中整个模型箱内部土体的变形特性。

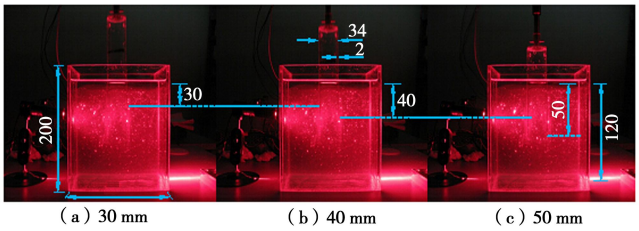


图 2 不同取土管贯入深度下透明土体激光散斑图

Fig. 2 Speckle images of model at different penetration depths

本试验采用图像数据分析软件PIVview2c进行土体变形场的分析与计算。PIVview2c软件是由德国航空航天中心粒子图像测速技术组研发，用于分析连续照片中颗粒位移变形场的PIV分析软件[16]。在岩土工程中可以采用该软件进行透明土颗粒变形量测，并能满足试验变形测量要求[17-18]。

2 试验结果与分析

2.1 像素标定试验

采用 PIVview2c 软件分析所得到的土体变形结果为像素变形大小，其变形大小单位为像素。为了得到透明土中取土管贯入引起的土样扰动变形，需要计算像素坐标与实际物理坐标之间的换算比例。为了得到变形换算比例大小，在贯入结束后，水平放置一把钢尺于模型箱正表面，通过读取钢尺上的实际刻度大小与相应刻度在图片中的像素大小计算得到 PIV 分析中物理坐标与像素坐标之间的换算比例。

对于数码相片来讲，位于图像正中央部位的图片质量最高，在图像边缘处都有一定程度畸变[19]，其相应的像素坐标与物体实际空间坐标并不是完全线性关系，因此其变形换算比例并不为一常数，在图片分析过程中需要尽量避免使用图片边缘处变形数据。图 3 所示为本试验中像素标定试验曲线，从图中可以看出，像素坐标与实际物理坐标之间的线性关系非常显著，说明采用试验相机捕捉的取土管贯入过程图片质量较高，没有发生明显畸变，这是因为在本试验图片采集过程中，图像采集区域较大（图 2 所示），试验模型箱基本位于图像正中央部位，图片质量较高。这样在变形数据转换过程中可以采用统一的量度值进行数据变换，统一量度值即为各个标定曲线的斜率。数据分析时，通过 PIVview2c 软件得到土体像素变形值后，乘以换算比例后即可获得土样真实的物理变形场。

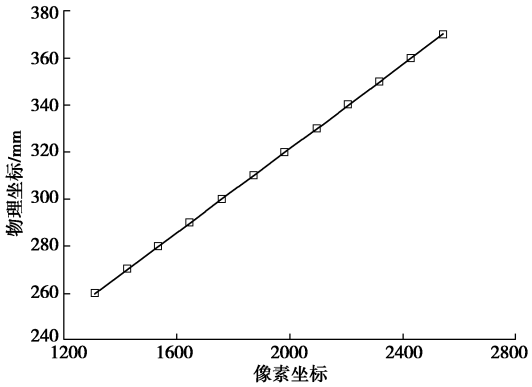
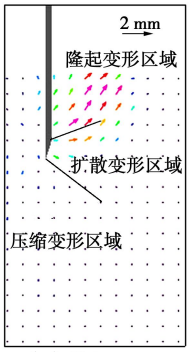


图 3 像素标定试验标定曲线

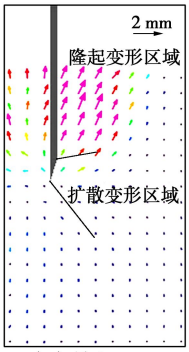
Fig. 3 Calibration curve of pixel calibration tests

2.2 土样变形场分析

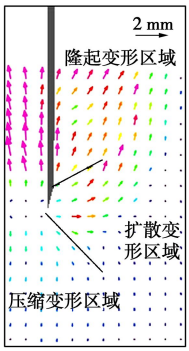
图 4 为取土管不同贯入深度下土样变形矢量图。由于模型的对称性，只对取土管轴线处一侧的土样进行分析。从图中可以看出土样扰动变形大小和范围随着取土管贯入深度增加而变大。当贯入深度为 50 mm 时，影响范围大致为 2 倍取土管内径。



（a）贯入30 mm



（b）贯入40 mm



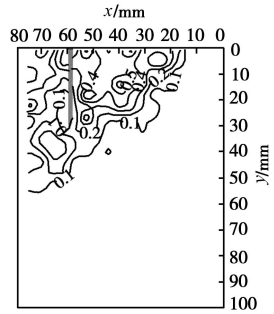
（c）贯入50 mm

图 4 土样矢量变形图

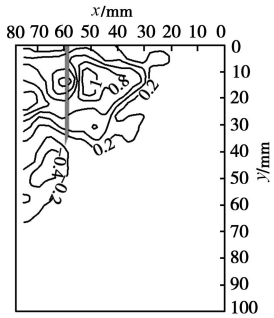
Fig. 4 Deformation vectors of soils during penetration of sampler tube

对于管外土样：刃脚以上部分土体，其变形主要表现为斜向上的隆起变形，竖向变形成分较大；刃脚处部位土体，其变形主要表现为水平向的扩散变形，主要由取土管的刃脚侧向挤土造成；刃脚以下部位土体主要为竖直向下的压缩变形。在取土管开始贯入时，管外土体主要属于扩散变形，由刃脚横向挤土造成，随着贯入深度增加，扩散变形区域逐渐下移，上部土体由于下部刃脚挤土过渡为斜向上的隆起变形，不同变形区域其分布范围如图 4 所示。

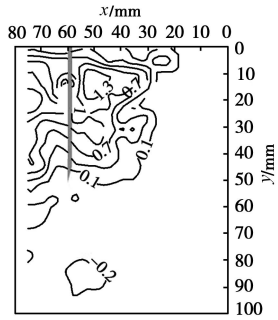
为了更直观地展现取土管贯入过程中土样变形场的分布特性及大小，将试验结果以变形等值线的形式给出。图 5 为取土管贯入过程中土样变形等值线图。对于管外土体，其最大变形区域位于取土管侧壁外围一定深度范围内，其大致深度在土体表面以下 10～20 mm 左右。当取土管贯入深度为 50 mm 时，管外土体变形已经达到了 1.3 mm 左右，取土管内部土体隆起变形也已经超过 1 mm。



（a）贯入30 mm



（b）贯入40 mm



（c）贯入50 mm

图 5 土体变形等值线图

Fig. 5 Deformation contours of soils during penetration of sampler tube

2.3 轴线处土样竖向变形分析

取土管在贯入过程中，管内土体由于受到侧壁约束作用，其变形主要表现为竖向变形。为了研究管内土体变形特性，以取土管轴线处土体作为研究对象，分析了其在取土管贯入过程中沿深度方向的变形特性。

图 6 为取土管轴线处土体竖向变形图。从图中可以看出，取土管贯入后轴线处土体表现为向上的隆起变形，且随着取土管贯入深度的增大，土体竖向隆起变形值不断增大。当贯入达到 50 mm 时，最大隆起变形 1.4 mm 左右。从图中可以看出：土体发生隆起变形的位置基本位于取土管中间部位，随着贯入深度的

增加而不断往下延伸。

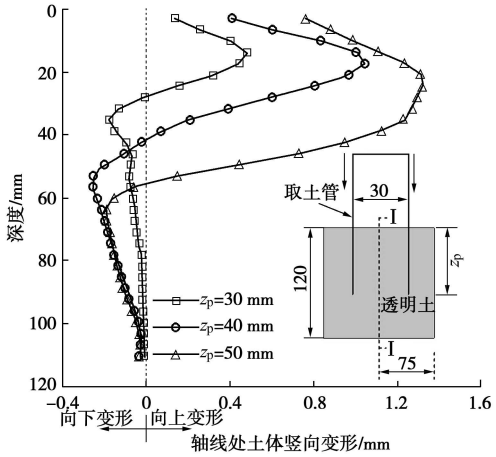


图 6 轴线处土体竖向变形图

Fig. 6 Vertical deformations of soils at centerline of sampler

管内土体呈现为向上的隆起变形，主要原因：①透明土体呈完全饱和状态，孔隙液体完全浸没透明玻璃砂，有机玻璃侧壁与玻璃砂摩擦作用较弱，无法使土体产生显著的压缩变形；②取土管内径相对侧壁壁厚较小，取土管贯入过程中刃脚挤土效应显著，导致土体呈现向上的隆起变形。

取土管刃脚以下土体表现为向下的压缩变形，其压缩变形较管内土体隆起变形要显著减小。在刃脚深度处土体压缩变形接近于 0，之后其压缩变形随着深度的增加而增大，当深度距刃脚 10 mm 左右时，土体压缩变形达到最大值。当深度进一步增加后，土体压缩变形开始减小，当深度达到 2 倍取土管贯入深度后，其压缩变形基本接近于 0。

由图 6 可以看出，在仅仅考虑取土器贯入过程引起的土样扰动情况下，取土器下方的土样扰动较小，室内试验时可以切取取土器下部土样进行强度、压缩、渗透等试验，以尽量减小扰动的影响。

2.4　取土管不同截面处土体竖向变形分析

图 7 所示为在取土管贯入深度为 50 mm 时不同截面上土体变形曲线，图中 *D*—*D* 表示取土管管内轴线，另外 3 个截面 *A*—*A*、*B*—*B*、*C*—*C* 位于取土管半径的 3 个四等分点位置。从图中可以看出，不同截面上土体变形规律基本一致，仅在变形大小上有所差异。具体表现为距离侧壁较近的截面其土体隆起变形要小于远离侧壁截面的土体变形值，这主要是因为距离侧壁越近，侧壁摩阻力对土体的压缩变形越显著，相应的其隆起变形有所减小。由于不同截面上土体变形基本一致，因此从宏观上来讲，取土管贯入引起的管内土体变形主要表现为土体整体的竖向隆起变形，不同截面间剪切变形较小。

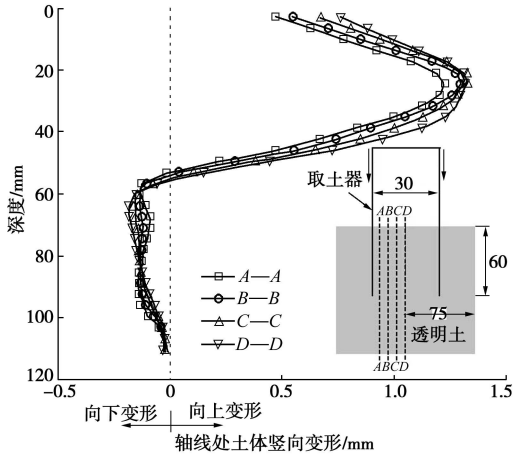


图 7 不同截面处土体竖向变形图

Fig. 7 Vertical deformations of soils on different sections of sampler

3　结　　论

本文基于透明土和 PIV 技术发展了取土管贯入模型试验系统，对取土管贯入过程中管内外土样的变形场分布特性进行了分析研究，基于试验结果可以得到以下结论：

（1）基于 PIV 和透明土技术的试验系统对取土管贯入过程中土体内部变形测量是可行的，相对于传统试验方法，具有变形测量可视化，无干扰，易操作等优点，可以应用于岩土工程相应的变形量测试验模型。

（2）管外土体变形主要分为 3 个区域：刃脚上部的隆起变形区域，刃脚处扩散变形区域及刃脚下部压缩变形区域，其中隆起变形区域最大变形位置位于土样表面以 10～20 mm 左右。

（3）管内土体表现为隆起变形，其扰动变形大小随着贯入深度的增大而增大，在深度方向土体最大变形位于取土管中间部位，刃脚以下部位土体影响深度范围大约为 2 倍贯入深度。

（4）不同截面处土样变形规律基本一致，管内土体变形主要表现为土体整体的竖向隆起变形，不同截面间剪切变形较小。

参考文献：

[1] HVORSLEV M J. Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes[R]. Vicksburg: U.S Army Corp. of Engineers Waterways Experiment Station, 1949.

[2] 魏汝龙, 王年香. 赤湾港软土取土质量的研究[J]. 港口工程, 1989(6): 1－6. (WEI Ru-long, WANG Nian-xiang. Research of sampling quality for Chi-wan port soft clay[J]. Port Engineering, 1989(6): 1－6. (in Chinese))

[3] CLAYTON C R I, SIDDIQUE A, HOPPER R J. Effects of sampler design on tube sampling disturbance—numerical and analytical investigations[J]. Géotechnique, 1998, **48**(6): 847 – 867.

[4] BALIGH M M, AZZOUZ A S, CHIN C T. Disturbances due to “ideal” tube sampling[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **113**(7): 739 – 757.

[5] 左文荣, 吴跃东, 李治国, 等. 取土器贯入土体引起土体扰动的理论分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, **37**(6): 702 – 706. (ZUO Wen-rong, WU Yue-dong, LI Zhi-guo, et al. Theoretical analysis of disturbance of soils caused by penetration of soil samplers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, **37**(6): 702 – 706. (in Chinese))

[6] 李家平, 高大钊, 李永盛. 取土管切入引起土体扰动的数值模拟分析[J]. 地质与勘探, 2003(增刊 2): 113 – 118. (LI Ji-ping, GAO Da-zhao, LI Yong-sheng. Numerical analysis of soil disturbance induced by sampler penetration[J]. Geology and Exploration, 2003(S2): 113 – 118. (In Chinese))

[7] 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.

[8] 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.

[9] YAN W M, NG I T, CHEUK C Y. Displacement field around an open-tube sampling[C]// Physical Modelling in Geotechnics, Two Volume Set: Proceedings of the 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG 2010). Zurich: CRC Press, 2010, 1: 411.

[10] 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.

[11] 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.

[12] HOVER E D, NI Q, GUYMER I. Investigation of centreline strain path during tube penetration using transparent soil and particle image velocimetry[J]. Géotechnique Letters, 2013, **3**: 37 – 41.

[13] LIU J, ISKANDER M G. Modelling capacity of transparent soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**(4): 451 – 460.

[14] 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))

[15] 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))

[16] RAFFEL M, WILLERT C E, KOMPENHANS J. Particle image velocimetry: a practical guide[M]. Berlin: Springer, 2007.

[17] YUAN B, LIU J, CHEN W, et al. Development of a robust Stereo-PIV system for 3-D soil deformation measurement[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, **40**(2): 256 – 264.

[18] SUN J, LIU J. Visualization of tunnelling-induced ground movement in transparent sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, **40**: 236 – 240.

[19] WHITE D J, TAKE W A. GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing[R]. London: Cambridge Universiyt Department of Engineering, 2002.