

DOI: 10.11779/CJGE2017S1013

取土器贯入扰动变形规律透明土试验研究

罗如平^{1,2}, 吴跃东^{*1,2}, 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. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 在岩土工程取样过程中, 取土器贯入会引起土样扰动变形, 造成土样物理力学性质的改变。为了研究取土器贯入过程中土体扰动变形特性及其影响因素, 基于透明土及 PIV 技术, 进行了不同尺寸、不同贯入速率的取土器贯入试验, 得到了取土器贯入过程中土体扰动变形场的分布特性及规律。模型试验结果表明: 土体扰动变形随着贯入深度增大而增大, 管内土体表现为向上的隆起变形, 在深度方向最大变形基本位于深度 20 mm 处; 增大取土器内径能有效减小轴线处土体扰动变形, 但减大幅度随着内径的增大而减小; 增大取土器贯入速率不能有效地减小结构性较弱的砂性土样的扰动变形。

关键词: 取土器; 扰动变形; 透明土; PIV 技术; 贯入速率

中图分类号: TU411; TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)S1-0064-05

作者简介: 罗如平(1989-), 男, 江西吉安人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程测试及桩基工程研究。E-mail: luoruping89928@163.com。

Tests on transparent soil for soil disturbance deformation induced by sampler penetration

LUO Ru-ping^{1,2}, WU Yue-dong^{*1,2}, 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 Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The soil disturbance deformation induced by sampler penetration has a significant influence on the physical and mechanical properties of soil in soil investigation engineering. A series of small-scale model tests with different sampler diameters and penetration rates are conducted to investigate the disturbance deformation characteristics of soil and the influence factors during sampler penetration by using transparent soils and PIV (particle image velocimetry) technique. The test results show that the disturbance deformation of soil increases with the depth of sampler penetration, and the disturbance deformation of soil in sampler is mainly upheaval, and the maximum upheaval deformation occurs at the depth about 20 mm. Increasing the sampler diameter can reduce the disturbance deformation of soil at sampler centerline effectively, but the reduced magnitude of deformation decreases with the sampler diameter. The sampler penetration rate has no effect on the disturbance deformation of non-structured soil.

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

0 前言

由于土样扰动的存在, 室内土工试验往往不能准确评价场地土体真实物理力学特性^[1]。土样扰动来源有很多种, 其中由取土器贯入引起的土体扰动变形是重要影响因素之一^[2]。在取土器贯入过程中, 由于取土器侧壁的挤土及摩擦作用, 会对土样造成一定程度的扰动变形, 从而影响到对场地原位土样真实物理力学特性的准确评价。

目前对于取土器贯入过程中土体扰动变形集中于理论及数值模拟研究, 然而由于土体性质的复杂, 模型分析往往做了较多的简化, 与实际情况有所差别^[3-5]。

由于土样的不可见性, 传统的室内试验往往很难准确获得土体内部的变形特性。为了可视化土体内部的变形, Iskander等^[6]提出在室内试验中使用透明土来代替自然土, 基于图像处理方法获得土体内部变形场, 从而实现了土体内部变形的可视化。

透明土作为一种人工合成材料, 其具有类似天然土体的物理力学性质, 广泛地应用于岩土力学变形测

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(2015B025914)

收稿日期: 2016-12-02

***通讯作者** (E-mail: hhuwyd@163.com)

试验中^[7-11]。Q.Ni^[8]等基于无定形硅粉及矿物油模拟了黏土样, 在此基础进行了透明黏土的沉桩试验, 得到了沉桩过程中土体变形场, 实测结果与理论分析具有很好的一致性; Ahmed M^[9]采用透明砂土模拟了隧道开挖过程, 获得了隧道开挖过程中土体内部及地表沉降特性, 与实际工程变形特点一致。

在国内, 透明土也越来越受到关注, 开始应用于相关模型试验中。曹兆虎等^[12]基于透明土进行了沉桩贯入试验, 研究了开口与闭口管桩在沉桩过程中的桩周土体的位移分布场, 试验结果与理论分析较为接近, 表明透明土试验模型可以应用于岩土工程变形量测; 齐昌广等^[13]基于透明土模型试验研究了细长桩的屈曲特性, 试验结果分析表明: 桩侧土体单元的运动规律与经典朗肯土压力理论相一致; 吴跃东等^[14]基于透明土及PIV变形测量技术, 研制了一套取土器贯入过程中土体扰动变形观测装置, 并基于该装置初步研究了取土器贯入过程中土体扰动变形场的分布特点, 验证了透明土技术在研究取土器贯入扰动变形问题中的可行性。

本文基于文献[14]中的试验装置, 进行了不同尺寸及不同贯入速率的取土器贯入试验, 并根据相机捕捉到的图像采用PIV进行分析, 得到了取土器贯入过程中土体扰动变形场分布特性, 并对其扰动变形分布特性及规律进行了分析, 有助于了解扰动变形影响因素及其变化规律, 并能为相关理论研究提供参考。

1 试验方案

取土器内径大小对土体扰动变形大小有着重要影响^[4]。试验所用模型箱为有机玻璃, 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。受模型箱大小及边界效应的影响, 试验过程中, 取土器内径分别为20, 30, 40 mm, 壁厚为2 mm, 取土器下端刃脚为30°。

表 1 取土器贯入试验方案

Table 1 Test schemes of sampler penetration tests		
试验编号	内径/mm	贯入速率/(mm·s ⁻¹)
d-20-4	20	4
d-30-4	30	
d-40-4	40	
d-20-8.5	20	8.5
d-30-8.5	30	
d-40-8.5	40	

为了研究不同贯入速率下土体扰动变形特性, 试验中通过切换步进电机的档位来实现取土器不同速率的贯入, 在本实验中取土器贯入速率分别为4, 8.5

mm/s。取土贯入试验方案如表1所示。本文中取土器贯入装置、试验所用透明土材料及土体变形观测方法与文献[14]一致, 具体操作方法可参考文献[14]。

2 试验结果分析

2.1 土体位移矢量场

图 1 为 d-30-4 试验取土器不同贯入深度下土体位移矢量图。由于模型的对称性, 只对取土器轴线处右侧的土体进行分析。从图 1 可以看出土体扰动变形随着取土器贯入深度增加而变大, 其扰动影响范围也随着贯入深度的增大而增大。当贯入深度为 60 mm 时, 影响范围大致为 1.5 倍取土器内径。

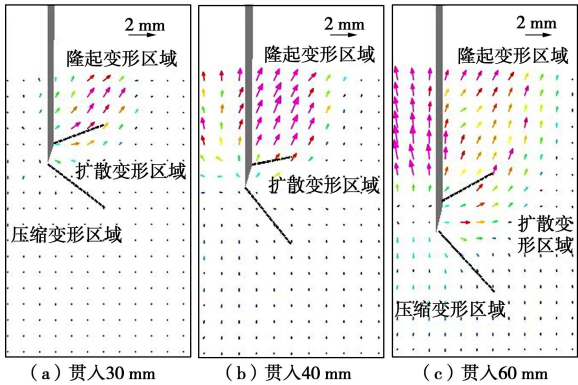


图 1 d-30-4 试验土体位移矢量图

Fig. 1 Soil displacement vectors of d-30-4 tests

对于取土器管外土体: 刃脚以上部分土体, 为隆起变形区域, 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, 为扩散变形区域, 其变形主要表现为水平向的扩散变形, 主要由取土器的侧向挤土造成; 刃脚以下部位土体为压缩变形区域, 主要为竖直向下的压缩变形。不同变形区域其分布范围如图 1 所示。

在取土器贯入过程中, 管内土体发生竖直向上的隆起变形。当贯入深度较浅时, 土体扰动变形较小, 随着取土器贯入深度的增加, 扰动变形增长较快, 最大扰动变形位于取土器中间深度部位。

2.2 取土器轴线处土体竖向位移分析

取土器在贯入过程中, 管内土体由于受到侧壁约束作用, 其变形主要表现为竖向位移, 水平位移相对较小, 如图 1 所示。为了研究取土器管内土体变形特性, 以取土器轴线处土体作为研究对象, 分析了其在取土器贯入过程中沿深度方向的变形特性。

图 2 为 d-30-4 试验取土器轴线处土体竖向位移图。从图中可以看出, 取土器贯入后其轴线处土体表现为向上的隆起变形, 且随着取土器贯入深度的增大, 土体竖向隆起变形值不断增大。当贯入达到 60 mm

时,最大隆起变形达到 1.7 mm。此外,从图中虚线可以看出:土体发生最大隆起变形的位罝基本位于深度 20 mm 处,但随着贯入深度的增加,下部土体变形增大趋势更为显著。

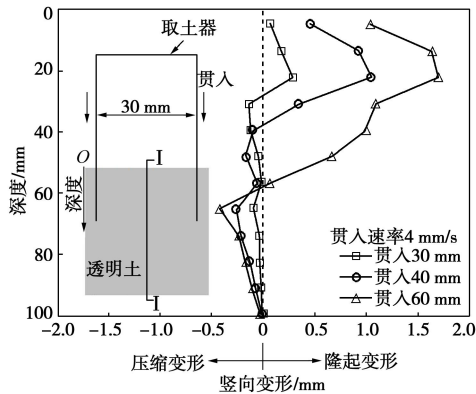


图2 轴线处土体竖向位移图

Fig. 2 Vertical deformations of soil on centerline of sampler

取土器管内土体呈现为向上的隆起位移,主要原因:一是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;二是取土器贯入过程中刃脚挤土效应显著,导致土体呈现较大的向上的隆起变形^[14]。

取土器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,当深度接近 2 倍取土器贯入深度后,其压缩变形基本接近于 0,这与数值模拟结果^[4]所得到的结论是相似的。

2.3 取土器内径对轴线土体竖向位移影响

图 3, 4 为不同贯入速率下,取土器内径对土体扰动变形的影响。从图 3, 4 可以看出,在不同贯入速率情况下,取土器内径对轴线处土体扰动变形影响具有相同的变化规律,取土器内径越大,轴线处土体竖向扰动变形越小。取土器内径越大,刃脚挤土效应对其轴线处土体影响越小,相应的扰动变形就越小。取土器内径的增大有利于减小轴线处土体的扰动变形,但变化幅度随着内径的增大而有所减小。例如,当贯入速率为 4 mm/s 时,内径为 20 mm 取土器最大扰动变形达到 2.5 mm,较内径为 30 mm 取土器的最大变形 1.7 mm 增大 0.8 mm,而内径 30 mm 取土器其最大变形较 40 mm 情况下增加 0.5 mm 左右。对于取土器贯入速率为 8.5 mm/s 情况,其具有同样的变化规律,这表明在取土器内径较小情况下(本试验中取土器内径

属于此种情况),增大取土器内径能有效减小取土器轴线处土体扰动变形,但当取土器内径增大到一定程度后,再增大取土器内径对减小土体扰动变形影响不大。基于模型试验结果可以看出,在实际勘察取样过程中,取土器直径并不是越大越好,当取土器直径达到一定尺寸后,再增加取土器直径并不能有效减小土体扰动程度,相反还会造成取土操作的困难。

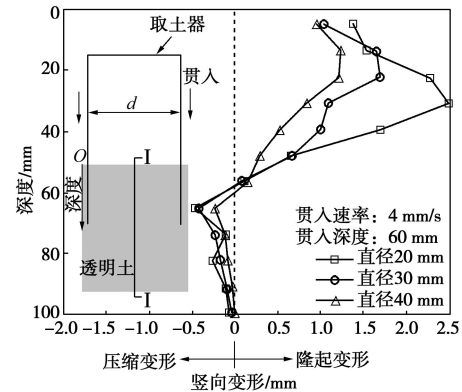


图3 不同内径取土器土体位移曲线(贯入速率 4 mm/s)

Fig. 3 Vertical deformations of soil for samplers with different diameters (penetration rate of 4 mm/s)

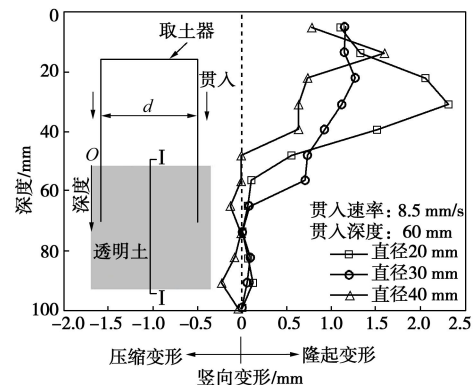


图4 不同内径取土器土体位移曲线(贯入速率 8.5 mm/s)

Fig. 4 Vertical deformations of soil for samplers with different diameters (penetration rate of 8.5 mm/s)

2.4 贯入速率对轴线土体竖向变形影响

图 5, 6 内径为 30, 40 mm 取土器在不同贯入速率下土体扰动变形。从图 5, 6 可以看出,当贯入速率从 4 mm/s 增加至 8.5 mm/s 后,上述两种内径取土器对土体扰动变形规律基本一致,取土器贯入速率对土体扰动变形没有明显的影响。在本试验中由于透明土材料为玻璃砂材料,颗粒间结构表现为一种散体颗粒堆积状态,不存在天然黏土状态下颗粒间的胶结作用,因此其颗粒间的连接作用较弱。取土器贯入速率影响到土体受扰动的时间长短,取土器贯入速率越大,土体受扰动时间越短,有利于保持土体的天然结构,减

小土样的扰动变形, 但对于本试验中的透明土样, 由于颗粒间结构性不明显, 因此贯入速率对土样的扰动变形也就基本上没有影响, 这表明在砂性土层进行取样操作时, 增大取土器贯入速率并不能有效减小土体扰动变形的大小。

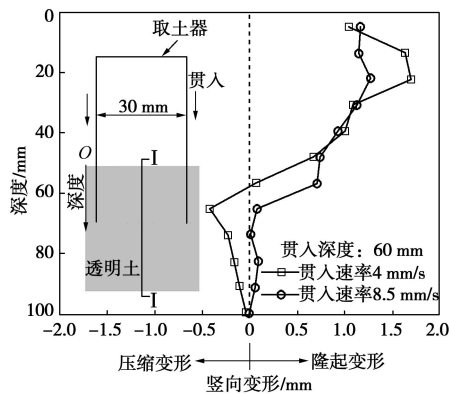


图 5 不同贯入速率土体扰动位移曲线 (d=30 mm)

Fig. 5 Vertical deformation of soil for sampler with different penetration rates (d=30 mm)

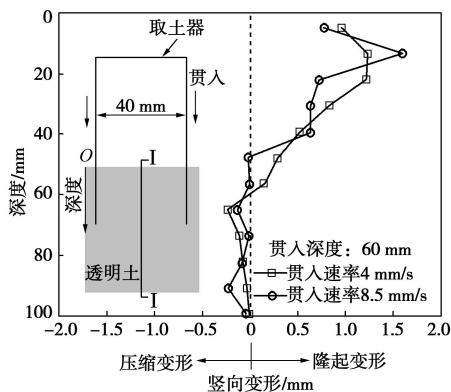


图 6 不同贯入速率土体扰动位移曲线 (d=40 mm)

Fig. 6 Vertical deformations of soil for sampler with different penetration rates (d=40 mm)

3 结 论

本文采用透明土材料进行了不同尺寸及贯入速率取土器贯入试验, 同时, 结合粒子图像测速 (PIV) 技术, 测量了不同试验条件下土体扰动变形特性, 并得到了如下结论:

(1) 取土器贯入过程中管外土体变形特性主要分为 3 个区域: 隆起变形区域、扩散变形区域及压缩变形区域。

(2) 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置基本位于 20 mm 处, 刃脚以下部位土体压缩变形相对管内土体较小。

(3) 取土器内径是影响土体扰动变形大小重要影响因素, 取土器内径越大, 轴线处土体扰动变形越小, 但减小幅度随着内径的增大而有所减小, 当取土器内径增大到一定程度后, 再增大取土器内径对减小土体扰动变形影响不大。

(4) 对于透明砂性土体, 颗粒间的连接作用较弱, 结构性不明显, 取土器贯入速率对土样的扰动变形影响不大。

取土器贯入引起的土体扰动变形问题是一个比较复杂的岩土工程问题, 目前对于取土扰动的研究多集中于室内试验, 基于常规试验研究土样扰动后相关物理力学性质的变化, 而对取土器贯入过程中土体微观变形特性研究却鲜有报导。本文基于透明土试验及 PIV 技术研究了不同尺寸、不同贯入速率下土体扰动变形特性, 并对其影响因素进行了分析, 但受本试验所采用的透明土材料所限, 其力学性质与仅与砂土类似, 与黏土的物理力学还有一定差异, 此外试验中取土器尺寸特性 (壁厚与内径比值) 与实际情况还有所差别, 对于这些问题还有待于今后进一步补充与完善。

参考文献:

- [1] HVORSLEV M J. Subsurface exploration and sampling of soils for civil engineering purposes[J]. WES Corp of Engineers, USA, 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] MOHSEN M, BALIGH Amr S, AZZOUZ, et al. Disturbances due to "ideal" tube sampling[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **113**(7): 739 - 757.
- [4] 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.
- [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] 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] SADEK S, ISKANDER M G, LIU J. Geotechnical properties of transparent silica[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(1): 111 - 124.
- [8] NI Q, HIRD C C, GUYMER I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry[J]. Géotechnique, 2009, **60**(2): 121 - 132.
- [9] AHMED M, ISKANDER M. Analysis of tunneling-induced ground movements using transparent soil models[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, **137**(5): 525 - 535.
- [10] LIU J, ISKANDER M G. Modelling capacity of transparent soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**(4): 451 - 460.
- [11] AHMED M, ISKANDER M. Evaluation of tunnel face stability by transparent soil models[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, **27**(1): 101 - 110.
- [12] 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))
- [13] 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, **36**(4): 838 - 848. (QI Chang-guang, CHEN Yong-hui, WANG Xin-quan, et al. Physical modeling experiment on buckling of slender piles in transparent soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **36**(4): 838 - 848. (in Chinese))
- [14] 吴跃东, 罗如平, 刘 坚, 等. 基于透明土的取土管贯入扰动变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(8): 1507 - 1512. (WU Yue-dong, LUO Ru-ping, LIU Jian, et al. Research on soil disturbance deformation induced by sampler tube penetration based on transparent soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(8): 1507 - 1512. (in Chinese))

(本文责编 明经平)