

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.01.010

基于透明黏土的取土器贯入扰动变形试验研究

刘同芳^{1,2}, 吴跃东^{1,2}, 周云峰^{1,2}, 刘 坚^{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: 为了解取土器贯入过程中黏土体的扰动变形特性, 采用由 Aristoflex AVC 制成的新型透明黏土及粒子图像测速(PIV)技术, 通过可视化模型试验装置进行了不同尺寸的取土器贯入试验。试验结果表明: 取土器贯入过程中各截面不同位置处的土体变形规律基本一致, 距离管壁越远, 变形越小; 取土器下部土体整体性较好, 且距离中轴线约 0.19 倍取土器内径范围内的土体剪应变较小, 室内试验可切取这部分土体; 取土器贯入引起的土体扰动变形主要由侧壁摩阻力及刃脚挤土效应引起, 增大取土器内径能有效减小取土器内土体的压缩变形。

关键词: 透明黏土; PIV 技术; 取土器; 贯入深度; 扰动变形

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)01-0077-07

Experimental study on disturbance deformation of soil sampler penetration based on transparent clay

LIU Tongfang^{1,2}, WU Yuedong^{1,2}, ZHOU Yunfeng^{1,2}, LIU Jian^{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: In order to understand the disturbance and deformation characteristics of clay during the penetration of soil sampler, the novel transparent clay made by Aristoflex AVC and the particle image velocimetry (PIV) technique were used to carry out the penetration tests of soil sampler with different sizes through the visual model test device. The test results show that the deformation distribution characteristics of soil in different sections are nearly the same, and the deformation decreases as it distances away from the tube wall. The soil at the lower part of the sampler has good integrity, and the shear strain of the soil within about 0.19 times the core diameter from the central axis of sampler is small, which is suitable for doing the laboratory experiment. Sampler penetration disturbance is mainly caused by the frictional resistance of the sidewall and the squeezing effect of edged foot, so increasing the inner diameter of soil sampler can effectively reduce the compressive deformation of soil in the sampler.

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

在岩土工程原状土取样过程中, 由于取土器刃脚处挤土效应及侧壁摩阻力等因素的影响, 取土器内部土体会受到扰动, 发生较大扰动变形, 其物理力学性质也将发生较大改变。原状土样质量低劣不能正确反映地基土层的真实性状, 可能导致对地基的估计过高, 使工程设计偏于危险; 更多的是导致对土质的评价过低, 造成资源浪费。

对于取土器贯入引起的土样扰动变形, 相关学者进行了一系列理论方法、数值模拟和室内模型试验方面的研究^[1-8]。取土器贯入扰动理论研究主要包括应变路径法和圆孔扩张法, 如 Baligh 等^[1]基于应变路径法分析了取土器贯入过程中取土器轴线处土体全过程应变; 左文荣等^[2]基于圆孔扩张理论推导出由取土器贯入引起的土体扰动变形场; 汪敏等^[3]结合应变路径法和球孔扩张理论, 基于小应变假定, 得到管桩压入过程

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B210202034)

作者简介: 刘同芳(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事软土地基处理研究。E-mail: 18362881087@163.com

通信作者: 吴跃东(1969—), 男, 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

引用本文: 刘同芳, 吴跃东, 周云峰, 等. 基于透明黏土的取土器贯入扰动变形试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 77-83.

LIU Tongfang, WU Yuedong, ZHOU Yunfeng, et al. Experimental study on disturbance deformation of soil sampler penetration based on transparent clay[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(1): 77-83.

中土体竖向位移和横向位移的解析解。在数值模拟研究方面,李家平等^[4]采用 ANSYS 对取土器压入土体过程做了初步数值模拟研究并对这一过程中产生的扰动进行了评价,同时分析了取土器参数对扰动的影响。

随着透明土配制技术的快速发展,将透明土与粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术结合使用的方法得到越来越多的应用。PIV 技术可以进行实时全场测量和分析,属于非接触式测量技术,不会对变形场产生干扰^[5]。采用透明土结合 PIV 技术进行试验可以非接触观测到土体的内部变形,因此该方法也广泛地用于岩土工程的机理研究。由于理论和数值模拟分析对取土过程做了一定程度的简化假定,且有限元的计算精度严重依赖于本构模型的选择以及相应参数的确定,因此通过试验方法获得取土器贯入过程中土样内部变形场的分布特性可成为一种较为可靠的研究手段。例如:Liu^[6]开发了一套透明土模型试验观测系统用于土体结构相互作用问题的研究;曹兆虎等^[7]基于 PIV 技术研究了桩体贯入透明土中的土体内部变形规律,结合数值模拟验证了模型试验的可靠性;吴跃东等^[8]基于透明土及 PIV 技术,通过模型试验研究了取土器贯入过程中土样扰动变形场的分布特性。已有模型试验多采用透明砂土,对于透明黏土中的取土扰动情况研究较少。

为加深对取土器贯入过程中土体变形规律的理解,观测取土器内部土体的变形情况,本文采用由 Aristoflex AVC 制成的新型透明黏土及 PIV 技术,通过取土器贯入扰动可视化模型试验装置,开展了不同内径的取土器贯入可视化模型试验,并对贯入过程中土体的变形规律进行了分析。

1 试验方法

1.1 试验材料及方案

为了更好地观察桩体或取土器贯入过程中土体的变形情况,可采用透明度较高且基本性质与土体较为接近的透明材料来模拟土体,目前主要采用无定型二氧化硅、Laponite RD 以及 Gelita 等材料^[9-13]配制透明土,但其透明度相对较低且物理力学性质与天然黏土有较大差距。本文选用吴跃东等^[14]研制的一种 AVC 新型透明黏土,该种透明黏土材料在半透明状态下具有 250 mm 的可视厚度,性质稳定,可满足取土器贯入模型试验中土体变形场的观测要求。

试验使用的 AVC 新型透明黏土采用克莱恩化工(美国)生产的 Aristoflex AVC 配制,Aristoflex AVC 常温下为白色粉末,含水率为 7%,pH 值(1% 水溶液)为 4~6,黏度(1% 水溶液)为 48~80 GPa·s。实际配制过程中采用去离子水以减少溶剂中的金属离子对 AVC 胶体强度的影响。采用多壁碳纳米管作为示踪粒子,在近红外光照射下产生荧光,可满足产生清晰散斑场的观测需求。

取土器尺寸对取土器贯入过程中的土体变形有较大影响^[15-18]。本文试验采用 3 组不同内径的取土器(图 1)研究其贯入过程中土体的变形情况,取土器长 $L=120$ mm,内径 $D=20、30、40$ mm,刃角 θ 设置为 5° ,壁厚 $t=2$ mm。试验中取土器贯入速度为 2 mm/s,土样中 AVC 透明胶体的质量分数为 2.5%,具体试验方案见表 1。

试验采用的 AVC 新型透明黏土属于一种高压缩性土体,与淤泥类似,用于模拟模型试验中的淤泥土。为了满足可视化需求,取土器的材质为无色透明有机玻璃,其下端为敞口,上端开设圆孔,类似于工程中常用的敞口薄壁取土器。试验采用匀速、静压贯入方式取样,与工程取样方式一致。

1.2 试验装置

取土器贯入扰动可视化模型试验装置如图 2 所示,主要包括阻尼式隔振光学平台、自动沉桩加载仪、激光光源、模型槽、取土器、透明土、带孔有机玻璃板、砝码、佳能 70D 单反相机。

试验采用的光学平台为标准阻尼式隔振光学平台,其上均匀分布螺纹孔以便于各类仪器的固定;自动沉桩

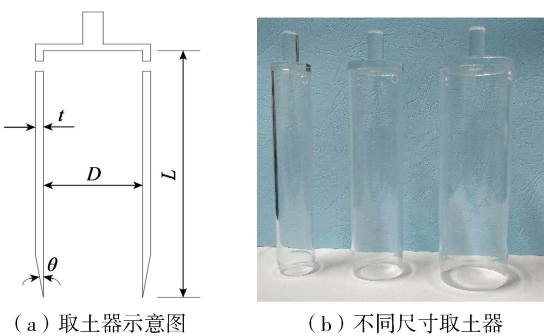


图 1 试验用取土器
Fig. 1 Soil sampler for tests

表 1 试验方案
Table 1 Test scheme

试验编号	内径/mm	刃角/(°)	壁厚/mm	附加荷载/kPa
D-20	20	5	2	2
D-30	30	5	2	2
D-40	40	5	2	2

加载仪上装配有调速电机,电机控制压杆的压入速度为 0~5 mm/s,压杆底部留有直径为 10 mm 的孔洞,通过螺母可将取土器固定在压杆上;激光光源为 EP532-2W 型半导体激光器。

试验所用模型槽和取土器材质均为有机玻璃,模型槽平面尺寸为 150 mm×150 mm,高度为 200 mm,厚度为 5 mm,模型槽底部中央带有微型凹槽,以便将其固定于光学平台上。为防止取土器贯入过程中管内空气压入透明土中,影响透明土的透明效果,在取土器上部开设两个圆孔。带孔有机玻璃板作为透明土的加载承台,孔洞大小比取土器大 1 mm,孔与取土器之间的空隙通过橡胶圈连接。

采用分辨率较高的佳能 70D 单反相机通过定时快门线实现图像的自动采集,图片处理软件为 PIVview2C。

1.3 试验步骤

a. 新型透明黏土按文献[14]进行配制,主要包括以下步骤:①按试验方案称取所需的去离子水,放入容积为 5~10 L 的密封桶内;②称取 Aristoflex AVC 粉末加入去离子水中;③搅拌机快搅约 20 min 后密封,阴凉处静置 8 h,避免阳光直射,确保 AVC 聚合物完全水解形成胶体;④精确称取多壁碳纳米管加入 AVC 胶体中,搅拌机慢搅至均匀;⑤使用真空泵抽出胶体中的气泡,静置 4~8 h,完成透明黏土的制备。

b. 基于透明黏土和 PIV 技术的取土器贯入试验主要包括以下步骤:①将配制好的透明黏土放入固定在光学平台上的模型槽中;②透明土上放置带孔有机玻璃板,板上放置砝码用于加载;③将不同尺寸的取土器与贯入系统的压杆连接;④调节相机至合适位置,设置单反定时快门线;⑤打开激光器,调节激光器功率至形成质量较高的散斑场,并保证激光切面、模型槽中心线及取土器中心线重合;⑥紧贴模型槽表面放置一把刻度尺并拍照记录,用于透明土像素标定;⑦调节自动沉桩加载仪至所需贯入速率,打开定时快门线开关,记录贯入过程。

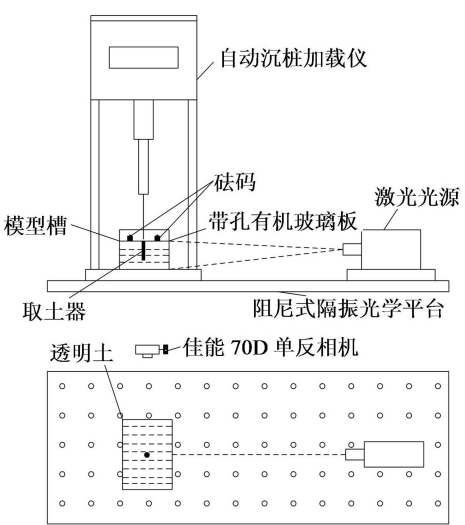


图 2 试验装置
Fig. 2 Test device

2 试验结果与分析

2.1 像素标定试验

通过读取图片上经过 PIVview2C 处理后得到的像素点坐标以及实际的刻度尺坐标值,拟合像素坐标与实际坐标之间的关系,将像素变形场乘以度量值即可得到实际的土体位移场。图 3 为试验土样的像素标定结果,可以看出像素坐标与实际坐标之间的线性关系十分显著,表明相机采集的图像质量较高,可采用统一的度量值(拟合曲线斜率)对像素坐标与实际坐标进行转换。

2.2 剪应变分析

图 4 为内径 40 mm 取土器贯入试验中试样的剪应变等值线,取土器贯入深度为 60 mm。从图 4 可以看出,贯入过程中土体最大剪应变为 0.2。对于取土器内部土体,其剪应变带主要分布在距离管壁 0.31D 范围内,取土器外部土体剪应变带主要分布在距离管壁 0.33D 范围内。因此在进行室内试验时应尽量采用取土器中轴线 0.19D 范围内的土体,即图 4 中斜线区域部分。剪应变等值线并未关于中轴线对称,这是因为透明黏土本身的非均质性以及实际贯入过程中透明黏土上部砝码质量有一定的差异,透明黏土受力并不完全相同所致。

2.3 透明黏土取土器轴线处土体变形分析

由于取土器贯入取土时,内部土体受到管壁的约束作用,其主要变形为竖向变形,因此选取典型的贯入深度,对取土器轴线处土体的竖向变形情况进行分析。其中土体变形为正表示土体向上隆起,为负表示土体向下压缩。

图 5 为内径 20 mm 取土器轴线处土体变形曲线(作为对比,以下各图中也给出了文献[19]的透明砂土试验结果)。图 5 中取土器贯入透明黏土不同深度时,轴线处土体均表现为压缩变形。贯入深度为 20 mm

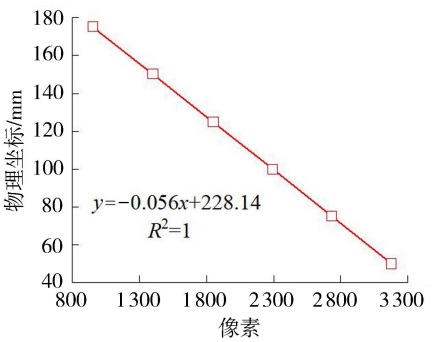


图 3 透明土像素标定曲线
Fig. 3 Pixel calibration curve of transparent soil

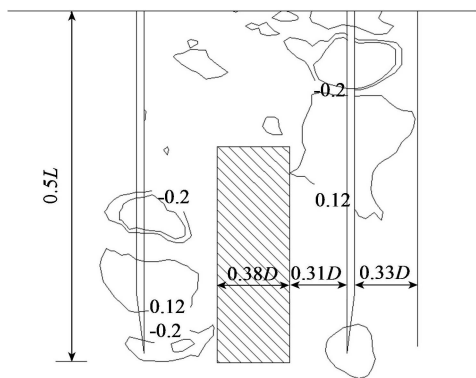


图 4 试样剪应变等值线

Fig.4 Shear strain contour of soil sample

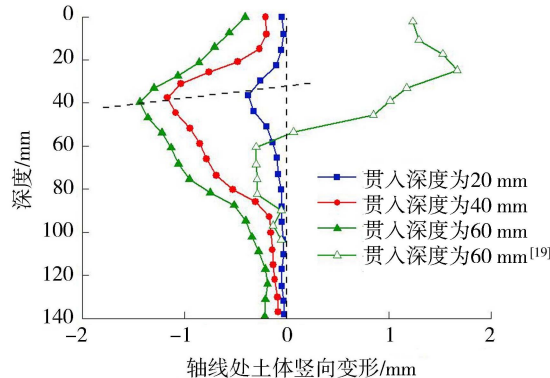


图 5 内径 20 mm 取土器轴线处土体变形曲线

Fig.5 Soil deformation curve at the axis of 20 mm-diameter soil sampler

时,轴线处土体压缩变形在距离土表 34.5 mm 深度处达到最大值 0.37 mm,随后逐渐减小,在 65 mm 深度处压缩变形接近于 0;随着贯入深度的增加,轴线各深度处的压缩变形不断增大,最大压缩变形位置逐渐下移,并沿着图中虚线方向延伸。这是因为取土器内部土体受到向下的侧壁摩阻力作用,土体表现为压缩变形,且随着贯入深度的增加,侧壁摩阻力增大,轴线处土体压缩变形增大。此外,随着取土器贯入深度的增加,其土体变形影响深度也逐渐增大,贯入深度为 60 mm 时的影响深度为 115 mm。与透明黏土有所不同,透明砂土主要表现为隆起变形,且随着深度的增加先增大后减小。

图 6 为内径 20 mm 取土器轴线处土体顶部位移曲线与最大变形曲线。可以看出,随着贯入深度的增加,取土器内透明黏土的压缩变形不断增大,当贯入深度为 60 mm 时,顶部压缩变形为 0.47 mm,最大压缩变形为 1.47 mm。这是因为随着贯入深度的增加,取土器内部侧壁与土体接触面积逐渐增大,向下的侧壁摩阻力逐渐增大,土体压缩变形增大。而透明砂土中取土器轴线处土体表现为隆起变形,且随着贯入深度的增加,隆起变形逐渐增大,当贯入深度为 60 mm 时,顶部隆起变形为 1.25 mm,比黏土中的扰动变形偏大 0.78 mm;最大隆起变形为 1.75 mm,比黏土中的扰动变形偏大 19.0%。

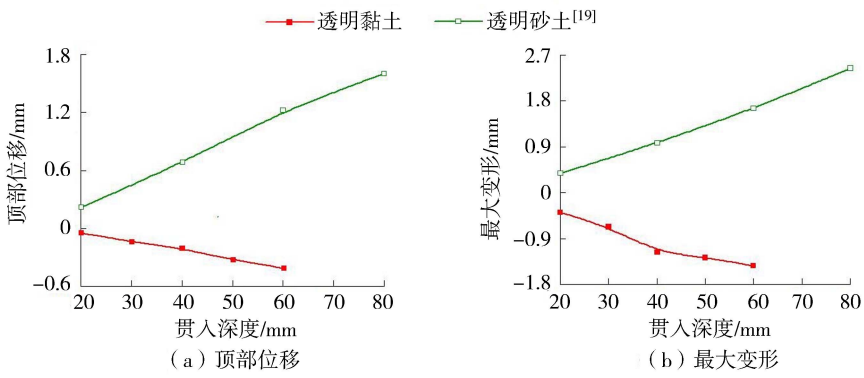


图 6 内径 20 mm 取土器轴线处土体顶部位移和最大变形

Fig.6 Top displacement and maximum deformation of soil at the axis of 20 mm-diameter soil sampler

图 7 为内径 30 mm 取土器轴线处土体变形曲线。与内径为 20 mm 取土器轴线处土体变形规律不同的是,沿取土器轴线方向上土体表现为部分隆起变形。贯入深度为 20 mm 时,距离土体表面 30 mm 内土体隆起变形逐渐减小,土体表面 30 mm 以下土体压缩变形逐渐增大,在 45 mm 深度处压缩变形达到最大值 0.25 mm,随后压缩变形逐渐减小,并在 88 mm 深度处接近于 0。随着贯入深度的增加,轴线处土体扰动变形逐渐增大,最大压缩变形位置随着贯入深度的增加逐渐下移。这是因为初始贯入时刃脚挤土效应显著,土体表现为隆起变形,随着贯入深度的增加向下的侧壁摩阻力逐渐增加,挤土效应逐渐减弱,两者的叠加作用使轴线处土体表现为压缩变形。与黏土中试验结果不同的是,透明砂土中轴线处土体表现为隆起变形。取土器贯入透明黏土过程中的土体变形影响深度随着贯入深度的增加而逐渐增大,贯入深度为 60 mm 时的影响深度为 118 mm;在透明砂土中也有类似的规律,但贯入相同深度时影响深度偏小 33.9%。

图 8 为内径 30 mm 取土器轴线处土体顶部位移曲线与最大变形曲线。从图 8 (a) 可以看出,在透明黏土中取土器顶部土体表现为隆起变形,且随着贯入深度的增加,隆起变形不断增大,贯入深度为 60 mm 时的顶部隆起变形为 0.54 mm。这是因为随着贯入深度的增加,土压力逐渐增大,取土器刃脚处挤土效应显著,顶部土体隆起变形逐渐增大。在透明砂土中取土器轴线处土体也有类似的变形规律,贯入深度为 60 mm 时的顶部隆起变形为 1.10 mm,比黏土中的扰动变形偏大 0.56 mm。从图 8 (b) 可以看出,在透明黏土中轴线处最大变形为压缩变形,且随着贯入深度的增加,最大压缩变形逐渐增大,贯入深度为 60 mm 时的最大压缩变形为 1.21 mm。这是因为随着贯入深度的增加,取土器内部侧壁与土体接触面积逐渐增大,向下的侧壁摩阻力逐渐增大,土体压缩变形增大。而在透明砂土中轴线处扰动变形为隆起变形,且随着贯入深度的增加,隆起变形逐渐增大,贯入深度为 60 mm 时最大隆起变形为 2.26 mm,比黏土中的扰动变形偏大 1.05 mm。

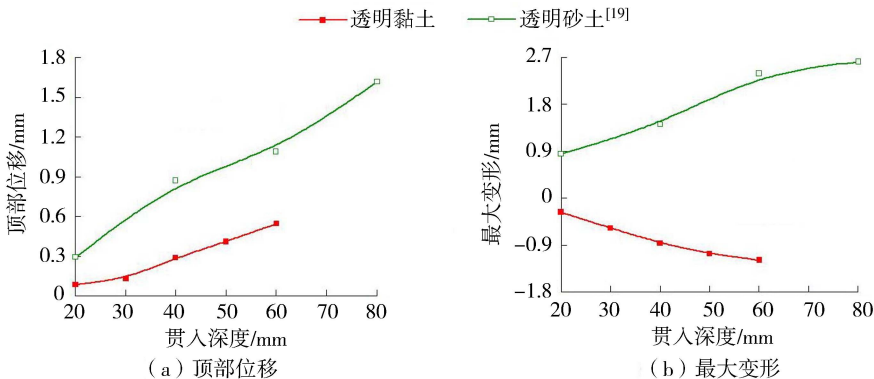


图 8 内径 30 mm 取土器轴线处土体顶部位移和最大变形

Fig. 8 Top displacement and maximum deformation of soil at the axis of 30 mm-diameter soil sampler

图 9 为内径 40 mm 取土器轴线处土体变形曲线,与内径为 30 mm 取土器轴线处土体变形规律相似,只是数值大小不同。贯入深度为 60 mm 时,在 52 mm 深度处压缩变形达到最大值 1.02 mm,与内径为 30 mm 取土器相比减小 15.7%,这表明增大取土器内径可减小贯入过程中的扰动变形。

为了方便表示取土器贯入的径向影响范围并进行影响因素分析,将土体变形影响深度 d 通过管内径 D 进行标准化,图 10 为取土器贯入深度与影响深度的关系曲线,可以看出,取土器贯入的影响深度随着贯入深度的增加而逐渐增大,当取土器贯入深度由 20 mm 增至 60 mm 时,其中取土器内径为 20 mm 时的扰动影响深度由 $2.5D$ 增至 $6D$,可能原因是随着贯入深度的增加,排开的土体增多,由于取土器的边界效应,土颗粒逐渐

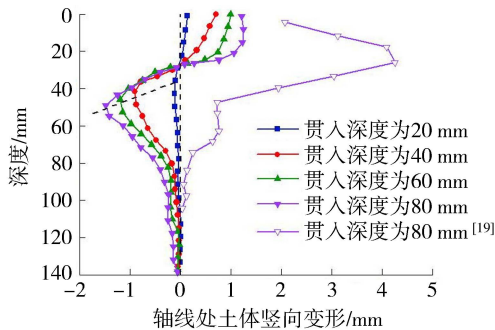


图 9 内径 40 mm 取土器轴线处土体变形曲线
Fig. 9 Soil deformation curve at the axis of 40 mm-diameter soil sampler

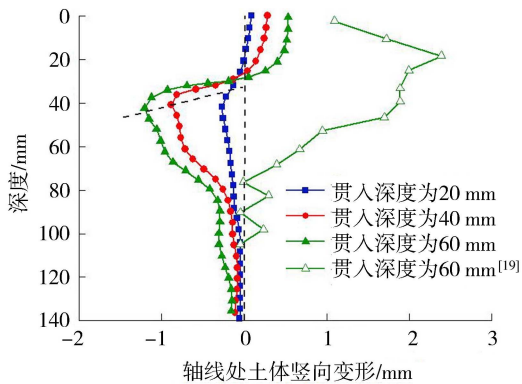


图 7 内径 30 mm 取土器轴线处土体变形曲线
Fig. 7 Deformation curve of soil at the axis of 30 mm-diameter soil sampler

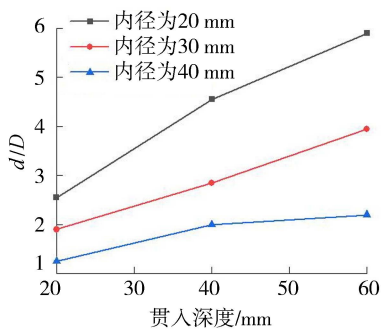


图 10 取土器贯入深度与影响深度关系
Fig. 10 Relationship between penetration depth of soil sampling and impact depth

竖向运动,同时造成表面的隆起和底部的压缩变形。此外,取土器内径的增大可减小扰动影响深度,以取土器贯入深度 60 mm 为例,取土器内径为 20 mm 时的扰动影响深度约为 115 mm(约 6D),而取土器内径增大至 40 mm 时的影响深度为 88 mm(约 2.2D),影响深度相比减小了 23.5%。

2.4 横截面上土体变形规律分析

图 11 为内径 40 mm 取土器、贯入深度为 60 mm 时不同截面上的变形特性(图中 4 个截面位于取土器横截面 8 等分点上,其中 A—A 截面位于取土器中轴线上)。由图 11 可以看出,各截面处土体变形特性基本相似,仅在变形大小上存在差异,距离侧壁较近的 D—D 截面处由于侧壁摩阻力相对较大,压缩变形最大。

图 12 为透明黏土同一横截面变形敏感性,其值为 A—A 截面与 D—D 截面的差值,图中还给出了透明砂土的试验结果^[19]。从透明黏土曲线可以看出,取土器顶部土体敏感性最大,随着深度的增加敏感性逐渐减小。土表横截面处敏感性为 0.15 mm,深度为 60 mm 的横截面处敏感性为 0.05 mm,仅为土表横截面处的 1/3。透明砂土与黏土在同一横截面处变形敏感性变化规律相似,土表横截面处敏感性为 0.33 mm,比黏土中试验结果偏大约 1 倍,深度为 60 mm 的横截面处敏感性为 0.11 mm。这表明黏土比砂土的整体性好,取土器下部土体敏感性较低,有较强的整体性。在进行室内试验时,可考虑采用取土器下部土体进行压缩、强度、渗透等试验。

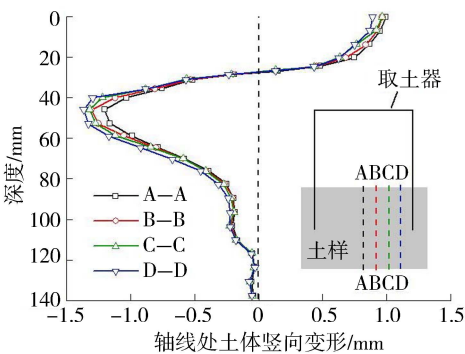


图 11 内径 40 mm 取土器各截面土体变形曲线

Fig. 11 Soil deformation curve of each section in a 40 mm diameter soil sampler

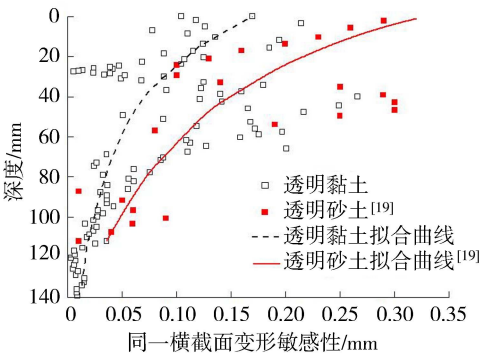


图 12 透明土体同一横截面变形敏感性

Fig. 12 Deformation sensitivity of different transparent soils at the same cross-section

3 结 论

- a. 取土器贯入扰动可视化模型试验装置具有非接触式测量的优点,能够实现取土器贯入过程中的可视化测量,其精度可以满足试验要求,对于取土器贯入过程中的变形研究具有重要意义。
- b. 取土器轴线处土体以压缩变形为主,取土器贯入引起的土体扰动变形主要由侧壁摩阻力及刃脚挤土效应引起,采用大直径的取土器可提高取土质量。
- c. 取土器贯入过程中各截面不同位置处土体变形规律基本一致,距离管壁越远,变形越小;取土器下部土体整体性较好,且距离中轴线 0.19D 范围内土体剪应变较小,室内试验时可切取这部分土体。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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 Wenrong, WU Yuedong, LI Zhiguo, 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))

[3] 汪敏, 储召军, 石少卿, 等. 基于应变路径法的压入管桩单桩挤土位移[J]. 后勤工程学院学报, 2015, 31(4): 23-30. (WANG Min, CHU Zhaojun, SHI Shaoqing, et al. Compacting displacement of press-in pipe pile based on strain path method [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2015, 31(4): 23-30. (in Chinese))

[4] 李家平, 高大钊, 李永盛. 取土器切入引起土体扰动的数值模拟分析[J]. 地质与勘探, 2003, 39(增刊 2): 113-118. (LI Jiaping, GAO Dazhao, LI Yongsheng. Numerical simulation of soil disturbance caused by sampling[J]. Geology and Exploration,

2003,39(Sup2):113-118. (in Chinese))

[5] 周安骐,徐振山,陈雨航,等. 多时距 PIV 技术在复杂流场测量中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):114-121. (ZHOU Anqi,XU Zhenshan,CHEN Yuhang,et al. Application of multi time-interval PIV technique in complex flow field measuremen[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(2):114-121. (in Chinese))

[6] LIU J. Visualization of 3D deformations using transparent “soil” models[D]. New York:Polytechnic University,2003.

[7] 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 Zhaohu,KONG Gangqiang,LIU Hanlong,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))

[8] 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 Yuedong,LUO Ruping,LIU Jian,et al. Soil disturbance deformation induced by penetration of sampler tube based on transparent soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(8):1507-1512. (in Chinese))

[9] ISKANDER M,LAI J,OSWALD C J,et al. Development of a transparent material to model the geotechnical properties of soils [J]. Geotechnical Testing Journal,1994,17(4):425-433.

[10] GILL D,LEHANE B. An optical technique for investigating soil displacement patterns[J]. Geotechnical Testing Journal,2001,24(3):324-329.

[11] WALLACE J,RUTHERFORD C. Geotechnical properties of LAPONITE RD® [J]. Geotechnical Testing Journal,2015,38(5):574-587.

[12] HAKHAMANESHI M,BLACK J A. Shear strength of transparent gelita:the effect of the mixture ratio,displacement rate, and over-consolidation ratio[C]//REDDY K R, YESILLER N, ZEKKOS D, et al. Geo-Chicago 2016: Sustainable Materials and Resource Conservation. Chicago:American Society of Civil Engineers,2016:443-453.

[13] HAKHAMANESHI M, BLACK J A, TATARI A. Optical characterization of transparent gelita using the modulation transfer function[C]//REDDY K R, YESILLER N, ZEKKOS D, et al. Geo-Chicago 2016: Sustainable Materials and Resource Conservation. Chicago:American Society of Civil Engineers,2016:421-433.

[14] 吴跃东,陈明建,周云峰,等. 新型透明黏土的配制及其基本特性研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(增刊1):141-145. (WU Yuedong,CHEN Mingjian,ZHOU Yunfeng,et al. Distribution and basic characteristics of new transparent clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2020,42(Sup1):141-145. (in Chinese))

[15] 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.

[16] 姜安龙,高大钊. 取土器直径对取样扰动的影响分析[J]. 工程勘察,2002(4):13-14. (JIANG Anlong,GAO Dazhao. Analysis of sampling disturbance effected by sampler diameter[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2002(4):13-14. (in Chinese))

[17] DIAO Hongguo,WU Yuedong,LIU Jian,et al. An analytical investigation of soil disturbance due to sampling penetration[J]. Geomechanics and Engineering,2015,9(6):743-755.

[18] PINEDA J A,LIU X F,SLOAN S W. Effects of tube sampling in soft clay:a microstructural insight[J]. Géotechnique,2016,66(12):969-983.

[19] 吴跃东. 软土地区取土扰动理论及试验研究[M]. 北京:科学出版社,2015.

(收稿日期:2023-03-05 编辑:熊水斌)