

DOI: 10.11779/CJGE201402018

# 基于透明土材料的沉桩过程土体三维变形模型试验研究

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. 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. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为了对沉桩过程中桩周土体内部的变形特性进行非插入式测量, 利用正十二烷、十五号白油混合液和玻璃砂合成透明土, 并在此基础上设计了沉桩模型试验系统; 该系统包括激光器、线性发生器、CCD (charge-coupled device) 相机、沉桩加载仪和计算机等。激光经线性发生器转化后将透明土样切分, 形成土体内部颗粒切面, CCD 相机连续拍摄沉桩过程中该切面的图像, 并通过计算机中图像处理软件进行分析, 得到该切面变形前后的变形位移场。通过与数值模型的对比分析, 验证模型试验结果的可靠性。对多个切面变形前后的位移场进行分析, 从而得到沉桩过程中土体变形的完整三维变形场。试验结果表明, 试验条件下沉桩水平挤土位移影响范围为  $8R$ ; 与常规模型试验方法相比, 方法实现了土体内部变形的三维测量, 有助于了解土体在各种荷载条件下的变形机理。

**关键词:** 透明土; 模型试验; 沉桩; 三维位移场

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2014)02 - 0395 - 06

**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 3-D soil deformation during pile penetration 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:** In order to meet the need for nonintrusively measuring the spatial deformation pattern in soils during pile penetration, the transparent soils made of glass sand and pore fluid with a matching refractive index are used. A small-scale laboratory modeling test system is designed. The system consists of a laser, a linear generator, a charge-coupled device (CCD) camera, a loading frame and a computer. A distinctive speckle pattern is generated by the interaction between the laser light and the transparent soils. A sequence of laser speckle images are recorded during pile penetration. They are then analyzed using the image processing technique, and the complete 2-D displacement field is obtained. By combining the multiple slices of 2-D displacement fields, a 3-D displacement field is obtained. The observed horizontal influence zone is  $8R$  from the pile shaft. The results show good agreement with the theoretical predictions of numerical method. Compared with the traditional test methods, the proposed system is more suitable for more advanced 3-D soil deformation measurements and can be employed to study the deformation mechanism of soils.

**Key words:** transparent soil; model test; pile penetration; 3-D displacement field

## 0 引言

静压桩沉桩过程造成周围土体的强扰动会对周围既有建筑物、地下隧道及环境等产生不利影响。因此, 研究静压桩沉桩过程中土体变形具有重大现实意义。目前国内外学者围绕静压桩沉桩挤土效应开展了大量研究, 包括理论方法、数值模拟和室内模型试验等。在室内模型试验方面, 陈文等<sup>[1]</sup>利用离心模型试验对饱和黏土中静压桩的挤土效应进行了研究; 徐建平<sup>[2]</sup>、周建等<sup>[3]</sup>利用半模桩试验, 观测土体中位移标志点的位移, 分别得到软黏土和砂土中静压桩沉桩引

起的土体位移场。但是在类似模型试验中半模桩的使用并不能反映土体内部真实边界条件。随着 Iskander 等<sup>[4]</sup>利用无定型硅和具有相同折射率的孔隙液体合成透明土, 使土体内部变形的可视化变成了可能。Lehane 等<sup>[5]</sup>利用透明土和图像技术, 在透明土内部预埋黑色示踪点, 通过追踪示踪点的位移来测量桩

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 - 06 - 21

周土体的位移场,但是得到的位移场反映的仅是土体内部有限的离散点的位移,而且示踪点的布置费时费力。White等<sup>[6]</sup>采用流体速度测量中普遍采用的PIV (particle image velocimetry) 技术及图像测量技术实现了半模桩周砂土整个位移场的测量。李元海等<sup>[7]</sup>利用相似的图像相关分析得到了砂土模型试验整个变形场的测量。刘君等<sup>[8]</sup>利用PIV技术在大型振动台模型试验中获得了边坡变形直至破坏的完整过程。

综合上述,现有室内模型试验得到的大多是一定条件下土体某个切面变形的二维位移场,对真实条件下任意切面的位移场及三维位移场的研究目前还相对较少。因此,基于以上的各种试验技术的优缺点,本文联合使用透明土材料和PIV技术,开发了一套基于透明土的沉桩加载系统和光学测量系统(光学平台、CCD相机、激光器等),对静压桩沉桩过程进行非插入式测量,得到一系列图像,经过PIV技术处理后得到某个切面变形前后的二维位移场,并通过对多个切面的测量,得到土体变形前后的三维位移场。

## 1 模型试验系统

### 1.1 透明土的基本性质

透明土的基本原理就是利用透明颗粒材料和具有相同折射率的孔隙液体混合,排除空气得到透明的饱和人工土,该土性质与天然土体具有相似的岩土工程性质。目前主要有两类人工合成透明土:一类是用无定型硅石粉末合成的透明土,其性质与黏土相近;一类是用无定型硅石凝胶或熔融石英砂合成的透明土,其性质与砂土相似。孔隙液体主要有两种:一种是烷烃类溶剂和矿物油按一定质量比混合;另一种是一定浓度的溴化钙溶液。Iskander等<sup>[9]</sup>、Sadek等<sup>[10]</sup>和Cao等<sup>[11]</sup>对相应的透明土的基本性质开展了大量试验工作,并与天然土体相对比,发现其能较好模拟天然土体,并广泛应用于岩土工程模型试验。

但是对于模拟砂土,硅石凝胶内部具有大量的微细孔道,压缩性较大;而熔融石英砂常含有杂质,影响透明度。故本文采用纯度更高的玻璃砂,基于模型试验相似率及散斑场清晰度等因素考虑,其粒径选用0.5~1 mm,其基本物理性质:材料为透明土,比重 $=2.186$ ,粒径 $=0.5\sim 1\text{ mm}$ ,最小干密度 $\rho_{\min}=0.970\text{ g/cm}^3$ ,最大干密度 $\rho_{\max}=1.274\text{ g/cm}^3$ ,相对密度 $=70\%$ 。孔隙液体则采用正十二烷和十五号白油按质量比1:4的混合液,性质稳定,相对溴化钙溶液,无腐蚀性。本文所采用的透明土样其直剪试验内摩擦角为 $39.4^\circ$ (油样);孔纲强等<sup>[12]</sup>对相应级配的玻璃砂透明土开展了一系列基本性质试验、直剪试验及三轴试验,

并与福建标准砂进行了对比,研究表明,相比硅石凝胶和熔融石英砂,其透明度更高,能更好模拟天然砂土应用于岩土工程模型试验。

### 1.2 试验装置

试验装置的具体位置如图1所示,考虑到透明土本身透明度及模型试验的可操作性,采用小尺寸有机玻璃槽,立方体,内部加肋以增加整体刚度,上部开口,外边平面尺寸为 $130\text{ mm}\times 130\text{ mm}$ ,壁厚 $5\text{ mm}$ ,高度为 $260\text{ mm}$ ;其中一外侧面由精密机床钻两列对称圆孔并漆成红色作为参考点,其直径为 $2\text{ mm}$ ,深度为 $1\text{ mm}$ 。这些参考点可用于像素坐标和物理坐标之间的转换。制成后的透明土移至模型槽后,保持土层上表面部为自由面,不再施加预压力,预压力会使透明度降低,这与Ni等<sup>[13]</sup>发现相似。

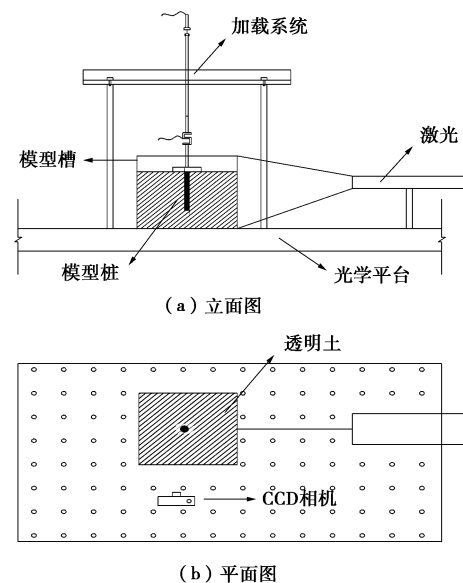


图1 模型试验装置示意图

Fig. 1 Model test set-up

光学平台采用阻尼材料,铁磁不锈钢表面,台面平整度高,台面布置阵列的标准孔距( $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ )的螺纹孔(M6),可方便固定其他设备及装置。平台的具体尺寸为长 $1800\text{ mm}\times$ 宽 $1200\text{ mm}\times$ 高 $800\text{ mm}$ ,台面厚度 $200\text{ mm}$ ,采用四支撑,支架高度 $600\text{ mm}$ ,试验前调整支架使台面保持平整。蜂窝状支撑内芯结构,抗振性能好,可减少加载系统和外界环境所产生的振动,提高整个模型试验的可靠性。

CCD相机具体参数为分辨率 $1200\times 960$ ,帧曝光,帧数15,曝光时间 $100\text{ }\mu\text{s}\sim 30\text{ s}$ ,通过自带软件将拍摄模式调整为连续自动拍摄可得到沉桩过程中的一系列图像。CCD相机通过螺栓固定在测试支架上,通过调节支架高度及相机焦距,可得到理想的视场,整个测试支架固定在光学平台上。

激光器采用氩氦激光器, 功率为 35 mW, 并配有线性转换器, 用于将点光源转化为线性光源, 试验前调整激光器在光学平台上的位置使其光源中心线形成的切面垂直, 并对准模型槽的对称中心。

沉桩加载仪采用静压方法, 整体框架由高强度钢材和螺栓组成, 起着稳定和传递反力的作用; 同时可以通过光学平台表面螺孔来固定加载仪, 提高整个系统的稳定性; 加载仪由电机提供稳定的沉桩速率, 范围为 0.1~10 mm/s。

### 1.3 PIV 技术原理

PIV 技术是基于图像匹配技术发展起来的一种流体速度测量技术, 其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。

通过关联函数得到该图像块从  $t_1$  时刻到  $t_2$  时刻的位移, 通过各个小图像块的位移便可得出整个图像的位移场。为了提高位移场的精度, 图像分析时图像尽可能的要小, 但是图像块越小, 计算量越大, 速度也越慢。通常一些学者采用傅里叶形式等关联函数。刘金元等<sup>[14]</sup>对 PIV 相关原理、匹配过程及精度分析做了大量研究。

### 1.4 试验过程及研究工况

保证相机镜头轴线垂直于激光穿透土体形成的切面, 调节光圈和焦距, 使视场宽度大约为桩径的 12 倍; 未加载前, 拍摄初始模型灰度图像作为参考图像, 此后相机的位置及焦距等不可改变; 沉桩过程中确保桩身垂直, 斜率不大于 0.5%, 沉桩速率恒定为 1 mm/s; 相机通过计算机控制, 间隔 1 s 自动拍摄一张图片, 整个过程保持所处空间光线均匀, 以减少光线对试验结果的影响, 直至沉桩结束; 鉴于模型槽尺寸的大小 (受限于透明度) 及边界效应, 模型桩采用不锈钢桩, 直径 10 mm。为了验证模型试验的可靠性, 同时利用天然砂土进行了一组相同试验条件下的半模型桩沉桩试验和一组数值模拟分析, 具体研究工况如表 1 所示。

表 1 研究工况

Table 1 Test conditions

编号	土体类型	桩径/mm	备注
1	透明土	10	全模试验
2	砂土	10	半模试验
3	砂土	10	数值模拟

## 2 二维模型试验结果与分析

试验过程中可通过调整激光位置, 独立形成 5 个切面, 如图 2 所示, 分别分析沉桩过程中每个切面的散斑场, 即可得到相对应的位移场。

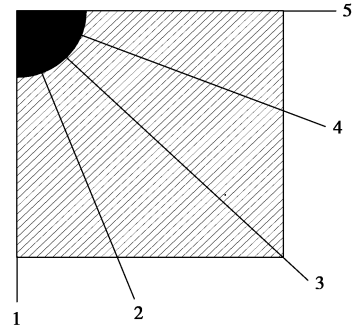


图 2 激光切面示意图

Fig. 2 Laser speckle patterns

### 2.1 典型位移场

对激光形成的切面 5 进行分析, 得到沉桩过程中桩周土体变形的二维位移场。如图 3 所示为相应的位移箭头矢量图, 图 3 (a) 为桩端从 0~7R, 图 3 (b) 为桩端从 0~13R。图中坐标表示距离, 从图中可以看出桩周土体位移以斜向上挤出形式为主。

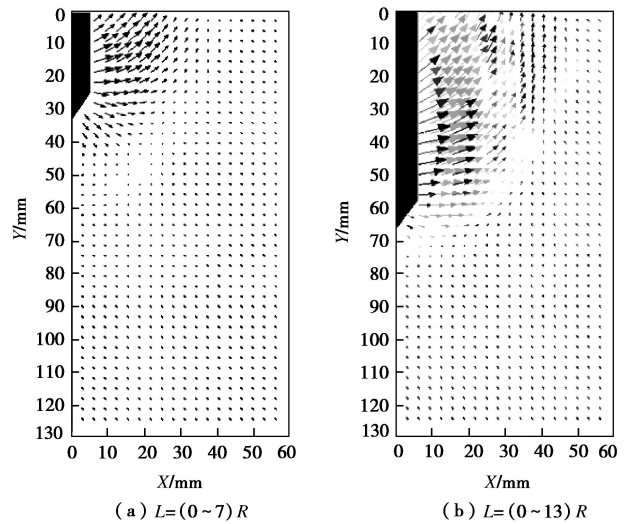


图 3 位移矢量图

Fig. 3 Typical displacement vectors

为了更直观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  $R$  进行标准化。图 4 (a)、4 (b) 分别为沉桩深度  $L$  从 0 到 7R 时, 桩周土体的水平位移轮廓图和竖向位移轮廓图; 图 5 (a)、5 (b) 分别为沉桩深度  $L$  从 0 到 13R 时, 桩周土体的水平位移轮廓图和竖向位移轮廓图。从图 4 和图 5 可以发现, 由于桩尖角

度的存在，桩周土体颗粒由于挤压，向桩侧斜上方运动，随着沉桩深度的增加，桩侧水平位移和竖向位移均增大。当沉桩深度为  $13R$  时，水平位移最大影响范围为  $8R$ ，竖向位移最大影响范围为  $10R$ ，土体表现一定隆起。对于桩尖以下土体，沉桩对其最大影响范围在桩尖下端  $3R$  处。

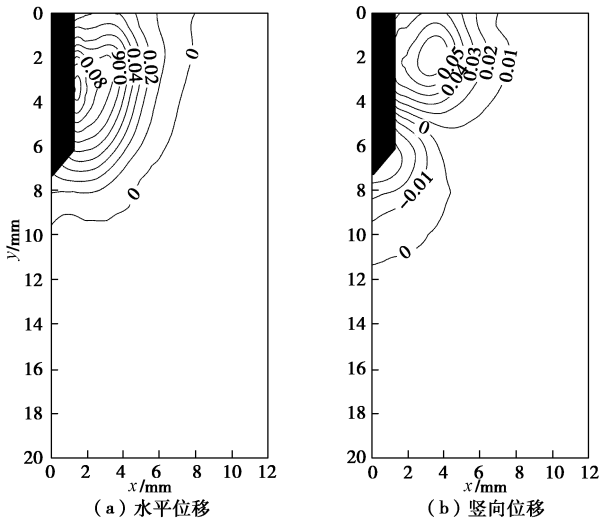


图 4  $L = (0 \sim 7)R$  位移轮廓图

Fig. 4 Displacement contours from  $L = 0$  to  $7R$

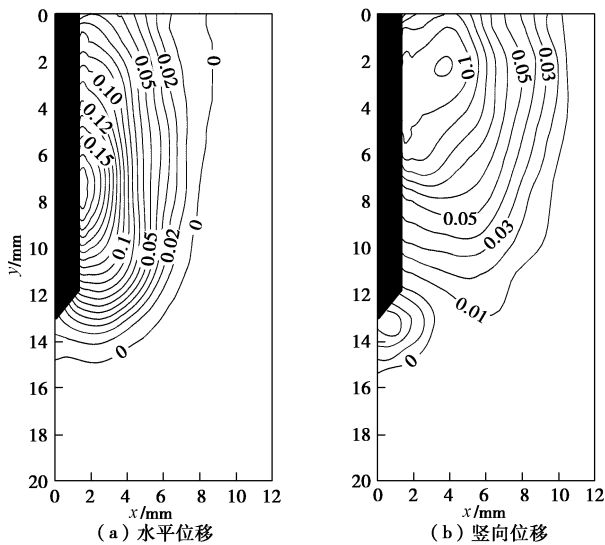


图 5  $L = (0 \sim 13)R$  位移轮廓图

Fig. 5 Displacement contours from  $L = 0$  to  $13R$

### 2.2 与数值模拟结果的对比分析

任意拉格朗日-欧拉方法 (Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE) 集合了 Lagrangian 有限元和 Eulerian 有限元的优越性，通过材料运动和网格运动的独立描述，能有效控制网格的扭曲和变形，保证网格的质量和计算质量<sup>[15]</sup>。在解决大变形问题时具有一定优越性<sup>[16-17]</sup>。采用 Abaqus 中 ALE 方法模拟压桩贯入过程，分析桩周土体位移的变化过程，并与试验结果进行对比分析。

模型建立时，桩体为直径  $10\text{ mm}$  的刚体模型，其变形忽略，大小尺寸、贯入深度等与试验模型桩保持一致；地基层层为砂土，采用线弹性模型，弹性模量取  $50\text{ MPa}$ ，泊松比  $0.3$ ，重度取  $18\text{ kN/m}^3$ ，为了减小模型的尺寸效应，砂土地基半径为  $300\text{ mm}$ ，深  $300\text{ mm}$ 。桩土接触切向为罚接触，摩擦系数  $0.15$ ；法向为硬接触。采取桩顶施加位移边界条件的方法模拟连续稳步的压桩贯入过程。为了简化计算，采用轴对称模型来计算分析，如图 6 所示。

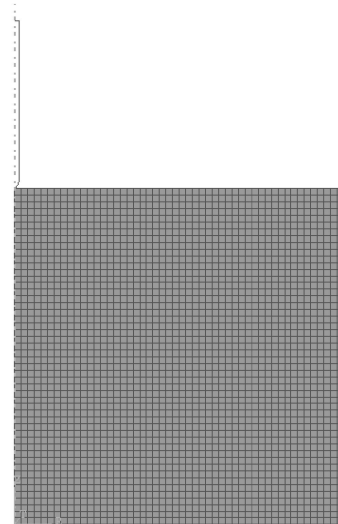


图 6 静压桩轴对称模型

Fig. 6 Axisymmetric model of jacked pile

在静压桩贯入过程的 ALE 模拟中，网格在不断移动，某时刻水平位移等值线图如图 7 所示。由于网格节点不在对应某一固定物质点，所以位移的等值线图是没有意义的。通过定义某些轨迹点来跟踪物质点的变化，得到这些轨迹点变量随时间的变化过程。当沉桩深度  $L$  为  $13R$  时，对计算结果进行整理，得到距离桩中心轴线  $3.6R$  处土体沿深度方向的水平位移，并与透明土试验及砂土半桩模型试验值进行比较。如图 8 所示，显示了沉桩贯入过程中的挤土效应。通过图 8 发现，距离桩中心轴线  $3.6R$  处沿贯入深度方向土体的水平位移变化趋势是一致的；在贯入深度以上接近土体表面部分，误差比较大，这可能与模型的大小及土体性质差异有关，同时试验模型相似比，图像后处理也存在一定的误差。总体来说，透明土模型试验能很好模拟沉桩贯入过程中的挤土效应。

### 3 三维模型试验结果与分析

利用 Iskander 等<sup>[18]</sup>获取三维变形场的方法，通过对激光形成的 5 个切面图像进行分析，可以得到完整的桩身土体的三维位移场。当沉桩深度  $L=13R$  时，桩身土体的位移场切面图如图 9 所示。图中坐标  $Y$  为沉桩深度方向， $X$  为径向， $Z$  为切面间隔。竖向、径向

及土体位移大小均通过桩半径  $R$  标准化, 从图中可以看出, 各个切面的位移场规律基本一致, 靠近桩身附近位移大小相差稍大, 一方面可能是桩身附近应变较大, 一方面可能是激光穿过一定距离后到达桩身附近时光强度相对较弱, 形成的散斑不清晰, 后处理时误差较大。

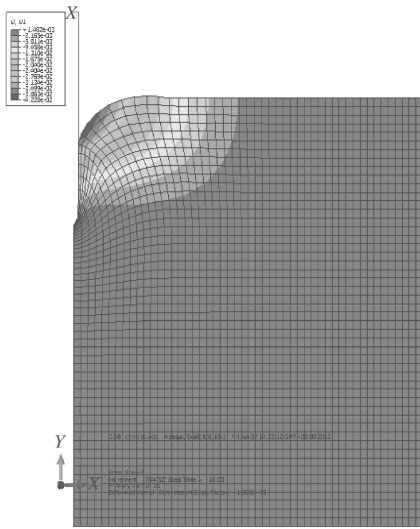


图 7 贯入过程网格位移等值线图

Fig. 7 Displacement of mesh joint during penetration

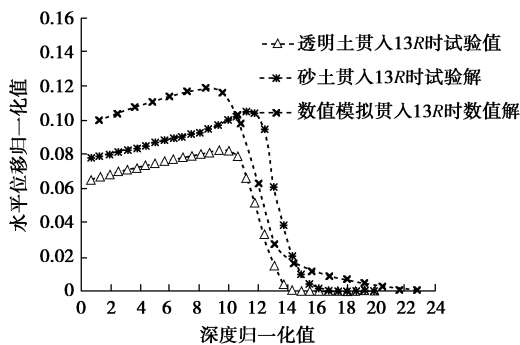


图 8 贯入过程挤土位移对比图

Fig. 8 Comparison of soil squeezing displacement during penetration

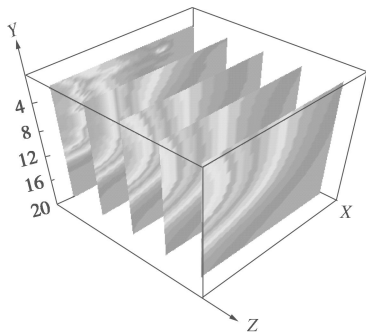


图 9  $L = (0 \sim 13)R$  桩周土体位移场切面图

Fig. 9 Slices of displacement fields around pile from  $L = 0$  to  $13R$

通过坐标转换并进行插值可以得到整个桩周土体三维位移场, 如图 10 所示,  $Y$  为沉桩深度方向,  $X, Z$  均为径向。从图中可以得到桩周任意位置土体的位移, 其挤土位移形式与传统圆孔扩张理论基本一致能够很好反映贯入过程中的挤土效应。同时从图中可以发现, 土体颗粒的实际运动并不全部沿理论上的径向, 存在一定差异。

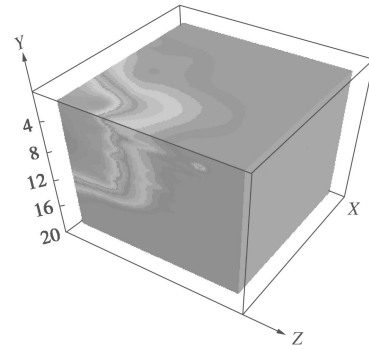


图 10  $L = (0 \sim 13)R$  桩周土体三维位移场

Fig. 10 3-D displacement fields around pile from  $L = 0$  to  $13R$

## 4 结 论

(1) 基于透明土材料和 PIV 技术的模型试验系统可以获得各种荷载条件下土体内部的变形规律及土体变形的三维位移场, 相比已有试验方法 (X 射线、计算机三维层析成像、磁共振成像等), 简便有效而且经济实用, 对进一步研究土体变形机理及各种岩土工程问题本质具有重要意义。

(2) 通过一个透明土沉桩贯入模型试验实例, 得到沉桩过程中土体内部的变形规律, 结合数值模拟验证了模型试验的可靠性, 最后得到桩周土体的三维位移场, 其挤土位移形式与传统圆孔扩张理论基本一致, 能够很好反应沉桩贯入的挤土效应。相对天然砂土, 透明土挤土位移试验值相对偏小, 可能是弹性模量的差异及透明土中孔隙液体的存在造成。

(3) 通过水平位移的归一化, 本试验结果表明沉桩水平位移的影响范围在  $8R$  附近。

模型试验中, 针对模型的尺寸效应、边界条件和光照强度等因素对测量精度的影响, 还需要通过离心机试验等进一步研究得出。

### 参考文献:

[1] 陈文, 施建勇, 龚和平, 等. 饱和黏土中静压桩挤土效应的离心机模型试验研究[J]. 河海大学学报, 1999, 27(6): 103 - 109. (CHEN Wen, SHI Jian-yong, GONG He-ping, et al. Centrifugal model tests of piles jacked in saturated clay[J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(6): 103 - 109. (in

- Chinese))
- [2] 徐建平, 周 健, 许朝阳, 等. 沉桩挤土效应的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2000, **21**(3): 235 - 238. (XU Jian-ping, ZHOU Jian, XU Zhao-yang, et al. Model test research on pile driving effect of squeezing against soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, **21**(3): 235 - 238. (in Chinese))
- [3] 周 健, 邓益兵, 叶建忠, 等. 砂土中静压桩沉桩过程试验研究与颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(4): 501-507. (ZHOU Jian, DENG Yi-bing, YE Jian-zhong, et al. Experimental and numerical analysis of jacked piles during installation in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(4): 501 - 507. (in Chinese))
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李元海, 朱合华, 上野胜利, 等. 基于图像相关分析的砂土模型试验变形场测量[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 36 - 41. (LI Yuan-hai, ZHU He-hua, KATSUTOSHI Ueno, et al. Deformation field measurement for granular soil model using image analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 36 - 41. (in Chinese))
- [8] 刘 君, 刘福海, 孔宪京, 等. PIV 技术在大型振动台模型试验中的应用[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(3): 368 - 374. (LIU Jun, LIU Fu-hai, KONG Xian-jing, et al. Application of PIV in large-scale shaking table model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(3): 368 - 374. (in Chinese))
- [9] ISKANDER M, LIU Jin-yuan, SADEK S. Transparent amorphous silica to model clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(3): 262 - 273.
- [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. 玻璃砂透明土变形特性三轴试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1140 - 1146. (GONG Gang-qiang, LIU Lu, LIU Han-long, et al. Triaxial tests on deformation characteristics of transparent glass sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1140 - 1146. (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] LIU Jin-yuan. Visualization of 3-D deformation using transparent “soil” models[D]. New York: Polytechnic University, 2003.
- [15] 费 康, 张建伟. Abaqus 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. Application of Abaqus in geotechnical engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010. (in Chinese)).
- [16] SHENG Dai-chao, NAZEM Majidreza, CARTER John P. Some computational aspects for solving deep penetration problems in geomechanics[J]. Computational Mechanics, 2009, **44**(4): 549 - 561.
- [17] 毕庆涛, 肖昭然, 丁树云, 等. 静压桩压入过程的数值模拟 [J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 2): 74 - 78. (BI Qing-tao, XIAO Zhao-ran, DING Shu-yun, et al. Numerical modelling of penetrating of jacked piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S2): 74 - 78. (in Chinese))
- [18] ISKANDER M, LIU Jin-yuan. Spatial deformation measurement using transparent soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, **33**(4): 314 - 321.