

DOI: 10.11779/CJGE2020S1041

非接触测试技术在模型沉桩试验中的应用

姜 赘¹, 陆 烨^{*}, 唐侨楚¹, 王校勇²

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 上海勘察设计研究院(集团)有限公司, 上海 200093)

摘要: 以数字图像相关技术为基础, 在不接触被测物体表面的情况下, 采用无标识点法捕捉室内静压桩模型试验中土体的位移信息, 分析并获得土体的位移规律。通过自行编制的 MATLAB 计算程序, 可以计算提取出压桩过程中土体所有位置在任意时刻的位移变化, 从而对不同桩型、不同排土体积产生的土体位移进行了动态分析, 拟合了土体的位移轨迹。同时, 通过设置局部摄像头, 观测分析了在桩土界面的扰动薄层位移特征。研究表明: 土体的水平位移随桩体的压入逐渐增大至稳定。当桩径一致时, 方桩具有比圆桩更强的挤土作用, 且在土体深处两者的差异更为明显。但当排土体积一致时, 方桩与圆桩之间的差异较小。桩-土界面扰动层厚度约为 5.7~8.6 倍平均粒径, 层内土体随桩体压入向下移动; 当桩体穿过观察区后, 扰动层位移逐渐减小。

关键词: 非接触测试技术; 静压桩; 土体位移; 桩-土界面

中图分类号: TU411.93 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0208-06

作者简介: 姜 赘(1994—), 男, 江苏常州人, 硕士, 研究方向为砂土室内试验及桩基础方面研究。E-mail: jiangyun7500@163.com。

Application of non-contact testing technology in model tests on press-in piles

JIANG Yun¹, LU Ye¹, TANG Qiao-chu¹, WANG Xiao-yong²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the digital image correlation technology, the displacement information of the soil in the model pile tests is obtained without marking and touching the surface, and the displacement laws of the soil is analyzed. The calculation program is compiled by using the MATLAB. The soil displacement and its change at any position and at any time in the tests can be extracted by calculation. In addition, the soil displacement caused by different pile types and different diameters is dynamically analyzed, and the displacement trajectory of the soil is fitted. At the same time, by setting up a local camera, the disturbance layer at the pile-soil interface is observed and analyzed. The study shows that the horizontal displacement of soil increases gradually to stability during pile press-in. When the diameter of the pile is the same, the soil-squeezing effect of the square pile is obviously stronger than that of the circular pile, and the difference between them is more obvious at the deep depth of the soil. But when the discharge volume is the same, the difference between the square pile and the circular pile is small. The thickness of the disturbance layer is about 5.7~8.6 d_{50} and the soil in this layer moves downward when the pile passes through, the displacement of the layer gradually decreases.

Key words: non-contact testing technology; press-in pile; soil displacement; pile-soil interface

0 引言

静压桩在软土地区及一些不允许强烈振动的地方是一种有效的施工方法。沉桩过程中桩体与周围土体相互作用, 一方面会影响桩体的承载力, 另一方面会引起周围土体的变形, 对临近建筑物、基础或地下建筑产生不利影响^[1]。目前很多学者对静压沉桩挤土效应开展了大量研究, 由于现场试验成本过高, 室内模型试验^[2]对压桩过程土体位移的研究较多。

非接触测试技术是以光电、电磁等技术为基础,

在不接触被测物体表面的情况下, 得到物体表面参数信息的测量方法。岩土工程领域中, 可以通过数字图像相关技术(digital image correlation, DIC)对桩周土体位移场进行非接触测量。部分学者^[3-4]采用半模桩并观测土体中标志点移动情况来得到土体的位移场, 但是这些试验中需要人为设置固定的标记点。相

基金项目: 上海市自然科学基金项目(16ZR1411900)

收稿日期: 2020-06-03

*通信作者(E-mail: ye.lu@shu.edu.cn)

关学者基于粒子图像测速技术 (particle image velocity, PIV) 技术^[5-6], 采用透明土和自行设计的静压桩模型试验系统进行试验, 但由于透明土本身的性质, 模型箱和桩体尺寸受到限制。另外, 相关研究对不同桩型、不同排土体积下压桩对土体产生的扰动对比也较少。沉桩过程中, 土颗粒与桩体相互作用, 界面处会形成一层较薄的剪切扰动区, 该区域较难观测, 尽管可以借用界面剪切试验对类似的颗粒位移进行研究^[7-8], 但其与实际压桩时产生的扰动区规律并不完全相同。

基于 DIC 技术原理, 通过 MATLAB 软件自行编制计算程序, 对压桩过程中桩侧土体的连续变形过程采用无标示点方法进行采集并分析。与商业的 PIV 系统相比, 本系统经济实用、数据处理灵活, 通过计算可以提取出试验过程中所有位置任何时刻的位移变化, 并且可以导出矢量图以及位移平均值。采用这一非接触图像测量系统对多组工况下 (不同桩型、不同排土体积) 的土体位移进行了动态分析, 同时对剪切扰动区域的颗粒位移单独记录, 分析并得到了相应位移的规律。

1 试验概况

1.1 试验设备

图 1 展示了试验过程中的主要设备, 包括图像采集设备——数码相机、摄影灯等, 压桩试验设备——模型箱 ($1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$)、加载系统、模型桩等。试验过程中利用高清数码相机对桩侧土体进行录像记录, 在玻璃近表面处安装微距摄像头记录桩-土界面剪切扰动层的情况。桩体最终贯入深度为 450 mm, 贯入速度为 2.5 mm/s。



图 1 模型装置示意图

Fig. 1 Schematic view of model test setup

1.2 试验材料

本文采用自然风干的建筑黄砂进行试验。在铺设砂土时, 采用雨落法分层铺设, 砂土层铺设总厚度为 800 mm。另外, 对试验用砂还进行了筛分试验, 确定

了试验用砂的级配曲线, 得到 $d_{10}=0.20\text{ mm}$, $d_{30}=0.29\text{ mm}$, $d_{50}=0.35\text{ mm}$, $d_{60}=0.38\text{ mm}$, $C_u=1.90$, $C_c=1.05$ 。因此该试样为颗粒级配不良中细砂, 属于均粒土。

1.3 模型试验工况

模型桩紧贴玻璃面压入, 因此采用多组半模铝合金桩, 具体参数见表 1。与同样运用图像技术的研究^[5-6] (桩径约 5.7~10 mm) 相比, 扩大了模型箱和桩的尺寸。本文共设计了 3 种桩型, 以研究不同桩型的挤土效应。其中, JY-1 为圆桩; JY-2 为方桩, 与 JY-1 等截面; JY-3 为方桩, 与 JY-1 等径。

表 1 模型试验工况

Table 1 Information of model tests on press-in piles

工况	桩型	桩直径 D/mm	桩靴角度/ $(^\circ)$	全场标定系数 $/(\text{mm/pixel})$
JY-1	圆桩	50	180	0.557
JY-2	方桩	44.3	180	0.563
JY-3	方桩	50	180	0.571

1.4 DIC 原理及操作软件

作为一种非接触测试技术, 数字图像相关技术有着全场测量、无损、对测量环境要求低的优点。近年来, 许多学者进行了大量的研究工作并取得了一系列的研究成果, DIC 技术在工程领域及模型试验中发挥越来越重要的作用。DIC 技术的原理是将获得的图像进行灰度处理, 并分成一个个小的图像子集, 通过互相关计算得到每个图像子集的位移, 从而最终获得整个图像的位移场。其原理如图 2 所示。

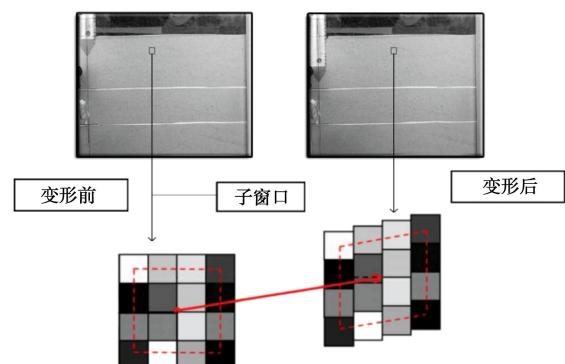


图 2 DIC 技术原理

Fig. 2 Principle of DIC technology

每个子窗口的灰度值分布可以定义为一个函数 $f(i, j)$, 被拍摄对象变形或移动后的第二幅图像中对应子窗口的灰度值分布函数为 $g(i + \Delta x, j + \Delta y)$ 。 Δx 和 Δy 可以表示为 i 和 j 的位移^[9]。图像匹配的标准函数为

$$C = \frac{\sum [f(i, j) - g(i + \Delta x, j + \Delta y)]^2}{\sum f^2(i, j)} \quad (1)$$

基于 DIC 原理, 本文利用 MATLAB 语言编制计算程序, 并与可视化的图形用户界面 (GUI) 相结合,

设计了一个可供反复使用并且操作简单的图像处理软件，从而可以快速处理大量的图像数据以及对处理得到的数据进行进一步的分析。该软件计算与分析的步骤如图 3 所示。

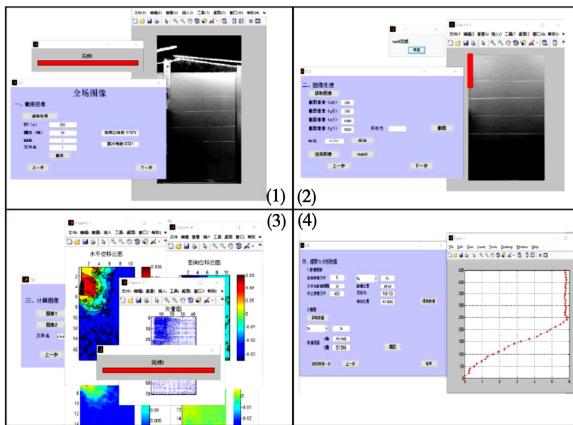


图 3 软件处理步骤

Fig. 3 Processing steps of software

计算程序主要功能分为 4 部分：①第一部分针对试验录制的视频提取具体时刻的图像（精确到每一帧）；②第二部分进行图像预处理，包括截图、标定以及 mask 掩码工作，为计算做好准备；③第三部分为图像相关计算，可便捷地选取需要计算的两张图像，并生成位移云图和位移数据；④第四部分是对图像数据计算结果的提取及分析，提取出需要分析的数据并进行整理，然后进行绘图和初步分析。整个程序操作较为灵活简单，可根据需要快速处理所需图像。

2 试验结果与分析

2.1 不同贯入深度下土体位移云图分析

通过 DIC 计算可以绘制压桩过程中桩周土体的水平和竖向位移的等值线图。图 4(a), (b) 列出了 JY-2 试验中，压桩深度为 250 mm 和 450 mm 时的土体水

平位移云图，土体向右移动为正。可以看到，沉桩过程中，土体受桩身的影响向四周挤开，并且随着贯入深度的增加，土体受影响范围越来越大：桩被压到 250 mm 深度处时，径向影响范围约 250 mm，即大约 5.7 倍桩径 (5.7D)。当桩被压到 450 mm 的位置时，径向影响范围已经达到 350 mm，即大约 8 倍桩径 (8D)。图 4(c), (d) 为 JY-2 试验中桩体不同深度时土体的竖向位移云图，土体向下移动为正。可以看到，土体的竖向位移分为两个部分，桩身上方的土体向上位移，桩身下方的土体受挤压向下位移，两者之间存在分界线，分界线上位移为“0”，分界线会随着桩体贯入相对于桩身逐渐向上移动。竖向位移的影响范围同水平位移的影响范围大致相当。

2.2 不同桩型之间土体水平位移差异

图 5~7 分别展示了距离桩表面 1D, 2D 和 3D 的不同深度处土体在沉桩过程中持续产生的水平位移。横轴为土体水平位移，规定向右移动为正，纵轴为桩体的贯入深度。由图可知，1D, 2D 和 3D 土体的位移由静止缓慢增加，随后逐渐稳定。当桩端达到某一位置时，该处的水平位移还未达到最大值，而当桩端超过这一位置时才达到最大值，最大水平挤土位移与压桩深度之间存在滞后效应。450 mm 处的土体由于深度较深，桩体并未穿过该区域，最大值还未体现。3D 处土体位移的稳定值比 1D 处小，说明水平位移会随着径向距离的增加而减小；450 mm 深度的位移比 150 mm 深度大，说明在一定沉桩深度内，水平位移随着深度增加而增加，深处土体受到的挤压效应也越大。

仔细对比圆桩 (50 mm)，方桩 (44 mm) 和方桩 (50 mm) 3 种不同工况的位移情况发现，50 mm 圆桩和 44 mm 圆桩位移相差不大，而 50 mm 方桩的位移比另外两者都要大一些，这说明相同排土体积下，

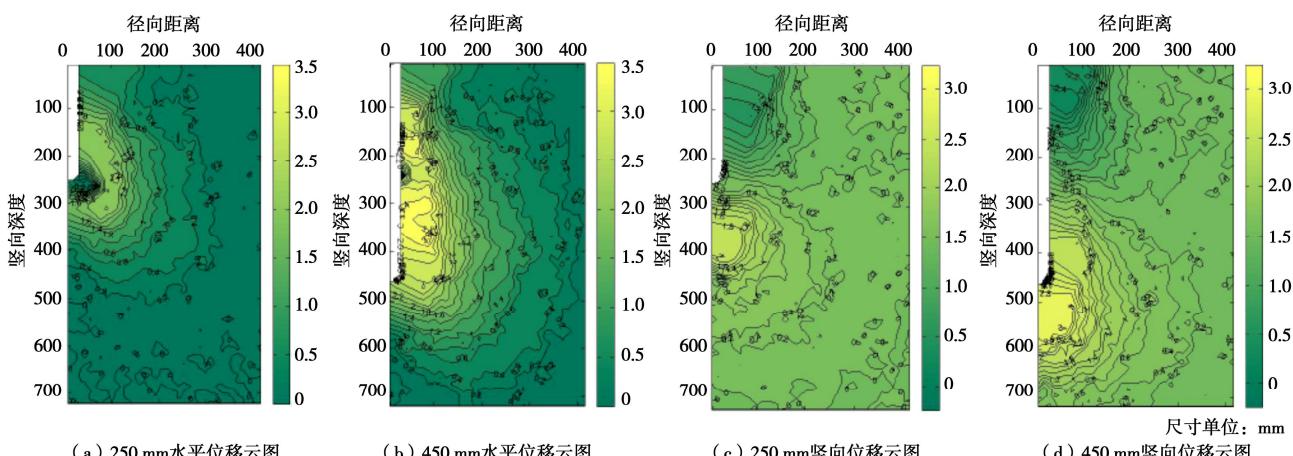


图 4 桩体不同深度时的水平和竖向位移云图

Fig. 4 Horizontal and vertical contour maps of soil displacements at different depths

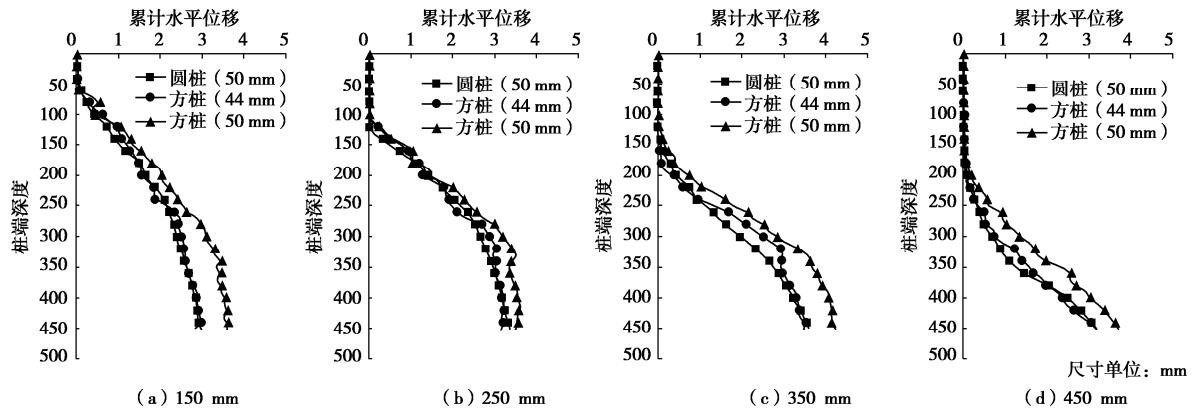


图 5 1D 距离处不同深度测点的水平累计位移发展规律图

Fig. 5 Horizontal cumulative displacements of measuring points at different depths at 1D

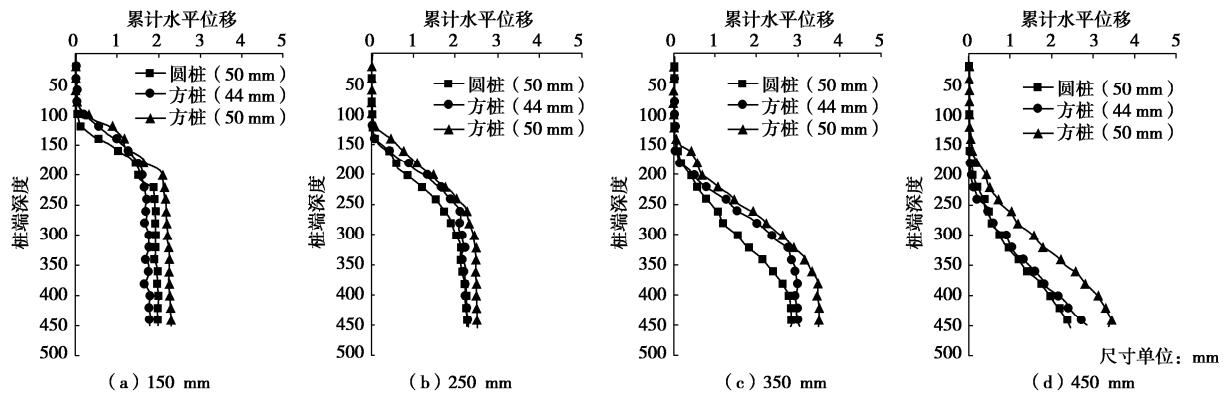


图 6 2D 距离处不同深度测点的水平累计位移发展规律图

Fig. 6 Horizontal cumulative displacements of measuring points at different depths at 2D

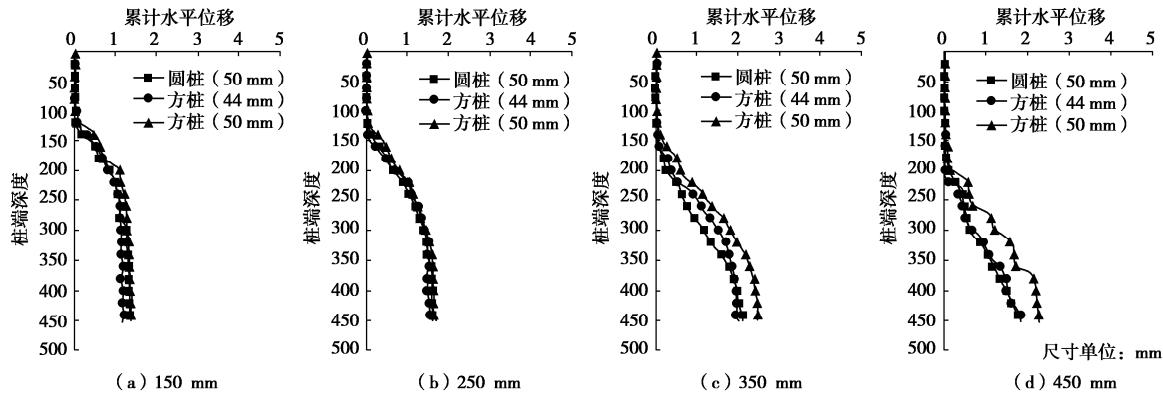


图 7 3D 距离处不同深度测点的水平累计位移发展规律图

Fig. 7 Horizontal cumulative displacements of measuring points at different depths at 3D

圆柱和方桩的对周围土体造成的影响差不多，不同的桩体型式的差别不大。而当桩径相同时，不同的桩型对土体挤压差异较大，方桩明显比圆柱挤压作用更强。当桩型相同时，随着直径的增大，排土体积逐渐增大，桩体对土的挤压效果也更加明显。据此认为，排土体积在桩体贯入过程中对周围土体的挤压影响至关重要。观察不同的深度发现，三者土体受到的挤压差异在深处比浅处更明显。另外，尽管 44 mm 方桩与 50 mm

圆柱的位移差异不大，但在 350 mm 深度处，两者有些许区别，44 mm 方桩比 50 mm 圆柱更早达到稳定值，这说明相同体积的圆柱和方桩在贯入过程，方桩比圆柱更早使周围土体稳定。

2.3 扰动薄层位移规律

在试验过程中，玻璃近表面处安装的微距摄像头可以记录桩-土界面剪切扰动层的情况。微距摄像头位置在距砂土表面 100 mm 深度处(见图 1)。图 8 为 JY-1

桩刚通过观察区域后大约 6 mm 时(桩体已用 mask 掩码掩去), 进行 DIC 计算之后得到的土颗粒的竖向位移云图。从图 8 中可以看到靠近桩体的一侧有明显的薄层, 此薄层中土体整体呈现明显的向下位移。薄层厚度为 2~3 mm 左右, 即 5.7~8.6 倍 d_{50} , 这与张嘎等^[8]等学者认为接触面剪切引起土颗粒变位大约 5~6 倍平均粒径范围内的结果吻合, 因此可确定该薄层为桩-土界面扰动层。为了更好地分析扰动层的位移情况, 对桩体每下压 2 mm 时扰动层的平均竖向位移进行了计算。图 9 为扰动层随桩端下压而变化的平均竖向位移值。可以发现, 在最开始桩端穿过 2 mm 后, 扰动层竖向位移迅速达到峰值, 在桩端下压大约 20 mm 后逐渐降至零, 说明扰动层刚出现时, 位移最大, 随着桩体不断贯入, 扰动层位移逐渐减小。

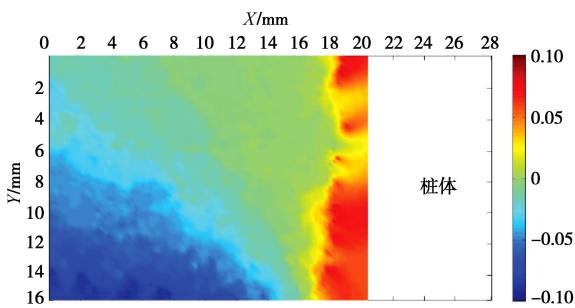


图 8 桩-土界面土体位移情况

Fig. 8 Soil displacements of pile-soil interface

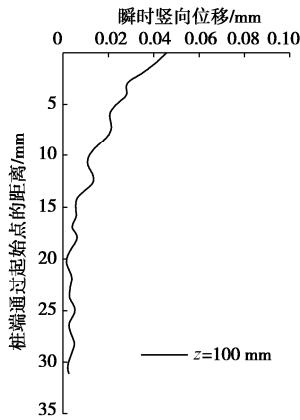


图 9 扰动层的竖向位移随桩体移动的变化情况

Fig. 9 Vertical downward displacements of disturbance layer during pile press-in

3 结 论

本文将非接触图像测试技术应用于室内静压桩模型试验中, 对多种工况模型桩压入过程的土体变形进行了全场和局部场的分析, 得出以下结论:

(1) 基于 DIC 技术开发的图像数据处理系统, 针对室内模型沉桩引起的桩周土体变形, 可以快速处

理大量的图像数据并进行分析, 操作简单灵活, 可以在桩模型试验中获取任意时刻任意位置的土体位移。并且类似试验可以通过该系统进行数据处理和分析。

(2) 桩体贯入过程中, 土体的水平位移逐渐增大随后趋于稳定, 深处土体和离桩体较近的土体水平位移的稳定值更大。当桩的直径相同时, 方桩明显比圆桩挤压作用更强, 且深处的土体受到的影响更明显。排土体积一致时, 不同桩型对土体挤压造成的位移差异不大。排土体积在桩体贯入过程中对周围土体的影晌起到了决定性的作用。

(3) 扰动薄层厚度约为 5.7~8.6 倍 d_{50} , 层内土体在桩体带动下向下移动, 并且位移随着桩体的压入逐渐减小, 桩体穿过大约 20 mm 后, 扰动薄层的土体位移趋近 0。局部摄像头的设置为今后对扰动区的进一步测量提供了参考。

参 考 文 献:

- [1] 高广运, 周群立, 陈龙珠. 软土中静压桩挤土分析和防治措施[J]. 岩土力学, 2002, 23(增刊 1): 65~68. (GAO Guang-yun, ZHOU Qun-li, CHEN Long-zhu. Analysis of compacting effect and control for silent piling in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(S1): 65~68. (in Chinese))
- [2] JARDINE R J, ZHU B T, FORAY P, et al. Measurement of stresses around closed-ended displacement piles in sand[J]. Géotechnique, 2013, 63(1): 1~17.
- [3] 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))
- [4] 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))
- [5] 孔纲强, 曹兆虎, 周航, 等. 水平荷载下扩底楔形桩承载力特性透明土模型试验[J]. 土木工程学报, 2015(5): 83~89. (KONG Gang-qiang, CAO Zhao-hu, ZHOU Hang, et al. Experimental study on lateral bearing capacity of enlarged wedge-shaped pile using transparent soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2015(5): 83~89. (in Chinese))
- [6] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于 PIV 技术的沉桩过程土

- 体位移场模型试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 168 - 174.
(CAO Zhao-hu, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al.)
Model test on deformation characteristic of pile driving in sand using PIV technique[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 168 - 174. (in Chinese))
- [7] DEJONG J T, WHITE D J, RANDOLPH M F. Microscale observation and modelling of soil-structure interface behaviour using particle image velocimetry[J]. Soils and Foundations, 2013, 46(1): 15 - 28.
- [8] 张 嘎, 张建民, 梁东方. 土与结构接触面试验中的土颗粒细观运动测量[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 903 - 907.
(ZHANG Ga, ZHANG Jian-min, LIANG Dong-fang. Measurement of soil particle movement in soil-structure interface test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 903 - 907. (in Chinese))
- [9] YATES J R, ZANGANEH M, TAI Y H. Quantifying crack tip displacement fields with DIC[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77(11): 2063 - 2076.

(编校: 黄贤沙)

(上接 166 页)

- [5] KONG X, LIU J, ZOU D, et al. Stress-dilatancy relationship of Zipingpu gravel under cyclic loading in triaxial stress states[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(4): 4016001.
- [6] MARACHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill materials[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1972, 98(1): 95 - 114.
- [7] HUNTER G, FELL R. Rockfill modulus and settlement of concrete face rockfill dams[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(10): 909 - 917.
- [8] VARADARAJAN A, SHARMA K G, ABBAS S M, et al. Constitutive model for rockfill materials and determination of material constants[J]. International Journal of Geomechanics, 2006, 6(4): 226 - 237.
- [9] VARADARAJAN A, SHARMA K G, VENKATACHALAM K, et al. Testing and modeling two rockfill materials[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(3): 206 - 218.
- [10] 汪小刚. 高土石坝几个问题探讨[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 203 - 222. (WANG Xiao-gang. Discussion on some problems observed in high earth-rockfill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 203 - 222. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)