

DOI: 10.11779/CJGE2020S1021

基于 NHRI 离心机机械手的港池开挖模拟研究

任国峰^{1, 2}, 蔡正银^{1, 2}, 顾行文^{*1, 2}, 徐光明^{1, 2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 离心模型试验中模拟板桩码头港池开挖过程大多是在 1g 条件下完成, 这种开挖方式相比原型增加了一个离心加速度从 1g 到 Ng 的升速过程, 虽然模型与原型土体的最终应力状态一致, 但两者应力路径完全不同; 新研制成功的南京水利科学研究院离心机机械手可在超重力场中同时完成 X, Y, Z 3 个方向的线性运动及 θ 轴方向无限制地转动, 借助于该机械手和特制的开挖工具开展了在 50g 条件下港池分层开挖模拟研究, 此开挖方式完全符合离心模型相似准则。比较两种不同开挖模拟方式下得到的板墙弯矩值和板墙水平侧向位移值, 结果表明: 板墙弯矩变化规律基本一致, 但在超重力场中进行开挖模拟试验得到的前墙弯矩极大值明显偏大, 锚碇墙弯矩极大值偏小; 1g 条件下开挖得到的板墙水平侧向位移值偏大。

关键词: 应力路径; 土工离心机机械手; 板墙弯矩; 分层开挖; 相似准则

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2020)S1-0105-06

作者简介: 任国峰(1986—), 男, 河南周口人, 工程师, 从事土工离心机模型试验研究。E-mail: gfred@nhri.cn。

Basin excavation using robotic manipulator of geo-centrifuge at NHRI

REN Guo-feng^{1, 2}, CAI Zheng-yin^{1, 2}, GU Xing-wen^{1, 2}, XU Guang-ming^{1, 2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: The simulation of basin excavation process of the sheet-pile wharf in the centrifugal modeling tests is mostly carried out under 1g. Also an elevation of 1g to Ng is added compared with the prototype, which results in the same stress state but different stress paths. The first four-axis robotic manipulator of the Mainland of China has been successfully developed and applied to the 400 gt geotechnical centrifuge at Nanjing Hydraulic Research Institute (NHRI). This robot, with four degrees of freedom, can achieve movements simultaneously in linear directions of x, y, z and rotation of θ . The robot and special tool are used to simulate the excavation of layered soil of the sheet-pile wharf basin under 50g in accordance with the model similarity criterion totally. By comparing the bending moments and the horizontal lateral displacements of the wall got from floor 1g and 50g excavation simulation, the result reveal that the change rules of the bending moments of the wall are basically identical. However, the bending moments of the front wall by means of the excavation are clearly larger and the bending moments of the anchor wall are smaller. The lateral displacement of the wall is greater under floor excavation of 1g.

Key words: stress path; geo-centrifuge robotic manipulator; bending moment of wall; layered soil excavation; similarity criterion

0 引言

在离心模型试验中, 施工过程的模拟是最复杂, 也是对模型的性状影响最明显的。在板桩码头结构中, 以单锚板桩码头结构为例, 其由前墙、锚碇墙和拉杆组成, 作用于码头构件上的外部荷载主要是土压力, 其变化是由港池开挖和码头面堆载引起的。为了充分掌握码头构件内力、变形以及稳定性情况, 就要弄明白土体与码头结构物之间相互作用机理, 尤其是因为开挖港池造成板墙土压力变化和板墙之间土体位移场

变化带来的影响。

根据现有的离心模拟技术条件, 模拟港池土体开挖问题大致可分为 3 类方法: ①在制样时预先挖除土体^[1-3], 通过分级提高离心加速度模拟土体与码头结构物的应力反应, 按照该方式模拟, 在预挖有港池的地

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51879167); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y317011、Y319001)

收稿日期: 2020-06-01

***通信作者** (E-mail: xwgu@nhri.cn)

基土体中,其侧向应力和竖向应力随离心加速度升高同步发生增大;而原型情形却是地基开挖过程中土体竖向应力不变而侧向应力不断减小。虽然模型与原型土体最终的应力状态一致,但两者的应力路径完全不同,原型土体循行的是侧向卸载应力路径,而模型土体循行的是比例加载应力路径,如图1所示,图中 σ_v 代表竖向应力, σ_h 代表侧向应力, a 代表加速度, σ_{h0} , σ_{v0} 与 σ_{he} , σ_{ve} 分别代表土体初始应力状态和最终应力状态, N 为模型比尺。土体的性状不仅取决于最终的应力状态,而且与其循行的应力路径密切相关。由于常规模拟方式将侧向卸载问题当作一个比例加载问题来模拟研究,其结果必然偏离原型真实性状,影响模型试验结果可靠性。②在离心机运转条件下通过排放与土体密度近似的溶液代替拟开挖土体,即排液法^[4-6]。试验中,一般选取 $ZnCl_2$ 溶液作为替代液体,该溶液有毒和腐蚀性,存在一定的安全隐患,而且由于液体在相同深度内各向压强相等,排放液体所形成的侧向压力系数与土体有较大差别,不能真实模拟土体侧向土压力。③通过制作特定的装置间接模拟土体开挖^[7-8]。

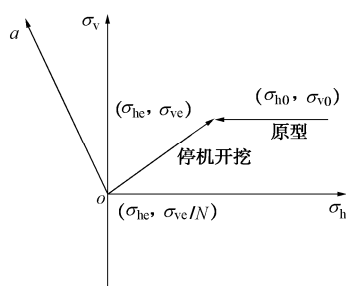


图1 模型土体与原型土体应力路径比较

Fig. 1 Comparison of stress paths between model and prototype

本文拟采用国内第一台土工离心机机械手在离心加速度 $50g$ 条件下直接模拟土体分层开挖过程,该方法完全满足模型相似律要求,是目前最理想的模拟土体开挖的方式。试验过程中采用专门的土体开挖工具,科学编制相应开挖顺序,较真实地还原土体卸荷过程。

1 NHRI 离心机机械手

南京水利科学研究院离心机机械手(以下简称NHRI 离心机机械手)是国内第一台土工离心机机械手,配备在如图2所示的NHRI400gt大型土工离心机上,设计加速度为 $100g$ 。该机械手可在离心机高速运转过程中实现 X , Y , Z 轴和 θ 轴四轴联动,主要有主机系统、电气系统等部分组成。

1.1 主机系统

试验时,将机械手整体放置在离心机吊篮上,吊篮尺寸 $1200\text{ mm}(X) \times 1200\text{ mm}(Y) \times 1100\text{ mm}(Z)$,机械手模型箱净尺寸为 $1240\text{ mm}(X) \times 750\text{ mm}(Y) \times 650\text{ mm}(Z)$ 。为了减轻机械手箱体重量,选用合金铝材质,板厚为 50 mm 。图3是NHRI离心机机械手整体布置图。



图2 NHRI 400 gt 大型离心机

Fig. 2 NHRI 400 gt centrifuge

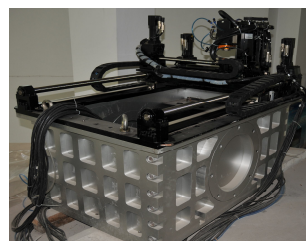


图3 NHRI 离心机机械手整体布置

Fig. 3 Robotic manipulator at 1g

该机械手可在超重力场中实现 X , Y , Z 3个方向的线性运动及 θ 轴方向无限制地转动,沿四轴方向的运动都由永磁同步交流伺服电机驱动,其中 X 轴方向两个电机, Y 轴和 Z 轴各一个电机,细部构件如图4所示;系统兼具行程大、重复精度高、承载能力强等优点,其主要技术参数见表1。

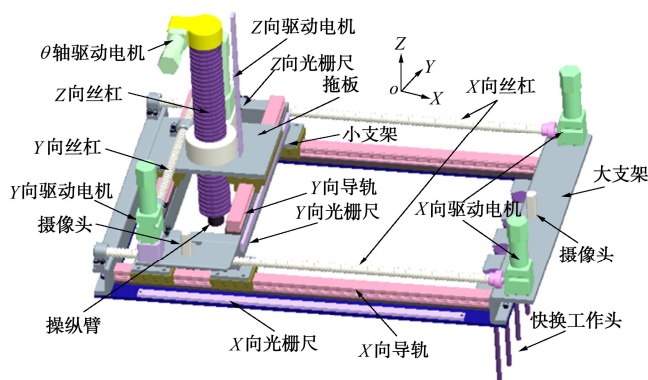


图4 主机系统

Fig. 4 Host system

1.2 电气系统

电气系统主要由 X , Y , Z 方向上的直线运动控制和 θ 轴的旋转控制系统及人机交互软件等组成。

表 1 离心机机械手主要技术参数

Table 1 Main specifications of four-axis robotic manipulator

项目	最大行程/mm	重复精度/mm	承载能力/N	最大运行速度/(mm·s ⁻¹)
X 轴	900	±0.2	2500	30
Y 轴	400	±0.2	2500	30
Z 轴	500	±0.2	拉 5000, 压 18000	20
2500	360°	±0.5°	5 Nm	20° /s

机械手的运动过程是由其控制系统来实现。控制系统由工控机、运动控制器 ETCPC 模块、人机交互软件和教学辅助部分组成。ETCPC 是整个系统的核心，它利用控制程序发来的指令进行轨道计算，然后将计算结果传递到驱动器装置执行控制命令。人机交互软件指运动控制器 ETCPC 模块所配置的类似于 CNC 的 ETCMMI 软件，通过在该人机交互软件界面上进行简单的编程，实现对机械手运动过程的自动控制。图 5 是 ETCMMI 软件界面图。

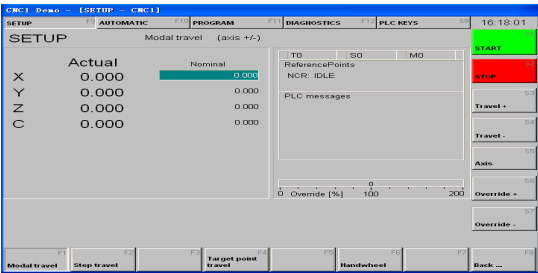


图 5 ETCMMI 软件界面图

Fig. 5 ETCMMI software interface

在机械手运动过程中，速度和位移是两个最重要的物理量，需要实时监测控制。在 X, Y, Z 向上采用旋转变压器作为速度反馈传感器，磁栅尺作为位置反馈传感器，实现机械手运动的精确定位； θ 轴的旋转运动由摆动气缸驱动，摆动气缸采用叶片驱动的双作用汽缸，可实现 360° 无限制摆动，该控制系统由伺服定位控制器、伺服定位控制器连接器、比例方向控制阀、摆动气缸及反馈传感器、快换工具等构成，同时在工具盘上盘上设有 2-6 bar 气压通道、6-5 A 电气通道接口，用于抓取工具盘下盘。

2 模型试验

2.1 模型制作

在板桩码头结构中，前墙和锚碇墙是受弯构件，主要在垂直码头岸线方向上受弯。根据受弯构件的模型相似律要求，这些结构的模型都按照等抗弯刚度相似原则进行设计，即模型与原型的挠度相等。试验选取的模型前墙和锚碇墙的厚度为 12 mm，前墙和锚碇墙的宽度按照模型箱净空尺寸考虑为 350 mm，高度

也为 350 mm。这样，前墙和锚碇墙的尺寸为 12 mm（厚）×350 mm（宽）×350 mm（高）。前墙和锚碇墙结构示意图如图 6。

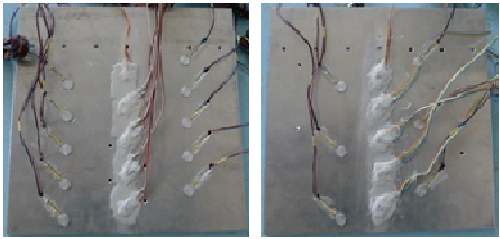


图 6 前墙和锚碇墙结构图

Fig. 6 Model wall (front wall, back wall)

在单钢板桩码头结构中，拉杆是用来联接前墙和锚碇墙的结构，主要受拉应力作用。所以，在制作模型拉杆时应按照等抗拉刚度原理设计。原型中的拉杆使用的是圆形钢锚杆，经过模型相似律换算后得到的模型拉杆直径较小，而且在圆形钢丝侧面上黏贴应变片本身也很困难，因此试验中选择与圆形钢丝截面面积相等的矩形钢片来制作拉杆。试验最终选用的模型拉杆截面尺寸为 3.2 mm（宽）×0.4 mm（厚），拉杆净长度为 335 mm。如图 7 所示为试验中所用的拉杆模型。

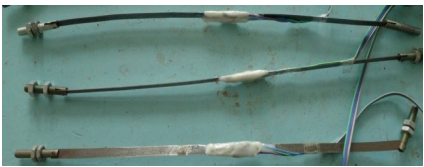


图 7 模型拉杆

Fig. 7 Model rod

试验中所用土样为无黏性的粉细砂，经过自然风干后，用筛子过滤掉其中的粗颗粒，保证制备地基土样的粉细砂颗粒直径在 0.25 mm 以下，通过砂雨法制备的地基土体密度约为 1.46 g/cm³。

2.2 开挖工具

为了在超重力场中完成土体开挖，还研制了专门的开挖工具，如图 8 所示。该工具可在超重力场中承受较大的强度和变形，工具口净尺寸为 80 mm（长）×80 mm（宽）×100 mm（高），主要有上部轴承结构、固定支架、中间旋转螺杆等部分组成。上轴承结构固定于 θ 轴电机上，外部支架通过螺钉和轴承结构联接，再由一颗销钉将支架整体牢牢固定，然后将中间螺杆和上部轴承结构通过螺钉联接，在旋转过程中尽量保证各螺钉松紧程度一致，避免在高加速度下开挖土体时结构受力不均，造成螺杆扭曲甚至电机受损。其工作原理如下：通过 θ 轴电机的旋转，带动电机下端轴承旋转，然后带动与之相连接的螺杆旋转，最终实现开挖工具抓斗叶片的张开与合拢。



图8 开挖工具

Fig. 8 Excavation tool

2.3 开挖模拟

为确保超重力场中开挖土体的精度和可靠性, 首先将制备好的地基模型放入指定位置, 再根据土层开挖要求, 通过 ETCMMI 软件进行相应的开挖程序编写, 然后在地面上执行程序命令开挖土体, 如此反复调试直到满足土体开挖要求, 最后将确定的开挖程序导入软件, 在 50g 下实现土体开挖过程的自动控制。

本次模型试验中模型土体开挖深度为 80 mm, 分两层开挖, 第一层深度为 50 mm, 第二层深度为 30 mm, 每层开挖 10 次, 共 20 次(见试验模型剖面图 9)。图中 d_f 和 d_b 分别表示模型前墙和锚碇墙水平位移测点, 数字代码表示每层土体开挖的次序。

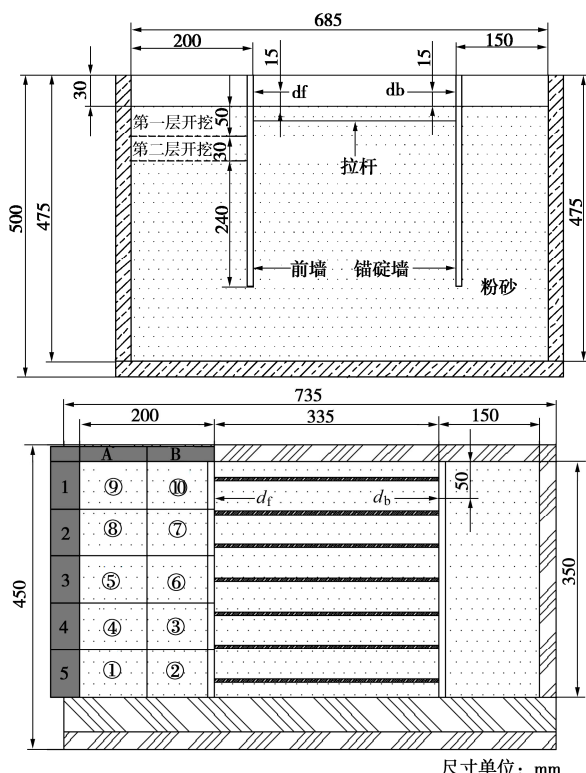


图9 开挖布置

Fig. 9 Layout of sand excavation (dimensions in mm)

3 结果分析

本次试验的离心加速度为 50g, 对应的原型土体开挖深度为 4 m, 前墙海陆两侧埋深分别为 12, 16 m;

以下所述物理量均已按照离心模拟相似准则换算为原型实际值, 并定义海侧受拉时弯矩值为正, 陆侧受拉时为负。

3.1 离心机机械手开挖试验结果

图 10 表示在土体开挖前、第一层开挖后、第二层开挖后以及运行期前墙弯矩随标高分布规律。从图中看出, 各个时期弯矩分布规律大体一致, 最大值均出现在标高约 -8 m 处, 即板墙陆侧埋深中点处; 相比于开挖前, 第一层土体开挖后, 弯矩值变化不大, 而在第二层土体开挖后, 在同一标高处, 板墙弯矩值明显增大。对于靠近墙体底部处出现的负弯矩值, 可能是由于墙体底端向陆侧变位, 从而引起板墙陆侧面受拉, 墙体通过自身的变形把内力合理的分配, 因而负弯矩值不是很大, 也有可能是因为地基土层制备不均匀等因素。

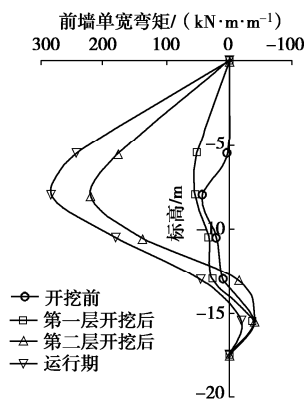


图10 前墙弯矩

Fig. 10 Bending moments on front wall at 50g

图 11 表示在土体开挖前、第一层开挖后、第二层开挖后以及运行期锚碇墙弯矩随标高分布规律。从图中看出, 各个时期弯矩分布规律大体一致, 最大负弯矩值(绝对值)均出现在标高 -8 m 处, 这与前墙最大正弯矩值位于同一标高处, 这说明码头结构内部之间相互作用, 密切关联。相比于开挖前, 第一层土体开挖后, 弯矩值变化不大, 而在第二层土体开挖后, 墙体弯矩值明显增加, 这表明随着港池深度加深, 弯矩值增幅越大, 影响越明显。

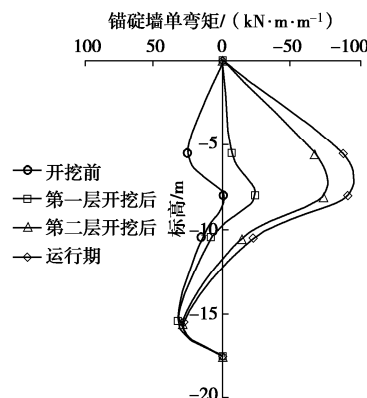


图11 锚碇墙弯矩

Fig. 11 Bending moments on back wall at 50g

3.2 1g 与 50g 下开挖试验结果比较

图 12 表示离心机机械手 50g 下开挖和 1g 停机开挖下的前墙单宽弯矩分布曲线。由图可知, 不同开挖方式得到的前墙弯矩分布规律一致, 在同一标高处, 机械手开挖所得的前墙单宽弯矩值远大于停机开挖下弯矩值, 原因在于采用机械手开挖港池时是在离心加速度 50g 下完成, 在开挖前地基土体未发生扰动, 土体强度不变, 开挖过程中地基土体与前墙充分作用, 有效阻碍了墙体偏移; 而对于停机开挖, 则是在 1g 下预先开挖一个等深度港池, 再逐级升高离心加速度至设计加速度 50g, 地基土体发生扰动, 强度降低, 土体与前墙之间作用力减弱, 这种阻碍作用也随之减小。

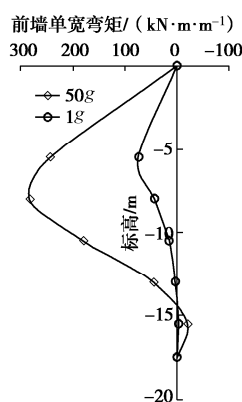


图 12 1g 与 50g 前墙单宽弯矩

Fig. 12 Bending moments on front wall between 1g and 50g excavation

图 13 表示离心机机械手 50g 下开挖和 1g 停机开挖下的锚碇墙单宽弯矩分布曲线。从图中可以看出, 两者分布规律大体相同, 但差值不如前墙单宽弯矩大。对于前墙, 主要考虑到开挖方式不同引起地基土体强度的变化, 进而影响前墙弯矩、土压力以及前墙上部位移; 对于锚碇墙, 前墙海侧土体开挖卸荷, 使得前墙上部向海侧偏移, 由于拉杆的锚固作用, 拉杆受力增加, 并最终作用于锚碇墙。因此, 在同一标高处, 1g 停机开挖条件下锚碇墙单宽弯矩值大于离心机机械手 50g 开挖下弯矩值。

板墙位移变化反映码头整体结构的稳定性状, 可以说是码头结构内部内力调整的一个外部直观体现, 在当前基于变形控制的港口工程设计中显得尤其重要。对于前墙位移, 主要是由墙体与地基土体之间的相互作用来决定。在停机开挖下, 地基土体在开挖过程中发生扰动, 墙体与地基土体之间未能充分作用; 采用机械手在 50g 条件下开挖时, 地基土体强度不变, 墙体与地基土体之间充分作用, 因此, 停机开挖下前墙侧向位移值大于机械手开挖条件下前墙位移值, 试

验测得停机开挖下前墙侧向位移值为 24 mm, 机械手开挖下前墙侧向位移值为 20 mm。锚碇墙侧向位移则主要是由于锚碇墙受到拉杆拉力作用以及墙体与地基土体之间相互作用引起的, 其根本原因在于前墙海侧土体开挖造成码头结构整体存在向海侧位移趋势, 根据模型试验结果, 停机开挖下锚碇墙侧向位移值为 22 mm, 机械手开挖下锚碇墙侧向位移值为 18 mm。最后需要说明的是, 无论采用哪一种开挖方式模拟港池开挖过程, 得到的前墙侧向位移值都大于锚碇墙侧向位移值。

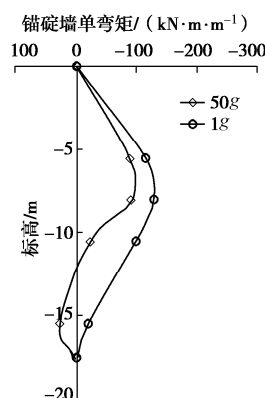


图 13 1g 与 50g 锚碇墙单宽弯矩

Fig. 13 Bending moments on back wall between 1g and 50g excavation

4 结 论

采用南京水利科学研究院新研制的大型离心机机械手, 成功实现了在离心机运转过程中模拟港池分层开挖, 并将试验结果与常规开挖结果进行了比较, 形成了以下认识:

(1) 采用土工离心机机械手模拟港池开挖的方式, 土体应力路径与原型一致, 满足了土体卸荷过程模拟相似性的要求。

(2) 比较 1g 停机开挖与离心机机械手 50g 下开挖得到的试验结果表明, 前者得到的前墙最大正负弯矩值 (绝对值) 小于后者弯矩值, 而前者锚碇墙最大负弯矩值 (绝对值) 大于后者弯矩值; 另外, 前者得到的墙顶侧向位移值大于后者位移值。

(3) 综合分析表明, 在板桩码头离心模型试验中, 港池开挖的模拟方式对模型试验结果影响显著, 采用符合模型相似律的开挖施工模拟方式对离心模型试验研究极其重要。

参考文献:

- [1] 马险峰, 张海华, 朱卫杰, 等. 软土地区超深基坑变形特性离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1371

- 1377. (MA Xian-feng, ZHANG Hai-hua, ZHU Wei-jie, et al. Centrifuge model tests on deformation of ultra-deep foundation pits in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(9): 1371 - 1377. (in Chinese))
- [2] 李景林, 蔡正银, 徐光明, 等. 遮帘式板桩码头结构离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(6): 1182 - 1187. (LI Jing-lin, CAI Zheng-yin, XU Guang-ming, et al. Centrifuge modelling test on covered sheet-piled structure of wharf[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(6): 1182 - 1187. (in Chinese))
- [3] KIMURA T, TAKEMURA J, HIRRO2OKA A, et al. Stability of unsupported and supported vertical cuts in soft clay[C]// Proc 11th Southeast Asian Geo Conf. 1993, Singapore: 61 - 70.
- [4] POWRIE W, KANTARTZI C. Ground response during diaphragm wall installation in clay: centrifuge model tests[J]. Géotechnique, 1996, **46**(4): 725 - 739.
- [5] RICHARDS D J, POWRIE W. Centrifuge model tests on doubly propped embedded retaining walls in overconsolidated kaolin clay[J]. Géotechnique, 1998, **48**(6): 833 - 846.
- [6] 冉光斌, 宁张伟, 洪建忠, 等. 具有多道支撑的深基坑开挖离心模拟试验方法[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(6): 1142 - 1145. (RANG Guang-bin, NING Zhang-wei, HONG Jian-zhong, et al. Centrifuge model test method of deep foundation pit excavation with multi-layer props[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, **6**(6): 1142 - 1145. (in Chinese))
- [7] KIMURA T, TAKEMURA J, HIROOKA A, et al. Excavation in soft clay using an in-flight excavator[C]// Proceedings of the International Conference on Geotechnical Centrifuge. 1994, Rotterdam: 649 - 654.
- [8] 李连祥, 符庆宏, 张永磊, 等. 基坑离心模型试验开挖方法研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(4): 856 - 864. (LI Lian-xiang, FU Qing-hong, ZHANG Yong-lei, et al. Research and application of a new excavation method in centrifuge model tests on foundation pit engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(4): 856 - 864. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)