

DOI: 10.11779/CJGE2022S2020

# 间隔型基坑开挖效应的离心机模拟试验研究

马险峰<sup>1,2</sup>, 林想<sup>1</sup>, 王欣杰<sup>3</sup>, 黄继成<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 喀什大学土木工程学院, 新疆 喀什 844006; 3. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 201103)

**摘要:** 采用离心机模型试验, 研究间隔型基坑群同时开挖情况下对周围既有结构物与基坑围护结构的影响。试验采取停机开挖的方式分六步进行基坑开挖, 获得每一个开挖顺序下车站墙体、隧道墙体以及基坑围护结构不同位置的变形, 最后分析相应结构在间隔型基坑群同时开挖情况下的变形规律。本研究可为日后类似工程的设计施工提供一定参考。

**关键词:** 离心模型试验; 间隔型基坑; 挡土墙; 开挖效应

**中图分类号:** TU432    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-4545(2023)S2-0092-05

**作者简介:** 马险峰(1972—), 男, 河南沈丘人, 博士, 教授, 主要从事岩土物理模型试验、地下结构抗震等方面的教学和科研。E-mail: xf.ma@tongji.edu.cn。

## Centrifugal model tests on excavation effect of interval foundation pits

MA Xian-feng<sup>1,2</sup>, LIN Xiang<sup>1</sup>, WANG Xin-jie<sup>3</sup>, HUANG Ji-cheng<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Kashi University, Kashgar 844006, China; 3. Shanghai Shentong Metro Group Co. Ltd., Shanghai 201103, China)

**Abstract:** The centrifugal model tests are used to study the excavation effects of interval foundation pits on the adjacent structures and the retaining walls. The tests adopt the generalized similarity ratio of 200 to carry out the scale simulation. The foundation pits are excavated in six steps of the shutdown-excavation method. The deformation data at different positions of the station walls, the tunnel walls and the retaining walls in each step are obtained. Finally, the deformation rules of the structures close to the interval foundation pits are drawn by analyzing these data. This study may provide some reference for the design and construction of similar projects in the future.

**Key words:** centrifugal model test; interval foundation pit; retaining wall; excavation effect

## 0 引言

随着中国经济社会的快速发展, 城市化进程不断加快, 地铁网络的建设也日趋密集。当前, 国内地铁车站建设以基坑开挖法为主, 随着地铁网络复杂化, 其面临着如下新难题: ①复杂的施工环境: 新开挖的基坑周边建筑物密集, 基坑施工将对周围地下建筑结构、管线和邻近多高层建筑产生影响。②多基坑同时开挖: 根据结构和工期需要, 时有多个基坑同时开挖的情况, 基坑间相互作用, 带来更复杂的土压力、基坑开挖变形等问题。

目前, 国内外学者对基坑开挖效应进行了大量研究, 主要采用了数值模拟、现场试验和模型试验等研究方法<sup>[1-3]</sup>。蒋晔<sup>[4]</sup>采用数值模拟的方法, 研究了深圳福田地铁车站开挖对周围建筑物的影响; 李磊等<sup>[5]</sup>通过现场试验的方法, 分析南昌某地铁车站基坑工程施工的监测数据, 研究基坑开挖深度对围护结构水平变形的影响; 马险峰等<sup>[6]</sup>通过离心机模型试验, 采用停机-

开挖-施加离心力的多次循环方法, 研究了38 m超深基坑的施工过程中围护结构变形、土压力变化、地表沉降等性状; Zhang等<sup>[7]</sup>开发了一种自动开挖装置, 用于离心机模型试验模拟基坑开挖过程, 监测土压力、土层位移变化, 并将结果与传统的停机开挖方法进行比较。

虽然国内外在基坑开挖效应方面的研究有丰富的成果, 但对于软土地区间隔型基坑群开挖效应的研究不深, 经验较少。本文采用离心机模型试验的方法, 以上海地铁14号线浦东大道站基坑工程为背景, 研究间隔型基坑群同时开挖情况下, 对基坑围护结构与周围既有结构物影响。本文的研究成果, 可以为日后类似工程的设计施工提供一定参考。

## 1 离心机模型试验

本试验均在同济大学的TLJ-150离心机上开展完

成。主要考察上海 14 号线浦东大道站间隔型基坑群同时开挖情况下，土体地表沉降、既有车站、隧道墙体和围护结构变形规律。

## 1.1 试验工况

上海 14 号线浦东大道车站穿越运营中的地铁 4 号线和大连路隧道，车站工程剖面图如图 1 所示。

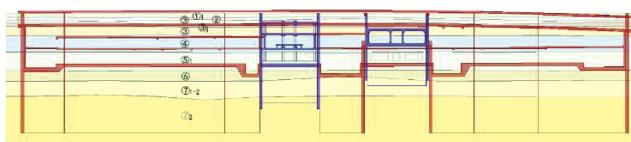


图 1-1 上海 14 号线浦东大道地铁站工程剖面图

Fig. 1 Cross section of Pudongdadao Railway Station of Shanghai

根据实际工程设计安排，本试验将在模型中间隔布置 3 个基坑，并在相应位置设置隧道和车站结构。试验中，挡土墙变形采用江浙黄岩电阻应变片测量，地表沉降与车站竖向位移采用激光位移传感器测量。

## 1.2 模型率

由于实际工程尺寸很大，离心机模型尺寸有限，模型需缩小到原型的  $1/200$  才能放进模型箱中，同时离心机也需加速到  $200g$  才能根据相似原理处理数据。然而本试验所用离心机只能加速到  $100g$ ，故需引入广义相似比进行二次缩放。本文采用 Iai 等<sup>[8]</sup>提出的广义相似比换算关系：

$$S_p = \mu\mu_e \eta S_m \quad . \quad (1)$$

式中： $S_p$  为原型位移； $S_m$  为模型位移； $\mu$  为缩放因子（原型/虚拟模型）； $\mu_e = \mu^{0.5}$  为小应变下适用于同等密度砂土的系数； $\eta$  为缩放因子（虚拟模型/物理模型）。

本试验模型率采用广义相似比  $100 \times 2$ , 即模型采用广义相似比 200 缩尺模拟, 离心机稳定运转后, 重力加速度维持在  $100g$ 。

### 1.3 模型设计与制作

模型箱的尺寸为 900 mm(长)×700 mm(宽)×700 mm(高), 模型布置及构件详图如图 2~5 所示。

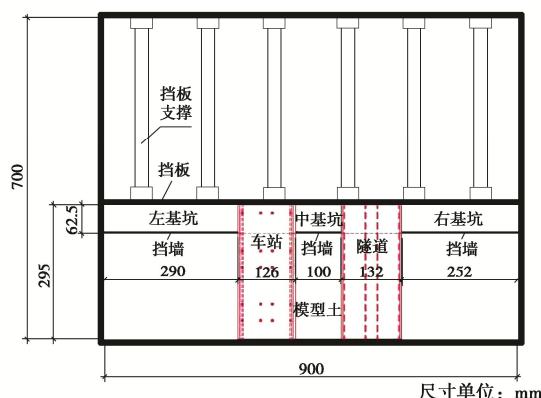


图 2 模型箱布置平面图

Fig. 2 Plane layout of model box

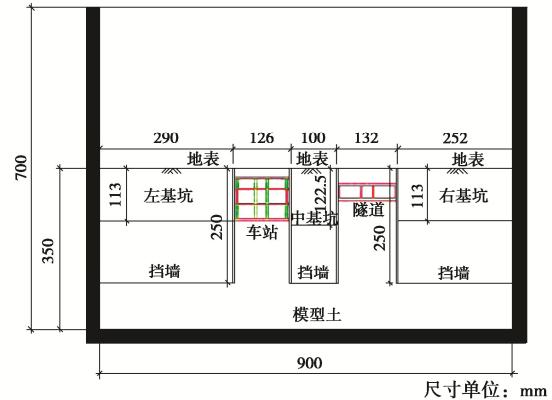


图 3 模型箱布置立面图

Fig. 3 Elevation layout of model box

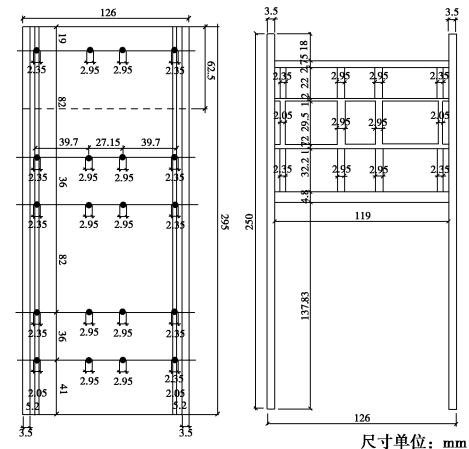


图 4 车站模型平面图、剖面图

Fig. 4 Plane and cross section of station

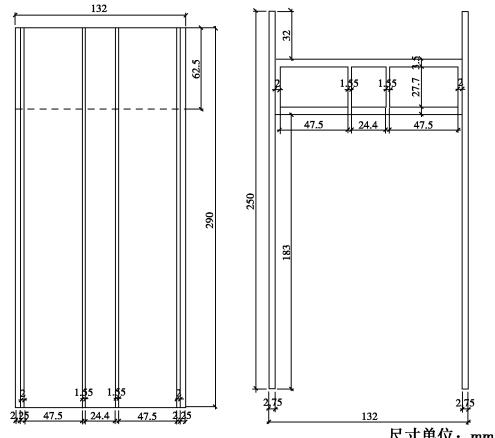


图 5 隧道模型平面图、剖面图

Fig. 5 Plane and cross section of tunnel

## 1.4 基坑挡土墙模型制作

基坑开挖过程中，挡土墙主要承受弯矩，为保证模型和原型受力变形状况一致，应根据抗弯刚度等效原理设计。本试验选用刚度等效的铝合金墙板模拟地下连续墙的弯曲，模型与原型材料抗弯刚度满足如下关系：

$$\frac{E_m t_m^3}{12(1-v_m^2)} = \frac{E_p t_p^3}{12(1-v_p^2)} \cdot \frac{1}{N^3} \quad , \quad (2)$$

式中  $E_m$  为铝板挡土墙模型的弹性模量,  $E_p$  为现场地下连续墙的弹性模量;  $\nu_m$  为铝板挡土墙模型的泊松比,  $\nu_p$  为现场地下连续墙的泊松比;  $t_m$  为铝板挡土墙厚度,  $t_p$  为现场地下连续墙的厚度;  $N$  为模型率。

现场地下连续墙的  $E_p$  为 25 GPa,  $t_p$  为 1000 mm,  $\nu_p$  为 0.2; 铝板挡土墙模型的  $E_p$  为 72 GPa,  $\nu_m$  为 0.33, 计算得铝板厚度  $t_m$  为 3.5 mm。

模型设 3 个基坑, 共需 3 块挡土墙, 即长度为 290, 100, 252 mm 的各一块, 铝板的宽度均为 250 mm, 厚度均为 3.5 mm。

### 1.5 支撑模型制作

基坑工程中, 支撑主要承受压力荷载, 为保证模型的工作状态与原型一致, 应根据抗压刚度相似原则设计。本试验选用实心铝管模拟支撑, 模型与原型抗压刚度应满足如下关系:

$$E_m \frac{\pi}{4} D_m^2 = E_p S_p \cdot \frac{1}{N^2}, \quad (3)$$

式中  $E_m$  为实心铝管的弹性模量,  $E_p$  为原型支撑的弹性模量;  $D_m$  为实心铝管模型的直径;  $S_p$  为原型支撑的截面面积;  $N$  为模型率 200。现场混凝土支撑的  $E_p$  为 25 GPa, 钢支撑的  $E_p$  为 200 GPa; 实心铝管材料的  $E_m$  为 72 GPa, 通过计算求得各铝管支撑的直径  $D_m$ 。支撑模型如图 6 所示, 支撑布置如图 7, 8 所示。



图 6 支撑模型

Fig. 6 Models for support structures

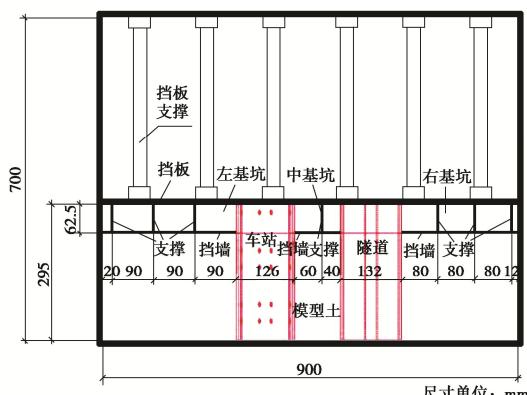


图 7 支撑布置平面图

Fig. 7 Plane layout of support structures

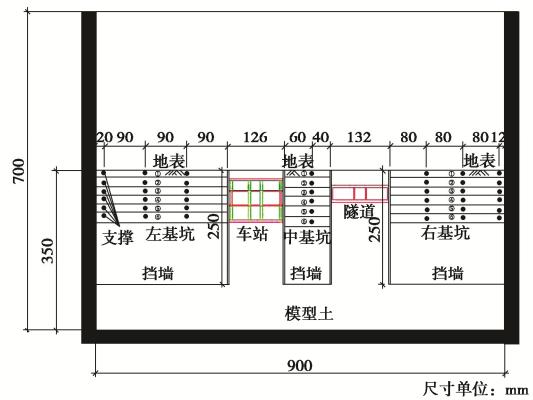


图 8 支撑布置立面图

Fig. 8 Elevation layout of support structures

### 1.6 试验步骤

本试验土样采用天然石英砂, 基坑挡土墙的安装、土体开挖及支撑架设均在重力场中进行。具体试验步骤如下: ①制作挡土墙、车站和隧道模型, 并在模型指定位置粘贴应变片; ②填砂至一定高度, 埋入安装好应变片的车站、隧道和挡土墙模型, 再继续填砂装箱; ③装箱完成的模型箱吊入离心机吊篮, 启动离心机, 使结构与土体紧密接触; ④挡土墙应变片数值稳定后, 停机安装激光位移传感器, 然后进行基坑开挖与支撑安装; ⑤完成一步开挖和支撑安装工作后, 启动离心机, 加速到 100g, 待监测数值稳定后记录数据, 直至开挖和支撑安装全部完成; ⑥停机, 撤掉试验模型, 进行数据处理, 提交试验结果。

## 2 试验结果分析

本次试验, 研究了间隔型基坑在同时开挖的情况下, 车站墙体、隧道墙体与基坑挡土墙的变形。

### 2.1 车站墙体位移

车站两侧墙体中轴线处各布置 9 个应变测点, 其中靠近左基坑的墙体, 有 3 处 (墙顶以下 12.5, 37.5, 43.75 m 处) 读数, 靠近中基坑的墙体, 有 3 处 (墙顶以下 6.25, 18.75, 43.75 m 处) 无应变测点读数。车站为 3 层结构, 顶板、内部两层楼板、底板分别位于墙体深度 3.95, 8.75, 14.94, 21.8 m 处。两面墙体在基坑群同时开挖条件下, 变形情况分别如图 9 所示。

开挖步 1 测定的数据表示, 进行第一次开挖并达到预定深度, 立即安装完成第一道支撑后, 启动离心机加速至 100g, 监测数值稳定后记录的数据。其他开挖步数据含义以此类推。

从图 9 (a) 可以看出:

(1) 靠近左基坑的车站墙体在开挖步 1 完成后, 车站底板以下部分墙体向基坑内部发生位移, 主要是由于基坑开挖造成卸载效应, 车站结构下部土体对墙

体产生的侧压力造成的。

(2) 车站墙体最大位移发生在墙顶以下 31.25 m 和 50 m 之间处, 但因缺失 37.5 m 和 43.75 m 数据, 无法判断最大位移准确位置。

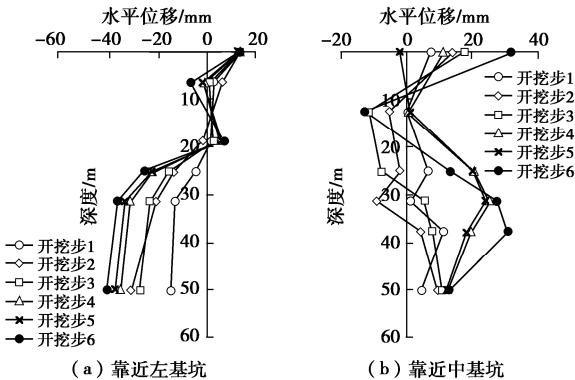


图 9 车站墙体变形  
Fig. 9 Deformations of station walls

(3) 随着开挖步的进行, 车站底板以下部分墙体逐渐向基坑内部发生水平位移, 最大位移发生时间在基坑开挖完成后。底板以上部分墙体水平位移的变化量不大, 说明车站结构对这部分墙体产生了较大的变形约束作用。

从图 9 (b) 可以看出:

(1) 随着开挖步的进行, 整个墙体大体上逐渐往基坑方向变形, 除了开挖步 2 和开挖步 3 中部分墙体往远离基坑方向发生了一定位移, 这可能与开挖时对结构产生一定扰动有关。

(2) 在开挖后期 (开挖步 4、开挖步 5 和开挖步 6), 车站底板以下部分墙体向基坑方向发生明显的“凸起”变形, 墙脚处水平位移小于上部墙体位移, 说明墙脚处土体更密实, 对墙体变形起到了更大的约束作用。

(3) 最大位移发生时间在开挖步 6 完成后, 且位于墙顶以下 37.5 m 处, 约为 30 mm。同样, 由于楼板的设置, 对墙体位移起了一定约束作用。

对比车站两侧墙体变形, 可以看到墙体底板以下部分均发生更明显的变形, 是因为基坑开挖过程中, 车站下方土体有往基坑内部方向运动的趋势造成的, 而靠近左基坑的墙体在底板以上部分向远离基坑方向变形, 靠近中基坑的墙体在底板以上部分向基坑方向变形, 可能是因为左基坑较中基坑大, 基坑开挖过程中, 对墙体产生的卸载效应更大, 车站下部土体往左基坑运动的趋势更明显, 致使车站整体上发生往右的微量倾斜。

## 2.2 隧道墙体变形

隧道结构靠近右基坑的墙体中轴线处布置 9 个应变测点, 有 3 处 (墙顶以下 18.75 m 处、43.75 m 处和 50 m 处) 无应变测点读数。隧道顶板和底板位于墙顶

以下 6.32 m 和 13.64 m 处。在左中右 3 个基坑同时开挖条件下墙体的变形见图 10。

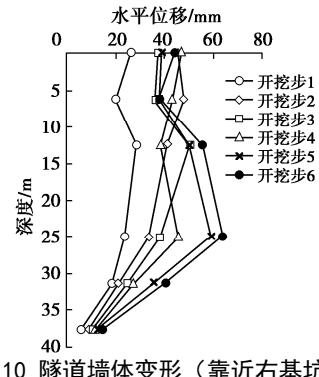


图 10 隧道墙体变形 (靠近右基坑)  
Fig. 10 Deformations of tunnel walls (close to right pit)

由图 10 可知:

(1) 靠近右基坑的隧道墙体在开挖步 1 完成后, 整个墙体向基坑内部方向产生水平位移, 分析原因, 是由于隧道上覆土的侧压力和隧道底部土体的侧压力作用引起。

(2) 随着开挖步的进行, 墙体位移逐渐增大, 隧道底板以下部分墙体变形幅度较底板以上部分墙体更大, 往基坑方向发生明显的“凸起”变形, 最大位移发生时间在开挖步 6 完成后, 且位于墙顶以下 25 m 处, 为 63.79 mm, 同样, 由于隧道顶板和底板的设置, 对墙体变形起了一定约束作用。

隧道结构墙体较车站结构墙体产生变形更大, 跟结构整体刚度存在一定关系, 车站结构总体刚度较隧道更大, 说明在基坑群开挖过程中, 隧道结构较车站结构偏于危险, 故需特别注意在施工过程中对隧道结构的保护。

## 2.3 基坑挡土墙变形

左中右 3 个基坑挡土墙在墙体中轴线处分别布置 9 个应变测点, 其中左基坑有 2 处 (墙顶以下 12.5 m 处和 18.75 m 处), 中基坑有 2 处 (墙顶以下 12.5 m 处和 50 m 处), 右基坑有 2 处 (墙顶以下 18.75 m 处和 31.25 m 处) 无应变测点读数。3 个基坑挡土墙变形如图 11 所示。3 个基坑挡土墙变形图像相似, 变化趋势基本相同。

试验表明, 挡土墙的水平位移最大值点随着基坑开挖的加深而下移, 但下移的幅度是逐渐变小的; 挡土墙水平位移极值随开挖深度加深越来越大, 其中水平位移最大值发生时间在开挖步 6 完成以后, 且位置在最大开挖深度附近; 同时从图中可以看出, 随着基坑继续开挖, 挡土墙支撑附近的挡土墙变形并未完全受到限制, 挡土墙变形仍有发展, 这说明支撑未完全地限制挡土墙的变形, 这是由于在高离心力场中, 支撑模型发生了一定量的向下的弯曲变形, 在挡土墙的顶推作用下, 更容易进一步变形, 这导致支撑无法

效地为挡土墙提供足够的支撑作用。

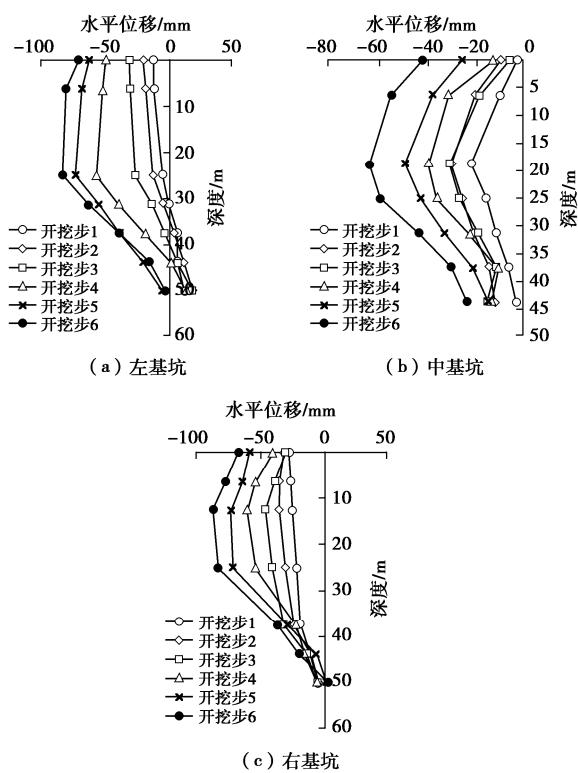


图 11 基坑挡土墙变形

Fig. 11 Deformations of retaining walls

### 3 结 论

本文以上海地铁 14 号线浦东大道站基坑工程为原型设计了离心模型试验, 得到了在基坑群开挖过程中, 各基坑围护挡土墙变形情况、各基坑外地表的沉降情况以及基坑群开挖对邻近地铁车站和隧道结构的影响机理, 主要包括车站的竖向位移、车站和隧道墙体的变形。得到了以下 3 点结论。

(1) 随着基坑开挖深度的加深, 车站墙体的变形随基坑开挖深度增大, 且车站底板下部墙体较上部变形更大, 车站结构整体向右发生微量倾斜。

(2) 隧道墙体变形随着基坑开挖深度的增大而增大, 且底板下部墙体较上部变形更大, 向基坑方向发生明显的“凸起”变形。

(3) 随基坑开挖深度的加深, 各基坑挡土墙水平位移的最大值点逐渐下移, 挡土墙水平位移的极值随开挖深度的加深而增大, 最大水平位移发生时间均为开挖步 6 完成后。

### 参考文献:

- [1] LAM S Y, ELSHAFIE M Z E B, HAIGH S K, et al. A new apparatus for modelling excavations[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2012, **12**(1): 24 – 38.
- [2] 戴斌, 胡耘, 王惠生. 上海地区相邻基坑同步开挖影响分析与实践[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊 2): 129 – 132. (DAI Bin, HU Yun, WANG Hui-sheng. Analysis and practice of influence of synchronous excavation of adjacent foundation pits in Shanghai area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S2): 129 – 132. (in Chinese))
- [3] 陈仁朋, 刘书伦, 孟凡衍, 等. 软黏土地层基坑开挖对旁侧隧道影响离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(6): 1132 – 1138. (CHEN Ren-peng, LIU Shu-lun, MENG Fan-yan, et al. Centrifuge modeling of excavation effects on a nearby tunnel in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(6): 1132 – 1138. (in Chinese))
- [4] 蒋晔. 大型地下车站基坑施工对周边环境的影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2008, **11**(6): 27-30, 34. (JIANG Ye. Influence of foundation pit construction of large underground station on environment[J]. Urban Mass Transit, 2008, **11**(6): 27-30, 34. (in Chinese))
- [5] 李磊, 段宝福. 地铁车站深基坑工程的监控量测与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 1): 2684 – 2691. (LI Lei, DUAN Bao-fu. Monitoring measurement and numerical simulation for deep foundation pit of subway station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(S1): 2684 – 2691. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] ZHANG G, YAN G C. In-flight simulation of the excavation of foundation pit in centrifuge model tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 2016, **39**(1): 20150028.
- [8] IAI S, TOBITA T C, NAKAHARA T. Generalised scaling relations for dynamic centrifuge tests[J]. Géotechnique, 2005, **55**(5): 355 – 362.

(编校: 黄贤沙)