

DOI: 10.11779/CJGE2022S1042

兰州特殊红砂岩地层深基坑支护监测与数值模拟分析

李宇杰¹, 冯忠居¹, 朱彦鹏^{*2}

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 兰州地铁开挖过程中不同场地遇到的红砂岩地层崩解性差异很大, 对不同类型红砂岩深基坑支护方法的研究亟待展开。以典型的红砂岩崩解性车站深基坑为例, 通过对场地特殊的工程地质及水文条件分析, 提出该类型红砂岩深基坑适合采用咬合桩加内支撑的支护结构。分析车站基坑施工过程中支护结构及周围环境变形的监测数据, 对开挖过程建立了 Midas GTS 数值模型, 对比分析了监测值与模拟值。结果表明各项目的变形都在安全控制范围内, 说明了该站基坑的支护结构方案合理有效, 研究结果可指导兰州地铁类似的红砂岩深基坑支护设计。

关键词: 红砂岩; 深基坑; 桩撑支护; 施工监测; 数值模拟

中图分类号: TU476 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)S1-0236-05

作者简介: 李宇杰(1993—), 女, 博士研究生, 主要从事深基坑支护设计、桥梁桩基等岩土工程方面的研究。E-mail: lyjie2022@163.com。

Monitoring and numerical simulation analysis of support structures of deep foundation pit in special red sandstone stratum in Lanzhou

LI Yu-jie¹, FENG Zhong-ju¹, ZHU Yan-peng²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: There are great differences in the disintegration of red sandstone strata encountered in different sites during the excavation of Lanzhou Metro, and the researches on the support methods for deep foundation pits in different types of red sandstone are urgently needed. Taking the deep foundation pit of a station in disintegrated red sandstone as an example, through the analysis of the special engineering geological and hydrological conditions of the site, it is proposed that the support structures of interlocking piles and internal supports are suitable. The monitoring data of the support structures and the deformation of the surrounding environment during the construction of foundation pit are analyzed. The numerical model Midas GTS is established for the excavation process, and the monitoring and simulated values are compared and analyzed. The results show that the deformation of each item is within the scope of safety control, indicating that the scheme of support structures for the foundation pit of the station is reasonable and effective. The research results may guide the support design of deep foundation pits in similar red sandstone in Lanzhou Metro.

Key words: red sandstone; deep foundation pit; pile-bracing support; construction monitoring; numerical simulation

0 引言

中国城市轨道交通近年来迅猛发展, 已经成为市政基础设施的主要组成之一, 随之而来的深基坑工程由于建设条件越来越复杂, 常常出现自身安全性与周边环境稳定性的破坏。兰州市东西狭长而南北窄的带状分布严重阻碍了市区交通的运输^[1], 为此规划的地铁线网在施工中碰到了西北地区特殊的富水红砂岩层, 其工程性质差别很大, 压实胶结作用差, 揭露后极易发生风化, 未扰动前力学性质较好, 遇水扰动后强度快速衰退, 崩解成流塑形的散沙, 从而引发诸多

地质工程问题^[2-5], 而地铁深基坑支护结构的设计目前仍处在施工探索和实践的阶段。兰州地铁各车站基坑的红砂岩地层岩性差异非常大, 若不对红砂岩分类并针对性地进行支护结构设计和地下水处理, 将导致基坑被水浸泡、坑壁涌水涌砂等一系列工程问题。定西路站基坑内的红砂岩地层遇水具有典型的崩解特性, 与之相应的基坑支护和地下水治理方案的研究刻

基金项目: 教育部长江学者创新团队 (IRT-17R51); 支持计划甘肃省科技计划项目 (18YFIGA136); 兰州市科技计划项目 (2018-4-12)

收稿日期: 2022-09-28

*通信作者 (E-mail: zhuypl@163.com)

不容缓。

国内外学者对深基坑支护结构的力学与变形特性已经做了大量的工作^[6-10], 但都没有针对兰州地区特殊红砂岩地层的深入研究。本文依托定西路站车站深基坑工程, 对开挖过程中的监测数据和 Midas GTS 的数值模拟结果对比分析, 验证支护方案设计的合理性, 研究结果可为类似红砂岩分布地区基坑支护结构设计提供技术支持。

1 工程概况

1.1 车站概况

定西路车站轴线近南北向分布, 车站总长 185 m, 标准段宽约 23.3 m, 底板埋深 24.33~24.73 m, 主体基坑施工方式为明挖法。车站两侧密集的建筑物加大了围护结构的受力, 对基坑支护产生了不利影响。

1.2 地质及水文条件

场地 45.0 m 勘探深度范围内各地层的岩性及埋藏条件如表 1。车站地下水为潜水, 卵石层为主要含水层, 埋深为 5.0~11.0 m, 其下第三系粉砂岩成岩作用差, 岩层内存在与卵石层相通的裂隙水。

表 1 岩土参数

Table 1 Geotechnical parameters

地层	层厚/m	重度 (kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	渗透 系数 (m·d ⁻¹)
黄土状土	0.7~10.2	18.3	17	20	5.0~8.0
卵石	5.0~11.0	21.0	0	40	25.8~35.3
强风化砂岩	5.7~10.8	20.7	30	33	2.1~2.9
中风化砂岩	未穿透	21.3	40	38	0.5~1.0

1.3 支护结构方案

车站场地砂岩层渗透性较小、流通性差, 降水周期短会导致层间滞水, 坑壁渗水将引发强风化粉砂岩崩解, 给基坑侧壁安全带来极大的风险, 场地特有的水文地质条件和岩土工程问题要求车站基坑的支护结构兼具支承及止水能力。

车站结构形式为地下二层单柱双跨箱型框架结构, 综合考虑经济性和安全性, 该站基坑采用咬合桩加内支撑支护。桩墙由Φ1000@1400 mm 的 C35 钢筋混凝土钻孔灌注桩与Φ800@1400 mm 的 C15 素混凝土旋喷桩咬合而成, 咬合深度为 200 mm, 桩长 24.118 m。标准段沿竖向布置三道内支撑, 钢筋混凝土撑水平间距约 6 m, 钢管撑水平间距为 3 m, 支护结构如图 1 所示。

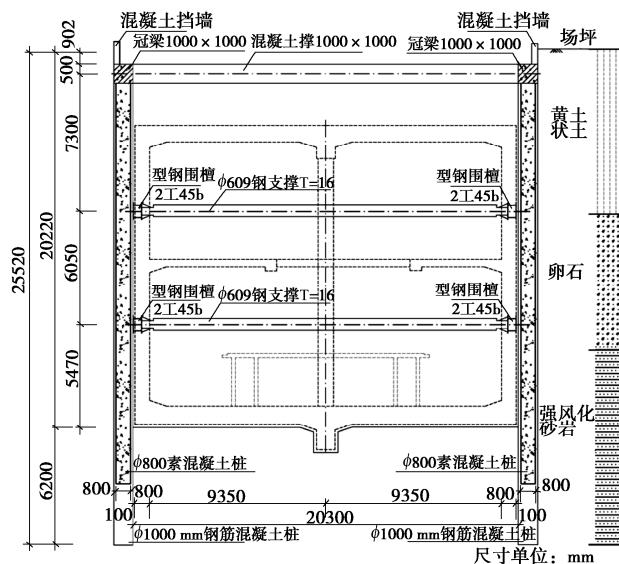


图 1 支护结构剖面图

Fig. 1 Section of support structures

2 现场测试与分析

2.1 监测方案

根据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB50911—2013) 制定监测方案, 各监测项目及控制值如表 2, 监测点平面布置如图 2。

表 2 基坑监测项目及控制值

Table 2 Foundation pit monitoring items and control values

监测项目	累计绝对值 /mm	累计开挖深度 度/%	变化速率 /(m·d ⁻¹)
周边地表沉降	30	0.20	3
建筑物沉降	30	0.20	3
支撑轴力			轴力设计值

2.2 基坑周边地表沉降分析

地表沉降监测点 DB10-1、DB10-2 和 DB10-3 随时间的变化关系曲线如图 3。由图 3 可得, 各监测点的地表累计沉降量随着基坑开挖深度增大上下波动, 但总体上都在增大。开挖初期, 最大沉降的位置离基坑边缘较近, 随着基坑开挖深度增加, 距离基坑边缘较远的 DB10-3 沉降值更大, 说明此时坑外土体向内倾斜对地表沉降产生的影响比内支撑的抑制作用大。

随着施工的进行, 基坑周边地表起伏变化。基坑开挖是卸荷过程, 开挖初期内支撑未支护时, 地表沉降。6月 17 日左右, 第一道钢支撑施工完成, 支护后的土体受到朝基坑外的挤压, 地表出现较小的隆起现象。随着开挖深度增大, 地表再次沉降, 7月 15 日, 第二道钢支撑施工完成, 地表再次隆起。DB10-3 的最大沉降值为 12.28 mm, 远小于控制值 30 mm, 表明基坑支护安全有效, 基坑开挖对周边地表的影响在可控范围内。

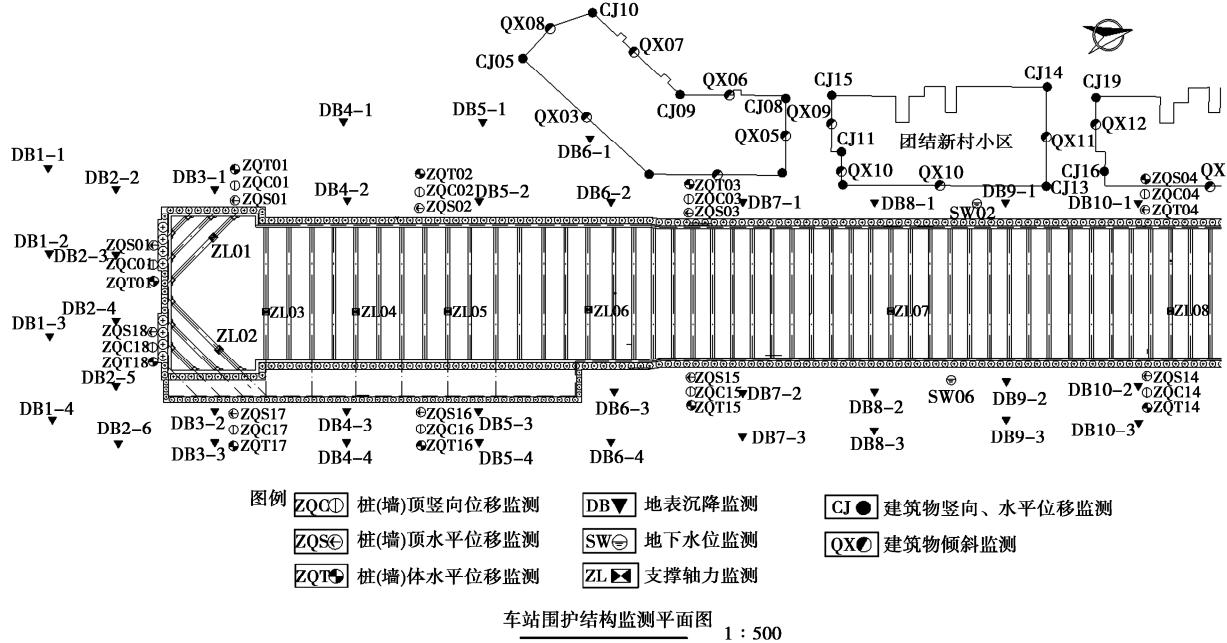


图 2 监测点布置平面图

Fig. 2 Layout plan of monitoring points

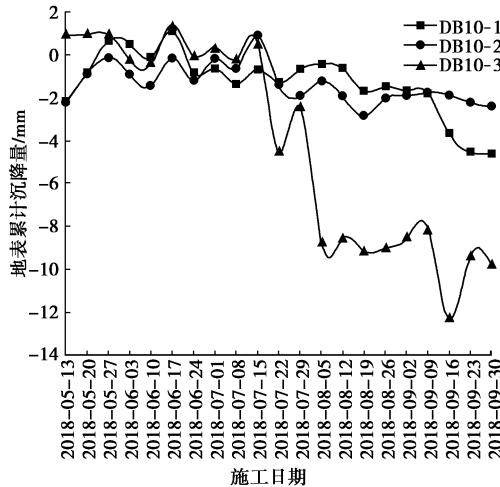


图 3 地表沉降随时间的变化

Fig. 3 Change of surface subsidence with time

2.3 基坑周边建筑物沉降分析

某栋楼四角监测点 CJ-12、CJ-13、CJ-14 和 CJ-15 的累计沉降值随时间的变化关系曲线如图 4。可知随着基坑开挖建筑物整体上在沉降，5月13日第一道支撑施工完成，建筑物向上隆起，6月17日第二道支撑施工后，建筑物整体发生微小的隆起变形，之后各监测点均表现为沉降，7月15日第三道支撑完成后，建筑物的沉降逐渐趋于平稳。

距离基坑边缘较近的监测点 CJ-12 和 CJ-13，变化曲线基本一致，较远的 CJ-14 和 CJ-15 的变化趋势相似，前者的沉降值整体上大于后者，可见基坑开挖对周边建筑物产生的影响随着距离的增加而减小。各测点在监测期得最大沉降量分别为 6.29, 5.42, 4.73, 3.72 mm, 远小于控制值 30 mm, 表明内支撑可有效

减小基坑周边建筑物沉降。

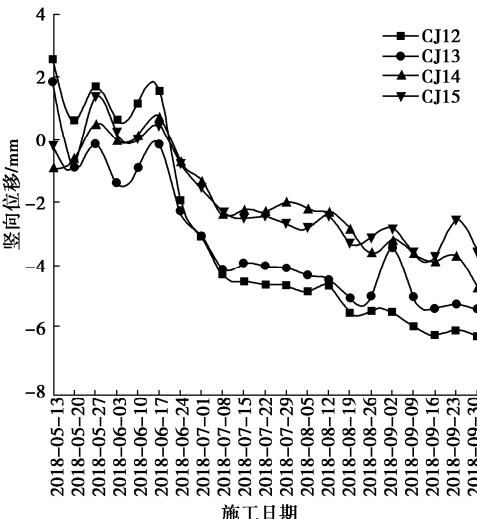


图 4 建筑物沉降随时间的变化

Fig. 4 Change of settlement of buildings with time

2.4 内支撑轴力分析

基坑原设计为三道钢支撑，轴力设计值分为 721, 1847, 1616 kN。监测点 ZL07 的三道内支撑轴力随时间的变化曲线如图 5。随着基坑开挖，三道支撑的轴力变化先上下起伏，在开挖完成后逐渐趋于稳定，可能与开挖深度不相等、内支撑预应力损失、间歇性施工等原因有关。5月13日第一道钢筋混凝土支撑施工完成，由于混凝土的收缩，使之受到 943 kN 的初始压应力。6月17日第二道支撑完成后，钢筋混凝土支撑的轴力明显下降，这是因为第二道支撑分担了基坑内土层卸荷产生的压力。7月15日第三道支撑完成，第一、二道支撑的轴力明显减小，之后三道支撑承担的

围护桩后的土压力随基坑开挖深度增加越来越大, 轴力也逐渐增大。

第一道支撑的轴力监测值始终大于设计值, 其中最大值为 1691 kN, 超过设计值的 135%, 故实际施工中用钢筋混凝土支撑代替了钢支撑。第二道支撑轴力最大值为 1367 kN, 轴力利用率较高。第三道支撑最大值为 598 kN, 轴力最大利用率为 37%, 设计偏保守。开挖过程未出现支撑破坏及基坑变形过大等现象, 表明基坑支撑设计还有很大的优化空间, 可进一步加强安全与经济的统一性。

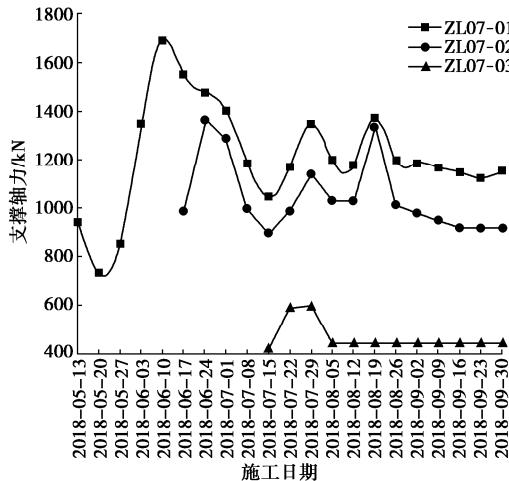


图 5 轴力随时间的变化

Fig. 5 Change of axial force with time

3 数值模拟及对比分析

3.1 模型及边界条件

选取 14~20 轴之间的基坑标准段建立 Midas GTS 有限元模型, 模型尺寸为 100 m×48 m×60 m, 网格划分如图 6。将模型涉及的土层简化为 4 层, 岩土体采用修正莫尔-库仑 (MMC) 模型, 支护结构采用弹性本构模型。根据基坑开挖步骤定义施工阶段如表 3。

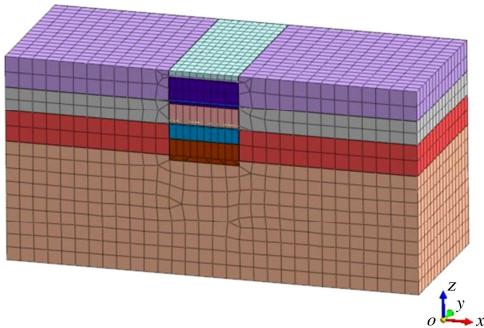


图 6 计算模型

Fig. 6 Computation model

3.2 基坑周边地表沉降对比分析

对比地表沉降监测点 DB10-1 的模拟值与监测值, 如图 7 所示。可知模拟值整体上小于实测值, 这是由于模拟计算的条件比较理想, 简化了土层, 假设开挖

在降水完成后进行, 且未考虑基坑周围可能出现临时堆载等不确定因素, 但两条曲线总体的变化趋势一致, 说明模拟计算的各参数选取较为合理。实测最大值为 -2.17 mm, 模拟最大值为 -1.5 mm, 均远小于控制值 -30 mm, 由于咬合桩加内支撑的支护结构刚度大, 且同一时间的开挖段较短, 对支护墙后的红砂岩地层扰动小, 因此基坑周边地表累计沉降值远小于控制值。

表 3 开挖工况

Table 3 Excavation conditions

工况	时间	施工状态
1	开始开挖—2018-05-13	开挖深度 2.4 m, 第一道钢
		筋混凝土支撑施工完成
2	2018-05-13—2018-06-17	开挖深度 9.7 m, 第一
		道钢支撑施工完成
3	2018-06-17—2018-07-15	开挖深度 15.75 m, 第
		二道钢支撑施工完成
4	2018-07-15—2018-07-29	开挖深度 20.22 m, 防水垫
		层已浇筑, 底板钢筋施工

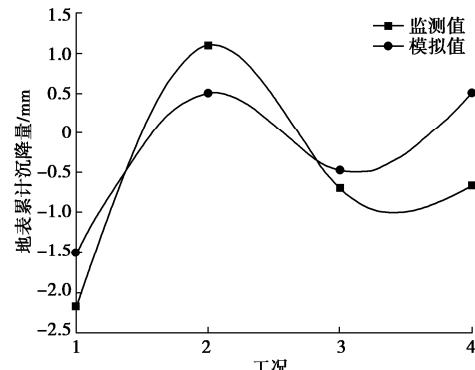


图 7 地表沉降对比

Fig. 7 Comparison of surface subsidences

3.3 内支撑轴力对比分析

选取建模区域内的支撑轴力监测点 ZL07, 对比第一道支撑的模拟数据和监测数据如图 8。由图可知, 两条曲线的变化趋势基本一致, 各工况下轴力的模拟值都小于监测值, 可能与建模条件较为理想、忽略了实际施工中基坑周边施工机具堆载等情况有关。由于钢筋混凝土支撑的刚度大, 整个开挖过程支撑和基坑都未出现过大的变形。

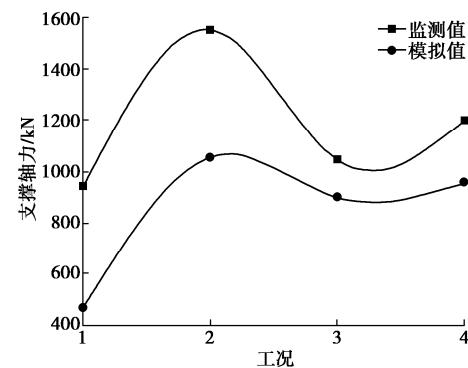


图 8 支撑轴力对比

Fig. 8 Comparison of structures axial forces of support

4 结 论

(1) 基坑开挖初期距离基坑边缘较近的位置地表沉降量更大, 随着开挖深度增加较远位置的沉降量更大; 基坑周边地表竖向位移随施工过程呈现沉降-隆起-沉降的起伏变化; 内支撑可有效减小基坑周边建筑物沉降。

(2) 第一道支撑的轴力始终大于设计值, 第二道的轴力利用率高, 第三道设计偏保守, 支护结构设计可进一步优化, 做到经济性和安全性相统一。

(3) 各施工监测项目结果与数值模拟结果随时间的变化趋势一致, 表明有限元软件可预测深基坑工程可能存在问题并优化支护方案。

(4) 开挖过程未出现支撑破坏及基坑变形过大等现象, 说明针对定西路车站红砂岩地层岩性条件下的深基坑支护结构合理有效, 设计思路对后续兰州地铁同类型红砂岩基坑支护有指导作用。

参 考 文 献:

- [1] LIANG X, YE F, OUYANG A H, et al. Theoretical analyses of the stability of excavation face of shield tunnel in Lanzhou metro crossing beneath the Yellow River[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, **20**(11): 04020200.
- [2] 周 勇, 王惠君, 朱彦鹏. 某地铁深基坑桩撑支护结构施工力学行为分析[J]. 铁道工程学报, 2019, **36**(1): 86 - 92. (ZHOU Yong, WANG Hui-jun, ZHU Yan-peng. Construction mechanics behavior analysis of pile-strut supporting structure of a subway deep foundation pit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, **36**(1): 86 - 92. (in Chinese))
- [3] 朱彦鹏, 马 滔, 杨校辉, 等. 基于正交设计的红砂岩改良土抗剪强度试验和回归分析[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 1): 87 - 92. (ZHU Yan-peng, MA Tao, YANG Xiao-hui, et al. Shear strength tests and regression analysis of red sandstone-improved soils based on orthogonal design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S1): 87 - 92. (in Chinese))
- [4] 周 勇, 郭 楠, 朱彦鹏. 兰州地铁世纪大道站基坑支护监测与数值模拟[J]. 铁道工程学报, 2014, **31**(1): 82 - 88. (ZHOU Yong, GUO Nan, ZHU Yan-peng. Construction monitoring and numerical simulation of deep excavation of century avenue metro station in Lanzhou[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, **31**(1): 82 - 88. (in Chinese))
- [5] 王文英, 周 烨. 计算机仿真技术在大断面铁路隧道施工方案比选中的应用[J]. 北京交通大学学报, 2014, **38**(4): 148 - 153. (WANG Wen-ying, ZHOU Ye. Application of computer simulation technology in the comparative analysis of excavation methods for large section railway tunnel[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, **38**(4): 148 - 153. (in Chinese))
- [6] 王国辉, 陈文化, 聂庆科, 等. 深厚淤泥质土中基坑开挖对基桩影响的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(2): 399 - 407. (WANG Guo-hui, CHEN Wen-hua, NIE Qing-ke, et al. Impacts of pit excavation on foundation piles in deep silty soil by centrifugal model tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(2): 399 - 407. (in Chinese))
- [7] 张治国, 赵其华, 鲁明浩. 邻近深基坑开挖的历史保护建筑物沉降实测分析[J]. 土木工程学报, 2015, **48**(增刊 2): 137 - 142. (ZHANG Zhi-guo, ZHAO Qi-hua, LU Ming-hao. Analysis on settlement monitoring of historical protective buildings adjacent to deep foundation pit excavation[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, **48**(S2): 137 - 142. (in Chinese))
- [8] YANG J H, KONG D Y. Deformation of deep and large foundation pit in soft soil of Fuzhou Subway[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, **13**(1): 36.
- [9] DING Z, JIN J K, HAN T C. Analysis of the zoning excavation monitoring data of a narrow and deep foundation pit in a soft soil area[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2018, **15**(4): 1231 - 1241.
- [10] 北京筑信达工程咨询有限公司. 深基坑设计软件[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(12): 2168. (Beijing Zhuxinda Engineering Consulting Co., Ltd. Deep foundation pit design software[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(12): 2168. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)