

DOI: 10.11779/CJGE2018S1023

兰州地铁某车站深基坑开挖变形特性分析

周 勇^{1,2}, 叶炜钠^{1,2}, 高 升³

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘 要: 对兰州市某地铁站深基坑桩顶水平位移、桩体水平位移和地表沉降变形进行跟踪监测, 分析其变化规律。监测结果表明: 桩顶水平位移随基坑开挖逐渐增大, 靠近内支撑的桩顶水平位移变化较平缓; 桩体水平位移随着深度增加呈现先快后慢、先陡后缓的变化趋势, 距桩顶 2/3 处会出现水平位移最大值; 距离基坑越近地表沉降量越大, 变化速率越快。最后借助有限元软件 Geostudio 对基坑开挖进行了模拟, 并将数值模拟结果与监测结果进行了对比分析, 结果表明, 数值模拟和监测结果较为接近, 变化规律基本一致, 证明了设计方案和有限元模型的可靠性, 可为今后类似工程的设计和施工提供很好的借鉴意义。

关键词: 深基坑变形特性; 桩顶水平位移; 桩体水平位移; 地表沉降

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S1-0141-06

作者简介: 周 勇(1978-), 男, 湖北宣恩人, 博士, 教授, 博士生导师, 国家一级注册结构工程师, 主要从事深基坑开挖支护与边坡加固方面的教学和研究工作。E-mail: gsutzhouy@163.com。

Deformation characteristics of excavation of deep foundation pit at a metro station in Lanzhou

ZHOU Yong^{1,2}, YE Wei-na^{1,2}, GAO Sheng³

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. China Railway First Survey & Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The horizontal displacement of the pile top, the horizontal displacement of the pile and the settlement of the ground surface in the deep foundation pit of a subway station in Lanzhou are monitored and analyzed. The results show that the horizontal displacement of pile top increases with the excavation of the foundation pit, and that of the pile tip close to the inner support is relatively smooth. With the increase of depth, the horizontal displacement of the pile presents the trend of “being first fast and then slow, first steep and then slow,” and there will be a maximum value at 2/3 points from the top of the pile. The more the ground settlement is, the faster the change rate is. Finally, the finite element software Geostudio is used to simulate the excavation of the foundation pit, and the numerical simulation results are compared with the monitoring ones. It is indicated that the results of numerical simulation and monitoring are close, and the law of change is basically the same. The reliability of the design scheme and finite element model is proved. It can provide a good reference for the design and construction of similar projects in the future.

Key words: deformation characteristic of deep foundation pit; horizontal displacement of pile top; horizontal displacement of pile; settlement of ground surface

0 引 言

随着城市越来越快的发展, 兴建地铁成为各大、中型城市现代化发展中不可或缺的工程项目^[1-2]。由于地铁属于城市地下工程, 基坑土体被挖出时, 基坑一定影响范围内的土体受到扰动, 土层应力会进行调整, 继而会对基坑围护结构、周边地表及附近建筑物造成

不良影响, 甚至威胁到基坑工程施工现场和周边地表、建筑物的安全性能, 因此, 地铁基坑工程的安全性一直是人们关注的重点^[3-9]。监控测量技术在基坑工程中

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51568042)

收稿日期: 2017-06-11

的广泛应用,对于指导施工、监测反馈设计以及提供实时数据都起到了非常好的帮助。而计算机技术的迅猛发展又为利用有限元法研究基坑开挖的相关问题提供了强有力的高科技工具^[10-11]。近年来,越来越多相关专业人士将监控测量和计算机技术相结合,研究基坑施工过程中的变形情况,以期能够对基坑工程进行更好的管理,加强安全措施。如房师军等^[1]利用理正数值模拟软件、FLAC^{2D} 软件模拟方法总结了地铁深基坑围护结构在不同开挖阶段变形规律,发现围护结构变形曲线最终会发展成“弓”形,且最大水平位移出现在基坑开挖 2/3 处;刘勇等^[2]将 FLAC^{3D} 三维数值模拟程序与实际监测数据相结合,以实时监测、建模的方法运用于北京深基坑围护结构变形的预测中;冯晓腊等^[12]采用有限元软件 PLAXIS 对武汉老铺片商业及住宅项目深基坑最不利剖面进行了基坑开挖全过程的数值模拟分析;李四维等^[13]利用 PLAXIS 3D Foundation 有限元软件对北京某地铁深基坑在开挖过程中围护桩桩体和桩顶的位移、钢支撑轴力及基坑周围土体地表沉降的变化进行建模分析。

尽管目前关于深基坑变形特性方面的研究有很多,但是兰州地区地质条件特殊,使得深基坑变形特点不同于其他地区,关于兰州地区深基坑的相关研究也较少,因此本文以兰州地铁 1 号线五里铺车站深基坑工程为背景,采用实际监测和数值模拟相结合的方法,分析了兰州地铁车站深基坑开挖变形特性,目的是为兰州地区类似基坑工程的可靠设计和安全开挖提供参考。

1 工程概况

五里铺站为 1、2 号线换乘站,采用地下三层双柱三跨的结构形式。车站主体长度约 201.01 m,标准段宽 20.7 m,总高 20.78 m,结构底板埋深 24.34~26.31 m。车站主体采用明挖顺作法施工,基坑围护结构采用钻孔灌注桩,基坑设内支撑,车站主体为现浇钢筋混凝土箱型框架结构,主体结构外设置附加防水层。

1.1 地质条件

五里铺车站地貌单元属黄河 I 级阶地。车站基坑开挖深度范围内各层土的岩性特征及埋藏条件分述如下:

①素填土(Q4^{ml}):杂色、硬塑。主要成分为黏性土,层厚 0.80~7.10 m,层底深度 0.80~7.10 m。②黄土状土(Q4^{al}):黄褐色、硬塑,稍湿。主要为粉土,局部为粉质黏土,土质较均匀。层厚约为 1.50~7.00 m,层底深度为 4.60~8.00 m。③卵石(Q4^{al}):杂色、密实,颗粒母岩成分以灰岩、花岗岩为主,磨圆度较

差,呈次圆状~次棱角状,层底深度 10.00~14.80 m。

④强风化砂岩(E1-2):棕红色、密实,细粒结构,层状构造。成岩作用差,遇水易软化,暴露地表易风化。

1.2 水文条件

根据勘察结果,含水层主要为第四系冲积卵石(局部含漂石)。地下水潜水位埋深 8.0~9.4 m,含水层主要为卵石层,卵石下的砂岩为相对隔水层,砂岩顶部可能存在局部裂隙水。

1.3 工程环境

(1) 既有道路

1 号线车站沿东岗西路东西向布设,位于东岗西路与瑞德大道十字路口西侧。东西向东岗西(东)路规划道路红线宽为 50 m,现状道路宽 21 m,双向 6 车道,两侧道路绿化带及人行道宽 15 m。东岗西路是兰州市城市主干道。

(2) 周边建筑物

车站周边建筑物较为密集,建筑物级别均较高,且距离车站主体结构较近。车站西北侧为甘肃省卫生学校,距开挖面最小距离为 13.2 m;西南侧为兰州大学第一医院,距开挖面最小距离为 20.47 m。东端在瑞德大道路中有一条泄洪渠,距开挖面最小距离为 0.8 m,在十字路口处为跨渠的五里铺桥,距开挖面最小距离为 0.8 m。

(3) 地下管线

车站所处位置的地下管线较多,车站施工时,影响车站基坑开挖的主要管线有 1 根 $\Phi 1200$ 雨污合流管道,埋深约 7.62 m,材质为混凝土管;1 根 $\Phi 1200$ 油污管道,埋深约 6.0 m,材质为混凝土管;1 根 $\Phi 1200$ 雨水管道,埋深约 9.0 m,材质为混凝土管;1 根 $\Phi 100$ 给水管道,埋深约 1.68 m,材质为铸铁管,需悬吊保护;还有很多电信、联通、移动及路灯强弱电铜光缆等,对影响施工的管线考虑做悬吊保护、临时或永久迁改。

2 基坑变形监测分析

2.1 监测项目及测点布置

根据 1 号线五里铺车站《主体围护结构监测总平面图》统计,监测项目工作量主要有:桩顶水平位移监测点 22 个,桩体水平位移监测点 14 个,桩顶垂直位移监测点 22 个,地下水位监测点 13 个,支撑轴力监测断面 12 个(48 个点),地表沉降(隆起)监测点 50 个,地下管线沉降、水平位移监测点 37 个,建(构)筑物沉降测点 24 个,建(构)筑物倾斜测点 15 个。基坑监测点布置断面图见图 1 所示。

本文仅对桩顶水平位移、桩体水平位移和地表沉降监测进行分析。

2.2 监测点布置图

车站主体的围护结构以直径 1200 mm、强度等级为 C35 的钻孔灌注桩作为主体围护结构，桩间距 1.5 m；支撑采用直径 609 mm，厚度 16 mm 的钢管焊接支撑，第一道支撑直接支撑于冠梁上，第二、三、四道支撑则支撑于钢围檩上。基坑监测断面如图 1。

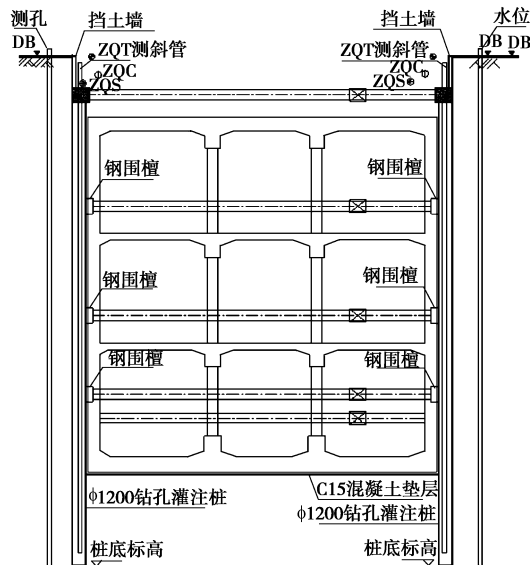


图 1 基坑监测断面图

Fig. 1 Monitoring section of foundation pit

2.3 监测结果分析

(1) 桩顶水平位移

选取 W05 和 W07 两个监测点监测结果进行分析，其中 W07 监测点位于内支撑之间，W05 监测点位于内支撑附近，桩顶水平位移曲线如图 2 所示。

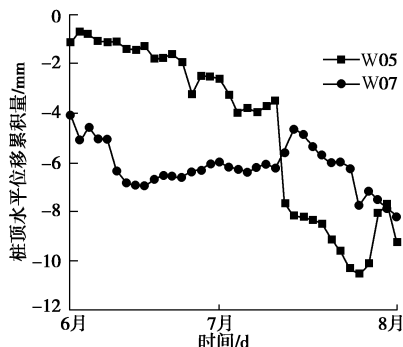


图 2 桩顶水平位移变化曲线图

Fig. 2 Curves of horizontal displacements of pile top

由图 2 中 W05 和 W07 的位移曲线可知，桩顶水平位移量的绝对值随时间逐渐增大，从 6 月份开挖到 8 月份为止，桩顶最大水平位移为-10.6 mm，在报警值之内，而 W07 监测点的水平位移相较于 W05 的水平位移而言，其变化较为平缓，主要是因为内支撑很好地控制了桩顶水平位移。

从图 2 中还可以发现，W05 和 W07 测点的桩顶水平位移在 7 月中旬出现一个突降点，分析其原因：该区域多为强风化红砂岩，遇水易软化崩解，而车站基坑西段坑底积水较多，坑底泥泞，施工单位又未及时抽排水，导致基坑土体长时间受水浸泡，承载力下降，桩后局部土体变形引，最终影响到 W05 和 W07 两个监测点的桩顶水平位移。

(2) 桩体水平位移

选取 CX01 来分析桩体水平位移。根据每周监测数据分别绘制 CX01 水平位移变化曲线图，如图 3 所示。

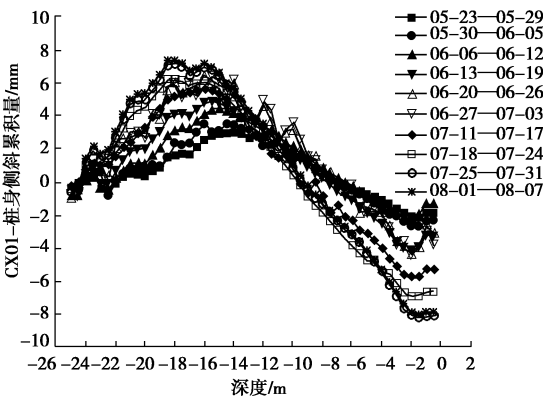


图 3 CX01 桩水平位移变化曲线

Fig. 3 Horizontal displacement curves of CX01 pile

由图 3 可知，测点 CX01 桩身水平位移程度随时间和工程推进越来越大，距离桩顶 2 m 的范围内，水平位移变化趋势比较稳定，之后迅速发展，在距离桩顶 2/3 的位置处水平位移达到最大值，随后以低于上升速度的速率下降，桩底水平位移一直在 0 上下微小波动，可忽略。且随着基坑的不断开挖，基坑越来越深，各水平位移变化曲线依次越来越密，说明桩体水平位移随时间逐渐增大，最后趋于稳定。

(3) 地表沉降

选取 DB05-01、DB05-02、DB05-03、DB07-01、DB08-02、DB09-01、DB09-01、DB10-01 共 8 个测点来分析地表沉降与基坑开挖的关系。通过监测结果分别绘制了 8 个监测点的变形曲线图，见图 4 所示。

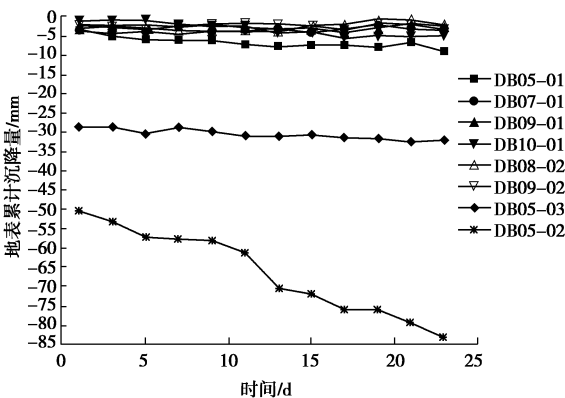


图 4 地表沉降变化曲线图

Fig. 4 Curves of ground surface settlement

DB07-01、DB09-01、DB10-01 是在基坑的横向平行线上且依次靠近基坑中心的 3 个监测点，DB08-02 和 DB09-02 也是类似的两个监测点，如图 4 所示，DB07-01、DB09-01、DB10-01、DB08-02、DB09-02 5 个测点的沉降（或隆起）曲线变化趋势基本一致。DB05-01、DB05-02 和 DB05-03 是在基坑纵向轴线平行线上的 3 个监测点，DB05-01、DB05-03 和 DB05-02 离基坑的距离依次渐近，由图 4 可以看出，3 个测点沉降变化曲线中，DB05-02 测点的沉降曲线变化趋势最大，其次是 DB05-03，最后 DB05-01，由此可以说明，距离基坑越近，沉降越大，沉降变化也较大。

3 数值模拟对比分析

3.1 模型简介与参数

本文所建立的模型采用二维模型，材料分类采用总应力参数，材料模型采用弹塑性模型，模型尺寸为 90 m×60 m，坐标 x 轴方向为基坑宽度， y 轴为基坑开挖深度。模型两侧边界条件为固定 X ，模型底边界条件为固定 X/Y ，基坑两侧超荷载为 20 kPa。基坑深 24 m，基坑内外侧降水最终深度为-24.5 m，桩顶标高为-1.5 m，嵌固深度为 7.5 m，钢支撑选用 Q235 的钢材，第一道支撑施加 200 kN 的预应力，第二道支撑施加 500 kN 的预应力，第三、四道支撑分别施加 700 kN 的预应力。建立模型所采用的土层参数见表 1，建立的模型如图 5 所示。

表 1 模型土层参数

Table1 Soil parameters of model						
层号	土类名称	层厚/m	重度/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
1	杂填土	2.8	15.8	10.0	14.0	0.39
2	杂填土	2.6	16.1	22.0	26.5	0.29
3	卵石	8.3	23.3	10.0	37.0	0.23
4	强风化岩	100.0	21.1	21.0	32.0	0.22

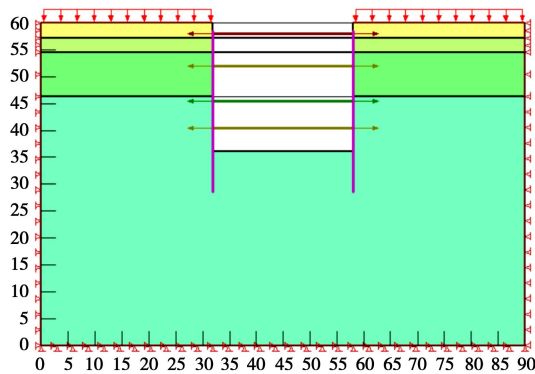


图 5 有限元模型

Fig. 5 Finite element model

3.2 基坑开挖施工过程中工况的设置

按照施工顺序，尽量真实地反映基坑在开挖过程中的变形情况。模拟基坑开挖步骤见表 2。

表 2 基坑开挖分析步

Table 2 Steps of excavation process	
施工步	工况
1	初始地应力平衡
2	基坑第一层土体开挖
3	围护桩施工
4	基坑第二层土体开挖
5	设置支撑一
6	基坑第三层土体开挖
7	设置支撑二
8	基坑第四层土体开挖
9	设置支撑三
10	基坑第五层土体开挖
11	设置支撑四
12	土体开挖至基坑底部
13	稳定阶段

3.3 数值模拟结果与监测数据的对比分析

本模型选取和监测数据相同的位移监测点进行计算、分析，仅选取桩身水平位移和桩顶水平位移进行对比分析，桩身水平位移的对比结果分别如图 6~8 所示，桩顶水平位移的对比结果如图 9 所示。

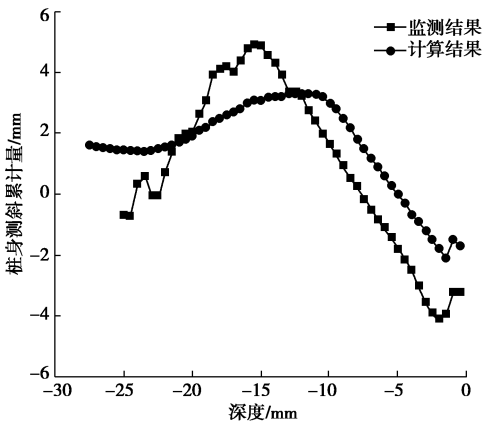


图 6 基坑第二层土体开挖后桩身水平位移对比曲线图

Fig. 6 Comparison curves of pile horizontal displacement after excavation of the second layer of soil

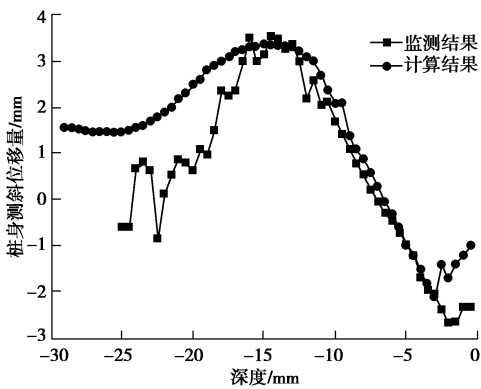


图 7 基坑第四层土体开挖后桩身水平位移对比曲线图

Fig. 7 Comparison curves of pile horizontal displacement after excavation of the fourth layer of soil

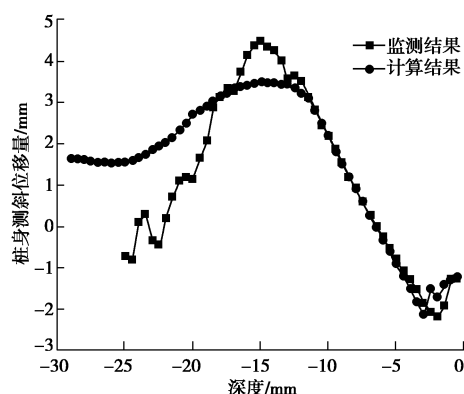


图 8 基坑最后一层土体开挖后桩身水平位移对比曲线图

Fig. 8 Comparison curves of pile horizontal displacement after excavation of the last layer of soil

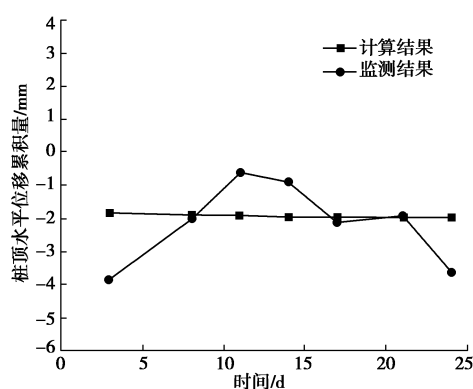


图 9 桩顶水平位移数值模拟对比图

Fig. 9 Comparison curves of Numerical simulation of horizontal displacement of pile top

由于需要对比分析数值模拟计算结果和监测结果, 本文选用数值模拟中的第 4, 8, 12 步的开挖工况来做分析, 同时选取实际工程中相对应工况的监测结果作为对比。第 4 步基坑第二层土体开挖后, 如图 6 所示, 与监测结果相比, 桩身水平位移的数值模拟计算结果已经出现与监测结果相似的趋势, 桩身最大水平位移的位置在 -10 m 左右; 第 8 步基坑第四层土体开挖后, 如图 7 所示, 桩身水平位移逐渐变大, 桩身最大水平位移的位置已经移到 -15 m 处; 第 12 步基坑开挖至坑底后, 如图 8 所示, 桩身水平位移已经较为稳定, 计算结果和监测结果最大水平位移的位置几乎完全吻合, 计算结果的曲线变化趋势与监测结果的曲线变化趋势也更加接近。如图 9 所示, 随着基坑的不断开挖以及加撑, 桩顶水平位移越来越小。

从图 6~9 中可以观察到, 监测结果比数值模拟的结果大, 且图 6 中, 监测结果与计算结果相比, 监测结果中的桩身最大水平位移提前出现在 -15 m 的位置, 而计算结果中的桩身最大水平位移则随着基坑开挖深度的增大逐渐移至 -15 m 的位置, 分析其原因:

数值模拟计算结果与监测结果相比, 数值模拟的计算结果和其变化速率都较小, 其原因是数值模拟无法将现实施工过程中所受到的诸多影响因素考虑进去, 比如机械振动、施工过程中加撑不及时、施工现场降排水工作不到位等都会导致监测结果的位移量增大。由此可见, 计算结果和监测结果必然存在一些不可避免的误差, 但桩顶位移和桩身水平位移的计算结果和监测结果的变化趋势基本一致, 说明数值模拟分析的计算模型、计算方法及计算参数等是可行的, 也证明数值模拟分析确实能够合理地反映基坑的变形特性, 为深基坑工程的设计提供可靠的理论依据。

4 结 论

本文通过兰州市五里铺地铁站基坑实测数据研究了兰州市地铁站基坑工程附近建筑物沉降、地表沉降、桩顶水平位移及桩身水平位移的变化规律。初步结论如下:

(1) 桩顶水平位移与桩距离钢支撑的远近有关。桩离钢支撑越近, 桩顶水平位移越小, 说明钢支撑对桩顶水平位移有很好的控制作用。

(2) 地铁站周围地表沉降与测点距离基坑边的距离有关。距离基坑边相同距离时, 地表沉降变化基本一致; 距离基坑边沿越近, 所受影响越大, 地表沉降越快。

(3) 桩身水平位移变化曲线随着基坑开挖深度的增加呈现先快后慢、先陡后缓的变化趋势, 距桩顶 2/3 处会出现水平位移最大值。

参考文献:

- [1] 房军师, 付拥军, 姚爱军. 某地铁工程深基坑排桩围护结构变形规律分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 216 - 219. (FANG Jun-shi, FU Yong-jun, YAO Ai-jun. Deformation of row pile retaining structures for deep foundation pit of subway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 216 - 219. (in Chinese))
- [2] 刘 勇, 冯 志, 黄国超, 等. 北京地铁工程深基坑围护结构变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, **5**(2): 329 - 335. (LIU Yong, FENG Zhi, HUANG Guo-chao, et al. The study in predicting the deformation of supporting structure for deep foundation pit of Beijing railway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, **5**(2): 329 - 335. (in Chinese))
- [3] 徐杨青. 深基坑工程设计的优化原理与途径[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(2): 247 - 251. (XU Yang-qing. Deep foundation design principle and methods of optimization[J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(2):247 - 251. (in Chinese))
- [4] 王超, 朱勇, 张强勇, 等. 深基坑桩锚支护体系的监测分析与稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(增刊 1): 2918 - 2923. (WANG Chao, ZHU Yong, ZHANG Qiang-yong, et al. Monitoring analysis and stability evaluation of pile-bolt support system in deep pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2014, **33**(S1): 2918 - 2923. (in Chinese))
- [5] 孙凯, 许振刚, 刘庭金, 等. 深基坑的施工监测及其数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(2): 293 - 298. (SUN Kai, XU Zhen-gang, LIU Ting-jin, et al. Construction monitoring and numerical simulation foundation of a analysis pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(2): 293 - 298 (in Chinese))
- [6] 帅红岩, 陈少平, 曾执. 深基坑支护结构变形特征的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(增刊 2): 374 - 380. (SHUAI Hong-yan, CHEN Shao-ping, ZENG Zhi, et al. Numerical simulation of deformation characteristics of supporting structure of deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(S2): 374 - 380. (in Chinese))
- [7] 孟丹, 臧晓光, 于广明, 等. 地铁车站开挖引起的地表沉降分析方法的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(6): 1169 - 1177. (MENG Dan, ZANG Xiao-guang, YU Guang-ming, et al. Comparative study of analytical methods for ground surface settlement induced by subway station construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(6):1169 - 1177. (in Chinese))
- [8] 吴意谦, 朱彦鹏. 兰州市湿陷性黄土地区地铁车站深基坑变形规律监测与数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(增刊 2): 404 - 411. (WU Yi-qian, ZHU Yan-peng, et al. Monitoring and numerical simulation of deformation law of deep foundation pit of subway station in Lanzhou collapsible loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(S2): 404 - 411. (in Chinese))
- [9] 李淑, 张顶立, 房倩, 等. 北京地铁车站深基坑地表变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(1): 189 - 198. (LI Shu, ZHANG Ding-li, FANG Qian, et al. Research on characteristics of ground surface deformation during deep excavation in Beijing subway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(1): 189 - 198. (in Chinese))
- [10] 李磊, 段宝福. 地铁车站深基坑工程的监控测量与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(增刊 1): 2684 - 2690. (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 - 2690. (in Chinese))
- [11] 刘杰, 姚海林, 任建喜, 等. 地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩石力学, 2010, **31**(增刊 2): 456 - 461. (LIU Jie, YAO Hai-lin, REN Jian-xi, et al. Monitoring and numerical simulation of deformation of retaining structure in subway station foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S2): 456 - 461. (in Chinese))
- [12] 冯晓腊, 熊宗海, 莫云, 等. 复杂条件下基坑开挖对周边环境变形影响的数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(增刊 2): 330 - 336. (FENG Xiao-la, XIONG Zong-hai, MO Yun, et al. Numerical simulation and analysis of surrounding environment deformation influenced by excavation of foundation pits under complex conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(S2): 521 - 530. (in Chinese))
- [13] 李四维, 高华东, 杨铁灯. 深基坑开挖现场监测与数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 284 - 291. (LI Si-wei, GAO Hua-dong, YANG Tie-deng, et al. Monitoring and numerical analysis of a deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 284 - 291. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)