

西安地铁深基坑变形模式统计规律分析

梅 源¹, 袁一力¹, 胡长明¹, 王雪艳^{1,2}, 赵 楠¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安工程大学环境与化学工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对西安地铁车站深基坑地表沉降及支护桩侧向变形性状开展了统计分析. 分析表明: 西安地铁车站深基坑地表沉降集中于 0~12 mm 范围, 支护桩侧向变形集中于 0~8 mm, 两者均小于其它地区的统计值. 基坑地表沉降表现为“凹槽形”模式, 距离坑壁 10~15 m 内地表沉降值最大, 距坑壁 30 m 以外沉降较小. 基坑支护桩变形表现为“中凸形”或“悬臂形”两种变形模式, 除个别测点支护桩顶部向基坑外变形外, 其余均向基坑内变形, 其中, “中凸形”模式变形的支护桩距地表 5~15 m 内变形最大, “悬臂形”模式支护桩顶变形最大, 并随深度增加而逐渐减小.

关键词: 土力学; 湿陷性黄土; 基坑工程; 西安地铁; 变形模式

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)03-0371-05

Statistical analysis of the construction deformation model of the deep foundation pit in Xi'an Metro Station

MEI Yuan¹, Yuan Yili¹, HU Changming¹, Wang Xueyan^{1,2}, Zhao Nan¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055;

2. School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048)

Abstract: A statistic analysis of the properties of the ground settlement and the lateral deformation of soldier pile of the deep excavation in Xi'an metro station is performed. The result shows that: Ground settlement of the deep excavation in Xi'an metro station mainly ranges from 0 mm to 12 mm, while the lateral deformation of soldier pile mainly ranges from 0 mm to 8 mm, both of which are smaller than that of other areas. The shape of the foundation ground settlement is groove-like, which means the ground settlement of the area within 10m to 15m from the foundation pit wall is the biggest, while that of the area 30 m away the foundation pit wall is smaller. The shape of the lateral deformation of soldier pile is like convex or cantilever. Deformation direction of most soldier pile is towards the foundation pit except for a very few piles are on the biggest deformation of the convex shape takes at the pile 5 m to 15 m below ground, while the biggest deformation of the cantilever shape is on the top of the pile, and the deformation decrease with the increase of the distance to the top of the pile.

Key words: soil mechanics; collapsible loess; foundation pit engineering; Xi'an metro; deformation model

黄土湿陷性具有极大的危害性^[1]. 作为黄土地区第一个修建地铁的城市, 西安地铁沿线土体多为典型的湿陷性黄土, 基坑工程变形影响因素比较复杂, 基坑开挖过程中风险较大, 基坑变形控制问题一直是工程人员关注的焦点.

针对深基坑变形规律的研究, 已经积累了一些重要的研究成果. LEUNG^[2]、徐中华^[3]、王卫东^[4]、MASUDA^[5]、李淑^[6-7]分别分析了不同地区的基坑变形特性及影响因素, 但较少涉及黄土深基坑. 虽然有不少学者针对某单一黄土深基坑的变形规律进行了分析, 但由于数据量较少, 而未能得到统计规律, 为向黄土地区地铁深基坑工程的设计和施工提供参考, 本文针对西安地铁车站深基坑地表沉降及支护桩侧向变形性状开展了统计分析, 对防止基坑事故及优化设计具有重要意义.

1 基坑概况及沿线基本地质条件

西安地铁沿线多穿越渭河或泾河阶地、黄土梁洼和黄土塬区^[8]. 地质条件复杂, 湿陷性黄土、饱和软黄土、饱和的粉细砂层、人工填土等特殊岩土和不良地质以及地裂缝决定了西安地铁工程的特殊地位, 沿线主要土层物理力学参数平均值见表1.

表1 西安地铁沿线主要土层物理力学参数平均值
Tab.1 Average value of the mechanical parameters of the critical soil layer along Xi'an subway

土层	天然重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	变形模量 E/MPa	泊松比 μ	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
杂填土 Q_4^{ml}	13.4	9	0.38	9.5	13.3
素填土 Q_4^{ml}	16.7	9	0.35	11.5	16.9
新黄土 Q_3^{eol}	16.8	22	0.32	37.2	21.7
老黄土 Q_2^{eol}	17.4	24	0.32	41.7	21.3
粗砂 Q_2^{al}	21.4	30	0.30	0	38.0

收稿日期: 2015-12-31

修改稿日期: 2016-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目资助项目(51408463); 陕西省自然科学基金项目(2016JQ5091); 陕西省教育厅专项科研项目(15JK1413); 西安建筑科技大学科技计划项目(RC1375); 西安建筑科技大学科技项目(QN1409)

作者简介: 梅源(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土力学及工程技术方向的研究. E-mail: my0326@126.com

为避免基坑变形影响因素过于复杂,本次统计基坑形状均为矩形,均是采用灌注桩与钢支撑联合支撑系统,基本信息见表2。

表2 统计的车站深基坑工程基本信息

Tab.2 Fundamental information of the station foundation pit engineering

序号	车站名称	基坑尺寸			围护桩
		长度/m	宽度/m	深度/m	嵌固深度/m
1	万寿路 ^[9-10]	135.6	21	27.1	9
2	通化门 ^[11-12]	150.2	22.7	24.54	10.5
3	小寨(2号线) ^[13]	209.6	21.5	17.11	8
4	小寨(3号线) ^[13]	145.65	21.7	23.16	11
5	南门 ^[14]	190.2	22.5	17.0	7
6	尤家庄 ^[15]	185	18.5	16.06	6
7	韦曲南 ^[16]	241.75	20.7	17.8	6
8	运动公园 ^[17]	190.2	22.5	17	7
9	某车站 ^[18]	225.7	24.9	15.6	4
10	五路口(1号线) ^[19]	194.8	22.7	16.11	4

由表2可知,本次统计的基坑长度集中分布在200 m左右,宽度集中分布在20 m左右,开挖深度主要分布于15~20 m之间,最大开挖深度达27.1 m,开挖尺寸分布如图1所示。

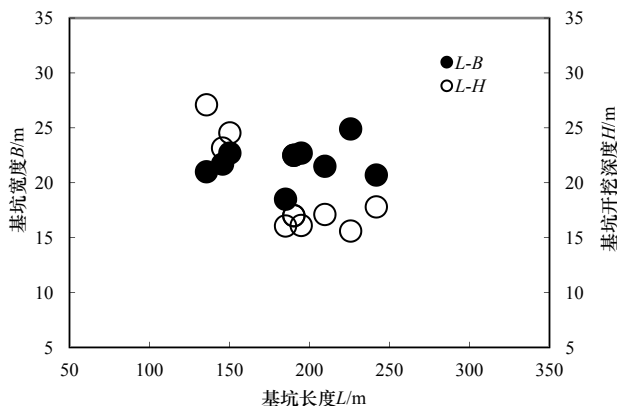


图1 基坑开挖尺寸分布

Fig.1 Dimension distribution of the excavation

2 基坑最大变形量分布

本次统计共得到81个地表沉降测点有效测值及710个桩体变形有效测值。图2为地表沉降测点的最终变形值,图3为桩体侧向变形最终测值。

从图2可以看出:基坑开挖主要引起地表沉降,沉降测点占有测点的97.53%;沉降值为0~3 mm的测点所占比例为23.46%;3~6 mm测点所占比例为39.51%为最高比率区段;6~9 mm测点所占比例为18.52%;9~12 mm测点所占比例为9.88%;12~15 mm测点所占比例为2.47%;15~18 mm测点所占比

率1.23%;沉降值大于18 mm的测点仅占2.46%。分析发现:基坑开挖不仅会使地表产生沉降,还会导致地面隆起,隆起的测点不多且隆起值较小,介于0~3 mm。

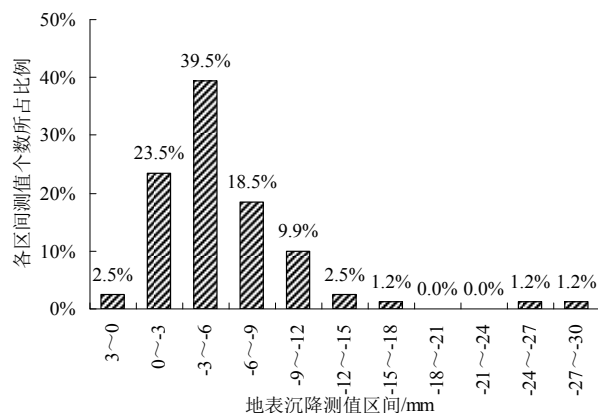


图2 地表沉降值分布

Fig.2 Value distribution of ground settlement

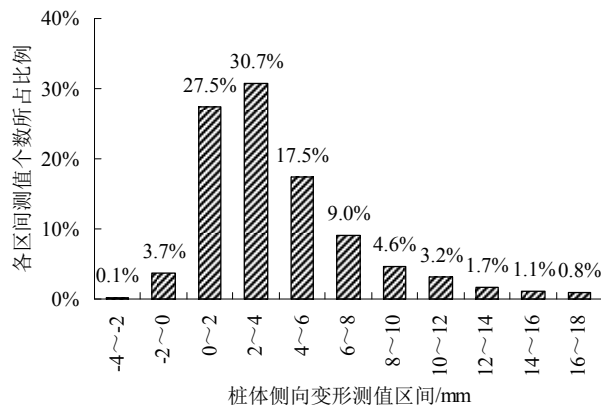


图3 支护桩侧向变形值分布

Fig.3 Value distribution of lateral deformation of soldier pile

由图3可知:围护桩最大侧向变形为0~2 mm所占比率为27.46%,2~4 mm区段所占比率为30.70%,是分布比例最高的区段;4~6 mm区段所占比率为17.46%;6~8 mm区段所占比率为9.01%;8~10 mm区段所占比率为4.65%;10~12 mm区段所占比率为3.24%;大于12 mm区段仅占3.67%。

对比发现,基坑地表沉降主要在0~12 mm范围,总体略大于墙体侧移(集中于0~8 mm),但绝对变形量见其它土质基坑小,这与黄土特殊的结构性和较高的强度有直接关系。本文统计结果与北京地区深基坑工程开挖总体变形趋势基本一致^[6-7]。

3 基坑基本变形模式

3.1 西安地铁深基坑与其它地区基坑变形对比分析
西安地区地铁深基坑变形与其他地区的对比情况见表3。

表3 西安地铁车站深基坑变形与其它地区对比结果
Tab.3 Comparison: results of the deep foundation pit in Xi'an metro station and other area

来源	土层条件	桩体侧移 U/H /%	地表沉降 V/H /%
G. W. Clough ^[2]	硬黏土、砂土	0.200	0.150
C. Y. Ou ^[6]	台北软土	0.200~0.500	0.500~0.700
R. Fernie ^[27]	英国较硬土	0.150~0.200	0.150
M. Long ^[4]	软土层	0.140~0.480	0.120~0.800
I. H. L. Wong ^[7]	软土层	0.150~0.500	0.200~0.500
E. H. Y. Leung ^[8]	香港城区土层	0.130~0.230	0.020~0.120
Y. M. A. Hashash ^[29]	填土、黏土等	0.070	0.050~0.150
徐中华 ^[9]	上海软土	0.440	0.420
李淑	北京城区土层	0.100~0.130	0.100
本文	西安黄土	0.036	0.043

由表3可知, 西安地区地铁车站基坑最大侧移平均值远小于其它地区, 这说明黄土深基坑在天然含水量状态下稳定性好, 侧移及沉降均较小。

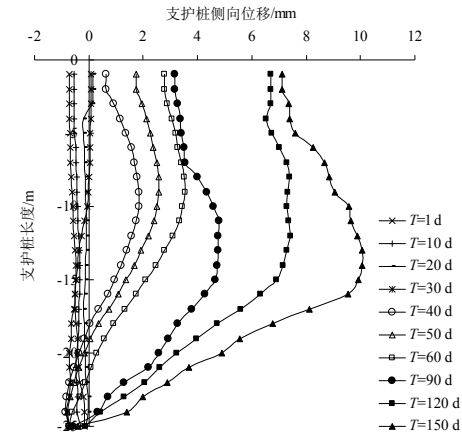
3.2 西安地铁深基坑典型变形曲线监测与分析

为说明西安地铁深基坑典型变形曲线, 本文基于某深基坑实测数据对支护桩变形及地表沉降的变化规律加以分析. 该车站长度约为150 m, 车站标准段宽度约为23 m, 开挖深度为25 m. 车站主体围护结构采用钻孔灌注桩及钢管($\Phi 600$)内支撑方案, 基坑内共设五层支撑. 场地位于黄土梁洼区, 地表一般均布有厚度不均的全新统人工填土(Q_4^{ml}); 其下为上更新统风积新黄土(Q_3^{eol})、层饱和软黄土(Q_3^{eol})及古土壤(Q_3^{el}), 再下为中更新统风积老黄土(Q_2^{eol})、冲积粉质黏土(Q_2^{al})、中砂等. 选取的支护桩侧移监测点监测结果如图4所示, 地表沉降监测断面监测结果如图5所示。

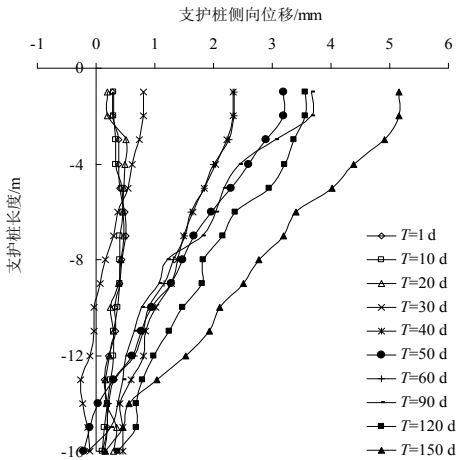
从图4中可看出, 在整个基坑的开挖过程中, 围护桩水平位移总体变化不大, 围护桩水平位移的最大值约有10 mm, 与设计桩体测斜报警值还相差较大, 这充分反映出了黄土深基坑不同与软土地区的显著特点, 黄土由于本身的结构性, 侧向变形较软土地区要小的多. 在基坑开挖的初始阶段, 支护桩的侧向位移一般很小, 呈前倾型曲线。

监测过程中发现, 大部分桩体变形曲线变化趋势相同(如图4(a)所示), 呈抛物线分布, 且在整个基坑施工过程中, 桩体变形最大位置随着开挖深

度的增加逐渐下移. 从图4(b)中还可以发现, 少部分桩体变形规律较其它测点有显著的不同, 整个支护桩的位移沿深度方向是线性减小的, 支护桩最大位移出现在桩顶, 这可能由于局部环境及荷载情况差异所致. 从图4中还可以看出, 桩体的水平位移不仅发生在开挖面以上, 开挖面以下也会产生一定的位移. 所以, 保证支护桩有一定的嵌固深度在设计和施工过程中是非常必要的。



(a) 支护桩侧移监测时程曲线1



(b) 支护桩侧移监测时程曲线2

图4 支护桩侧向变形监测曲线

Fig.4 Monitoring curve of lateral deformation of soldier pile

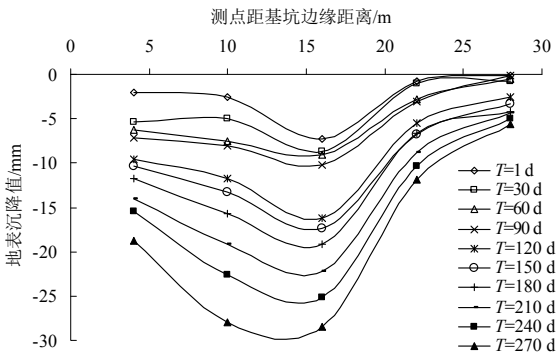


图5 地表沉降变形监测曲线

Fig.5 Monitoring curve of ground settlement

从图5中可以看出,在基坑开挖过程中,最大沉降点并不是距离基坑最近处,而是始终发生在距基坑边缘一定距离处.该基坑的实测地面最大沉降点位于距离基坑边13~15 m的位置处,整体沉降形状类似于“凹槽形”,且随着基坑开挖深度的增加,沉降峰值逐渐向基坑侧靠近.在整个基坑开挖过程中,最大的地面沉降值接近30 mm,并随着监测点与基坑边距离的不断增加,沉降值又逐渐减小,最后趋于稳定.每开挖一步,坑后地表的沉降量都有一定程度的增加,每步开挖形成的地表沉降分布曲线形状相似.

3.3 变形模式分析

为统计分析西安地铁深基坑支护桩侧向变形及地表侧向变形的规律,本文将收集到的数据采用统计方法处理,得到基坑地表沉降测点最终测值统计图(如图6所示)及基坑支护桩侧向变形统计图(如图7所示).

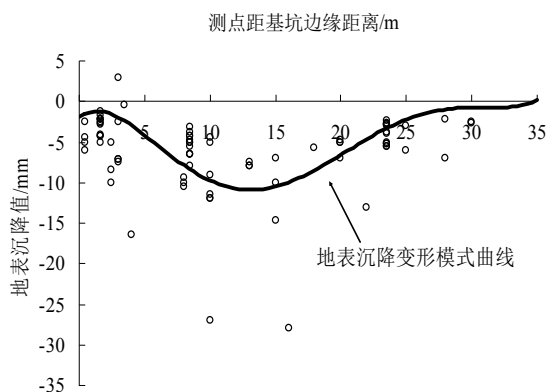


图6 地表沉降变形模式
Fig.6 Model of ground settlement

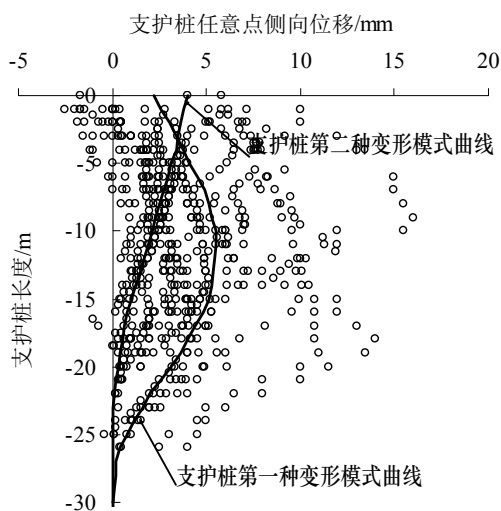


图7 支护桩侧向变形模式
Fig.7 Model of lateral deformation of soldier pile

由图6可知,西安地区地铁车站基坑地表变形

表现为“凹槽形”模式.除距基坑边缘约3 m处个别测点表现为隆起外,其余均为沉降;距离坑壁10~15 m内地表沉降值最大;距坑壁30 m以外沉降较小,基本模式与北京地区深基坑地表变形模式相似^[6].

由图7可知,西安地区地铁车站基坑支护桩变形表现为两种变形模式,即“中凸形”或“悬臂形”模式^[7].除个别测点支护桩顶部向基坑外变形外,其余均向基坑内变形.“中凸形”模式变形的支护桩距地表5~15 m内变形最大;“悬臂形”模式支护桩顶变形最大,并随深度增加而逐渐减小.两种变形模式下支护桩嵌固端可视为不动点.根据经验,对于土质较好的基坑,桩侧土压力的作用往往表现不明显,支护桩变形更接近于“悬臂形”模式;当土质相对较软或部分土层发生湿陷时,桩侧土压力的作用将会表现的较为突出,桩体变形模式更接近于“中凸形”模式,类似于软土基坑.

4 结 论

(1) 西安地铁车站深基坑地表沉降变形主要集中在0~12 mm范围,支护桩侧向变形集中于0~8 mm范围,但两者均小于其它地区的统计值.

(2) 基坑开挖导致的地表沉降变形表现为“凹槽形”模式,距离坑壁10~15 m内地表沉降值最大,坑壁30 m以外地表沉降较小,且随着基坑开挖深度的增加,峰值逐渐向基坑侧靠近.支护桩侧向变形分别表现为“中凸形”或“悬臂形”两种模式,距地表5~15 m范围内侧向变形最大且在施工过程中,桩体变形最大位置随着开挖深度的增加逐渐下移.

参考文献 References

- [1] 王梅. 中国湿陷性黄土的结构性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
WANG Mei. Study on Structure of collapsible loess in China[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [2] LEUNG E H Y, NG C W W. Wall and ground movements associated with deep excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2007, 133(2): 129-143.
- [3] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 81-86.
XU Zhonghua, WANG Jianhua, WANG Weidong. Deformation behavior of diaphragm walls in deep excavations in Shanghai[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(8): 81-86.
- [4] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11):

- 1659-1666.
WANG Weidong, XU Zhonghua, WANG Jianhua. Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1659-1666.
- [5] MASUDA T. Behavior of deep excavation with diaphragm wall[D]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1993.
- [6] 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 Dingli, 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.
- [7] 李淑, 张顶立, 房倩, 等. 北京地区深基坑墙体变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2344-2353.
LI Shu, ZHANG Dingli, FAN Qian, et al. Research on characteristics of retaining wall deformation due to deep excavation in Beijing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2344-2353.
- [8] 杨智国, 张福忠. 西安地铁2号线地质勘察总体工作探讨[J]. 铁道工程学报, 2009, 133(10): 95-98.
YANG Zhiguo, ZHANG Fuzhong. Discussion on the overall geological survey for metro lines in Xi'an[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 133(10): 95-98.
- [9] 赵浩. 地铁车站深基坑的变形规律研究与风险识别[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
ZHAO Hao. Risk identification and study on deformation laws of deep excavation in subway station[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [10] 杨罗沙. 基于现场监测反馈分析的黄土地区超深基坑位移控制及工程应对措施研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
YANG Luosha. The research of the displacement control and the engineering measures of the super deep loess foundation pit based on the monitoring and feedback analysis[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [11] 林源. 黄土超深基坑施工对周边环境的影响及对策研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
LIN Yuan. Study on influence and countermeasure of loess extra deep foundation ditch construction to surroundings environment[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [12] 李沙沙. 地铁施工期周围环境风险管理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
LI Shasha. Study on risk management of subway construction to surroundings environment[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [13] 周国华. 黄土地区地铁T形换乘站深基坑围护结构稳定性研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2009.
ZHOU Guohua. Study on the stability of retaining structure in "T Shape" interchange transition station foundation pit in loess area[D]. Xiangtan: Hunan University of science and Technology.
- [14] 刘均红. 西安地铁车站深基坑变形规律现场监测与FLAC模拟研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
LIU Junhong. In-situ monitoring and FLAC simulation study of deformation laws of deep excavation in metro station in Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an University of science and Technology, 2010.
- [15] 李永辉. 黄土深基坑施工监测分析与数值模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
LI Yonghui. The monitoring analysis and numerical simulation for loess deep foundation pit[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2009.
- [16] 张婷. 西安地铁韦曲南站深基坑变形规律现场监测研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
ZHANG Ting. Study of in-situ monitoring of deformation law of deep excavation in Weiqu south station of Xi'an subway line[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [17] 杨睿, 李冬生. 西安地铁运动公园站深基坑变形规律现场监测研究[J]. 西安工业大学学报, 2014, 34(6): 450-454.
YANG Rui, LI Dongsheng. Monitoring deformation of deep foundation pit of sports park station of Xi'an subway[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2014, 34(6): 450-454.
- [18] 刘杰, 姚海林, 任建喜. 地铁车站基坑围护结构变形监测与数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 456-461.
LIU Jie, YAO Hailin, REN Jianxi. Monitoring and numerical simulation of deformation of retaining structure in subway station foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 456-461.
- [19] 成娟. 西安地铁车站深基坑施工风险管理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
CHENG Juan. The risk management of deep excavation at subway station in Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2011.
- [20] 梅源, 胡长明, 王雪艳, 等. 西安地区湿陷性黄土地铁车站深基坑开挖引起的地表及基坑支护桩变形特性[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(1): 9-16.
MEI Yuan, HU Changming, WANG Xueyan, et al. Research on characteristic deformation of ground surface and retaining pile induced by deep foundation pit excavation of subway station in collapsible loess of Xi'an area[J]. China Railway Science, 2016, 37(1): 9-16.

(编辑 桂智刚)