

基坑开挖的实测分析与短期预测方法探索

舒志乐, 吴海宽, 杨大雪, 李亨

(西华大学土木建筑与环境学院, 成都 610039)

摘要:为研究基坑开挖对周围环境的影响和提高基坑监测分析的及时性,根据基坑工程的实际案例,通过使用测量仪器如水准仪、全站仪和轴力计等对沉降、水平位移和轴力等进行监测,得到冠梁、支护桩、周边地表和临近建筑的变形规律,并采用指数平滑法分析监测数据,预测基坑各项安全指标的变化趋势,此方法只适用于短期预测。分析结果表明,基坑的开挖深度和基坑侧面施工机械和大面积的堆载对于基坑的变形有很大影响,但钢支撑的及时架设可以有效的控制基坑的变形。采用指数平滑法进行预测能够弥补监控量测的滞后性,对于实际工程具有重要的指导意义。

关键词:指数平滑法;基坑监测;基坑开挖;水平位移

中图分类号:TU753

文献标志码:A

引言

随着城市交通建设的快速发展,地上交通的空间越来越少,由此,人们就开始把交通建设从地上引入了地下,基坑在各项工程实际中的应用越来越多,并且基坑的深度也在逐渐加大,由此引发了很多问题。如基坑开挖引起的周边地表的沉陷,对地下设施和周边建筑带来的不利影响,造成周边路面和地下管线的开裂等^[1-3]。为了适应基坑工程的快速发展,基坑的实时监测越发重要,但是目前的监控量测技术得出的监测数据具有一定的滞后性,基坑监测的预测方法就变得至关重要。基坑监测领域内有很多研究在预测数据的方法以及预测预警系统^[4]等方面做出贡献,提出了许多预测方法,比如回归分析法、BP神经网络法、小波神经网络法和时间序列法等^[5-10],本文在前人研究的基础上引入了时间序列法中的指数平滑法对监测数据进行预测,使得监测的数据能够及时的指导施工。本文以太原铁路枢纽新建西南环线东晋隧道明挖段为实例,对部分必测项目进行分

析并采用指数平滑法对基坑数据进行预测,以确保工程的安全稳定^[11]。实时监测和短期预测给施工设了两道安全保障,对现场的施工和安全具有重要的意义。

1 工程概况与地质条件

1.1 工程概况

东晋隧道明挖段起点里程 DK0+400,终点里程 DK1+223,全长 823 m。东晋隧道设计为单孔双线结构,明挖段采用直墙拱顶形式,双线之间线间距 4 m~5 m,最大挖深 20 m,覆土最大深度 7 m(图 1)。基坑降水采用水泥搅拌桩+基坑内降水和基坑外降水两种形式。基坑防护采取土钉墙、抗浮梁、护拱、钻孔灌注桩+钢支撑、倒撑等多种形式相结合。

1.2 地质条件

本标段所承建的范围属于山前洪积平原,地形宽广平坦,起伏小,线路经过的地区分布既有铁路、道路和地面建筑物又有河道及少许菜园圃,地面高程 794.85 m~837.46 m。地貌主要为丘陵缓坡、洪积平原及冲积平

收稿日期:2017-02-24

基金项目:国家自然科学基金创新群体基金(50621403);教育部春晖计划项目(14206503);西华大学重点基金项目(zl120635);西华大学研究生创新基金(ycej2016080)

作者简介:舒志乐(1976-),男,湖南洞口人,副教授,博士,主要从事岩土工程和地下工程方面的研究,(E-mail) 377830956@qq.com

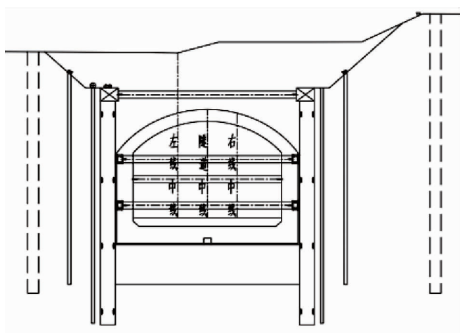


图 1 基坑立面示意图

原,地形平坦开阔,略有起伏。该地区属于典型的断陷盆地,盆地内主要的断层种类有南堰断裂和交城断层。隧道范围内地层主要为第四系全新统洪积层(Q4pl),地表覆盖第四系全新统人工堆积层(Q4ml)。按照地质柱状图自上而下为:0.5 m~5.0 m 杂填土、素填土;5 m~18 m 新黄土;18 m~23 m 粉质黏土;23 m~40 m 粉土、砂土,个别地段夹杂圆砾或卵石。明挖段隧道基坑深度及埋深:挖深 17 m~20 m,埋深 2 m~10 m,围岩等级为 VI 级。

2 周边环境和气候特征

本工程周边环境复杂,安全管理和环境保护要求高,沿线周边建(构)筑物密集,地下管线众多。施工前必须对管线或构筑物进行细致探测,采取周密的保护和疏解方案;全过程加大周边建(构)筑物和管线的监控量测的频率,实施信息化动态施工;采用可靠系统的环境保护措施,确保管线和建(构)筑物安全。工程所在地冬

季干冷漫长,夏季湿热多雨。需制定夏季施工明挖基坑防水及结构物工程的养护,冬季施工防寒保温等措施,并严格落实。

3 监测方案

3.1 监测意义

在深基坑开挖的施工过程中,基坑内外的土体将由原来的静止土压力状态向被动和主动土压力状态转变,应力状态的改变引起围护结构承受荷载并导致围护结构和土体的变形,围护结构的内力(围护桩和墙的内力、支撑轴力或土锚拉力等)和变形(深基坑坑内土体的隆起、基坑支护结构及其周围土体的沉降和侧向位移等)中的任一量值超过容许的范围,将造成基坑的失稳破坏或对周围环境造成不利影响,因此,在深基坑施工过程中,需要对基坑支护结构、基坑周围的土体和相邻的构筑物进行全面、系统的监测,以确保工程的顺利进行。

3.2 监测内容

基坑监测主要分为两类,即应力监测与变形监测。应力监测仪器主要采用轴力计、钢筋计、压力传感器和孔隙水压力计等,变形监测主要仪器采用全站仪、水准仪和测斜仪等。监测项目主要有:(1)桩顶水平位移;(2)桩顶竖向位移;(3)周边地表竖向位移;(4)深层水平位移;(5)邻近建筑竖向位移;(6)钢支撑轴力。其中桩顶水平位移测点数 24 个;桩顶竖向位移测点数 24 个;周边地表竖向位移测点数 36 个;深层水平位移 3 根,测点数 133 个;邻近建筑竖向位移测点数 16 个;钢支撑轴力测点 4 个。监测布点示意图如图 2 所示。

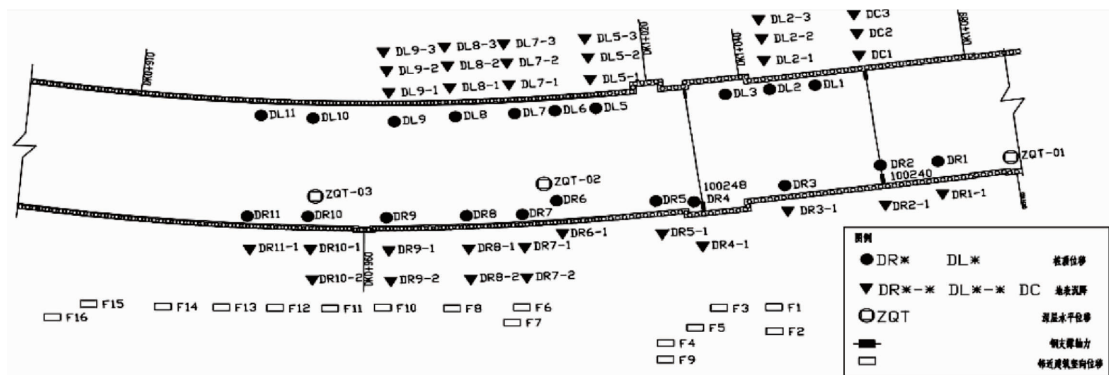


图 2 监测布点示意图

3.3 监测频率

基坑开挖过程是从大里程到小里程进行分层开挖,最后向小里程出口收缩取土,并且分块进行底板和顶板的施工。基坑监测频率根据基坑变形情况与基坑施工进度进行调整。桩顶沉降和水平位

移监测频率为基坑开挖时,1 次/天,主体结构施工时,1 次/2~3 天;支撑轴力监测频率为开挖初期 1 次/天,挖至基底 2~3 次/天;基坑回弹监测频率为埋设后、基坑开挖完成、地板浇筑前测量。地表沉降为 1 次/天。

4 监测结果分析

本工程明挖段正处于施工阶段,监测项目见表1,利用已有的监测数据对部分项目进行分析。

4.1 沉降监测

沉降监测主要针对桩顶竖向位移、周边地表的竖向位移以及邻近建筑的竖向位移进行分析。分析过程中发现问题并给予现场施工一定的指导。

4.1.1 桩顶与周边地表沉降

表1 监控量测项目、方法和精度

监测项目	监测方法	仪器名称	监测精度
地表沉降	水准测量(二等)	苏州一光 DS05	≤0.3 mm
桩顶水平位移	视准线法、小角度法	全站仪 KTS-442	≤1 mm
桩顶竖向位移	水准测量(二等)	苏州一光 DS05	≤0.3 mm
支撑轴力	钢筋应力计	海岩工程仪器厂频率仪	应力计精度不低于 0.5% F.s
地下水(坑外)	水位计	SWJ-8090 型钢尺水位计	不低于 10 mm
周边邻近建筑竖向位移	水准测量(二等)	苏州一光 DS05	≤0.3 mm
深层土体水平位移	测斜仪	CX-2000 测斜仪	测斜仪系统精度不低于 0.25 mm/m
支护结构内力	钢筋计	海岩工程仪器厂频率仪	应力计精度不低于 0.5% F.s
裂缝监测	裂缝计	ZBL-F101 裂缝宽度观测仪	宽度精度不宜低于 0.1 mm,长度和深度不低于 1 mm
倾斜监测	前方交会法、垂吊法、差异沉降法	全站仪或高精度水准仪	≤1 mm

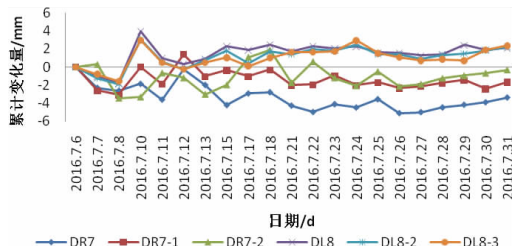


图3 DK0 +994 横断面沉降变化曲线图

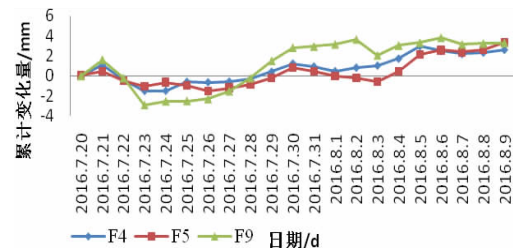


图4 DK1 +018 邻近建筑沉降变化曲线图
(+ 下沉; - 上抬)

4.1.2 周边建筑沉降监测

面向大里程基坑右侧有居民小区建筑,由于其距离基坑小于三倍基坑开挖深度,应进行监测。由于基坑开挖深度和桩顶沉降,邻近建筑物会发生明显不均匀沉降^[12]。选取里程 DK1 +018 位置的三个监测点进行分析,曲线图如图4所示。由图4可知,监测点所在位置的沉降变化趋势基本一致,其中 F9 距离基坑最近,受基坑开挖的影响也较大,沉降更明显。

4.2 桩顶水平位移监测

桩顶水平位移能够反映基坑支护桩顶的变形情况,这里选取了四个监测点进行对比(图5)。其中 DR6 与 DL7 在一个横断面上,DR7 和 DL8 在一个横断面上,纵坐标正向表示向基坑内偏移,负向表示向基坑外偏移。从监测结果分析可知,桩顶的水平位移不仅与基坑的位置有关,还与基坑的周边堆载相关^[13]。基坑左侧的桩顶向基坑内偏移,右侧的桩顶向基坑外偏移,这是由于在

选取 DK0 +994 横断面的桩顶和周边地表的监测点,通过使用水准仪测量高程得到的数据,绘制了该横断面桩顶与周边地表沉降的变形曲线图(图3)。图3中,纵坐标累计变化量正值表示下沉,负值表示上升。由图3可知,在开挖的前几天,突变比较明显,但都没有超过控制值,而后曲线趋于平缓。面向大里程左侧点沉降变形更加接近,而右侧点变形现阶段普遍上抬,主要原因是现场施工过程中,大型机械、钢筋、钢支撑等主要放置在了基坑右侧,导致基坑右侧承受的力过大,导致基坑边变形上抬。

基坑左侧没有堆载,开挖后,排桩只受侧面土的土压力作用,导致左侧桩顶水平位移向基坑内偏移;基坑右侧有堆载,附加荷载的作用使得桩顶水平位移出现了向基坑外偏移的现象。在开挖初期,桩顶水平位移有轻微波动,但变形量随着基坑的开挖逐渐增大,主要表现在7月6日至7月23日,在7月23日之后,随着钢支撑的架设,变形量逐渐趋于稳定,钢支撑的架设有效的抑制了桩顶水平位移的增加。

4.3 深层水平位移监测

深层水平位移能够较好的反映灌注桩和基坑侧面土体的整体变形情况,是基坑的重要安全指标。测点 ZQT-01 的有效测量深度为 14.5 m,测点 ZQT-01 的深层水平位移累计变化曲线和大面积堆载作用下深层水平位移累计变化曲线分别如图6和图7所示,其中,正号表示位移向基坑内侧,负号表示位移向基坑外侧。由

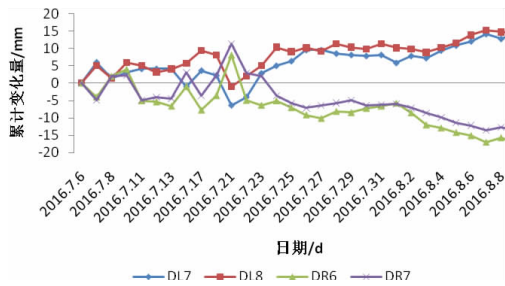


图 5 桩顶水平位移累计变化曲线图

图 6 可知,在钢支撑架设之前(7月7日),基坑深层水平位移最大值发生在地表,这是因为在土压力的作用下,支护桩类似于悬臂梁,最大水平位移发生在支护桩顶^[14]。随着开挖的进行,深层水平位移逐渐增大,这是由于在开挖的过程中,破坏了土体原有的应力平衡,使得该位置的变形逐渐变大。在深度为 1.5 m 的位置,水平位移变化最大,向基坑内侧偏移达到 2.200 mm,这是由于基坑架设了两道钢支撑,对该处基坑支护产生了约束,使得深层水平位移最大值发生在支护中间位置。由图 7 可知,此时基坑侧面有大面积堆载包括施工机械和钢筋,并且基坑底板也已经施工完毕,深层水平位移变形曲线前半段现凸起形状,后面逐渐趋向于零,说明基坑底部趋于稳定,简化的力学模型如图 8 所示,能够很直观的反映基坑侧面受到大面积临时堆载时的变形情况。

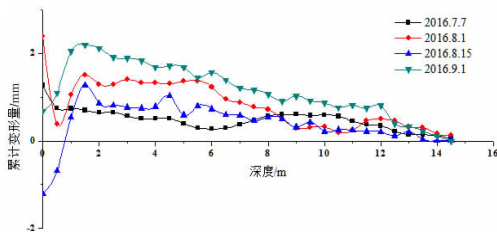


图 6 ZQT-01(1#) 测点深层水平位移累计变化曲线图

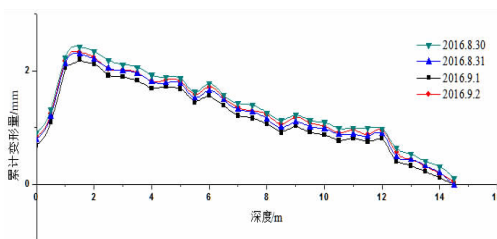


图 7 ZQT-01(1#) 测点大面积堆载作用下深层水平位移累计变化曲线

4.4 支撑轴力监测

支撑轴力的变化趋势与基坑现场施工的情况有着密切的联系,施工阶段的变化、钢支撑的架设、基坑开挖后土体的暴露时间都会影响钢支撑轴力的变

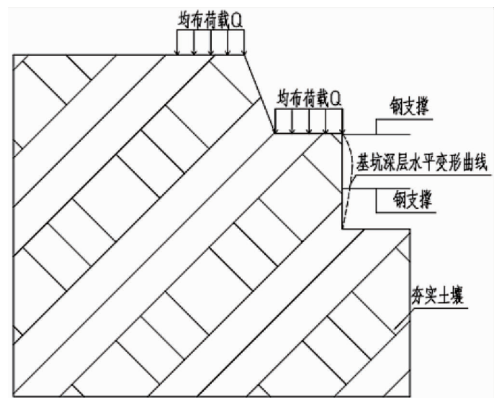


图 8 基坑深层水平位移简化力学模型示意图

化。由轴力监测结果可知(图 9),在基坑开挖初期,支撑轴力不断加大,处于上升阶段,7月21日至8月22日期间,支撑轴力每天的变化量有微小的波动,但是整体上比较平稳;8月22日至9月1日,钢支撑轴力快速增加,9月1号往后,支撑轴力趋于平稳,此时轴力基本维持在 750 KN ~ 850 KN 之间,超过了 600 KN 的控制值,这是由于支撑周围大量堆放钢筋和停放吊车^[15],此时建议施工队立即清理基坑周边堆放钢筋并停止停放吊车等大型机械,以免钢支撑压屈,出现基坑整体失稳破坏。

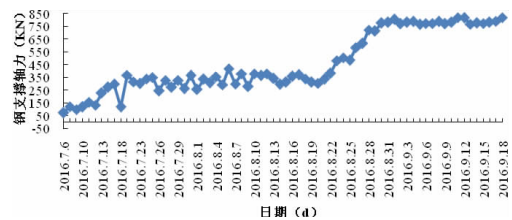


图 9 100248 钢支撑轴力变化曲线图

5 指数平滑法对监测数据的预测分析

每次监控量测工作从监测到出数据和结果的过程比较长,导致监测结果相比于现场实际有一定的滞后性,基坑监测的超前预测就很重要。本文认为时间序列的态势具有稳定性或规则性,所以,可以合理地顺推时间序列,最近的过去态势在某种程度上会延续到未来,由此提出了指数平滑法来预测监测数据的变化趋势,为安全施工打下基础^[16]。

指数平滑法^[17]的基本原理是任一次的指数平滑值等于本次实际观测值与上一次指数平滑值的加权平均。包括一次指数平滑法、二次指数平滑法和三次指数平滑法。本文仅用到了二次指数平滑法。

设时间序列为 $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots$, 则一次指数平滑公式为:

$$S_t^{(1)} = \alpha y_t + (1 - \alpha) S_{t-1}^{(1)} \quad (1)$$

式(1)中 $S_t^{(1)}$ 为第 t 周期的一次指数平滑值; α 为加权系数, $0 < \alpha < 1$ 。

为了理解指数平滑的实质,将公式(1)依次展开,可得:

$$S_t^{(1)} = \alpha \sum_{j=0}^{t-1} (1 - \alpha)^j y_{t-j} + (1 - \alpha)^t S_0^{(1)} \quad (2)$$

由于 $0 < \alpha < 1$, 当 $t \rightarrow \infty$, $(1 - \alpha)^t \rightarrow 0$, 于是式(2)变为

$$S_t^{(1)} = \alpha \sum_{j=0}^{\infty} (1 - \alpha)^j y_{t-j} \quad (3)$$

由此可见 $S_t^{(1)}$ 实际上是 $y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-j}, \dots$ 的加权平均。加权系数分别为 $\alpha, \alpha(1 - \alpha), \alpha(1 - \alpha)^2, \dots$, 是按几何级数衰减的, 愈近的数据, 权数愈大, 愈远的数据, 权数愈小, 且权数之和是 1, 即

$$\alpha \sum_{j=0}^{\infty} (1 - \alpha)^j = 1 \quad (4)$$

由于加权系数契合指数规律, 且又具有圆滑数据的功能, 所以称为指数平滑。

用平滑值进行预测, 就是一次指数平滑法。其预测模型为:

$$y_{t+1}^{\circ} = S_t^{(1)} = \alpha y_t + (1 - \alpha) y_t^{\circ} \quad (5)$$

即以第 t 期的一次指数平滑值作为第 $t+1$ 期预测值。

指数平滑系数^[18]的确定包括:(1) 当时间序列显现较稳定的平缓趋势时, 应选较小的值, 一般可在 0.05 ~ 0.20 之间取值;(2) 当时间序列有起伏波动, 但长期趋势变化不大时, 可选稍微大的值, 常在 0.1 ~ 0.4 之间取值;(3) 当时间序列波动很大, 长期趋势变化幅度较大, 呈现明显且迅速的上升或下降趋势时, 宜选择较大的值, 如可在 0.6 ~ 0.8 间选值, 这样可以使预测模型灵敏度更高, 能迅速跟上数据的变化。

图 10 和图 11 分别为桩顶沉降和桩顶水平位移预测与实测对比图, 图 10 中, 取平滑系数分别为 0.2、0.5、0.8, 生成的预测曲线与实际曲线比较, 通过计算最后得出取不同平滑系数的误差, 其中平滑系数为 0.8 的误差最小为 0.1778 mm, 平滑系数 0.5 和 0.2 的误差分别为 0.2238 mm 和 0.5038 mm, 所以平滑系数为 0.8 的预测曲线能够很好的反映实际曲线的变化趋势。

6 结论

(1) 在基坑工程中, 监控量测对于基坑施工是至关重要的一环, 它能够有效的指导基坑的施工, 提高基坑施工的安全性。

(2) 使用时间序列法的指数平滑法能够预测基坑短期内各数据的变化趋势, 弥补了监控量测的滞后性, 使

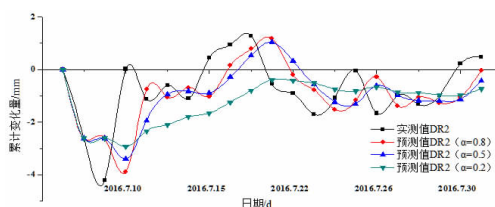


图 10 桩顶沉降预测与实测对比图

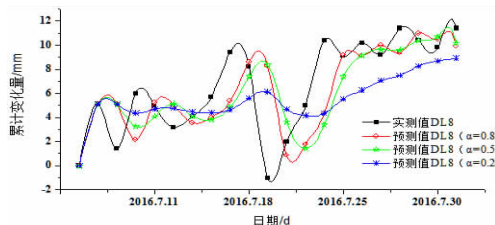


图 11 桩顶水平位移预测与实测对比图

得基坑施工更加高效和安全。

(3) 基坑开挖过程中, 不宜将挖出的土方和施工机械、钢筋等建筑材料放在基坑周边, 否则, 地面荷载和车辆荷载对基坑支护结构会产生很大影响。

参考文献:

- [1] 刘红岩, 秦四清, 李厚恩, 等. 深基坑工程开挖安全性的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊 1): 1441-1444.
- [2] 李大勇, 龚晓南, 张士乔. 软土地基深基坑周围地下管线保护措施数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 736-740.
- [3] 张文慧, 田军, 王宝田, 等. 基坑围护结构上的土压力与土体位移关系分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(5): 575-579.
- [4] 徐杨青, 程琳. 基坑监测数据分析处理及预测预警系统研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 1): 219-224.
- [5] 王胜涛, 梁小勇, 周亦涛. 隧道监控量测的数据回归分析探讨[J]. 隧道建设, 2009, 29(6): 629-632.
- [6] 胡斌, 王新刚, 冯晓腊, 等. 武汉地铁某深基坑开挖对周边高架桥影响的分析预测与数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 368-373.
- [7] 潘国荣, 谷川. 变形监测数据的小波神经网络预测方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(4): 47-50.
- [8] 臧婁斌, 黄腾. 时间序列分析在地铁变形监测中的应用[J]. 测绘科学, 2014, 39(7): 155-157.

- [9] 马晨阳,吴立,周玉纯,等.基于粗糙集理论 BP 网络的地铁深基坑监控预测分析与优化[J].施工技术, 2016,45(13):50-54.
- [10] 赵敏,厉广广,孟令冬.黄土地区深基坑土压力监测与分析[J].四川理工学院学报:自然科学版,2016, 29(5):81-84.
- [11] 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1):2918-2923.
- [12] 康志军,谭勇,李想,等.基坑围护结构最大侧移深度对周边环境的影响[J].岩土力学,2016,37(10): 2909-2914.
- [13] 陈昆,闫澍旺,孙立强,等.开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J].岩土力学,2016,37(4):1075-1082.
- [14] 赵瑜,申奇发,代红伟.城市浅埋隧道基坑监测[J].华北水利水电学院学报,2011,32(6):97-100.
- [15] 丁智,王达,虞兴福,等.杭州地铁新塘路、景芳路交叉口工程深基坑监测分析[J].岩土工程学报,2013, 35(增刊2):445-451.
- [16] 胡巍,常金源,李祥龙,等.指数平滑法预测滑坡变形的适用性探讨[J].人民长江,2015,46(14):28-31.
- [17] 尹光志,张卫中,张东明,等.基于指数平滑法与回归分析相结合的滑坡预测[J].岩土力学,2007,28(8): 1725-1728.
- [18] 王长江.指数平滑法中平滑系数的选择研究[J].中北大学学报:自然科学版,2006,27(6):558-561.

Experimental Analysis and Short Term Prediction Method of Foundation Pit Excavation

SHU Zhile, WU Haikuan, YANG Daxue, LI Heng

(School of Civil Engineering and Architecture, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: In order to study the influence of excavation on the surrounding environment and improve the timeliness of the analysis and analysis of the foundation pit, according to the actual case of foundation pit engineering, the deformation law of crown beam, supporting pile, surrounding surface and adjacent building are obtained through measuring instruments such as leveling, total station and axial force meter, Axial force and so on. And the monitoring data are analyzed by exponential smoothing method to predict the change trend of safety index of foundation pit only in the case of Short-term forecast. The results show that the excavation depth of the foundation pit, the construction machinery and the large area of the foundation pit have great influence on the deformation of the foundation pit, but the timely construction of the steel support can effectively control the deformation of the foundation pit. The use of exponential smoothing method to predict can be a good remedy for the measurement of the lag, and has important guiding significance for the actual project.

Key words: exponential smoothing method; Pit monitoring; excavation of foundation pit; horizontal displacement