

鞠兴华, 刘禹阳. 基于多元信息融合的基坑预警分级研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(1): 129-136.

JU Xinghua, LIU Yuyang. Multi-source information fusion-based study on foundation pit early-warning grading[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(1): 129-136.

基于多元信息融合的基坑预警分级研究

鞠兴华^{1,2}, 刘禹阳³

(1. 潍坊学院 建筑工程学院, 山东 潍坊 261041; 2. 潍坊学院 海洋岩土工程中心, 山东 潍坊 261041;
3. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 为保证基坑预警结果的准确性和有效性, 在基坑预警准则构建的基础上, 利用累计变形判据和变形速率判据实现了多元监测信息融合的基坑预警研究。其中: 累计变形判据包含稳定性指标和相对变形指标, 即从基坑稳定性和变形安全储备角度实现了基坑长时段预警分析; 而变形速率判据包含了绝对量指标和发展趋势指标, 即从变形速率的现有变形绝对量及其发展趋势角度实现了基坑短时段预警分析。实例分析表明: 不同判据在不同监测项目中的预警等级具有一定的差异, 在累计变形判据的预警结果中, 得出基坑处于稳定状态, 预警等级为Ⅱ级; 而在变形速率判据的预警结果中, 坑顶变形监测项目的预警等级为Ⅲ级, 其余监测项目的预警等级为Ⅱ级; 按不利原则, 对两类判据的预警结果进行叠加, 综合确定基坑预警等级为Ⅲ级, 即应采取密切监测措施, 切实保证施工安全。

关键词: 地铁基坑; 预警准则; 稳定性评价; 预警等级; 尖点突变分析

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.01.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TU9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2021)01-0129-08



与作者互动
听语音聊科研

Multi-source information fusion-based study on foundation pit early-warning grading

JU Xinghua^{1,2}, LIU Yuyang³

(1. College of Architecture and Engineering, Weifang University, Weifang 261041, Shandong, China; 2. Center of Offshore Geotechnical Engineering, Weifang University, Weifang 261041, Shandong, China;
3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to ensure the accuracy and effectiveness of the early-warning results for foundation pit, the study on the multi-source information fusion-based early-warning for foundation pit is realized through both the relevant cumulative deformation criterion and the deformation rate criterion on the basis of establishing the early-warning criteria for foundation pit; in which the cumulative deformation criterion includes the stability index and the relative deformation index, that is to say, the analysis on the long-term early-warning for foundation pit is realized from the aspect of the stability and deformation safety reserve of foundation pit, while the deformation rate criterion includes the absolute index of deformation amount and its development trend index, namely, the short-term early-warning for foundation pit is realized from the aspect of the existing deformation amount of the deformation rate and its development trend. A case analysis shows that certain differences are there among the different criteria for the early-warning grades in different monitoring items, and then it is obtained that the foundation pit is in a stable status with the early-warning grade of level II in the early-warning result of deformation rate criteria, while the early-warning grade is level III for the monitoring item of pit top and the early-warning grades for all the other monitoring items are level II. In accordance with

收稿日期: 2020-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908051); 潍坊学院博士科研基金项目(2020BS31)

作者简介: 鞠兴华(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程方向的研究工作。E-mail: 2564436323@qq.com

unfavorable principle, the warning results of the two kinds of criteria are superposed, from which it is comprehensively determined that the early-warning grade of the foundation pit is level III, that is to say, close monitoring measures are necessary to be made for surely guaranteeing the safety of the construction.

Keywords: subway foundation pit; early-warning criterion; stability evaluation; early-warning grade; cusp catastrophe analysis

0 引言

随着市政交通工程的快速发展, 地铁基坑工程也日益增加, 为提高现场施工人员的安全意识及减少工程事故的突发性, 基于基坑监测基础上的预警等级研究具有重要意义^[1-3]。目前, 已有许多学者开展了基坑预警研究, 如周诚等^[4]利用无人机巡逻和监控, 进行基坑施工信息的采集, 并利用后台系统进行预警分析和响应, 实现了施工现场的自动化预警, 节约了管理成本; 王乾坤等^[5]、韦猛等^[6]在基坑安全预警信息源筛选的基础上, 利用 T-S 神经网络构建了基坑预警模型, 有效实现了警情位置及类型预测, 具有较强的适用性和可行性; 郑帅等^[7]利用支持向量机构建了锚索拉力的预测模型, 通过其滚动预测, 实现了基坑潜在警情的超前预警, 合理指导了现场施工。上述研究取得了一定成果, 验证了基坑预警研究的必要性和意义, 但也存在一定不足, 如无人机预警虽较为简便, 但常态化运营成本相对较高, 且具有一定的不确定性; 预警模型的构建指标相对较为单一, 缺乏全面性和系统性。鉴于上述不足, 仍有必要进一步开展基坑预警研究。因此, 该文以苏州地铁活力岛站为工程背景, 在多准则条件下, 通过多元监测信息融合构建了基坑预警模型, 以期为基坑安全施工提供一定的参考依据。

1 基本原理

基坑预警是一个复杂过程, 其预警模型构建应具有合理的预警判据, 且预警判据应具有多样性, 该文预警模型包含累计变形判据和变形速率判据两类, 其中,

累计变形判据是用于实现基坑施工以来的持续状态判别和长时段预警分析; 而变形速率判据是用于实现基坑施工过程中的瞬时状态判别和短时段预警分析。

首先, 在累计变形判据中, 将现有变形值 S_t 与极限变形值 S_c 的比值设定为相对变形指标, 若其值越大, 说明基坑变形的相对预留变形量越小, 可将其作为基坑累计变形判据中的一个判别指标, 且相对变形指标 F_c 的求解公式为

$$F_c = S_t / S_c \quad (1)$$

同时, 累计变形序列也是基坑稳定性的直观体现, 利用其进行基坑稳定性评价是可行的。因此, 将累计变形判据的判别指标设定为稳定性指标和相对变形指标。

第二, 在变形速率判据中, 以往多采用变形速率的绝对量进行预警等级判断, 但均未涉及其发展趋势研究; 若当其变形速率处于较低预警等级, 但其发展趋势较快时, 其预警等级应适当提高, 进而该文将变形速率判据的判别指标设定为绝对量指标 s 和发展趋势指标。

最后, 在预警等级划分过程中, 等级总数不宜过多, 结合以往工程经验, 将预警等级划分为四级, 即 I 级(绿色)、II 级(黄色)、III 级(橙色)和 IV 级(红色), 结合活力岛站基坑的监测方案及其地质条件, 将基坑不同等级的预警等级划分标准及建议措施设定如表 1 所列。

1.1 累计变形判据模型的构建

累计变形判据的判别指标包括稳定性指标和相对变形指标, 由于两者求解方法不一致, 对其具体实现方法进行分述。

表 1 基坑预警等级划分标准

Table 1 Classification standards for early warning levels of foundation pits

预警等级		I 级(绿色)	II 级(黄色)	III 级(橙色)	IV 级(红色)
累计变形判据	稳定性指标	稳定	稳定	稳定	不稳定
	相对变形指标 F_c	$F_c \leq 0.7$	$0.7 < F_c \leq 0.8$	$0.8 < F_c \leq 0.9$	$F_c > 0.9$
变形速率判据	绝对量指标 s	$s \leq 1.0 \text{ mm/d}$	$1.0 \text{ mm/d} < s \leq 1.5 \text{ mm/d}$	$1.5 \text{ mm/d} < s \leq 2 \text{ mm/d}$	$s > 2 \text{ mm/d}$
	发展趋势指标	下降趋势	上升趋势(无、较显著)	上升趋势(显著)	上升趋势(强显著)
建议措施		正常监测即可, 无需采取加固措施	密切关注监测成果, 若有问题及时汇报, 无需采取加固措施	向相关分管人员汇报, 并采取密切监测措施, 暂不需要采取工程措施	采取停工观测, 组织相关专家及人员进行现场调查, 并需采取必要工程措施

注: 预警等级以两类判据的不利判别为准; 同时, 上述临界指标值是以该文实例条件进行设定的, 偏向适用于软土地区, 建议在该文划分标准的推广应用, 应结合具体工程监测方案及地质条件, 重新设定合理的临界参数

1.1.1 稳定性指标

基坑稳定性受支护结构及周边地质条件等因素的综合影响,直接评价较为困难,鉴于基坑变形是其稳定性的直观体现,因此利用基坑累计变形进行基坑稳定性评价。同时,尖点突变理论可准确实现事物稳定与否的合理评价,且被广泛应用于基坑或其他岩土领域,适用性较强,进而将其作为本文基坑稳定性指标的求解方法^[8-10]。限于篇幅,本文不再赘述其基本原理。通过尖点突变分析,可求得突变特征值 Δ ,且其判据为:当 $\Delta < 0$ 时,说明基坑处于不稳定状态;当 $\Delta > 0$ 时,说明基坑处于稳定状态;当 $\Delta = 0$ 时,说明基坑稳定性处理临界状态。同时,鉴于突变特征值 $\Delta = 0$ 属临界状态,得出突变特征值越趋近于0,其稳定性相对越弱。

1.1.2 相对变形指标

根据相对变形指标 F_c 的求解公式,其现有变形值 S_t 可根据现有监测成果求得,进而仅需对极限变形值 S_c 进行求解。同时,在极限变形值的求解过程中,有必要充分发挥既有监测成果的使用价值,进而利用指数回归来确定极限变形值,其拟合公式为

$$y = Ae^{-B/x} \quad (2)$$

式中, y 为基坑变形值; x 为时间变量; A 、 B 为待拟合参数,且 A 、 B 两参数在拟合过程中的取值范围为大于0的常数。

根据式(2),当时间变量趋于无穷大时,基坑变形趋近于定值 A ,且该值为最大值,进而式(2)拟合得到的 A 即为极限变形值。

通过上述极限变形值 S_c 求解,并结合现有变形值 S_t ,可得到基坑相对变形指标,进而实现其预警等级评价。

1.2 变形速率判据模型的构建

在变形速率判据中,绝对量指标可通过监测成果直接求得,因此,仅需构建发展趋势指标的求解方法。鉴于Manner-Kendall检验法在变形序列发展趋势评价中的适用性,利用其求解基坑变形速率的发展趋势,且Manner-Kendall检验法的基本原理已在文献[11-12]中进行了详述,本文不再赘述。

通过Manner-Kendall检验,可得评价指标 Z 值,将 Z 值的绝对值与临界值 Z_α 进行对比,即若 $|Z| > Z_\alpha$,则说明检验过程有效,能判断基坑变形速率的发展趋势,且当 $Z < 0$ 时,变形速率呈下降趋势;反之,呈上升趋势。同时,当临界值 Z_α 越大时,越难保证检验结果的有效性,加之临界值 Z_α 与临界水平 α 相关,即 α 越低,其临界值越大,进而可通过不同临

界水平对应的临界值来划分基坑变形速率发展趋势的显著性。结合临界水平的分布规律,将其显著性划分标准设定如表2所列。

表2 变形速率发展趋势的显著性划分标准

Table 2 Significance classification criteria for the development trend of deformation rate

临界水平 α	0.01	0.05	0.1	-
Z_α 值	2.576	1.960	1.645	<1.645
显著性	强显著	显著	较显著	无显著性

2 实例分析

2.1 工程概况

苏州地铁四号线活力岛站位于春申湖南侧,近似沿文灵路南北布置,基坑结构外包长度为199.6 m,宽度为19.7 m,端头井开挖深度为18.5 m,标准段开挖深度为16 m。

车站基坑开挖范围均以土层为主,自上而下,主要可分为四层,其中,上两层又可进一步细分为两个亚层,各类土层的基本特征参数如表3所列。

表3 各类土层的特征参数统计

Table 3 Statistics of characteristic parameters of various soil layers

序号	地层岩性	层厚范围 /m	平均厚度 /m	含水量 /%	压缩系数 /MPa	压缩模量 /MPa
① ₂	杂填土	0.5~1.0	0.65	-	-	-
① ₃	素填土	0.8~2.8	1.52	30.0	0.48	3.97
③ ₁	黏土层	1.6~4.2	3.34	26.1	0.29	6.36
③ ₂	粉质黏土	4.2~6.0	4.96	29.9	0.36	5.49
④ ₁	粉黏夹粉土	6.8~9.0	8.08	31.1	0.38	5.55
⑥ ₁	黏土层	8.5~9.8	0.25	24.1	0.22	8.07

基坑周边近接建筑物较为复杂,主要以西侧5栋住宅楼为主,每栋住宅楼均为15层,与基坑净距约20.5 m,施工扰动对其影响较大。

为充分掌握基坑施工过程的变形特征,对坑顶沉降及侧位移、横撑轴力及既有建筑物变形等均进行了监测点布设,其中,坑顶沉降及侧位移监测点共计26个,支撑轴力监测点共计11个,既有建筑物沉降变形监测点共计10个(见图1)。同时,监测时间为2013年6月20日至2013年10月19日,若无特殊交代,后续分析的累计变形值或速率值均为10月19日时的统计结果。

由于坑顶变形位移监测点相对较多,难以实现全分析,且在一般情况下,位移越大稳定性越差,进而以累计位移量为基础,对坑顶代表性的位移监测点进行筛选。同时,为保证预警分析的全面性,对南北

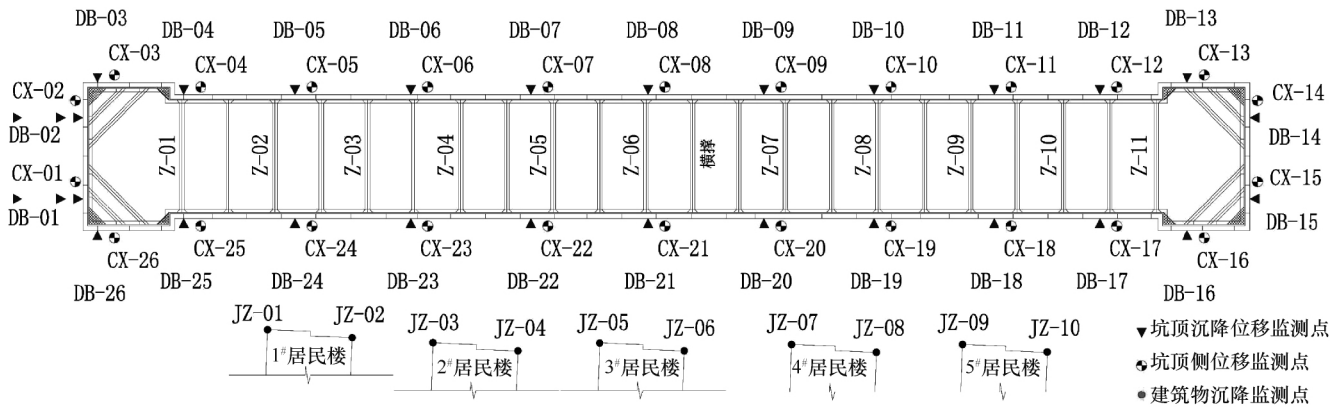


图 1 基坑监测点布置

Fig. 1 Layout of foundation pit monitoring points

两侧坑顶监测点各选取一个代表点, 东西两侧监测点各选取 2 个代表点, 共计 6 个代表性的监测点。通过监测成果统计, 得 26 个坑顶监测点的变形量如图 2 所示。

由图 2 可知, 坑顶监测点的位移值存在明显波动特征, 按照前述筛选原则, 在坑顶沉降预警分析方面, 确定监测点 DB-02(N 侧)、DB-07(E 侧)、DB-09(E 侧)、DB-14(S 侧)、DB-21(W 侧) 和 DB-23(W 侧) 为本次分析的代表性监测点; 而在坑顶侧位移预警分析方面, 确定监测点 CX-01(N 侧)、CX-08(E 侧)、CX-11(E 侧)、CX-15(S 侧)、CX-22(W 侧) 和 CX-23(W 侧) 为本次分析的代表性监测点。

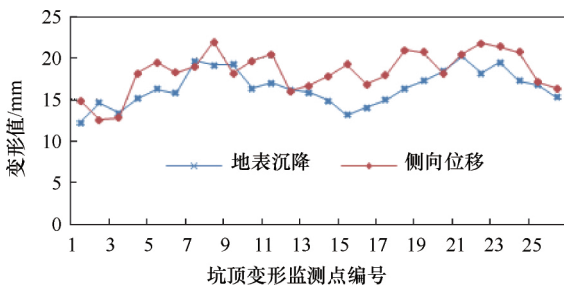


图 2 坑顶变形监测成果

Fig. 2 Monitoring results of roof deformation

2.2 累计变形判据的预警分析

2.2.1 稳定性指标的预警分析

限于篇幅, 难以对所有位移监测点的评价过程进行全分析, 进而以坑顶沉降预警分析为例, 详述其尖点突变分析过程。通过计算, 得坑顶沉降的尖点突变分析结果如表 4 所列。

从表 4 可知, 各坑顶沉降监测点在拟合过程中的拟合度均较趋近于 1, 说明其拟合效果均较优, 所得突变特征参数的可信度较高; 同时, 各坑顶沉降监测点的突变特征值 Δ 均大于 0, 说明其均处于稳定状态, 但其稳定性程度存在一定差异, 以监测点 DB-21(W 侧) 的稳定性相对最佳, 而 DB-07(E 侧) 的稳定性相对最弱。

对坑顶侧位移及近接既有建筑物的沉降变形进行稳定性预警分析, 其结果如表 5 所列。从表 5 可知, 各坑顶侧位移监测点的突变特征值 Δ 也大于 0, 说明基坑坑顶侧位移也处于稳定状态; 同时, 10 个既有建筑物沉降变形监测点的突变特征值也是大于 0 的, 说明在基坑施工过程中, 近接既有建筑物均处于稳定状态。

对比上述三类监测项目的稳定性预警结果可知, 近接既有建筑物的突变特征值相对更大, 而两类坑顶

表 4 坑顶沉降稳定性分析结果

Table 4 Settlement stability analysis results of pit roof

监测点	拟合函数	拟合度	突变特征参数		
			μ	v	Δ
DB-02(N 侧)	$y = 2.172 \times 10^{-5} t^4 - 2.824 \times 10^{-4} t^3 - 3.229 \times 10^{-2} t^2 + 1.077 t - 1.273$	0.956	-1 550.04	39 646.31	1.265×10^{10}
DB-07(E 侧)	$y = 2.538 \times 10^{-5} t^4 - 2.179 \times 10^{-4} t^3 - 4.191 \times 10^{-2} t^2 + 1.160 t - 0.866$	0.938	-1 678.94	38 537.56	2.237×10^9
DB-09(E 侧)	$y = 3.102 \times 10^{-5} t^4 - 1.805 \times 10^{-4} t^3 - 4.102 \times 10^{-2} t^2 + 1.029 t - 1.228$	0.967	-1 335.07	29 300.91	4.142×10^9
DB-14(S 侧)	$y = 2.902 \times 10^{-5} t^4 - 2.916 \times 10^{-4} t^3 - 2.726 \times 10^{-2} t^2 + 1.132 t - 1.115$	0.942	-1 678.94	38 537.56	2.404×10^9
DB-21(W 侧)	$y = 3.066 \times 10^{-5} t^4 - 1.586 \times 10^{-4} t^3 - 3.133 \times 10^{-2} t^2 + 1.220 t - 1.118$	0.971	-1 031.89	37 131.01	2.844×10^{10}
DB-23(W 侧)	$y = 3.033 \times 10^{-5} t^4 - 2.107 \times 10^{-4} t^3 - 3.192 \times 10^{-2} t^2 + 1.227 t - 1.209$	0.988	-1 070.52	36 757.54	2.667×10^{10}

表5 坑顶侧位移及近接既有建筑物的稳定性分析结果

Table 5 Analysis results of pit roof displacement and stability of adjacent existing buildings

坑顶监测点	CX-01	CX-08	CX-11	CX-15	CX-22	CX-23	-			
突变特征值	3.293×10^9	5.298×10^{10}	1.287×10^9	2.981×10^9	6.118×10^{10}	7.262×10^{10}	-			
既有建筑物监测点	JZ-01	JZ-02	JZ-03	JZ-04	JZ-05	JZ-06	JZ-07	JZ-08	JZ-09	JZ-10
突变特征值	3.287×10^{12}	4.229×10^{13}	4.918×10^{12}	2.774×10^{12}	6.278×10^{13}	1.287×10^{13}	5.029×10^{12}	7.289×10^{13}	3.278×10^{12}	2.389×10^{13}

表6 坑顶沉降的相对变形指标预警分析结果

Table 6 Early warning analysis results of relative deformation index of pit roof settlement

监测点	拟合方程	拟合度	极限变形值/mm	现有变形值/mm	预警系数 F_c	预警等级
DB-02(N 侧)	$y=25.19\exp(-10.09/t)$	0.974	25.19	14.71	0.58	I 级
DB-07(E 侧)	$y=38.63\exp(-17.89/t)$	0.986	38.63	19.73	0.51	I 级
DB-09(E 侧)	$y=26.87\exp(-15.42/t)$	0.958	26.87	19.34	0.72	II 级
DB-14(S 侧)	$y=25.13\exp(-10.02/t)$	0.952	25.13	14.90	0.59	I 级
DB-21(W 侧)	$y=28.14\exp(-12.26/t)$	0.944	28.14	20.32	0.72	II 级
DB-23(W 侧)	$y=30.63\exp(-13.64/t)$	0.971	30.63	19.54	0.64	I 级

表7 坑顶侧位移的相对变形指标预警分析结果

Table 7 Early warning analysis results of relative deformation index of pit top displacement

监测点	拟合方程	拟合度	极限变形值/mm	现有变形值/mm	预警系数 F_c	预警等级
CX-01(N 侧)	$y=23.71\exp(-10.18/t)$	0.967	23.71	14.92	0.63	I 级
CX-08(E 侧)	$y=30.15\exp(-13.40/t)$	0.952	30.15	22.04	0.73	II 级
CX-11(E 侧)	$y=29.48\exp(-13.28/t)$	0.984	29.48	20.52	0.70	II 级
CX-15(S 侧)	$y=31.84\exp(-14.57/t)$	0.957	31.84	19.28	0.61	I 级
CX-22(W 侧)	$y=29.65\exp(-13.02/t)$	0.938	29.65	21.84	0.74	II 级
CX-23(W 侧)	$y=28.56\exp(-12.21/t)$	0.953	28.56	21.40	0.75	II 级

表8 既有建筑物的相对变形指标预警分析结果

Table 8 Early warning analysis results of relative deformation index of existing buildings

监测点	JZ-01	JZ-02	JZ-03	JZ-04	JZ-05	JZ-06	JZ-07	JZ-08	JZ-09	JZ-10
累计沉降/mm	12.32	10.04	11.42	9.70	10.33	9.81	10.77	11.23	12.65	10.43
极限位移/mm	24.82	22.05	19.52	22.17	21.82	23.05	18.69	22.19	23.91	17.67
预警系数 F_c	0.50	0.46	0.59	0.44	0.47	0.43	0.58	0.51	0.53	0.59
预警等级	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级

监测项目的突变特征值相当,说明前者较后者具有相对更好稳定性;同时,三类监测项目的稳定性预警分析均得出基坑目前处于稳定状态。

2.2.2 相对变形指标的预警分析

2.2.2.1 坑顶沉降的预警分析

通过计算,得到坑顶沉降监测项目在相对变形指标条件下的预警分析结果如表6所列。从表6可知,在极限变形值的求解过程中,各监测点的拟合度均较趋近于1,说明其拟合过程较优,所得极限变形值的可信度较高;同时,结合现有变形值,得出各坑顶沉降监测点的预警系数介于0.51~0.72之间,预警等级属I级—II级,其中,预警等级为I级监测点有4个,所占比例为66.67%,其余为II级,说明在相对变形指标的预警分析过程中,坑顶沉降以I级预警为主。

2.2.2.2 坑顶侧位移的预警分析

对坑顶侧位移进行相对变形指标的预警分析,结果如表7所列。由表7可知,在坑顶侧位移的极值求解过程中,拟合度也较趋近于1,说明其拟合效果较优;在其预警等级划分过程中,预警系数值介于0.61~0.75,预警等级属I级—II级,其中,I级预警的监测点仅有两个,其余4个监测点均是II级预警。对比两类坑顶监测项目的预警结果,得出两者均以I级—II级预警为主,并以侧位移的预警系数相对略大,具相对更高的预警等级。

2.2.2.3 既有建筑物的预警分析

同理,对既有建筑物的沉降变形进行相对变形指标的预警分析,其结果如表8所列。由表8可知,各监测点的预警系数介于0.43~0.59,波动性相对

表 9 坑顶变形的变形速率判据预警结果

Table 9 Early warning results of deformation rate criterion for pit top deformation

项目类型	监测点	绝对量指标			发展趋势指标			综合判别
		现有变形速率/mm·d ⁻¹	预警等级	Z 值	趋势性	显著性	预警等级	
地表沉降变形	DB-02(N 侧)	0.42	I 级	0.97	上升趋势	无	II 级	II 级
	DB-07(E 侧)	1.03	II 级	-0.65	下降趋势	-	I 级	II 级
	DB-09(E 侧)	1.11	II 级	1.23	上升趋势	无	II 级	II 级
	DB-14(S 侧)	0.54	I 级	0.38	上升趋势	无	II 级	II 级
	DB-21(W 侧)	1.53	III 级	1.72	上升趋势	较显著	III 级	III 级
	DB-23(W 侧)	1.03	II 级	-0.87	下降趋势	-	I 级	II 级
地表侧位移变形	CX-01(N 侧)	0.64	I 级	0.54	上升趋势	无	II 级	II 级
	CX-08(E 侧)	1.52	III 级	1.57	上升趋势	无	II 级	III 级
	CX-11(E 侧)	1.35	II 级	-0.81	下降趋势	-	I 级	II 级
	CX-15(S 侧)	0.7	I 级	-0.24	下降趋势	-	I 级	I 级
	CX-22(W 侧)	1.27	II 级	0.47	上升趋势	无	II 级	II 级
	CX-23(W 侧)	1.03	II 级	-0.73	下降趋势	-	I 级	II 级

表 10 既有建筑物的变形速率判据预警结果

Table 10 Early warning results of deformation rate criterion of existing buildings

监测点		JZ-01	JZ-02	JZ-03	JZ-04	JZ-05	JZ-06	JZ-07	JZ-08	JZ-09	JZ-10
绝对量指标	现有变形速率/mm·d ⁻¹	0.25	-0.11	0.76	0.37	0.82	0.44	0.86	0.42	0.31	0.45
	预警等级	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级	I 级
发展趋势指标	Z 值	0.73	-0.27	1.03	-0.61	0.93	-0.61	0.97	-0.48	-0.63	0.75
	趋势性	上升趋势	下降趋势	上升趋势	下降趋势	上升趋势	下降趋势	上升趋势	下降趋势	下降趋势	上升趋势
	显著性	无	-	无	-	无	-	无	-	-	无
	预警等级	II 级	I 级	II 级	I 级	II 级	I 级	II 级	I 级	I 级	II 级
综合判别		II 级	I 级	II 级	I 级	II 级	I 级	II 级	I 级	I 级	II 级

较小, 预警等级均属 I 级, 说明基坑施工对近接既有建筑物的影响相对较小。

2.2.2.4 小结

综上所述, 得出不同监测项目的预警等级存在一定差异, 侧面验证了多元指标综合确定基坑预警等级思路的必要性, 且按不利原则, 通过各监测项目在累计变形判据条件下的预警分析, 得出其预警等级为 II 级。

2.3 变形速率判据的预警分析

2.3.1 坑顶变形的预警分析

通过两类坑顶监测项目在变形速率方面的绝对量指标和发展趋势指标求解, 得其相关参数及预警结果如表 9 所列, 并通过表 9 中信息总结, 得其预警结果如下。

2.3.1.1 绝对量指标的预警结果

在坑顶沉降项目的预警结果中, 各监测点现有变形速率的波动性较大, 致使其预警等级介于 I 级-III 级之间, 其中, I 级预警的监测点有 2 个, II 级预警的监测点有 3 个, III 级预警的监测点有 1 个; 在坑顶侧位移项目的预警结果中, 预警等级也介于 I 级-III 级之间, 分布规律也与坑顶沉降项目一致。

2.3.1.2 发展趋势指标的预警结果

根据两类监测项目的 M-K 检验分析, 得出各监测点变形速率的趋势性存在明显差异, 其中, 在坑顶沉降变形中, 呈上升趋势的监测点有 4 个, 下降趋势的监测点有 2 个; 而在侧位移变形中, 呈上升趋势的监测点有 3 个, 下降趋势的监测点有 3 个。同时, 两类监测项目的趋势性均相对较小, 仅 DB-21 监测点属较显著趋势。

将上述两类指标的预警结果叠加, 得出 I 级预警的监测点有 1 个, II 级预警的监测点有 9 个, III 级预警的监测点有 2 个, 以 II 级预警为主。

2.3.2 既有建筑物的预警分析

同理, 也再对既有建筑物进行变形速率判据的预警分析, 结果如表 10 所列。在绝对量指标的预警分析方面, 各既有建筑物位移监测点的变形速率均相对较小, 均属 I 级预警。在发展趋势指标的预警分析方面, 趋势性呈上升趋势的监测点有 5 个, 下降趋势的监测点也为 5 个, 且变形呈上升趋势的监测点均无明显的显著性, 得其上升趋势较弱; 通过预警等级分析, 得出其 I 级预警的监测点有 5 个, II 级预警的监测点也为 5 个。

前述两者预警结果叠加,得出既有建筑物在变形速率判据条件下的预警分析结果为: I级预警的监测点有5个, II级预警的监测点也为5个。

2.3.3 小结

根据上述三类监测项目在变形速率判据条件下的预警分析结果,按不利原则,得出基坑预警等级为 III级。

2.4 综合预警分析

在前述两类判据预警分析基础上,总结各类判据的预警结果,得到活力岛站基坑的综合预警结果如表 11 所列。由表 11 可知,不同判据在不同监测项目中的预警等级具有一定差异,多以 II级预警为主,仅两类坑顶变形监测项目在变形速率判据条件下的预警等级为 III级,按不利原则,综合确定活力岛站的预警等级为 III级,建议向相关分管人员汇报,并采取密切监测措施。

表 11 基坑综合预警结果统计

Table 11 Statistics of comprehensive warning result of foundation pit

监测项目	坑顶沉降	坑顶侧位移	既有建筑物	综合预警等级
累计变形判据	II级	II级	II级	III级
变形速率判据	III级	III级	II级	

同时,为进一步掌握基坑施工过程中预警等级是发展变化规律,结合前述基坑施工时间(6月20日至10月19日),以绝对施工时间1个月为时间点,分别将基坑施工过程划分为4个阶段,再分别利用上述方法进行预警等级评价,结果如表 12 所列。由表 12 可知,随基坑开挖持续,其预警等级大致呈上升趋势,即阶段一的预警等级为 I级,阶段二的预警等级为 II级,其余两阶段的预警等级为 III级,这是由于随着持续,基坑开挖深度相对越大,其空间限制相对减弱。

表 12 不同阶段的基坑预警等级对比

Table 12 Comparison of early warning levels of foundation pit in different stages

阶段	阶段一	阶段二	阶段三	阶段四
时间节点	7月20日	8月20日	9月20日	10月19日
预警等级	I级	II级	III级	III级

通过上述,充分发挥了现场监控量测的实用价值,有效掌握了基坑施工过程中的预警等级,为现场安全施工奠定了基础。

3 结论

通过多元监测项目信息融合在活力岛站基坑中的

综合预警分级研究,主要得出如下结论:

(1) 基坑监测是其安全施工的必要手段,限于基坑地质条件的差异性及施工过程的不确定性,难以通过基坑所处的环境条件及结构条件来判断基坑现有的预警等级。同时,鉴于各类监测成果是其环境条件与施工条件等因素综合作用的直观体现,有必要充分发挥监测成果的潜在价值,进而基于监测成果基础上的预警分级具有重要意义。

(2) 传统单一监测指标在单一判据下的预警分级具有一定的局限性,通过多元监测项目的信息融合能有效保证分析结果的准确性和全面性,避免单一偶发因素对预警分级的影响。

(3) 通过活力岛站的预警分级研究,得出其综合预警等级为 III级,建议向相关分管人员汇报,并采取密切监测措施,以切实保证基坑的安全施工。

(4) 该文模型可通过监测成果的实时更新来实现重复预警分级,符合施工过程中的信息化施工,也便于工程人员的动态管理,具有较强的可推广性,具有较高的实用价值。

参考文献(References):

- [1] 齐红升,肖成志,王子寒,等. 深基坑智能联网监测与预警系统的研究及开发[J]. 深圳大学学报(理工版), 2020, 37(1): 97-102.
QI Hongsheng, XIAO Chengzhi, WANG Zihan, et al. Research and development of intelligent network monitoring and early warning system for deep foundation pit [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Technology Edition), 2020, 37(1): 97-102.
- [2] 顾雷雨,黄宏伟,陈伟,等. 复杂环境中基坑施工安全风险预警标准[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4153-4162.
GU Leiyu, HUANG Hongwei, CHEN Wei, et al. Early warning standard of safety risk in foundation pit construction in complex environment [J]. Journal of rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4153-4162.
- [3] 傅志峰,罗晓辉,李杰,等. 基于安全预警分级的基坑安全模糊评价研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3693-3700.
FU Zhifeng, LUO Xiaohui, LI Jie, et al. Research on fuzzy evaluation of foundation pit safety based on safety warning classification [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(12): 3693-3700.
- [4] 周诚,蒋双南,林兴贵. 基于无人机的深基坑施工安全风险巡视与预警研究[J]. 施工技术, 2016, 45(1): 14-19.
ZHOU Cheng, JIANG Shuangnan, LIN Xinggui. Research on safety risk patrol and early warning in deep foundation pit construction based on uav [J]. Construction Technology, 2016, 45(1): 14-19.
- [5] 王乾坤,年春光,杨冬,等. 基于 T-S 模糊神经网络的地铁深基坑安全预警[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(8): 161-167.
WANG Qiankun, NIAN Chunguang, YANG Dong, et al. Safety warn-

- ing for deep foundation pit of subway based on T-S fuzzy neural network [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2016, 28(8): 161-167.
- [6] 韦猛, 吴王正, 张弘. 基于多信息融合的深基坑安全预警方法及应用[J]. 建筑结构, 2019, 49(S1): 756-762.
WEI Meng, WU Wangzheng, ZHANG Hong. Safety early warning method and application of deep foundation pit based on multi-information fusion [J]. Architectural Structure, 2019, 49(S1): 756-762.
- [7] 郑帅, 姜谔男, 郑世杰, 等. 基于向量机方法的基坑工程预警系统研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(1): 115-121.
ZHENG Shuai, JIANG Zhannan, ZHENG Shijie, et al. Research on early warning system of foundation pit engineering based on vector machine [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(1): 115-121.
- [8] 张志会, 张明, 王先斌. 基于尖点突变理论及速率比值法的基坑变形预警研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(7): 174-180.
ZHANG Zhihui, ZHANG Ming, WANG Xianbin. Research on the early warning of foundation pit deformation based on the theory of sharp point mutation and rate ratio method [J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 2019, 50(7): 174-180.
- [9] 王雪妮, 韩国锋. 地铁车站深基坑的变形预测及稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(10): 77-81.
WANG Xueni, HAN Guofeng. Study on deformation prediction and stability of deep foundation pit in subway station [J]. Journal of Changjiang Academy of Sciences, 2015, 35(10): 77-81.
- [10] 李常茂, 薛晓辉, 刘盛辉. 基于尖点突变理论及 Spearman 秩次检验的基坑稳定性分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(9): 98-102.
LI Changmao, XUE Xiaohui, LIU Shenghui. Analysis of foundation pit stability based on spike mutation theory and Spearman rank test [J]. Journal of Changjiang Academy of Sciences, 2018, 35(9): 98-102.
- [11] 贺华刚. 基于集成组合预测模型的隧道大变形预测研究[J]. 人民长江, 2019, 50(8): 172-177.
HE Huagang. Research on large deformation prediction of tunnel based on integrated combination prediction model [J]. People's Yangtze River, 2019, 50(8): 172-177.
- [12] 鞠兴华, 杨晓华, 张莎莎. 铁路路基沉降变形趋势的综合检验分析[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(3): 132-137.
JU Xinghua, YANG Xiaohua, ZHANG Shasha. Comprehensive inspection and analysis of railway subgrade settlement deformation trend [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2016, 28(3): 132-137.

(责任编辑 陈小敏)