

基于数据相关性的基坑工程风险预警分析

吴威皋¹, 黄忠辉^{1, 2}, 金磊铭², 朱雁飞^{1, 3}, 王建华¹

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200230; 2. 上海市建设工程安全质量监督总站, 上海 200023; 3. 上海隧道股份有限公司, 上海 200093)

摘要: 大型复杂地下结构基坑工程施工的监测和风险预警通常由若干个子对象组成。传统的风险预警方法根据采集的监测数据结果与规范规定的限制进行比较, 只能描述结构的局部特征且易受外界条件干扰。为解决上述问题, 提出了需要考虑多数据源相关性, 结合现场经验以及风险分级标准, 构建全新的基坑工程风险预警分析系统, 对基坑安全状态进行更加全面的评估。该系统借助 AutoCAD 软件进行二次开发, 结合基坑场地几何情况, 基坑各部件施工工况, 力学原理以及监测数据进行静态、动态的多参数相关性风险评估。最后结合一个工程实例展示了该系统能够判定出传统预警方法所不能识别的基坑风险, 具有良好的实用价值。

关键词: 基坑; 数据相关性; 风险; 预警

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0233-05

作者简介: 吴威皋(1987-), 男, 上海人, 博士研究生, 主要从事岩土工程数值模拟与施工动态控制的研究工作。E-mail: wuweigao@126.com。

Risk analysis and warning in excavation engineering based on data dependency

WU Wei-gao¹, HUANG Zhong-hui^{1,2}, JIN Lei-ming², ZHU Yan-fei^{1, 3}, WANG Jian-hua¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200230, China; 2. Shanghai Municipal Construction

Engineering Safety Quality Supervision Centre, Shanghai 200032, China; 3. Shanghai Tunnel Engineering Company, Shanghai 200093, China)

Abstract: The monitoring and risk warning system of complex underground excavation is composed of several sub-objects. Traditionally, the control values of monitoring data are determined by construction norms. However, a single control value can only reflect the local properties and safety state of excavation and be easily affected by external interference. Based on data fusion, considering field experience and expert hierarchy system, a brand-new risk warning system in excavation engineering is introduced to give a comprehensive assessment of construction safety. This system is a secondary development product of AutoCAD integrating the excavation site conditions, construction steps of each part, principles of mechanics and monitoring data to conduct static, dynamic evaluation and multi-source data fusion assessment of the current and potential risks. Moreover, a project case is presented to demonstrate that this system can detect more potential risk than the traditional information construction system and enjoy high applicable value.

Key words: excavation; data dependency; risk; warning

0 引言

近年来, 深基坑工程越来越多, 并呈现大规模、大深度的发展趋势。随着基坑规模与深度的增加, 其施工风险也越来越大, 基坑工程的风险预警与控制已经引起了国内外普遍的关注^[1-3]。刘国彬等^[4]提出了基于可靠度理论的基坑支护结构受力及变形的概率预测方法。黄宏伟等^[2]结合工程实例识别深基坑工程施工过程中的风险因素, 并用专家调查法和层次分析法对深基坑工程施工期的风险进行评估。边亦海^[3]提出了深基坑支护结构和周边环境的风险分析理论, 运用模糊数学方法和蒙特卡洛方法进行了基坑工程风险分析。Matsuo 等^[5]、Bjerrum 等^[6]、Yossef 等^[7], 在基坑

支护结构方面开展了较为系统的可靠性研究工作, 他们分析了基坑支护体系各种失效模式的机理、研究了各种不确定性因素, 并且还开展了可靠性分析方法及系统可靠性评价工作。

大型复杂地下结构基坑工程施工的监测和风险预警通常由若干个子对象组成。对象的分层和分块特征使得需要监测和评估的部位非常多, 而传统的方法仅是在地下结构的某些关键部位利用单个数据源的监测结果与规范规定的预警限值比较, 进行风险评估。单个数据源在某一采样时刻获取一组数据, 只能用来描

述结构的局部特征。此外由于测量噪声、外界环境因素和传感器自身性能的影响，使得单个数据源往往无法直接用来判断整个基坑体系是否处在安全状态。解决这一问题的有效途径就是考虑多数据源相关性进行基坑施工多参数监测与风险评估。多数据源系统通过多个传感器获得更多种类和数量的结构特征信息，能够对基坑安全状态进行更加全面的描述。本文研究了基于多源数据相关性的基坑风险分析方法，并开发预警分析系统，将其应用于工程实践分析。

1 基坑风险预警方法与系统

1.1 风险数据相关性分析理论

在传统单一数据源限值预警体系的基础上，系统实现多数据源相关性分析。具体标准如下：

基坑工程支护体系和周边环境的受力变形如图 1 所示，其主要指标包括：围护结构位移（包括侧向变形和隆沉）、坑外墙体沉降、周围管线以及建构筑物沉降（和倾斜）、立柱桩隆沉、支撑内力等。基坑施工控制中，上述 5 个参数均有各自的风险评判标准和限值。但基坑支护结构和周围环境在开挖卸荷过程中是一个整体的体系，各参数之间具有内在的力学影响机理和密切的相互关系。土体开挖卸荷引起坑内土体回弹和围护结果侧向位移，进而引起坑外地表沉降、立柱桩和地下连续墙竖向位移等，并导致周围土体、管线和建筑物的移动。各参数指标中，围护结构侧移和地表沉降的关系描述了坑内外土体的流动，间接反映了坑内土体隆起和坑外管线、建筑物的沉降情况；地墙与立柱桩的竖向位移，对支撑的中部有附加的位移，是支撑稳定性的重要指标；支撑轴力和围护结构的侧移必须协调变化，否则可能存在支撑失稳和围护结构冲切破坏的危险。从土与结构共同作用的角度可见，各数据源间存在一定的受力变形关系，应将其作为一个相互关联的多数据源体系来进行评估。

以上各参数指标之间的关系可以反映基坑所处的受力变形状态，不同的状态表征了不同的风险性和安全性。单一数据源限值控制的方法往往忽视了这些参数之间内在联系所表征的风险状态。本文在原有单一数据源控制的基础上，提出基坑多数据源相关性风险评估方法。根据力学分析和经验统计结果，以各数据源之间的协调要求作为控制标准进行相关性风险分析和预警。协调控制要求的数学关系参考上海地区实测统计规律和工程经验值^[8]。

视单一数据源超出预警限值为三级（最低级）风险，若多数据源发生关联风险异常则根据危害程度分为二级和一级风险。

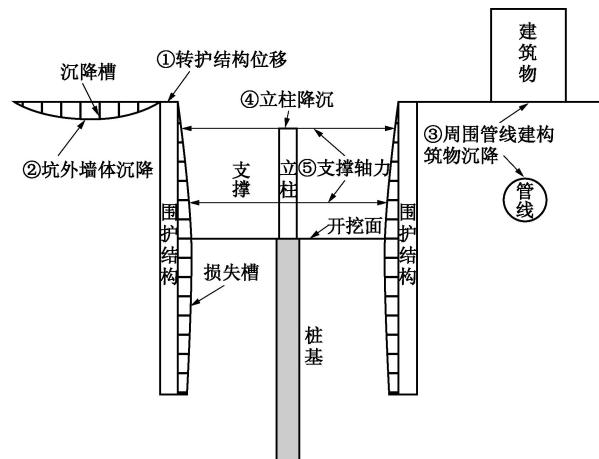


图 1 深基坑工程的受力变形图

Fig. 1 Deformation of deep excavation

1.2 系统开发平台的选择

基于 AutoCAD 软件进行二次开发建立风险预警系统。利用 AutoCAD 平台进行二次开发有以下 4 个优点：①AutoCAD 是一个被广泛使用的通用平台，稳定可靠；②施工人员熟悉其操作，可以利用大量的现有图纸资料，方便进行基坑几何建模；③属于开放性平台，可以实现用户的个性化要求。比如制作对话框进行基坑各部件工况、监测数据的导入与显示，展示基坑二维/三维视图；④AutoCAD 可基于 C++ 技术进行二次开发，能够实现众多数据融合算法。

1.3 基坑风险步骤

(1) 静态评估

依据基坑平面布置以及现场水文地质条件，系统自动扫描分析场地情况，判断潜在基坑工程风险源。静态评估可以在施工开始前辨识潜在的风险源。

例如若场地 10 m 以上存在砂层，则基坑有成槽坍方的风险；若围檩体系不闭合则可能发生整体失稳破坏；若基坑开挖面积大于 200 m² 则需要考虑开挖暴露面积过大产生的风险等。

(2) 动态评估

随着基坑施工的进行，现场施工人员应及时记录各部件的施工工况，当某部件进行到指定施工工序后，触发风险动态分析。

例如：围护结构进行成槽或降水工序时，系统自动开始进行成槽塌方或过度降水的风险分析；旋喷桩开始施工后，需要验算周围建筑物或者管线的隆起或是沉降；当开挖下层土后未加支撑的时间超过 24 h，则需要考虑上道支撑暴露时间过长会带来的风险。

动态评估一直贯穿于整个施工过程，保证基坑工程各部件在每个工况下都处于安全状态。

2 工程实例应用

2.1 工程概况

上海轨道交通 12 号线巨峰路站为地下 2 层车站。线路全长约 40.4 km, 呈西南—东北走向。车站标准段宽约 25 m, 最大宽度约 60 m。巨峰路站车站围护结构采用 800 mm 厚地下连续墙, 采用明挖顺作法施工。地下墙既作为基坑开挖时的围护结构, 使用阶段又与内衬两墙合一, 成为车站结构的主体部分。车站西侧端头井结构底板埋深 17.9 m, 采用 800 mm 厚地下墙及 600 mm 厚内衬结构; 车站中间标准段结构底板埋深 16.1~16.2 m, 采用 800 mm 厚地下墙及 400 mm 厚内衬结构; 车站东侧端头井结构底板埋深 17.5 m, 采用 800 mm 厚地下墙及 600 mm 厚内衬结构。

如图 2 所示为左线车站基坑标准段的支护方案示意图, 基坑共 4 道支撑, 第 1 道为 800×800 的混凝土支撑, 第 2、3、4 道支撑均为 $\Phi 609 \times 16$ 的钢支撑。地下连续墙为 800 mm 厚, 深 28.5 m, 底板为 C30 素混凝土浇筑。

采用本文介绍的系统对施工过程的风险进行动态评估, 评估过程中多次发现常规监测控制未报警的数据相关性风险报警情况。

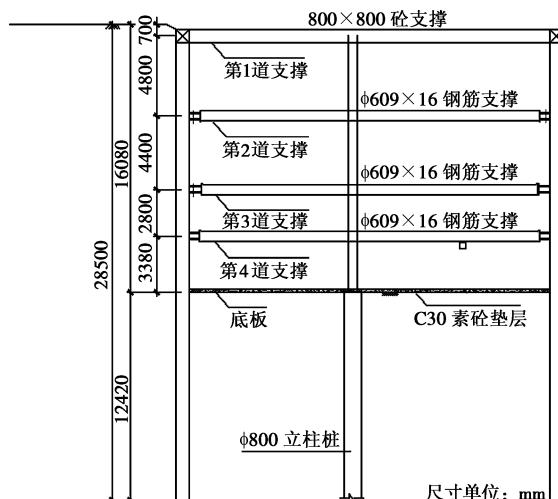


图 2 左线基坑标准段支护方案

Fig. 2 Supporting structure of standard section of excavation

2.2 数据相关性的风险评估

(1) 基坑建模及数据显示

首先调用系统的前处理建模功能, 建立基坑三维几何模型, 图 3 中①为地下连续墙, ②为混凝土支撑, ③为钢支撑, ④为土体分块。建立好基坑的几何模型后, 也将基坑模型各个实体对象赋予了编号, 属性, 材料信息, 力学参数, 几何参数等。

(2) 风险评估结果

所有前处理建模完成后, 便可以导入监测数据进行风险评估。如图 4, 5 分别显示了测斜 I5 对应地墙最大测斜变化率和最大沉降变化率的风险评估结果, 图 4 中可以看到 I5 最大测斜变化率的三级预警信息;

图 5 中显示了测点 I5 对应的最大沉降变化率和最大测斜变化率不匹配的二级预警信息, 具体数据分析情况如图 6 所示。

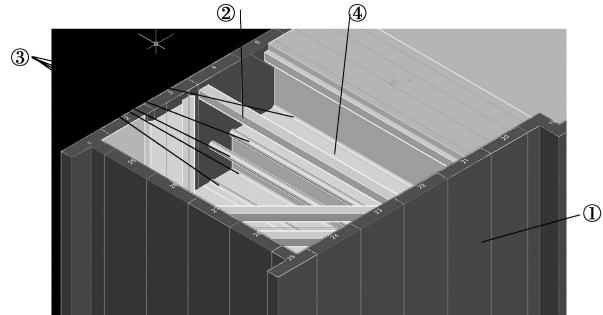


图 3 标准段基坑三维模型

Fig. 3 3D model of standard section of excavation



图 4 最大测斜变化率传统预警

Fig. 4 Traditional risk warning of maximum ratio of change of lateral displacement at I5



图 5 最大测斜变化率与最大沉降变化率关系的风险预警

Fig. 5 Risk warning of relationship between lateral displacement and surface settlement at I5

测点 I5 最大沉降变化率和最大测斜变化率如图 6 所示, 可以看到 11 月 26 日之前最大测斜变化率均小于最大测斜变化率, 11 月 27 日之后, 最大测斜变化率逐渐波动下降, 数据一直维持在零附近上下波动, 可能是地墙变形的内部调整。纵观所有的沉降测点, 变化率一直维持的 0.3 mm/d 附近, 小于规范限制的 2.0 mm/d, 而最大测斜变化率存在较多的点大于规范

限制的 2.0 mm/d , 系统会在这些日子报警。对于多数数据源相关性风险, 可以看到图中 11 月 15 日, 11 月 21 日的最大测斜变化率分别为 $4.67, 4.36 \text{ mm/d}$, 对应的最大沉降变化率为 $0.16, 0.2 \text{ mm/d}$, 最大测斜与沉降之比 $\Delta\delta_{\max}/\Delta\delta_{v\max}$ 分别为 $29.2, 21.8$, 已经远大于 5 倍的限值, 则在该日存在相对沉降发展较快的测斜变化量, 可能存在坑外土体空洞的风险。对于 12 月 1 日, 最大测斜变化率为 0.28 , 最大沉降变化率为 0.63 , 最大沉降变化率大于最大测斜变化率, 且二者都不是较小的变化量, 存在二级风险, 系统报警。

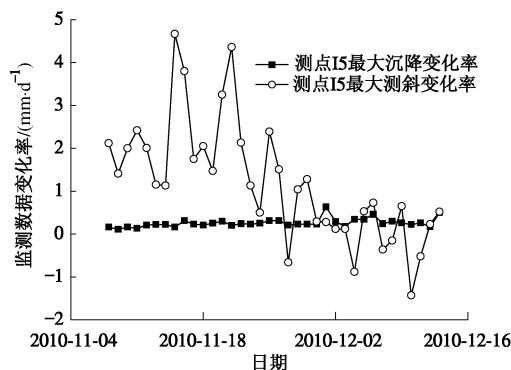


图 6 测点 I5 最大沉降变化率和最大测斜变化率之间关系

Fig. 6 Relationship between lateral displacement and surface settlement at I5

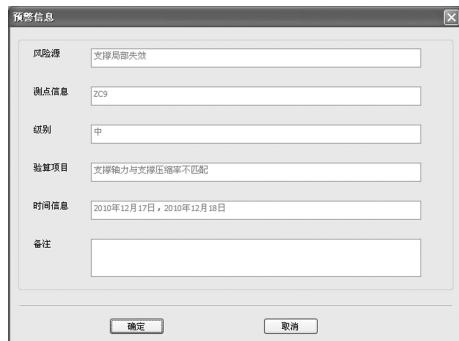


图 7 支撑轴力与对应压缩量之间关系的风险评估

Fig. 7 Risk warning of relationship between axial force of support and corresponding amount of compression at ZC9

支撑 ZC9 轴力与对应压缩量之间关系的风险评估如图 7 显示。支撑 ZC9 为 $\square 609 \times 16$ 钢支撑, 长 21.6 m , 钢材弹性模量 E 为 206 GPa , 深度为 9 m 。该支撑轴力最大实测值为 1514 kN , 轴力设计值为 2000 kN , 根据现行规范的预警标准轴力预警值为 1600 kN , 则预测的支撑轴力均安全, 系统不会报该风险。支撑 ZC9 对应的测斜点为 I3, 将支撑轴力和测斜数据进行数据相关性分析, 计算其对应的轴力压缩量可以得到(如图 9): 12 月 17 日和 18 日支撑轴力变化值和围护位移变化值之间的关系 K 分别为 $0.44, 0.47$, 均小于 0.5 ,

说明两者变化率不匹配, 系统提示二级预警。

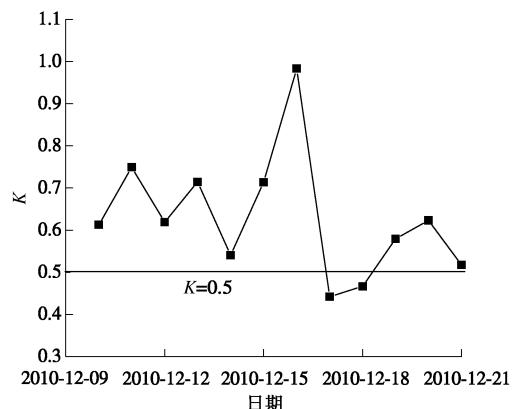


图 8 测点 ZC9 的支撑轴力和围护位移的关系

Fig. 8 Relationship between axial force of support and corresponding displacement at ZC9

3 结语

本文考虑多数据源相关性, 结合现场经验以及分级标准, 把握基坑工程在开挖过程中的变形受力特性, 构建了全新的基坑工程风险分析系统。相对传统的《规范》单源数据风险评估方法, 更能代表基坑结构以及周围环境的受力变形情况。采用本系统对地铁车站基坑的实测数据进行分析, 结果表明本系统能够判定出传统方法所不能识别的基坑风险。施工风险数据相关性评估方法为深基坑控制提供了更为可靠的手段, 是对常规预警方法的必要补充。

参考文献:

- [1] 黄宏伟, 边亦海. 深基坑工程施工中的风险管理[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 611 – 614. (HUANG Hong-wei, BIA Yi-hai. Field test on LSC piles to improve soft clay ground under the expressway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(4): 611 – 614. (in Chinese))
- [2] 边亦海. 基于风险分析的软土地区深基坑支护方案选择[D]. 上海: 同济大学, 2006. (BIAN Yi-hai. Selection of supporting system of deep excavations in soft soil area based on risk analysis[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))
- [3] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bing, Wang Wei-dong, Handbook for excavation engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [4] 刘国彬, 沈建明, 侯学渊. 深基坑支护结构的可靠度分析[J]. 同济大学学报, 1998, 26(3): 260 – 264. (LIU Guo-bing,

- SHEN Jian-min, HOU Xue-xuan. Reliability analysis of braced structures of deep-excavation[J]. Journal of Tongji University, 1998, **26**(3): 260 - 264. (in Chinese))
- [5] MATSUO M, KAWAMURA K. A design method of deep excavation in cohesive soil based on the reliability theory[J]. Soils and Foundations. 1980, **20**(1): 61 - 75.
- [6] BJEMUM L, EIDE O. Stability of struttued excavation in city[J]. Géotechnique, 1996, **6**(1): 32 - 47.
- [7] YOSSEF M A. Ground movement piedction for deep excavations in soft clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 1996, **122**(6): 474 - 486.
- [8] 刘一杰. 深基坑施工多参数风险评估与信息化预警[D]. 上海: 上海交通大学, 2012. (LIU Yi-jie. Multi-parameter based risk evaluation and pre-warning system for deep excavation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese))
- [9] 徐中华. 上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形形状研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.(XU Zhong-hua. Deformation behavior of deep excavations supported by permanent structure in Shanghai soft deposit[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)