

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.009

基于贝叶斯网络的富水砂层深基坑渗漏动态风险分析

张 申^{1,2,3,4}, 李 锦⁵, 王群敏³, 黄江华³, 单治钢¹, 吴 勇³, 龚晓南^{2,6}

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310012;
3. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司, 浙江 杭州 310014;
4. 浙江省城市盾构隧道安全建造与智能养护重点实验室, 浙江 杭州 310015;
5. 杭州市地铁集团有限责任公司, 浙江 杭州 310018; 6. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 针对富水砂层地区深基坑围护结构渗漏问题突出、危害严重的问题, 为适应开挖过程中渗漏风险随时间变化情况并提高评价客观性, 提出了基于贝叶斯网络的深基坑渗漏动态风险分析方法。以杭州富水砂层深基坑渗漏病害为背景, 构建了涵盖地层、补给、结构和变形等因素的渗漏风险评价指标体系; 运用贝叶斯网络及 Leaky-Max 假设构建静态贝叶斯网络模型, 分析了渗漏概率的敏感性及渗漏损失的风险因素和指标。工程实例分析结果表明, 采用该方法得到的富水砂层深基坑开挖过程渗漏的动态损失、渗漏概率和风险等级结果与工程实际情况一致, 验证了方法的合理性, 可用于富水砂层深基坑工程围护结构渗漏风险预测。

关键词: 渗漏; 深基坑; 富水砂层; 动态风险; 贝叶斯网络; 杭州

中图分类号: **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2024)06-0060-09

Dynamic risk analysis of deep foundation pit leakage in water-rich sand layer based on Bayesian network

ZHANG Shen^{1,2,3,4}, LI Jin⁵, WANG Qunmin³, HUANG Jianghua³, SHAN Zhigang¹, WU Yong³, GONG Xiaonan^{2,6}

(1. POWERCHINA Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China;

3. Zhejiang Huadong Mapping and Engineering Safety Technology Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;

4. Key Laboratory of Safe Construction and Intelligent Maintenance for Urban Shield Tunnels of Zhejiang Province, Hangzhou 310015, China;

5. Hangzhou Metro Group Co., Ltd., Hangzhou 310018, China;

6. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Aiming at the prominent and serious leakage problem of retaining structures of deep foundation pits in water-rich sand layers, a dynamic risk analysis method for deep foundation pit leakage based on the Bayesian network is proposed to adapt to the change of leakage risk over time during excavation and improve the objectivity of evaluation. Taking the leakage disease of deep foundation pits in water-rich sand layers in Hangzhou as the background, a risk analysis index system covering stratigraphy, supply, structure, and deformation was established. The static Bayesian network model was constructed using the Bayesian network and the Leaky-Max hypothesis to analyze the sensitivity of leakage risk probability and the risk factors as well as indices of loss. The results of engineering case analysis show that the dynamic loss, probability and risk level of leakage during the excavation of deep foundation pits in water-rich sand layers obtained by this method are consistent with the actual engineering situation, which verifies the rationality of the method that can be used to predict the leakage risk of retaining structures of deep foundation pits in water-rich sand layers.

Key words: leakage; deep foundation pit; water-rich sand layers; dynamic risk; Bayesian network; Hangzhou

富水砂层深基坑围护结构渗漏易造成基坑变形破坏、周边地表沉降及建筑物开裂等危害^[1-5], 因通常无法通过监测数据发现明显征兆且土体渗透破坏发展迅速^[6-7], 有效利用工程经验实现深基坑渗漏风险防治的

基金项目: 华东测安科技项目(ZKY2022-CA-01-01); 浙江省城市盾构隧道安全建造与智能养护重点实验室开放基金项目(ZUCC-UST-22-04)

作者简介: 张申(1988—), 男, 工程师, 博士, 主要从事基坑工程建设安全风险分析工作。E-mail: zhang_s10@hdec.com

通信作者: 吴勇(1980—), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事工程安全风险控制研究。E-mail: wu_y3@hdec.com

引用本文: 张申, 李锦, 王群敏, 等. 基于贝叶斯网络的富水砂层深基坑渗漏动态风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 60-68.

ZHANG Shen, LI Jin, WANG Qunmin, et al. Dynamic risk analysis of deep foundation pit leakage in water-rich sand layer based on Bayesian network[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(6): 60-68.

挑战仍然较大。

目前,国内外学者围绕深基坑渗漏风险的评估和分析已做了许多有益探索。例如:Jurado 等^[8]综合采用故障树分析、地下水流动方程随机模拟及专家评判等方法,定量研究了渗漏等地下水引起的基坑工程渗漏风险;周红波等^[9]采用故障树和敏感性分析方法对深基坑止水帷幕渗漏、流砂等承压水风险事件及关键因素进行判识,并结合工程实践提出了应对措施;徐青^[10]将动态故障树和蒙特卡罗抽样方法相结合,分析得到了基坑建设过程中涌水事故的概率变化趋势;Castaldo 等^[11]通过蒙特卡罗模拟、贝叶斯网络更新及现场监测,综合确定了地下水沿不同深度接缝位置的渗漏概率分布,并针对风险因素提出了预防建议;李卫华等^[12]利用模糊综合评判法结合监测数据,对地铁基坑渗漏事故前后的风险等级进行了评价;吴波等^[13-14]基于模糊层次分析法和灰色关联度理论建立了地铁深基坑涌水涌砂风险评价模型,基于模糊贝叶斯网络分析模型有效评估了地铁深基坑施工渗漏风险。可见既有关于深基坑渗漏风险的评估结果表现为静态形式,未能实现渗漏风险的实时、动态预测,且研究大多以专家经验、模糊评判等方法为基础,主观因素较强,缺乏数据支撑。

本文以杭州富水砂层地铁深基坑渗漏病害为背景建立渗漏风险评价指标体系,采用贝叶斯网络并基于 Leaky-Max 假设构建静态贝叶斯网络 (static Bayesian network, SBN) 模型,分析渗漏概率的敏感性及渗漏损失的风险因素和指标,以期对深基坑工程围护结构渗漏风险预测与防治提供参考。

1 工程背景

杭州市位于杭嘉湖平原西南部、钱塘江下游,境内北部、东部及钱塘江两岸均为广阔的堆积平原,水网密布,潜水多年平均埋深 0.5 ~ 1.0 m,地下工程建设安全风险高。在宝石山至半山一线以东 (古) 钱塘江流域内广泛分布有河相沉积砂砾石层,该地层位于工程建设深度范围,且厚度较大、透水性强,受降雨和地表水补给强烈,涌水涌砂引发工程止水帷幕渗漏风险高。地铁车站基坑往往深度较大且平面形状不规则,施工工序复杂、变形控制难度大,围护结构接缝位置受工艺影响出现夹泥夹砂缺陷后易发展成渗漏通道,进而可能引发周边路面沉降、塌陷及建 (构) 筑物开裂甚至人员伤亡等危害。

2 渗漏动态风险分析方法

以杭州富水砂层地铁深基坑渗漏病害为背景,建立渗漏风险评价指标体系;运用贝叶斯网络及 Leaky-Max 假设构建 SBN 模型,分析渗漏概率的敏感性及渗漏损失的风险因素和指标;通过更新评价指标取值,得到渗漏损失、渗漏概率和风险等级的动态变化。

2.1 SBN 模型构建

2.1.1 渗漏风险评价指标体系

深基坑围护结构渗漏风险受场地工程地质条件、围护结构施工质量及变形状态、土方开挖与支撑架设效率、基坑降水效果等多因素影响^[3,9,15]。结合相关文献资料^[3,4,7]、工程经验及杭州地铁深基坑渗漏病害统计数据,综合确定包括四方面因素、共 10 个指标的深基坑渗漏风险评价指标体系,如图 1 所示。①地层风险评价指标。粉土、粉砂及淤泥质土等是基坑渗漏的易发地层,基坑收底期间与开挖界面附近渗漏风险较高,以底板岩性(x_1)和开挖界面岩性(x_2)为评价指标。研究区地貌以沉积平原为主、地表高差小,岩性间接反映了基坑深度和渗漏深度。②补给风险评价指标。地下水富集是基坑渗漏的必要条件,研究区地势平坦、河网

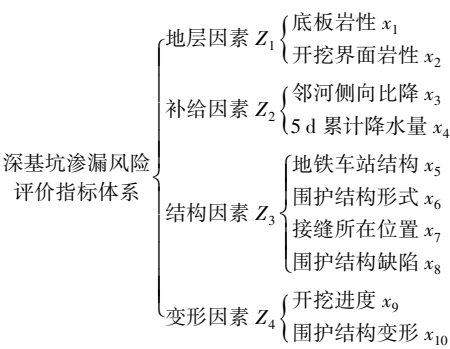


图 1 深基坑渗漏风险评价指标体系

Fig. 1 Leakage risk analysis index system of deep foundation pit

纵横,地下水位受河流控制,埋深较浅且相对稳定,从水平向水力梯度的角度出发,以邻河侧向比降(x_3 ,即渗漏深度与基坑邻近河道的水平距离的比值)为评价指标;研究区雨量充沛,多日连续降雨持续入渗补给地下水,比较渗漏发生前2~7d累计降水量并选取5d累计降水量(x_4)为评价指标。③结构风险评价指标,包括影响基坑规模的地铁车站结构(x_5)、影响止水防渗效果的非地连墙和地连墙围护结构形式(x_6)、接缝所在位置(x_7)和围护结构缺陷(x_8)。受施工空间、异形墙幅等影响,转角和平面位置围护结构接缝质量控制难度不同,接缝实际质量状况难以探明,故以围护结构整体质量缺陷作为表征并划分为轻微、一般和严重3个等级(表1)。④变形风险评价指标。土体开挖过半后基坑变形风险逐渐增大,以开挖深度与设计深度的比值表征开挖进度(x_9),以最大水平位移与最大位移深度的比值表征围护结构变形(x_{10})状态。

表 1 围护结构质量缺陷等级

Table 1 Level of quality defects of retaining structure

缺陷等级	判定标准(以地连墙为例)
轻微	地连墙接缝位置存在夹泥夹砂缺陷,墙体其余部位未见明显质量问题
一般	成槽过程缩颈并存在槽壁坍塌现象,地连墙局部鼓包、露筋,但较少引发地表沉降
严重	成槽过程缩颈、槽壁坍塌,墙体鼓包较多,部分位置存在露筋甚至漏筋现象,多引发地表小幅沉降;成槽过程跑浆导致槽壁大面积坍塌;成槽偏斜、锁口管偏斜等导致地连墙在接缝处出现错缝、交叉

参照 GB 50652—2011《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》(以下简称《规范》)表 4.3.1,深基坑渗漏风险等级由风险的概率和损失确定。渗漏概率按《规范》表 4.2.1 分级,损失参照《规范》划分为 5 级,严重程度则综合渗漏表现和渗漏对环境、围护结构的影响确定,如表 2 所示。

表 2 深基坑渗漏损失等级

Table 2 Leakage loss level of deep foundation pit

损失等级	渗漏表现		渗漏影响	
	水流情况	含砂情况	环境	围护结构
A	涌水	涌砂	地面沉降、塌陷,管线破坏,建筑开裂	变形强烈、失稳破坏
B	涌水	涌砂	地面沉降、塌陷,管线破坏,建筑开裂	变形较小,整体稳定
C	涌水	涌砂	地下可能出现空洞	变形较小,整体稳定
D	涌水	夹泥带砂	地下可能出现空洞	变形较小,整体稳定
E	渗漏水	无或较少	无显著变化	无显著变化
N	无	无	无显著变化	无显著变化

2.1.2 SBN 模型变量及取值

基于 Bayes Server 软件,深基坑渗漏风险分析的 SBN 模型(图 2)可依据贝叶斯网络结构原理及风险评价指标构建。指标 x_1 、 x_2 的取值对应杭州地区典型岩性的工程地质分层编号^[16-17]。 n 为空值(null),表示指标 x_i 的统计样本中未出现的数值、区间,或取值未知的情况; N 表示无渗漏(损失)情况。指标 x_3 、 x_4 、 x_9 、 x_{10} 的取值区间根据样本的概率分布,采用聚类方法划分。指标 x_5 取值 0、1,分别代表地铁车站的附属和主体结构;指标 x_6 取值 0、1,分别代表非地连墙和地连墙围护结构形式;指标 x_7 取值 0、1,分别代表围护结构转角和平面位置;指标 x_8 取值 1、2、3,分别代表严重、一般和轻微缺陷等级。

节点 Z_i 设置为辅助变量,等级划分同渗漏损失 Y ,并取决于其所有子变量的条件概率分布,即 $P(Z_1 | x_1, x_2)$ 、 $P(Z_2 | x_3, x_4)$ 、 $P(Z_3 | x_5, x_6, x_7, x_8)$ 和 $P(Z_4 | x_9, x_{10})$,可通过样本统计得到。节点 Y 设置为 Leaky-Max 变量,则条件概率表共含有 $(6-1) \times 6^4 = 6480$ 个参数,但独立参数仅 $(6-1) \times 6 \times 4 = 120$ 个。

2.2 渗漏动态风险分析

2.2.1 SBN 风险分析

在事件 X 发生条件下,事件 Y 发生的概率为

$$P(Y | X) = P(YX) / P(X)$$

其中
$$P(YX) = P(Y | X) \cdot P(X) = P(X | Y) \cdot P(Y)$$

若事件 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 分割了样本空间 Ω 且彼此独立,则事件 Y 发生的概率为

$$P(Y) = \sum_{i=1}^n P(X_i)P(Y | X_i)$$

根据式(1)、式(2)可得贝叶斯公式:

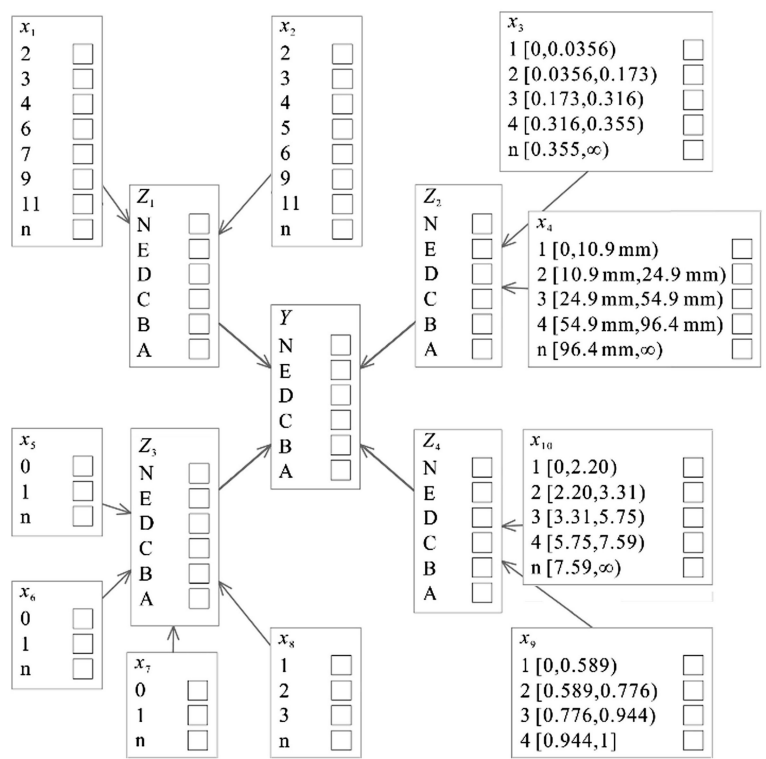


图 2 渗漏风险分析的 SBN 模型

Fig.2 SBN model of leakage risk analysis

$$P(X_i | Y) = P(X_i)P(Y | X_i) / \sum_{i=1}^n P(X_i)P(Y | X_i) \tag{3}$$

- 基于渗漏风险分析的 SBN 模型及式(1) ~ (3) 能够实现指标的敏感性分析、渗漏概率预测及指标诊断。
- a. 指标敏感性分析。敏感性为结果变量(子节点)对原因变量(父节点)变化的响应程度。通过条件概率公式(式(1))可计算不同指标取值下的渗漏概率变化,从而实现指标的敏感性分析,并确定引起深基坑渗漏概率变化的敏感指标。
 - b. 渗漏概率预测。概率预测是贝叶斯网络由原因向结果的正向推理应用,依据全概率公式(式(2))可计算多指标影响下的渗漏概率。
 - c. 指标诊断。指标诊断是贝叶斯网络由结果向原因的反向推理应用,依据贝叶斯公式(式(3))可计算风险发生条件下不同指标发生的概率。

2.2.2 动态风险分析

深基坑渗漏的动态风险分析主要基于渗漏概率的动态更新,确定相应渗漏损失等级后,综合确定渗漏风险等级。

- a. 渗漏概率动态更新。基于 SBN 渗漏概率预测方法,通过更新原因节点的证据向量,可实现渗漏概率的动态预测。因此,将指标(图 1)划分为静态和动态两类,静态指标包括底板岩性(x_1)、地铁车站结构(x_5)、围护结构形式(x_6)、接缝所在位置(x_7),其余均为动态指标,随时间及开挖进度变化。
- b. 渗漏风险等级确定。动态指标的证据向量按时步输入后,可基于 SBN 风险分析预测渗漏损失(Y)的概率分布,确定各时步的损失等级(A ~ E 或 N)。最终,不同时步的渗漏风险等级参照《规范》表 4.3.1 并结合损失等级和概率等级确定为 I ~ IV 级,从而得到深基坑施工过程中渗漏风险的动态变化趋势。

3 工程实例分析

3.1 基坑概况

以位于钱塘区大江东的 8 号线某车站基坑为例,其西端头井转角处在施工过程中曾发生渗漏病害。该车站为地下二层双柱三跨、局部单柱双跨现浇钢筋混凝土箱型结构。主体基坑总长度为 625.6 m,分为东、西

两区施工,其间设置中隔墙,西基坑顶板施工完成后开始东基坑施工。基坑标准段宽 21.7 m、深 15.5 m,东、西端头井分别深 21.0 m 和 16.8 m。围护结构采用 800 mm 厚地下连续墙+4 或 5 道内支撑形式。

基坑地层岩性如表 3 所示,潜水位埋深 7.5 ~ 9.7 m,底板位于③₅粉砂层内、局部位于⑥₂淤泥质粉质黏土夹粉土层内。基坑平面位置处于钱塘江、曹娥江环绕的“半岛”之上,与二者的最短距离约 9.1 km,与最近河道的水平距离约 400 m。

本文重点分析西端头井转角位置渗漏风险,静态评价指标取值分别为: $x_1=3, x_5=1, x_6=1, x_7=0$ 。

3.2 SBN 风险分析

3.2.1 指标敏感性分析

指标 x_i 取不同值时,可得到渗漏风险 Y 处于损失等级 $A(Y_A)$ 的概率 $P(Y_A | x_i)$,将其按照升序排列并进行线性回归,结果如图 3(a)所示。采用拟合直线斜率作为敏感性参数,可知 Y_A 对各指标变化的敏感性由高到低依次为 $x_5, x_7, x_6, x_8, x_3, x_4, x_1, x_{10}, x_2, x_9$,即基坑 A 级损失的渗漏风险概率对地铁车站结构最敏感,对接缝所在位置、围护结构形式和围护结构缺陷次之,对开挖进度最不敏感,可见结构因素(Z_3)变化对渗漏风险 Y_A 影响更大。

表 3 基坑地层岩性

地层编号	地层岩性	层厚/m
① ₂	素填土	0.4
② ₃₂	砂质粉土	2.3
② ₄₂	砂质粉土夹粉砂	5.4
③ ₃	粉砂夹砂质粉土	2.2
③ ₅	粉砂	9.3
⑥ ₂	淤泥质粉质黏土夹粉土	10.4

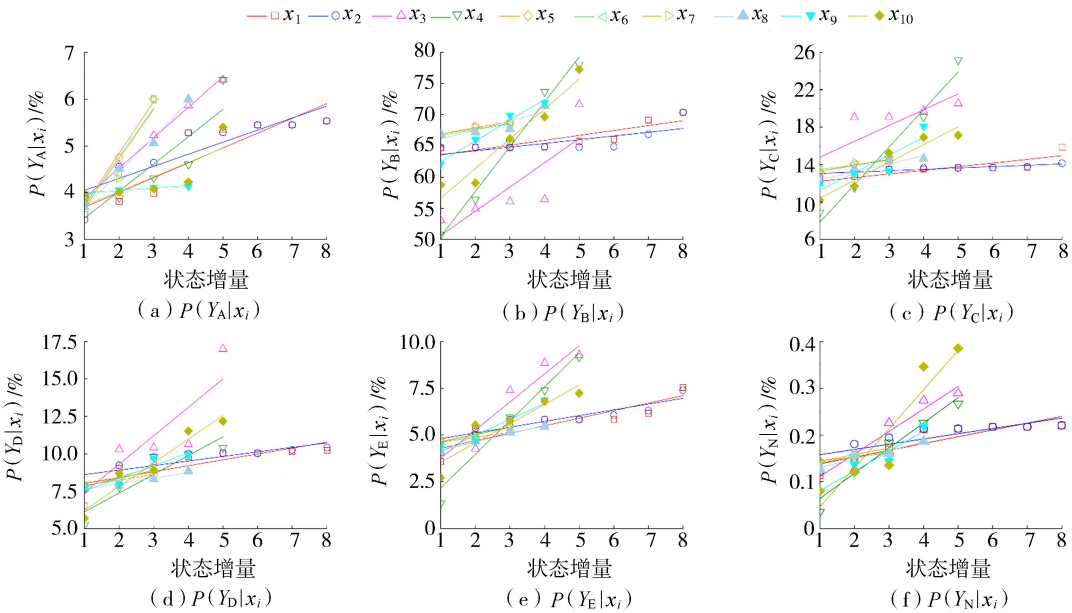


图 3 $P(Y | x_i)$ 分布及拟合直线

Fig. 3 Distribution and fitting line of $P(Y | x_i)$

同样地,可得到指标 x_i 取不同值时渗漏风险 Y 处于等级 B ~ E 及 N 的概率变化情况,结果分别如图 3(b) ~ (f) 所示。将渗漏风险 Y 对指标 x_i 的敏感性按顺序排列如表 4 所示, $Y_B \sim Y_E$ 和 Y_N 敏感的前 5 项指标较一致($x_3, x_4, x_8, x_9, x_{10}$),可见补给因素(Z_2)和变形因素(Z_4)的变化影响较强,且均为动态指标,因而主要的渗漏风险($Y_B \sim Y_E, Y_N$)随着时间及开挖进度动态变化。静态指标(x_1, x_5, x_6, x_7)和 x_2 的变化影响较弱,其中地层因素(Z_1)指标 x_1, x_2 表征的岩性在研究区内稳定分布且易发生渗漏,因此渗漏风险对二者的敏感性低。渗漏损失等级 A ~ E 及 N 的最敏感指标分别为 $x_5(0.0111)$ 、 $x_4(0.0718)$ 、 $x_4(0.0401)$ 、 $x_3(0.0190)$ 、 $x_4(0.0180)$ 、 $x_{10}(0.0008)$ 。

表 4 渗漏风险 Y 对指标 x_i 的敏感性强弱

Table 4 Sensitivity of leakage risk Y to risk indicators x_i

损失等级	敏感性强弱排序(由高到低)
A	$x_5, x_7, x_6, x_8, x_3, x_4, x_1, x_{10}, x_2, x_9$
B	$x_4, x_{10}, x_3, x_9, x_8, x_5, x_6, x_7, x_1, x_2$
C	$x_4, x_{10}, x_9, x_3, x_8, x_7, x_5, x_6, x_1, x_2$
D	$x_3, x_{10}, x_4, x_9, x_6, x_7, x_1, x_8, x_5, x_2$
E	$x_4, x_3, x_{10}, x_9, x_8, x_1, x_6, x_7, x_2, x_5$
N	$x_{10}, x_4, x_3, x_9, x_8, x_1, x_7, x_2, x_6, x_5$

因此渗漏风险对二者的敏感性低。渗漏损失等级 A ~ E 及 N 的最敏感指标分别为 $x_5(0.0111)$ 、 $x_4(0.0718)$ 、 $x_4(0.0401)$ 、 $x_3(0.0190)$ 、 $x_4(0.0180)$ 、 $x_{10}(0.0008)$ 。

3.2.2 指标诊断

实际工程中,通常采用指标的后验概率 $P(x_i | Y)$ 表征其重要程度,后验概率越大的指标风险越大^[18]。不同渗漏损失等级发生条件下,地层、补给、结构和变形风险因素 (Z_i) 的后验概率分布如图 4 所示,以 $P(Z_i | Y_A)$ 为例, Z_1 损失等级 A 的概率最大,为 34.1%; Z_2 损失等级 B 的概率最大,为 39.5%; Z_3 损失等级 D 的概率最大,为 25.2%; Z_4 损失等级 B 的概率最大,为 44.7%;综上,渗漏风险状态 Y_A 出现时,损失等级为 B 时的变形风险(Z_4)为最可能的风险因素(记为 $Z_{4-B} | Y_A$)。渗漏风险 $Y_B \sim Y_E$ 和 Y_N 出现的最可能风险因素分别为 $Z_{2-B} | Y_B$ ($P=59.5\%$)、 $Z_{1-C} | Y_C$ ($P=36.9\%$)、 $Z_{2-D} | Y_D$ ($P=51.6\%$)、 $Z_{2-E} | Y_E$ ($P=65.0\%$) 和 $Z_{2-E} | Y_N$ ($P=68.3\%$),可见补给因素(Z_2)的风险最大。

同理,上述最可能风险因素发生条件下,相应指标的后验概率分布如图 5 所示,以 $P(x_i | Z_{1-C})$ 分布为例, x_1 取值为 6 的概率最大(56.1%), x_2 取值为 3 的概率最大(64.6%),即地层因素(Z_1)导致渗漏的损失等级为 C 级时,基坑底板最有可能位于层⑥₂、渗漏时开挖界面最有可能位于层③₃、③₅。类似地,当变形因素(Z_4)导致渗漏的损失等级为 B 级时,开挖进度最可能处于 $[0.944, 1]$ 区间、围护结构变形比值最可能处于 $[0, 2.2)$ 区间。补给因素(Z_2)导致渗漏的损失等级为 A、N 级时,邻河侧向比降最可能处于 $[0.0356, 0.173)$ 区间、5 d 累计降水量最可能处于 $[54.9\text{ mm}, 96.4\text{ mm})$ 区间;为 B、D、E 级时,邻河侧向比降最可能处于 $[0, 0.0356)$ 区间、5 d 累计降水量最可能处于 $[0, 10.9\text{ mm})$ 区间;为 C 级时,邻河侧向比降最可能处于 $[0, 0.0356)$ 区间、5 d 累计降水量最可能处于 $[24.9\text{ mm}, 54.9\text{ mm})$ 区间。

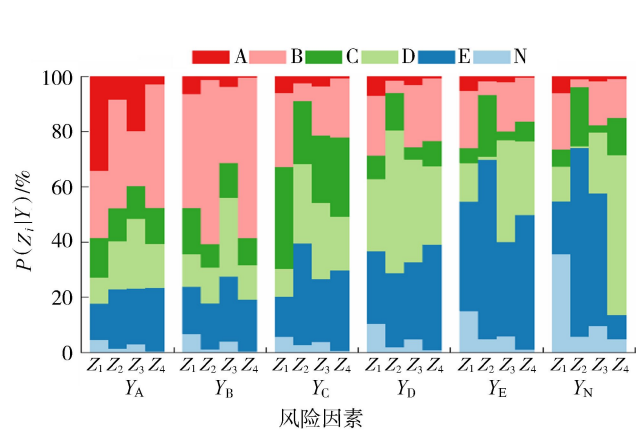


图 4 风险因素的后验概率分布

Fig.4 Posterior probability distribution of risk factors

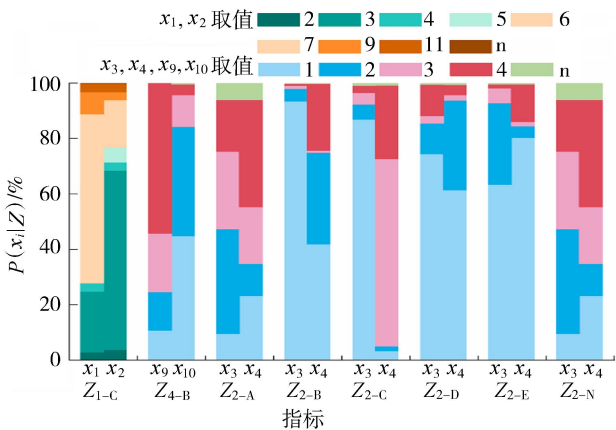


图 5 指标的后验概率分布

Fig.5 Posterior probability distribution of risk indices

3.3 动态风险分析

据调查,渗漏位置附近地连墙成槽过程中曾发生槽壁坍塌并引发地表沉陷(严重缺陷等级),塌孔位置在基坑底板以下,尽管当时吊出钢筋笼回填了混凝土,但仍可能存在较大缺陷,故开挖进度(x_9)为 0.9 之前和之后的围护结构缺陷等级分别设置为一般和严重,即 $x_8 = 1, 2$ 。

基坑施工主要时间节点:2018 年 7 月 29 日起围护结构施工,12 月 28 日起土方开挖;西端头井(1~3 轴)于 2019 年 3 月 22 日开挖见底,3 月 23 日垫层浇筑完成,同时标准段 4~8 轴底板已浇筑,9~11 轴底板钢筋绑扎,12~16 轴第四层土方开挖,17~19 轴第三层土方开挖完毕;5 月 17 日西端头井具备盾构始发条件。

自基坑开挖始,西端头井施工期间 5 d 累计降水量及开挖深度情况如图 6 所示,其中开挖进度按照基坑开挖原则、案例工程基坑特点、既有施工记录、土方开挖及支撑架设的常规时长等综合确定。依据岩层埋深(表 3)及 5 d 累计降水量区间划分(图 2)可确定指标 x_2, x_4 取值分别为: $x_2 = 2, 3, n$; $x_4 = 1, 2, 3, 4, n$ 。邻河侧向比降(x_3)、开挖进度(x_9)和围护结构变形(x_{10})在开挖、收底期间变化如图 7 所示,指标取值分别为: $x_3 = 1, 2$; $x_9 = 1, 2, 3, 4$; $x_{10} = 1$ 。

以第 14 天为例,开挖深度约为 5.60 m、开挖界面岩层为②₄₂,5 d 累计降水量约为 30.2 mm,邻河侧向比降约为 0.014,开挖进度约为 0.33,围护结构变形约为 0.41。因此,依据渗漏风险分析 SBN 模型(图 8),可以得到当日西端头井基坑转角位置渗漏损失等级最可能为 E 级,相应的概率为 38.5%,概率等级为 1 级,综合确定渗漏风险等级为Ⅲ级。

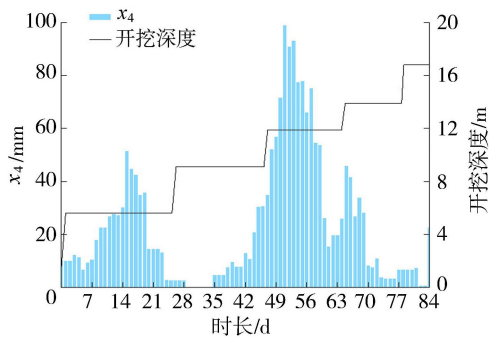


图6 西端头井开挖深度和5d累计降水量

Fig.6 Excavation depth of west well and 5-day cumulative rainfall

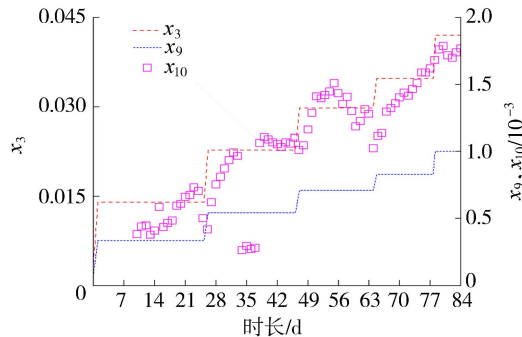


图7 邻河侧向比降、开挖进度和围护结构变形变化情况

Fig.7 Variations of lateral gradient of adjacent river, excavation progress, and deformation of retaining structure

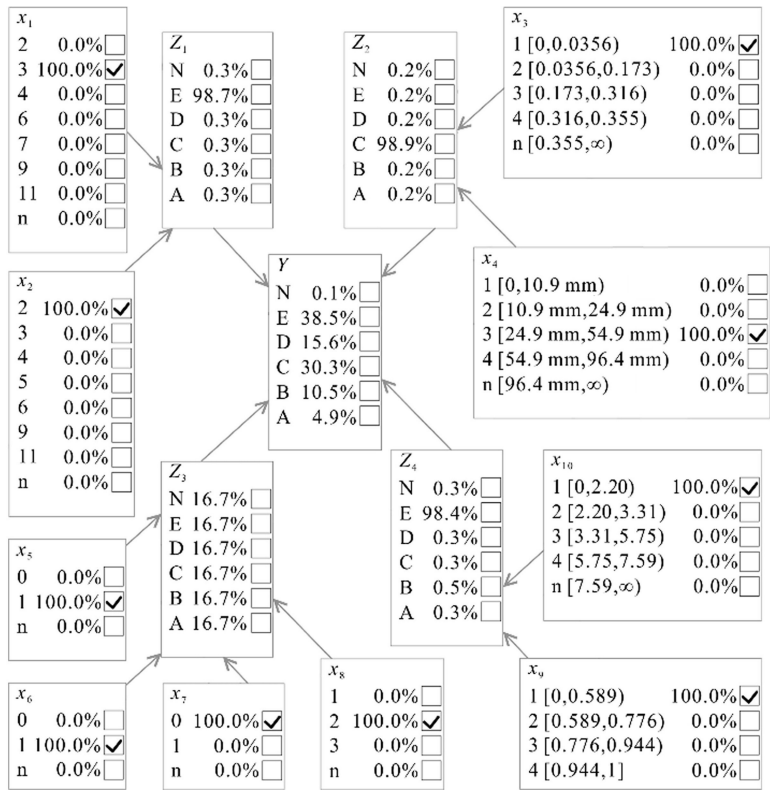


图8 第14天渗漏损失及概率分析

Fig.8 Analysis of leakage loss and probability at day 14

以7 d为一个步长、共计13个时间节点更新基坑开挖过程渗漏概率变化,结果如图9所示,可知该基坑渗漏损失以B级为主,且渗漏概率在开挖前期(<42 d)波动较大,后期则稳定在较高水平($P>70\%$),表明基坑开挖的中后期渗漏风险较高,这与软土深基坑侧向变形随着开挖深度的增加而增大的规律^[15,19]一致。若以80%作为渗漏概率等级划分阈值^[20-21],则第70~84天“很可能”或“几乎肯定”会发生险情,需格外关注,对应开挖深度为13.9~16.8 m、开挖进度为0.83~1.00;特别在基坑收底阶段,渗漏概率达到极大值84.6%,渗漏风险等级为I级。

在施工过程中,3月24日12时48分施工单位巡视发现西端头井北侧Z字幅地连墙阴角处垫层下方出现渗漏。现场随即准备

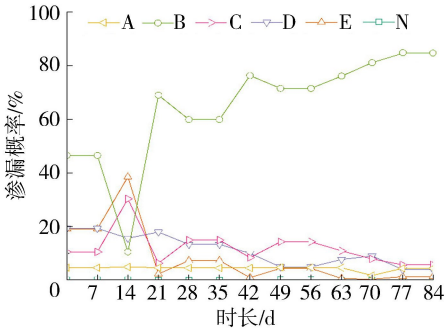


图9 开挖过程渗漏概率变化

Fig.9 Changes in leakage probability during excavation

封堵,然而渗漏发展迅速,10 min 后转为大股涌水涌砂,墙外地表大范围沉降(B 级渗漏损失)。施工单位立即启动应急预案,撤离坑内作业人员并组织土方回填、混凝土反压及坑外混凝土回填,同时封堵外部雨水管线、窨井,切断地下水汇集、流动优势通道,进行坑外引孔注浆。建设单位协调多方驻场跟踪险情动态,分析监测数据,更新平台信息,发布预警短信。21 时左右险情得以缓解,25 日 3 时 20 分涌水险情解除。

3.4 基坑渗漏原因与特点

围护结构缺陷是基坑渗漏的直接原因。地下连续墙接缝处常因泥浆质量、混凝土绕流、接头冲刷、沉渣厚度控制等问题造成夹泥夹砂缺陷,类似于围护桩咬合性差、桩间土加固欠密实等缺陷,并因此形成渗漏发育的“天然”通道;转角位置接缝因叠加施工空间狭窄、异形墙幅拼接等不利因素,更易发生渗漏病害。构筑于富水砂层中的围护结构受地下水影响,施工质量控制难度大,成槽过程中会因跑浆导致缩颈、槽壁坍塌并引发墙体鼓包、露筋,会因成槽偏斜导致相邻两幅墙体出现错缝、开叉;成墙过程中易发生混凝土超方并导致地连墙出现严重缺陷。

围护结构变形加剧了基坑渗漏风险。基坑开挖面附近围护结构常由于土方超挖、支撑架设不及时等原因而变形过大,在支撑架设滞后区域的坑内外土(水)压力平衡阶段,若砂砾石层富水且接缝存在质量缺陷,则极易发生渗漏,因此开挖面上部一定范围内渗漏风险较高。软土深基坑围护结构侧向位移沿深度呈“D”形分布,侧向位移极大值所在位置深度随开挖深度的增大而增大的趋势显著,最大侧向位移出现在基坑底部附近,因而随着开挖的深入,渗漏风险增大。特别在基坑收底阶段,坑外土压力大,同时为便于施工,存在多段底板集中浇筑、支撑架设滞后、支撑标高上抬等问题,加剧了坑底附近的变形。因此,随着基坑开挖进入中后期,围护结构变形增大,富水砂层部位的接缝缺陷暴露,基坑渗漏风险显著升高。

相对于动态贝叶斯网络需要更为详细的施工数据支撑转移概率计算、假设条件与实际情况存在较大差距等问题,基于 SBN 模型的动态风险分析更加便捷、实用,通过构建渗漏风险评价指标体系和一定量的样本数据即可实现渗漏风险的预测;分析结果与工程实际情况吻合,能够较好地反映基坑开挖过程渗漏风险变化情况。

4 结 语

富水砂层深基坑渗漏病害频发,且具有隐蔽性强、发展迅速等特点,易造成基坑及周边环境变形、破坏甚至人员伤亡。深基坑渗漏风险受多种因素影响,预测难度大,本文以杭州富水砂层地铁深基坑工程为背景,提出了基于贝叶斯网络的动态风险分析方法,基于 Leaky-Max 假设建立了考虑地层、补给、结构和变形等因素评价指标的深基坑围护结构渗漏风险分析 SBN 模型。基于研究区内渗漏病害统计数据,分析了渗漏概率对风险评价指标取值变化的敏感性,及不同渗漏损失等级下最可能的风险因素和指标,结合研究区内工程案例更新评价指标取值,获取基坑开挖过程渗漏损失、渗漏概率和风险等级的动态变化,分析结果与工程实际情况一致,验证了方法的合理性,可为类似地区深基坑工程围护结构渗漏风险预测提供参考。

参考文献:

[1] 陈亮,滕耀宗,蔡国栋,等. 变水头下管涌细颗粒迁移试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):82-88. (CHEN Liang,TENG Yaozong,CAI Guodong,et al. Experimental study on the migration of fine particles in piping under variable water head[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(5):82-880. (in Chinese))

[2] 邱昊天,王媛,巩佳琨,等. 泡沫流体对堤基土体渗流特性影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):70-78. (QIU Haotian,WANG Yuan,GONG Jiakun,et al. Effect of foam fluid on seepage characteristic in embankment foundation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(5):70-78. (in Chinese))

[3] 侯新宇,刘娟,薛必芳,等. 地铁基坑地下连续墙渗漏原因分析及治理措施[J]. 建筑技术,2017,48(9):972-975. (HOU Xinyu,LIU Juan,XUE Bifang,et al. Study on causes and countermeasures for seepage accidents of diaphragm walls in subway excavations[J]. Architecture Technology,2017,48(9):972-975. (in Chinese))

[4] 樊冬冬,刘祥勇,景旭成,等. 南通富水砂性地层地铁深基坑墙体渗漏原因分析[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(增刊 1):225-231. (FAN Dongdong,LIU Xiangyong,JING Xucheng,et al. Causes analysis on wall leaking of metro foundation pit in Nantong water-rich sandy stratum[J]. Tunnel Construction,2020,40(Sup1):225-231. (in Chinese))

[5] 王烨晟,陈文华. 基于地墙缺陷的深基坑渗透破坏评判准则研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(增刊 2):951-958.

- (WANG Yesheng, CHEN Wenhua. Research on criterion of seepage failure for deep foundation pit with diaphragm wall defects [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(Sup2): 951-958. (in Chinese))
- [6] 周仁练, 马佳佳, 苏怀智. 基于无人机载红外-可见双光成像的土石堤坝渗漏巡查方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 154-161. (ZHOU Renlian, MA Jiajia, SU Huaizhi. Leakage inspection method of earth-rock embankment based on UAV with infrared and visible dual-light imaging[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 154-161. (in Chinese))
- [7] 晁慧, 谭勇, 刘天任. 富水砂性地层中地墙渗漏诱发地层塌陷灾害的细观机制探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(7): 1180-1189. (CHAO Hui, TAN Yong, LIU Tianren. Meso-mechanism of ground collapse induced by leaking of underground diaphragm wall in water-rich sandy strata[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(7): 1180-1189. (in Chinese))
- [8] JURADO A, DE GASPARI F, VILARRASA V, et al. Probabilistic analysis of groundwater-related risks at subsurface excavation sites[J]. Engineering Geology, 2012, 125: 35-44.
- [9] 周红波, 蔡来炳. 软土地区深基坑工程承压水风险与控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 27-32. (ZHOU Hongbo, CAI Laibing. Risk and control of the artesian water for deep excavation engineering in soft soil area[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2015, 43(1): 27-32. (in Chinese))
- [10] 徐青. 武汉地铁站深基坑开挖涌水风险与控制研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
- [11] CASTALDO P, JALAYER F, PALAZZO B. Probabilistic assessment of groundwater leakage in diaphragm wall joints for deep excavations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 531-543.
- [12] 李卫华, 张生杰, 洪小星, 等. 基于监测数据的某地铁基坑渗漏风险评估[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(1): 60-66. (LI Weihua, ZHANG Shengjie, HONG Xiaoxing, et al. Risk assessment of diaphragm wall leakage during subway excavation based on field monitoring data[J]. Journal of Hefei University of Technology(Nature Science), 2022, 45(1): 60-66. (in Chinese))
- [13] 吴波, 陈辉浩, 黄惟, 等. 基于FAHP-GRA理论的深基坑涌水涌砂风险评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 2209-2216. (WU Bo, CHEN Huihao, HUANG Wei, et al. Risk assessment of water and sand gushing in deep foundation pit based on the FAHP-GRA theory[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(8): 2209-2216. (in Chinese))
- [14] 吴波, 农宇, 蒙国往, 等. 基于FBN地铁深基坑施工渗漏风险评估模型及应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(5): 178-185. (WU Bo, NONG Yu, MENG Guowang, et al. Risk assessment model of leakage in deep foundation pit construction of subway based on FBN and its application[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(5): 178-185. (in Chinese))
- [15] 赵云非, 王晓琳. 城市地铁深基坑施工渗漏水原因分析与预防[J]. 隧道建设, 2013, 33(3): 242-246. (ZHAO Yunfei, WANG Xiaolin. Cause analysis on and prevention of water seepages during construction of deep foundation pits of metro works in urban areas[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(3): 242-246. (in Chinese))
- [16] 浙江省工程建设标准《工程建设岩土工程勘察规范》管理组. 工程建设岩土工程勘察规范: DB33/T1065—2019[S]. 杭州: 浙江省住房和城乡建设厅, 2019.
- [17] 杭州地铁岩土工程勘察地层编号规定[R]. 杭州: 杭州市地铁集团有限责任公司, 2015.
- [18] 丁保军. 基于BN的地铁施工及盾构刀盘失效风险研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [19] 王占生, 张佳莉, 杜江涛. 地铁车站基坑变形规律分析: 以苏州地区为例[J]. 土工基础, 2021, 35(1): 1-5. (WANG Zhansheng, ZHANG Jiali, DU Jiangtao. Ground deformation during the deep excavation of Suzhou metro stations [J]. Soil Engineering and Foundation, 2021, 35(1): 1-5. (in Chinese))
- [20] 周红波, 姚浩, 卢剑华. 上海某轨道交通深基坑工程施工风险评估[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊1): 1902-1906. (ZHOU Hongbo, YAO Hao, LU Jianhua. Construction risk assessment on deep foundation pits of a metro line in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(Sup1): 1902-1906. (in Chinese))
- [21] 夏元友, 陈春舒, 陈金培, 等. 基于现场监测的深基坑施工动态风险评估[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1378-1384. (XIA Yuanyou, CHEN Chunshu, CHEN Jinpei, et al. Dynamic risk assessment of deep foundation pit construction based on field monitoring[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(5): 1378-1384. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-11-28 编辑: 熊水斌)