

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.102



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 基于贝叶斯网络的深基坑承压水风险分析评价

马海洋<sup>1</sup>, 童立元<sup>1</sup>, 方若全<sup>2</sup>, 苏昂<sup>2</sup>, 吴烁<sup>3,4</sup>, 白坤<sup>3,4</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 南京 211189; 2. 江苏省交通工程建设局, 南京 210004; 3. 中铁十四局集团有限公司, 济南 250101; 4. 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 南京 211800)

**摘要:** 针对目前深基坑承压水风险分析中分析方法单一、事前风险评估理论不足、施工全过程动态风险预测缺乏等问题, 提出基于贝叶斯网络(Bayesian network, 简称 BN)的深基坑承压水风险分析方法, 实现承压水风险事故的事前分析和施工全过程的动态风险评价。该方法从环境、设计、施工、管理等方面建立深基坑承压水风险评价指标体系, 构建静态 BN 风险分析模型, 完成了风险概率预测、事故因素诊断、致灾因子识别等事前风险评估内容; 在此基础上, 通过设定风险转移节点和观测节点, 引入 Noisy-Max 假设, 实现基于监测数据的动态 BN 施工全过程承压水动态风险分析预测; 以江阴靖江长江隧道江北深基坑工程为例, 分析确定工程的承压水风险等级, 进一步明确相关风险因素, 准确预测出该工程的动态风险变化。结果表明, 该风险分析方法具有较高的适用性和合理性, 能为深基坑施工安全提供切实的指导和帮助。

**关键词:** 贝叶斯网络; 承压水; 条件概率; 事前评估; 动态风险

中图分类号: TU46 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)06-0080-09

## Confined water risk analysis and evaluation in deep foundation pit based on Bayesian network

MA Haiyang<sup>1</sup>, TONG Liyuan<sup>1</sup>, FANG Ruoquan<sup>2</sup>, SU Ang<sup>2</sup>, WU Shuo<sup>3,4</sup>, BAI Kun<sup>3,4</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China; 2. Jiangsu Transportation Engineering Construction Bureau, Nanjing 210004, P. R. China; 3. China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd., Jinan 250101, P. R. China; 4. China Railway 14th Bureau Group Big Shield Engineering Co., Ltd., Nanjing 211800, P. R. China)

**Abstract:** In view of the existing problems of confined water risk analysis of deep foundation pit, such as single analysis method, insufficient risk prior assessment theory and lack of dynamic risk prediction during the construction process, this paper proposed a confined water risk analysis method of deep foundation pit based on Bayesian network (BN) to realize the pre-analysis of confined water risk accidents and the dynamic risk evaluation of the whole construction process. From aspects of environment, design, construction and management, the method established a risk evaluation index system of confined water of deep foundation pit,

收稿日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(51878157、52178384); 江苏省交通工程建设局项目(2021QD05)

作者简介: 马海洋(1998-), 男, 主要从事深基坑风险事故研究, E-mail: 2089476022@qq.com.

童立元(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: 101010519@seu.edu.cn.

Received: 2022-05-23

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (Nos. 51878157, 52178384); Project of Jiangsu Provincial Traffic Engineering Construction Bureau (No. 2021QD05)

**Author brief:** MA Haiyang (1998-), main research interest: deep foundation pit risk accident, E-mail: 2089476022@qq.com.

TONG Liyuan (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: 101010519@seu.edu.cn.

constructed static BN risk analysis model, and completed the risk probability prediction, accident factor diagnosis, disaster factor identification and other risk assessment contents in advance. On this basis, the dynamic risk analysis of confined water in the whole construction process based on monitoring data was realized by setting risk transfer nodes and observation nodes and introducing Noisy-Max hypothesis. Finally, taking the north deep foundation pit of Jingjiang Yangtze River tunnel project in Jiangyin as an example, the risk level of confined water in the project was analyzed, the related risk factors were further defined, and the dynamic risk change was accurately predicted. Results show that the proposed method has high applicability and can provide practical guidance for the safety of deep foundation pit construction.

**Keywords:** Bayesian network; confined water; conditional probability; prior assessment; dynamic risk

城市大规模地下空间开发经常涉及复杂的地下水灾害问题,深基坑承压水风险具有客观性、必然性、多样性、动态性、模糊性等特点<sup>[1]</sup>,针对深基坑承压水风险分析及事故的动态预测评价,可为深基坑工程的施工安全提供技术支撑。

近年来,诸多学者针对承压水风险开展了大量研究,常见的分析方法包括层次分析法<sup>[2]</sup>、故障树法<sup>[3]</sup>、模糊综合评价法<sup>[4]</sup>、灾害链演化法<sup>[5]</sup>等。Font-Capó等<sup>[6]</sup>利用数值模拟软件分析了承压水与隧道的相互作用,预测出承压水水位变化及隧道渗漏风险程度;Heidarzadeh等<sup>[7]</sup>从事故原因角度分析了承压水风险,并提出了减压降水的新技术。但上述方法存在专业基础要求较高、缺乏反向推理、敏感性分析等问题。此外,现有分析多为事前风险分析,无法表征不同工况和不同施工阶段下风险事故的动态变化。基于图论和概率论的贝叶斯网络(Bayesian network,简称BN)具有较好的节点关系表达和双向因果推理能力,且考虑时间因素后可将其扩展为动态贝叶斯网络(dynamic Bayesian network,简称DBN),能较好地表达风险的非线性、时序性和不确定性等特点。Zhang等<sup>[8]</sup>针对基坑坍塌问题,提出了基于模糊BN和模糊层次的综合评价分析法;Badr等<sup>[9]</sup>将马尔科夫链与BN模型相结合,实现了水坝破坏的动态风险评估;陈舞等<sup>[10]</sup>将模糊数学、故障树法等与BN理论相结合,实现了BN正反向推理与敏感性分析等理论在隧道坍塌方面的运用;Shafiee Neyestanak等<sup>[11]</sup>利用混合贝叶斯网络从农业、景观、工业等方面预测了废水的风险概率;卢鑫月等<sup>[12]</sup>建构了针对盾构下穿既有建筑物诱发建筑物安全风险的动态风险概率评估模型。然而,BN风险分析方法在深基坑承压水风险方面应用未见相关论文报道,基于BN的深基坑承压水风险分析方法有待进一步提出;此外,DBN模型转移矩阵的确定主观性较大,且缺乏基于监测数据的DBN施工全过程动态风险分析研究。

基于现有研究不足,笔者提出基于BN的深基

坑承压水风险分析评价方法,并结合江阴靖江长江隧道江北深基坑工程案例,构建相应的静态BN模型,开展承压水风险的事前风险预测、敏感性分析和事故因素诊断。进一步考虑时间因素,将地面沉降值和水头差设为风险观测节点,建立动态BN模型,实现了基于监测数据的全过程动态风险分析。

## 1 贝叶斯网络分析模型

### 1.1 静态贝叶斯网络

静态贝叶斯网络(static Bayesian networks,简称SBN)是一种有向无环图(directed acyclic graph,简称DAG)的概率分析模型<sup>[13]</sup>,其主要由两部分组成,一部分是有向无环图,由各风险节点与代表其相互影响关系的有向连接箭头组成;另一部分是条件概率表,主要用于表达各风险节点与其对应父节点之间的影响关系。

### 1.2 动态贝叶斯网络

动态贝叶斯网络是在SBN的基础上考虑了时间因素,可描述事故风险在不同时间节点下的变化情况。DBN模型由初始网络模型和转移概率表组成<sup>[14]</sup>,如图1所示。模型中每一时间点下风险节点的联合概率不仅仅与当前节点状态有关,还与父节点状态和历史节点状态有关,因此,DBN模型具有极高的复杂性。为简化计算,在实际建模过程中一般采用马尔可夫假设和转移概率不变假设<sup>[15-16]</sup>。

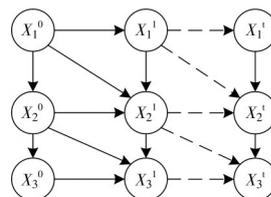


图1 DBN模型示意图

Fig. 1 Diagram of DBN model

### 1.3 条件概率表的确定

SBN模型的条件概率表可通过专家调查或数据驱动确定,后者需要大量的样本数据进行学习建模<sup>[17]</sup>,对于深基坑承压水风险领域,很难对风险节点

的指标参数进行定量化确定,且极度缺乏相关样本数据,因此,采用专家调查法确定其条件概率表。

对于SBN模型,若风险节点 $X$ 有 $m$ 个状态,有 $n$ 个父节点,则 $X$ 的条件概率表有 $m^n$ 项,该情况下工作量巨大,难以操作。为简化计算,在BN建模过程中,将各个风险节点仅设为Good和Bad两种状态,其中,Good代表该风险因素发生风险的可能性较小;Bad代表该风险因素发生风险的可能性较大。引入Noisy-OR gate<sup>[18]</sup>模型假设,仅需确定每个父节点与子节点的连接概率 $p_i$ ,即可得出其对应的条件概率表,计算如式(1)所示, $X_T$ 表示事件 $X$ 发生。

$$P(Y|X_1 \cdots X_n) = 1 - \prod_{i: X_i \in X_T} (1 - p_i) \quad (1)$$

式中: $X_1 \cdots X_n$ 为引起结果 $Y$ 的 $n$ 个原因; $P(Y|X)$ 为事件 $X$ 已发生的条件下,事件 $Y$ 发生的概率; $X_T$ 为所有状态为真值的原因 $X_i$ 构成的集合为 $X_T$ 。

由式(1)可知,若所有父节点风险均不发生,则子节点不发生风险。然而,在实际工程中,总会存在部分被忽略的风险因素,而这些风险因素或多或少会对SBN模型中风险节点产生影响,与式(1)推论矛盾,因此,需要进行人为数据修正。此外,Noisy-OR gate模型仅可计算二元变量,Noisy-Max模型<sup>[19]</sup>是在其基础上的推广,能够进行多元变量条件概率的计算。Noisy-Max假设:节点变量 $X$ 、 $Y$ 必须是顺序变量,且各影响因素之间相互独立。引入上述假设,风险事件的条件概率可由式(2)、式(3)计算确定。

$$P(Y \leq y|X) = \prod_i \left[ \sum_{Y \leq y} P(Y = y|X = x_i) \right] \quad (2)$$

$$P(Y|X) = \begin{cases} P(Y \leq y|X) - P(Y \leq y - 1|X), & y \neq y_{\min} \\ P(Y \leq y|X), & y = y_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P(Y|X)$ 为变量 $Y$ 已发生的条件下变量 $X$ 发生的概率; $y$ 、 $x_i$ 分别为变量 $Y$ 、 $X$ 的取值。

## 2 基于BN的深基坑承压水风险分析

### 2.1 深基坑承压水风险因素识别

深基坑施工承压水风险受环境、设计、施工、管理等多方面影响,各个风险又包含诸多风险因素,如环境风险方面包括地层条件、水文条件、勘察质量等风险因素。结合诸多文献资料及相关基坑案例<sup>[20-22]</sup>,选取风险影响较大的13个风险因素指标,建立如图2所示的风险评价指标体系。

深基坑承压水风险等级划分由风险损失和风

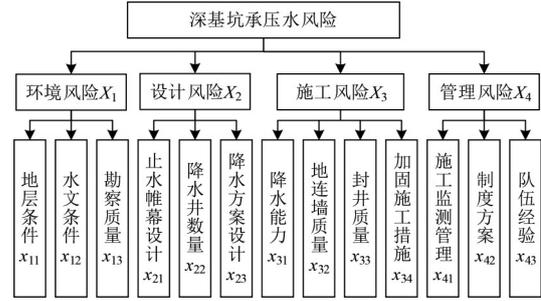


图2 承压水风险评价指标体系

Fig. 2 Confined water risk assessment index system

险概率综合确定,依据《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》(GB 50652—2011)<sup>[23]</sup>,划分结果如表1所示。在实际施工过程中,当风险概率极低,风险损失极小时,一般不考虑该风险,风险等级可设为V级。风险等级从I级到V级代表风险逐渐减小,当风险等级为I级时,代表风险损失程度最大,风险发生概率最高,即风险程度最高。

表1 承压水风险等级划分

Table 1 Classification of confined water risk

概率	风险等级				
	1级	2级	3级	4级	5级
1级	I级	I级	I级	II级	III级
2级	I级	I级	II级	III级	III级
3级	I级	II级	III级	III级	IV级
4级	II级	III级	III级	IV级	IV级
5级	III级	III级	IV级	IV级	V级

### 2.2 SBN模型的构建

SBN模型的初始网络结构可依据深基坑承压水风险评价指标体系确定。专家调查法对于难以定量分析的风险事故能够给出较好的定性判断,但当比较因素过多或因素差距对比较小时,专家调查法会出现一定误差。针对该问题,条件概率表不再由专家直接给出,仅需对某因素可能造成的风险事故进行定性判断即可,根据调查结果确定连接概率并计算得出条件概率表。以环境风险 $X_1$ 为例,介绍专家调查法得到条件概率表的方法。

专家学者知识水平和经验能力的差异会一定程度上影响其打分结果的可参考性,参考标准如表2所示。共邀请14位专家打分,水文条件方面打分结果如表3所示,各个风险因素的连接概率 $p_i$ 可通过式(4)确定。

$$p_i = \frac{\sum_{k=1}^{14} \omega_k \cdot r_k}{\sum_{k=1}^{14} \omega_k} \quad (4)$$

式中: $\omega_k$ 、 $r_k$ 分别为第 $k$ 位专家的打分系数、打分结果。

经计算可知,水文条件的连接概率, $p_{12}=0.614$ ,同理可计算出地层条件和勘察质量的连接

表 2 专家打分的可参考性

Table 2 The reference-ability of experts score

分级	专家等级说明	参考系数	邀请人数
1级	承压水风险领域知名专家学者	1.0	5
2级	长期从事该领域施工和研究的技术人员	0.8	6
3级	从事该领域施工和研究的技术人员	0.6	7

表 3 水文条件专家打分结果

Table 3 Hydrologic condition expert score results

分 级	打 分						
	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6	专家 7
1级	1	0	1	1	0		
2级	1	1	0	0	1	1	
3级	0	1	0	1	1	0	1

注:表中1代表水文条件不佳会导致环境风险;0代表水文条件不佳不会导致环境风险。

概率,  $p_{11}=0.314$ 、 $p_{13}=0.443$ 。因此,通过式(1)即可计算环境风险  $X_1$  的条件概率,汇总于表 4。设计风险  $X_2$ 、施工风险  $X_3$ 、管理风险  $X_4$  的条件概率可见表 5~表 7。专家调查法的优化能够较大程度上确保计算的准确性,但笔者仍对结果进行进一步的对比分析验证。

表 4 环境风险  $X_1$  的条件概率表

Table 4 Conditional probability table for environmental risk  $X_1$

$x_{11}$	$x_{12}$	$x_{13}$	$X_1=Bad$	$X_1=Good$
Bad	Bad	Bad	0.852 6	0.147 4
Bad	Bad	Good	0.735 5	0.264 5
Bad	Good	Bad	0.618 0	0.382 0
Bad	Good	Good	0.314 3	0.685 7
Good	Bad	Bad	0.785 1	0.214 9
Good	Bad	Good	0.614 3	0.385 7
Good	Good	Bad	0.442 9	0.557 1
Good	Good	Good	0.050 0	0.950 0

表 5 设计风险  $X_2$  的条件概率表

Table 5 Conditional probability table for design risk  $X_2$

$x_{21}$	$x_{22}$	$x_{23}$	$X_2=Bad$	$X_2=Good$
Bad	Bad	Bad	0.868 0	0.132 0
Bad	Bad	Good	0.785 1	0.214 9
Bad	Good	Bad	0.763 1	0.236 9
Bad	Good	Good	0.614 3	0.385 7
Good	Bad	Bad	0.657 8	0.342 2
Good	Bad	Good	0.442 9	0.557 1
Good	Good	Bad	0.385 7	0.614 3
Good	Good	Good	0.050 0	0.950 0

周红波等<sup>[20]</sup>、刘军等<sup>[24]</sup>对环境方面的风险因素进行了定性排序,影响因素从大到小为水文、勘察、地层;周念清等<sup>[25]</sup>定性排序为水文第一,勘察和地层

表 6 施工风险  $X_3$  的条件概率表

Table 6 Conditional probability table for construction risk  $X_3$

$x_{31}$	$x_{32}$	$x_{33}$	$x_{34}$	$X_3=Bad$	$X_3=Good$
Bad	Bad	Bad	Bad	0.966 4	0.033 6
Bad	Bad	Bad	Good	0.934 7	0.065 3
Bad	Bad	Good	Bad	0.938 2	0.061 8
Bad	Bad	Good	Good	0.879 8	0.120 2
Bad	Good	Bad	Bad	0.876 4	0.123 6
Bad	Good	Bad	Good	0.759 6	0.240 4
Bad	Good	Good	Bad	0.772 2	0.227 8
Bad	Good	Good	Good	0.557 1	0.442 9
Good	Bad	Bad	Bad	0.924 2	0.075 8
Good	Bad	Bad	Good	0.852 7	0.147 3
Good	Bad	Good	Bad	0.860 4	0.139 6
Good	Bad	Good	Good	0.728 6	0.271 4
Good	Good	Bad	Bad	0.720 8	0.279 2
Good	Good	Bad	Good	0.457 1	0.542 9
Good	Good	Good	Bad	0.485 7	0.514 3
Good	Good	Good	Good	0.050 0	0.950 0

表 7 管理风险  $X_4$  的条件概率表

Table 7 Conditional probability table for management risk  $X_4$

$x_{41}$	$x_{42}$	$x_{43}$	$X_4=Bad$	$X_4=Good$
Bad	Bad	Bad	0.806 0	0.194 0
Bad	Bad	Good	0.698 2	0.301 8
Bad	Good	Bad	0.733 7	0.266 3
Bad	Good	Good	0.585 7	0.414 3
Good	Bad	Bad	0.531 6	0.468 4
Good	Bad	Good	0.271 4	0.728 6
Good	Good	Bad	0.357 1	0.642 9
Good	Good	Good	0.050 0	0.950 0

并列第二。本文水文、勘察、地层影响因素的权重分别为 0.448、0.323、0.229,能够对风险事故进行较好的定量分析评价,且定性排序与诸多工程案例均一致,有较高的准确性和可靠度。

### 2.3 基于 SBN 模型的事前风险评估

SBN 模型主要基于图论和概率论等相关理论,图论能够较好地表达各风险节点之间的逻辑关系与风险事故的并发性,概率论能够为 SBN 模型提供较好的理论计算依据和定量分析标准,针对深基坑承压水所建立的 SBN 风险分析模型,可进行承压水风险的事前风险预测、敏感性分析和事故因素诊断。

风险事故是由诸多风险因素联合导致的,通过全概率公式可进行风险发生概率的预测,如式(5)所示;在确定事件 A 与事件 B 的联合概率后,可计算事件 B 条件下事件 A 发生的概率,即可通过条件概率公式进行承压水风险的敏感性分析,从而确定风

险事故的关键致灾因子,如式(6)所示;贝叶斯公式表示了先验概率和后验概率之间的关系,即可通过SBN反向推理确定后验概率,从而进行风险事故的因素诊断,如式(7)所示。

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A|B_i)P(B_i) \quad (5)$$

$$P(A|B) = \frac{P(AB)}{P(B)} \quad (6)$$

$$P(H=h|E=e) = \frac{P(H=h)P(E=e|H=h)}{P(E=e)} \quad (7)$$

式中: $P(A)$ 为事件 $A$ 发生的概率; $P(A, B)$ 为事件 $A$ 与事件 $B$ 的联合概率; $P(A|B)$ 为事件 $B$ 已发生的条件下,事件 $A$ 发生的概率; $B_i$ 为事件 $B$ 的不同情况, $B_i$ 所构成的集合为 $B$ 。

#### 2.4 基于DBN模型的动态风险分析

以建立的SBN模型作为初始网络,将承压水风险 $P$ 设为转移节点,对于深基坑承压水工程而言,其转移矩阵可直接通过专家经验确定<sup>[15]</sup>,但该方法人为判断的因素占比过高,存在较大的主观性,且缺乏基于监测数据的实时动态分析。鉴于此,选取地面沉降 $S$ (mm)和水头差 $H$ (m)的监测数据作为风险观测节点,地面沉降指基坑外某沉降监测点的地面沉降变形累计值 $S$ ,水头差指基坑开挖面至坑内地下水位的距离 $H$ ,基于监测数据的DBN动态风险分析模型如图3所示。此外,考虑了Noisy-Max假设,转移矩阵可由式(2)、式(3)确定,专家打分仅需对风险概念进行定性的评价,优化了专家经验法在DBN模型中的应用。

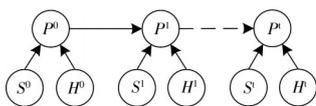


图3 基于监测数据的DBN动态风险分析

Fig. 3 DBN dynamic risk analysis based on monitoring data

DBN风险分析模型无法对数据本身进行分析,需要对监测数据进行离散化处理,将数据离散为不同的风险状态等级及风险概率,并将其输入DBN模型,从而进行承压水动态风险分析。针对不同的深基坑工程,由于其开挖规模、周围环境、水文地质条件不同,地面沉降 $S$ 和水头差 $H$ 风险等级的划分均不同,表8是江阴靖江长江隧道江北深基坑工程的地面沉降 $S$ 和水头差 $H$ 的风险等级划分。

#### 2.5 BN风险分析方法的可靠性评价

针对深基坑承压水风险问题,提出了基于BN的风险分析方法,从风险识别、模型构建、事前评估和动态风险等方面对该方法进行了全面推导,确保

表8 监测数据的风险等级

Table 8 Risk level of monitoring data

风险等级	地面沉降 $S$	水头差 $H$
1级	$>120$ mm	$0 \leq H \leq 5$ m
2级	$60$ mm $< S \leq 120$ mm	$5$ m $< H \leq 10$ m
3级	$0 \leq S \leq 60$ mm	$10$ m $< H \leq 15$ m
4级		$15$ m $< H \leq 20$ m
5级		$>20$ m

了该方法的可靠性。为进一步说明本方法的有效性和优越性,对相关工程实例对比分析验证。

李浩然等<sup>[5]</sup>、卢鑫月等<sup>[12]</sup>、周红波等<sup>[20]</sup>、刘军等<sup>[24]</sup>利用灾害链演化法、模糊综合评价法、故障树法和层次分析法等对深基坑承压水风险进行了分析评价,包括风险识别、敏感性分析、最不利事件确定等内容,其动态风险分析的转移矩阵由专家直接给出。笔者提出的BN风险分析方法,其承压水二级风险排序为环境、设计、施工、管理,与诸多研究结果一致;在敏感性分析和事故诊断方面,给出了定量评价指标,较之前的定性评价更为准确;在动态风险分析方面,引入监测数据确保了模型预测的有效性和精确性,较之前的分析结果,消除了专家打分的主观性,其预测结果与实际风险规律一致,且离散性和波动性更小。因此,提出的基于BN的深基坑承压水风险分析方法在确保有效性的同时,较之前的方法有更好的优越性。

### 3 工程应用

#### 3.1 工程背景

江阴靖江长江隧道江北深基坑地层以素填土、粉砂夹粉土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土夹粉土、粉砂、粉细砂、粉质黏土、粉土为主。场地水文条件复杂,包括填土层潜水和3个承压含水层,第1、2层承压含水层与江水直接连通,第3层承压含水层渗透性和富水性好,补给通畅,水量丰富。工作井开挖深度29.4 m、宽度53.56 m、长度25.0 m,采用1200 mm地连墙作为围护结构,支撑包括4道钢筋混凝土支撑+1道钢支撑,地下5层为箱形框架结构。针对深基坑的多层承压水问题,坑内设置6口疏干井和8口降压井,并额外设置2口应急井兼观测井,坑外设置降水井8口。该项目地层剖面如图4所示。

项目工程水文地质条件复杂,存在多层承压含水层问题,有较高的环境风险。此外,该基坑紧邻长江且位于江漫滩软土地层,存在较大的设计难度和施工风险,通过增加地墙厚度、增设降水井、基坑加固、提高地墙施工质量等相关措施一定程度上降低了设计和施工方面的风险。在管理方面,项目由

基坑结构名称	深度/m	地层编号名称	厚度/m
第1道混凝土支撑	2.50	①素填土	2.50
第2道混凝土支撑			
第3道混凝土支撑	12.40	②淤泥质粉质黏土	9.90
第4道混凝土支撑	16.30	② <sub>2</sub> 粉质黏土夹粉土	3.90
	18.70	② <sub>1</sub> 粉砂	2.40
第5道钢支撑	23.60	② <sub>1</sub> 粉细砂	
基坑坑底	28.50	③ <sub>1</sub> 粉质黏土	4.90
	34.40	③ <sub>2</sub> 粉砂	5.90
	37.50	③ <sub>3</sub> 粉质黏土	3.10
	49.30	③ <sub>4</sub> 粉细砂	11.80
	52.40	④ <sub>1</sub> 粉质黏土	3.10
地连墙底端	62.10	④ <sub>2</sub> 粉细砂	9.70

图 4 江北深基坑工作井地层剖面

Fig. 4 Stratum profile of foundation pit working well in Jiangbei

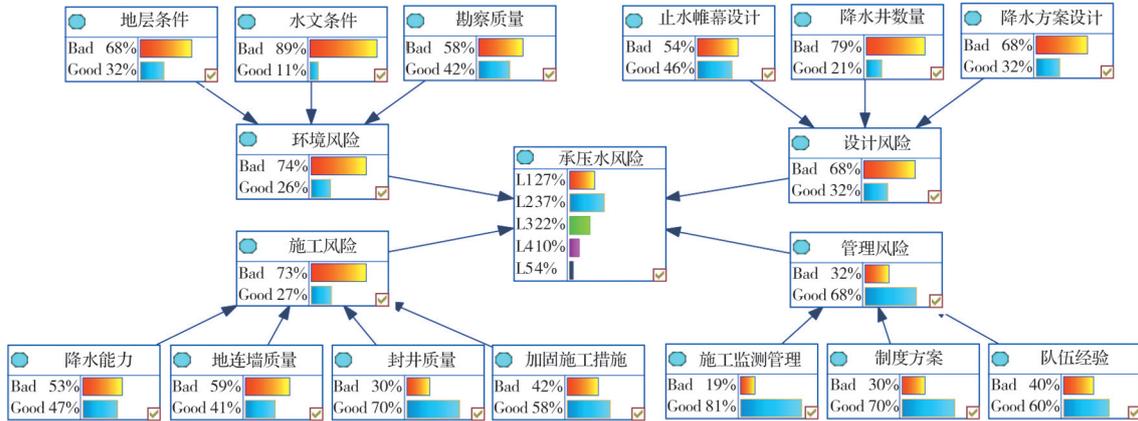


图 5 深基坑承压水风险分析和预测

Fig. 5 Confined water risk analysis and prediction in deep foundation pit

3.2.2 风险事故因素诊断

基于SBN模型的反向因果推理可实现深基坑承压水风险事故因素诊断,对于不同的SBN模型,其风险诊断结果不同,影响强度由条件概率表(表3)和贝叶斯公式(式(7))计算得出<sup>[26]</sup>。针对建立的模型,各风险因素对风险事故的影响强度如表9所示。结果表明:当发生承压水风险事故时,施工监测管理、水文条件、止水帷幕设计、地连墙质量、勘察质量为承压水事故诱因的概率较大。此外,若部分风险节点状态已知,也可将之输入SBN模型中,从而进一步精确事故诊断结果。

3.2.3 关键致灾因子确定

敏感性是指某些风险因素变量发生变化时,对其目标因素的影响程度,即通过敏感性分析可确定深基坑承压水风险的关键致灾因子,相关度由条件概率表(表3)和条件概率公式(式(6))计算得出<sup>[27]</sup>。对建立的SBN模型进行敏感性分析,各风险因素与

中铁第四勘察设计院集团有限公司、中铁大桥勘测设计院集团有限公司、中交公路规划设计院有限公司、中交隧道工程局有限公司、中铁十四局集团有限公司联合开展,各单位均有较丰富的工程项目经验,有较为完备的制度管理体系,管理风险较低。

3.2 事前风险分析评估

3.2.1 承压水风险概率预测

建立SBN承压水风险分析模型,以GeNIe软件作为研究工具,进行基于正向因果推理的承压水风险概率预测,其预测结果如图5所示,结果表明,该项目深基坑工作井承压水风险处于I级、II级、III级、IV级、V级的概率分别为27%、37%、22%、10%、4%,存在较大的施工风险。此外,建立的BN模型还可根据现场风险证据更新预测结果,即当某些风险因素节点状态已知时,可将之输入模型从而更新承压水风险概率预测结果。

表 9 风险事故因素诊断

Table 9 Risk accident factor diagnosis

风险因素	影响强度	排序	风险因素	影响强度	排序
$x_{11}$	0.157	11	$x_{32}$	0.301	4
$x_{12}$	0.391	2	$x_{33}$	0.152	12
$x_{13}$	0.246	5	$x_{34}$	0.166	10
$x_{21}$	0.374	3	$x_{41}$	0.403	1
$x_{22}$	0.235	6	$x_{42}$	0.145	13
$x_{23}$	0.196	9	$x_{43}$	0.206	7
$x_{31}$	0.201	8			

承压水风险的相关度如表10所示,相关度越大代表其风险因素的敏感性越高。结果表明:水文条件、地连墙质量、降水井数量、止水帷幕设计、队伍经验为影响深基坑承压水风险前五的风险因素,为本工程的关键致灾因子。

3.2.4 事前风险分析评估效果评价

施工单位本身也对该项目进行了风险评估,其评估方法为检查表法、软件验算法、工程类比法,即

表10 各风险因素的相关度  
Table 10 Correlation of risk factors

风险因素	相关度	排序	风险因素	相关度	排序
$x_{11}$	0.314	10	$x_{32}$	0.807	2
$x_{12}$	1.405	1	$x_{33}$	0.167	13
$x_{13}$	0.407	9	$x_{34}$	0.267	12
$x_{21}$	0.648	4	$x_{41}$	0.456	7
$x_{22}$	0.687	3	$x_{42}$	0.295	11
$x_{23}$	0.459	6	$x_{43}$	0.569	5
$x_{31}$	0.444	8			

通过检查表对风险源进行识别分析,利用相关设计软件验证围护结构及基坑安全,采用工程类比法确定承压水风险等级。施工单位所确定的承压水风险等级为Ⅱ级,并根据调查表确定了10余种风险因素,包括地连墙渗漏水、勘察孔管涌、降水井堵塞、基坑坑底隆起等。

基于SBN的承压水风险概率预测结果与其一

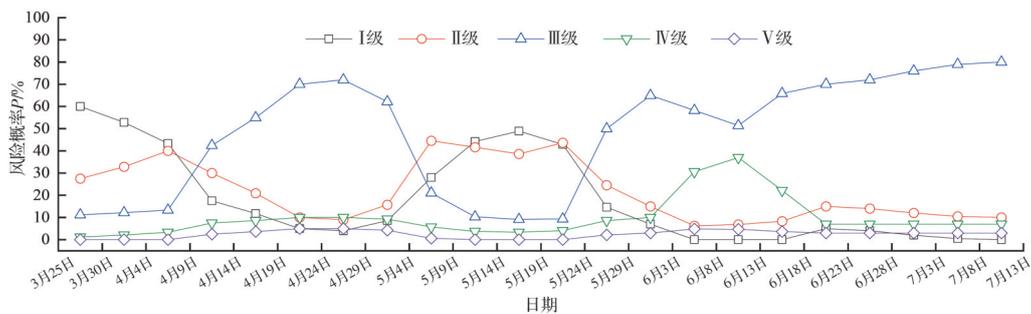


图6 施工全过程承压水动态风险分析

Fig. 6 Confined water dynamic risk analysis during construction

基坑施工全过程动态分析计算量较大,以第12、13个时间节点,即5月19日至5月23日和5月24日至5月29日两个时间段进行示例分析计算。第12、13个时间节点内平均地面沉降 $S$ 分别为76.8、88.2 mm,水头差 $H$ 分别为5.65、11.3 m,监测数据离散化结果如表11所示。根据转移矩阵和全概率公式(式(5))即可计算其动态风险概率。第12个时间节点Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级风险概率分别为42.9%、43.7%、9.3%、4.1%、0,第13个时间节点风险概率分别为14.6%、24.5%、50%、8.6%、2.2%。

3月25日前,承压水初始风险等级较高,Ⅰ、Ⅱ

表11 监测数据离散化结果

Table 11 Discretized results of monitoring data

节点	离散化结果/%				
	1级	2级	3级	4级	5级
12(S)	0	78	22		
12(H)	37	63	0	0	0
13(S)	0	97	3		
13(H)	0	24	76	0	0

致,在确保预测结果有效性的基础上,预测结果更为全面精确。此外,本文不仅仅给出本项目需注意的风险因素,也通过分析进一步明确了各风险因素在风险事故诊断和致灾因子确定中的影响程度。在实际施工过程中,施工单位以笔者的分析评估为基础,进一步完善了承压水风险分析报告,绘制了承压水风险清单,并根据其重要度排序提出了相关的设计控制措施。

### 3.3 动态风险分析

建立DBN风险分析模型,实现基于监测数据的承压水动态风险分析。江北深基坑工作井从2021年3月25日开始开挖施工,于当年7月13日施工完毕,模型以5 d为一个时间节点,共设22个时间步长,将基坑施工全过程的监测数据进行离散化处理,风险状态等级及风险概率划分依据如表8所示,DBN模型风险分析结果如图6所示。

级风险概率分别为60%、27%,这是由于基坑水文地质条件的复杂性导致承压水风险较高,后开始基坑降水开挖施工,承压水风险不断降低。工作井于4月25日因降水井封井质量问题发生管涌,加强了坑内外降水,承压水风险降低,4月底承压水Ⅲ级风险概率为72%。由于坑内外的大幅度降水,引起了较大程度的地面沉降,且抢险结束后部分降水井暂停工作,因此承压水风险再次上升。6月15日,工作井开始封底浇筑工作,为确保封底质量和基坑安全,控制周围地面沉降,采取了坑内降水、坑外回灌的联合降水方案,承压水风险大幅度降低,承压水Ⅲ、Ⅳ级风险概率分别为52%、37%。工作井封底结束后,逐步暂停降水工作,江北深基坑承压水风险趋于稳定,承压水Ⅲ级风险概率约为80%。

## 4 结论

提出基于贝叶斯网络的深基坑承压水风险分析方法,实现了事故的事前分析和施工全过程的动态风险评价,并以江阴靖江长江隧道江北深基坑工

程为案例进行分析。主要结论如下:

1)从环境、设计、施工、管理等方面建立了深基坑承压水风险评价指标体系,构建了SBN风险分析模型,可对承压水风险概率、风险事故诊断、致灾因子确定等内容进行分析评估。

2)设定风险转移节点和观测节点,引入Noisy-Max假设优化专家经验法,构建基于监测数据的DBN动态风险分析模型,能够较为准确地预测施工全过程中承压水风险的动态变化。

3)对江北深基坑承压水进行风险分析,得出其承压水风险概率较大,并指出可能的风险事故诱因,动态风险预测结果与实际施工情况基本一致,能够为深基坑承压水施工提供切实的风险指导。

### 参考文献

- [1] 王军玺, 吴伟雄, 李琼, 等. 承压水基坑突涌的水力劈裂[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(4): 105-111.  
WANG J X, WU W X, LI Q, et al. Burst in foundation pit on confined water using hydro-fracturing [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(4): 105-111. (in Chinese)
- [2] LI Q, SUI W H. Risk evaluation of mine-water inrush based on principal component logistic regression analysis and an improved analytic hierarchy process [J]. Hydrogeology Journal, 2021, 29(3): 1299-1311.
- [3] GACHLOU M, ROOZBAHANI A, BANIHABIB M E. Comprehensive risk assessment of river basins using Fault Tree Analysis [J]. Journal of Hydrology, 2019, 577: 123974.
- [4] 白凡, 杨娜, 常鹏, 等. 基于模糊层次法的藏式砌体劣化风险权重系数试验标定研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(2): 158-164.  
BAI F, YANG N, CHANG P, et al. Experimental calibration of risk weight coefficient of Tibetan masonry based on fuzzy analytic hierarchy method [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2): 158-164. (in Chinese)
- [5] 李浩然, 欧阳作林, 姜军, 等. 城市轨道交通灾害链演化网络模型及其风险分析: 以地铁水灾为例[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(2): 153-157.  
LI H R, OUYANG Z L, JIANG J, et al. Urban rail transit disaster chain evolution network model and its risk analysis: Taking subway flood as an example [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(2): 153-157. (in Chinese)
- [6] FONT-CAPÓ J, VÁZQUEZ-SUÑÉ E, CARRERA J, et al. Groundwater inflow prediction in urban tunneling with a tunnel boring machine (TBM) [J]. Engineering Geology, 2011, 121(1/2): 46-54.
- [7] HEIDARZADEH M, MIRGHASEMI A, NIROOMAND H. Construction of relief wells under artesian flow conditions at dam toes: Engineering experiences from Karkheh earth dam, Iran [J]. International Journal of Civil Engineering, 2015, 13: 73-80.
- [8] ZHANG G H, WANG C T, JIAO Y Y, et al. Collapse risk analysis of deep foundation pits in metro stations using a fuzzy Bayesian network and a fuzzy AHP [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 4214379.
- [9] BADR A, YOSRI A, HASSINI S, et al. Coupled continuous-time Markov chain-Bayesian network model for dam failure risk prediction [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2021, 27(4): 4021041.
- [10] 陈舞, 王浩, 张国华, 等. 基于T-S模糊故障树和贝叶斯网络的隧道坍塌易发性评价[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(8): 820-830.  
CHEN W, WANG H, ZHANG G H, et al. Evaluation of tunnel collapse susceptibility based on T-S fuzzy fault tree and Bayesian network [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2020, 54(8): 820-830. (in Chinese)
- [11] SHAFIEE NEYESTANAK J, ROOZBAHANI A. Comprehensive risk assessment of urban wastewater reuse in water supply alternatives using hybrid Bayesian network model [J]. Water Resources Management, 2021, 35(14): 5049-5072.
- [12] 卢鑫月, 许成顺, 侯本伟, 等. 基于动态贝叶斯网络的地铁隧道施工风险评估[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(3): 492-501.  
LU X Y, XU C S, HOU B W, et al. Risk assessment of metro construction based on dynamic Bayesian network [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(3): 492-501. (in Chinese)
- [13] PEARL J F. Propagation, and structuring in belief networks [J]. Artificial Intelligence, 1986, 29(3): 241-288.
- [14] MURPHY K P. Dynamic Bayesian networks: Representation, inference and learning [D]. University of California, Berkeley, 2002.
- [15] ESMAEIL ZADEH SOUDJANI S, ABATE A, MAJUMDAR R. Dynamic Bayesian networks for formal verification of structured stochastic processes [J]. Acta Informatica, 2017, 54(2): 217-242.
- [16] BRAMERET P A, RAUZY A, ROUSSEL J M. Automated generation of partial Markov chain from high level descriptions [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 139: 179-187.
- [17] MENG G W, LIU J L, QIU W X, et al. A failure probability evaluation method for the collapse of drill-blast tunnels based on a multistate cloud Bayesian network [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 856701.
- [18] FENG X, JIANG J C, WANG W F. Gas pipeline

- failure evaluation method based on a Noisy-OR gate Bayesian network [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 66: 104175.
- [19] ZAGORECKI A, DRUZDZEL M J. Knowledge engineering for Bayesian networks: How common are noisy-MAX distributions in practice? [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2013, 43(1): 186-195.
- [20] 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 H B, CAI L B. 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)
- [21] WANG J X, LIU X T, LIU J X, et al. Dewatering of a 32.55 m deep foundation pit in MAMA under leakage risk conditions [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(8): 2784-2801.
- [22] 张世民, 景峰卫, 黄英省, 等. 基坑开挖及降水对坑外地表沉降的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(5): 43-49. ZHANG S M, JING F W, HUANG Y S, et al. The influence of foundation pit excavation and dewatering to ground surface settlement [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(5): 43-49. (in Chinese)
- [23] 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范: GB 50652—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Code for risk management of underground works in urban rail transit: GB 50652—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [24] 刘军, 潘延平. 轨道交通工程承压水风险控制指南[M]. 上海: 同济大学出版社, 2008. LIU J, PAN Y P. Guide to confined water risk control in rail transit engineering [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2008. (in Chinese)
- [25] 周念清, 魏诚寅, 娄荣祥, 等. 基于模糊数学理论探讨评判地铁工程中地下水风险[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(11): 1629-1633. ZHOU N Q, WEI C Y, LOU R X, et al. Groundwater risk assessment of metro project based on fuzzy mathematical method [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(11): 1629-1633. (in Chinese)
- [26] 丁保军. 基于BN的地铁施工及盾构刀盘失效风险研究[D]. 华中科技大学, 2015. DING B J. Study on the risk management of subway construction and shield cutter head failure based on Bayesian network [D]. Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [27] CASTILLO E, GUTIERREZ J M, HADI A S. Sensitivity analysis in discrete Bayesian networks [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 1997, 27(4): 412-423.

(编辑 王秀玲)