

劲性水泥土搅拌桩地下连续墙贝叶斯网络分析

王红卫^{1,2}, 周 健^{1,2}, 贾敏才^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 分别分析了事件树、故障树和贝叶斯网络的优点和缺点, 总结了三者联合应用的必要性, 进而改善了贝叶斯网络的构造方法。方法是先将事件树的输出事件和序列事件分别作为故障树的顶事件和中间事件建造系统的故障树, 再将故障树转化为系统的贝叶斯网络, 然后利用贝叶斯网络的计算优势进行分析; 建议贝叶斯网络中的任一非根节点事件出现失效时应按后验概率从大到小的次序对相应根节点事件进行控制。采用文中方法分析了 SMW (soil-cement mixing wall) 深基坑工程的基坑事故发生概率和造成事故的主要基本事件, 证明了该方法的实用性。

关键词: 贝叶斯网络; 事件树; 故障树; 失效概率; 基坑工程

中图分类号: TU473

文献标识码: A

Bayesian Networks Analysis on Soil-cement Mixing Wall

WANG Hongwei^{1,2}, ZHOU Jian^{1,2}, JIA Mincai^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on an analysis of the advantages and the disadvantages of event trees (ET), fault trees (FT) and Bayesian networks (BN) respectively, a conclusion is drawn that the three methods should be applied jointly, and the way to construct a BN is improved. This way consists of three steps. First, the FT whose top event and middle events are the output event and the event sequence of the ET respectively is built. Then, the constructed FT is transformed into a BN directly. Finally, with the advantages of the calculation and analysis, the BN is used to make predictions as well as diagnostics. When there is any failure in the non-root node event in BN, the corresponding root node events should

be controlled by the descending order of their posterior probability values. By applying the proposed method to the soil-cement mixing wall in a deep excavation, the failure probability of the top event and the main cause are figured out easily and the practicability of this method is proved.

Key words: Bayesian networks; event trees; fault trees; failure probability; excavation engineering

基于概率推理的贝叶斯网络 (Bayesian networks, BN) 起源于人工智能领域的研究, 对于解决复杂系统不确定性因素引起的故障有很大的优势, 在 1986 年由 Pearl 提出后, 已经成为当前的研究热点^[1]。Weber P 等在分析了近 10 年 7000 多篇有关 BN 的参考文献后总结出 BN 在可靠度、风险分析等方面的应用呈现增长的趋势^[2]。近年来, BN 在土木工程领域中已有所应用, 文献[3]采用 BN 建立了评估钢筋混凝土碳化腐蚀的概率模型; Tang Z 等建立了关于机场建设项目管理的贝叶斯网络模型, 用于分析决策过程中的关键因素及其影响, 并指出在复杂项目建设管理中 BN 是极具潜力的工具^[4]。国内也有一些研究成果, 文献[5]利用 BN 建立了地铁系统关键因素的因果关系模型, 从而使得对地铁系统的安全风险分析变得简易有效; 周建方等在大坝风险评估中尝试用 BN 进行了分析^[6]; 周红波用 BN 对深基坑风险进行了模糊综合评估^[7]。总之, BN 在土木工程中的应用还比较少。

BN 具有推理说服性强、可在信息不完全或不确定情况下进行推理、具有很强的学习能力等优势, 但概率参数的确定和网络结构的构造往往妨碍了 BN 的应用, 文献[8]提出了由部分数据得到全部条件概率数据的方法, 却没有解决 BN 结构的构造问题。为

收稿日期: 2010-11-11

基金项目: 武汉轨道交通钟家村站及相邻区间关键技术研究 (WHRT-KY-201013)

第一作者: 王红卫 (1974—), 男, 工程师, 博士生, 主要研究方向为岩土工程风险管理。E-mail: whwang2001@sohu.com

通讯作者: 周 健 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土工程风险管理、软土地基处理技术等。

E-mail: tjuzj@vip.163.com

此,本文讨论了利用事件树分析法、故障树分析法联合构造 BN 结构的必要性和可行性,并采用联合构造的 BN 对某一基坑工程失效概率进行分析,证明了该法简单易行、效果较好。

1 事件树分析法与故障树分析法的结合

故障树分析法(FTA)、事件树分析法(ETA)具有逻辑性强、形象化等特点,因而得到广泛应用。FTA 是一种由果到因的演绎逻辑方法,应用 FTA 时选择顶事件是关键。基于经验和初步分析,常常把重要的失效、代表性的失效、高概率的失效或者是关键性的失效选为故障树的顶事件。但顶事件的确定受诸多因素的影响,如受主观意识的影响、忽略主要事件而把次要事件确定为顶事件等等。同样的问题也会发生在中间事件上,而且故障树一旦建造好就不易更改,不容易接受和处理新信息。ETA 是一种由因到果的归纳逻辑方法。ETA 的初始事件是系统的失效、运行模式的次序改变,后续事件是初始事件的限制性措施,事件序列因依靠系统的设计而确定。但在 ETA 中,事件序列的定量却是非常困难的。同时事件树、故障树具有逻辑性强、形象化等优点。

文献[9]讨论了两者的必要性和方法:将事件树的输出事件定为故障树的顶事件,将事件树的事件序列作为故障树的中间事件;利用 FTA 对顶事件和中间事件进行量化;再将量化结果作为事件树中相应序列事件的量化结果。FTA 和 ETA 的联合解决了故障树顶事件不易确定的难题,以事件树的事件序列作为故障树的中间事件,使得对系统的分析更具全面性,但故障树往往会遇到计算量指数增长的问题。

2 贝叶斯网络

2.1 BN 构造方法的改进

BN 的构造方法有 2 种,但经常是通过咨询专家进行手工构造。咨询专家构造网络结构的方法同样受到主观意识和经验的影响,构造结构时不同的变量顺序导致不同的网络结构,不同的网络结构表示了联合分布的不同分解^[10],大型系统 BN 的构造显得更加繁琐,所以有必要对其结构的构造方法进行改进。FTA 和 ETA 联合建立的故障树既符合系统的事件序列又对系统的分析更为全面,将该故障树

直接转化为 BN,使得 BN 避开了结构构造的障碍同时又具备了考虑周全的优点,这也说明了 FTA、ETA 和 BN 联合应用的必要性。

2.2 故障树逻辑关系向 BN 的转化

文献[11-13]讨论了故障树向 BN 转化的方法,包括事件、逻辑门与节点的映射关系、逻辑关系与条件概率分布之间的映射关系,其中文献[13]指出任一故障树都可直接转化为一个 BN。本文仅讨论正规故障树与 BN 之间的映射关系,如图 1 所示。

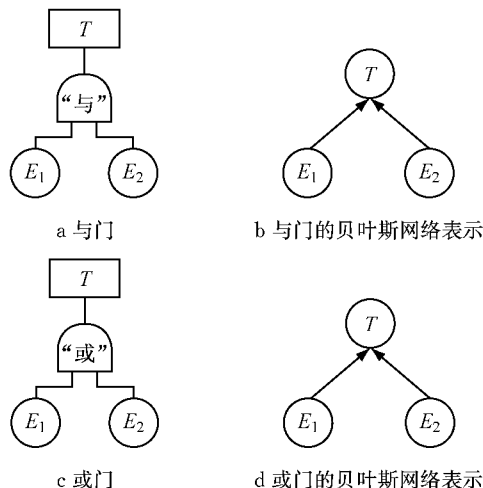


图1 故障树逻辑关系的贝叶斯网络表示

Fig.1 Logical relation of fault tree in Bayesian network

图 1 给出了“与”、“或”逻辑关系对应的 BN。逻辑与门转化为 BN 时对应的条件概率:
$$\begin{cases} P(T=1 | E_1=1, E_2=1) = 1 \\ P(T=1 | \text{其他}) = 0 \end{cases}$$
 ,逻辑或门转化为 BN 时对应的条件概率:
$$\begin{cases} P(T=1 | E_1=0, E_2=0) = 0 \\ P(T=1 | \text{其他}) = 1 \end{cases}$$
 .式中: P 为概率;变量 T 为顶事件, $T \in \{0,1\}$; 变量 $E_1, E_2 \in \{0,1\}$ 分别表示 2 个底事件。变量等于 1 时,表示相应事件发生;变量等于 0 时,表示相应事件不发生。

故障树向 BN 转化的算法如下:①对故障树中的每个底事件在 BN 中建立 1 个二态节点,并根据该事件进行命名,对于重复事件只建立 1 个节点;②对故障树中的逻辑门,在 BN 中建立 1 个相应的二态节点,并根据该逻辑门的输出事件进行命名,对于重复的输出事件只建立 1 个节点;③将输入事件对应的节点连接到其所在逻辑门对应的节点;④按照故障树中相应底事件的失效分布确定 BN 中根节点的先验概率分布;⑤按照故障树中逻辑关系确定 BN 中非根节点的条件概率分布。

2.3 顶事件发生概率求解

在故障树分析中,计算顶事件和中间事件发生概率首先要求解所有的最小割集或最小路集,然后利用容斥定理进行精确计算,或采用相斥近似或独立近似进行近似计算.在BN中,无须求解割集,利用联合概率分布可以直接计算顶事件的发生概

$$P(E_i = 1 | E_j = 1) = \frac{\sum_{E_1, \dots, E_{i-1}, E_{i+1}, \dots, E_{j-1}, E_j, \dots, E_M} P(E_k = e_k, E_i = 1, E_j = 1, 1 \leq k \leq M, k \neq i, k \neq j)}{P(E_j = 1)}$$

BN的优势在于可利用这些信息进行双向计算,既可以进行推理,又可以进行诊断,例如既可推算顶事件的发生概率,又可判断顶事件发生时的最大可能解释,也就是可找出顶事件发生后验概率最大的变量组合.可见由故障树转化得到BN避免了直接构造BN的难题,而且具有更强的建模分析能力.

3 工程实例

3.1 劲性水泥土搅拌桩地下连续墙事件树、故障树和BN的构造

本文研究对象是深基坑劲性水泥土搅拌桩地下连续墙(SMW)的风险事故情况,暂不考虑甲方、设计、监理和施工单位管理不善等更深层次的原因.编制深基坑SMW工法支护结构体系的事件树如图2

率: $P(T = 1) = \sum_{E_1, \dots, E_{M-1}} P(E_1 = e_1, \dots, E_{M-1} = e_{M-1}, T = 1)$, 节点变量 $E_i (1 \leq i \leq M-1)$ 对应故障树中的中间事件和底事件; M 为BN中节点的数目; $e_i \in \{0, 1\}$ 用来表征事件 E_i 发生与否.

此外,利用BN还能得到更加丰富的信息,比如在某事件 E_j 发生后,其他事件发生的后验概率为

所示.以事件树的输出事件即基坑事故作为故障树的顶事件,以事件树的序列事故即勘察失误、设计失误、施工失误、监理失误和监测失误分别为故障树的中间事件,建立深基坑SMW工法支护结构体系的故障树,如图3所示.按照上述转化算法,将故障树向BN转化,经过整合和修正后的SMW工法支护结构体系的BN如图4所示.

3.2 BN计算

利用Kevin Murphy等人编写的开放源代码MATLAB工具箱BNT(Bayes net toolbox)进行计算.基本事件发生概率的取值为参考文献[14]和专家问卷调查的结果,本文对7名教授和4名具有高级职称的设计人员进行调研,为避免数据过于离散,调研时同样参考了文献[14]的概率值,然后对调研结果直接进行平均取值,计算结果列于图4左侧.

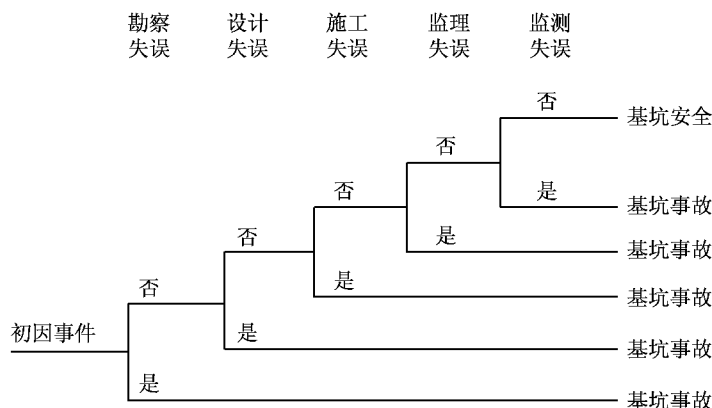


图2 劲性水泥土搅拌桩地下连续墙事件树

Fig.2 Event tree of soil-cement mixing wall

本文进行二态的BN计算,并假设根节点事件相互独立,由故障树中的逻辑关系构造BN的条件概率,结合根节点事件的先验概率可计算非根节点事件的联合概率分布,具体计算方法参考文献[15].从计算结果中可知,SMW工法支护结构体系深基坑事故发生概率为0.187 2.基坑事故的最大可能解释

是由于墙体入土深度不够造成墙体水平位移过大,从而使墙体破坏;或者是由于墙体入土深度不够直接造成墙体整体失稳,这主要是设计或施工的失误,其路径已在图4中用粗线表示出来.

利用BN可以分析任何事件的先验概率和后验概率,其中以顶事件失效为证据,基本事件的后验概

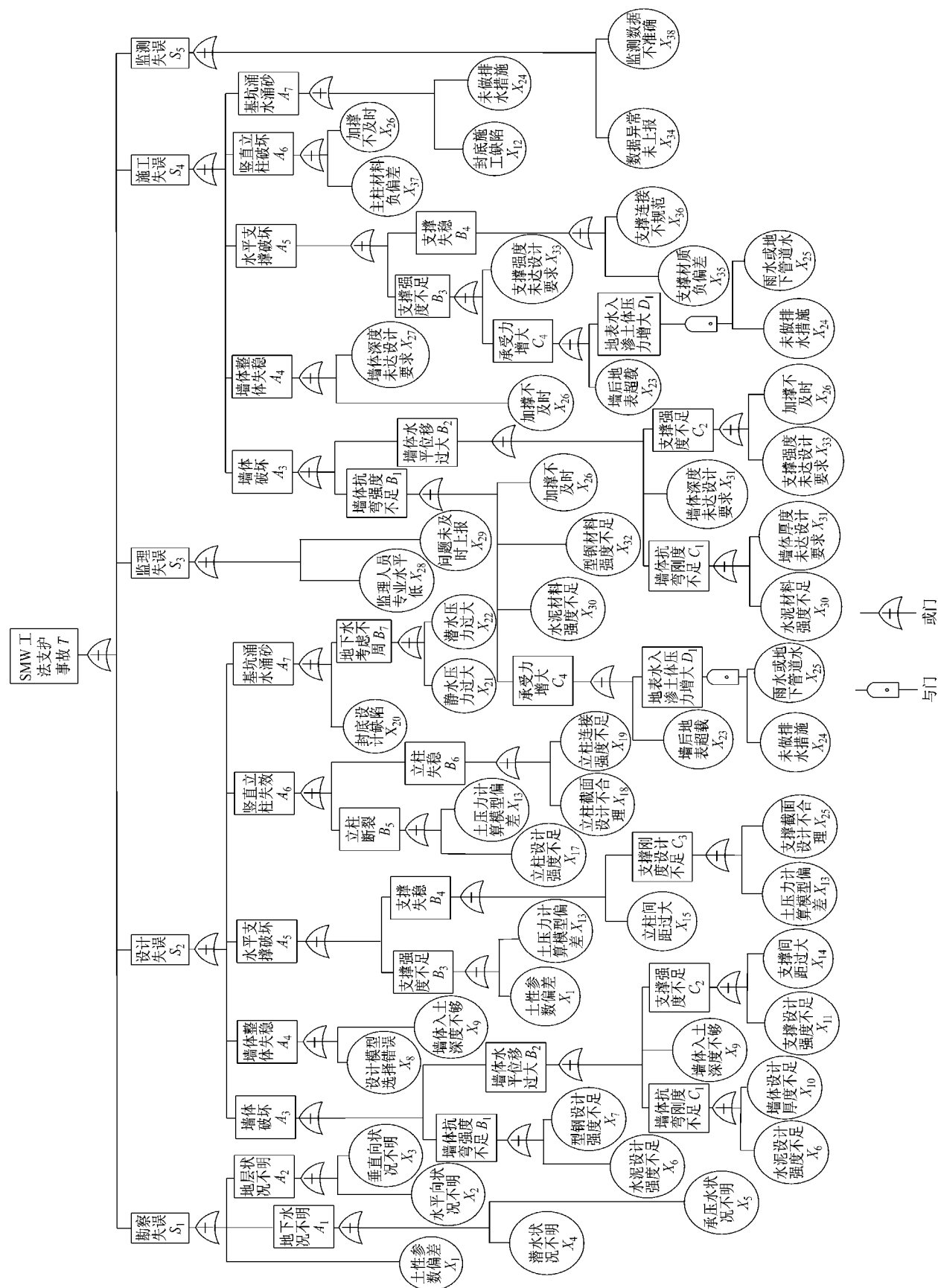


图3 劲性水泥土搅拌桩地下连续墙故障树

Fig.3 Fault tree of soil-cement mixing wall

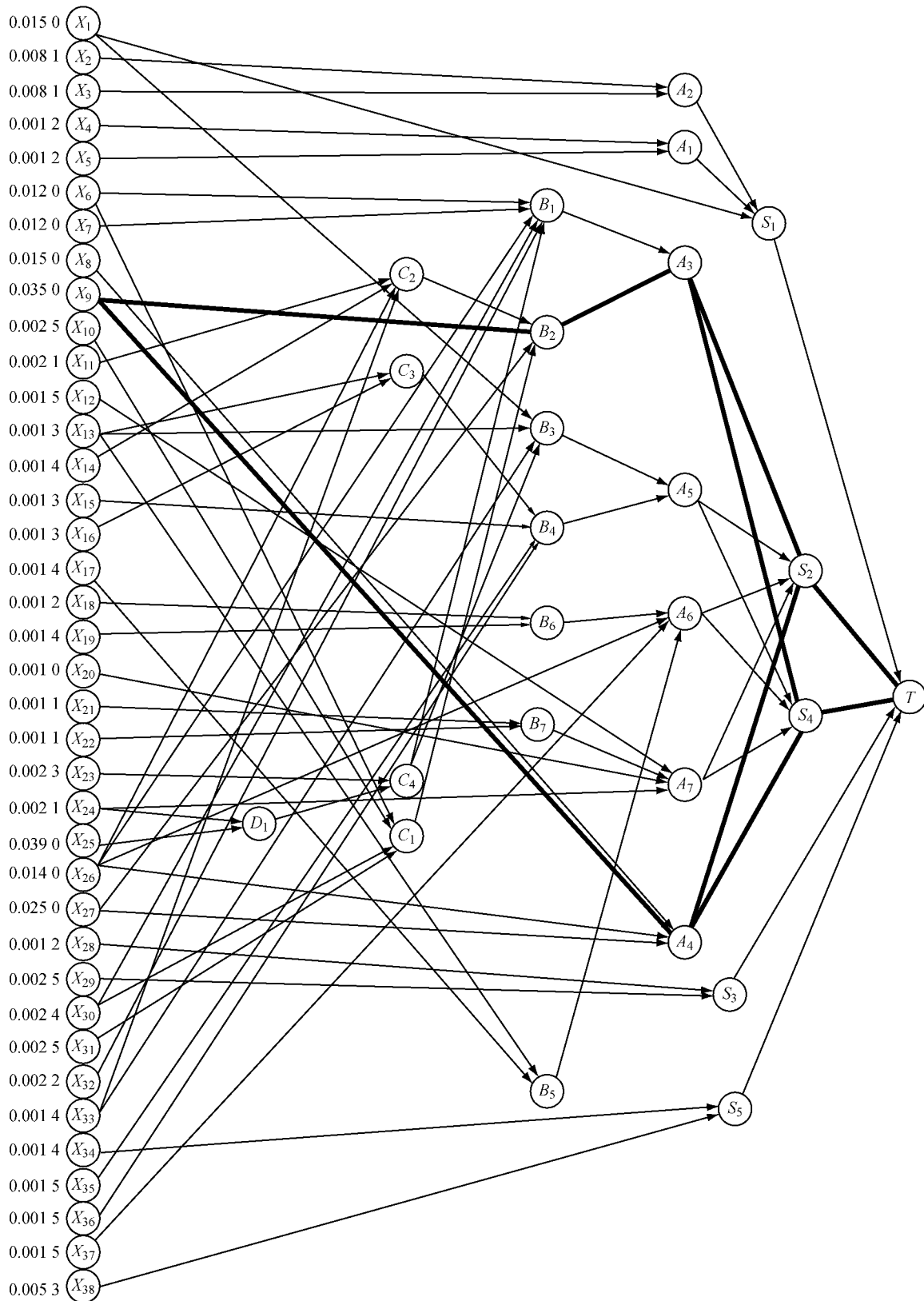


图 4 劲性水泥土搅拌桩地下连续墙贝叶斯网络

Fig.4 Bayesian networks of soil-cement mixing wall

率列于表 1. 非根节点事件初步显现失效时, 控制措施应以相应基本事件的后验概率为依据, 后验概率大的基本事件应重点控制. 例如图 4 中当顶事件发

生时, 对基本事件采取控制措施的先后次序大致为 $X_9, X_{27}, X_1, X_8, X_{26}, X_{27}, \dots$.

表1 基本事件的后验概率

Tab.1 Posterior probability of basic events

编号	后验概率	编号	后验概率	编号	后验概率	编号	后验概率	编号	后验概率
X ₁	0.080 1	X ₉	0.187 0	X ₁₇	0.007 5	X ₂₅	0.003 9	X ₃₃	0.074 8
X ₂	0.043 3	X ₁₀	0.013 4	X ₁₈	0.006 4	X ₂₆	0.074 8	X ₃₄	0.007 5
X ₃	0.043 3	X ₁₁	0.011 2	X ₁₉	0.007 5	X ₂₇	0.133 6	X ₃₅	0.008 0
X ₄	0.006 4	X ₁₂	0.008 0	X ₂₀	0.005 3	X ₂₈	0.006 4	X ₃₆	0.008 0
X ₅	0.006 4	X ₁₃	0.006 9	X ₂₁	0.005 9	X ₂₉	0.013 4	X ₃₇	0.008 0
X ₆	0.064 1	X ₁₄	0.007 5	X ₂₂	0.005 9	X ₃₀	0.012 8	X ₃₈	0.028 3
X ₇	0.064 1	X ₁₅	0.006 9	X ₂₃	0.012 3	X ₃₁	0.013 4		
X ₈	0.080 1	X ₁₆	0.006 9	X ₂₄	0.011 2	X ₃₂	0.011 8		

4 结语

通过分析可知,结合事件树构造 SMW 工法支护结构的故障树可全面考虑风险事故的基本事件,故障树的构造显得更加简易化和形象化;通过将故障树转化为 BN 避开了直接构建 BN 的难题,同时利用 BN 计算和分析方面的优势,根据事件的后验概率可找出系统中任一非根节点事件的薄弱环节,并可确定基本事件预控措施的优先次序,以上几点反映了三者联合应用的优势。

参考文献:

- [1] 李海军, 马登武, 刘霄, 等. 贝叶斯网络理论在装备故障诊断中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
LI Haijun, MA Dengwu, LIU Xiao, et al. Bayesian networks in equipment fault diagnosis [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.
- [2] Weber P, Medina-Oliva G, Simon C, et al. Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas[J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2010, 6(2): 1.
- [3] Tesfamariam S, Martín-Pérez B. Bayesian belief network to assess carbonation-induced corrosion in reinforced concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2008, 20(11): 707.
- [4] Tang Z, McCabe B. Construction of Bayesian belief networks for decision making in engineering[C]//33rd CSCE Annual Conference 2005. Toronto: Canadian Society for Civil Engineering, 2005; 1-10.
- [5] LU Ying, LI Qiming, Jimmie Hinze. Subway system safety risk analysis based on Bayesian network[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Construction & Risk Management. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 219-227.
- [6] 周建方, 唐椿炎, 许智勇. 贝叶斯网络在大坝风险分析中的应用[J]. 水利发电学报, 2001, 29(1): 192.
ZHOU Jianfang, TANG Chunyan, XU Zhiyong. Application of Bayesian networks to dam risk analysis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2001, 29(1): 192.
- [7] 周红波. 基于贝叶斯网络的深基坑风险模糊综合评估方法[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(9): 1473.
ZHOU Hongbo. Risk assessment of deep foundation pit by using fuzzy comprehensive evaluation method based on Bayesian networks[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(9): 1473.
- [8] Zhong Tang, Brenda McCabe. Developing complete conditional probability tables from fractional data for Bayesian belief networks[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE, 2007, 21(4): 265.
- [9] 江荣汉, 江晓岳, 田英杰. 事件树与故障树相结合的系统可靠性分析法[J]. 湖南大学学报, 1995 1: 104.
JIANG Ronghan, JIANG Xiaoyue, TIAN Yingjie. Combination between event tree and fault tree in system reliability analysis [J]. Journal of Hunan University, 1995 1: 104.
- [10] 张连文, 郭海鸥. 贝叶斯网引论[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
ZHANG Lianwen, GUO Haiou. Introduction to Bayesian network[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [11] 周忠宝. 基于贝叶斯网络的概率安全评估方法及应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学信息系统与管理学院, 2006.
ZHOU Zhongbao. Research on methods and application of probabilistic safety assessment based on Bayesian networks [D]. Changsha: National University of Defense Technology. School of Information System & Management, 2006.
- [12] 周忠宝, 董豆豆, 周经伦. 贝叶斯网络在可靠性分析中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2006(6): 95.
ZHOU Zhongbao, DONG Doudou, ZHOU Jinglun. Application of Bayesian networks in reliability analysis [J]. System Engineering Theory and Practice, 2006(6): 95.
- [13] Bobbio A, Portinale L, Minichino M, et al. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 71: 249.
- [14] 边亦海, 黄宏伟. SMW 工法支护结构失效概率的模糊事故树分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 664.
BIAN Yihai, HUANG Hongwei. Fuzzy fault tree analysis of failure probability of SMW retaining structure in deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 664.
- [15] Kevin Murphy. Bayes net toolbox for MATLAB[EB/OL]. [2007-08-19]. <http://code.google.com/p/bnt/>.