

DOI : 10.16285/j.rsm.2017.2445

基于 T-S 模糊故障树的地连墙+支撑支护 基坑坍塌可能性评价

钟国强^{1,2,3}, 王 浩¹, 孔 利⁴, 王成汤^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031; 4. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要: 针对基坑支撑围护结构复杂、坍塌事故频发, 且传统故障树分析方法的应用受概率和精确与或关系限制的问题, 提出了一种基于 T-S 模糊故障树的地连墙+支撑支护基坑坍塌可能性评价方法。该方法利用模糊数描述各底事件的发生概率和故障状态, 克服了传统故障树过度依赖精确概率以及不能考虑事件中间故障状态对系统影响的问题; 同时, 以 T-S 模糊模型替换传统的逻辑与或关系, 体现了故障机制和事件联系的模糊性, 降低了故障树的建立难度。该方法实现了用底事件实际故障状态和底事件模糊概率两种不同的方式计算基坑坍塌可能性, 并可根据底事件重要度分析结果指导风险控制工作。实例分析表明: 该方法比传统故障树更加贴合工程实际, 可以更加科学、可靠地评价发生坍塌的可能性并确定关键致险因子, 可作为基坑坍塌可能性评价的有效工具。

关 键 词: T-S 模糊故障树; 基坑; 坍塌可能性; 模糊数; T-S 模型

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2019) 04 - 1569 - 08

Evaluation of the possibility of foundation pit collapse with " diaphragm wall+ support" based on T-S fuzzy fault tree

ZHONG Guo-qiang^{1,2,3}, WANG Hao¹, KONG Li⁴, WANG Cheng-tang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shandong Provincial Communications Planning & Designing Institute, Jinan, Shandong 250031, China; 4. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Due to the complexity of foundation pit supporting structure, frequent occurrence of collapse accidents and applying limitation of traditional fault tree analysis(FTA) method induced by probability and accuracy logical relationship, a method for evaluating the foundation pit collapse probability based on T-S fuzzy fault tree is proposed. This method uses fuzzy numbers to describe the probability and fault state of each bottom event, which solves the problems suffered by traditional fault tree that relies too much on accurate probability and fails to take the intermediate fault state of events into consideration. At the same time, T-S model is used to replace the traditional logic and/or relationship, which reflects the fuzziness of fault mechanism and event connection, reducing the difficulty of building fault tree. This method can use the actual failure state or the fuzzy probability of the bottom event two different ways to calculate the collapse possibility of foundation pit, which can also guide the risk control work according to the analysis result of bottom event importance. Case analysis shows that this method is more suitable for engineering practice than traditional fault tree. It can scientifically and accurately evaluate the possibility of collapse and determine the key risk factors which can be an effective tool for evaluating the possibility of foundation pit collapse.

Keywords: T-S fuzzy fault tree; foundation pit; collapse possibility; fuzzy number; T-S model

收稿日期: 2017-12-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 41472288, No. 41731284, No. 51579235, No. 41672314)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (41472288, 41731284, 51579235, 41672314).

第一作者简介: 钟国强, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事岩土力学与工程方面的研究工作。E-mail: zhong_g_q@126.com

通讯作者: 王浩, 男, 1972 年生, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程监测、数据建模、风险分析和相关软件开发等工作。E-mail: hwang@whrsm.ac.cn

1 引言

近年来,随着我国城市地下工程及高层建筑的不不断发展,深大基坑不断涌现。同时,由于基坑支护工程多为临时性工程,安全储备相对较小,且存在周边环境复杂,施工条件差等不利因素,导致基坑安全事故时有发生。据统计,在众多基坑事故类型中,坍塌和塌陷事故频数最高,且坍塌事故是单次死亡人数最多的事故类型,平均每次坍塌可能导致2人以上伤亡^[1-2]。因此,开展针对基坑坍塌的可能性评价具有重大现实意义。

故障树分析(fault tree analysis, FTA)作为大型复杂系统可靠性和安全性分析的有效工具非常适合于基坑坍塌可能性评价,且在岩土工程领域已有较多应用^[3-5]。然而传统故障树存在以下不足: 概率假设,底事件概率需精确已知; 二态假设,事件状态只有完全正常和完全故障,无中间半故障状态。

与或关系假设,事件间联系需精确已知,完全符合与、或关系。

然而,许多复杂系统存在缺乏概率统计数据,故障机制不清、事件间联系不确定,中间故障状态不可忽略等问题,这大大限制了传统故障树的推广应用。针对以上问题,研究人员进行了大量研究,故障树分析方法也经历了两次大的改进创新:

(1) 模糊故障树: 20世纪80年代中期,国外建立了模糊事故树分析的基本概念和方法^[6-7],提出以模糊数表示底事件概率,解决了故障发生概率的不确定性和模糊性的问题,减小了精确概率难以获取的问题。我国20世纪90年代初开始相关研究,目前在基坑安全风险评估方面已有一些研究成果^[8-9]。

(2) T-S 模糊故障树: 由于模糊故障树仍然存在二态假设和与或关系假设两点不足,这在许多情况下并不符合工程实际。2005年,宋华等^[10]在模糊故障树的基础上提出了T-S模糊故障树方法,该方法提出用T-S模糊模型描述事件间的联系,以解决事件联系的模糊性;用模糊数描述故障的程度,以考虑不同故障程度对系统的影响,该方法对传统故障树的3点不足进行了有效解决,目前主要用于复杂液压系统及重要设备的可靠性分析^[11-14],在岩土工程领域应用极少,仅见隧道冻害研究^[15]方面的相关文献报导。

鉴于T-S模糊故障树优越性和创新性,本文将将其应用到地连墙+支撑支护基坑坍塌可能性评价中,在构建其坍塌T-S模糊故障树的基础上,通过专家调查法获取对应的T-S模糊门规则,并利用底

事件模糊概率和故障状态计算实例基坑的坍塌可能性,为科学可靠评价地连墙+支撑支护基坑的安全状态及风险控制提供理论支持。

2 T-S 模糊故障树基本理论

2.1 模糊数

在T-S模糊故障树分析中,用模糊数描述底事件发生概率和故障程度。为使用方便且不失一般性,本文选用图1所示的梯形隶属函数来描述模糊数 $\tilde{M}=(m_0, s_l, f_l, s_r, f_r)$,其详细表达式为

$$\mu_{\tilde{M}}(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < m_0 - s_l - f_l \\ \frac{x - (m_0 - s_l - f_l)}{f_l}, & m_0 - s_l - f_l \leq x < m_0 - s_l \\ 1, & m_0 - s_l \leq x < m_0 + s_r \\ \frac{(m_0 + s_r + f_r) - x}{f_r}, & m_0 + s_r \leq x < m_0 + s_r + f_r \\ 0, & m_0 + s_r + f_r \leq x \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_0 为模糊数支撑集的中心; s_l 和 s_r 为左、右支撑半径; f_l 和 f_r 为左、右模糊区。显然, $s_l = s_r = 0$ 时,梯形隶属函数变为三角形隶属函数, $f_l = f_r = 0$ 时,模糊数变为确定数。

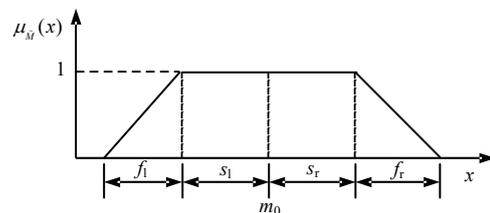


图1 模糊数梯形隶属函数

Fig.1 Trapezoid membership function of fuzzy numbers

采用模糊数描述事件发生的概率,既解决了因统计资料缺乏而难以获得底事件准确概率的问题,又能将工程技术人员的实践经验考虑进来。当某个底事件历史数据丰富时,可认为其故障概率是确定的,那么左右支撑半径和左右模糊区均为0。而当历史数据不足,发生概率不能精确确定时,可通过专家调查法来确定合适的左右支撑半径和左右模糊区,一般情况下 $s_l = s_r$ 、 $f_l = f_r$ 。

采用模糊数来描述故障的严重程度时,可用区间 $[0, 1]$ 上的模糊数来描述,如故障程度可用语言信息描述为小、中、大或无故障、轻微故障、严重故障等,可分别用模糊数0.0、0.5、1.0来描述。

2.2 T-S 模糊故障树^[10]

T-S 模糊故障树以 T-S 模型替换传统与或关系来描述事件间的联系，解决了许多复杂系统故障机制不清、事件间联系不确定、建立故障树困难的问题。T-S 模型是由一系列 IF-THEN 模糊规则组成的万能逼近器。假设底事件 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和上级事件 y 的故障程度分别描述为模糊数 $(x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^{k_1})$, $(x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^{k_2})$, \dots , $(x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^{k_n})$ 和 $(y^1, y^2, \dots, y^{k_y})$ 。其中：

$$\left. \begin{matrix} 0 & x_1^1 < x_1^2 < \dots < x_1^{k_1} & 1 \\ 0 & x_2^1 < x_2^2 < \dots < x_2^{k_2} & 1 \\ \dots & & \\ 0 & x_n^1 < x_n^2 < \dots < x_n^{k_n} & 1 \\ 0 & y^1 < y^2 < \dots < y^{k_y} & 1 \end{matrix} \right\} \quad (2)$$

T-S 模糊门如图 2 所示，可表述如下：

规则 l ：如果 x_1 为 $x_1^{i_1}$ ，且 x_2 为 $x_2^{i_2}$ ，且...，且 x_n 为 $x_n^{i_n}$ ， y 为 y^1 的可能性为 $P^l(y^1)$ ， y 为 y^2 的可能性为 $P^l(y^2)$ ，...， y 为 y^{k_y} 的可能性为 $P^l(y^{k_y})$ 。其中， $i_1 = 1, 2, \dots, k_1$ ； $i_2 = 1, 2, \dots, k_2$ ； $i_n = 1, 2, \dots, k_n$ 。因此，规则总数为 $m = \prod_{i=1}^n k_i$ 。

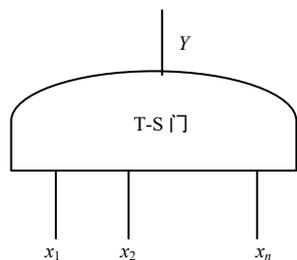


图 2 T-S 模糊门
Fig.2 T-S fuzzy door

假设底事件各种故障程度的模糊概率分别为 $P(x_1^{i_1})$ 、 $P(x_2^{i_2})$ 、...、 $P(x_n^{i_n})$ ，则规则 l 执行的可能性为

$$P_0^l = P(x_1^{i_1})P(x_2^{i_2}) \dots P(x_n^{i_n}) \quad (3)$$

因此，上级事件的模糊概率为

$$\left. \begin{matrix} P(y^1) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y^1) \\ P(y^2) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y^2) \\ \vdots \\ P(y^{k_y}) = \sum_{l=1}^m P_0^l P^l(y^{k_y}) \end{matrix} \right\} \quad (4)$$

若已知底事件 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的故障程度为 $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ ，则由 T-S 模型可估计出上级事件故障程度的模糊可能性：

$$\left. \begin{matrix} P(y^1) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^1) \\ P(y^2) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^2) \\ \vdots \\ P(y^{k_y}) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^{k_y}) \end{matrix} \right\} \quad (5)$$

式中： $\beta_l^*(x') = \frac{\prod_{j=1}^n \mu_{x_j^{i_j}}(x'_j)}{\sum_{l=1}^m \prod_{j=1}^n \mu_{x_j^{i_j}}(x'_j)}$ ， $\mu_{x_j^{i_j}}(x'_j)$ 为第 l 条规则中第 j 个事件故障程度 x'_j 对应模糊集的隶属度。

因此，由下级事件 x 的模糊概率并结合 T-S 模糊门规则，用式 (4) 可得出上级事件 y 的各种模糊概率；由下级事件 x 的当前故障程度 x' 并结合 T-S 模糊门规则，用式 (5) 可估计出上级事件故障程度的模糊可能性。

2.3 底事件重要度分析

事件 x_j 故障程度为 $x_j^{(i_j)}$ ($i_j = 1, 2, \dots, k_j$) 对系统顶事件 T 为 T_q 的 T-S 概率重要度为

$$I_{T_q}^{Pr}(x_j^{(i_j)}) = P(T_q, P(x_j^{(i_j)}) = 1) - P(T_q, P(x_j^{(i_j)}) = 0) \quad (6)$$

式中： $P(T_q, P(x_j^{(i_j)}) = 1)$ 、 $P(T_q, P(x_j^{(i_j)}) = 0)$ 分别表示当 x_j 故障程度为 $x_j^{(i_j)}$ 的模糊概率 $P(x_j^{(i_j)})$ 为 1 和 0 时引起系统顶事件 T 为 T_q 的模糊概率，两者差值可以认为是由 $x_j^{(i_j)}$ 单独引起的系统顶事件 T 为 T_q 的模糊概率。

综合事件各个故障程度的 T-S 概率重要度，可以得到事件 x_j 对顶事件 T 为 T_q 的 T-S 概率重要度：

$$I_{T_q}^{Pr}(x_j) = \frac{\sum_{i_j=1}^{k_j} I_{T_q}^{Pr}(x_j^{(i_j)})}{k_j} \quad (7)$$

式中： k_j 为第 j 个事件的非 0 故障程度的个数。

2.4 基于 T-S 模糊故障树的基坑坍塌可能性分析流程

基于 T-S 模糊故障树的基坑坍塌可能性分析不仅能够用底事件模糊概率计算基坑坍塌概率，还可以根据开挖过程中各底事件的实际故障状态计算基坑坍塌的模糊可能性，同时还可以利用底事件重要度分析结果确定关键致险因子，指导风险控制工作。

具体分析流程如图3所示：

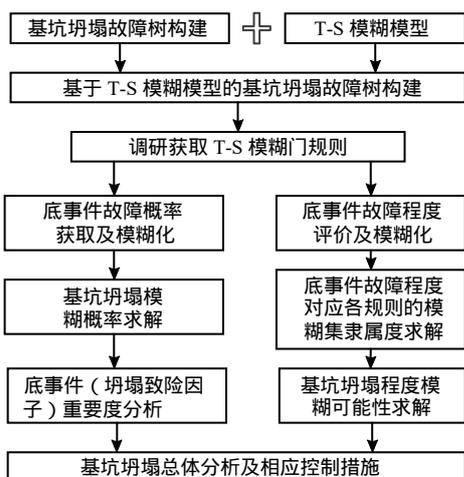


图3 基于 T-S 模糊故障树的基坑坍塌可能性分析流程

Fig.3 Flow chart of evaluating the possibility of foundation pit collapse based on T-S fuzzy fault tree

3 基坑坍塌的 T-S 模糊故障树建立

如前言所述，坍塌是基坑工程中的一种发生频率较高的事故，也是导致伤亡较大的事故，因此，本文选择地连墙+支撑支护形式的基坑发生坍塌为顶事件，通过对导致其发生的自身地质条件、外部施工扰动条件和支撑维护系统状态三个方面原因的系统分析，构建了地连墙+支撑支护基坑坍塌的 T-S 模糊故障树，如图4所示。图中各事件编号如下： T 为顶事件， $x_1 \sim x_{22}$ 为底事件，其余为中间事件，由上往下按照 A 、 B 、 C 、 D 顺序编号。图中各 T-S 门规则通过专家调查法并经加权计算获得，专家权重同文献[16]，因篇幅限制，仅列出 T-S 门5的各规则作为示例，如表1所示。专家调查主要面向基坑工程领域专家，项目设计、施工单位技术管理人员和岩土工程博、硕士研究生进行，共发放25份调查问卷，收回17份。

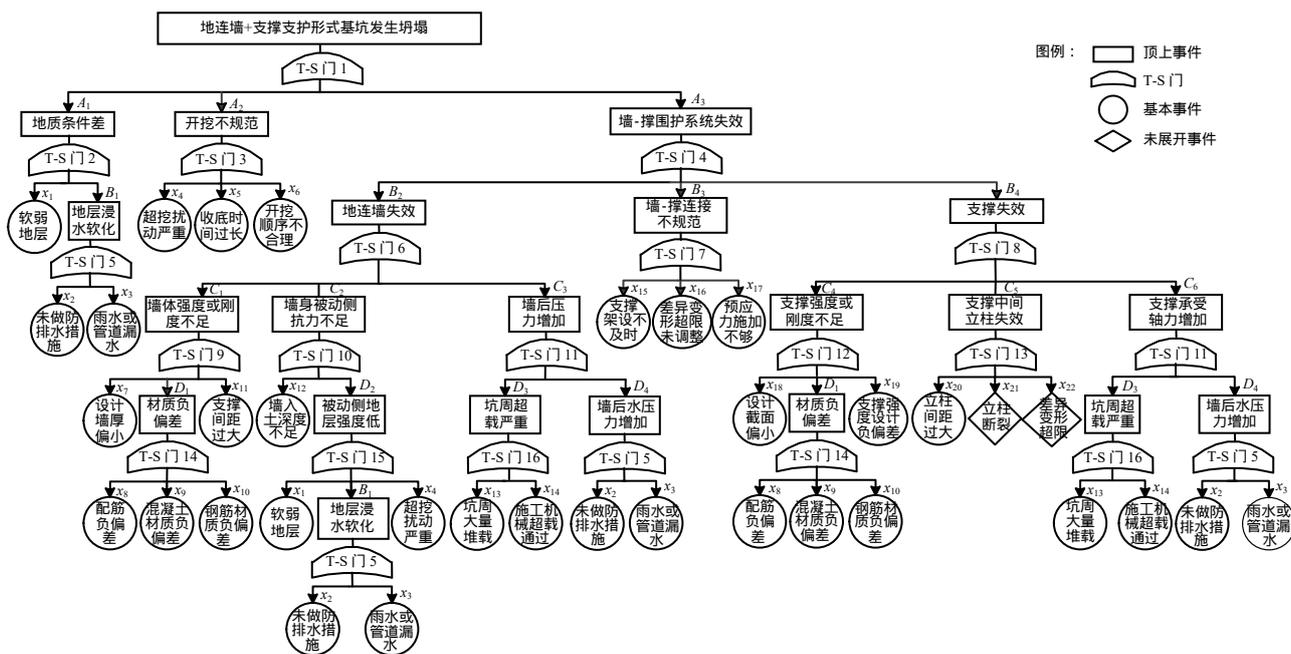


图4 地连墙+支撑支护形式基坑坍塌 T-S 模糊故障树

Fig.4 T-S fuzzy fault tree of foundation pit collapse in the form of "diaphragm wall+ support" support

表1 T-S 门5 规则

Table 1 Rules of T-S gate 5

序号	x_2	x_3	$P(B_1)$		
			$B_1=0.0$	$B_1=0.5$	$B_1=1.0$
1	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
2	0.0	0.5	0.9	0.1	0.0
3	0.0	1.0	0.7	0.3	0.0
4	0.5	0.0	1.0	0.0	0.0
5	0.5	0.5	0.3	0.6	0.1
6	0.5	1.0	0.0	0.7	0.3
7	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0
8	1.0	0.5	0.0	0.8	0.2
9	1.0	1.0	0.0	0.0	1.0

4 实例分析

基于该方法的基坑坍塌风险可能性评价应当遵循如下的思路：一般来说，地连墙+支撑支护地铁基坑大多采用分段、分层、分块、对称的方式进行开挖，当在下一区段开挖前，若根据监测数据、巡检结果或者经验判断得出基坑具有坍塌的可能性（变形、轴力陡增，坑周地表裂缝等）时，就需要启动该风险可能性评价。我们可以根据勘察设计资料、施工单位资质及施工水平、环境资料、历史（预

报)气象数据和监测巡检结果等提前对各底事件的发生概率和故障程度进行预判,然后利用 2.2 节提出的两种方法对基坑坍塌的可能性进行动态的定量计算,并通过 2.3 节关于底事件的重要度分析确定导致坍塌的关键致险因子,用于指导风险控制工作。与此同时,风险管理人员还可以对坍塌发生后可能造成的损失进行定性判断,以便得出基坑坍塌的风险等级,根据具体的风险等级便可提前采取相应的应对措施。

下面将分别结合南昌地铁前湖大道站明挖基坑资料和深圳地铁 5.10 基坑坍塌事故^[17]对两种方法进行算例计算,验证本文所提方法在地连墙+支撑支护基坑坍塌可能性评价方面的适用性。

4.1 根据底事件概率计算坍塌发生概率

目前,故障树的应用普遍存在底事件概率难以获取的问题,现阶段的替代方式是通过专家调查或者少量样本统计得出的方法,但得到的并非真正的概率,严格来讲传统故障树方法是无法使用的。而 T-S 模糊故障树提出以模糊数形式表示底事件发生概率,并根据概率收集情况来确定模糊数的支撑半径,这种方式更加符合现阶段实际。

南昌地铁前湖大道站为明挖顺作法基坑,基坑长 223 m,宽 20.2 m,深约 16 m,支护形式为 800 mm 厚地连墙+三道支撑。因缺乏相关底事件概率数据,因此本文采用专家调查法,并结合现场数据和相关文献^[8, 18]统计数据来确定底事件模糊概率。调查情况同第 2 节 T-S 门规则调查,同时要求被调查专家先按照《城市轨道交通地下工程建设风险管理规范》(GB50625 - 2011)^[19]中表 4.2.1 确定底事件发生的可能性等级,再根据个人经验在选定等级内确定概率值。汇总调查结果并进行加权^[16]平均后得模糊概率均值,最后经适当模糊化用梯形模糊数表示,如表 2 所示,模糊化参数为 $s_1 = s_r = 0.05m_0$ 、 $f_1 = f_r = 0.15m_0$ 。

根据表 1 中 T-S 门 5 的规则和表 2 中的 x_2 、 x_3 的模糊概率数据,利用式(3)、(4)可求得中间事件 B_1 发生不同故障程度的概率分别为

$$P\{B_1 = 0.0\} = \sum_{l=1}^9 P_0^l P^l(B_1 = 0.0) = P_0^1 P^1(B_1 = 0.0) + P_0^2 P^2(B_1 = 0.0) + P_0^3 P^3(B_1 = 0.0) + P_0^4 P^4(B_1 = 0.0) + P_0^5 P^5(B_1 = 0.0) + P_0^7 P^7(B_1 = 0.0) = (0.977\ 68, 0.980\ 47, 0.982\ 33, 0.985\ 12) \quad (8)$$

$$P\{B_1 = 0.5\} = \sum_{l=1}^9 P_0^l P^l(B_1 = 0.5) = P_0^2 P^2(B_1 = 0.5) + P_0^3 P^3(B_1 = 0.5) + P_0^5 P^5(B_1 = 0.5) + P_0^6 P^6(B_1 = 0.5) + P_0^8 P^8(B_1 = 0.5) = (0.014\ 88, 0.017\ 67, 0.019\ 53, 0.022\ 32) \quad (9)$$

$$P\{B_1 = 1.0\} = \sum_{l=1}^9 P_0^l P^l(B_1 = 1.0) = P_0^5 P^5(B_1 = 1.0) + P_0^6 P^6(B_1 = 1.0) + P_0^8 P^8(B_1 = 1.0) + P_0^9 P^9(B_1 = 1.0) = (0, 0, 0, 0) \quad (10)$$

表 2 底事件模糊概率

Table 2 The fuzzy probability of the bottom events

编号	模糊概率均值	梯形模糊数
x_1	0.000 00	(0.000 00, 0.000 00, 0.000 00, 0.000 00)
x_2	0.000 00	(0.000 00, 0.000 00, 0.000 00, 0.000 00)
x_3	0.046 50	(0.037 20, 0.044 18, 0.048 83, 0.055 80)
x_4	0.002 14	(0.001 71, 0.002 03, 0.002 25, 0.002 57)
x_5	0.008 01	(0.006 41, 0.007 61, 0.008 41, 0.009 61)
x_6	0.005 66	(0.004 53, 0.005 38, 0.005 94, 0.006 79)
x_7	0.040 80	(0.034 68, 0.038 76, 0.042 84, 0.046 92)
x_8	0.000 94	(0.000 75, 0.000 89, 0.000 99, 0.001 13)
x_9	0.000 78	(0.000 62, 0.000 74, 0.000 82, 0.000 94)
x_{10}	0.002 50	(0.002 00, 0.002 38, 0.002 63, 0.003 00)
x_{11}	0.000 00	(0.000 00, 0.000 00, 0.000 00, 0.000 00)
x_{12}	0.019 76	(0.015 81, 0.018 77, 0.020 75, 0.023 71)
x_{13}	0.018 75	(0.015 00, 0.017 81, 0.019 69, 0.022 50)
x_{14}	0.015 63	(0.012 50, 0.014 85, 0.016 41, 0.018 76)
x_{15}	0.029 89	(0.023 91, 0.028 40, 0.031 38, 0.035 87)
x_{16}	0.094 38	(0.075 50, 0.089 66, 0.099 10, 0.113 26)
x_{17}	0.004 83	(0.003 86, 0.004 59, 0.005 07, 0.005 80)
x_{18}	0.000 75	(0.000 60, 0.000 71, 0.000 79, 0.000 90)
x_{19}	0.001 03	(0.000 82, 0.000 98, 0.001 08, 0.001 24)
x_{20}	0.000 00	(0.000 00, 0.000 00, 0.000 00, 0.000 00)
x_{21}	0.000 00	(0.000 00, 0.000 00, 0.000 00, 0.000 00)
x_{22}	0.001 11	(0.000 89, 0.001 05, 0.001 17, 0.001 33)

如表 1 所示,中间事件 B_1 各故障程度的概率仍是一个梯形模糊数,其不出现故障的概率很大,出现故障程度 1.0 和 0.5 的概率均很小,且出现故障程度为 1.0 的概率小于出现故障程度为 0.5 的概率,这与实际情况相符。

利用同样的方法,由下往上逐层计算,求得顶事件发生各故障程度的概率分别为

$$\left. \begin{aligned} P\{T = 0.0\} &= (0.662\ 65, 0.695\ 69, 0.720\ 42, 0.756\ 22) \\ P\{T = 0.5\} &= (0.126\ 87, 0.143\ 19, 0.153\ 78, 0.167\ 59) \\ P\{T = 1.0\} &= (0.116\ 91, 0.136\ 39, 0.150\ 53, 0.169\ 76) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

如上结果所示，该基坑出现中等和严重坍塌的概率很小，与基坑实际状态非常吻合，基坑在整个开挖过程中基本未出现变形超限预警的情况，围护结构最大水平位移（含深部位移）仅为 14.80 mm，地表最大沉降为 -10.74 mm。这也验证了本文提出的 T-S 模糊故障树方法在地连墙+支撑支护形式基坑坍塌可能性评价方面的正确性。

如果在求得坍塌概率较大时，我们需要进一步确定哪些因素对基坑坍塌起到了重要作用，以及需要按照怎样的先后顺序对各致险因子进行控制。针对底事件的重要度分析可以确定坍塌的关键致险因子，为坍塌风险控制提供指导。

利用式 (6)，得到各底事件各非零故障程度对基坑中度坍塌和严重坍塌的 T-S 概率重要度；再利用式 (7)，综合各底事件全部非零故障程度的 T-S 概率重要度，得到各底事件分别对基坑中度坍塌和严重坍塌的 T-S 概率重要度。表 3 分别列出了对实例基坑中等坍塌和严重坍塌影响较大的 5 个关键致险因子（底事件）的 T-S 概率重要度。

表 3 对基坑坍塌影响较大的底事件的 T-S 概率重要度
Table 3 T-S probability importance of a bottom event with great effect on the foundation pit collapse

序号	重要底事件	$I_{05}^{Pr}(x_j)$	重要底事件	$I_1^{Pr}(x_j)$
1	x_{15}	0.336	x_{10}	0.669
2	x_{17}	0.326	x_9	0.661
3	x_{11}	0.227	x_8	0.647
4	x_7	0.217	x_{19}	0.552
5	x_{16}	0.182	x_{18}	0.522

由表 3 可知，对于该实例基坑，当发生中等坍塌事故时， x_{15} 的 T-S 概率重要度最大，对预防中度基坑坍塌的效果最为明显，那么在开挖过程中应严格遵守设计要求的支撑架设原则进行及时架设。同时可按以下次序进行重点故障排查： x_{15} 、 x_{17} 、 x_{11} 、 x_7 、 x_{16} ；当系统发生严重坍塌事故时， x_{10} 的 T-S 概率重要度最大，则确保支撑和围护结构的钢筋材质安全可靠对预防严重基坑坍塌的效果最为明显，同时可按以下次序进行重点故障排查： x_{10} 、 x_9 、 x_8 、 x_{19} 、 x_{18} 。

4.2 根据底事件故障程度求坍塌模糊可能性

根据勘察设计资料、施工单位资质及施工水平、环境资料、历史（预报）气象数据和监测巡检结果等资料提前对各底事件的可能的故障程度进行预判后，利用本文提出的方法便可计算顶事件出现不同故障程度的模糊可能性，这对于基坑施工过程中的

动态安全风险分析十分有用，这一功能是传统故障树方法所不具备的。

据报道^[17]，2017 年 5 月 10 日上午，深圳轨道交通 3 号线南延工程某基坑发生坍塌，造成 3 名工人死亡的悲剧。经调查，事故原因是由于连续多日降雨导致上部填土泡水软化，同时基坑下部存在较厚淤泥层，稳定性较差，两者共同作用导致开挖面失稳滑动，酿成惨剧。

在该部分，将利用所构建的 T-S 模糊故障树，在假设软弱地层及雨水或管道渗水故障程度的基础上，对上述坍塌事故进行模拟计算。其中，假设软弱地层的故障程度 $x'_1 = 0.8$ ，防排水措施故障及雨水或管道漏水的故障程度分别为 $x'_2 = 0.2$ 、 $x'_3 = 0.5$ ，其余底事件的故障程度分别假设为 $x'_4 = 0.2$ 、 $x'_6 = 0.1$ 、 $x'_5 = 0$ 、 $x'_7 \sim x'_{22}$ 均为 0。由式 (1) 可算得表 2 中底事件 x_2 、 x_3 的隶属度，见表 4。

表 4 T-S 门 5 故障程度隶属度
Table 4 Membership grade of the failure degree in T-S gate 5

序号	隶属度	
	x_2	x_3
1	2/3	0
2	2/3	1
3	2/3	0
4	1/3	0
5	1/3	1
6	1/3	0
7	0	0
8	0	1
9	0	0

因此 T-S 模糊门 5 中各规则的执行度 $\beta_2^* = \frac{2}{3}$ 、 $\beta_5^* = \frac{1}{3}$ ，其余均为 0。根据式 (5) 可计算出中间事件 B_1 不同故障程度的模糊可能性为

$$\left. \begin{aligned} P_F(B_1 = 0.0) &= 0.8\beta_2^* + 0.3\beta_5^* = 0.633\ 3 \\ P_F(B_1 = 0.5) &= 0.2\beta_2^* + 0.6\beta_5^* = 0.333\ 3 \\ P_F(B_1 = 1.0) &= 0.1\beta_5^* = 0.033\ 4 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由此可知，当防排水措施轻微故障及雨水或管道较多渗水时，地层不出现浸水软化和中度浸水软化的可能性较大模糊可能性分别约为 2/3 和 1/3，而出现严重浸水软化的模糊可能性极小，该结果与实际情况非常相符。用 B_1 的模糊可能性代替其隶属度，由下向上逐层计算可以得到顶事件出现不同程

度故障的模糊可能性分别为 $P_F(T=0.0)=0.0377$ 、 $P_F(T=0.5)=0.1702$ 、 $P_F(T=1.0)=0.7921$ 。

根据计算结果可知，该基坑出现严重坍塌的模糊可能性约为 0.8，极可能发生严重坍塌事故。因此，当场地存在大量软弱地层，且地层受到浸水软化和轻微不规范施工干扰的情况下，基坑工程发生坍塌的可能性极大，施工中应引起足够的重视，做好截排水措施并严格按照开槽支撑、先撑后挖、分层开挖、严禁超挖的原则进行开挖。计算结果印证了专家对深圳地铁坍塌事故的原因分析，同时也验证了本文所述方法对基坑坍塌可能性评价的正确性。

5 结 论

(1) 提出了基于 T-S 模糊故障树的地连墙+支撑支护形式基坑坍塌可能性评价方法，并通过基于权重的专家调查法获得了相应的 T-S 模糊门规则。该方法在继承传统故障树分析推理严密、分析透彻等优点的基础上，又充分考虑了底事件发生概率的模糊性、故障机制及联系的模糊性、中间故障状态对顶事件的重要性，克服了传统故障树中的概率假设、二态假设、与或关系假设的不足，是进行地连墙+支撑支护基坑坍塌可能性评价的有效工具。

(2) 基于 T-S 模糊故障树的基坑坍塌可能性分析不仅可以用底事件模糊概率计算基坑坍塌概率，还可以根据基坑相关资料在对各底事件故障程度进行预判后计算基坑坍塌的模糊可能性。通过算例计算验证了两种方法的正确性和适用性。

(3) 针对底事件的重要度分析能够量化各底事件对基坑坍塌的促进作用，这有助于确定导致基坑坍塌的关键致险因子，并按重要度大小合理安排不同预防措施实施的先后顺序，为基坑坍塌的风险控制进行有效指导。

参 考 文 献

- [1] 胡群芳, 秦家宝. 2003 - 2011 年地铁隧道施工事故统计分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(3): 705 - 710.
HU Qun-fang, QIN Jia-bao. Statistical analysis on accidents of subway tunnel construction from 2003 to 2011 in china[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(3): 705 - 710.
- [2] 李凤伟, 杜修力, 张明聚. 地铁工程建设施工事故统计分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 474 - 479.
LI Feng-wei, DU Xiu-li, ZHANG Ming-ju. Statistical analysis of accidents in metro construction[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(2): 474 - 479.
- [3] 周继忠. 灰色关联故障树分析法在基坑工程放坡开挖中应用[J]. 土木工程学报, 2009, 42(8): 109 - 114.
ZHOU Ji-zhong. Application of gray correlation fault tree analysis for unprotected open cut excavations[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2009, 42(8): 109 - 114.
- [4] 周红波, 高文杰, 蔡来炳, 等. 基于 WBS-RBS 的地铁基坑故障树风险识别与分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2703 - 2707, 2726.
ZHOU Hong-bo, GAO Wen-jie, CAI Lai-bing, et al. Risk identification and analysis of subway foundation pit by using fault tree analysis method based on WBS-RBS[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(9): 2703 - 2707, 2726.
- [5] 黄宏伟, 闫玉茹, 胡群芳. 复合式土压平衡盾构刀盘失效风险分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2324 - 2330.
HUANG Hong-wei, YAN Yu-ru, HU Qun-fang. Risk analysis of cutter head failure of composite EPB shield[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2324 - 2330.
- [6] FURUTA H, SHIRAISHI N. Fuzzy importance in fault tree analysis[J]. *Fuzzy Set and System*, 1984, 12: 205 - 213.
- [7] SINGER D. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1990, 32(2): 145 - 155.
- [8] 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.
- [9] 李立. 地铁车站施工风险管理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
LI Li. Study on the metro station construction risk management[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [10] 宋华, 张洪钺, 王行仁. T-S 模糊故障树分析方法[J]. 控制与决策, 2005, 20(8): 854 - 859.
SONG Hua, ZHANG Hong-yue, WANG Xing-ren. Fuzzy fault tree analysis based on T-S model[J]. *Control and Decision*, 2005, 20(8): 854 - 859.
- [11] 姚成玉, 赵静一. 基于 T-S 模型的液压系统模糊故障树分析方法研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(16): 1913 - 1917.
YAO Cheng-yu, ZHAO Jing-yi. Research on fuzzy fault

- tree analysis method for hydraulic system based on T-S model[J]. **China Mechanical Engineering**, 2009, 20(16): 1913 - 1917.
- [12] 黄亮亮, 姚安林, 杨鲁明, 等. 基于 T-S 模糊故障树的输气站场设备失效可能性研究[J]. **中国安全生产科学技术**, 2014, 10(8): 144 - 149.
- HUANG Liang-liang, YAO An-lin, YANG Lu-ming, et al. Study on failure possibility of facilities in gas transmission station based on T-S fuzzy FTA[J]. **Journal of Safety Science and Technology**, 2014, 10(8): 144 - 149.
- [13] SONG HUA, ZHANG HONGYUE, CHAN C W. Fuzzy fault tree analysis based on T-S model with application to INS/GPS navigation system[J]. **Soft Computing**, 2009, 13(1): 31 - 40.
- [14] DONG LIJING, SONG HUA, LIU WENJING. The application of T-S fuzzy fault tree analysis in satellite attitude control system[C]//IEEE International Conference on Industrial Informatics. [S. l.]: [s. n.], 2012: 208 - 213.
- [15] 罗彦斌. 寒区隧道冻害等级划分及防治技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- LUO Yan-bin. Study on frost damage grades and its prevention and control technologies in cold region tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [16] 边亦海, 黄宏伟, 李剑. 可信性方法在深基坑施工期风险分析中的应用[J]. **地下空间与工程学报**, 2006, 2(1): 70 - 73.
- BIAN Yi-hai, HUANG Hong-wei, LI Jian. Risk analysis in the construction stage of deep excavation engineering based on dependability method[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2006, 2(1): 70 - 73.
- [17] 郑小红. 深圳地铁工地发生坍塌事故 已有两人遇难[EB/OL]. 中国新闻网, 2017-05-11 [2017-12-07]. <http://www.chinanews.com/sh/2017/05-11/8221616.shtm>.
- ZHENG Xiao-hong. Two people have been died in the collapse of Shenzhen Metro construction site[EB/OL]. China News, 2017-05-11 [2017-12-07]. <http://www.chinanews.com/sh/2017/05-11/8221616.shtm>.
- [18] 吴静. 深基坑支护结构事故预警系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2002.
- WU Jing. Research on early warning system of deep foundation pit support structure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2002.
- [19] 中国土木工程学会, 同济大学. GB50625 - 2011 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- China Civil Engineering Society. Tongji University. GB50625 - 2011 Code for risk management of underground works in urban rail transit[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [32] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1993, 30(5): 758 - 767.
- [33] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(3): 203 - 224.
- [34] LEUNG E H Y, NG C W W. Wall and ground movements associated with deep excavations supported by cast in situ wall in mixed ground conditions[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(2): 129 - 143.
- [35] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1998, 35(6): 1004 - 1017.
- [36] MANA A I, CLOUGH G W. Prediction of movements for braced cut in clay[J]. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, 1981, 107(6): 759 - 777.
- [37] WANG Z W, NG C W W, LIU G B. Characteristics of wall deflections and ground surface settlements in Shanghai[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005, 42(5): 1243 - 1254.
- [38] 刘念武, 龚晓南, 俞峰, 等. 内支撑结构基坑的空间效应及影响因素分析[J]. **岩土力学**, 2014, 35(8): 2293 - 2298.
- LIU Nian-wu, GONG Xiao-nan, YU Feng, et al. Analysis of spatial effects in strutted excavation and related influential factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(8): 2293 - 2298.
- [39] SON M, CORDING E J. Estimation of building damage due to excavation-induced ground movements[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2005, 131(2): 162 - 177.

上接第 1525 页