

事故树分析在排桩基坑工程安全评价中的应用研究

张小平¹, 王杰², 胡明亮³

(1. 南京航空航天大学土木工程系, 江苏 南京 210016; 2. 江苏镇江建科建筑科学研究院有限公司, 江苏 镇江 212004;
3. 江苏省建筑科学研究院有限公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 根据事故树分析 FTA 的原理, 建造了排桩支护结构体系的事故树图; 提出了将专家调查的失事基坑工程统计频率与级差概率相结合的方法来确定底事件的概率的方法; 在确定最小割集的基础上, 进行了顶事件概率的计算, 对于相交的割集通过采用将最小割集中出现的相交和化为不交和的方法 - 递推化法来实现; 最后通过重要度分析评价, 对基本事件的重要度进行排序, 以便寻求对顶事件发生事故最有影响的潜在因素, 并据此进行安全评价报告, 指出相应安全对策及建议。

关键词: 基坑工程; 事故树分析; 最小割集; 底事件概率

中图分类号: TU413.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)06-0960-06

作者简介: 张小平(1965-), 女, 山西平陆人, 博士, 副教授, 从事岩土工程的教学与研究。Email: zhangxp@nuaa.edu.cn。

Application of FTA in safety assessment of row piles of excavation engineering

ZHANG Xiao-ping¹, WANG Jie², HU Ming-liang³

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Jiangsu Zhenjiang Research Institute of Building Science Co., Ltd., Zhenjiang 212004, China; 3. Jiangsu Research Institute of Building Science Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: According to the theories of fault tree analysis (FTA), the fault tree diagram of retaining structure system with row piles is established. The probability method of combining the statistical frequency and the progression probability of accidental excavations investigated by experts to verify the probability of bottom events is proposed. The top events according to the probability of the basis of verifying the minimal cut set are calculated. The intersecting cut set is obtained through the recursive algorithms by using the intersecting and non-intersecting in the minimal cut set. The basic events are rearranged based on the importance according to the importance analysis to find out the most influentially potential factor for the occurrence of the top events. Also, a safety evaluation report is finished, and the corresponding safety measurements are suggested.

Key words: excavation engineering; FTA; minimal cut set; probability of basic event

0 引言

安全评价以实现工程和系统安全为目的, 对工程、系统中存在的危险和有害因素进行识别与分析, 判断其发生事故的可能性及严重程度, 提出安全对策建议, 从而为工程、系统制定防范措施和管理决策提供科学依据。安全评价的程序主要包括: 准备阶段, 危险、有害因素识别与分析, 定性定量评价, 提出安全对策措施, 形成安全评价结论及建议, 编制安全评价报告^[1]。常用的安全评价方法有安全检查表 (SCL)、故障类型及影响分析(FMEA)、事故树分析(FTA)、事件树分析(ETA)等。

目前, 事故树分析法即 FTA 法被公认为是对系统进行安全评价比较好的方法之一, 已经在化工、航空航天、电子等方面有了飞跃的发展。该法的逻辑关系

一目了然, 最终导致事故的因素明确, 能够分析并预测顶事件发生的概率, 通过最小割集确定所有可能导致顶事件发生的潜在破坏模式, 通过重要度分析可以确定出对顶事件发生影响较大的事件。

基坑工程大多紧邻城市干道, 周围往往布置着很多城市生命线工程, 以及旧建筑物, 一旦发生破坏, 往往造成很大的经济损失和社会影响。基坑工程的特点之一是安全储备较小, 风险性较大, 事故率高。基于 FTA 法的优点, 国内已有一些学者将其引入基坑工程领域, 但仅限于方法和思路的研究^[2-5], 如何给出事故树底事件的概率, 计算顶事件的概率, 仍然是 FTA

应用于基坑工程事故树分析的一个难以解决的问题。

本文以排桩支护结构为例, 建造基坑工程事故树, 并结合曾宪明^[6]、唐业清^[7]、边亦海^[8]对我国基坑工程事故率的调查结果, 以及级差概率给定底事件的概率, 研究事故树分析法在基坑工程中的应用, 计算基坑工程事故发生的顶事件概率, 分析导致基坑工程失效破坏的主要潜在因素, 进行安全评价报告, 并提出基坑工程的安全对策措施, 为避免基坑事故的发生有着重大意义。

1 事故树的数学描述

设 x_i 与 f 分别表示底事件和顶事件的状态变量, 均仅取 0 或 1 两种状态。顶事件状态 f 完全由事故树中底事件状态 X 所决定, 即

$$f = f(X) \quad , \quad (1)$$

式 (1) 中, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 称 $f(X)$ 为 FTA 的结构函数。其中 $i = 1, 2, \dots, n$, n 为底事件的总数。

当顶事件 T 发生, 即相当于 $f=1$, 与此状态相应的底事件状态为元部件、子系统故障状态, 相当于 $x_i=1$ 。

当 x_i 仅取 0, 1 时, 与门 (条件与门)、或门 (条件或门) 的结构函数分别为

$$f(X) = \prod_{i=1}^n x_i \quad , \quad (2)$$

$$f(X) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i) \quad . \quad (3)$$

2 基坑支护结构 FTA 的应用研究

2.1 基坑支护结构事故树的建造

以排桩支护结构为例, 基坑工程事故树绘制的一般思路及需要考虑的因素: ①顶事件是该基坑工程支护结构体系事故; ②基坑工程事故一般分为支护结构变形过大造成周围建筑物及地下管线破坏和支撑结构体系破坏; ③基坑支护结构体系一般包括挡土体系、止水降水排水体系和支撑体系, 它在土方开挖施工、进行土水压力计算、地下水的作用方面常出现问题; ④通过工程项目从建设需求到最终建成投入使用, 涉及到的建设各方包括建设单位、勘察单位、设计单位、施工单位和监理单位。

绘制事故树应遵循从顶到底的顺序。顶事件是排桩支护结构体系事故, 中间事件是从挡土结构、挡水结构和内支撑系统开始层层往下分析, 分为灌注桩破坏、基坑涌水涌砂破坏和支撑体系破坏, 逻辑门符号为“或门”, 根据基坑排桩支护结构体系及其破坏的特点和故障树原理^[8], 逐级绘制排桩支护工程体系事故

树, 见图 1, 事故树中的符号含义见表 1。

表 1 图 1 事故树中符号的意义

Table 1 Meanings of symbols in Fig. 1

符号	意义
x_1	超挖
x_2	挖土等机械随意碰撞支撑
x_3	支撑间距过大
x_4	支撑长细比过大
x_5	kj/g' 为上层滞水或潜水引起涌水涌(砂)的条件公式, g' 为土的浮重度, k 为安全系数, j 为最大渗流力
x_6	$\sum g_i h_i (g_w h)$ 为承压水引起涌水(土)的条件公式, g_i, h_i 为基坑开挖后底面至含水层顶板的土层的重度、高度, g_w 为水的重度, H 为承压水头高于含水层顶板的高度
x_7	抗弯刚度设计不合理
x_8	桩嵌固深度不足
x_9	对被动土压力估计过大
x_{10}	基坑超载或附加重型动载作用
x_{11}	未按要求施加相应的预压力
x_{12}	架设支撑滞后于土体开挖
x_{13}	围檩与灌注桩未完全密接
x_{14}	地下水位降得不够
x_{15}	坑底存在砂性土层
x_{16}	承压水压力水头较大
x_{17}	未作封底处理
x_{18}	旋喷桩缩颈或断桩
x_{19}	旋喷桩与灌注桩未完全密接
x_{20}	地下管线漏水或暴雨作用
x_{21}	存在富水的粉土、淤泥质土
x_{22}	支撑强度设计不足
x_{23}	支撑材质负偏差
x_{24}	设计对温度应力考虑不足
x_{25}	立柱间距过大
x_{26}	立柱基础持力层选择不当
x_{27}	支撑上增加设计未考虑的荷载
x_{28}	泵送机械故障或导管堵塞
x_{29}	沉渣过厚或塌孔
x_{30}	岩土工程勘察报告不准确
x_{31}	设计中土体强度指标偏大
x_{32}	水土压力计算偏差较大
x_{33}	防排水措施不力

2.2 最小割集确定和顶事件概率计算

(1) 最小割集的确定

根据图 1 排桩支护工程体系事故树, 用布尔代数及集合运算法则的吸收律和等幂律求最小割集: $T = A_1 + A_2 + A_3 = x_7 + x_8 + x_{28} + x_{29} + x_{30} + x_{31} + x_{32} + x_{10} +$

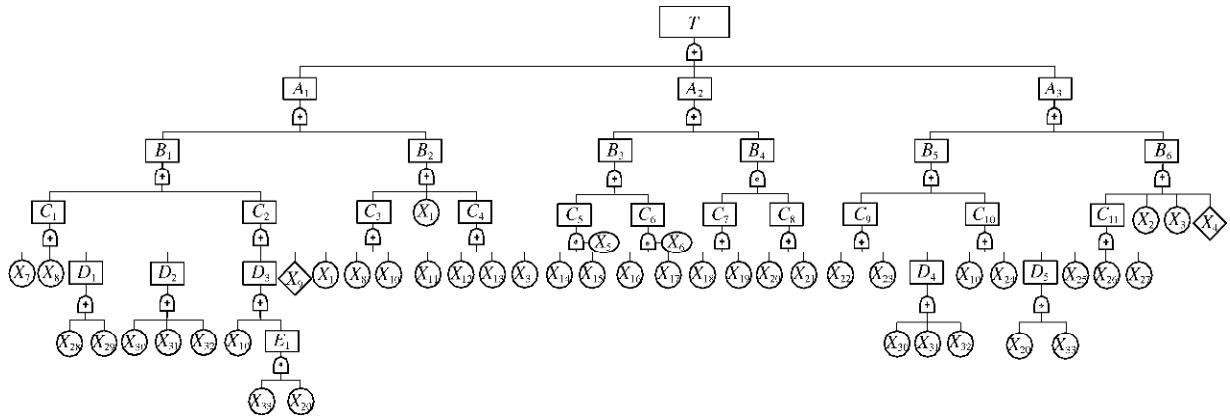


图 1 排桩支护工程体系事故树

Fig. 1 Fault tree of retaining structure system with row piles

$$\begin{aligned}
 & x_{33}x_{20} + x_9 + x_1 + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_3 + x_5x_{14}x_{15} + x_6x_{16}x_{17} + \\
 & x_{18}x_{20} + x_{18}x_{21} + x_{19}x_{20} + x_{19}x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + \\
 & x_{26} + x_{27} + x_2 + x_4
 \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)看出, 共得出 29 个最小割集, 分别为

$$\begin{aligned}
 & \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_{28}\}, \{x_{29}\}, \{x_{30}\}, \{x_{31}\}, \{x_{32}\}, \{x_{10}\}, \{x_{33}x_{20}\}, \\
 & \{x_9\}, \{x_1\}, \{x_{11}\}, \{x_{12}\}, \{x_{13}\}, \{x_3\}, \{x_5x_{14}x_{15}\}, \{x_6\} \\
 & \{x_{16}x_{17}\}, \{x_{18}x_{20}\}, \{x_{18}x_{21}\}, \{x_{19}x_{20}\}, \{x_{19}x_{21}\}, \{x_{22}\}, \\
 & \{x_{23}\}, \{x_{24}\}, \{x_{25}\}, \{x_{26}\}, \{x_{27}\}, \{x_2\}, \{x_4\}
 \end{aligned} \quad (5)$$

每个最小割集代表一种导致事故发生的模式, 说明排桩支护结构体系有 29 种潜在的破坏模式。同时发现, 有多达 22 个最小割集中只含有 1 个底事件, 这说明排桩支护结构体系中, 经常出现即使很小的一个不安全因素(事件)也可能导致整个体系失效。

(2) 底事件的概率计算

为了确定基坑事故树底事件的概率, 本文提出将统计资料调查显示的频数与级差概率情况相结合的思想, 即底事件的概率等于级差概率与权重系数的乘积。根据唐业清调查的 162 起基坑工程事故的统计资料^[7], 得到被调查事故发生的频数比例为: 设计单位: 施工单位: 建设单位: 勘察单位: 监理单位=0.46: 0.415: 0.06: 0.035: 0.03。

为了计算方便, 并且避免出现计算结果的顶事件概率大于 1, 将这一比例调整为: 设计单位: 施工单位: 建设单位: 勘察单位: 监理单位=0.045: 0.040: 0.006: 0.004: 0.003。

把该比例的每一项称为权重系数考虑到事故树的基本事件概率中, 这可以有效地避免单纯利用安全系统工程介绍的事件概率的确定方法带来的与基坑工程事故调查数据不一致的矛盾。

级差概率采用美国格林厄姆(K.J. Graham)和金尼(G.F. Kinney)提出的作业危险性评价法, 它是对

人员在具有潜在危险性环境中作业时危险性的一种简单易行的半定量评价法。发生危险事件的可能性分值见表 2^[9]。根据具体基坑工程, 忽略最后 2 种可能性(极不可能和实际上不可能), 只讨论前 5 种可能性。表 2 中的分值, 为了不使级差概率大于 1, 将其值分别乘以 0.09, 各底事件的级差概率、权重系数以及最终得出的事件概率见表 3。

表 2 发生危险事件的可能性分值

Table 2 Possibility of risk event

危险事件的可能性	取值(分值)
完全可以被预料到	10
相当可能	6
不经常, 但可能	3
很少可能	1
可设想, 但极少可能	0.5
极不可能	0.2
实际上不可能	0.1

(3) 顶事件的概率计算

若各个最小割集中彼此无重复的基本事件, 顶事件的发生概率^[10]为

$$P(T) = \prod_{r=1}^{N_G} \prod_{i \in G_r} q_i \quad (6)$$

式中 r 为最小割集序数; i 为基本事件序数; q_i 为第 i 个基本事件的概率; N_G 为系统中最小割集数; G_r 为第 r 个最小割集。

若最小割集相互间有重复事件, 即最小割集相交时, 采用将最小割集中出现的相交和化为不交和的方法——递推化法^[11]:

$$T = F(1) + F(2) + \mathbf{L} \mathbf{L} + F(N_K) = \sum_{i=1}^{N_K} F(I), \quad (7)$$

其中

$$F(I) = C(I)K(I), \quad (8)$$

$$C(I) = \begin{cases} 1 & \text{当 } I = 1 \\ C(I-1)\bar{K}(I-1) & \text{当 } I = 2, 3, \mathbf{L}, N_K \end{cases}, \quad (9)$$

$K(I) = K_i$, $\bar{K}(I-1) = \bar{K}_{i-1}$ 。其中, \bar{K}_i 为 K_i 的补集, N_K 为事故树最小割集的总数。

表 3 底事件的概率表

Table 3 Probability of basic event

底事件	级差概率	权重系数	事件概率
x_1	0.9	0.045	0.0405
x_2	0.54	0.045	0.0243
x_3	0.27	0.040	0.0108
x_4	0.045	0.040	0.0018
x_5	0.27	0.045	0.0122
x_6	0.54	0.045	0.0243
x_7	0.27	0.040	0.0108
x_8	0.54	0.045	0.0243
x_9	0.27	0.040	0.0108
x_{10}	0.9	0.045	0.0405
x_{11}	0.54	0.045	0.0243
x_{12}	0.54	0.045	0.0243
x_{13}	0.09	0.045	0.0040
x_{14}	0.54	0.045	0.0243
x_{15}	0.09	0.040	0.0036
x_{16}	0.54	0.004	0.0022
x_{17}	0.27	0.045	0.0122
x_{18}	0.27	0.045	0.0243
x_{19}	0.54	0.045	0.0243
x_{20}	0.9	0.045	0.0405
x_{21}	0.045	0.004	0.0002
x_{22}	0.27	0.040	0.0108
x_{23}	0.09	0.003	0.0003
x_{24}	0.09	0.040	0.0036
x_{25}	0.09	0.040	0.0036
x_{26}	0.27	0.040	0.0108
x_{27}	0.54	0.045	0.0243
x_{28}	0.27	0.045	0.0122
x_{29}	0.27	0.045	0.0122
x_{30}	0.54	0.004	0.0022
x_{31}	0.9	0.045	0.0405
x_{32}	0.54	0.040	0.0216
x_{33}	0.54	0.045	0.0243

为了方便计算排桩支护结构工程体系事故树的顶事件发生概率, 进行如下简化: ①将 33 个基本事件的概率分别记为 $q_1, q_2, \mathbf{L}, q_{33}$; ②将所有只含一个事件的最小割集 (记为 G_1), 含有 2 个事件的最小割集 (记为 G_2), 含有 3 个事件的最小割集 (记为 G_3) 分开考

虑。

G_1 , G_2 与 G_3 无任何交集, 故顶事件 T 的发生概率可以简化为

$$P(T) = P(G_1) + P(G_2) + P(G_3) \quad (10)$$

这样简化的目的是这三部分互相独立, 方便概率计算。由式 (6) 可看出, G_1 每个部分都互相独立, 又由于仅含一个事件, 将它们所含的事件概率相加即可; G_3 共有 2 个最小割集, 分别为 $\{x_5 x_{14} x_{15}\}$, $\{x_6 x_{16} x_{17}\}$, 每个最小割集含有 3 个独立事件, 将各事件的概率相乘, 可按公式 (6) 计算, 得 $P(G_1) + P(G_3) = 0.3189$ 。

由式 (5) 得

$$G_2 = x_{33}x_{20} + x_{18}x_{20} + x_{18}x_{21} + x_{19}x_{20} + x_{19}x_{21} \quad (11)$$

由式 (11) 看出, G_2 的最小割集出现相交, 因此先将 G_2 化成不交化和, 应用式 (8)、(9)、(10) 计算 $P(G_2)$ 得 $G_2 = F(G_2) = x_{33}x_{20} + \bar{x}_{33}x_{18}x_{20} + \bar{x}_{20}x_{18}x_{21} + \bar{x}_{33}x_{18}x_{19}x_{20} + \bar{x}_{20}\bar{x}_{18}x_{19}x_{21}$ 。求得 $P(G_2) = 0.0024$ 。则 $P(T) = 0.3213$, 即顶事件的概率为 0.3213。

2.3 重要度分析

根据事故树计算顶事件的概率, 可以确定出整个基坑系统可能发生事故的概率, 但另一重要目的是通过 FTA 计算, 寻求各事件引起顶事件发生事故的可能性大小, 故引入重要度分析, 可以计算出各事件引起顶事件发生事故的重要度。重要度计算包括^[10-12]:

结构重要度

$$I_f(i) = 1 - \prod_{x_j \in k_j} \left(1 - \frac{1}{2^{n_j-1}}\right); \quad (12)$$

概率重要度

$$I_g(i) = \frac{\partial Q}{\partial q_i} \quad ; \quad (13)$$

临界重要度

$$CI_g(i) = \frac{\frac{\partial Q}{\partial q_i}}{Q} = I_g(i) \cdot \frac{q_i}{Q} \quad ; \quad (14)$$

F-V 重要度

$$I_{FV}(i) = \frac{P(\prod_{j=1}^{N_i} k_j^{(i)}, x_i = 1)}{Q} \quad . \quad (15)$$

其中, n_j 为第 i 个底事件所在第 j 个最小割集 k_j 的事件总数, Q 为顶事件的发生概率即 $P(T)$, q_i 为第 i 个底事件的发生概率, $k_j^{(i)}$ 是包含底事件 x_i 的最小割集, N_i 是系统包含底事件 x_i 最小割集的数目。

表 4 临界重要度排序表

Table 4 Order of critical importance

底事件	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}
排序	1	4	12	21	28	31	12	4	12	1	4	4	17	28	28	31	31
底事件	X_{18}	X_{19}	X_{20}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}	X_{25}	X_{26}	X_{27}	X_{28}	X_{29}	X_{30}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	
排序	26	25	23	27	12	22	18	18	12	4	10	10	20	3	9	24	

通过式(12)、(13)、(14)、(15)以及不交化法对已得出的最小割集来求4种重要度。计算发现22个事件的结构重要度和概率重要度相同,这是由于有22个最小割集只含有1个事件。分析其原因,本文中故树底事件概率的给定,是将专家调查的失事工程资料与级差概率相结合,最终会存在底事件概率相同的情况。同时发现这些底事件又都存在于仅含该事件本身的最小割集中。由于很多最小割集中只含一个事件,使得这两种重要度排序出现很多事件相同的情况,因此仅根据结构重要度和概率重要度评价是不够的。

而临界重要度和F-V重要度的计算结果大致相同,可采用两者之一计算重要度。重要度的绝对值大小没有意义,其排序更有意义,有利于寻找基坑支护系统事故树中对顶事件的事故发生最有影响的底事件,表4是用临界重要度计算得到的排序表。这一排序结果,决定着各事件对顶事件即基坑工程支护结构体系的影响程度,对安全评价报告的编制有重要的指导意义。由表4可以看出, x_1 和 x_{11} 超挖和附加荷载增大其影响作用最大;并发现涉及水害的基本事件 x_{20} 在33个事件中排序23,分析原因,是由于涉及到水害的事件都仅处在“与门”结构上,而处在“与门”结构上的事件不可能单独出现在一个最小割集中,在各种重要度计算时会受到处在同一最小割集事件的影响。安全评价报告应对重要度排序靠前的事件进行评价,同时应考虑涉及处在“与门”结构上的事件中重要度排序最前的几个事件,并指出相应的安全对策措施及建议,由于篇幅所限,不多赘述。

对比表3、4,可以看出重要度排序取决于底事件的概率大小,底事件概率越大,其重要度排序越靠前,而底事件的概率则取决于人对各事件的认知程度,以及调查结果。因此,底事件概率的确定是极其重要和复杂的,本文提出的底事件概率的确定方法,是建立在唐业清等^[7]对基坑事故调查统计的基础上,因此仍需要大量的调查统计来完善这一工作,同时应结合具体基坑支护工程的设计、施工和管理情况,以更准确地给定事故树的底事件概率。

3 结 论

(1) 根据事故树FTA的原理,在分析排桩支护

结构体系发生事故的原因及特点的基础上,提出基坑工程事故树绘制的一般思路及需要考虑的因素,据此,建造了排桩支护结构体系的事故树图。

(2) 提出了底事件的概率的确定方法,是将专家调查的失事工程资料与级差概率相结合,即由权重系数乘以级差概率,权重系数是由专家对多年基坑事故统计数据得出,而级差概率则是一种半定量的确定方法,底事件的概率则取决于人对各事件的认知程度以及调查结果,仍需要大量的调查统计来完善这一工作,同时应结合具体基坑支护工程的设计、施工和管理情况,才能得出更为准确的事故树的底事件概率。

(3) 在确定最小割集的基础上,独立事件的最小割集的概率相加,不相交的非独立事件概率相乘,相交的割集通过采用将最小割集中出现的相交和化为不交和的方法-递推化法来实现,通过这种方法可以比较简单地根据底事件的概率求出顶事件的概率。

(4) 计算重要度的目的,是对基本事件的重要度排序,以便寻求对顶事件发生事故最有影响的潜在因素。结果表明,由临界重要度排序发现,超挖、基坑超载或附加重型动载作用对排桩支护结构体系的安全影响最大,而处在“与门”结构上的事件由于不可能单独出现在一个最小割集中,在重要度计算时会受到处在同一割集的其他事件的影响。

(5) 应该根据重要度排序编制安全评价报告,即应对重要度排序靠前的事件进行评价,同时应考虑涉及处在“与门”结构上的事件中重要度排序最前的几个事件,并指出相应的安全对策措施及建议。

参 考 文 献:

- [1] 国家安全生产监督管理局.国家安全生产监督管理[M].北京:煤炭工业出版社, 2005. (State Administration of Work Safety. Supervision and management of work safety[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [2] 张 娇. 深基坑工程失效概率预测研究[J]. 路基工程, 2009(6): 17 - 18. (ZHANG Jiao. Research On Invalidation Probability Forecasting For Deep Foundation Pit Works[J]. Subgrade Engineering, 2009(6): 17 - 18. (in Chinese))
- [3] 张 建. FTA 分析方法在基坑工程中的应用研究[J]. 铁道

- 建筑, 2009(2): 74 - 76. (ZHANG Jian. Study on application of FTA (Fault Tree Analysis) method to foundation pit engineering[J]. Railway Architecture, 2009(2): 74 - 76. (in Chinese))
- [4] 龙小梅, 陈龙珠. 基坑工程安全的故障树分析方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2005(12): 363 - 368. (LONG Xiao-mei, CHEN Long-zhu. Safety assessment of deep excavation engineering with FTA method[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005(12): 363 - 368. (in Chinese))
- [5] 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(5): 664 - 668. (BIAN Yi-hai, HUANG Hong-wei. Fuzzy fault tree analysis of failure probability of SMW retaining structures in deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(5): 664 - 668. (in Chinese))
- [6] 曾宪明. 基坑与边坡事故警示录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (ZENG Xian-ming. Warning from the accident of excavation engineering and slope[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))
- [7] 唐业清, 李启民, 崔江余. 基坑工程事故分析与处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (TANG Ye-qing, LI Qi-min, CUI Jiang-yu. Accident analysis and treatment of excavation engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))
- [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 of area based on risk analysis[D]. Shanghai, Tongji University, 2006. (in Chinese))
- [9] W.E.维齐利. 故障树手册[M]. 北京: 原子能出版社, 1987. (WEIQILI W E. Handbook of fault tree[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1987. (in Chinese))
- [10] 袁昌明, 张晓冬, 章保东. 安全系统工程[M]. 北京: 中国计量出版社, 2006. (YUAN Chang-ming, ZHANG Xiao-dong, ZHANG Bao-dong. Safety system engineering[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2006. (in Chinese))
- [11] 章国栋, 陆廷孝, 屠庆慈, 等. 系统可靠性与维修性的分析与设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990. (ZHANG Guo-dong, LU Ting-xiao, TU Qing-ci, et al. Analysis and design of reliability and servicing of system[M]. Beijing: Beihang University Press, 1990. (in Chinese))
- [12] 徐志胜, 吴超. 安全系统工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. (XU Zhi-sheng, WU Chao. Safety system engineering[M]. China Machine Press, 2007. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 北京金土木软件技术有限公司
- 封 3 重庆市永固工程拉筋带厂有限公司
- 封 4 上海分元土木工程科技有限公司
- 后插 1 广州中海达卫星导航技术股份有限公司
- 后插 2 常州金土木工程仪器有限公司
- 后插 3 北京理正软件设计研究院有限公司
- 后插 4 徕卡测量系统贸易(北京)有限公司