

基坑锚杆脱粘风险的事故树分析

李金和, 郝建斌

(长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 根据事故树分析原理, 构造了基坑锚杆支护结构脱粘的事故树图; 提出了将专家统计的失事基坑工程频率与级差概率相结合来确定基本事件概率; 在确定最小割集的基础上, 进行了顶事件概率的计算; 最后通过敏感性分析, 对各基本事件的敏感性进行排序, 揭示基本事件对于顶事件的贡献程度. 分析结果表明, 基坑锚杆支护结构脱粘的概率为 0.180 64; 土层锚杆脱粘失效对锚固段长度最为敏感; “预应力施加过早过大”、“砂浆配比不合理”、“灌浆方式不合理”、“浆体密实度不足”、“锚固体表面积过小”、“荷载过大”等几个基本事件的敏感系数排序靠前, 在基坑锚杆的设计与施工过程中, 必须引起足够重视.

关键词: 基坑锚杆工程; 事故树分析; 底事件概率; 敏感性分析

中图分类号: TU94+2; X947

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)01-0071-05

建设工程中常用的风险评估方法有专家评议法、蒙特卡罗模拟法、模糊数学法、事件树法(ETA)、事故树法(FTA)、层次分析法(AHP)等^[1]. 事故树分析(Fault Tree Analysis, 简称 FTA)是 20 世纪 60 年代美国贝尔实验室的 T. J. Watson 等在图论基础上发展起来的一种逻辑分析法, 是从结果到原因描述事故的有向逻辑树图. 其最大优点是可以分析事故深层原因, 并通过基于事故树最小割集的敏感性分析方法判定系统的危险度及基本事件对于顶事件的贡献程度.

在基坑工程中, 由于土体性质的复杂多变及作业环境的恶化, 锚杆工程出现病害甚至失事的现象屡见不鲜, 给工程建设带来极大的安全隐患, 严重的甚至造成工程中断、人员伤亡和带来重大的经济损失^[2]. 基于 FTA 法的优点, 国内已有一些学者将其引入基坑锚杆工程领域, 但仅限于方法和思路的研究^[3-8], 无法从定量的角度准确地反映风险水平的高低; 而且, 也无法将已有的研究成果整合到现有的研究中, 即历史的经验积累并没有很好地得以利用, 对各基本事件的敏感性排序也无法准确考虑.

本文采用事故树分析法, 建造了基坑锚杆支护结构脱粘的事故树, 结合曾宪明^[9]、唐业清^[10]、边亦海^[11]对我国基坑工程事故率的统计结果, 以及级差概率给定基本事件的概率, 研究事故树分析法在基坑锚杆工程中的应用, 计算该类工程事故发生的顶事件概率, 对各风险因素的敏感性进行排序, 为系统的风险管理和预防措施的制定提供理论依据.

1 事故树的计算分析

事故树分析中的计算主要指的是事故树的定性分析、定量分析以及基本事件的重要度分析. 其中定性分析包括最小割集和最小径集的求解, 定量分析是指顶事件发生概率的求解, 基本事件的重要度则包括基本事件的结构重要度、概率重要度和临界重要度.

设 x_i 与 ϕ 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 ϕ 完全由事故树中底事件状态 X 所决定, 即

$$\phi = \phi(X) \quad (1)$$

式 (1) 中, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 称 $\phi(X)$ 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 $\phi=1$, 与此状态相对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

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

$$\varphi(x)=1-\prod_{i=1}^n(1-x_i)$$

(3)

2 基坑锚杆脱粘事故树的建造

基坑锚杆支护结构脱粘事故树建造需要考虑以下几个因素：①顶事件是基坑锚杆脱粘事故；②锚杆脱粘事故分为杆体与灌浆体界面脱粘及灌浆体与土层界面脱粘两种情况；③基坑锚杆支护工程施工过程中所涉及的相关单位，包括设计单位、勘察单位、建设单位、施工单位和监理单位。

绘制事故树应遵循从顶到底的原则。顶事件是基坑锚杆脱粘事故，中间事件分为杆体与灌浆体界面脱粘及灌浆体与土层界面脱粘，逻辑门符号为“或门”。根据基坑锚杆支护结构脱粘破坏的特点及影响因素和事故树原理^[12]，逐级绘制基坑锚杆脱粘事故树，见图 1，事故树中的符号含义见表 1。

表 1 事故树中的符号含义
Tab.1 Meanings of symbols in Fig.1

| 基本事件 | 符号含义 | 基本事件 | 符号含义 |
|----------|------------|----------|---|
| X_1 | 荷载过大 | X_{13} | 坑底存在砂性土层 |
| X_2 | 预应力施加过早过大 | X_{14} | 承压水压力水头较大 |
| X_3 | 锚固段表面未清理干净 | X_{15} | 未作封底处理 |
| X_4 | 砂浆配比不合理 | X_{16} | $kj > \gamma'$ ，是上层滞水或潜水引起涌水（涌砂）的条件公式， γ' 为土的浮重度， k 为安全系数， j 为最大渗流力 |
| X_5 | 养护不当 | | |
| X_6 | 浆体密实度不足 | | |
| X_7 | 灌浆方式不合理 | X_{17} | $\sum \gamma_i h_i < \gamma_w h$ ，是承压水引起涌水（土）的条件公式 γ_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， γ_w 为水的重度， h 为承压水头高于含水层顶板的高度 |
| X_8 | 锚固段长度设计不足 | | |
| X_9 | 锚固体表面积过小 | | |
| X_{10} | 雨水或管道水渗漏 | | |
| X_{11} | 防排水措施不力 | | |
| X_{12} | 地下水位降得不够 | | |

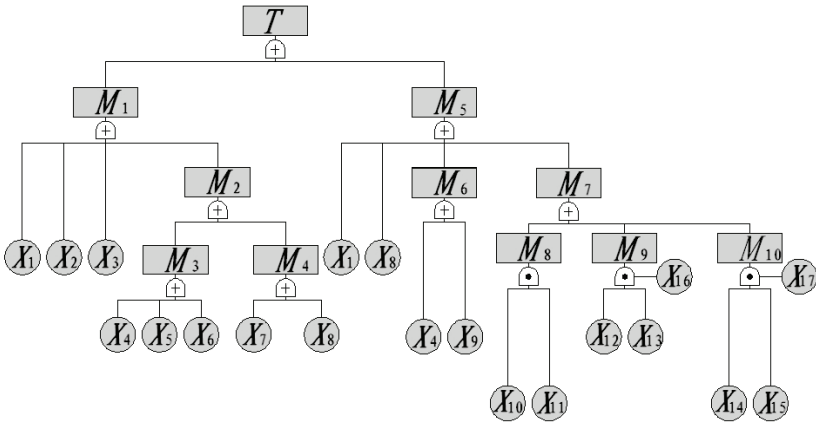


图1 锚杆脱粘事故树
Fig.1 Fault tree of anchors' debonding

3 基坑锚杆脱粘事故树的分析

3.1 最小割集的确定

在图 1 的基础上，利用布尔代数及集合运算法则求得基坑锚杆脱粘事故树的最小割集为： $\{X_4\}$ 、 $\{X_1\}$ 、 $\{X_2\}$ 、 $\{X_3\}$ 、 $\{X_{10}, X_{11}\}$ 、 $\{X_8\}$ 、 $\{X_{12}, X_{13}, X_{16}\}$ 、 $\{X_{14}, X_{15}, X_{17}\}$ 、 $\{X_7\}$ 、 $\{X_9\}$ 、 $\{X_5\}$ 、 $\{X_6\}$ 。

每个最小割集代表一种可能导致事故发生的模式，说明土层锚杆支护体系有 12 种潜在的破坏模式。同时，有多达 9 个最小割集中只含有 1 个底事件，这说明锚杆支护结构体系中，即使很小的一个不安全事件也可能导致整个脱粘事故的发生。

3.2 底事件的概率计算

为确定基坑锚杆支护工程脱粘事故树底事件的的概率, 本文提出将调查资料统计的频数比例与级差概率相结合的思想, 即基本事件的概率等于级差概率与权重系数的乘积。

根据唐业清等对 162 起基坑工程事故的调查统计资料^[10], 基坑事故发生的频数比例为: 监理单位: 勘察单位: 设计单位: 施工单位: 建设单位=0.03: 0.035: 0.46: 0.415: 0.06。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: 监理单位: 勘察单位: 设计单位: 施工单位: 建设单位=0.003: 0.004: 0.045: 0.045: 0.006。为避免利用系统工程方法确定的基本事件概率与上述基坑工程事故调查数据不一致的矛盾, 将该比例的每一项作为权重系数计入到事故树的基本事件概率中。

基本事件的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^[12]。危险事件发生的可能性分值见表 2。根据锚杆工程具体情况, 只讨论前 5 种可能性, 忽略最后的极不可能和实际上不可能两种可能性。

表 2 中, 对各基本事件的可能性分值进行赋值时, 采用专家调查法进行, 并取其平均值; 为了不使级差概率大于 1, 将其值分别乘以 0.09。各基本事件的级差概率、权重系数以及最终概率见表 3。

表 2 发生危险性事件的可能性分值

| Tab.2 Possibility of risk event | |
|---------------------------------|-----|
| 事故发生的可能性 | 分数值 |
| 完全可以预料 | 10 |
| 相当可能 | 6 |
| 可能、但不经常 | 3 |
| 可能性小, 完全意外 | 1 |
| 很不可能, 可以设想 | 0.5 |
| 极不可能 | 0.2 |
| 实际不可能 | 0.1 |

表 3 基本事件概率表

Tab.3 Probability of basic event

| 基本事件级差概率权重系数 事件概率 | | | | 基本事件级差概率权重系数 事件概率 | | | |
|-------------------|------|-------|----------|-------------------|------|-------|---------|
| X_1 | 0.37 | 0.045 | 0.016 65 | X_{10} | 0.80 | 0.040 | 0.032 |
| X_2 | 0.72 | 0.040 | 0.028 8 | X_{11} | 0.25 | 0.040 | 0.01 |
| X_3 | 0.62 | 0.003 | 0.001 86 | X_{12} | 0.60 | 0.045 | 0.027 |
| X_4 | 0.65 | 0.040 | 0.026 | X_{13} | 0.01 | 0.040 | 0.004 |
| X_5 | 0.47 | 0.003 | 0.001 41 | X_{14} | 0.60 | 0.004 | 0.002 4 |
| X_6 | 0.60 | 0.040 | 0.024 | X_{15} | 0.30 | 0.045 | 0.013 5 |
| X_7 | 0.60 | 0.040 | 0.024 | X_{16} | 0.30 | 0.045 | 0.013 5 |
| X_8 | 0.78 | 0.045 | 0.035 1 | X_{17} | 0.60 | 0.045 | 0.027 |
| X_9 | 0.50 | 0.045 | 0.022 5 | | | | |

3.3 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^[12]为:

$$p(T)=\bigcup_{r=1}^{N_G}\prod_{X_i\in G_r}q_i$$
 (4)

式中: i 为基本事件序数; r 为最小割集序数; q_i 为第 i 个底事件的最终概率; N_G 为最小割集数; G_r 为第 r 个最小割集。

为方便计算基坑锚杆脱粘事故树顶事件的发生概率, 进行如下简化: ①将各个基本事件的概率分别记为 q_i ; 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 ; 且将 G_1 、 G_2 、 G_3 分开考虑。

G_1 , G_2 , G_3 无任何交集, 故锚杆脱粘顶事件 T 的发生概率可以简化为:

$$P(T)=P(G_1)+P(G_2)+P(G_3)$$
 (5)

简化的目的是 G_1 、 G_2 、 G_3 三部分互相独立, 方便概率计算。由式 (4) 可看出, G_1 每个部分都互相独立, 且仅含一个事件, 将它们所含的事件概率相加即可得 $P(G_1)=0.180\ 32$; G_3 有 2 个最小割集, 分别为 $\{X_{12}, X_{13}, X_{16}\}$ 、 $\{X_{14}, X_{15}, X_{17}\}$, 每个最小割集含有 3 个独立事件, 按公式 (4) 计算, 将各事件的概率相乘, 所得结果非常小, 对顶事件发生概率的贡献可以忽略; G_2 只有一个最小割集, $G_2=\{X_{10}, X_{11}\}$, 按公

式 (4) 计算, 得 $P(G_2) = 0.032 \times 0.01 = 0.000\ 32$.

$P(T) = 0.180\ 32 + 0.000\ 32 = 0.180\ 64$, 即基坑锚杆脱粘顶事件发生的概率为 0.180 64.

3.4 敏感性分析

根据事故树计算顶事件的概率, 一方面可以确定出整个锚杆支护系统可能发生脱粘事故的概率, 另一方面可以通过敏感性分析, 揭示各个基本事件对于顶事件的贡献程度.

基本事件敏感系数^[12]:

$$CI_g(i) = \frac{\partial Q}{\partial q_i} \cdot \frac{Q}{q_i} = \frac{\partial Q}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{Q} \quad (6)$$

式中: Q 为顶事件的发生概率即 $P(T)$; q_i 为第 i 个基本事件的发生概率.

表 4 是用基本事件敏感系数计算得到的排序表. 敏感系数的绝对值大小没有意义, 其排序更有意义, 有利于寻找基坑锚杆脱粘事故树中对顶事件的事故发生最有影响的基本事件, 这一排序结果, 决定着各基本事件对顶事件即基坑锚杆脱粘事故的影响程度, 对安全评价报告的编制有重要的指导意义.

表 4 各基本事件敏感性排序
Tab.4 Risk factors' sensitivity

| 序号 | 基本事件 | 敏感系数 | 序号 | 基本事件 | 敏感系数 |
|----|----------|-------|----|----------|---------|
| 1 | X_8 | 0.194 | 8 | X_5 | 0.008 |
| 2 | X_2 | 0.159 | 9 | X_{10} | 0.001 8 |
| 3 | X_4 | 0.144 | 9 | X_{11} | 0.001 8 |
| 4 | X_7 | 0.133 | 10 | X_{12} | 0.000 6 |
| 4 | X_6 | 0.133 | 10 | X_{13} | 0.000 6 |
| 5 | X_9 | 0.124 | 11 | X_{14} | 0.000 2 |
| 6 | X_{17} | 0.092 | 11 | X_{15} | 0.000 2 |
| 6 | X_1 | 0.092 | 11 | X_{16} | 0.000 2 |
| 7 | X_3 | 0.010 | | | |

根据风险因素敏感性的分析可以看出, 土层锚杆脱粘失效对锚固段长度最为敏感; 在导致土层锚杆脱粘失效的原因中, “锚固段长度设计不足”、“预应力施加过早过大”、“砂浆配比不合理”、“灌浆方式不合理”、“浆体密实度不足”、“锚固体表面积过小”、“荷载过大”等几个因素排序靠前, 且这六个事件的敏感系数明显比其他事件大得多, 在土层锚杆的设计与施工过程中, 不可不引起重视.

并发现涉及水害的基本事件 X_{12} 在 17 个事件中排序 10, 分析原因, 主要是由于涉及到水害的事件都处在“与门”结构上, 而处在“与门”结构上的基本事件不可能单独出现在某一个最小割集中, 在敏感性计算时肯定会受到处在同一最小割集事件的影响.

对比表 3~4, 可以看出敏感系数排序与基本事件的概率大小有关, 基本事件概率越大, 其敏感系数排序越靠前, 而基本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, 基本事件概率的确定是极其重要和复杂的, 本文提出的基本事件概率的确定方法, 是建立在基坑事故调查统计的基础上. 针对基坑锚杆支护工程, 仍需要大量的调查统计来完善这一工作, 以更准确地给定事故树的基本事件概率.

4 结论

(1) 根据事故树的原理, 在分析基坑锚杆支护体系发生脱粘事故的原因及特点的基础上, 建造了其事故树图.

(2) 提出将权重系数与级差概率相结合的方法来确定底事件的概率. 级差概率则是一种半定量的确定方法, 权重系数则是由专家对多年基坑事故统计数据得出. 针对基坑锚杆支护工程, 仍需要大量的调查统计来完善这一工作, 以更准确地给定事故树的基本事件概率.

(3) 通过基本事件的敏感性排序, 寻求对顶事件发生事故最有影响的潜在因素; 结果表明, 土层锚杆脱粘失效对锚固段长度最为敏感; “预应力施加过早过大”、“砂浆配比不合理”、“灌浆方式不合理”、“浆体密实度不足”、“锚固体表面积过小”、“荷载过大”等几个基本事件的敏感系数排序靠前, 在土层锚杆的设计与施工过程中, 不可不引起重视.

(4) 编制安全评价报告时, 首先应对敏感性排序靠前的事件进行评价, 同时应考虑涉及处在“与门”结构上的事件中敏感性排序最前的几个事件, 并给出相应的安全对策措施及建议.

参考文献 References

- [1] 陈赓. 工程风险管理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
CHEN Bin. Project risk management[M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [2] 汪班桥. 土层锚杆常见病害破坏机理及防治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
WANG Banqiao. Study of failure mechanism and control measures on anchors' common diseases in clay [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [3] WANG J C, HOU W H, WANG X Z. Analysis of accident and risk sources factors for deep foundation pit[J]. Progress in Safety Science and Technology, 2005 (5): 476-481.
- [4] 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.
- [5] 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 Xiaomei, CHEN Longzhu. Safety assessment of deep excavation engineering with FTA method[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005(12): 363-368.
- [6] 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 Yihai, HUANG Hongwei. Fuzzy fault tree analysis of failure probability of SMW retaining structures in deep excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(5): 664-668.
- [7] 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(9): 2703-2707.
ZHOU Hongbo, GAO Wenjie, CAI Laibing, 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(9): 2703-2707.
- [8] 张小平, 王杰, 胡明亮. 事故树分析在排桩基坑工程安全评价中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2011(6): 960-965.
ZHANG Xiaoping, WANG Jie, HU Mingliang. Application of FTA in safety assessment of row piles of excavation engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011(6): 960-965.
- [9] 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 Xiaming. Warning from the accident of excavation engineering and slope[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999.
- [10] 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 Yeqing, LI Qimin, CUI Jiang-yu. Accident analysis and treatment of excavation engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999.
- [11] 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 Yihai. Selection of supporting system of deep excavations in soft soil of area based on risk analysis[D]. Shanghai, Tongji University, 2006.
- [12] 徐志胜, 吴超. 安全系统工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
XU Zhisheng, WU Chao. Safety system engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.

Debonding risk analysis of anchors in excavation engineering based on fault tree

LI Jinhe, HAO Jianbin

(School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to analysis theory of fault tree, the fault tree diagram of retaining structure system with anchors is established, and the method put forward to combine wrecking foundation trench project statistical frequency inquired by experts and differential probability to determine probability method of the bottom event. Based on confirming minimum cutset, the probability of top events is calculated. In the end, through sensitivity analysis, sensibilities of various basic events are sequenced to reveal contribution degree from basic events to the top event. It is shown from the analytic result that the debond probability of foundation trench bolting structure is 0.180 64 and the earth anchor debond invalidation is sensitive to length of the anchorage segment. basic events such as "too early and oversize application of pre-stress", "unreasonable mixture ratio of mortar", "unreasonable grouting mode", "insufficient mortar compactness", "less anchorage surface area", "oversize load", etc moved to the top. During design and construction process of earth anchor, attention to these problems has to be paid.

Key words: foundation trench anchor project; fault tree analysis; probability of bottom event; sensitivity analysis

(本文编辑 桂智刚)