

DOI:10.3969/j.issn.1003-0972.2018.01.028

基于事故树分析法的建筑施工安全评价研究

王 颂*,张 品,王雨枫

(信阳师范学院 建筑与土木工程学院,河南 信阳 464000)

摘 要:以河南省光山县“12·19”模板支架坍塌事故为实例,运用事故树分析法剖析了该事故的致因及安全隐患导致事故发生的详细过程,根据分析结果提出了科学高效的预防措施.结果表明:导致建筑施工模板支架坍塌事故的可能性有48种,但只要能够采取3组最小径集中的任何一组去采取有针对性的预防措施,该事故就可避免.

关键词:建筑施工安全;事故树分析;模板坍塌事故

中图分类号:TU714 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-0972(2018)01-0140-05

Research on Safety Assessment of Construction Based on Fault Tree Analysis Method

WANG Song*, ZHANG Pin, WANG Yufeng

(College of Architecture and Civil Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: Taking Guangshan County of Henan province “12·19” formwork collapse accident as an example, the fault tree analysis method was used to analyze the causes of accidents and safety hazards in the process of the accident in details, the scientific and effective preventive measures were put forward according to the results of the analyses. The results showed that there were 48 possibilities to cause the construction formwork collapse accident, but as long as any group of the 3 groups taking the minimum path set took effective preventive measures, the accident can be avoided.

Key words: construction safety; fault tree analysis; template collapse

0 引言

近年来,我国基础设施和工程建设的规模逐年扩大^[1].2006—2015年间,我国建筑施工安全事故死亡累计25 141人.2015年死亡人数为1891人,首次降至2000人以下,相对指标十万从业人员死亡率、千万平方米死亡率、百亿元产值死亡率均有所下降^[2].总体来看,建筑安全生产形势持续稳定好转,但并不乐观,建筑施工安全问题仍然不容轻视.因此,如何加强安全管理,减少施工事故的发生,是建筑工程施工管理过程中的一个重要问题.解决这一问题的关键之处是找出事故隐患,通过安全评价,采取有效的防范措施预防事故的发生.运用事故树分析法可以寻求事故发生的主要原因,为安全评价和防治对策提供可靠依据,从而实现提前

预测事故及不安全的因素,估计事故发生的可能后果,找到最经济的预防手段和方法的目的.

1 事故树分析法

事故树分析(Fault tree analysis)法^[3],也称故障树分析法,是从事故的最终结果出发,根据事件之间的直接逻辑关系,层层递进向下罗列出与事故发生相关的各基本因素事件,最终上下相连绘制成树形图的逻辑图形分析法.

事故树分析法是安全系统工程进行安全评价最为核心的分析方法^[4].该法通过各事件间的因果逻辑关系绘制出事故树图后,快速找到导致事故发生的安全隐患,在定性分析与定量分析相结合的基础上,得出各个安全隐患对事故发生的影响程度,找出重大安全隐患,同时也为事故的预防提供了科

收稿日期:2017-04-19;修订日期:2017-09-10;*.通信联系人,E-mail:ws73216@126.com

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(18A560021)

作者简介:王颂(1973—),女,河南信阳人,副教授,硕士,主要从事建筑施工安全研究.

学、高效的措施依据。

事故树分析的程序,常因评价对象、分析目的、粗细程度的不同而不同,但一般程序如图 1 所示。

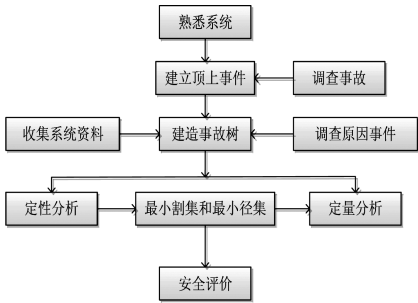


图 1 事故树分析法 (FTA) 解决问题的程序
Fig. 1 The steps to solve the problem of FTA

1.1 事故树分析法的应用步骤

(1)明确顶上事件:在了解系统工作流程、作业环境的基础上弄清事故类型,确定需要作为分析对象的事件作为顶上事件,如“基坑不放坡坍塌”“地铁盾构隧道下穿既有轨道风险评估”.像“结构整体失稳”“边坡透水过程”这些事件后果并不明确而无法继续分析。

(2)调查事故原因:在明确顶上事件后,顺着顶上事件的因果逻辑关系,一层层往下寻找导致顶上事故的各种原因,对这些原因进行分析,将与顶上事故无关紧要的原因去除,把直接导致顶上事故的原因事件全部列举出来。

(3)绘制事故树图:由顶上事故开始,根据因果逻辑关系(结果在上、原因在下),自上而下绘制中间事件及基本事件。

(4)定性分析:用布尔代数法求最小割集、最小径集。最小割集反映了造成顶上事件发生的最少基本事件集合,最小径集则可以保证顶上事件得以避免的最少基本事件集合。

(5)定量分析:根据各基本事件对顶上事件的相对重要程度的不同,通过计算确定事故树中各基本事件的影响重要程度,找出相对重要的基本事件。

(6)制定事故防御措施:在综合定性定量分析结果基础上,在最小径集中找出最容易防范基本事件,制定有针对性的预防方案。

2 事故树分析法的安全评价应用

随着我国建筑行业的迅速发展,为了满足人们日益增长的物质文化需求,建筑物楼层越来越高、

结构设计也日趋丰富复杂,这就自然加大了模板工程的施工危险性。模板工程本来就是事故高发部位,且一旦发生模板坍塌事故就会带来人员伤亡和重大经济损失。研究建筑施工模板坍塌发生原因,在事故发生前及时制定出省工、省事、经济、高效的预防措施,可以大大避免一些不必要的人员伤亡和经济损失。然而传统的事后找原因的方法仅能找出一些表面的显性原因,很难发现一系列并未暴露出来的隐形安全隐患。因此,为了尽量避免悲剧重演,要以系统综合的观点,着眼于事故全过程,运用系统安全的方法对事故进行系统全面的安全分析,找出致使事故发生的本质原因和应对措施。

2.1 “12·19”事故工程概况及事故经过

信阳市光山县幸福花园工程位于光山县司马光广场西路,该工程由光山县城镇开发公司投资建设,该项目占地面积 26 196.2 m²,总建筑面积 129 020.3 m²,地下建筑面积 11 891.73 m²(包含人防面积 5 313.18 m²),本工程由 2 栋商铺用楼和 6 栋居住用楼组成。事故发生的 1 号商铺楼为 3 层 5.27 m 高的框架结构,首层占地面积 797 m²。

2014 年 12 月 19 日下午,信阳市光山县幸福家园小区 1 号商铺楼模板在浇筑混凝土过程中支架发生倾斜,项目负责人立即组派人员对模板支架采取增设剪刀撑等补救措施进行加固处理。16 点 30 分,1 号商铺楼模板支架突发整体坍塌事故,致使正在现场进行补救施工的作业人员被埋。经紧急救援,该事故最终确认伤亡人数 14 人、造成直接经济损失 400 万元以上。事故现场如图 2 所示。



图 2 “12·19”模板支架坍塌事故现场
Fig. 2 “12·19” template stent collapse accident scene

2.2 “12·19”事故现场施工模板支架坍塌事故树图

从人、机、料、法、环的角度分析建筑施工模板

支架坍塌事故的发生的机理,找出导致模板支架坍塌的主要因素有:工程实体存在严重质量缺陷、施工现场质量管理混乱、监理单位未履行监理职责等因素^[5-7].根据事故树原理,绘制出“12·19”事故现场施工模板支架坍塌事故树图(见图 3),图 3 中符号的意义如表 1 所示.

2.3 运用事故树法分析评价

根据上述事故树可知,导致该事件发生的基本事件有 12 个,分别用 $X_1, X_2, \dots, X_{12}$ 来表示,这些基本事件即事故隐患.一般情况下,并不是每个基本事件都会同时发生,当且仅当某些基本事件发生时,才能导致顶上事件发生.

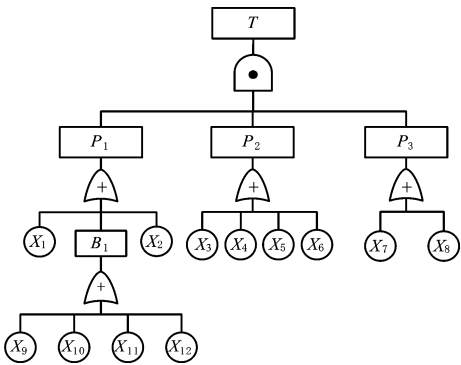


图 3 建筑施工模板支架坍塌事故树图
Fig. 3 Template bracket collapse of the accident tree

表 1 图 3 中符号的意义
Tab. 1 The meaning of the symbols in Fig. 3

符号	意义	符号	意义
T	模板支架坍塌事故	X_5	未配备合格的质量管理人员
P_1	工程实体严重质量缺陷	X_6	无质量保证体系
P_2	施工现场管理混乱	X_7	未对现场施工单位资质核查
P_3	监理单位未履行监管职责	X_8	未及时制止违规施工
B_1	脚手架搭设不合格	X_9	立杆搭设不合格
X_1	使用不合格钢管扣件	X_{10}	水平拉杆不符合要求
X_2	脚手架基础不合格	X_{11}	未设扫地杆
X_3	无技术方案	X_{12}	剪刀撑布设不合格
X_4	未进行技术交底		

这些能导致顶上事件发生的基本事件的集合即割集,其中能导致顶上事件发生的最小基本事件集合为最小割集,运用布尔代数法求出最小割集如下:

$$\begin{aligned} T &= P_1 P_2 P_3 = \\ &= (X_1 + B_1 + X_2)(X_3 + X_4 + X_5 + X_6)(X_7 + X_8) = \\ &= (X_1 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12})(X_7 + X_8)(X_3 + X_4 + X_5 + X_6) = \\ &= X_1 X_3 X_7 + X_1 X_3 X_8 + X_1 X_4 X_7 + X_1 X_4 X_8 + X_1 X_5 X_7 + \\ &+ X_1 X_5 X_8 + X_1 X_6 X_7 + X_1 X_6 X_8 + X_2 X_3 X_7 + X_2 X_3 X_8 + \\ &+ X_2 X_4 X_7 + X_2 X_4 X_8 + X_2 X_5 X_7 + X_2 X_5 X_8 + X_2 X_6 X_7 + \\ &+ X_2 X_6 X_8 + X_9 X_3 X_7 + X_9 X_3 X_8 + X_9 X_4 X_7 + X_9 X_4 X_8 + \\ &+ X_9 X_5 X_7 + X_9 X_5 X_8 + X_9 X_6 X_7 + X_9 X_6 X_8 + X_{10} X_3 X_7 + \\ &+ X_{10} X_3 X_8 + X_{10} X_4 X_7 + X_{10} X_4 X_8 + X_{10} X_5 X_7 + \\ &+ X_{10} X_5 X_8 + X_{10} X_6 X_7 + X_{10} X_6 X_8 + X_{11} X_3 X_7 + \\ &+ X_{11} X_3 X_8 + X_{11} X_4 X_7 + X_{11} X_4 X_8 + X_{11} X_5 X_7 + \\ &+ X_{11} X_5 X_8 + X_{11} X_6 X_7 + X_{11} X_6 X_8 + X_{12} X_3 X_7 + \\ &+ X_{12} X_3 X_8 + X_{12} X_4 X_7 + X_{12} X_4 X_8 + X_{12} X_5 X_7 + \\ &+ X_{12} X_5 X_8 + X_{12} X_6 X_7 + X_{12} X_6 X_8. \end{aligned}$$

由此计算,得到顶层事件 T 最多有 48 组最小割集:

$$\begin{aligned} E_1 &= \{X_1, X_3, X_7\}, E_2 = \{X_1, X_3, X_8\}, \\ E_3 &= \{X_1, X_4, X_7\}, E_4 = \{X_1, X_4, X_8\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_5 &= \{X_1, X_5, X_7\}, E_6 = \{X_1, X_5, X_8\}, \\ E_7 &= \{X_1, X_6, X_7\}, E_8 = \{X_1, X_6, X_8\}, \\ E_9 &= \{X_2, X_3, X_7\}, E_{10} = \{X_2, X_3, X_8\}, \\ E_{11} &= \{X_2, X_4, X_7\}, E_{12} = \{X_2, X_4, X_8\}, \\ E_{13} &= \{X_2, X_5, X_7\}, E_{14} = \{X_2, X_5, X_8\}, \\ E_{15} &= \{X_2, X_6, X_7\}, E_{16} = \{X_2, X_6, X_8\}, \\ E_{17} &= \{X_9, X_3, X_7\}, E_{18} = \{X_9, X_3, X_8\}, \\ E_{19} &= \{X_9, X_4, X_7\}, E_{20} = \{X_9, X_4, X_8\}, \\ E_{21} &= \{X_9, X_5, X_7\}, E_{22} = \{X_9, X_5, X_8\}, \\ E_{23} &= \{X_9, X_6, X_7\}, E_{24} = \{X_9, X_6, X_8\}, \\ E_{25} &= \{X_{10}, X_3, X_7\}, E_{26} = \{X_{10}, X_3, X_8\}, \\ E_{27} &= \{X_{10}, X_4, X_7\}, E_{28} = \{X_{10}, X_4, X_8\}, \\ E_{29} &= \{X_{10}, X_5, X_7\}, E_{30} = \{X_{10}, X_5, X_8\}, \\ E_{31} &= \{X_{10}, X_6, X_7\}, E_{32} = \{X_{10}, X_6, X_8\}, \\ E_{33} &= \{X_{11}, X_3, X_7\}, E_{34} = \{X_{11}, X_3, X_8\}, \\ E_{35} &= \{X_{11}, X_4, X_7\}, E_{36} = \{X_{11}, X_4, X_8\}, \\ E_{37} &= \{X_{11}, X_5, X_7\}, E_{38} = \{X_{11}, X_5, X_8\}, \\ E_{39} &= \{X_{11}, X_6, X_7\}, E_{40} = \{X_{11}, X_6, X_8\}, \\ E_{41} &= \{X_{12}, X_3, X_7\}, E_{42} = \{X_{12}, X_3, X_8\}, \\ E_{43} &= \{X_{12}, X_4, X_7\}, E_{44} = \{X_{12}, X_4, X_8\}, \\ E_{45} &= \{X_{12}, X_5, X_7\}, E_{46} = \{X_{12}, X_5, X_8\}, \\ E_{47} &= \{X_{12}, X_6, X_7\}, E_{48} = \{X_{12}, X_6, X_8\}. \end{aligned}$$

利用最小径集与最小割集的对偶性,画出该事故树的对偶树,即成功树,求出成功树的最小割集,就是原事故树的最小径集。

如图4所示,求该成功树的最小割集,求得的最小割集就是原事故树的最小径集,用布尔代数法可得:

$$\begin{aligned} T^* &= P_1^* + P_2^* + P_3^* = \\ & (X_1^* B_1^* X_2^*) + (X_3^* X_4^* X_5^* X_6^*) + (X_7^* X_8^*) = \\ & (X_1^* X_9^* X_{10}^* X_{11}^* X_{12}^* X_2^*) + (X_3^* X_4^* X_5^* X_6^*) + (X_7^* X_8^*), \end{aligned}$$

故此成功树的最小割集有3组,同样原事故树的最小径集也是这3组,即:

$$E_1^* = \{X_1^* X_9^*, X_{10}^* X_{11}^* X_{12}^*\},$$

$$E_2^* = \{X_3^* X_4^* X_5^* X_6^*\},$$

$$E_3^* = \{X_7^*, X_8^*\}.$$

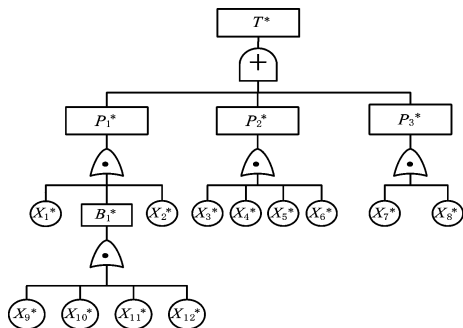


图4 成功树图

Fig. 4 Successful tree diagram

2.4 基本事件影响重要程度分析

根据各基本事件对顶上事件的影响程度不同,对事故树中各基本事件的重要度进行分析,就能得出各基本事件的影响重要度排序,从而找出相对重要的基本事件对其进行严格把关。这里用 $I_{(i)}$ 表示基本事件 X_i 的结构重要度系数,若它们在少事件最小割集中出现次数少,在多事件最小割集中出现次数多,以及其他更为复杂的情况,可用下列近似判别式计算:

$$I_{(i)} = \sum_{X_i \in K_j} \frac{1}{2^{n_i-1}},$$

式中: $I_{(i)}$ 为基本事件 X_i 结构重要度的近似判断值; $X_i \in K_j$ 为基本事件 X_i 属于 K_j 最小割(径)集; n_i 为基本事件 X_i 所在最小割(径)集中包含基本事件的个数。

各基本事件对模板支架坍塌事故的影响的结构重要度系数为:

$$I_{(7)} = I_{(8)} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{6},$$

$$I_{(3)} = I_{(4)} = I_{(5)} = I_{(6)} = \frac{1}{4} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{12},$$

$$I_{(1)} = I_{(2)} = I_{(9)} = I_{(10)} = I_{(11)} = I_{(12)} = \frac{1}{3} \times \frac{1}{6} = \frac{1}{18}.$$

故各个基本事件的影响重要度排序为:

$$I_{(7)} = I_{(8)} > I_{(3)} = I_{(4)} = I_{(5)} = I_{(6)} >$$

$$I_{(1)} = I_{(2)} = I_{(9)} = I_{(10)} = I_{(11)} = I_{(12)}.$$

2.5 结果分析

(1)由事故树可以看出,“或”门的个数多(占80%),“与”门的个数少(占20%),这表明该系统(模板支架坍塌事故)的危险性是比较大的。

(2)从最小割集看,任何一个最小割集都是该事件顶上事件发生的一种“可能渠道”,事故树中最小割集越多,顶上事件发生的可能性就越多,系统就越危险。本事故树中最小割集一共有48组,表明导致模板支架坍塌事故发生有48种“可能渠道”,这也就充分反映出了模板支架坍塌事故的可能性和危险性之大,且预防困难。如任取一个最小割集 $E_2 = \{X_1, X_3, X_8\}$ 进行分析,只需 X_1 (使用不合格钢管扣件)、 X_3 (无技术方案)、 X_8 (监理未及时发现制止违规施工)三个基本事件同时发生就会导致模板支架坍塌事故的发生。

(3)从最小径集看,事故树有一个最小径集,顶上事件不发生的可能性就有一种。最小径集越多,顶上事件不发生的途径就越多,系统也就越安全。利用最小径集可以优选出确保系统安全的最佳方案,为预防、控制事故提供有效的依据。如“模板支架坍塌”事故树中最小割集48组,最小径集3组,故利用最小径集分析更为方便。 $E_2^* = \{X_3^* X_4^* X_5^* X_6^*\}$ 表明 $X_3^*, X_4^*, X_5^*, X_6^*$ 不发生,则顶上事件不会发生,也就是说,若在模板支架施工前,施工单位加强现场管理,严格按照制定的质量保证体系去配备相应的质量管理人员,按照模板支架施工技术方案提前对现场作业人员进行技术交底,则该坍塌事故完全可以避免。

(4)从结构重要度来看,不考虑基本事件发生的概率是多少,仅从事故树结构上分析各基本事件的发生对顶上事件发生的影响程度。事故树是由众多基本事件构成的,这些基本事件对顶上事件均产生影响,但影响程度是不同的。在制定安全防范措施时必须有个先后次序、轻重缓急,以便使系统达到经济、有效、安全的目的。如:对于本次事故的基本事件 X_7 (未对现场施工单位资质核查)、 X_8 (未及时发现制止违规施工)结构重要度最大,表明其在系统

中占首要地位,其次是 X_3 (无技术方案)、 X_4 (未进行技术交底)、 X_5 (未配备合格的质量管理人员)、 X_6 (无质量保证体系),最后是 X_1 (使用不合格钢管扣件)、 X_9 (立杆搭设不合格)、 X_{10} (水平拉杆不符合要求)、 X_{11} (未设扫地杆)、 X_{12} (剪刀撑布设不合格)、 X_2 (脚手架基础不合格).由此可以看出,在制定事故预防措施的时候,应从实际出发按照事件的重要度顺序,由大到小地去选定出最高效的预防措施.

3 结论

通过对“12·19”模板支架坍塌事故树的分析可知,建筑施工模板坍塌事故最小割集有 48 组,最小径集有 3 组,这表明导致建筑施工模板支架坍塌事故的可能性有 48 种.由此可见建筑施工模板支

架坍塌事故是比较容易发生的,但只要能够采取 3 组最小径集中的任何一组去采取有针对性的预防措施,该事故就可避免.对于本次事故,可以采取核查现场施工单位的资质或及时制止违规施工阻止事故的发生;或者考虑制定技术方案,进行技术交底,配备合格的质量管理人员,建立质量保证体系等措施防止事故的发生;也可以通过控制不合格钢管扣件的使用,检查立杆的搭设是否合格,水平拉杆是否符合要求,是否设置扫地杆,剪刀撑布设是否合格,脚手架基础是否合格等避免事故的发生.同时采用事故树分析法对事故进行分析既能对导致事故的各因素间的逻辑关系做出系统的阐述,了解事故树的关键要点,又能开阔安全管理人员的思路,对事故的发生做出全面的分析,为避免事故的发生提供针对性强的预防措施.

参考文献:

[1] 张自然,张平,刘霞辉.中国城市化模式,演进机制和可持续发展研究[J].经济学动态,2014(2):58-73.
ZHANG Ziran, ZHANG Ping, LIU Xiahui. Chinese urbanization model, evolution mechanism and sustainable development [J]. Economic Dynamics, 2014 (2): 58-73.

[2] 高寒,赵锦锴,刘存祥.近年我国建筑施工安全状况与事故类型特点[J].工程建设与设计,2014(3):148-150.
GAO Han, ZHAO Jinkai, LIU Cunxiang. Safety status and accident type characteristics of construction in China in recent years[J].Engineering Construction and Design, 2014(3):148-150.

[3] 卜全民,王涌涛,汪德燿.事故树分析法的应用研究[J].西南石油大学学报,2007,29(4):141-144.
BU Quanmin, WANG Chongtao, WANG Deguan. The application of fault tree analysis[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(4): 141-144.

[4] 何梦超,吴波,王鸣涛,等.基于 FFTA 的地铁盾构隧道下穿既有轨道风险评估[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(6):911-916.
HE Mengchao, WU Bo, WANG Mingtao, et al. Risk assessment of metro shield tunnel below through existing track based on fuzzy fault tree analysis[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(6): 911-916.

[5] 高朋朋.建筑施工坍塌事故原因分析及对策研究[J].建筑安全,2016,31(8):64-66.
GAO Pengpeng. Construction collapse accident reason analysis and countermeasure research of [J]. Construction Safety, 2016,31(8): 64-66.

[6] 徐桂花,徐进,许高亮,等.建筑施工现场坍塌事故调查研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(2):119-122.
XU Guihua, XU Jin, XU Gaoliang, et al. Study on accident survey of collapse on construction site[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(2): 119-122.

[7] 谢洪涛.基坑工程施工坍塌事故致因相互影响关系研究[J].安全与环境学报,2014,14(4):151-156.
XIE Hongtao. Analysis of the cause-effect interactive relations of the construction foundation pit collapse accidents[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(4): 151-156.

责任编辑:郭红建