文章编号:2095-0365(2016)01-0021-05

地铁盾构施工风险的事故树分析

——以地面沉降事故为例

刘维庆[1], 赵雅云[2], 孙赫梓[2]

(1.石家庄铁道大学 经济管理学院,河北 石家庄 050043;
2.石家庄铁道大学 大型结构研究所,河北 石家庄 050043)

摘 要:地面沉降是地铁盾构施工过程中常见的事故,运用安全系统工程中的事故树分析法,对引起地面沉降的原因进行分析,以地面沉降为顶事件,通过层层向下分析,找到导致事故发生的基本事件,并构建事故树。通过事故树分析,得到各原因事件之间的逻辑关系,并计算出各基本事件的结构重要度,确定导致地面沉降事故发生的主要原因,找出预防事故的关键途径,并制定出有效的安全管理措施。

关键词:盾构施工;地面沉降;事故树分析;结构重要度;安全管理对策

中图分类号:X928.9 文献标识码:A DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbskb.2016.01.04

随着我国城市化进程的飞速发展,城市人口日益增多,传统的以公共汽车为主的交通方式由于运客量小,已逐渐无法满足城市化的客运需求。为解决客运压力,各城市开始将目光投向低污染、低能耗、高载客量的城市轨道交通工具——地铁。对于地铁施工来说,盾构施工法由于其对环境影响小、不影响地面交通、机械化程度高等优点,适用于城市地下开挖工程。然而,盾构法受工程地质条件、掘进过程人为控制等因素的影响较大,施工过程中可能会引起地面沉降和地面坍塌事故[1-2]。因发生异常沉降而导致的建筑物墙壁开裂、房屋倾斜倒塌、路面沉陷、地面塌陷等安全事故,会给人民生活、交通运输、工程生产带来极大的影响,甚至造成人员伤亡[3]。本文采用安全系统工程中的事故树分析法,分析并找出引起盾构施工地面沉降的多层原因直到根本因素,根据分析结果提出安全管理对策,以达到有效地预防地面沉降事故。

一、事故树分析方法

(一)事故树分析原理

事故树(Fault Tree)是一种用来描述导致事故发生的各层原因的有逻辑关系的"树"。事故树分析(Fault Tree Analysis,简称FTA)方法是安全系统工程中较为常用的安全分析方法,也常用于安全评价。事故树分析以可能发生的事故为顶事件,逐层寻找导致事故发生的原因和各原因之间的逻辑关系[4]。通过事故树分析,不仅可以找到导致事故发生的直接和间接原因,而且能够深层次地分析出系统中可能导致事故发生的不易察觉的潜在因素,除此之外,还可以进行定性和定量分析,确定各个基本事件的发生对事故的影响程度,从而便于找出导致事故发生的主要原因,为制定安全措施和安全管理提供有利的依据,为实现系统最佳安全状态打下基础[5]。

收稿日期:2015-11-22
作者简介:刘维庆(1963—),男,教授,博士,研究方向:工程项目管理。
基金项目:河北省社科基金项目(HB15GL033),教育部人文社科课题(11YJA630066)
本文信息:刘维庆,赵雅云,孙赫梓.地铁盾构施工风险的事故树分析[J].石家庄铁道大学学报:社会科学版,2016,10(1):21-25.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(二)事故树分析的基本程序

实施事故树分析,基本上可分作三个阶段。首先是熟悉系统阶段,在此阶段需要明确系统并收集系统的相关信息,查阅本系统与其他相似系统的历史资料;其次是编制事故树阶段,确定顶事件,之后收集事故原因,一层一层向下分析,直到找到基本事件,并编制事故树;定性和定量分析阶段,通过分析各原因事件之间的逻辑关系,找到最小割集和最小径集,计算顶事件发生概率和各基本事件的概率重要度、结构重要度等系数,并对分析结果进行总结与应用。本文在定性和定量分析阶段仅进行结构重要度计算。

二、地铁盾构施工地面沉降的事故树分析

(一)盾构施工地面沉降事故树的确立

本文针对石家庄地铁3号线一期工程,以盾构法施工过程可能发生的地面沉降事故为顶事件,进行事故树分析。石家庄地铁3号线一期工程位于中心城区范围,规划线路全长62.3 km,全部为地下线,沿线邻近或下穿多处立交桥,下穿多处房屋,工程风险较大,在地下区间采用盾构法施工。

通过对石家庄地铁3号线盾构施工方案的分析,可以得出造成地面沉降的原因主要有地面沉降量过大和预防地面沉降措施不当,两个因素缺一不可,与顶事件为逻辑与门的关系,构成事故树的第一个层次。

导致地面沉降量过大的原因有地质因素和技术因素,二者之间为逻辑或门的关系。预防地面沉降措施不当主要原因有监控不足和人员素质低,二者为逻辑或门的关系。这四个因素构成事故树的第二个层次。

根据石家庄地铁3号线的地质水文情况,地质因素包括地层损失和受扰动土再固结,二者为逻辑或门关系。技术因素主要是施工不当和设计不当,包括开挖面超挖[6]、设计不合理等。二者为逻辑与门关系。而造成地质损失的原因有:开挖面土体移动、盾构后退、土体挤入盾尾空隙、推进方向发生变化、盾构前方障碍物随盾构推进。继续向下分析,各中间事件可进行进一步分解,从而找到事故发生的基本原因即底事件。根据上述分析,构造事故树,事故树见图1,各事件符号及意义见表1。

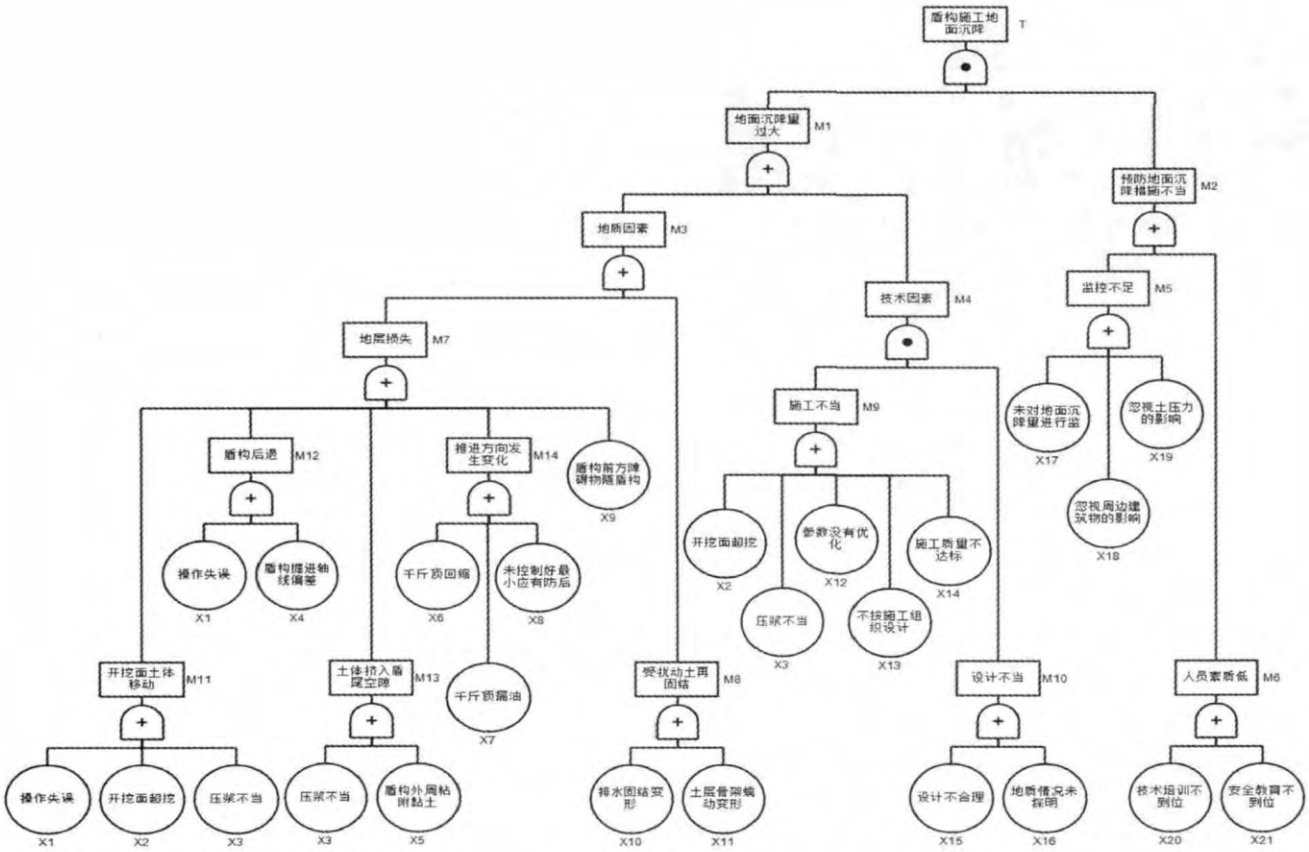

图1 地铁盾构施工地面沉降事故树

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　地铁盾构施工地面沉降事故中事件符号及含义

项目	代表意义	项目	代表意义	项目	代表意义	项目	代表意义
T	盾构施工地面沉降	M9	施工不当	X4	盾构掘进轴线偏差	X13	不按施工组织设计
M1	地面沉降量过大	M10	设计不当	X5	盾构外周粘附黏土	X14	施工质量不达标
M2	预防地面沉降措施不当	M11	开挖面土体移动	X6	千斤顶回缩	X15	设计不合理
M3	地质因素	M12	盾构后退	X7	千斤顶漏油	X16	地质情况未探明
M4	技术因素	M13	土体挤入盾尾空隙	X8	未控制好最小应有防后退顶力	X17	未对地面沉降量进行监测
M5	监控不足	M14	推进方向发生变化	X9	盾构前方障碍物随盾构推进	X18	忽视周边建筑物的影响
M6	人员素质低	X1	操作失误	X10	排水固结变形	X19	忽视土压力的影响
M7	地层损失	X2	开挖面超挖	X11	土层骨架蠕动变形	X20	技术培训不到位
M8	受扰动土再固结	X3	压浆不当	X12	参数没有优化	X21	安全教育不到位

(二)最小割集的计算与分析

在所有基本事件组成的集合中,当一个集合中所有事件发生则引起顶事件发生时,称这个集合为割集,当一个割集中,任一基本事件不发生就不会引起顶事件发生时,称这样的割集为最小割集。最小割集可以表示出顶事件发生的可能性大小和造成顶事件发生的原因组合。事故树中最小割集的数量越多,就代表着系统越危险。由图 1 所示的事故树分析可知,造成盾构施工地表坍塌事故的基本事件有 21 个,即事故隐患有 21 个。

应用布尔代数简化,就可以得出最小割集。利用事故树分析软件,对事故树进行简化,得到以下结果:

T＝M1M2＝(M3＋M4)(M5＋M6)＝(M7＋M8＋M9M10)(M5＋M6)＝(M11＋M12＋M13＋M14＋X9＋M8＋M9M10)(M5＋M6)＝{X1＋X2＋…＋X11＋(X12＋X13＋X14＋X2＋X3)(X15＋X16)}(X17＋…X21)

求得此事件的最小割集为:Ø＝{X12,X15,X17),(X12,X15,X18)……}。

结果显示有 85 个最小割集,其中 30 个割集中包含 3 个基本事件,55 个割集中包含 2 个基本事件。从最小割集的计算可以看出:

(1)共有 85 个最小割集,即顶事件发生的可能性共有 85 种,根据最小割集的概念来说,地铁盾构施工发生地面沉降的可能性很大,可见其预防的难度较大。

(2)基本事件共有 21 个,其中属于技术及管理因素的有 8 个,为 X12～X19,其余的 13 个属于物的不安全状态和人的不安全行为。这说明物的不安全状态和人的不安全行为对地铁盾构施工地面沉降造成的影响较大。

(三)最小径集的计算与分析

与割集相反,当一个集合中基本事件不发生则顶事件就不会发生时,这个集合称为径集。当一个径集中任一基本事件发生则顶事件发生时,这个径集称为最小径集。事故树中最小径集越多,系统的安全性就越高。将地铁盾构施工地面沉降的事故树变为成功树,用布尔代数法求成功树的最小割集,即可得到原事故树的最小径集为:

{(X17,X18,X19,X20,X21),(X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8,X9,X10,X11,X15,X16),(X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8,X9,X10,X11,X12,X13,X14)}

盾构施工地面沉降有 3 个最小径集:

{X17,X18,X19,X20,X21},

{X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8,X9,X10,X11,X15,X16},

{ X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8,X9,X10,X11,X12,X13,X14}。

从最小径集的计算可以看出:

{X17,X18,X19,X20,X21}由五个基本事件构成,这是防治地铁盾构施工地面沉降事故的最短路径。

{X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8,X9,X10,X11,X15,X16}由 13 个基本事件构成,这些事件与地面沉降的地质因素和设计因素有关,预防难度较大。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

{X1,X2,X3,X4,X5,X6,X7,X8,X9,X10,X11,X12,X13,X14}有14个基本事件构成,这些事件除与地质因素和设计因素有关外,还与施工不当有关。

(四)结构重要度的排序和分析

结构重要度是在不考虑各基本事件的发生概率或者认为所有基本事件的发生概率相同的情况下,仅从事故树的结构上分析其对顶事件发生的影响程度。在缺乏定量分析数据的前提下,结构重要度定性分析就显得很重要[7]。此事故树的结构重要度的排序为:

I(X21)=I(X20)=I(X19)=I(X18)=I(X17)>I(X11)=I(X10)=I(X9)=I(X8)=I(X7)=I(X6)=I(X5)=I(X4)=I(X3)=I(X2)=I(X1)>I(X16)=I(X15)>I(X14)=I(X13)=I(X12)

从中可以看出:结构重要度最大的基本事件为:未对地面沉降量进行监测、忽视周边建筑物的影响、忽视土压力的影响、人员的技术培训和安全教育不到位。其次是土层骨架变形蠕动、排水固结变形、盾构前方障碍物随盾构推进、未控制好最小应有防后退顶力、千斤顶漏油、千斤顶回缩、盾构外周粘附黏土、盾构掘进轴线偏差、压浆不当、开挖面超挖、操作失误。再其次是设计不合理、地质情况未探明,最后是参数没有优化、不按施工组织设计、施工质量不达标。施工时应加强对地质的监控,做好地质勘查工作,按规范监测地面沉降量,重视周边建筑物和土压力的影响,做好施工人员技术培训和安全教育。施工和设计时都应注意地层损失和受扰动土再固结对地面沉降造成的影响。在此必须要说明的是,在结构重要度中,排在后面的各个基本事件也不应该被忽视。

三、地铁盾构施工地面沉降事故树分析结论与安全管理对策

轨迹交叉理论告诉我们,人的不安全行为、物的不安全状态是引起事故发生的直接原因,安全管理缺陷是间接原因。但只有在管理存在漏洞的情况下,人的不安全行为和物的不安全状态这两大因素才得以存在,所以,安全管理存在漏洞是导致事故发生的最本质原因[5]。从上述事故树的结构重要度可以看出,对地面沉降事故发生影响较大的因素有:安全教育不到位、技术培训不到位、忽视土压力的影响、忽视周边建筑物的影响、未对地面沉降量进行检测。根据事故树分析结论,可以采取相应的措施加强安全管理。

(一)地铁盾构施工地面沉降事故树分析结论

根据最小径集计算出的最短路径{X17,X18,X19,X20,X21},可以确定预防地面沉降事故发生的最有效措施是:按照规范对地面沉降量进行监测,重视周边建筑物的影响,重视土压力的影响,对施工人员进行技术培训和安全教育。

从其他径集包含的事件可以看出:①在施工过程中应严格按照施工规范执行,提高施工人员素质,以此来预防地层损失,受扰动土再固结引起的地面沉降也应引起施工人员的注意。②设计人员也应严格按照规范并结合项目实际情况进行设计。③为预防施工不当造成的地面沉降,可采取如下措施:优化盾构施工参数、严格按照施工组织设计施工、严格控制施工质量和避免施工人员因技术水平不高而导致的开挖面超挖和压浆不当。

(二)地铁盾构施工安全管理措施

根据事故树分析的结论,在石家庄地铁3号线一期工程中,可以从以下方面加强安全管理,预防地铁盾构施工中的地面沉降。

1.施工技术安全管理

施工之前落实地质、环境条件的勘测工作,收集详尽的相关资料,为施工设计提供有效的依据,避免出现施工开始之后发现土质不符合施工条件、周边建筑物影响施工进度等问题。加强施工过程中的安全监测,按规范监测地面沉降量,监测项目包括地面沉降量监测、地下水位监测等,及时将地面沉降监测成果应用于检查验收,并编制检查验收报告,根据监测情况制定并实施有效措施。为保证系统能够可靠运行,应严格按照规范及相关作业指导书进行施工,施工设计方案的制定和施工方法的选择必须严格把关,各项技术参数的使用严格按照国家标准进行。

2.加强安全教育及安全培训

在目前工程中大量使用人力(农民工)且建筑施工人员素质普遍偏低[8]、安全管理人员水平不高的情况下及大规模的建设背景下[9],实现安全施工的难度是很大的,由于人的不安全行为往往是导致事故发生的根本原因,所以要想做到预防

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

事故的发生,必须加强施工人员的技术培训和安全教育。安全教育是意识上的培养,目的是要提高工人的安全意识和自我防范能力,施工现场应开展安全教育活动,宣传安全施工的重要性,通过改变工人对安全事故的认知,来引导员工的行为;安全技术培训则更专业一些,主要包括对安全管理人员和设备操作人员进行专业知识培训,除此之外还包括对广大员工预防安全事故和自身保护能力的培训,通过安全技术培训,可以使施工人员掌握正确的工作方法,避免出现操作错误和技术性错误。

四、结语

事故树分析是安全工程中常用的系统分析方法,事故树分析对预防事故的发生有着很重要的作用。首先,通过对地铁盾构施工地面沉降事故进行事故树分析,可以得到引起事故各因素及其逻辑关系,全面地查明危险因素,为设计、施工和管理提供依据;其次,可以通过事故树分析来评价工艺、设备和方法的安全性,改善施工技术和管理方案;再次,熟悉系统阶段和编制事故树阶段的材料收集和使用,可以使工作人员更全面的了解系统,熟悉施工过程,开阔思路;最后,事故树分析是定性和定量分析,通过分析计算最小割集、最小径集、结构重要度、概率重要度等参数,可以得到更准确有效的事故预防措施。

参考文献:

[1]冯国冠. 基于某地铁盾构区间施工坍塌处理技术分析[J]. 中国安全生产科学技术,2012,8(3):174-178.

[2]陈 溃,洪开荣,吴学松. 盾构施工技术[M]. 北京:人民交通出版社,2009.

[3]彭永涛. 盾构施工引起地面沉降的原因分析及控制措施研究[J]. 公路,2013,11(11):110-113.

[4]施 伟,刘建辉. 煤矿安全管理分析与评价方法探讨[J]. 安全生产与监督,2007(2):21-22.

[5]黄彩德,马元琳,袁 林. 基于事故树分析的 4.28 铁路事故安全管理对策[J]. 交通科技与经济,2013,15(5):63-70.

[6]王庆磊,李文江,孙洪硕,刘阳. 近接新建地铁既有污水管道安全性分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2014,27(2):41-45,60.

[7]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,2011,33(6):960-965.

[8]刘铁民. 安全生产工作体系建设[J]. 中国安全生产科学技术,2008,4(5):5-7.

[9]贺农农. 城市轨道交通建设安全监督管理模式研究[J]. 石家庄铁道大学学报:社会科学版,2014,8(1):23-26.

Fault Tree Analysis of Subway Shield Construction

——A Case Study of Land Subsidence Accident

LIU Wei-qing[1], ZHAO Ya-yun[2], SUN He-zi[2]

(1. College of Economics and Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, 050043, China;

2. Structural Health Monitoring and Control Institute, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, 050043, China)

Abstract: Land subsidence accident is rather common in the subway construction process when applying shield method. By using fault tree analysis, the method in safety system engineering and the causes of land subsidence are analyzed. Taking the land subsidence as the top event, the research is to find the basic faults which caused the accident after the layers of analysis, and then the fault tree is built. Through the fault tree analysis, the logical relationship between various causative events is got, then the structural importance of each basic events is calculated out. The primary causes of land subsidence accident are determined, the critical path of accident prevention is found, and the effective way to prevent the ground settlement accident in the shield construction is proposed.

Key words: shield construction, land subsidence, fault tree analysis, structure importance, safety management countermeasures

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net