

环境敏感区施工风险控制研究

——以之江路输水管廊及道路提升工程为例

谢芳¹, 刘飞飞¹, 赖健维²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 310014; 2. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘要:城市地下综合管廊施工常会途经环境敏感区。利用事故树对环境敏感区施工风险进行分析,建立顶上事件及造成事故发生原因之间的逻辑关系树,进行定性及定量分析环境敏感区施工存在的潜在风险。对事故树最小径集计算结果可知,施工资质和施工顺序这两个基本事件结构重要度最大,表明施工资质不符和施工顺序有误对于事故发生占首要地位,因此应将这两项基本因素作为预防事故发生着重考虑的因素。

关键词:环境敏感区;施工风险;事故树

中图分类号:TU99 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)02-0109-05

环境敏感区是指依法设立的各级各类自然、文化保护地,以及对建设项目的某类污染因子或者生态影响因子特别敏感的区域。随着中国城市化进程的不断加速,城市地下综合管廊的应用越来越广泛,其施工既属市政工程又属地下工程范畴,某些项目的施工过程中会下穿环境敏感区,施工对于环境敏感区会带来系列风险,但不同因素所带来的风险概率不同,因此需要对各因素进行分析,以便于更好控制风险。

王莉莉等^[1]、高吕和等^[2]、黄卫清等^[3]、韩梅等^[4]就事故树的方法对空中交通管制员情景意识丧失、车辆安全状态、城市灰霾致因、铁路超限货物运输风险等问题进行分析,采用自上而下的方式对各问题原因进行逐层分析,建立事故树模型,找出导致问题发生的主要因素。朱嘉^[5]、黄萍等^[6]、刘磊^[7]对于地下综合管廊施工过程中存在的风险进行分析,得到各类风险因素。

本文结合事故树的方法对环境敏感区施工风险进行分析,建立顶上事件及造成事故发生原因之间的逻辑关系树,进行定性及定量分析环境敏感区施工存在的潜在风险。对事故树最小径集计算得到基本事件结构重要度,得到对于事故发生占首要地位的因素并作为预防事故发生着重考虑的因素。

1 之江路输水管廊及道路提升工程概况

根据杭州市主城区水厂布局优化调整的需求,南星水厂关停,取水口上移,既有南星水厂供水服务由九溪水厂替代,经过整合,之江路上需敷设清水管和原水管;同时根据杭州市拥江发展战略,之江路需打造成世界级沿江生态带、景观带、休闲带及滨水廊道。在敷设输水管线的同时,通过“功能活力化、交通立体化、空间人行化、景观整体化”的设计策略,将之江路道路下穿或局部下穿,尽可能释放地面空间,实现城市江岸一体化、街道空间慢行化。另根据之江路交通流量的分析,为满足远期之江新城发展的要求,之江路具有交通规模扩容的需求。因此,在充分考虑之江路多方面、多功能整治提升的需求下,在输水管线建设的带动下,同步实现道路交通与景观的提升,体现工程的综合效益。

之江路输水管廊及道路提升工程设计范围西起之浦路以西,东至复兴路,采用输水管与交通隧道合建形式,建设内容主要包括新建输水管廊与道路提升改造两个方面,全长约 6.3 km。其中,地下隧道为城市主干路,长度约 5.62 km(含 2.0 km 明挖段,3.6 km 盾构段),双向 4 车道+2 应急车道,设计时速 60 km/h,采用盾构隧道,内径为 13.3 m,外径为 14.5 m。之浦路平行匝道进口位于之江路,

收稿日期:2022-08-22

作者简介:谢芳(1991—),女,四川广安人,中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,工程师,研究方向为工程项目管理;刘飞飞(1991—),女,浙江绍兴人,中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,工程师,硕士,研究方向为工程造价;赖健维(1998—),女,四川西昌人,西南交通大学土木工程学院,硕士研究生,研究方向为工程项目管理。

定向匝道出口位于之浦路;之江路匝道位于白塔南侧,采用盾构法下穿中河。地面道路为城市次干路兼顾景区道路功能,设计时速 40 km/h。

工程沿线涉及的重要建筑物可分为文物保护建筑和其他重要建筑物两类,在盾构段及明挖段均有分布,其与隧道的关系见表 1、表 2。

表 1 工程沿线文物分布

文物保护建筑物名称	保护级别	与隧道关系
中河	世界文化遗产全国重点文物保护单位	匝道盾构隧道下穿结构顶距河底约 7 m
闸口白塔	全国重点文物保护单位	匝道盾构隧道侧穿,与塔基最小净距 38.6 m 主线明挖隧道侧穿,与塔基最小净距 23.6 m
钱塘江大桥	全国重点文物保护单位	主线盾构隧道下穿引桥路基段,穿越段覆土厚度 24.3 m
六和塔	全国重点文物保护单位	主线盾构隧道侧穿,与塔基最小水平
之江大学旧址	全国重点文物保护单位	净距 38.1 m 主线盾构隧道侧穿,与保护建筑最小水平净距 39.2 m

表 2 工程沿线其他重要建筑物

位置	建筑物名称	与隧道关系	结构形式
西段明挖隧道	紫之隧道	上穿,最小竖向净距 1.4 m	—
	九溪玫瑰园挡墙	侧穿,最小水平净距 8 m	重力式挡墙
	九溪加油站	侧穿,最小水平净距 25 m	—
盾构隧道	九溪派出所	下穿,最小竖向净距 16.4 m	砖 2
	浙大之江校区食堂	侧穿,最小水平净距 16.9 m	混凝土 2
	六和塔百货商场	下穿,最小竖向净距 23.8 m	混凝土 2
	望江楼酒店	下穿,最小竖向净距 23.9 m	混凝土 2
东段明挖隧道	杭州铁路分局车间	侧穿,最小水平净距 6.9 m	混凝土
	盐业仓库	侧穿,最小水平净距 29.4 m	砖
	的士之家	隧道 U 型槽上方,需拆迁	砖+砖 2

由表 1、表 2 可知,之江路输水管廊及道路提升工程沿线经过众多文物保护单位,故该工程所处地带为环境敏感区,在施工过程中需加强监测,控制风险因素,尽可能减小对环境敏感区的影响。

2 事故树分析

2.1 事故树分析法

事故树分析法常用于风险管理领域,用于对某种事故系统进行逻辑推理及其危险性的识别和评价。通过建立顶上事件及造成事故发生原因之间的逻辑关系树,进而可以进行定性或定量分析,进一步深究事故发生的潜在原因,更加全面地认识该事故系统的机理^[1]。

2.2 事故树分析法步骤

2.2.1 明确分析系统

熟悉分析对象、了解城市地下综合管廊工作全流程以及城市地下综合管廊施工环境,确定分析系统顶上事件,结合对于施工现场调查及事故原因的分析确定事故发生的系列原因,确定逻辑清晰的因果关系^[2]。

2.2.2 事故树绘制

在明确顶上事件后,按照上一步骤捋顺的因果联系,逐层将所有的因果列示,按照直接影响或间接影

响将列示出的事故发生原因进行分类,直到直接原因清晰。明确顶上事件是源头,因果逻辑关系是链条,在绘制事故树图时,应该按照逻辑推理的方式,结果在上,原因在下,逐层绘制事故树分析图^[3]。

2.2.3 事故树结论分析

割集指事故树中某些基本事件的集合,当这些事件都发生时,顶上事件必然发生。导致顶上事件发生的最低限度的基本事件组合为最小割集。研究最小割集的目的在于研究系统发生事故的规律和表现形式,发现系统最薄弱的环节,最小割集表示系统的危险性。

径集指事故树中某些基本事件的集合,当这些基本事件都不发生时,顶上事件必然不发生。系统的径集代表了系统的正常模式,即系统成功的一种可能性。不能导致顶上事件发生的最低限度的基本事件组合称为最小径集。最小径集表示系统的可靠性。通过对最小割集或最小径集的分析,可以找出系统的薄弱环节,提高系统的安全性和可靠性。

在进行事故树结论分析时,最小割集与最小径集的计算结果是其中很重要的一个数据。首先,最小割集与最小径集均采用布尔代数法求得,其中最小割集是构成基本顶上事件最小的事件组合,而最

小径集与最小割集代表数据相反,它代表最大程度避免顶上事件的最小集合。其次,在进行定量分析时,要通过最小割集与最小径集的计算结果将顶上事件的影响因素按照计算结果排序,找出相对重要的事件。最后,提出建议,进行定性与定量的综合分析,据分析结果提出行之有效的措施。

一个事故树通常会包含很多基本事件,这些基本事件的重要性并不都相同,有些事件或其组合若出现故障,则必然引起顶上事件故障,而有些则对顶上事件的影响较小。一个基本事件或者最小割集对顶上事件的影响力大小称为重要度。为明确引发顶上事件发生故障的原因并有针对性地制定预防措施,需要根据基本事件或最小割集对顶上事件的重要度进行排序。在假设每个基本事件的发生概率相等、不考虑自身发生概率的情况下,仅从事故树的结构上进行重要度分析,称为结构重要度分析^[4]。

3 环境敏感区施工风险分析

3.1 环境敏感区施工风险识别

风险指标体系的合理构建是进行有效风险评估的基础。为提高风险识别结果的准确性,叠加使用德尔菲法和实地法进行风险源识别,在德尔菲法的基础上通过实地法进行二次筛选。通过此风险识别方法得到环境敏感区施工风险两大主要因素分别为施工管理和施工环境^[8]。

环境敏感区施工风险主要是来自施工沉降过大或者施工过程中发生了坍塌,影响地面以上的重要建筑,因此确定环境敏感区施工风险事故树顶上事件为“环境敏感区施工沉降超限/坍塌”^[5]。

3.1.1 施工管理

地下综合管廊施工过程相较于其他项目施工

更加复杂,参与到其中的相关单位和人员更多,任何一环出现问题都可能对施工产生极大影响,因此公共过程中的施工管理显得尤为重要,处于环境敏感区的地下综合管廊施工过程的施工管理显得更为重要。环境敏感区施工管理风险主要包括施工设计方案、施工单位资质、施工方案审批、工期不合理、施工监测以及施工人员风险,施工人员风险又包括文化程度、施工经验以及违规操作。

3.1.2 施工环境

城市地下综合管廊施工的周围环境非常复杂,包括自然环境、现场环境以及社会环境。自然环境中天气、地下水以及地质情况都会对地下综合管廊的施工产生一定的影响,地下综合管廊施工周期较长,在施工过程中如遇雨季或其他极端天气会对工期、施工安全等产生影响。地下水位的高低对周围建筑的沉降会产生较大影响,地下综合管廊施工过程中,地层地质情况的不确定性也会给施工带来一定的风险。施工现场环境的支护方案是否合理、结构承重是否有效在环境敏感区施工过程中也显得尤为重要。社会环境主要是疫情及其他社会因素可能会对施工工期等产生一定的影响^[6]。

3.2 绘制事故树

通过对顶上事件即环境敏感区施工沉降超限/坍塌发生的主要因素进行梳理,确立 5 个中间事件, 13 个基本事件。结合环境敏感区施工的特点,逐个对施工管理、施工环境对造成环境敏感区施工沉降超限/坍塌发生的原因进行深度梳理,建立环境敏感区施工沉降超限/坍塌事故树(图 1),其中事故树基本事件的符号含义见表 3。

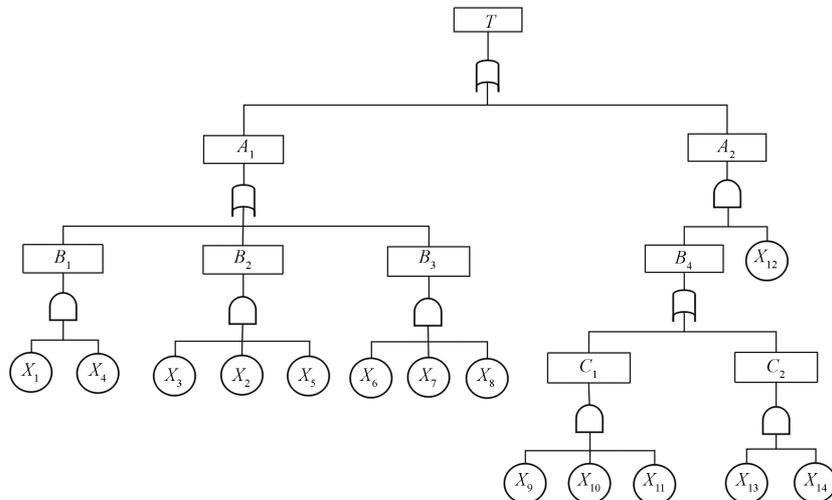


图 1 环境敏感区施工沉降超限/坍塌事故树

表 3 事故树基本事件的符号含义

符号	事件	符号	事件
A ₁	施工管理	X ₄	施工顺序
A ₂	施工环境	X ₅	施工设计方案
B ₁	质量管理	X ₆	施工经验
B ₂	现场管理	X ₇	文化程度
B ₃	人员管理	X ₈	违规操作
B ₄	外部环境	X ₉	地下水
C ₁	自然环境	X ₁₀	天气
C ₂	现场环境	X ₁₁	地质情况
X ₁	施工监测	X ₁₂	社会环境
X ₂	方案审批	X ₁₃	构件承重
X ₃	施工单位资质	X ₁₄	支护方案

3.3 环境敏感区施工事故树的定性分析

3.3.1 求最小割集、最小径集

根据表 1 可知,环境敏感区施工沉降超限/坍塌安全事故的致因要素共有 14 件,其基本要素分别用 X_1, X_2, \dots, X_{14} 来表示,这些因素即为造成事故发生的安全隐患。根据轨迹交叉理论对这 14 个基本事件进行分类,有可能会发生其中之一或者其中几件,但是只有当人类不安全行为与不安全物态交叉时,才会导致特定的施工安全事故的发生,交叉的两种行为会被认定为一个临时组合,该组合会直接导致施工安全事故发生,因此称这些临时组合为顶上事件的割集,其中最小组合为最小割集,并利用布尔代数方法列出事故树的结构函数,其结构函数化简为

$$\begin{aligned}
 T &= A_1 A_2 = B_1 B_2 B_3 (B_4 + X_{12}) = \\
 &(X_1 + X_4)(X_2 + X_3 + X_5)(X_6 + X_7 + X_8)(C_1 C_2 + \\
 &X_{12}) = (X_1 + X_4)(X_2 + X_3 + X_5)(X_6 + X_7 + \\
 &X_8)[(X_9 + X_{10} + X_{11})(X_{13} + X_{14}) + X_{12}] = (X_1 + \\
 &X_2 + X_3 + X_4 + X_5)(X_6 + X_7 + X_8)[(X_9 + X_{10} + \\
 &X_{11})(X_{13} + X_{14}) + X_{12}] = (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + \\
 &X_5)(X_6 + X_7 + X_8)(X_9 X_{13} + X_9 X_{14} + X_{10} X_{13} + \\
 &X_{10} X_{14} + X_{11} X_{13} + X_{11} X_{14} + X_{12}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

通过计算可知,该事故树最小割集有 105 个,因篇幅有限,此处就不一一罗列。最小割集对应于事故树,最小径集对应于成功树,事故树中当最小割集中的基本事件发生时会引起事故,而成功树中最小径集中的基本事件不发生则不会引发事故。因最小割集数目过多,且最小割集与最小径集之间存在一定的函数关系,所以可以通过计算小径集来进行结构重要度分析^[7],最小径集计算过程如下:

$$\begin{aligned}
 T' &= A'_1 + A'_2 + A'_3 = B'_1 + B'_2 + B'_3 + B'_4 X'_{12} = \\
 &X'_1 X'_4 + X'_2 X'_3 X'_5 + X'_6 X'_7 X'_8 + (C'_1 + C'_2) X'_{12} = \\
 &X'_1 X'_4 + X'_2 X'_3 X'_5 + X'_6 X'_7 X'_8 + (X'_9 X'_{10} X'_{11} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X'_{13} X'_{14}) X'_{12} &= X'_1 X'_4 + X'_2 X'_3 X'_5 + X'_6 X'_7 X'_8 + \\
 &X'_9 X'_{10} X'_{11} X'_{12} + X'_{12} X'_{13} X'_{14} \quad (2)
 \end{aligned}$$

可以确定最小径集 $E_1^* = \{X'_1 X'_4\}$, $E_2^* = \{X'_2, X'_3, X'_5\}$, $E_3^* = \{X'_6, X'_7, X'_8\}$, $E_4^* = \{X'_9, X'_{10}, X'_{11}, X'_{12}\}$, $E_5^* = \{X'_{12}, X'_{13}, X'_{14}\}$ 。

3.3.2 基本事件结构重要度分析

通过对事故中的各个基本因素进行重要度分析来得出对事故的影响重要度排序,找出影响事故发生的因素,从上到下排序,进行针对性布置^[9]。

用式(3)计算某一个基本事件对施工安全事故的影响度,计算结果 $I(i)$ 表示某基本事件对于施工安全事故影响的相关系数:

$$I(i) = \sum_{X_i \in G_i} \frac{1}{2^{n_i-1}} \quad (3)$$

式中: n_i 指基本事件所在最小割集 G_i 的基本事件总数; $I(i)$ 为基本事件 X_i 结构重要度的近似值。由此得到

$$I(1) = I(4) = 0.5;$$

$$I(2) = I(3) = I(5) = I(6) = I(7) = I(8) =$$

$$I(12) = I(13) = I(14) = 0.25;$$

$$I(9) = I(10) = I(11) = I(12) = 0.125。$$

基本事件结构重要度排序:

$$\begin{aligned}
 I(1) = I(4) > I(2) = I(3) = I(5) = I(6) = \\
 I(7) = I(8) = I(12) = I(13) = I(14) > I(9) = \\
 I(10) = I(11) = I(12)。
 \end{aligned}$$

4 结果分析及预防措施

分析最小割集的计算可以看出,或门较多且导致环境敏感区施工沉降超限/坍塌事故发生的因素有 105 种可能的渠道,即当这 105 种因素集合的其中一种或者几种发生就会导致环境敏感区施工事故的发生,根据数理统计相关理论知识可知,组合数量较高则表明环境敏感区地下综合管廊施工过程中事故发生的概率较高。如随意一个最小割集发生,则会引起事故的发生。

分析最小径集可以对防止事故发生提出针对性意见,为预防事故的发生提供技术支持。最小割集对应于事故树,则最小径集对应于成功树,若想要事故不发生,则只要对应的最小径集不发生即可。如分析最小径集 $E_2^* = \{X'_2, X'_3, X'_5\}$ 可知,若基本事件 X'_2 (方案审批)、 X'_3 (施工单位资质)、 X'_5 (施工设计方案)均符合相关规定的话,则环境敏感区施工沉降超限/坍塌事故也不会发生。因此在施工过程中,施工管理人员应加强对于施工方案的质量把控、施工单位资质以及施工设计方案的审

核,则可以在很大程度上防止环境敏感区施工沉降超限/坍塌事故的发生。

分析结构重要度计算结果,事故树的各个基本事件对于事故发生的影响程度并不相同。根据结构重要度计算结果可知,最小径集 E_1^* 中 X'_1 、 X'_4 两个基本事件结构重要度最大,表明施工资质不符合施工顺序有误对于事故发生占首要地位,因此应将这两项基本因素作为预防事故发生着重考虑的因素。施工资质不符指实际施工人员设备等相关资质与施工招标文件上的不符合,应加强施工过程中的施工实际资质的监督;施工顺序需要控制工序活动条件及活动效果的质量,同时疫情期间且施工地段属环境敏感区,施工顺序可能会受疫情及地段敏感性印象,更应加强把关各施工工序的合理性及安全性。

5 结语

1)利用德尔菲法与现场走访法结合的方法确定环境敏感区施工沉降超限/坍塌事故的风险因素,经过三轮调查归纳汇总得到影响事故发生的两大主要因素即施工管理、施工环境及其对应的各基本事件。

2)根据基本事件间的逻辑关系绘制的事故树,利用布尔代数法列出结构函数求最小割集计算可知,或门较多且导致环境敏感区施工沉降超限/坍塌事故发生的因素有 105 种可能的渠道,即当这 105 种因素集合的其中一种或者几种发生就会导致环境敏感区施工事故的发生。最小径集的分析可以对防止事故发生提出针对性意见,为预防事故的发生提供技术支持。

3)计算结构重要度,分析对于事故发生影响程

度较大的因素,并提出针对性的防控措施。事故树的各个基本事件对于事故发生的影响程度并不相同,根据结构重要度计算结果可知,最小径集 E_1^* 中 X'_1 、 X'_4 两个基本事件结构重要度最大,表明施工资质不符合施工顺序有误对于事故发生占首要地位,因此应将这两项基本因素作为预防事故发生着重考虑的因素,其次是 E_2^* 、 E_3^* 、 E_5^* 中的 9 个基本事件,最后是 E_4^* 中的 4 个因素。

参考文献

- [1] 王莉莉,朱敏.基于事故树的空中交通管制员情景意识分析[J].安全与环境学报,2021,21(1):249-56.
- [2] 高吕和,田晶晶,李世武,等.基于事故树分析的车辆安全状态模糊综合评价模型[J].吉林大学学报(工学版),2011,41(S1):95-100.
- [3] 黄卫清,徐平如,钱宇.基于事故树方法的城市灰霾的成因机理分析:以天津市为例[J].化工学报,2018,69(3):982-991,1252.
- [4] 韩梅,吴珊,常青,等.基于事故树和模糊贝叶斯网络的铁路超限货物运输风险评估[J].铁道学报,2021,43(5):9-17.
- [5] 朱嘉.城市综合管廊安全风险辨识及评价体系研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
- [6] 黄萍,林杰钦.基于层次分析法的 DFT 城市综合管廊盾构施工风险评价研究[J].安全与环境工程,2020,27(5):116-21.
- [7] 刘磊.基于事故致因理论的城市地下综合管廊施工安全隐患管理研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2020.
- [8] 雷银,黄晓初.跨海桥隧枢纽人工岛施工总体风险评估体系研究[J].科技和产业,2020,20(7):134-138,170.
- [9] 张加国,张庆财.运用风险事故树分析矿井通风系统安全性[J].煤炭科学技术,2020,48(S2):169-73.

Research on Construction Risk Control in Environmentally Sensitive Areas: Taking Zhijiang Road water pipe gallery and road improvement project as an example

XIE Fang¹, LIU Feifei¹, LAI Jianwei²

(1. Huadong Engineering Corporation Limited of POWERCHINA, Hangzhou 310014, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The construction of urban underground comprehensive pipe gallery often passes through environmentally sensitive areas. The accident tree is used to analyze the construction risks in environmentally sensitive areas, and a logical relationship tree between the overhead events and the causes of the accidents is established to qualitatively and quantitatively analyze the potential risks of construction in environmentally sensitive areas. From the calculation results of the minimum diameter set of the accident tree, it can be seen that the two basic events, construction qualification and construction sequence, have the greatest structural importance, which indicates that the construction qualification is not up to standard and the construction sequence is wrong are the two factors to be considered in preventing accidents.

Keywords: environmentally sensitive area; construction risk; accident tree