2021 年 第21 卷 第35 期
2021, 21(35): 15222-08

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:陈 赟, 刘湘慧, 陈玉斌. 基于决策实验室分析法及解释结构模型的交通隧道施工事故致因链构建[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 15222-15229.

Chen Yun, Liu Xianghui, Chen Yubin. Construction of the cause chain of traffic tunnel construction accidents based on dematel-ism[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 15222-15229.

基于决策实验室分析法及解释结构模型的交通隧道施工事故致因链构建

陈 赟, 刘湘慧, 陈玉斌

(长沙理工大学交通运输工程学院, 长沙 410114)

摘 要 为明确交通隧道施工事故致因之间纵向影响关系及层级结构,从事故发生全过程视角出发,在利用文本挖掘技术构建事故致因体系的基础上,借助决策实验室分析法(decision-making trial and evaluation laboratory,DEMATEL)及解释结构模型(interpretative structural modeling,ISM)判断各致因的重要性程度,建立事故致因多级递阶结构模型,确定关键致因因素,构建关键致因影响链,深入分析其纵向影响关系,并以万拉木隧道为例进行验证,证实其实用性。研究结果表明:5 方面 20 项交通隧道施工事故致因间存在明显的层级结构;人员、管理及环境因素对技术因素、机械设备与材料因素存在直接影响作用,其中安全意识及素养、安全监管、施工方案及各类环境因素在事故致因体系中占据重要位置,对其进行有效管控是良好安全管理的体现。本研究可为交通隧道施工安全管理提供参考与依据。

关键词 交通隧道; 事故致因; 文本挖掘; 决策实验室分析法; 解释结构模型

中图法分类号 U458; **文献标志码** A

Construction of the Cause Chain of Traffic Tunnel Construction Accidents Based on DEMATEL-ISM

CHEN Yun, LIU Xiang-hui, CHEN Yu-bin

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

[**Abstract**] In order to clarify the longitudinal influence relationship and the hierarchical structure between the causes of traffic tunnel construction accidents, based on the perspective of the whole process of the accident and the construction of the accident cause system with text mining technology,and with the help of decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) and interpretative structural modeling (ISM), the importance of each causal factor is judged, a multi-level recursive structure model of the causal factors is developed, key causal factors are identified, key causal influence chains are constructed, vertical influence relationships are analysed in depth, and the Wanramu Tunnel is used as an example to verify its practicality. The research results show that there are 20 causes of traffic tunnel construction accidents, which have obvious hierarchical structure. Personnel, management and environmental factors have a direct impact on technical factors, mechanical equipment and material factors. Among them, safety awareness and literacy, safety supervision, construction plans and various environmental factors occupy an important position in the accident cause system, and effective management and control of them is the embodiment of good safety management. This research can provide reference and basis for the safety management of traffic tunnel construction.

[**Keywords**] traffic tunnel; accident causation; text mining; decision-making trial and evaluation laboratory; interpretative structural modeling method

随着经济社会的快速发展,交通基础设施建设项目也不断增多,尤其是利用地下空间的交通隧道,已经成为我国交通运输的主要载体之一。但频发的交通隧道施工事故也带来了巨大的财产损失和人员伤亡,交通隧道施工安全管理已然成为了施工过程中的重要内容。

近年来,交通隧道施工事故安全分析得到促进和发展,静态与动态相结合的方法逐步兴起[1-3],*K*-Means聚类模型[4]、层次分析法[5]、Dempster-Shafer(D-S)证据理论[6-7],灰色关联度[8]等也广泛运用于交通隧道安全风险分析过程中。与此同时,历史事故对于交通隧道施工安全管理具有重要的指导

收稿日期: 2021-07-02; **修订日期**: 2021-08-27

基金项目: 2018 年湖南省应急管理厅安全生产科技研究及推广项目(201801);长沙理工大学研究生科研项目(CX2020SS19)

第一作者: 陈 赟(1963—),男,汉族,湖南邵阳人,博士,教授。研究方向:工程项目管理。E-mail:cheny@csust.edu.cn。

意义,为充分利用以往的评估经验,汲取以往的事故教训,相关学者对其进行了归纳总结与分析研究。例如,孙景来等[9]通过对案例进行统计整理,划分隧道施工塌方类别,并对其进行特征分析及原因说明;熊自明等[10]对以往典型的地下工程进行统计分析,发现在隧道施工过程中主要事故致因包括人的不安全行为,物的不安全状态;王龚[11]对城市地铁施工事故案例进行整理分析确定了客观因素、主观因素及监控测量3类安全风险评价体系,并基于此进行风险等级评价;陈赟等[12]通过识别地铁隧道施工事故特征构建情景表达模型,为充分利用事故经验管控隧道施工安全提供新的参考。

综上所述,对历史事故进行总结分析可对交通隧道施工安全管理工作提供科学参考,但现有交通隧道施工事故安全分析主要集中于事故致因对施工安全的影响,较少从事故全过程视角对事故致因进行纵向挖掘,缺少对事故致因链的挖掘。为此,现以挖掘事故致因间的纵向影响关系为根本任务,通过文本挖掘提取主要事故致因,引入决策实验室分析法(decision-making trial and evaluation laboratory,DEMATEL)及解释结构模型(interpretative structural modeling,ISM)构建致因要素模型,确定关键致因因素及各致因影响路径,明确关键控制点,以期为交通隧道施工安全管理提供参考和依据。

1　交通隧道施工事故致因分析

1.1　基于文本挖掘的事故致因提取

交通隧道施工事故的爆发是多方面因素共同作用的结果,考虑文本挖掘已运用于多领域多方面,可从大量文本数据中获取隐性知识[13],较专家经验、文献总结更具客观性及全面性,故结合事故案例,采用文本挖掘技术提取交通隧道施工事故致因。为保证数据来源的可靠,选取对事故发生的全过程、直接原因及间接原因有较为详细描述的各交通隧道施工事故调查报告及相关论文共135例作为文本挖掘的语料。

通过NLPIR-Parser平台对事故直接原因及间接原因部分进行文本分词处理、词频统计及权重统计[14],其中词频即词组出现的次数,权重是在确定各候选词邻接熵和互信息值的基础上,通过线性插值法获得[13,15]。为统计与交通隧道施工事故相关的致因,剔除其中无关词。如施工单位、地铁集团等,以此作为交通隧道施工事故致因的初始因素。筛选后文本分词词频和权重统计结果(部分)如表1所示,利用python软件生成的词云图如图1所示。

表1　词频和权重统计结果

Table 1　Word frequency and weight statistics

初始因素	权重	词频	初始因素	权重	词频
围岩	179.3	323	二衬	26.94	32
岩体	73.03	92	不良地质	25.62	15
掌子面	57.36	49	边坡	25.61	15
初期支护	50.99	44	仰拱	25.59	15
锚杆	46.14	35	左线隧道	24.63	8
地下连续墙	43.13	15	安全操作规程	24.52	12
地质条件	38.32	37	浅埋	24.01	17
安全隐患	34.15	49	施工方法	23.84	13
拱顶	33.99	36	隐患排查治理	23.59	12
技术交底	33.35	39	节理裂隙发育	23.36	19
监控量测	32.55	11	设计图纸要求	20.36	8
专项施工方案	32.45	16	右线	20.19	13
泥灰岩	29.64	9	拱脚	20.16	10
钢筋绑扎	27.18	6	防范措施	20.02	16
履职情况	27.07	10	衬砌	18.97	13

图1　交通隧道施工事故致因词云图

Fig. 1　Word cloud map of the causes of traffic tunnel construction accidents

1.2　事故致因体系构建

由于初始因素中存在部分表述不完整或词义相近的词,需对其进行进一步筛选和完善,筛选和完善原则如下。

(1)对事故致因名称表述进行完善,如将“安全意识”表述为“安全意识及素养淡薄”,将“安全隐患”“隐患排查治理”表述为“隐患排查治理不到位”。

(2)将词义相同但表述略有差异的事故致因归并,如将“围岩”“岩体”“泥灰岩”“地质条件”“水土压力”等归并为“水文地质条件差”。

基于以上原则得到交通隧道施工事故的20项致因,并结合《公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南》及4M1E理论,将事故致因分为人员、机械设备及材料、管理、技术及环境5个主要方面,具体分类如图2所示。

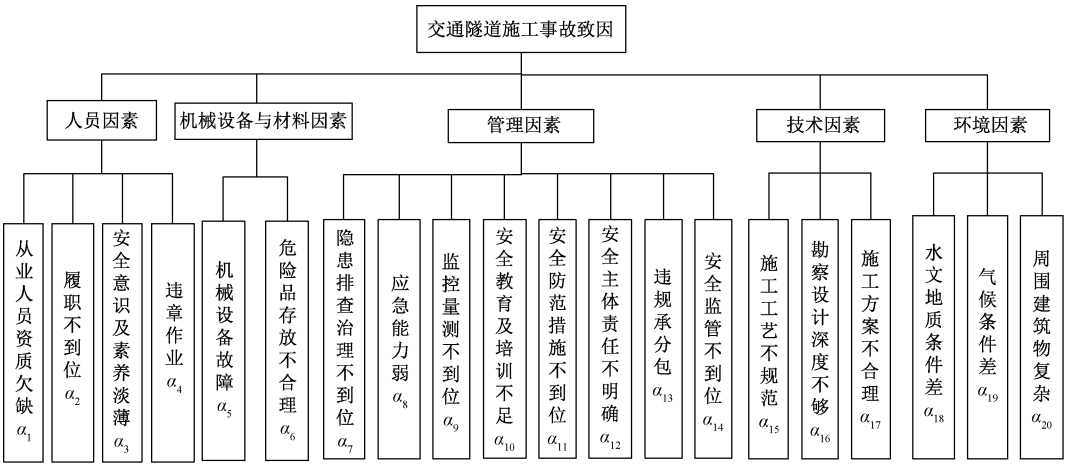

图 2 交通隧道施工事故致因体系

Fig. 2 The cause system of traffic tunnel construction accidents

2 基于 DEMATEL-ISM 的事故致因模型构建与分析

决策实验室法(DEMATEL 方法)同时考虑了因素间的直接影响关系和间接影响关系,并判别原因因素及结果因素,明确各因素的重要性程度[16]。解释结构模型法(ISM 方法)是一种定性分析系统内要素依赖或制约关系的方法,可将复杂关系转化为直观的结构关系模型,并形成多级层级结构,从而明确事故致因的因果关联和影响关系[17]。

因此,采用 DEMATEL 方法与 ISM 方法相结合的方式,对交通隧道施工事故致因进行深入分析和研究,明确各因素层级结构及其影响路径,为确定关键因素,进行科学决策提供依据。

2.1 直接影响矩阵建立及其规范化

将交通隧道施工事故致因体系的 20 项事故致因集合为一个向量 $\boldsymbol{S}=[\alpha_1\ \ \alpha_2\ \ \cdots\ \ \alpha_{20}]$,定义因素 α_i 对 α_j 的影响程度为 $\beta_{i,j}$。邀请领域内 5 名专家对 20 项事故致因中任意两项的影响作用按照很强、较强、一般、较弱、无影响 5 个等级分别按照 4、3、2、1、0 分的标准进行打分,根据 5 名专家打分的结果均值构建初始直接影响矩阵 $\boldsymbol{K}=[k_{ij}]_{n\times n}$,并计算得到规范化直接影响矩阵 $\boldsymbol{W}$,计算式为

$$\boldsymbol{W}=[w_{ij}]_{n\times n}=\frac{1}{\max\limits_{1\leqslant i\leqslant n}\sum\limits_{j=1}^{n}\beta_{i,j}}\boldsymbol{K} \tag{1}$$

2.2 综合影响矩阵、中心度和原因度的计算

交通隧道施工过程中各致因间存在纵向影响关系,一个因素的变化可能会波及其他因素,为分析此种作用关系,要确定事故致因的综合影响矩阵 $\boldsymbol{M}$,另外计算交通隧道施工事故致因影响度 d_i 及被影响度 f_i。影响度与被影响度的和为中心度 c_i,可表示各因素的重要性程度;影响度与被影响度的差值为原因度 r_i,$r_i>0$ 说明该因素属于交通隧道施工事故致因体系中的原因因素集合,$r_i<0$ 表明其属于结果因素集合。以上因素计算式为

$$\boldsymbol{M}=[m_{ij}]_{n\times n}=\boldsymbol{W}_1+\boldsymbol{W}_2+\cdots+\boldsymbol{W}_n=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{W}_i \tag{2}$$

$$d_i=\sum_{j=1}^{n}m_{ij} \tag{3}$$

$$f_i=\sum_{j=1}^{n}m_{ji} \tag{4}$$

$$c_i=d_i+f_i \tag{5}$$

$$r_i=d_i-f_i \tag{6}$$

各事故致因影响度、被影响度、中心度、原因度计算结果图 3、图 4 所示。由图 3 可知,在影响度与被影响度方面,管理、人员两方面因素较技术、机械设备与材料因素的影响度高、被影响度低,证明管理、人员因素易对其他事故致因造成影响,其中安全监管不到位(α_{14})、安全意识及素养淡薄(α_3)的影响程度最大。由图 4 可知,在中心度方面,管理、人员两方面因素较环境、技术、机械设备与材料因

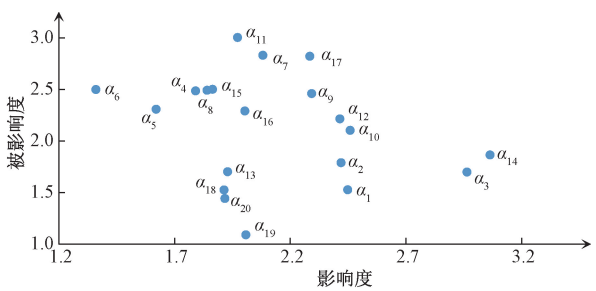

图 3 事故致因影响度与被影响度

Fig. 3 Influence and influenced degree of the causes of the accidents

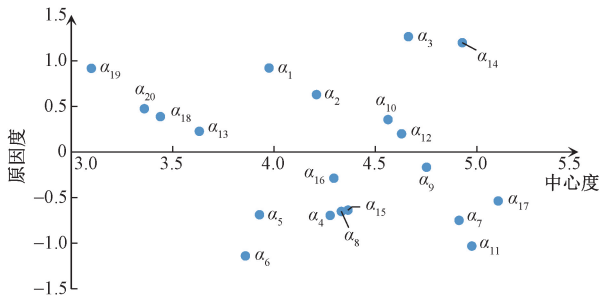

图 4　事故致因中心度及原因度

Fig. 4　Centrality and cause degree of the causes of the accidents

素更高,证明该两方面因素在事故致因体系中占据重要位置;在原因度方面,环境因素均属于原因因素集合,技术、机械设备与材料因素均属于结果因素集合,进一步验证责任事故、人为原因及环境气象为地下工程事故的主要原因[11]。因此,对人员、管理因素进行管控是提高安全风险管理水平的有效手段。

2.3　多级递阶结构模型的构建

考虑各事故致因对自身的影响,采用单位矩阵 $\boldsymbol{E}$ 与综合影响矩阵 $\boldsymbol{M}$ 相加的方式得到整体影响矩阵 $\boldsymbol{U}$,即

$$\boldsymbol{U} = [u_{ij}]_{n\times n} = \boldsymbol{E} + \boldsymbol{M} \tag{7}$$

为筛去影响程度较弱的指标之间的关系,可对整体影响矩阵 $\boldsymbol{U}$ 设置阈值 λ,由

$$h_{ij} = \begin{cases} 1, & u_{ij} \geqslant \lambda \\ 0, & u_{ij} < \lambda \end{cases} \tag{8}$$

得到可达矩阵 $\boldsymbol{H} = [h_{ij}]_{n\times n}$,从而达到简化系统结构的效果。在本文中 λ 采用赋值法,分别取 0.08、0.10、0.12、0.13、0.14、0.15、0.16 进行对比分析[16-17],综合考虑 7 种不同的阈值取值情况下各事故致因影响关系的清晰度及复杂度,最终确定阈值 $\lambda = 0.15$。

根据确定的可达矩阵 $\boldsymbol{H}$,利用

$$\begin{cases} X_i = \{\alpha_j / \alpha_j \in S, h_{ij} = 1\}, & i,j = 1,2,\cdots,n \\ Y_i = \{\alpha_j / \alpha_j \in S, h_{ji} = 1\}, & i,j = 1,2,\cdots,n \end{cases} \tag{9}$$

计算出可达集合 X_i 及前因集合 Y_i。其中可达集合 X_i 表示在可达矩阵中事故致因 α_i 可以到达所有因素的集合,前因集合 Y_i 表示可以到达事故致因 α_i 的所有因素的集合,按

$$X_i = X_i \cap Y_i, \quad i = 1,2,\cdots,n \tag{10}$$

对 X_i 及 Y_i 进行验证,若满足则表示 X_i 中的所有致因都可以在 Y_i 中找到即 α_i 为最高层级因素,依次逐步确定交通隧道施工事故致因多级递阶结构模型。

根据以上原则,以 $\lambda = 0.15$ 为阈值所计算出的可达矩阵为基础,以单向箭头表示各致因因素的纵向影响关系,绘制交通隧道施工事故致因多级递阶结构模型,该多级递阶模型中共有 5 个层级,本文中借鉴文献[17-18]将该多级递阶模型的 5 个层级划分为本质因素、深层因素、过渡因素及表层因素 4 个类别,如图 5 所示。

图 5 所示模型各层级及各类别对施工安全的影响程度逐级加深,其中第五层级是事故致因体系的本质因素,是交通隧道施工过程中的基础性因素,影响其他层级及类别因素安全程度,即安全意识及素养、安全监管对交通隧道施工安全有着根源性影响;第四层级即深层因素是安全管理过程中的重要因素,是对事故致因因素递阶影响的深层挖掘;第二层级至第三层级的风险因素为过渡因素,它们受深层因素及本质因素的影响,同时也影响着表层因素,是预防施工事故的重要一环;第一层级的表层因素,是事故发生的直接原因,在施工过程中控制这些因素对预防事故的发生会起到较为直接显著的效果。

2.4　关键事故致因影响链构建分析

在明确各致因递阶层级结构的基础上,从“管理、人员、环境、机械设备及材料、技术”5 个角度出发分析其交互作用,明确关键致因影响路径,为施工人员制定有效的安全管理措施,阻断致因间的不良影响提供依据。

2.4.1　关键致因确定及影响链构建

根据 ISM 得到的事故致因多级递阶结构模型,结合 DEMATEL 确定的中心度、原因因素与结果因素集合,明确 6 项关键致因,并构建关键致因影响链,具体原则如下。

(1)安全意识及素养淡薄、安全监管不到位在事故致因多级递阶结构模型中属于根源性因素,且重要性程度高,对其他致因的影响大,据此分别构建以安全意识及素养淡薄和安全监管不到位两个本质因素为核心的因素影响链,如图 6、图 7 所示。

(2)各环境因素在事故致因多级递阶结构模型中受本质因素的影响程度较小,属于深层因素,在施工管控过程中处于关键位置,且其均属于原因因素集合,对其他致因有较为明显的影响,为辨别环境因素对其他因素的影响关系构建“环境条件不佳”影响链,如图 8 所示。

(3)施工方案不合理在事故致因多级递阶结构模型中受本质因素及深层因素的影响较大,且其中心度最高,在事故致因体系中重要程度最高,以此将其影响和被影响的致因提取为以施工方案不合理为核心的影响链,如图 9 所示。

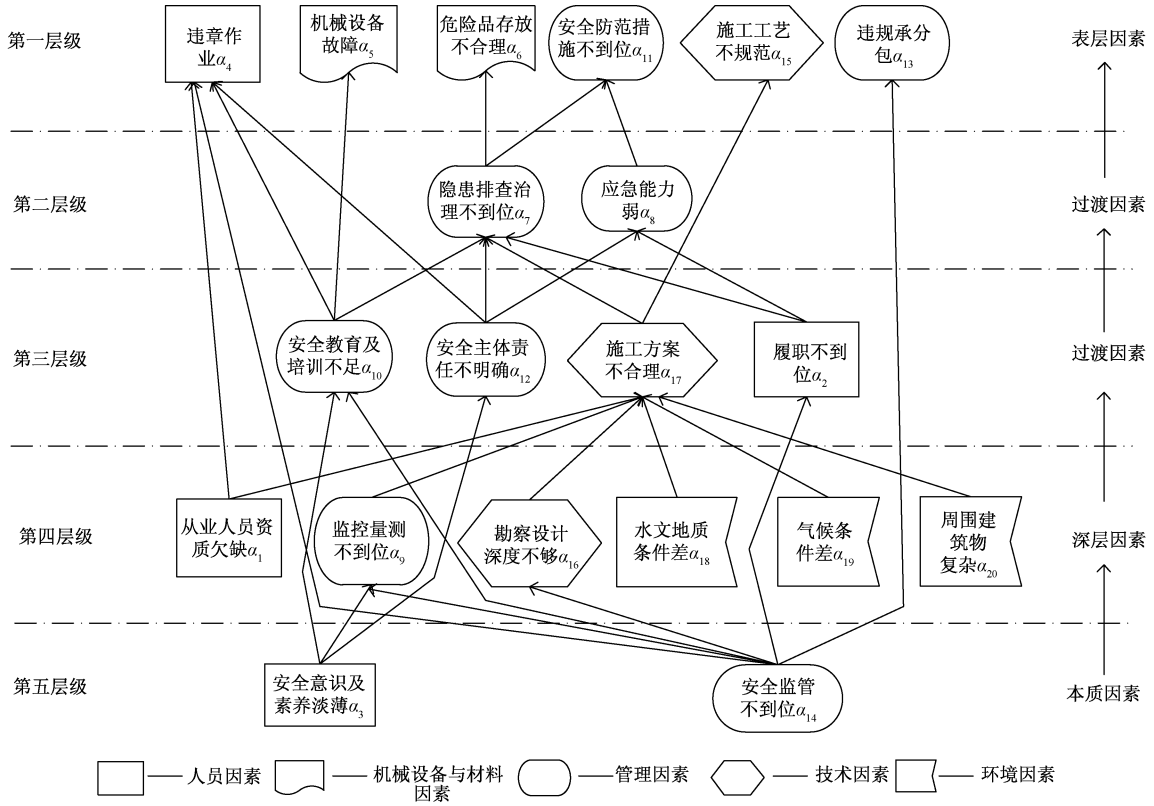

图 5 交通隧道施工事故致因多级递阶结构模型

Fig. 5 Multi-level hierarchical structure model for traffic tunnel construction accidents

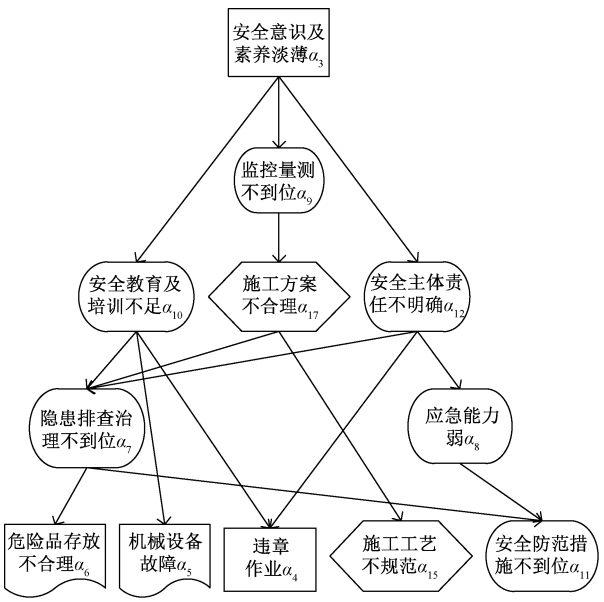

图 6 安全意识及素养淡薄影响链

Fig. 6 The chain of poor safety awareness and literacy

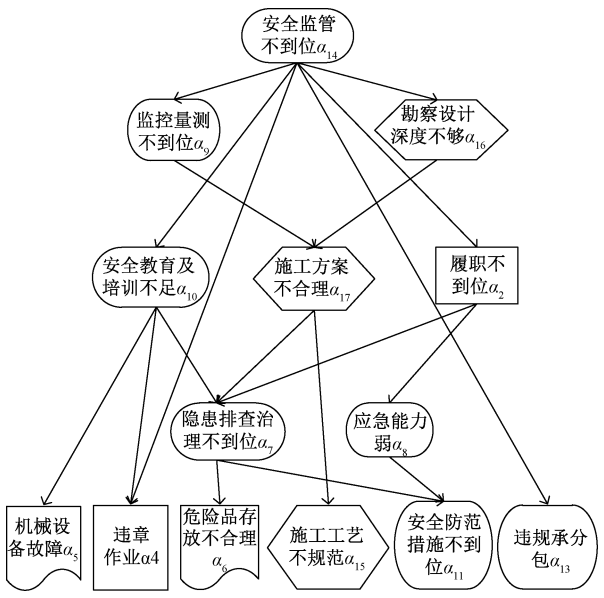

图 7 安全监管不到位影响链

Fig. 7 The chain of inadequate safety supervision

2.4.2 关键事故致因影响链分析

在“安全意识及素养淡薄”影响链中(图 6),以人员因素为核心直接影响管理因素,进而影响技术、机械设备与材料因素。说明从业人员的业务能力直接影响交通隧道施工管理水平,影响安全施工的组织规划,即从业人员的安全意识及素养是管控隧道施工风险的重要着力点,严格把握管理人员的安全意识,有助于完善安全主体责任,促进安全教育培训,增强施工人员的安全知识,为后续施工方案的设计实施,隐患排查治理的执行,应急预案的制定等奠定良好的基础。

在“安全监管不到位”影响链中(图 7),管理因素

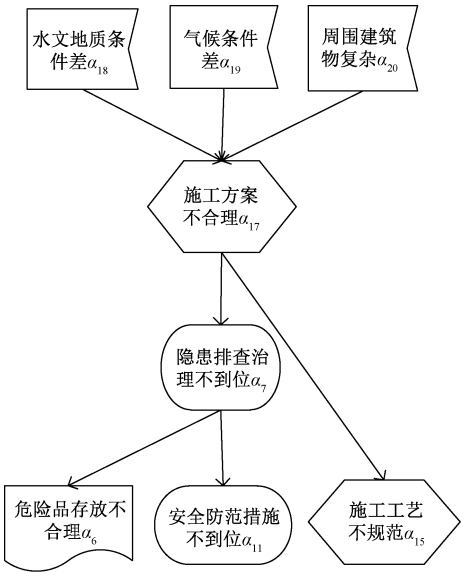

图 8　环境因素影响链

Fig. 8　The chain of envirnmental factors

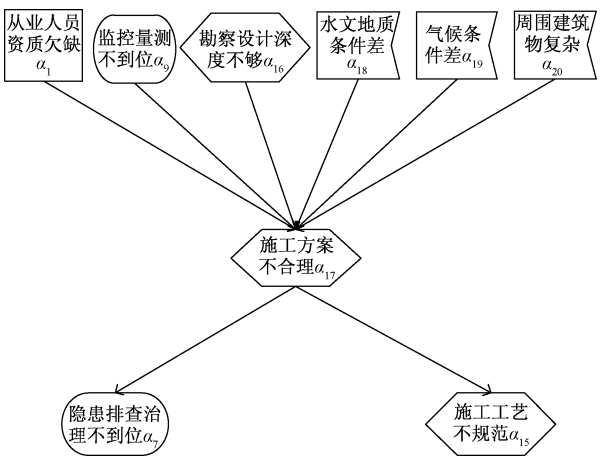

图 9　施工方案不合理影响链

Fig. 9　The chain of unreasonable construction plans

直接影响人员因素及技术因素,贯穿隧道施工全过程。说明安全管理力度直接影响从业人员及设计方案的施工效果,即在管控隧道施工过程中,严格执行安全监管可不断修正人的不安全行为,改善物的不安全状态,防止在施工过程中出现操作失误、违反安全章程、擅离职守及勘察设计深度不够等情况。

在"环境条件不佳"影响链中(图 8),环境因素直接作用于技术因素,进而影响管理因素及机械设备因素。说明施工项目的环境条件直接影响施工方案及机械设备的选择,即充分了解施工项目所处地区的地质水文条件、气候条件及周围管线设施,是选择合理施工方案的前提,对地质情况进行超前预测及预报,也为后续施工及设计方案的及时变更奠定了基础。

在"施工方案不合理"影响链中(图 9),施工方案受到人员、管理、技术及环境的综合影响,合理施工方案的选择依靠施工项目的环境条件、勘察设计深度及相关从业人员的资质与经验,同时又影响着施工工艺的选择及隐患排查治理的效果,即完善的施工方案是良好安全管理的体现。

3　案例分析

3.1　事故案例概况

万拉木隧道全长约 4.88 km,是丽香铁路的重要组成部分,该隧道正洞施工采用辅助坑道横洞的方式,横洞长为 995 m,在正洞施工过程中发生一起物体打击事故,造成 1 人死亡,直接经济损失约 135 万元。

3.2　事故案例致因链分析

应用上文构建的事故致因体系,结合事故调查报告中的事故发生经过、事故原因分析、事故责任认定,提取此次物体打击事故致因因素,并结合调查报告上下文语境,如"现场安全生产检查不到位,未能及时发现施工安全存在的事故隐患"整理出事故致因影响链如图 10 所示。

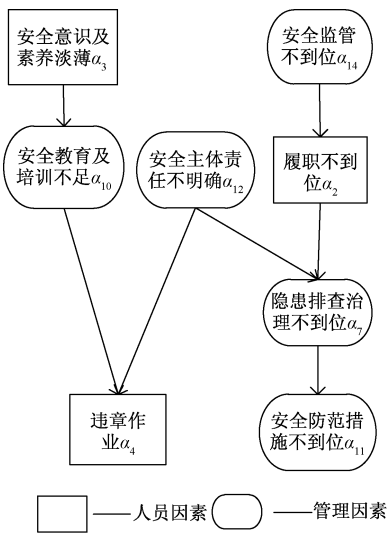

图 10　事故案例致因影响链

Fig. 10　The causal influence chain of accident case

图 10 事故致因链显示,此次物体打击事故的主要致因因素为管理及人员因素两类,在安全意识及素养淡薄、安全监管不到位两个根源因素的作用下,各因素纵向影响,最终造成施工人员安全防护措施不到位及违规作业,以致事故发生。该影响链一方面证实了"安全意识及素养淡薄"及"安全监管不到位"在事故致因中的关键位置,另一方面与前文构建的事故致因多级递阶模型具有一致性。

为有效阻断事故致因的纵向影响关系,从管理及人员两个角度出发,致力于"从根源因素处控制,

于过渡因素处截断,在表层因素处阻止”,提出安全促进对策,具体如表2所示,结合事故报告中的事故防范措施建议对比分析,进一步证明致因链及关键因素的确定,可为阻断致因链发展,防控隧道施工事故的发生提供参考和依据。

表2 事故案例安全促进对策

Table 2 Safety promotion countermeasures for accident cases

事故案例致因因素		安全促进对策
管理因素	安全监管不到位	保证施工全过程安全管理,加强安全监督检查力度
	安全意识及素养淡薄	严格把控安全管理人员的安全知识储备,加强知识学习
	安全责任主体不明确	建立安全生产责任制度,明确安全管理人员安全主体责任
	安全教育培训不到位	设置完善的安全管理制度,做好安全教育及培训工作
	隐患排查治理不到位	严格执行施工现场隐患排查工作,坚决落实治理措施
	安全防范措施不到位	落实技术交底工作,强化安全保护措施
人员因素	履职不到位	增加安全监管强度,强化从业人员责任意识
	违章作业	加强对施工作业人员安全教育,杜绝违法违章行为

4 结论

与以往研究多关注于事故致因本身对施工安全的影响不同,本研究以挖掘事故致因间的纵向关系为根本任务,力求探寻事故致因链并找出关键因素,以便从根源上对事故致因进行控制,对交通隧道施工实践具有一定的指导意义。

(1)交通隧道施工安全受多项因素综合影响,具体可概括为人员、机械设备与材料、管理、技术以及环境5个方面20项。

(2)交通隧道施工事故致因可划分为5个层级4个类别,各层级、各类别间存在明确的递进关系,随表层因素、过渡因素、深层因素及本质因素的逐步递进,各因素对隧道施工安全影响程度逐步加深。

(3)5个方面的事故致因间存在交互作用,且管理、人员、环境因素可直接作用于技术、机械设备及材料因素。

(4)事故致因间具有纵向影响关系,其中安全意识及素养、安全监管、各类环境因素、施工方案为关键控制点,对其进行合理有效控制可减少事故发生。

参 考 文 献

[1] 张延杰, 杨小兵, 任孟德, 等. 山岭隧道施工期静态与动态风险评估方法及应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(10): 2703-2710.
Zhang Yanjie, Yang Xiaobing, Ren Mengde, et al. Static and dynamic risk assessment method of mountain tunnel during construction period and its application[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(10): 2703-2710.

[2] 桂志敬, 吴忠广, 严 琼, 等. 公路隧道施工安全风险评估方法优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(9): 136-143.
Gui Zhijing, Wu Zhongzhuang, Yan Qiong, et al. Study on optimization of safety risk assessment method for highway tunnelconstruction[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(9): 136-143.

[3] 黄 俐, 梁 鹏. 北京地铁六号线盾构施工风险分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(6): 238-243.
Huang Li, Liang Peng. Risk analysis in beijing subway shield tunneling construction of Line 6[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(6): 238-243.

[4] 王景春, 林佳秀, 靳俊中. 基于改进 *K*-Means 聚类模型的公路隧道施工风险分析及其应用[J]. 公路交通科技, 2019, 36(6): 58-64.
Wang Jingchun, Lin Jiaxiu, Jin Junzhong. Analysis on highway tunnel construction risk based on improved *K*-Means clustering model and application[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(6): 58-64.

[5] 孙瑞义, 黄 帅. 复杂山岭隧道施工风险管理与控制措施[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(11): 4627-4633.
SunRuiyi, Huang Shuai. Risk management and control measures of complex mountain tunnel construction[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(11): 4627-4633.

[6] Ou G Z, Jiao Y Y, Zhang G H, et al. Collapserisk assessment of deep-buried tunnel during construction and its application[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 115: 104019.

[7] Zhou H, Zhao Y, Shen Q, et al. Risk assessment and management via multi-source information fusion for undersea tunnel construction[J]. Automation in Construction, 2020, 111: 103050.

[8] 刘 灿, 郑邦友, 李 政, 等. 基于熵权-改进灰色关联模型的公路隧道塌方风险评估[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(15): 6292-6297.
Liu Can, Zheng Bangyou, Li Zheng, et al. Risk assessment of highway tunnel collapse in entropy weight-modified grey relational model[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(15): 6292-6297.

[9] 孙景来, 刘保国, 储昭飞, 等. 隧道坍塌事故类型划分及其主要特征[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(6): 44-51.
Sun Jinglai, Liu Baoguo, Chu Zhaofei, et al. Type classification and main characteristics of tunnel collapses[J]. China Railway Science, 2018, 39(6): 44-51.

[10] 熊自明, 卢 浩, 王明洋, 等. 我国大型岩土工程施工安全风险管理研究进展[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3703-3716.
Xiong Ziming, Lu Hao, Wang Mingyang, et al. Research progress on safety risk management for large scale geotechnical engineering construction in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10): 3703-3716.

[11] 王 龚. 城市地铁隧道事故案例统计分析与风险评价方法研

究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
Wang Gong. Study on accidents statistical analysis and risk assessment methods of urban subwaytunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[12] 陈　赟, 陈玉斌, 李晶晶, 等. 基于知识元表达的地铁隧道施工事故情景库设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 259-267.
Chen Yun, Chen Yubin, LI Jingjing, et al. Design of subway tunnel construction accident scene database based on knowledge element expression[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(1): 259-267.

[13] Kumar S, Kar A K, Ilavarasan P V. Applications of text mining in services management: a systematic literaturereview[J]. International Journal of Information Management Data Insights, 2021, 1(1): 100008.

[14] 张华平, 商建云. NLPIR-Parser: 大数据语义智能分析平台[J]. 语料库语言学, 2019, 6(1): 87-104.
Zhang Huaping, Shang Jianyun. NLPIRR-Parser: an intelligent semantic analysis toolkit for big data[J]. Corpus Linguistics, 2019(1): 87-104.

[15] 张华平, 商建云. 面向社会媒体的开放领域新词发现[J]. 中文信息学报, 2017, 31(3): 55-61.
Zhang Huaping, Shang Jianyun. Social media-oriented open domain new word detection[J]. Journal of Chinese Information Processing, 2017, 31(3): 55-61.

[16] 刘明菲, 陈　威. 基于集成 DEMATEL-ISM 的生鲜冷链前置仓物流服务质量风险影响因素研究[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(1): 118-125.
Liu Mingfei, Chen Wei. Research on risk impacting factors of logistics service quality of fresh cold chain front warehouse based on DEMATEL-ISMmethod[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(1): 118-125.

[17] 朱敬宇, 陈国明, 曹恩泽, 等. 基于 DEMATEL/ISM 的深水井喷风险影响因素研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(8): 5-10.
Zhu Jingyu, Chen Guoming, Cao Enze, et al. Study on influencing factors of deepwater blowout risk based on DEMATEL/ISM[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(8): 5-10.

[18] 江芙蓉, 李　翔. 基于 DEMATEL-ISM 的飞行学员训练应激结构模型研究[J]. 航天医学与医学工程, 2020, 33(1): 15-21.
Jiang Furong, Li Xiang. Study on structural modeling of stressors for student pilot in flight training based on DEMATELISM[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2020, 33(1): 15-21.