

基于主成分分析法的地铁施工危险源层次辨识研究

张艺耀, 牟陆滢, 王亚东, 沈政涛, 陈音圻, 吴萍*

浙大宁波理工学院, 土木建筑工程学院, 浙江 宁波
Email: *wuping@nit.zju.edu.cn

收稿日期: 2020年8月20日; 录用日期: 2020年9月3日; 发布日期: 2020年9月10日

摘要

地铁项目具有施工技术复杂、周边环境复杂、不可预见因素多等特点, 导致安全事故多发。本文收集2001年~2019年地铁安全事故案例进行原因分析, 并对危险源造成的损失成果程度进行问卷调查, 借助主成分分析法研究危险源发生的频率及规律特点, 研究危险源的相关性。将相关度高的危险源进行合并, 从而得出六项关键危险源, 为有效控制危险源提供参考。

关键词

地铁施工危险源, 案例分析, 主成分分析法

Research on Hierarchical Identification of Dangerous Sources in Metro Construction Based on Principal Component Analysis

Yiyao Zhang, Luyin Mou, Yadong Wang, Zhengtao Shen, Yinqi Chen, Ping Wu*

School of Civil Architecture & Engineering, Ningbo Tech University, Ningbo Zhejiang
Email: *wuping@nit.zju.edu.cn

Received: Aug. 20th, 2020; accepted: Sep. 3rd, 2020; published: Sep. 10th, 2020

Abstract

The subway project has the characteristics of complex construction technology, complex sur-
*通讯作者。

文章引用: 张艺耀, 牟陆滢, 王亚东, 沈政涛, 陈音圻, 吴萍. 基于主成分分析法的地铁施工危险源层次辨识研究[J]. 土木工程, 2020, 9(9): 875-883. DOI: 10.12677/hjce.2020.99092

rounding environment, and many unforeseen factors, which lead to frequent safety accidents. This paper collects a number of subway safety accident cases from 2001 to 2019, extracts the causes, conducts a questionnaire survey on the degree of loss of hazards, and uses principal component analysis to study the frequency and regular characteristics of hazards, and to study the correlation of hazards. Combine the highly correlated hazards to obtain six key hazards, which can provide reference for effective control of hazards.

Keywords

Dangerous Source of Subway Construction, Case Analysis, Principal Component Analysis Method

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地铁通达性为日常生活提供了众多便捷,但由于施工地点位于地下且属于大型机械化施工项目,施工过程中坍塌、机械伤害、高处作业等所造成的人员财产伤害不计其数。所以,识别危险源并进行有效规避显得尤为重要。而造成施工安全事故的危险源众多,导致控制安全危险源并进行预防需要投入大量人力物力。因此,本文通过收集2001年~2019年地铁施工事故案例进行统计分析,辨识主要危险源的规律特点,研究危险源之间的相关性,从而合并危险源种类,给相关单位提供有针对性的安全预防措施,降低安全管理的复杂性。

2. 危险源辨识

2.1. 危险源概念

哈默(Willie Hammer)认为危险源是指在某个系统中一种隐藏的不安全因素,这种因素具有潜在的能量使作用的物质能够通过某种形式释放危险,可能使人的生命安全受到威胁或财产遭到损失[1]。

2.2. 危险源辨识方法

危险源辨识是安全管理的基础工作,主要目的是要找出每项工作活动有关的所有危险源,并考虑这些危险源可能会对什么人造成什么样的伤害,或导致什么设备设施损坏等[2]。

目前应用于危险源的辨识方法有数十种,主要有事故案例统计分析、专家调查法、故障树分析,安全检查表法等,本文主要运用事故案例统计分析和问卷调查对危险源进行辨识。

3. 地铁施工安全事故案例原因统计分析

3.1. 危险源清单

通过对2001年~2019年收集240项地铁安全事故的初步研究得出以下15项原因,分别是:恶劣天气、地质构造复杂、水土流失土质疏松、地下水渗漏、安全教育培训不足、前期勘察不到位、施工前应急逃生管理不足、安全隐患排查治理不当、防护设备不达标、施工设备不达标、设计方案不合理、施工方擅自改变施工方案、工地管理人员应急处理措施不当、高空作业意外和用电意外。

将上述原因按照设备-人为-环境-管理四个角度进行分类汇总,形成危险源分类清单,见图1所示。

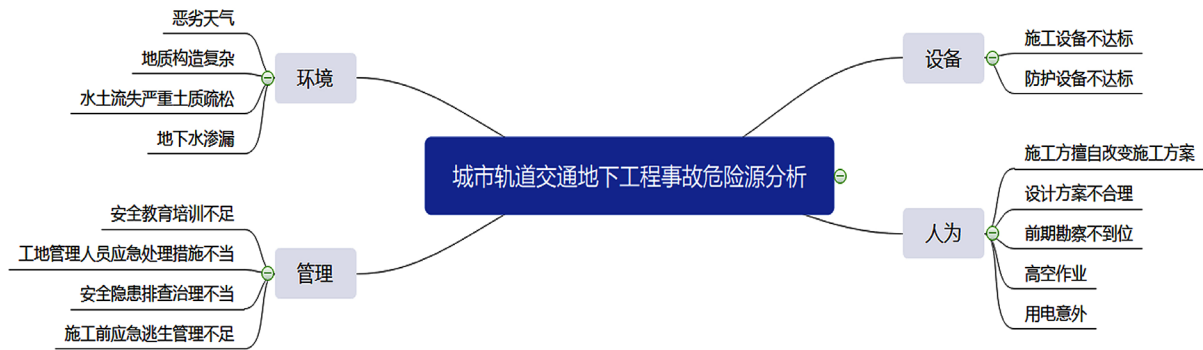


Figure 1. Hazard classification list

图 1. 危险源分类清单

3.2. 危险源频率及造成损失后果程度分析

根据收集的地铁施工安全事故的事故调查报告中提出的各种原因分析及上文的危险源分类,得到各危险源导致安全事故统计频率图,如下图2所示。

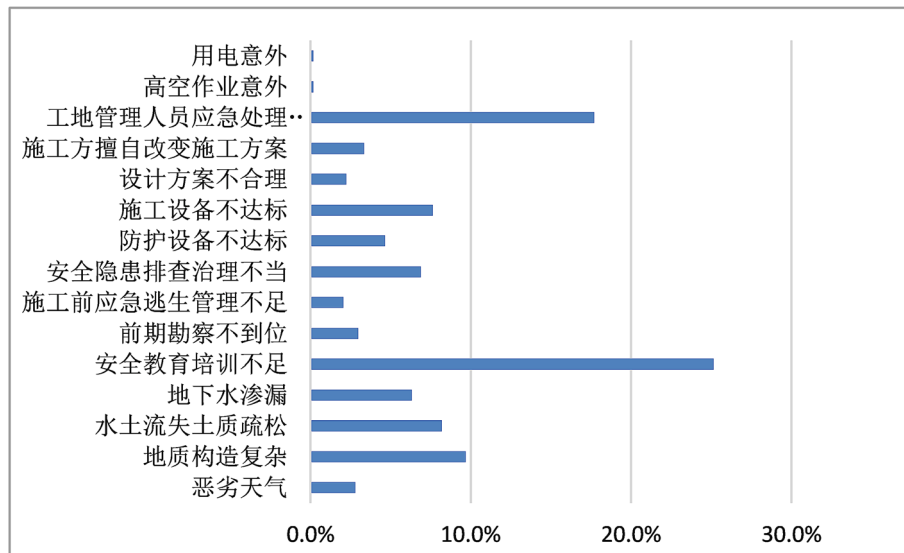


Figure 2. Accident cause frequency chart

图 2. 事故发生原因频率图

上图显示,工地管理人员应急处理措施不当和安全教育培训不足在发生频率上占绝大多数。

在本次调查中,面向地铁项目建设的参与方,共发放15份问卷,收回15份问卷。问卷关于危险源清单中的危险源在施工过程中造成损失后果程度进行调研,将造成的后果损失程度分为不严重、不太严重、一般、严重以及很严重五个等级,在下图3中转化为百分比进行比较分析。

图3显示,各危险源造成的损失程度都相当高,并且差距不大。其中恶劣天气、安全隐患排查治理不当、施工设备不达标和工地管理人员应急处理措施不当所造成的损失最为严重。

将图2和图3结合观察可得,工地管理人员应急处理措施不当和安全教育培训不足发生频率最高,造成损失也非常严重。说明以上两种危险源在地铁施工过程中风险度最高,需要进行重点关注和研究。

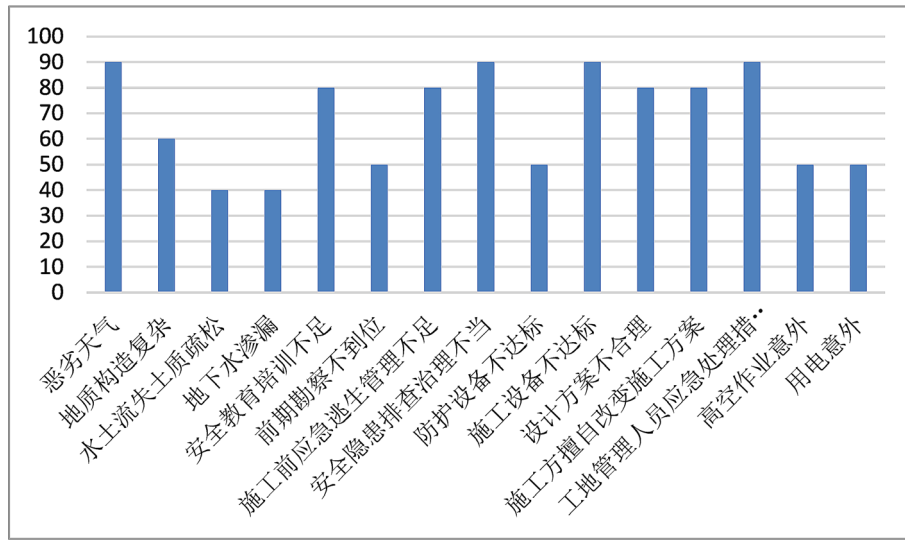


Figure 3. Degree of loss caused by hazard
图 3. 危险源造成损失程度

4. 危险源相关性分析

本文采用主成分分析法研究上述 15 个危险源的层次关系。主成分分析法是一种多目标评价方法。它利用多元统计方法，完全依赖于评价指标的实际数据，较为客观，而且将多维数据进行降维处理，可以指出影响评价结果的主要因素[3]。地铁施工项目的危险源多，如对每一危险源进行安全风险评价会造成评价的复杂。因此本文通过主成分分析法，对 15 个危险源种类行降维分析，将多个危险源变量转化为几个综合变量，以此筛减合并相似事故危险源，得到最主要最关键的危险源，对关键危险源加大预防措施力度。

4.1. 危险源之间的相关性

本文采用 2001 年~2019 年间 240 起施工案例进行分析，提取危险源后将每一起案例发生的所有危险源因素编号，并输入 SPSS 中得出各个危险源之间的相关性及其显著性如表 1 所示，为下文中的数据降维提供依据。

Table 1. Correlation table among 15 hazards
表 1. 15 个危险源间的相关性表

危险源	恶劣天气	地质构造复杂	水土流失土质疏松	地下水渗漏	安全教育培训不足	前期勘察不到位	应急逃生管理不足	隐患排查治理不当	防护设备不达标准	施工设备不达标准	设计方案不合理	擅自改变施工方案	管理人员应急不当	高空作业意外	用电意外
恶劣天气 X1	1	0.046	0.072	0.066	-0.045	-0.076	0.095	-0.028	0.159*	0.079	-0.063	0.017	-0.029	-0.018	-0.018
地质构造复杂 X2	0.046	1	0.650**	0.752**	-0.467**	0.046	-0.023	-0.120	-0.002	-0.075	0.060	-0.118	0.227**	-0.035	-0.035
相关性显著性		0.481	0.267	0.309	0.491	0.239	0.143	0.667	0.014	0.222	0.328	0.792	0.657	0.783	0.783
相关性显著性	0.481		0.000	0.000	0.000	0.481	0.727	0.065	0.971	0.248	0.359	0.068	0.000	0.591	0.591

Continued

水土流失土质疏松 X3	相关性显著性	0.072	0.650**	1	0.863**	-0.455**	-0.011	0.045	-0.061	-0.039	-0.067	0.180**	-0.005	0.074	-0.031	-0.031
		0.267	0.000		0.000	0.000	0.870	0.486	0.344	0.544	0.304	0.005	0.933	0.257	0.627	0.627
地下水渗漏 X4	相关性显著性	0.066	0.752**	0.863**	1	-0.404**	0.020	0.020	-0.115	-0.002	-0.018	0.118	-0.092	0.153*	-0.027	-0.027
		0.309	0.000	0.000		0.000	0.752	0.763	0.076	0.977	0.780	0.069	0.155	0.017	0.675	0.675
安全教育不足 X5	相关性显著性	-0.045	-0.467**	-0.455**	-0.404**	1	-0.144*	0.013	-0.012	-0.093	-0.083	-0.208**	-0.028	-0.191**	0.052	0.052
		0.491	0.000	0.000	0.000		0.025	0.846	0.853	0.153	0.200	0.001	0.663	0.003	0.423	0.423
勘察不到位 X6	相关性显著性	-0.076	0.046	-0.011	0.020	-0.144*	1	-0.061	-0.028	0.004	-0.089	0.235**	0.172**	0.004	-0.018	-0.018
		0.239	0.481	0.870	0.752	0.025		0.351	0.667	0.945	0.170	0.000	0.007	0.947	0.783	0.783
应急管理不足 X7	相关性显著性	0.095	-0.023	0.045	0.020	0.013	-0.061	1	0.293**	-0.078	0.000	0.041	0.143*	0.063	-0.014	-0.014
		0.143	0.727	0.486	0.763	0.846	0.351		0.000	0.228	0.989	0.526	0.027	0.330	0.827	0.827
隐患排查治理不当 X8	相关性显著性	-0.028	-0.120	-0.061	-0.115	-0.012	-0.028	0.293**	1	0.067	0.096	-0.045	0.072	0.048	-0.028	-0.028
		0.667	0.065	0.344	0.076	0.853	0.667	0.000		0.301	0.138	0.488	0.267	0.458	0.670	0.670
防护设备不达标 X9	相关性显著性	0.159*	-0.002	-0.039	-0.002	-0.093	0.004	-0.078	0.067	1	0.036	0.160*	-0.015	-0.051	-0.023	-0.023
		0.014	0.971	0.544	0.977	0.153	0.945	0.228	0.301		0.581	0.013	0.817	0.428	0.723	0.723
施工设备不达标 X10	相关性显著性	0.079	-0.075	-0.067	-0.018	-0.083	-0.089	0.000	0.096	0.036	1	-0.059	-0.052	-0.127*	-0.031	-0.031
		0.222	0.248	0.304	0.780	0.200	0.170	0.989	0.138	0.581		0.360	0.419	0.050	0.637	0.637
设计方案不合理 X11	相关性显著性	-0.063	0.060	0.180**	0.118	-0.208**	0.235**	0.041	-0.045	0.160*	-0.059	1	0.224**	-0.033	-0.015	-0.015
		0.328	0.359	0.005	0.069	0.001	0.000	0.526	0.488	0.013	0.360		0.000	0.610	0.819	0.819

Continued

擅自改变施工方案 X12	相关性显著性	0.017	-0.118	-0.005	-0.092	-0.028	0.172**	0.143*	0.072	-0.015	-0.052	0.224**	1	0.144*	-0.014	0.295**
管理人员应急不当 X13	相关性显著性	0.792	0.068	0.933	0.155	0.663	0.007	0.027	0.267	0.817	0.419	0.000		0.025	0.827	0.000
高空作业意外 X14	相关性显著性	-0.029	0.227**	0.074	0.153*	-0.191**	0.004	0.063	0.048	-0.051	-0.127*	-0.033	0.144*	1	-0.053	0.079
用电意外 X15	相关性显著性	0.657	0.000	0.257	0.017	0.003	0.947	0.330	0.458	0.428	0.050	0.610	0.025		0.411	0.225
	相关性显著性	-0.018	-0.035	-0.031	-0.027	0.052	-0.018	-0.014	-0.028	-0.023	-0.031	-0.015	-0.014	-0.053	1	-0.004
	相关性显著性	0.783	0.591	0.627	0.675	0.423	0.783	0.827	0.670	0.723	0.637	0.819	0.827	0.411		0.949
	相关性显著性	-0.018	-0.035	-0.031	-0.027	0.052	-0.018	-0.014	-0.028	-0.023	-0.031	-0.015	0.295**	0.079	-0.004	1
	相关性显著性	0.783	0.591	0.627	0.675	0.423	0.783	0.827	0.670	0.723	0.637	0.819	0.000	0.225	0.949	

注释：表格中*代表 0.05 显著性水平，**代表 0.01 显著性水平。

由上表可知，恶劣天气所对应的显著值中防护设备不达标的数值为 0.014，该值小于 0.005，说明两项危险源之间有显著的线性相关关系。同理可得，地质构造复杂、水土流失土质疏松、地下水渗漏、安全教育培训不足、工地管理人员应急处理不当这几个危险源之间有显著的线性相关关系。线性相关关系表示危险源之间相互影响的关系。例如：恶劣天气会增加因防护设备不达标而造成的施工事故发生概率。故下一步，即进行主成分与变量的选取，将应用主成分分析进行数据降维，把 15 个危险源缩减为较少的互不相关的指标。

4.2. 主成分与变量选取和分析

通过 SPSS 软件进行主成分分析法分析后得出了 6 个主成分见表 2 及表 3 所示。

Table 2. Component matrix

表 2. 成分矩阵

	主成分						H
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	
X1 恶劣天气	0.085	-0.113	0.343	0.298	0.548	0.193	0.564
X2 地质构造复杂	0.859	-0.125	-0.003	-0.115	0.013	-0.029	0.768
X3 水土流失土质疏松	0.883	-0.051	0.066	-0.039	0.001	0.162	0.814
X4 地下水渗漏	0.908	-0.126	0.043	-0.069	0.030	0.098	0.857
X5 安全教育培训不足	-0.660	-0.142	-0.051	-0.224	0.052	0.188	0.547
X6 前期勘察不到位	0.102	0.460	-0.402	0.232	-0.293	-0.085	0.531

Continued

X7 施工前应急逃生管理不足	0.007	0.284	0.674	-0.082	-0.255	0.288	0.690
X8 安全隐患排查治理不当	-0.133	0.224	0.655	0.103	-0.347	-0.067	0.632
X9 防护设备不达标	0.027	0.058	0.031	0.653	0.306	-0.071	0.530
X10 施工设备不达标	-0.072	-0.202	0.321	0.366	0.123	-0.189	0.334
X11 设计方案不合理	0.241	0.513	-0.253	0.445	-0.154	0.165	0.634
X12 施工方擅自改变施工方案	-0.042	0.780	0.048	-0.082	0.238	0.098	0.685
X13 工地管理人员应急处理不当	0.261	0.284	0.157	-0.435	0.045	-0.367	0.499
X14 高空作业意外	-0.067	-0.078	-0.126	-0.074	-0.053	0.782	0.646
X15 用电意外	-0.056	0.407	-0.031	-0.345	0.598	0.020	0.647

Table3. Explained total variance
表 3. 解释的总方差

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差的%	累计%	合计	方差的%	累计%
Y1	2.954	19.691	19.691	2.954	19.691	19.691
Y2	1.579	10.525	30.216	1.579	10.525	30.216
Y3	1.382	9.217	39.432	1.382	9.217	39.432
Y4	1.309	8.727	48.159	1.309	8.727	48.159
Y5	1.126	7.509	55.668	1.126	7.509	55.668
Y6	1.028	6.853	62.521	1.028	6.853	62.521
Y7	0.987	6.578	69.099			
Y8	0.932	6.216	75.315			
Y9	0.865	5.769	81.084			
Y10	0.748	4.986	86.070			
Y11	0.594	3.963	90.033			
Y12	0.560	3.730	93.763			
Y13	0.521	3.472	97.235			
Y14	0.312	2.079	99.314			
Y15	0.103	0.686	100.000			

依据表 2 及表 3 可以计算出相应于第一个特征值 2.954 的特征向量为: [0.049, 0.500, 0.514, 0.528, -0.384, 0.059, 0.004, -0.077, 0.016, -0.042, 0.140, -0.024, 0.152, -0.039, -0.033]。

特征向量中的每一个值, 对应每一个原始危险源的系数。因此, 第一个主成分的表达式可以写作:

$$Y1 = 0.049X1 + 0.500X2 + 0.514X3 + 0.528X4 - 0.384X5 + 0.059X6 + 0.004X7 - 0.077X8 + 0.016X9 - 0.042X10 + 0.140X11 - 0.024X12 + 0.152X13 - 0.039X14 - 0.033X15。$$

对于主成分 Y1 来说：X3、X4 和 X6 前的系数较大，均大于 0.5，也就是地质构造复杂、水土流失土质疏松和地下水渗漏这三个危险源的系数较大，都大于 0.5，因而它们在第一主成分中所起的作用相当。同理可得：安全教育培训不足、安全隐患排查治理不当、施工设备不达标、施工方擅自改变施工方案和用电意外的系数为负，其中安全教育培训不足的绝对值为 0.384，即安全教育培训不足占比越大，主成分 Y1 取值越小。从而知道它对第一个主成分表达式起明显的减值作用。因此 Y1 突出反映了自然地理结构以及安全教育对施工安全的重要性。

同理，相应于第二个特征值 1.579 的特征向量为：[-0.090, -0.099, -0.041, -0.100, -0.113, 0.366, 0.226, 0.178, 0.046, -0.161, 0.408, 0.621, 0.226, -0.062, 0.324]。

$$Y2 = -0.090X1 - 0.099X2 - 0.041X3 - 0.100X4 - 0.113X5 + 0.366X6 + 0.226X7 + 0.178X8 + 0.046X9 - 0.161X10 + 0.408X11 + 0.621X12 + 0.226X13 - 0.062X14 + 0.324X15。$$

对于主成分 Y2 来说：施工方擅自改变施工方案的系数最大，即施工方擅自改变施工方案所占比重越大，Y2 取值越大。因此，Y2 突出反映了擅自改变施工方案对于施工过程中事故发生的影响之大。

相应于第三个特征值 1.382 的特征向量为：[0.292, -0.003, 0.056, 0.037, -0.043, -0.342, 0.573, 0.557, 0.026, 0.273, -0.215, 0.041, 0.134, -0.107, -0.026]。

$$Y3 = 0.292X1 - 0.003X2 + 0.056X3 + 0.037X4 - 0.043X5 - 0.342X6 + 0.573X7 + 0.557X8 + 0.026X9 + 0.273X10 - 0.215X11 + 0.041X12 + 0.134X13 - 0.107X14 - 0.026X15。$$

对于主成分 Y3 来说：安全隐患排查治理不当的系数最大，即安全隐患排查治理不到位所占比重越大，Y3 取值越大。因此，Y3 突出反映了施工前对于施工场所安全隐患排查的重要性。

相应于第四个特征值 1.309 的特征向量为：[0.260, -0.101, -0.034, -0.060, -0.196, 0.203, -0.072, 0.090, 0.571, 0.320, 0.389, -0.072, -0.380, -0.065, -0.302]。

$$Y4 = 0.260X1 - 0.101X2 - 0.034X3 - 0.060X4 - 0.196X5 + 0.203X6 - 0.072X7 + 0.090X8 + 0.571X9 + 0.320X10 + 0.389X11 - 0.072X12 - 0.380X13 - 0.065X14 - 0.302X15。$$

对于主成分 Y4 来说：防护设备不达标的系数最大，即防护设备不达标所占比重越大，Y4 取值越大。因此，Y4 突出反映了防护设备对于保障施工安全的重要性。

相应于第五个特征值 1.126 的特征向量为：[0.516, 0.012, 0.001, 0.028, 0.049, -0.276, -0.240, -0.327, 0.288, 0.116, -0.145, 0.224, 0.042, -0.050, 0.564]。

$$Y5 = 0.516X1 + 0.012X2 + 0.001X3 + 0.028X4 + 0.049X5 - 0.276X6 - 0.240X7 - 0.327X8 + 0.288X9 + 0.116X10 - 0.145X11 + 0.224X12 + 0.042X13 - 0.050X14 + 0.564X15$$

对于主成分 Y5 来说：恶劣天气的系数很大，即恶劣天气所占比重越大，Y5 取值越大。因此，Y5 突出反映了恶劣天气对增加施工事故发生概率的影响。

相应于第六个特征值 1.028 的特征向量为：[0.190, -0.029, -0.160, 0.097, 0.185, -0.084, 0.284, -0.066, -0.070, -0.186, 0.163, 0.097, -0.362, 0.771, 0.020]。

$$Y6 = 0.190X1 - 0.029X2 - 0.160X3 + 0.097X4 + 0.185X5 - 0.084X6 + 0.284X7 - 0.066X8 - 0.070X9 - 0.186X10 + 0.163X11 + 0.097X12 - 0.362X13 + 0.771X14 + 0.020X15。$$

对于主成分 Y6 来说：施工前应急逃生管理不足的系数很大，即施工前应急逃生管理不足所占比重越大，Y6 取值越大。因此，Y6 突出反映了施工前应及时做好逃生管理的培训，以应对施工过程中的突发情况，减少人员伤亡和财产损失。

5. 结论

综上所述, 本文对于 2001 年~2019 年间共 240 起施工事故案例进行详细分析, 提取 15 项扼要危险源因素, 利用 SPSS 软件进行主成分分析, 将 15 项危险源分为 Y1、Y2、Y3、Y4、Y5 和 Y6 六种主成分。Y1 突出反映了自然地理结构以及安全教育对施工安全的重要性; Y2 突出反映了擅自改变施工方案对于施工过程中事故发生的影响之大; Y3 突出反映了施工前对于施工场所安全隐患排查的重要性; Y4 突出反映了防护设备对于保障施工安全的重要性; Y5 突出反映了恶劣天气对增加施工事故发生概率的影响; Y6 突出反映了施工前应及时做好逃生管理的培训, 以应对施工过程中的突发情况, 减少人员伤亡和财产损失。运用具体数据将危险源这一抽象事实具象化, 从定性至定量, 帮助从业者直接理解并规避以上危险源。地铁施工过程中可提出对以上六种危险源的针对方案, 降低甚至消除对生命健康及财产安全的威胁, 为未来城市建设贡献力量。

基金项目

宁波市交通运输局科技项目(202007), 浙大宁波理工学院大学生创新创业训练计划(2019X0033)。

参考文献

- [1] 陈元桥. GB/T28001-2001《职业健康安全管理体系规范》理解与实施[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [2] 温艳芳, 秦慧敏. 建筑工程施工危险源辨识、评价与控制[J]. 建筑安全, 2012(4): 39-42.
- [3] 马万里, 孙秀娟. 零售业顾客满意度测评研究[J]. 商业研究, 2006(12): 4-6.