

基于危险源辨识方法的公路堆积体 边坡风险等级评估

田明^{1,2}, 王建洪^{1,2}, 肖羚^{1,2}, 杜宇翔³

(1. 云南大永高速公路有限公司, 云南 大理 671000;

2. 云南省交通投资建设集团有限公司, 云南 昆明 650200;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 堆积体是一类极不稳定的岩土体, 工程力学特性受环境因素影响很大, 我国西南地区堆积体分布广泛, 在山区公路建设过程中, 为保证施工安全和施工进度, 亟需一套对沿线堆积体边坡进行准确、快速的风险评估体系。应用危险源辨识方法, 考虑边坡堆积层厚度和含石量等岩土体特征, 对危险源进行辨识和分类, 确立主要危险源因子; 建立堆积体边坡风险等级评估标准体系, 采用层次分析法对危险源因子集赋权重, 运用模糊综合评判法确定各边坡所对应的风险等级。应用该风险评估体系对云南大理到永胜高速公路沿线的98个路堑边坡进行风险等级评估, 结果显示, 路堑边坡中I级边坡1个, II级边坡49个, III级边坡28个, IV级边坡20个, 研究表明, 该方法可以快速有效地评估公路堆积体边坡风险等级。

关键词: 堆积体; 公路边坡; 风险评估; 危险源辨识; 模糊综合评判

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)04—0081—06

Risk Assessment of Accumulation Slope of Highway Based on Hazard Identification

TIAN Ming^{1,2}, WANG Jianhong^{1,2}, XIAO Ling^{1,2}, DU Yuxiang³

(1. Yunnan Dayong Highway Construction Company Limited, Dali, Yunnan 671000, China;

2. Yunnan Communications Investment & Construction Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Accumulation is a kind of extremely unstable rock and soil. The engineering mechanical properties are greatly affected by environmental factors. Accumulations are widely distributed in Southwest China, in the process of mountainous highway construction, in order to ensure construction safety and construction progress, a set of accurate and rapid risk assessment system is needed for the accumulation slope. The identification method of hazard source is applied, considering the characteristics of rock and soil mass such as the thickness of slope accumulation layer and stone content, the hazard sources are identified and classified, and the main risk factors are established. The standard system of risk assessment of accumulation slope is established, and analytic hierarchy process (AHP) is applied to assign weight to dangerous factor sets, fuzzy comprehensive evaluation method is used to determine the risk level of each slope. The risk assessment system is used to evaluate the risk grade of 98 cutting high slopes in Dali to Yongsheng highway. The evaluation results show that slope numbers of the grade I, grade II, grade III and grade IV are 1, 49, 28 and 20, respectively. The case study shows that the proposed method can effectively evaluate the risk grade accumulative slope of a highway.

Keywords: accumulation; highway slope; risk assessment; hazard identification; fuzzy comprehensive evaluation

我国西南地区处于青藏高原周边地带,曾在第四纪经历过强烈的下切期,导致斜坡发生剧烈的变形破坏运动,形成了大量的崩塌型巨厚堆积层^[1]。堆积体边坡的失稳破坏条件不同于岩质边坡或土质边坡,其中堆积层厚度和含石量是决定堆积体边坡稳定性的关键因素。公路边坡具有沿线呈点状分布、间隔距离长、数量多、历史数据积累少,而且易受环境变化及人类工程活动的影响的特点,很难获取每个边坡详细的岩体特征及力学参数。考虑公路堆积体边坡的堆积体特性,准确、快速地对堆积体边坡作出风险评估,可为我国西南地区山区公路建设提供有效的施工指导和建议。

近年来,半定量评估方法被逐渐引入到安全风险评估,如层次分析法^[2]、模糊综合评判法^[3]等。该类方法能够快速进行安全风险评估,有效指导施工,保障工程项目的顺利进行,故而受到风险评估人员的青睐。国内很多学者对该类方法在边坡风险评估的应用方面进行了研究,证实了该类评估方法的可行性^[4-6]。张勇慧等^[7]建立公路岩质边坡评价体系,应用模糊综合评判法对湖湘地区常吉高速公路 142 个岩质高边坡进行稳定性分级评价,评判结果与实际边坡失稳情况较为吻合。杜时贵等^[8]基于结构面的空间位置、规模大小和边坡匹配关系的分层分析,提出了系统评价露天矿山边坡稳定性的分级分析方法,并对云南省普洱市大平掌铜矿采场东部边坡进行了稳定性评价,评价结果与边坡的实际变形破坏特征非常吻合。唐亚明等^[9]应用自己设计的边坡分级系统,对黄土滑塌类地质灾害的风险进行半定量评价,并得出了不同风险等级的黄土边坡区域分布规律。半定量风险评估方法评价结果的准确性取决于评价指标选取的合理性,而很多公路边坡风险等级评估方法并未讨论评价指标的选取方法以及所选指标的合理性,故无法保证得出准确的评价结果。

危险源辨识是指识别危险源并确定其特性,可为安全风险评估提供合理的评价指标。国内外已开发出的危险源辨识方法有几十种之多,如事故树分析法、事件树分析法、LEC 法等,国内外学者通过实例分析对各种危险源辨识方法进行了研究,表明了该类方法的实用性^[10-16]。马安锋等^[17]应用事故树分析方法分析了造成基坑失稳事故的危险源,为基坑支护过程制定了施工安全专项方案。王刚毅^[18]应用事故树分析方法详细分析了不同时期尾矿库的危险源,建立了具体事故的事件树模型,总结了失事

后果经验估算方法,计算得出了综合风险评估结果,证明了事件树方法的可行性。

本文考虑堆积体边坡的特性,应用危险源辨识方法合理选取公路堆积体边坡的评价指标,通过层次分析法和模糊综合评判法相结合,建立了公路堆积体边坡的风险等级评估方法,并将其应用于云南大理到永胜(大永)高速公路沿线堆积体边坡的风险评价。

1 危险源辨识

为了对边坡进行客观合理的危险源辨识,首先要定义边坡危险源。中国《职业健康安全管理体系规范》^[19](GB/T 28001—2001)中对于危险源的定义:“可能导致伤害或疾病、财产损失、工作环境破坏或者这些情况组合的根源或状态”。根据该定义,本文对边坡危险源定义为:“可能导致边坡失稳破坏的固有地质特征或环境状态”。

1.1 事故树分析

采用事故树分析方法进行堆积体边坡危险源辨识。事故树分析法是从需要分析的特定事故或者故障(顶上事件)开始,逐层分析事故发生原因,直到找出事故的全部基本原因(底事件)为止。事故树分析方法可以有效地分析事故所对应事件或对象的危险源。分析步骤如下:

(1) 对边坡失稳破坏事故进行事故致因分析,构造边坡失稳破坏事故树符号和意义,见表 1。

(2) 构造事故树模型,找出事故的所有基本原因,如图 1 所示。

(3) 根据事故树写出事故树结构式:

$$T = A_1 + A_2 = B_1 + B_2 + B_3 + X_{14} + X_{15} = \\ X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + \\ X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} \quad (1)$$

1.2 危险源确立

由事故树分析法得到的事故基本原因确定边坡危险源因子。按照事故树模型结构,结合对边坡危险源的定义和危险源分类方法,将危险源分为第一类危险源和第二类危险源。第一类危险源为根源危险源,是指系统中存在的、可能发生意外释放的能量或危险物质,第二类危险源为状态危险源,是指导致屏蔽措施失效或破坏的各种不安全因素。对于边坡系统,第一类危险源是指边坡系统内在危险源,属于边坡本身固有属性,按坡体表面和坡体内部特征,分为地形地貌和岩土体特征。地形地貌对应的危险源因子有坡高、坡角和坡面形态;岩土体特征根据不同

岩性类型边坡确定危险源,对于堆积体边坡,考虑基岩特性、土石混合体特性以及接触面特性,危险源因子可确定为基岩岩性、基岩风化程度和堆积体厚度等。第二类危险源为边坡系统外在危险源,是对边

坡系统产生影响的外在不安全因素,包括人工开挖活动、降雨和地震。所确定的堆积体边坡危险源如图 2 所示。

表 1 事故树中的符号和意义

符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义
T	边坡失稳破坏	X_1	边坡过高	X_7	堆积层过厚	X_{13}	工程措施不当
A_1	不良地质特征	X_2	边坡过陡	X_8	堆积体碎石含量少	X_{14}	降雨诱发
A_2	外部环境诱发	X_3	坡面形态不利	X_9	坡体结构不稳定	X_{15}	地震诱发
B_1	地形地貌特征	X_4	植被覆盖不足	X_{10}	地下水位过高		
B_2	岩土体特征	X_5	基岩岩性差	X_{11}	开挖坡高过大		
B_3	人工开挖不当	X_6	基岩强风化	X_{12}	开挖坡角过大		

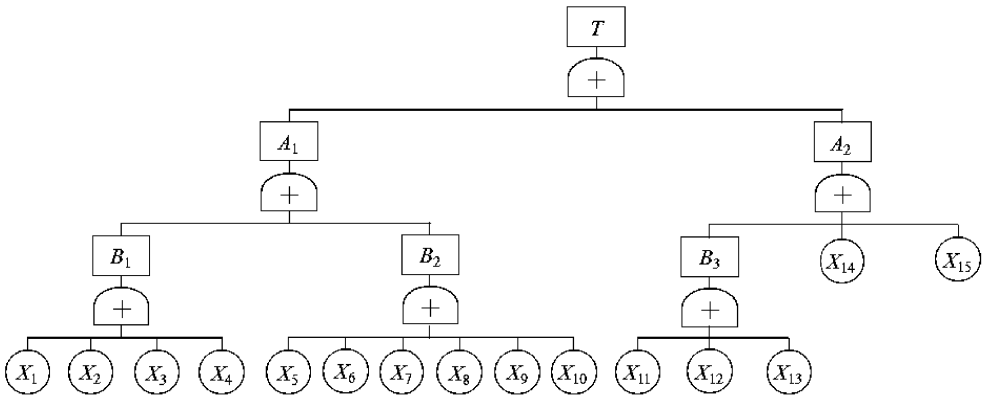


图 1 边坡失稳破坏事故树

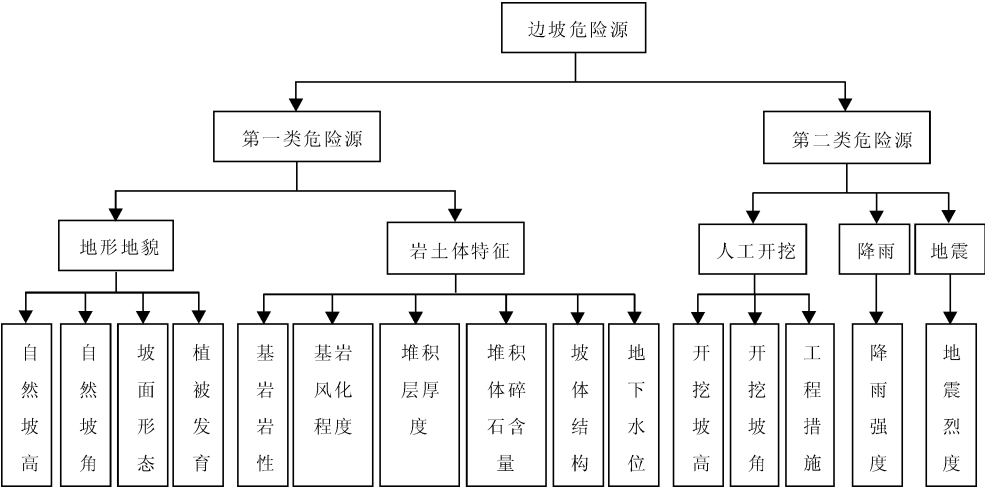


图 2 堆积体边坡危险源确立

2 堆积体边坡风险评估体系

2.1 层次分析法赋权重

以危险源辨识方法确立的危险源作为评价指标因子集,应用层次分析法,将山区公路堆积体边坡风险评估问题分为目标层、准则层、指标层,分析下层

因子相对于上层因子的单排序情况,通过量化比较构造判断矩阵,求得判断矩阵的最大特征值所对应的特征向量,并进行归一化处理,即可作为该层因子的权重。判断矩阵还需满足一致性要求。

以指标层 $\{C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{26}\}$ 为例,说明权重的确定步骤及判断矩阵的一致性检验方法。

(1) 判断矩阵构造:

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 1/2 & 1/3 & 1/5 & 2 \\ 4 & 1 & 3 & 2 & 1/2 & 5 \\ 2 & 1/3 & 1 & 1/2 & 1/4 & 3 \\ 3 & 1/2 & 2 & 1 & 1/3 & 4 \\ 5 & 2 & 4 & 3 & 1 & 6 \\ 1/2 & 1/5 & 1/3 & 1/4 & 1/6 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) 权重向量计算。判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max} = 6.122\ 5$, 对应的特征向量归一化后即为权重:

$w = (0.064, 0.250, 0.101, 0.160, 0.382, 0.043)$ (3)

(3) 一致性检验。判断矩阵为 6 阶, 查表可知 $r.i. = 1.26$, 可求出 $c.r.$:

$$c.i. = \frac{\lambda_{\max} - 6}{6 - 1} = 0.0194 \quad (4)$$
$$c.r. = \frac{c.i.}{r.i.} = 0.0194 < 0.1 \quad (5)$$

式(4) 说明判断矩阵满足一致性要求, 权重确定合理。层次分析法所确定的因子集权重见表 2。

表 2 因子集权重

目标层 A	准则层 B	准则层权重	指标层 C_i	指标层 C_i 权重	指标层 C_{ij}	指标层 C_{ij} 权重
风险评估	第一类危险源 B_1	0.667	地形地貌 C_1	0.333	自然坡高 C_{11}	0.248
					自然坡角 C_{12}	0.483
					坡面形态 C_{13}	0.191
					植被发育 C_{14}	0.078
			岩土体特征 C_2	0.667	基岩岩性 C_{21}	0.064
					基岩风化程度 C_{22}	0.250
					堆积层厚度 C_{23}	0.101
					堆积体碎石含量 C_{24}	0.160
	第二类危险源 B_2	0.333	人工开挖 C_3	0.740	坡体结构 C_{25}	0.382
					地下水位 C_{26}	0.043
					开挖高度 C_{31}	0.374
					开挖坡角 C_{32}	0.571
					工程措施 C_{33}	0.055
			降雨 C_4	0.167	降雨强度 C_{41}	1.000
			地震 C_5	0.094	地震烈度 C_{51}	1.000

2.2 模糊综合评判法确定风险等级

2.2.1 底层指标隶属度向量确定

通过查阅相关文献[16], 结合堆积体边坡特性, 确定边坡单因素风险评估标准, 见表 3。建立因子集底层指标相对于评价集的隶属度计算模型, 具体方法为: 对于连续型指标, 如坡高、坡角、堆积体厚度等, 通过构造降半梯形 - 三角形 - 升半梯形隶属度函数, 对于区间等级 II、III, 取评价标准的中值作为三角形函数峰值(所构造的堆积体厚度隶属度函数如图 3 所示), 将指标取值作为自变量代入隶属度函数, 可求得指标对各风险等级的隶属度向量; 对于离散型指标, 构造各风险等级评价标准的判断矩阵, 为保证单因素指标对于各等级的隶属度之和为 1, 方便数据处理, 求得该矩阵最大特征值所对应的特征向量并作归一化处理, 作为指标对各风险等级的隶属度向量。

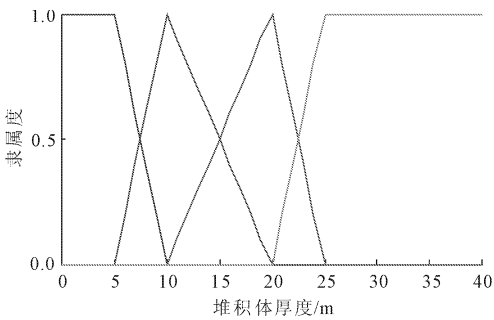


图 3 堆积体厚度隶属度函数

2.2.2 风险等级判定

以某公路边坡为例, 基岩为钙质胶结砂岩, 属于硬岩, 基岩强风化。上层堆积体平均厚度为 6 m, 碎石平均含量为 10%。坡面倾向与斜坡岩层产状相反, 属逆向坡, 与节理裂隙成大角度相交, 对边坡稳定有利。第四系孔隙水多以潜水形式出现, 水量甚微, 深挖区孔隙水埋深较浅, 水量不大, 基岩裂隙水

埋深深,对挖方路堑影响不大。

以 $\{C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{26}\}$ 为底层指标, 计算上层指标 C_2 的隶属度向量:

(1) 隶属度矩阵构造。由所确定指标层 $\{C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{26}\}$ 的隶属度向量, 构造隶属度矩阵, 横向表示各指标对于风险等级的隶属度向量:

$$R = \begin{bmatrix} 0.303 & 0.487 & 0.140 & 0.071 \\ 0.073 & 0.170 & 0.473 & 0.284 \\ 0.800 & 0.200 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 \\ 0.277 & 0.467 & 0.160 & 0.095 \\ 0.507 & 0.263 & 0.152 & 0.078 \end{bmatrix} \quad (6)$$

表 3 单因素风险评估标准

基础因子	不同风险等级评估标准(危险性分级由轻度→高度)取值			
	I	II	III	IV
自然坡高/m	<30	30~40	40~60	>60
自然坡角/(°)	<20	20~40	40~60	60~90
坡面形态	坡面纵横向均为平直或内凹型	坡面纵向为平直或内凹型, 横向为外凸型	坡面纵向为外凸型, 横向为平直或内凹型	坡面纵横向均为外凸型或坡形复杂, 等高线紊乱
植被发育	乔木草灌均发育较好	乔木发育较好, 草灌不发育	乔木不发育, 草灌发育较好	乔木草灌均不发育
基岩岩性	极硬岩	硬岩	软岩	极软岩
基岩风化程度	未风化及弱风化	中风化	强风化	全风化
堆积层厚度/m	<5	5~15	15~25	>25
堆积体碎石含量/%	>75	50~75	25~50	<25
坡体结构	有利	一般	不利	很不利
地下水位(H 为坡高)/ H	<0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	>0.75
开挖高度/m	<20	20~30	30~50	>50
开挖坡角/(°)	<20	20~40	40~60	60~90
工程措施	挡土墙工程	注浆工程	锚固或抗滑桩	无支护措施
降雨强度/(mm·d ⁻¹)	<10	10~25	25~50	>50
地震烈度	<6	6~7	7~8	>8

(2) 上层指标隶属度向量计算。采用模糊算子 $M(\cdot, +)$, 由式(3)、式(6) 可求得上层指标 C_2 的隶属度向量:

$$S = w \cdot R = (0.246, 0.284, 0.195, 0.275) \quad (7)$$

逐层计算上层指标隶属度向量, 最终得出目标层隶属度向量, 由最大隶属度原则确定边坡所属风险等级。

3 工程应用

云南大理到永胜高速公路分为大理段和丽江段两个标段, 其中, 大理段起点与大理机场公路搭接, 起点里程为 K0+000, 止点位于大理与丽江分界处, 止点里程为 K52+979.27, 全长约 53 km; 丽江段起点里程 K52+979.270, 位于宾川县力角镇与永胜县片角镇交界处, 即接大理段终点, 止点里程 K91+406.956, 永胜县期纳镇, 路线全长约 38 km。线路经过区域地层出露较多, 主要出露奥陶系(O)、泥盆系(D)、二叠系(P)、第四系(Q)地层, 地层总厚度在 6 100 m 以上。不同成因的第四系松散沉积物广泛

分布于山坡、沟谷和山前地带及盆地中。包括残破积层, 主要由褐色、褐红色、褐灰色可塑—硬塑黏土、稍密角砾、稍密碎石等组成; 冲洪积层, 主要由褐色、灰褐色、褐灰色软塑—可塑—硬塑黏土, 稍密圆砾、稍密卵石、稍密漂石组成。项目区在区域上属高原性气候, 干、雨季分明。年平均降雨量 1 176 mm。一般山区雨量大, 坝区小。降雨量分配极不均匀。80% 集中在雨季 6 月—10 月, 每年 12 月至次年 2 月有霜期 100 d 左右。路线所经区域地质构造复杂, 构造活动期次较多, 地震活动频繁, 特别是晚近期构造活动强烈地段, 地形切割强烈, 地震活动特点是具明显的阶段性和周期性, 近期地震运动有所复活。

通过对高速公路沿线的 98 个路堑高边坡的现场调查, 结合路线设计方案与区域地震降雨资料, 采用基于危险源辨识方法的风险评估体系开展灾害风险评估, 评价结果为: I 级边坡 1 个, 占 1%; II 级边坡 49 个, 占 50%; III 级边坡 28 个, 占 29%; IV 级边坡 20 个, 占 20%, 见图 4。

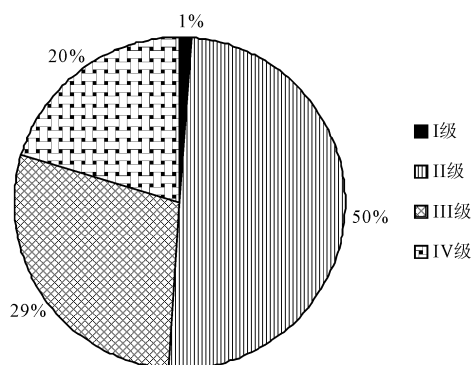


图4 大永高速公路边坡风险评估结果

4 结 论

(1) 针对我国西南地区公路堆积体边坡的特征,应用危险源辨识方法中的事故树分析方法,考虑堆积体边坡的堆积层厚度和含石率两个关键因子,为公路堆积体边坡风险等级评估提供了更为合理的评价指标。

(2) 应用层次分析法确定评价指标权重,运用模糊综合评判法计算公路堆积体边坡风险等级。该系统方法能够准确、快速地对公路堆积体边坡进行风险等级评估,且评估效率优于极限平衡分析和有限元强度折减法等定量评价方法。

(3) 针对云南大永高速公路沿线 98 个路堑边坡,采用建立的评估体系开展堆积体边坡风险等级评估,其中 I 级边坡 1 个,II 级边坡 49 个,III 级边坡 28 个,IV 级边坡 20,可见该方法能有效地评估公路堆积体边坡风险等级,为山区公路建设提供有效的施工指导和建议。

参考文献:

- [1] 邓华锋,朱 敏,原先凡,等.某大型堆积体边坡成因机制分析及治理措施研究[J].岩土力学,2013,34(S1):285-292.
- [2] 黄锦林,赵吉国,张 婷,等.基于层次分析法的库岸高速滑坡危险度评价[J].自然灾害学报,2011,20(5):95-99.
- [3] 薛聪聪,卢书强.基于模糊数学和极限平衡法的滑坡稳定性评价[J].人民长江,2016,47(8):43-46,56.

- [4] 杨秀贵,仇 森,冯一鸣.改进层次分析法的滑坡灾害危险性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(6):773-777.
- [5] 吴茂明.边坡失稳灾害的模糊综合评估技术及其应用[D].福州:福州大学,2006.
- [6] 谢全敏.滑坡灾害风险评价及其治理决策方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2004.
- [7] 张勇慧,李红旭,盛 谦,等.基于模糊综合评判的公路岩质边坡稳定性分级研究[J].岩土力学,2010,31(10):3151-3156.
- [8] 杜时贵,雍 睿,陈喆扞,等.大型露天矿山边坡岩体稳定性分级分析方法[J].岩石力学与工程学报,2017,36(11):2601-2611.
- [9] 唐亚明,薛 强,李 清,等.黄土滑塌灾害风险分级系统研究[J].工程地质学报,2012,20(3):378-386.
- [10] Smith S D, Carter G. Safety hazard identification on construction projects[J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2006,132(2):197-205.
- [11] 兰建义.煤矿人因失误事故分析的关键影响因素危险识别研究[D].焦作:河南理工大学,2015.
- [12] 王开凤,张谢东,王小璜,等.大规模山区高速公路施工危险源辨识与风险控制[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2009,33(6):1096-1099.
- [13] 张 岚,韩世栋,蒋裕丰.水利水电工程高边坡的危险源辨识和风险评价[J].西北水电,2011(S1):181-185.
- [14] 成国文,李 晓,狄帮让,等.基于 AHP-FM 法的堆积层斜坡稳定性分级[J].勘察科学技术,2010(6):3-6,17.
- [15] 王 醒,马 斌,纪 琨.基于模糊综合评价的尾矿库安全评价研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(3):125-129,167.
- [16] 刘 帅,付成华,杜修娟,等.水电工程施工危险源关联辨识方法及其应用[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):86-90.
- [17] 马安锋,许 锐,程 辉,等.基于事故树分析的基坑施工安全评价研究[J].路基工程,2017(4):14,15.
- [18] 王刚毅.基于溃坝事件树的尾矿库模糊综合风险计算方法的研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [19] 职业健康安全管理体系规范:GB/T 28001—2001[S].北京:中国商务出版社,2001.