

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.07.007

超高路堑边坡施工过程的定量风险评估

吴昊城^{1,2}, 王浩^{1,2}, 黄晓毅³, 李先忠³, 罗金妹³

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350116; 2. 地质工程福建省高校工程研究中心, 福建 福州 350116;
3. 中化地质矿山总局福建地质勘察院, 福建 福州 350013)

摘要: 施工过程是路堑边坡全寿命周期中稳定性最差且容易发生重大风险事故的关键时期, 传统的路堑边坡定性风险评估方法难以精确定量施工过程中面临的风险, 在传统的定性风险评估基础上开展定量风险评估是控制工程风险和评价边坡治理方案经济效益的重要依据。以福建省挖方最高的双永高速公路 K227 滑坡为例, 基于路堑边坡风险评估及管理技术框架, 研究了该边坡变形破坏过程中的边坡破坏概率、灾害到达承灾体概率、承灾体时空概率及承灾体易损性等关键指标的计算方法, 进而定量估算了滑坡灾害导致的财产损失估值和人身伤害风险值。估算结果印证了该边坡开挖后将面临极高的风险损失, 需要开展系统的风险控制。在此基础上确定了 K227 滑坡的治理方案, 并对该边坡分“上、中、下”3段分步施工过程开展了定量风险评估。对比评估结果表明: 通过科学合理的治理规划并实行分步施工, K227 滑坡的破坏概率、潜在财产损失与人身伤害风险值均大幅降低, 具有显著工程经济价值和防灾减灾效益; 该边坡定量风险评估技术方案具有较高的科学性和实用价值, 可供类似工程参考。

关键词: 道路工程; 风险评估; 定量分析; 路堑边坡; 施工过程

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)07-0045-09

Quantitative Risk Assessment of Ultra-high Cut Slope during Construction

WU Hao-cheng^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, HUANG Xiao-yi³, LI Xian-zhong³, LUO Jin-mei³

(1. School of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350116, China;

2. Geological Engineering Research Center of Fujian Provincial Universities, Fuzhou Fujian 350116, China;

3. Fujian Geological Exploration Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Fuzhou Fujian 350013, China)

Abstract: The construction stage is the key period for the worst stability of road cutting slope in all life cycle and prone to major risk accidents, traditional qualitative risk assessment method for cutting slope is difficult to accurately quantify the risks in the construction process. Carrying out quantitative risk assessment based on tradition qualitative risk assessment is the important basis for controlling project risks and evaluating the economic benefit of the slope treatment scheme. Taking K227 landslide of Yongchun – Yongding expressway for example, based on the technical framework of cutting slope risk assessment and management, the calculation methods of the key indicators such as probability of slope failure, probability of disaster reaching disaster-bearing body, space-time probability of disaster-bearing body, and vulnerability of disaster-bearing body of the slope during deformation and failure of the slope are studied. Then, the property loss valuation and personal injury risk value caused by landslide disaster are quantitatively estimated, which proves that the slope will face extremely higher risk loss after excavation, and need to carry out systematic risk control. On this basis, the treatment scheme of K227 landslide is determined, and the quantitative risk assessment on the “upper, middle and lower” stepwise construction process of this slope is carried out. The comparison of

收稿日期: 2018-11-06

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2018J01746); 中化地质矿山总局科技创新团队基金项目(2018071306)

作者简介: 吴昊城(1992-), 男, 福建漳州人, 硕士研究生。(991814036@qq.com)

evaluation results shows that (1) through scientific and reasonable treatment planning and stepwise construction, the destruction probability, potential property loss and personal injury risk value of K227 landslide are greatly reduced, which has significant engineering economic value and disaster prevention and mitigation benefit; (2) the proposed technical scheme of slope quantitative risk assessment has higher scientific and practical value and can be used as a reference for similar projects.

Key words: road engineering; risk assessment; quantitative analysis; cutting slope; construction process

0 引言

我国是世界上地质环境较为脆弱,地质灾害多发的国家之一。在过去的数十年,随着人口的增长和土地利用扩张,诱发的滑坡及其次生灾害已造成了大量的人口伤亡和经济损失^[1]。近年来,山区高速公路建设涌现出不少超高路堑边坡,由于其具有体积规模巨大、地质条件复杂、环境状况恶劣、影响因素众多等特点而具有相当程度的复杂性,从而造成了公路建设及运营阶段的人员生命安全与经济损失^[2-4]。

目前国际上将路堑边坡风险管理归入滑坡泥石流等广义的滑坡风险管理当中,至今已研究30余年。2005年温哥华滑坡风险管理国际会议提出的滑坡风险管理理论框架^[5],是目前国际上主流和应用最广泛的滑坡风险评估技术框架。2015年我国交通运输部出版了《高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南(试行)》^[6],初步提出了高速公路边坡施工安全风险评估的基本流程与方法。

施工阶段是超高路堑边坡安全控制的重要阶段,亦是边坡灾害多而严重的阶段,因此超高路堑边坡施工阶段风险评估在边坡动态设计及建造过程中占有重要地位。本研究以福建省最高的双永高速公路K227滑坡为例^[7-8],系统研究边坡施工过程定量风险评估的技术方案及关键计算参数的确定方法,实现边坡施工阶段潜在风险损失的定量估测,并据此确立合理的施工组织方案,以达到了施工安全风险防控的目标。

1 边坡工程概况

本研究依托项目工程为福建龙岩双永高速公路K227+635~+745段左侧超高路堑边坡(以下简称K227滑坡)。边坡开挖10级后产生整体变形破坏,经卸载反压及桩锚加固后,形成开挖18级、总高达140m的超高路堑边坡,为目前福建省高速公路系统最高的路堑边坡工点。

1.1 边坡工程地质条件

K227超高路堑边坡为反倾层状泥质粉砂岩坡体结构,该边坡地质构造极为发育,受边坡左侧F106E-A压扭性断层影响,节理裂隙发育、岩体破碎;场地母岩为粉砂岩,因局部花岗岩脉侵入并产生变质作用,形成了以粉砂岩为主、花岗岩脉与变质砂岩混杂的极为复杂的坡体地质结构。该地质条件对K227滑坡的演化发展产生极为不利的影响,对工程的治理及风险分析评估提出了严格的要求。

1.2 边坡周边环境条件

边坡场地年降雨在1400~1800mm之间,水量丰富,动态变化大。坡体前缘紧邻双永高速公路荷花大桥段落,左右两侧邻近隧道口(详见图1),造就了坡体周边复杂多样的建构筑物影响,对滑坡风险评估提出了较高难度与精度要求。

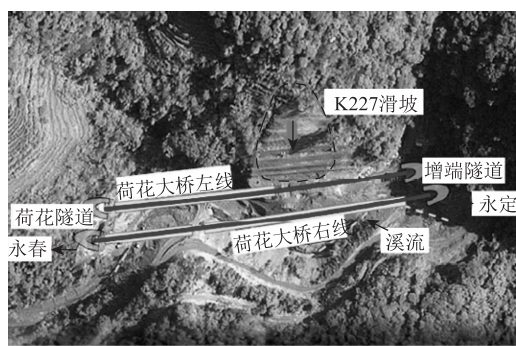


图1 K227滑坡周边环境

Fig. 1 Surrounding environment of K227 landslide

1.3 边坡滑坡灾害过程及特征

边坡前期开挖形成10级裸露坡面,卸荷松动效应明显,并经历持续半个月的连续降雨,雨水入渗坡体恶化了边坡的水文地质条件,同时缺少有效加固措施,最终导致边坡整体变形,形成体积约20万m³的中型路堑滑坡。由于边坡超高,且临近施工中的荷花大桥、荷花隧道及增瑞隧道等3座重要构筑物,滑坡治理方案的优选及施工过程的安全控制均具有相当的难度,迫切需要开展系统性的边坡施工过程风险评估及管理。

2 滑坡灾害过程的定量风险评估

2.1 边坡风险评估技术方案

路堑边坡定量风险评估属于广义的滑坡灾害风险评估范畴,但是又需要结合路堑边坡的特点确定具体的风险评估技术方案才能顺利实施。王浩^[9]提出了基于霍尔三维结构的路堑边坡系统分析模型,将路堑边坡风险评估及管理分为风险分析、风险评估、风险管理3个工作阶段和逻辑层次,并提出了路堑边坡定量风险评估中确定边坡的破坏概率、承灾体的时空概率、滑坡到达承灾体的概率、承灾体易损性等具体参数取值的思路与方法,形成了路堑边坡全寿命周期风险评估及管理的一套技术方案^[10-11]。具体见图2。

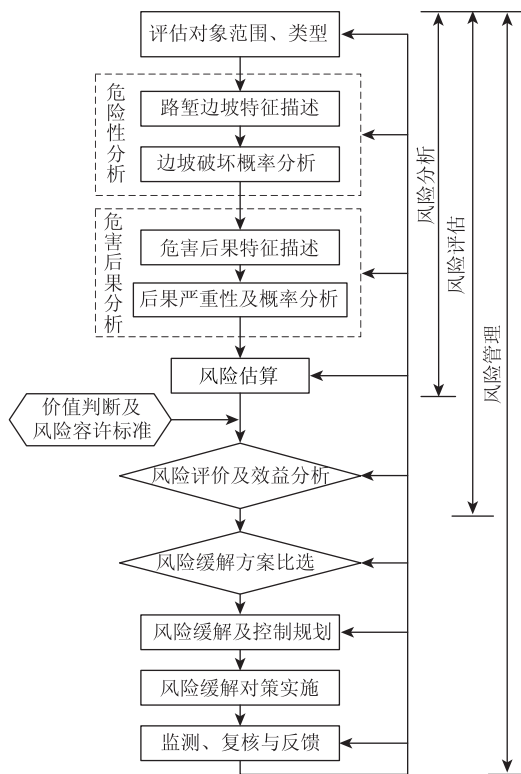


图2 路堑边坡风险评估及管理框架

Fig. 2 Framework for risk assessment and management of cutting slope

采用图2提出的路堑边坡风险评估技术框架,对K227滑坡灾害发生过程中的人身伤害及财产损失进行定量评估,既是对滑坡灾害风险的反演分析,也是确定施工过程风险评估及管理的重要依据。

2.2 危险性分析

K227滑坡在按照最初设计的11级刷坡方案开挖10级,且未能及时施作有效的工程控制措施,产生变形破坏,且边坡稳定状态有不断恶化的趋势,

可能造成严重的人员伤亡及财产损失。通过分析该边坡初勘、补勘、监测、施工等资料,查明边坡变形特征及滑体空间规模,建立边坡工程地质模型,进行滑坡灾害的危险性分析。由于单一的安全系数很难完全体现边坡岩土体参数变异性问题,故应用边坡可靠性指数和破坏概率的概念^[12],结合蒙特卡罗法^[13],计算获得边坡破坏概率 P_L 。

K227滑坡岩土主要分层为坡积含角砾粉质黏土、砂土状强风化泥质粉砂岩、构造蚀变带、构造破碎带、碎块状强风化泥质粉砂岩、弱风化泥质粉砂岩。采用深部位移监测查明滑动带的空间特征及其依附地层主要有滑坡中部的构造蚀变带、构造破碎带及局部碎块状强风化泥质粉砂岩,根据土工试验统计分析体现的岩土力学参数离散程度,并结合龙岩地区公路领域的经验,确定滑动带依附地层的岩土力学参数特征值,见表1。

表1 滑动带依附地层岩土力学参数特征值

Tab. 1 Geotechnical characteristic parameters of sliding zone attaching stratum

岩土层	构造蚀变带	构造破碎带	碎块状强风化泥质粉砂岩
黏聚力/kPa	均值 30 标准差 3.1	32 3.0	32 3.2
内摩擦角/(°)	均值 25 标准差 2.2	30 2.0	30 2.3

假定滑动带岩土力学参数服从表1所列的标准正态分布,采用图3所示的K227边坡初始设计方案的开挖模型,在GeoStudio软件中进行5000次蒙特卡罗模拟,求取边坡破坏概率的稳定值及其分布特征,获得图3所示开挖条件下的边坡稳定系数概率分布图。得到边坡稳定系数 F_s 主要分布范围在0.8~1.2之间,均值为0.963,可靠性指数为0.48297,失效概率 $P=69.580\%$,即边坡稳定系数 F_s 的期望值为0.963。这表明K227滑坡在开挖且未加固的条件下,最可能出现的状态是边坡失稳,也远低于《公路路基设计规范》(JTGD30—2015)对边坡防治工程设计安全系数应满足 $F_s \geq 1.20$ 的要求,与该边坡实际开挖施工的背景及边坡显现的稳定状态相吻合,符合边坡稳定系数概念的本质。

根据Priest等^[14]对边坡稳定概率分析的研究,定义当破坏概率高于5%时为不可接受概率。从边坡失效概率的角度分析,K227滑坡在开挖且未加固的条件下,边坡破坏概率 $P_L=0.696$,远高于5%的不可接受概率的临界值,计算分析得到的边坡稳定状

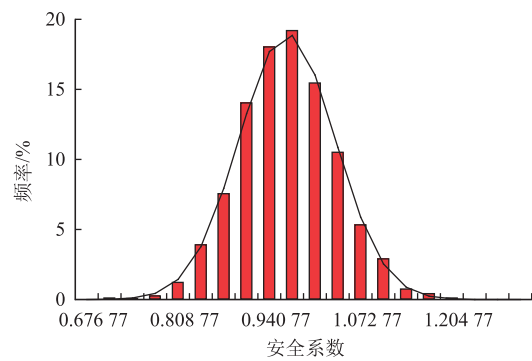


图 3 反演分析安全系数概率分布图

Fig. 3 Probability distribution of back analysis safety factor
态与实际滑坡灾害结果相吻合。

2.3 承灾体识别及滑坡危害后果分析

滑坡危害后果分析主要是结合致灾体的影响情况识别承灾体, 对其进行价值估算、易损性分析、灾害到达承灾体概率分析及承灾体时空概率分析。主要分为财产损失分析和人身伤害分析。

财产损失主要指受边坡变形破坏影响的坡体及周边构筑物的经济损失^[15], 主要用经济价值进行衡量。K227 边坡初始开挖垂直高度为 93 m, 坡面长度约为 141 m, 滑坡角为 $\alpha = 38^\circ$ (定义滑坡角 α 为滑坡后壁最高点到堆积体散落最远点的连线与水平面的夹角)。

根据香港滑坡边坡破坏滑移距离公式^[16-17]:

$$\lg S_1 = 0.109 + 1.010 \lg H - 0.506 \lg (\tan \alpha), \quad (1)$$

$$S_2 = (L/4) / \tan \alpha, \quad (2)$$

$$S_3 = H / \tan \alpha, \quad (3)$$

式中, H 为垂直高度; α 为滑坡角; L 为坡面长度; S_1 为滑移距离; S_2 为顶端影响距离; S_3 为两侧影响距离, 计算得到 $S_1 = 126 \text{ m}$, $S_2 = 45 \text{ m}$, $S_3 = 120 \text{ m}$ 。

K227 边坡左侧 110 m 接荷花隧道洞口, 右侧 95 m 接增瑞隧道洞口, 坡前 46 m 范围内为荷花大桥。根据经验公式估算绘制滑坡影响范围 (图 4), 估算得到滑坡影响面积约为 $61\,369.7 \text{ m}^2$, 计算得到土地资源价值为 1 212.1 万元。

滑坡到达承灾体的概率为 $P_{T:L}$, 可根据承灾体与滑坡体的位置关系进行确定。当承灾体位于滑坡体上时, $P_{T:L} = 1$; 当承灾体位于滑坡体滑移路径范围内时, 应根据承灾体距滑坡体的距离进行定量估计, $P_{T:L} = 0.50 \sim 1.0$ 之间; 当承灾体位于滑坡潜在危害范围边界时, $P_{T:L} = 0 \sim 0.50$ 之间。

同时考虑承灾体均为固定型承灾体, 各承灾体

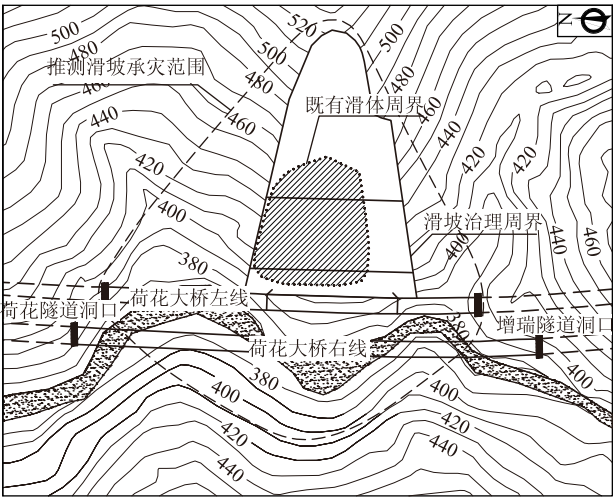


图 4 K227 滑坡影响范围 (单位: m)

Fig. 4 K227 landslide impact range (unit: m)

时空概率均为 $P_{S:T} = 1$ 。参考国际上通用的澳大利亚岩土工程协会 (AGS)^[18] 及殷坤龙等根据建构筑物的结构、材料对承灾体易损性给出的建议值 (表 2)。K227 滑坡承灾体的主要承灾体类型为土地及桥隧道路, 具体易损性见表 3。

表 2 建筑结构易损性指标建议值

Tab. 2 Recommended values of vulnerability indicators of building structure

滑坡灾害 强度分区	建筑物结构类型			
	钢结构	钢筋混凝土结构	砖结构	简易结构
无危害区	0	0	0	0
轻微危害区	0.1	0.2	0.3	0.4
中等危害区	0.3	0.5	0.7	0.9

最后根据施工分部分项工程概算 K227 滑坡的主要承灾体详细经济价值, 如表 3 所示。结合灾害到达承灾体概率、承灾体易损性及承灾体时空概率统计, 获得承灾体直接综合经济损失:

$$A = P_{T:L} \times P_{S:T} \times V_{\text{prop}} \times E, \quad (4)$$

式中, $P_{T:L}$ 为滑坡到达承灾体的概率; $P_{S:T}$ 为承灾体时空概率; V_{prop} 为承灾体易损性; E 为承灾体的经济价值。计算得到 $A = 2\,334.41$ 万元。

表 3 各个承灾体的 $P_{T:L}$, $P_{S:T}$, V_{prop} 取值

Tab. 3 $P_{T:L}$, $P_{S:T}$, V_{prop} values of each disaster-bearing body

工程项目	经济价值/万元	$P_{T:L}$	$P_{S:T}$	V_{prop}	直接损失/万元
桥梁	1 532.0	0.75	0.7	1	804.3
路基	191.1	0.75	0.9	1	128.99
路面	254.34	0.75	0.9	1	171.68
隧道	99.1	0.25	0.7	1	17.34
征地	1 212.1	1	1	1	1 212.1
总计	3 288.64	—	—	—	2 334.41

同时考虑灾害发生的间接经济损失,国土资源部门^[19]统计各地质灾害直接经济损失与间接经济损失的相关关系,采用比例系数法进行评估。对于边坡灾害比例系数取 $n=1.1$,计算承载体总财产间接损失:

$$B = nA, \quad (5)$$

式中, B 为间接经济损失; A 为直接经济损失; n 为间接经济损失比例系数;计算得到 $B=1.1 \times 2\,334.41 = 2\,567.851$ 万元。

人身伤害分析中,以人员生命危险作为分析目标,故只考虑人员的死亡率。K227滑坡灾害发生阶段,作为承灾体的人员主要以通过临时便道车辆中的人员为主。在AGS的研究中,定义过往车辆出现在边坡灾害影响范围中的时空概率为^[20]:

$$P_{S:T} = \frac{N_V}{24} \times \frac{L}{1\,000} \times \frac{1}{V_V}, \quad (6)$$

式中, $P_{S:T}$ 为承灾体时空概率; N_V 为日车流量; L 为边坡长度; V_V 为平均车速。

K227滑坡线路边坡总长 $L=110$ m,临时便道车辆平均车速约为 $V_V=20$ km/h,日通过车次约 $N_V=360$ veh/d。计算得到K227边坡在滑坡灾害发生过程的人身风险时空概率 $P_{S:T}=0.082\,5$ 。同时因人员主要活动范围在坡前路面,故其灾害到达人员承灾体的概率 $P_{T:L}=0.75$ 。人员易损性的取值主要考虑人员年龄组成的影响^[21],参考表4数据,取40~50岁的人员易损性作为代表性计算得到人员的易损性 $V_{D:T}=0.66$ 。

表4 人员生命易损性取值^[21] (节选)

Tab. 4 Vulnerability values of personnel life (excerpt)

人员年龄/岁	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60
人员易损性	0.81	0.66	0.50	0.66	0.81

2.4 风险定量估算

通过对滑坡灾害发生概率的分析及承灾体识别、危害后果分析,进行总体的风险定量估算,主要分为人身伤害风险定量估算和财产损失分析定量估算^[22]。综合地区的可接受意愿,采用澳大利亚岩土力学协会(AGS)提出的定量分析公式。

其中人身伤害定量风险分析公式:

$$P_{LOL} = P_L \times P_{T:L} \times P_{S:T} \times V_{D:T}, \quad (7)$$

式中, P_{LOL} 为边坡灾害造成的年人员伤亡概率; P_L 为边坡破坏的概率即危险性; $P_{T:L}$ 为边坡灾害到达承

灾体的概率; $P_{S:T}$ 为承灾体的时空概率; $V_{D:T}$ 为人员的易损性。

估算K227滑坡灾害的人身伤害风险:

$$P_{LOL} = 0.696 \times 0.75 \times 0.082\,5 \times 0.66 = 2.842 \times 10^{-2}。$$

财产损失定量风险估算公式:

$$R_{prop} = P_L \times P_{T:L} \times P_{S:T} \times V_{prop} \times E, \quad (8)$$

式中, R_{prop} 为边坡灾害造成的年财产损失价值; V_{prop} 为财产易损性; E 为承灾体的经济价值。

估算K227滑坡灾害的财产损失估算:

$$R_{prop} = P_L (A + B) = 3\,411.97 \text{ 万元}。$$

3 滑坡灾害治理的施工过程风险评估

根据前文所述,K227滑坡灾害潜在的人身伤害及财产损失均不容忽视。而众所周知,滑坡灾害治理过程更具有较高的风险。本节沿用上述边坡风险评估的技术框架,对经优化设计确定的分“上、中、下”3个阶段分步实施的K227滑坡灾害治理过程进行定量风险评估及对比分析。

3.1 滑坡治理方案

为保证边坡稳定,进行全方位治理,变更设计边坡整体开挖18级,高度140 m,以双排锚索抗滑桩结合预应力锚索框架为主要支护措施;边坡施工分为上、中、下3个阶段^[7-9](图5)。

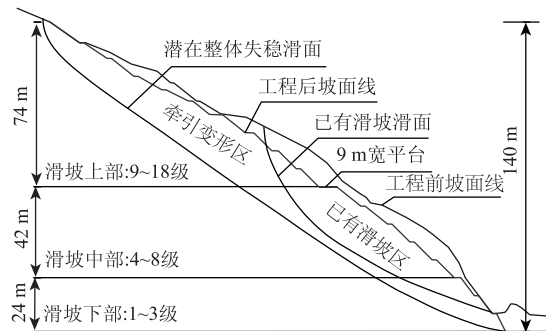


图5 K227滑坡支护设计图分部施工示意图

Fig. 5 Schematic diagram of staged construction of support design of K227 landslide

3.2 危险性分析

结合边坡分段施工过程进行边坡安全系数、可靠性指数和失效概率的计算。岩土体参数变异性见表1。

在第1阶段上部施工,进行8级平台以上的开挖及支护工作,挖方土沿坡面下滑堆载至第7级坡脚切坡处起到堆载反压作用,并迅速实施锚索抗滑桩与框架锚索的施工。计算获得上部施工

阶段总体安全系数 $FS_1 = 1.155$ ，可靠性指数为 2.215 6，失效概率 $P_1 = 1.0\%$ 。该阶段破坏概率 $P_{L1} = 0.01$ 。

在第2阶段中部施工，进行8级平台以下的堆载土体开挖及支护工作，挖方延续至第3级坡顶部，在上部锚索框架支护完成的基础下进行锚索抗滑桩的挖设，完成边坡中部的整体加固布设。由于坡脚堆载土体未开挖，反压效果较好，计算获得中部施工阶段总体安全系数 $FS_2 = 1.257 2$ ，可靠性指数为 3.196 5，失效概率 $P_2 = 0.16\%$ 。该阶段破坏概率 $P_{L2} = 0.001 6$ 。

在第3阶段下部施工，进行第3级以下与坡脚土体的开挖，同时布设第1、第2级的预应力锚索框架，完成边坡整体的施工建造过程，并完成坡面绿化和系统排水设施。获得边坡下部施工的基本安全系数 $FS_3 = 1.249$ ，可靠性指数为 3.087 3，失效概率 $P_3 = 0.2\%$ 。安全系数大于 1.2 满足设计规范要求，可靠性指数大于 2 且破坏概率远低于 5%，均满足国际研究认可标准，并且加固后的可靠性指数相对于灾害发生的可靠性指数大幅提高。该阶段破坏概率 $P_{L3} = 0.002$ 。

各施工阶段安全系数概率分布如图6所示。

3.3 危害后果分析

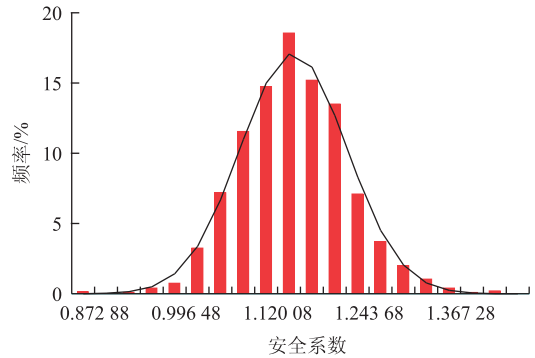
K227 滑坡施工阶段固定型承灾体主要考虑坡脚前方的荷花大桥，以及左侧连接的荷花隧道洞口和右侧连接的增瑞隧道洞口，同时应考虑滑坡影响范围内的土地使用价值。根据表3，统计对应各个承灾体中滑坡到达承灾体的概率 $P_{T:L}$ 、承灾体时空概率 $P_{S:T}$ 、承灾体的易损性 V_{prop} 、承灾体的经济价值 E 。获得施工阶段固定型承灾体的直接经济损失 $A = 2\,334.41$ 万元，间接经济损失 $B = 2\,567.851$ 万元，总经济损失为 $(A+B) = 4\,902.261$ 万元。

K227 滑坡施工阶段临时型承灾体主要考虑施工人员、施工器械及施工过程中的临时搭建建筑。人身风险性评价主要由滑坡的发生概率、灾害到达施工人员的概率、人员的时空概率、人员的易损性综合决定。施工人员的时空概率确定较为复杂，本研究主要考虑施工期间人员在岗工作的概率。阶段施工中人员承灾体时空概率 $P_{S:T}$ 为：

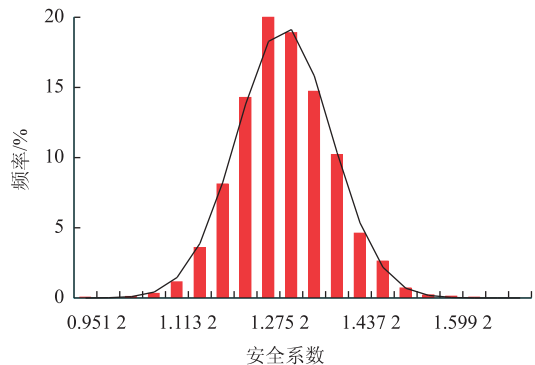
$$P_{S:T} = \frac{t \times d \times w}{24 \times 365}, \quad (9)$$

式中， t 为日工作时间； d 为周工作天数； w 为施工周数。

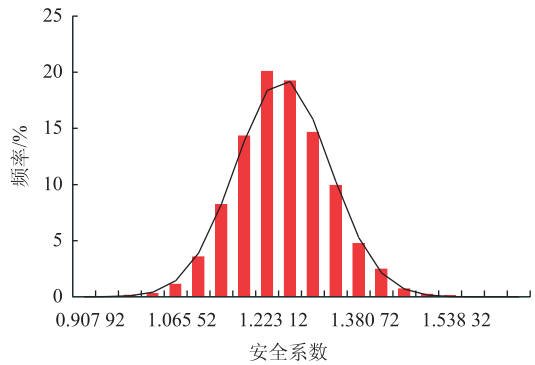
根据 K227 滑坡分级施工设计，施工期间施工人



(a) 第1阶段



(b) 第2阶段



(c) 第3阶段

图6 三阶段施工安全系数概率分布图

Fig. 6 Probability distribution of safety facto of construction in 3 stages

员 $t = 8$ h, $d = 5$ d。

第1级施工总工期 $w_1 = 30$ 周，故第1阶段施工 $P_{S:T1} = 0.137$ 。

第2级施工总工期 $w_2 = 47$ 周，故第2阶段施工 $P_{S:T2} = 0.215$ 。

第3级施工总工期 $w_3 = 13$ 周，故第3阶段施工 $P_{S:T3} = 0.059$ 。

施工人员施工地点均在边坡坡面，故灾害到达承灾体的概率 $P_{T:L} = 1$ 。根据表4确定施工人员易损性为 0.66，由于施工单位有定期对施工人员进行安

全教育培训,人员易损性数值应乘以修正系数 n (n 取值0.5)。故施工建造阶段施工人员易损性 $V_{D,T}=0.5 \times 0.66 = 0.33$ 。

表5 施工阶段风险估算

Tab. 5 Estimation of risk in construction stage

风险估算		P_{LOL} 和 R_{prop}
人身伤害风险	第1阶段	$P_{LOL1} = 0.01 \times 1 \times 0.137 \times 0.33 = 4.521 \times 10^{-4}$
	第2阶段	$P_{LOL2} = 0.0016 \times 1 \times 0.215 \times 0.33 = 1.135 \times 10^{-5}$
	第3阶段	$P_{LOL3} = 0.002 \times 1 \times 0.059 \times 0.33 = 3.894 \times 10^{-5}$
财产损失风险	第1阶段	$R_{prop1} = 0.01 \times 4902.261 = 49.023$ 万元
	第2阶段	$R_{prop2} = 0.0016 \times 4902.261 = 7.844$ 万元
	第3阶段	$R_{prop3} = 0.002 \times 4902.261 = 9.806$ 万元

对比滑坡灾害发生时的滑坡财产损失估算值3411.97万元,3阶段施工过程财产损失风险估算值均大幅度降低,达到可以忽略的水平,故该边坡治理取得显著成果。

4 分析与讨论

4.1 工程效果对比分析

通过进行滑坡发生前及施工各阶段边坡安全性分析及风险定量分析,运用边坡稳定性分析方法以及定量风险评估计算,获得的分析结果见表6。

表6 K227 滑坡灾害风险评估对照

Tab. 6 Comparison of K227 landslide disaster risk assessment

施工对比 阶段	破坏过程 反演	施工第1 阶段	施工第2 阶段	施工第3 阶段
安全系数	0.963	1.155	1.257	1.249
可靠性指数	0.482 97	2.215 6	3.196 5	3.087 3
破坏概率	0.696	0.01	0.001 6	0.002
人身伤害风险	2.84×10^{-2}	4.52×10^{-4}	1.141×10^{-4}	3.89×10^{-5}
财产损失 风险值/万元	3411.97	49.023	7.844	9.806

根据表6可知,在滑坡发生前的安全系数和破坏概率均在不可接受范围内,边坡表现出高度危险性。通过边坡治理措施,边坡的安全系数降到规范的要求范围内,破坏概率也远远低于人工边坡的设计要求。前后两部分的定量风险评估结果恰与安全系数和破坏概率体现出的结果相吻合,充分反映了边坡的真实风险水平。

4.2 技术经济对比分析

通过定量风险分析,计算得出在滑坡发生前的财产损失估算为 $R_{prop} = 3411.97$ 万元。根据边坡设计方案及实际施工费用统计,得出K227边坡总体治

3.4 施工阶段风险定量估算

按照式(7)~(8)计算各阶段的人身伤害风险和财产损失风险,见表5。

理费用为2671.6万元,治理后的财产损失估算为 $R_{prop3} = 9.806$ 万元,相比治理前的财产损失估算已大幅度降低至可忽略水平。

由此可获得工程治理前和治理后的风险评价成果: $b_{前} = 3411.97$ 万元; $b_{后} = 9.806$ 万元;治理总成本为 $C = 2671.6$ 万元。故K227滑坡治理工程价值为:

$$V_s = \frac{b_{前} - b_{后}}{c} = 1.27, \quad (10)$$

式中, V_s 为工程价值; $b_{前}$ 为工程治理前风险值; $b_{后}$ 为工程治理后风险值; C 为治理总成本。

根据表5施工3阶段风险评估与灾害发生过程的风险评估对比可知,风险评估方案具有较高的效益性和价值性,印证了K227滑坡动态施工治理取得的显著收益。

4.3 讨论

本研究以超高路堑边坡K227为具体案例,基于路堑边坡风险评估及管理的技术框架,通过定量风险评估方法分析了滑坡灾害发生前的风险值及施工过程各阶段的风险值,较好地评价和指导了K227滑坡病害治理的风险防控工作,但仍存在一些不足。

在承灾体的易损性分析上仍存在一定的模糊性,很难做到精确考虑每个承灾体的具体情况;在单个承灾体的易损性分析上,虽然考虑应用了当前国内外的定量分析方法,但是对于不同类型的边坡、不同类型的承灾体不一定存在完全的适用性,在充分考虑各种不同条件类型的承灾体定量分析上仍需进一步研究,有待于完善归纳较为全面的承灾体易损性定量分析指标,进而适用于不同类型的边坡。

在人身伤害风险的评价上,国内外不同研究领

域仍存在一定的差异性,可接受范围的确定对于不同的具体边坡环境具有一定的波动性。由于当前国内外没有单独对应施工阶段的人身伤害风险评价指标,故本研究运用当前国际通用的建筑边坡人身伤害分析评价指标。但由于施工阶段的边坡人员流动性大,人口数量多而密集,同时施工人员基本处于边坡潜在滑体中,遭遇风险的可能性大幅度提高,故有待提出更为贴切具体的施工阶段人身伤害风险评价指标。

5 结论

路堑边坡开挖具有明显的开挖卸荷松动效应,并可能受强降雨等外界环境影响产生变形破坏,需要加强施工过程风险评估及控制。本研究以双永高速 K227 滑坡为例,在风险分析、风险评估及风险管理的过程中贯彻定量风险评估的思路和方法,开展滑坡灾害过程和滑坡治理过程的风险评估及管理,得到以下结论。

(1) 通过对定量风险分析流程及关键计算参数的研究分析,开展了 K227 滑坡的失效概率分析及灾害后果分析,估算了 K227 滑坡灾害的人身伤害及财产损失值,验证了该滑坡灾害具有较高的失效概率,需要开展系统的风险控制以规避损失。

(2) 沿用滑坡定量风险评估技术方案,对 K227 滑坡上、中、下 3 段治理过程进行风险估算及对比分析。发现通过治理措施,可将滑坡施工过程中的人身伤害及财产损失控制到可接受范围之内,并取得良好的经济效益。

(3) 对比滑坡灾害发生和治理两阶段的定量风险评估结果,发现实施严格规范的施工过程风险控制,不仅可显著提高边坡安全系数,而且可降低边坡破坏概率、潜在的财产损失值和人身伤害概率,治理成效显著。

(4) 虽然在施工过程定量风险评估的多方案优选过程中,相关概率和易损性指标的具体取值对评估与决策结果影响不大,但是各评估指标参数的确定仍值得深入研究,如何更合理地确定指标值在国内外仍存在一定的困难,但相信通过更多工程的验证可以不断获取经验,并充分体现该方法的科学性及其在工程减灾中的应用价值。

参考文献:

References:

- [1] 马惠民,王恭先,周德培. 山区高速公路高边坡病害防治实例 [M]. 北京:人民交通出版社,2006.
- MA Hui-min, WANG Gong-xian, ZHOU De-pei. Examples on Prevention and Control of High Slope Disease of Expressway in Mountainous Area [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [2] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (3): 433-454.
- HUANG Run-qiu. Large-scale Landslides and Their Sliding Mechanisms in China Since the 20th Century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (3): 433-454.
- [3] 吴忠广,申瑞君,万福茂,等. 岩质高边坡运营安全风险源辨识方法 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (3): 8-15, 27.
- WU Zhong-guang, SHEN Rui-jun, WAN Fu-mao, et al. A Method for Identifying Operation Safety Risk Source of Rocky High Slope [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (3): 8-15, 27.
- [4] 刘光旭,席建超,戴尔阜,等. 中国滑坡灾害承灾体损失风险定量评估 [J]. 自然灾害学报, 2014, 23 (2): 39-46.
- LIU Guang-xu, XI Jian-chao, DAI Er-fu, et al. Loss Risk Assessment of the Hazard-affected Body of Landslides in China [J]. Journal of Natural Disasters, 2014, 23 (2): 39-46.
- [5] HUNGR O, FELL R, COUTURE R, et al. Landslide Risk Management [C] //Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management. Vancouver: A. A. Balkema Publishers, 2005.
- [6] 交通运输部. 高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南 [M]. 北京:人民交通出版社,2015.
- Ministry of Transport. Guide for Construction Safety Risk Assessment of Expressway Cutting High Slope Projects [M]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [7] 王浩,王晓东,泮俊. 超高路堑边坡治理工程案例研究 I: 边坡失稳机制模拟分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (4): 899-909.
- WANG Hao, WANG Xiao-dong, YAN Jun. A Case Study of Super-high Cut Slope I: Simulation and Analysis of Instability Mechanism Simulation of Slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (4): 899-909.
- [8] 王浩,王晓东,泮俊. 超高路堑边坡治理工程案例研究 II: 治理对策及其过程控制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (5): 1152-1161.
- WANG Hao, WANG Xiao-dong, PAN Jun. A Case Study

- of Super-high Cut Slope II: Stabilization Measures and Their Process Controls [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (5): 1152-1161.
- [9] 王浩, 豆红强, 谢永宁, 等. 路堑边坡全寿命周期风险评估及管理的技术框架 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (12): 3505-3516.
- WANG Hao, DOU Hong-qiang, XIE Yong-ning, et al. A Technical Framework for Life Cycle Risk Assessment and Management of Highway Cut Slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (12): 3505-3516.
- [10] 王浩, 林一夫, 梁涛, 等. 福建山区高速公路路堑高边坡风险分级方法研究 [J]. 工程地质学报, 2016, 24 (4): 492-500.
- WANG Hao, LIN Yi-fu, LIANG Tao, et al. Risk Classification Method for High Cut Slopes of Highway in Mountains of Fujian Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24 (4): 492-500.
- [11] 吴忠广, 王海燕, 陶连金, 等. 高速公路高边坡施工安全总体风险评估方法 [J]. 中国安全科学学报, 2014, 24 (12): 124-129.
- WU Zhong-guang, WANG Hai-yan, TAO Lian-jin, et al. Method for General Risk Assessment of Expressway High Slope in Construction Safety [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24 (12): 124-129.
- [12] 李典庆, 肖特, 曹子君, 等. 基于极限平衡法和有限元法的边坡协同式可靠度分析 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (6): 1004-1013.
- LI Dian-qing, XIAO Te, CAO Zi-jun, et al. Auxiliary Slope Reliability Analysis Using Limit Equilibrium Method and Finite Element Method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (6): 1004-1013.
- [13] 李侃, 巨能攀. 基于蒙特卡洛方法的边坡可靠性评价 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25 (1): 23-27.
- LI Kan, JU Neng-pan. Integrated Application of Monte-Carlo Simulation for Landslide Reliability Analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25 (1): 23-27.
- [14] PRIEST S D, BROWN E T. Probabilistic Stability Analysis of Variable Rock Slopes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1983, 20 (5): 159.
- [15] 樊晓一, 乔建平, 韩萌, 等. 灾难性地震和降雨滑坡的体积与运动距离研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (10): 3051-3058.
- FAN Xiao-yi, QIAO Jian-ping, HAN Meng, et al. Volumes and Movement Distances of Earthquake and Rainfall-induced Catastrophic Landslides [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (10): 3051-3058.
- [16] FINLAY P J, MOSTYN G R, FELL R. Landslide Risk Assessment: Prediction of Travel Distance [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36 (3): 556-562.
- [17] 吴树仁. 滑坡风险评估理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- WU Shu-ren. Theory and Technology of Landslide Risk Evaluation [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [18] POWELL G. Landslide Risk Management Concepts and Guidelines [J]. Australian Geomechanics, 2000, 35 (1): 49-92.
- [19] 潘懋, 李铁峰. 灾害地质学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- PAN Mao, LI Tie-feng. Disaster Geology [M]. Beijing: Peking University Press, 2012.
- [20] FELL R, COROMINAS J, BONNARD C, et al. Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning [J]. Engineering Geology, 2008, 102 (3/4): 85-98.
- [21] 李彝. 甘肃舟曲县锁儿头滑坡风险评估研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- LI Ben. Study on Risk Assessment of Suoertou Landslide in Zhouqu County, Gansu Province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.
- [22] 杜娟. 单体滑坡灾害风险评价研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2012.
- DU Juan. Risk Assessment of Individual Landslide [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2012.