

# 基于不安定指数法的运营公路边坡 风险评价模型研究

田卿燕<sup>1</sup>, 张青青<sup>1\*</sup>, 殷全春<sup>1</sup>, 杨军<sup>2</sup>

(1. 广东华路交通科技有限公司, 广东 广州 510420; 2. 广州市市政工程试验检测有限公司, 广东 广州 510520)

**摘要:**该文基于大量运营公路边坡检测案例提出可用于公路边坡破坏潜势风险评估的理论计算模型及评定标准,探讨影响公路边坡技术状况的各主要因素及影响程度,并以实际工程为例进行边坡风险程度预测分析。分析结果表明:基于大量边坡案例的不安定指数方法能够较好地揭示影响运营公路边坡风险的各主要因素,公路边坡破坏的关键因素主要是边坡本体技术状况,边坡防护结构技术状况和坡面地形地貌等因素所占权重相对不高。采用数学统计方法进行边坡破坏潜势风险的评定分级具有一定合理性,建立的边坡破坏潜势风险区域计算误判率能够有效降低。

**关键词:**运营公路; 边坡; 风险评估; 不安定指数法

**中图分类号:** U416.1+4

**文献标志码:** A

近20年来中国山区公路里程迅速增加,随着高速公路建设向丘陵、山区的延伸,形成大量的边坡工程,同时受气候环境多变及地质条件复杂的影响,边坡地质灾害发生较为频繁,为保障高速公路通行安全,其养护及技术状况评价正成为山区公路工程发展必须面临的问题。公路边坡病害类型与地形地貌、岩层特性、土壤种类、气象水文、地震、人类活动等多个因素有关<sup>[1-4]</sup>,如何根据这些基础资料,同时结合边坡当前的状态,对边坡进行科学合理的分析评价,为边坡养护加固提供科学的依据,保障高速公路的运营安全成为业界日益关注的课题<sup>[5]</sup>。

目前,中国对运营期边坡的安全风险评价尚无规范可依。而业界内评价运营期边坡安全风险应用最为广泛的方法为经验方法和统计方法。经验方法为实际现场进行边坡技术状况评价最常采用的方法,以定性的评价内容为主,通过对边坡的定性描述,并给予评分,最后按照所有的定性描述得到总评分,再依照总评分的高低来定义边坡病害等级,经验方法虽能较为迅速得到边坡技术状况评价,但较为粗略;统计方法主要采用数理统计方法对大量边坡案例数据进行分析,统计结果一般随区域特性的不同、选取因子的不同以及统计方法的不同,而得到不同的边坡本体技术状况评价结果,在使用上可能受限于部分因子无法取得或不

同区域特性下缺少相对应的因子分级,导致无法进行边坡本体技术状况评价<sup>[6-8]</sup>。由上可知,对于边坡技术状况评价仍然存在以下几方面问题尚未完全解决:① 经验方法多为定性,难以量化,加上部分评价内容不容易通过现场巡查取得,适用性不佳;② 统计方法无法具备全范围的适用性,针对不同区域特性、环境变化以及其他因素的影响,无法有效给出完善的评价结果;③ 评价结果的分级缺乏数据支撑。

该文基于大量边坡工程案例,在综合经验方法和统计方法各自优点的基础上,提出可用于边坡技术状况评定的不安定指数模型及评定标准。采用该方法进行影响因素分析和理论模型构建,以不安定指数值( $D_i$ )描述路堑边坡潜在破坏风险大小,进行各评价指标的变异性分析,并依照计算的变异值判定影响因子权重,以实现边坡风险程度预测与评价。

## 1 边坡风险评价模型

### 1.1 边坡分项技术状况评价指标

影响公路边坡整体技术状况的因素可分为内在因素和外在因素。内在因素主要是指边坡坡体自身的固有特性,例如边坡结构、岩土类型和物理力学性质、水理性质、密实程度、坡高、坡度等要素;外在因素主要有

收稿日期:2020-08-25

基金项目:广东省交通运输厅科研项目(编号:科技-2015-03-015)

作者简介:田卿燕,女,博士,教授级高工。E-mail:826875931@qq.com

\* 通信作者:张青青,女,硕士,工程师。E-mail:392045875@qq.com

环境因素和人为因素,例如降雨、地震、人工削坡或堆载等。

广东省山区高速公路边坡整体稳定性主要受地层结构和岩性、降雨与地下水渗流条件、边坡防护措施有效性等多种因素的影响。结合广东省公路边坡实际病害类型和分布特点,并参考国内外相关边坡技术状况评价内容,考虑到现场巡查人员可直接取得相关信息,使其能够依照现场巡查信息立即进行标准化评分,将运营公路边坡技术状况评价指标划分为边坡本体技术状况评价指标、边坡支护结构技术状况评价指标以及边坡排水设施技术评价指标 3 个方面。

边坡本体技术状况评价分为坡面地形地貌特征、边坡岩土体性状特征、地下水分布特征、坡面防护体特

征以及降雨特征 5 个项目进行评价,如表 1 所示,按照对特征因子病害的影响程度进行 4 个(0,1,2,3)或 3 个(0,1,2)分级。以坡面地形地貌特征评价指标为例,详细指标分级与标准化评分如表 2 所示。

表 1 边坡本体技术状况评价特征因子指标	
特征项目	特征因子
坡面地形地貌	坡顶/坡面/坡脚
边坡岩土体性状(坡体历史病害/坡体水平变形)	地层岩性/病害程度与治理效果/表面和(或)深层测斜位移量
地下水分布	地下水
坡面防护体	挂网喷射/干砌/浆砌片石/植被护坡/防护网
降雨特征	降雨条件

表 2 坡面地形地貌特征评价特征因子指标

特征因子	特征描述	影响程度	分级
坡顶 $t_{TE}$	无任何病害征兆	无	0
	有部分裂缝产生,但整体坡顶并无明显变化	低	1
	坡顶出现明显裂缝,且上下裂缝产生错位;人为活动开垦	中	2
	坡顶出现大范围明显裂缝,且有大规模不均匀沉陷、错位、变形	高	3
坡面 $s_{TE}$	无任何病害征兆	无	0
	坡面裸露,出现部分裂缝,但整体坡面并无明显变化	低	1
	坡面裸露且有侵蚀、冲刷的现象;坡面植生树木群产生倾斜;坡面出现变形;人为活动开垦	中	2
	坡面发生大范围裂缝、崩塌、坍塌、变形	高	3
坡脚 $f_{TE}$	无任何病害征兆	无	0
	坡脚出现部分张力裂缝,但整体坡脚并无明显变化	低	1
	坡脚出现大范围裂缝、隆起、变形	中	2
	坡脚出现大范围变形,隆起严重,伴随整体或局部滑坡现象	高	3

边坡支护结构技术状况评价指标依据实际采用的支护类型(预应力锚固结构、挡土墙、抗滑桩)和不同支护结构的病害特征,将影响程度定为 4 个级别(0,1,2,3),以预应力锚固结构评价指标为例,详细指标分级与标准化评分如表 3 所示。

将边坡排水设施技术状况评价分为病害历史与养护管理状况、堵塞情况、损坏程度以及整体功能分别进行 4 个级别(0,1,2,3)分级,现场巡查人员通过这些指标能对现场排水设施的运行状况进行评价(表 4)。

1.2 边坡风险评价模型建立

运营公路边坡工程破坏潜势风险评价模型的建立,主要包括以下几个步骤:

(1) 选取影响边坡整体稳定性的评定因子(边坡破坏潜势风险评价指标)。

(2) 区域性边坡工程病害案例资料的调研与整理(搜集边坡病害样本)。

(3) 计算各因子的权重和重要程度分级(计算各因子不稳定率、变异系数和因子权重值)。

(4) 推导边坡破坏潜势风险评定多元非线性数学表达式,计算各边坡破坏案例样本的不安定指数值(建立边坡破坏潜势风险评定理论模型)。

(5) 统计误判率,验证模型可靠性,通过重复步骤(1)~(4)进一步提高模型分析精度,降低误判概率。

(6) 将上述建立的边坡破坏潜势风险评定理论模型运用于分析实际边坡工程。

图 1 为边坡破坏潜势风险评定不安定指数法的主要分析流程。

表 3 预应力锚固结构评价特征因子指标

特征因子	特征描述	影响程度	分级
病害历史与养护管理状况 $h_{AN}$	无病害	无	0
	有病害且治理措施恰当,病害发展速率趋缓	低	1
	有病害但治理措施部分失效,病害继续发展	中	2
	有病害但治理措施无效,病害加速发展	高	3
锚索(杆)锈蚀 $c_{AN}$	无任何缺损	无	0
	锚头出现结晶现象	低	1
	锚头出现渗水现象	中	2
	锚头出现大量渗水、铁锈色渗水现象	高	3
锚索(杆)松弛或超限 $r_{AN}$	无任何缺损	无	0
	梁底周围出现轻微冲刷	低	1
	梁底周围出现脱空,锚头与锚索无损坏	中	2
	梁底周围明显冲刷、脱空,锚头与锚索分离断裂	高	3
锚头损坏程度 $f_{AN}$	无任何裸露	无	0
	锚头出现轻微裂缝	低	1
	锚头出现局部破损、开裂	中	2
	锚头明显损坏、开裂、锚具脱离	高	3

表 4 边坡排水设施技术评价特征因子指标

特征因子	特征描述	影响程度	分级
病害历史与养护管理状况 $h_{DS}$	无病害	无	0
	有病害且治理措施恰当,病害发展速率趋缓	低	1
	有病害但治理措施部分失效,病害继续发展	中	2
	有病害但治理措施无效,病害加速发展	高	3
堵塞情况 $b_{DS}$	无堵塞情况	无	0
	部分排水设施长草、淤积	低	1
	排水设施出现积水	中	2
	淤积严重,出现溢流	高	3
损坏程度 $f_{DS}$	无任何损坏	无	0
	排水设施表面出现轻微裂隙	低	1
	排水设施多处裂缝、破损	中	2
	排水设施断裂、破损、变形,排水出现断流	高	3
整体功能 $o_{DS}$	整体排水功能完善	无	0
	排水设施分布不完整、不连通	低	1
	降雨期间,排水设施有溢流现象	中	2
	整体排水功能完全丧失	高	3

该方法的主要分析步骤<sup>[2]</sup>如下:

(1) 采用式(1)对反映边坡病害特征的各特征因子影响程度分级结果进行无量纲化(归一化)处理,消除分级大小和分级数目差异化的影响,确定各特征因子的标准化评分值  $d_i$  (即 1,4,7,10 或 1,5.5,10)。各因子的评分值  $d_i$  越接近 10,表示边坡病害致灾的潜在概率越高;反之则致灾潜在概率越低。

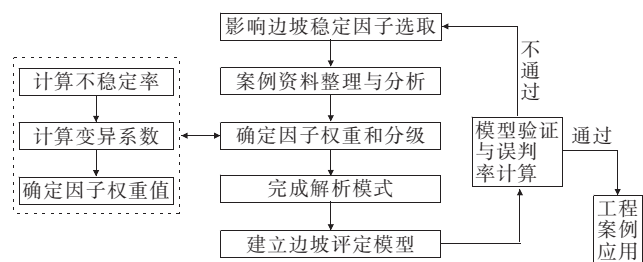


图1 边坡破坏风险评定理论计算模型构建与应用流程图

$$d_i = \frac{9(S_i - S_{\min})}{(S_{\max} - S_{\min})} + 1 \quad (1)$$

式中:  $S_i$  为各特征因子影响程度的分级数值;  $S_{\max}$  与  $S_{\min}$  分别为同一特征因子影响程度分级的最大值和最小值。

(2) 根据调查样本总数和已知病害数目计算各特征因子在不同分级下的病害发生百分比  $X$ , 并采用式(2)计算各特征因子的变异系数  $V$ 。其变异系数值越大, 代表该特征因子影响路堑边坡出现破坏的概率越高。

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\sigma$  为各因子不同分级下病害百分比的统计标准偏差;  $\bar{X}$  为各因子在不同分级下产生病害的百分比平均值。

变异系数反映各特征因子影响路堑边坡出现破坏潜势概率的敏锐度。变异系数越小, 显示同一个因子的各个分级影响路堑边坡出现破坏的发生概率相近, 因子的分级无法影响路堑边坡出现破坏发生概率的高低, 可以判定其为非重要的影响因素; 反之, 则将其列为重要的影响因素。

(3) 完成变异系数计算后, 依其数值大小计算其影响权重比例, 将各因子的变异系数除以全部因子的变异系数总和, 即为该因子对于路堑边坡出现破坏潜势概率的权重值, 如式(3)所示:

$$W_i = \frac{V_i}{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}, i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中:  $W_i$  为各特征因子的权重值;  $V_i$  为各特征因子的变异值。

权重值为指数形式, 其值介于 0~1 之间, 所有评价指标的权重值之和为 1。权重值越大者, 表示该评价指标的影响性越大。同时, 也可依照各特征因子的病害百分率计算其评分值  $d_i$ , 如式(4)所示:

$$d_i = \frac{9(\bar{X}_i - \bar{X}_{\min})}{(\bar{X}_{\max} - \bar{X}_{\min})} + 1 \quad (4)$$

式中:  $\bar{X}$  为各特征因子影响路堑边坡出现破坏的发生百分比;  $\bar{X}_{\max}$  与  $\bar{X}_{\min}$  分别为同一特征因子中所属的各分级路堑边坡出现破坏百分比值中的最大和最小值。

该式计算结果也可作为评价各特征因子重要程度的一个量化指标。

(4) 将权重值  $W_i$  与评分值  $d_i$  代入多变量不安定指数值计算公式, 如式(5)所示:

$$D_t = d_1^{w_1} \times d_2^{w_2} \times d_3^{w_3} \times \dots \times d_n^{w_n} \quad (5)$$

推导得到可适性高的多元非线性数学模式, 计算出各边坡破坏案例样本下的不安定指数值  $D_t$ 。  $D_t$  介于 1~10 之间, 越接近 10 则表示路堑边坡出现整体破坏的概率越高。

建立的边坡工程破坏潜势风险评价方法可采用 95% 信赖区间作为统计检定分析依据, 决定评价方法  $D_t$  值的上下限区间<sup>[7]</sup>, 如式(6)所示:

$$\bar{X} - t_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{N}} < \mu < \bar{X} + t_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

式中:  $N$  为样本数;  $\bar{X}$  为样本平均数;  $S$  为样本标准偏差;  $t_{\alpha/2}$  为具有  $V=N-1$  自由度且右方面积为  $t_{\alpha/2}$  的  $t$  值。

## 2 边坡风险评定模型应用分析

以粤北山区某高速公路沿线边坡作为研究对象, 应用该文模型进行工程案例分析。

### 2.1 公路沿线边坡工程概况

该高速公路沿线边坡位于广东省北部山区, 属亚热带气候, 跨越南岭山, 地质构造较为复杂, 自然环境恶劣, 地形、地质情况复杂, 全线有不良地质现象, 如滑坡、溶洞、断层破碎带、错落体、塌方、软弱夹层、煤系地层、高液限土等分布广泛, 高边坡工程规模普遍较大, 选定 63 处典型路堑边坡进行风险潜势评价研究。

### 2.2 边坡典型病害

沿线边坡病害类型具体如下:

#### (1) 北部红砂岩地区

该区位于 K0+000~K16+800 段, 长约 16 km, 主要病害类型以坡面病害(风化剥落、溜坍)为主, 少见滑坡、崩塌等病害。据监测资料初步统计, 该区发育的坡面病害 6 处, 崩塌 2 处。

#### (2) 中部灰岩地区

位于 K8+600~K64+000 段, 长约 56 km, 该区地下水发育, 沿线多处边坡有地下水出露, 局部地段见

溶洞。主要病害类型以坡面病害、崩塌落石为主,发育滑坡、坍塌等病害。据初步统计,该区发育的滑坡 6 处(2 处不稳定、2 处欠稳定、2 处基本稳定),崩塌 7 处,坍塌 1 处,坡面病害 26 处。

(3) 南部砂岩、页岩、泥岩互层地区

该区位于 K64+000~K109+292 段,长约 45 km,边坡岩土体风化层厚,稳定性差,部分为煤系地

层,多处发现高液限土。该区所在的路堑高边坡地下水(基岩裂隙水)较为发育,多出露于砂岩与煤系地层(页岩、泥岩、煤层)交界处。主要病害类型以坡面病害为主,发育滑坡(顺层滑坡)、坍塌等病害。据初步统计,该区发育的滑坡 5 处(2 处欠稳定、2 处基本稳定、1 处不稳定),崩塌 2 处,坍塌 2 处,坡面病害 25 处。

具体的病害分布规律见表 5。

表 5 京珠北高速公路主要病害情况

病害类型	病害分布里程范围	地质类型	病害占全线比例/%	备注
风化剥落	K0+000~K16+800	红砂岩	4.6	北段
溜坍	K0+000~K16+800	红砂岩	5.2	北段
坡面渗水	K8+600~K64+000	石灰岩	13.5	—
锚头渗水	K8+600~K64+000	石灰岩	5.0	—
重力式高挡墙	K26+000~K30+000	石灰岩	3.3	中段
后侧平台塌陷	K50+500~K69+000			
坡面起鼓开裂	K28+000~K41+000	石灰岩	9.6	—
坡面裸露岩石崩塌	K25+000~K39+000	石灰岩、砂岩	4.4	—
	K87+000~K90+000			
坡面溜塌	K21+000~K41+000	石灰岩、砂岩	3.5	南段与中段
	K87+000~K90+000			
	K101+000~K109+000			
滑坡(顺层滑坡)	K83+000~K99+000	砂岩与煤系 地层 (页岩、泥岩、煤层)交界处	7.8	全线地质 软弱带
	K107+000~K109+000			
坡面坍塌	K16+000~K30+000	石灰岩， 部分为砂岩	8.3	—
	K41+000~K52+000			
抗滑桩头开裂露钢筋	K17+000~K19+000	煤系地层和砂岩	1.5	—
	K65+000~K70+000			
边坡天沟距离坡顶过远 或者过水面积不足	K25+000~K39+000	石灰岩	4.5	—
	K60+000~K70+000			
平台截水沟杂草多	K84+000~K109+000	砂岩、页岩、泥岩互层	16.4	—
仰斜排水孔淤堵	K16+000~K27+000	砂岩、页岩、泥岩互层	5.6	—
	K90+000~K107+000			
锚索锈蚀	K16+000~K20+000	石灰岩、砂岩、页岩、泥岩	6.8	—
	K46+000~K88+000			
	K98+000~K107+000			
合计			100	

2.3 边坡破坏潜势风险评定分析

依照所建立的理论基础以及边坡工程破坏潜势风险评定方法的各项评价指标,通过历史资料、现场调查以及无人机航拍技术,将既有 63 处边坡病害及技术状况评定进行相关特征因子评分(表 6),若评价指标与

该边坡无相对应的内容,则以评分 1 计算。评分完成后,可将 63 处边坡工程资料进行统计分析,取得相关特征因子的变异值及权重值。

依照 63 处边坡病害调查结果的评分,初步对相关特征因子进行变异值及权重值计算,并对特征因子影

响边坡破坏的概率排序,如表 7 所示。

由表 7 计算结果可知:影响边坡破坏主要是以边坡本体技术状况为主控条件,该地区边坡风险程度与其所处的多雨气候条件、地表和地下水径流条件、边坡施工期历史病害关系十分紧密,表现为地下水分布、降雨条件和边坡排水设施状况以及坡体历史病害排序最为靠前;坡体变形量(表面位移和深层水平位移)和坡面防护结构(是否因坡体变形而破损)是判断边坡变形发展程度和整体稳定性最为直观的评价指标,故该特征因子重要性排序同样比较靠前。边坡防护结构技术状况的影响相对较小,这是因为抗滑桩、预应力锚固结构和挡土墙等均是为提高边坡抗滑稳定性要求而设计,支挡结构的施加增加了边坡整体的安全储备,这些结构个别部位失效并不一定表示边坡整体的技术状况迅速恶化或风险程度陡增,即便这些支护结构出现较大面积的病害,往往边坡坡体也会产生非常明显的变形破坏迹象,需要进一步明确该类病害的严重程度。因此,这些特征因子的排序相对靠后;坡面地形地貌的权重值排序最为靠后,这主要与边坡坡面地形地貌因边坡施作边坡防护结构而不易直观判断有关,说明该特征因子与边坡安全风险状况的相关性并不显著。

表 6 边坡变异系数及权重值计算(以坡面地形地貌特征为例)

特征因子	影响程度	分级	标准化评分	调查总数/处	病害数量/处	病害百分比/%
$t_{TE}$	无	0	1	58	16	27.59
	低	1	4	5	1	20.00
	中	2	7	0	0	0.00
	高	3	10	0	0	0.00
变异系数						118.36
权重						0.029
$s_{TE}$	无	0	1	15	3	20.00
	低	1	4	45	12	26.67
	中	2	7	3	2	66.67
	高	3	10	0	0	0.00
变异系数						98.66
权重						0.024
$f_{TE}$	无	0	1	6	1	16.67
	低	1	4	53	13	24.53
	中	2	7	4	3	75.00
	高	3	10	0	0	0.00
变异系数						111.18
权重						0.027

表 7 边坡变异系数及权重值

排名	巡查内容	平均权重	特征因子	变异系数	权重值
1	地下水分布(GR)	0.049	地下水 $w_{GR}$	200.00	0.049
			地层岩性 $g_{BS}$	200.00	0.049
			病害程度与治理效果 $l_{BS}$	200.00	0.049
2	降雨条件(RA)	0.043	时最大雨量 $i_{RA}$	173.21	0.043
			表面和(或)深层测斜位移量 $d_{BT}$	173.21	0.043
			病害历史与养护管理状况 $h_{DS}$	200.00	0.049
3	边坡排水设施(DS)	0.040	堵塞情况 $b_{DS}$	116.89	0.029
			损坏程度 $f_{DS}$	129.77	0.032
			整体功能 $o_{DS}$	200.00	0.049
4	抗滑桩(AS)	0.039	病害历史与养护管理状况 $h_{AS}$	126.20	0.031
			抗滑桩外观 $a_{AS}$	150.36	0.037
			抗滑桩结构 $c_{AS}$	200.00	0.049
5	坡面防护体(SP)	0.035	挂网喷射 $n_{SP}$	115.66	0.029
			干砌 $l_{SP}$	200.00	0.049
			浆砌片石 $m_{SP}$	148.07	0.037
			植被护坡 $v_{SP}$	126.20	0.031
			防护网 $p_{SP}$	126.20	0.031

续表 7

排名	巡查内容	平均权重	特征因子	变异系数	权重值
6	预应力锚固结构(AN)	0.029	病害历史与养护管理状况 $n_{AN}$	133.89	0.033
			锚索(杆)锈蚀 $c_{AN}$	101.53	0.025
			锚索(杆)松弛或超限 $r_{AN}$	96.67	0.024
			锚头损坏程度 $f_{AN}$	137.61	0.034
	挡土墙(RW)	0.029	病害历史与养护管理状况 $h_{RW}$	117.80	0.029
			挡土墙外观 $a_{RW}$	115.94	0.029
			挡土墙结构 $c_{RW}$	116.89	0.029
			泄水孔 $d_{RW}$	117.80	0.029
7	坡面地形地貌(TE)	0.027	坡顶 $t_{TE}$	118.37	0.029
			坡面 $s_{TE}$	98.67	0.024
			坡脚 $f_{TE}$	111.18	0.027

在求得各评价指标的评分和权重值后,可由式(5)建立该公路边坡破坏潜势风险评定数学模式,即:

$$D_i = i_{RA}^{0.043} \times t_{TE}^{0.029} \times s_{TE}^{0.024} \times f_{TE}^{0.027} \times$$
$$\omega_{GR}^{0.049} \times g_{BS}^{0.049} \times l_{BS}^{0.049} \times d_{BT}^{0.043} \times n_{SP}^{0.029} \times l_{SP}^{0.049} \times$$
$$m_{SP}^{0.037} \times v_{SP}^{0.031} \times p_{SP}^{0.031} \times n_{AN}^{0.033} \times c_{AN}^{0.025} \times r_{AN}^{0.024} \times$$
$$f_{AN}^{0.034} \times h_{RW}^{0.029} \times a_{RW}^{0.029} \times c_{RW}^{0.029} \times d_{RW}^{0.029} \times$$
$$h_{AS}^{0.031} \times a_{AS}^{0.037} \times c_{AS}^{0.049} \times h_{DS}^{0.049} \times b_{DS}^{0.029} \times f_{DS}^{0.032} \times$$
$$o_{DS}^{0.049} \quad (7)$$

采用式(7)对 63 处边坡工程案例逐一进行不安定指数( $D_i$ )的计算。63 处边坡不安定指数( $D_i$ )计算值如图 2 所示。

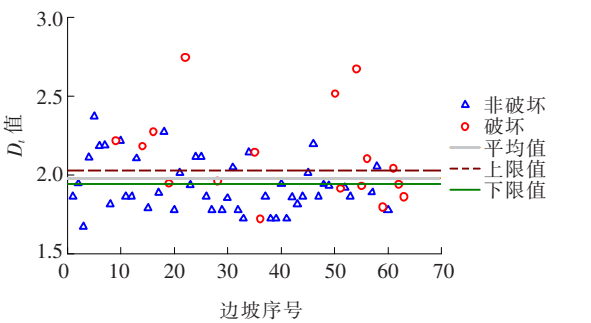


图 2 边坡工程风险评定计算值分布(95%置信区间)

由图 2 可知: $D_i$  值为 1.67~2.75,平均值为 1.98。若采用 95%置信区间作为统计检定分析依据,可确定评价方法  $D_i$  值的上限和下限分别为 2.03 和 1.94。现场调查评定为破坏的边坡,在不安定指数值( $D_i$ )的计算结果中,部分评定为未破坏;现场调查评定为未破坏的边坡,计算结果却评定为破坏。因此,可针对上述建立的边坡评定模式进行误判率分析。以下分别以  $D_i$  值的上下限区间和平均值进行误差矩阵计算,得到根据不同界限值计算的误判率,结果如表 8 所示。

表 8 边坡工程风险评定模式误差矩阵

分界指标	误判率/ %	现场判定	现场推估/处		
			破坏	未破坏	总计
上限	38.48	现场判定破坏	9	8	17
$D_i =$		现场判定未破坏	13	33	46
2.03		总计	22	41	63
平均值	40.67	现场判定破坏	9	8	17
$D_i =$		现场判定未破坏	15	31	46
1.99		总计	24	39	63
下限	35.92	现场判定破坏	12	5	17
$D_i =$		现场判定未破坏	18	28	46
1.94		总计	30	33	63

由表 8 可知:当  $D_i$  值为上限时,误判率为 38.48%; $D_i$  值为平均值时,误判率为 40.67%; $D_i$  值为下限时,误判率为 35.92%,以下限值的误判结果为最小。因此,该文以  $D_i \geq 1.94$  作为初步判定边坡具有较高破坏风险的判定依据。

3 边坡工程破坏潜势风险程度分级

根据该公路沿线 63 处边坡样本数据计算的评定模式可知,采用数学统计方法进行边坡破坏潜势风险的评定分级具有一定的合理性。根据文献[9]的建议,边坡破坏潜势风险分级可采用平均值进行划分,其优点为后续进行准确率提升时,可即时计算边坡破坏潜势风险的分级。

依照平均值的划分将边坡破坏潜势风险分级划分为高度风险(High Hazard, HH)、中度风险(Medium

Hazard,MH)和低度风险(Low Hazard,LH)。依据63处边坡的不安定指数值( $D_i$ )计算结果可知, $D_i$ 值介于1.67~2.75之间,平均值为1.98,分别将最大值和最小值与平均值求平均,如式(8)、(9)所示:

$$V_{HH} = \frac{D_{i_{max}} + D_{i_{mean}}}{2} \tag{8}$$

$$V_{LH} = \frac{D_{i_{min}} + D_{i_{mean}}}{2} \tag{9}$$

由式(8)、(9)分别计算得到的界限值为2.37和1.83。因此,可初步将高度风险区域定义为 $D_i$ 值为2.75~2.37;中度风险区域定义为 $D_i$ 值为2.37~1.83;低度风险区域定义为 $D_i$ 值为1.83~1.67,具体参见图3。

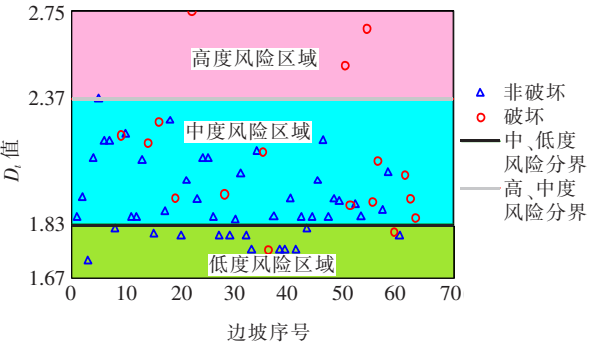


图3 边坡破坏潜势风险区域分界

建立的边坡破坏潜势风险区域可进一步计算高度风险区域和低度风险区域的误判率(表9)。

表9 边坡破坏潜势风险区域的误判率

风险区域	破坏/处	非破坏/处	误判率/%
高度风险	3	0	0
低度风险	2	13	13

由表9可知:对于高度风险区域,3处边坡破坏点位皆分布于该区域,误判率为0%;对于低度风险区域,15处边坡点位有2处边坡破坏点位分布于该区域,误判率为13%。

可以看出:即便按上述方式对63处边坡工程的风险等级进行划分,评定结果与实际情况仍存在一定偏差,一些已判定为破坏的边坡样本仍处于中度风险区域。出现这一结果的原因,一方面可能与评定模型采用的边坡破坏与非破坏这一边界划分方式相对较粗有关,另一方面也可能与评定模型未有效体现边坡滑坡后果对公路运营安全的影响有关。但是,该方法基本上从理论方面能够揭示影响公路边坡技术状况的主要因素,较客观地评定各因素的影响程度,为边坡技术状况评定实用方法的建立提供了重要的理论基础。

4 结论

提出可用于公路边坡破坏潜势风险评估的理论计算模型及评定标准,揭示了影响公路边坡技术状况的各主要因素及影响程度,并以实际工程为例进行边坡风险程度预测分析。得到以下主要结论:

(1) 基于不安定指数分析理论,建立适用于分析公路边坡破坏潜势风险等级的计算方法,并通过实际工程验证了该方法的可行性。

(2) 影响因素分析结果表明:公路边坡破坏的关键因素主要是边坡本体技术状况,边坡防护结构技术状况和坡面地形地貌所占权重相对不高。

(3) 采用数学统计方法进行边坡破坏潜势风险的评定分级具有一定合理性,建立的边坡破坏潜势风险区域计算误判率能够有效降低。

该文评定模型采用的边坡破坏与非破坏这一划分方式相对较粗,对风险评定结果有一定影响,与实际边坡检测与养护需求还存在差距,今后应对该文方法做进一步优化,以满足实际应用需要。

参考文献:

[1] 胡厚田,邢爱国,黄少强.山区高等级公路边坡病害的类型分析[J].公路,2000,45(2):64-69.

[2] 徐明明.山区公路边坡处治方案优化决策方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.

[3] RAMANATHAN R, AYDILEK A H, TANYU B F. Development of a GIS-Based Failure Investigation System for Highway Soil Slopes[J]. Frontiers of Earth Science, 2015,9(2):165-178.

[4] 刘祥兴,李红中.广东山区高速公路挖方边坡常见病害及防治策略[J].广东公路交通,2017(1):53-57.

[5] 林灿阳,廖小平.高速公路边坡工程工后稳定性评估[J].路基工程,2014(6):46-50.

[6] 周建昆.云南省山区高速公路工程风险评价与管理研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2009.

[7] 张建伟,廖小平,魏土荣.高速公路运营期高边坡安全风险评估体系研究[J].路基工程,2015(6):197-203.

[8] 吴忠广,申瑞君,万福茂.岩质高边坡运营安全风险评价指标体系研究[J].中国安全生产科学技术,2017,33(5):108-115.

[9] JAMALUDIN M A, BUJANG R, HAIDZIR Y, et al. Physical and Mechanical Properties of Fibreboards from Oil Palm Fibres and Polyethylene[J]. Science Letters, 2005,2(1):43-54.