

高速公路改扩建边坡 安全风险评估及强降雨稳定性研究

张京城, 吴波, 刘聪

(东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为探讨高速公路改扩建边坡安全风险, 量化降雨入渗对不同状态下改扩建高边坡工程影响, 依托吉康高速改扩建项目某7级边坡工程, 建立一种基于层次分析法-反熵权法的高速公路边坡风险评估体系, 运用模糊综合评价得出原边坡为基本稳定状态, 二次开挖后降低为不稳定状态, 采取框格锚杆加固后该边坡稳定性提升至基本稳定状态。不同阶段改扩建边坡稳定性及其表面水平位移阈值均随降雨强度、降雨时长的提升而降低, 二次开挖扰动后处于未支护状态下边坡失稳风险最高, 原边坡、改扩建未加固、改扩建加固后安全系数分别为1.093、0.637、1.313, 比降雨前分别降低6.74%、27.34%、17.31%。

关键词: 高速公路; 边坡; 风险评估; 边坡稳定性分析

中图分类号: U416.14

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)06-0511-09

Safety-risk assessment and heavy rainfall stability of reconstructed and expanded highway slopes

ZHANG Jingcheng, WU Bo, LIU Cong

(School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: This research aims to explore the safety risks associated with the expansion and reconstruction of highway slopes, and to quantify the impact of rainfall infiltration on different states of expanded high slope projects. A risk assessment system for highway slopes was established based on the AHP-AEW method. This system was applied to a Grade-7 slope project in Jikang Highway expansion. The fuzzy comprehensive evaluation shows the original slope was basically stable, which was downgraded to an unstable state after secondary excavation, but returned to an basically stable state with the reinforcement of frame anchors. The stability of the slope and its threshold horizontal displacements at different stages of reconstruction decreased with increasing rainfall intensity and duration. After the disturbance from secondary excavation, the slope in its unsupported state exhibited the highest risk of instability. The safety factors for the original slope, the unreinforced expanded slope, and the reinforced expanded slope were 1.093, 0.637, and 1.313, respectively, showing decreases of 6.74%, 27.34%, and 17.31% compared to pre-rainfall conditions.

Keywords: highway; slope; risk assessment; slope stability analysis

随着我国路网总里程和路网密度大幅度的提高, 部分高速公路的目标车流量巨大, 交通潮汐现象严重, 拥堵情况十分突出, 因此增加车道

数、扩大通行能力刻不容缓。在对既有高速公路改扩建的同时, 不可避免的面临边坡二次开挖的风险问题, 高边坡施工涉及大量既有支挡结构拆

收稿日期: 2024-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52168055); 江西省自然科学基金项目(20224BAB204058)

第一作者简介: 张京城(1999—), 男, 安徽庐江人, 硕士研究生, 研究方向: 边坡工程。

通信作者: 吴波(1971—), 男, 四川阆中人, 教授, 博士, 研究方向: 隧道与地下工程技术。

除,极易改变原有边坡支护方式进而引发支护体系失效。

目前安全风险评估方法主要分为定量、定性、定量与定性相结合 3 类^[1]。王道隆等^[2]结合层次分析法和可拓集理论提出了一种边坡稳定性评估模型,对广连高速某路堑高边坡进行评估,结果与现场勘测报告一致。王建伟等^[3]基于模糊综合评价牡丹江市某高速公路上一处边坡的稳定性,结果表明该边坡属于较不稳定边坡。李志国等^[4]将多源信息融合的层次分析-模糊综合评价模型应用于扎哈卓尔露天煤矿北帮边坡,并基于数值模拟对模型进行验证。施威等^[5]采用极限平衡和有限元法对下蜀土滑坡进行稳定性分析并提出了相应治理措施。汤鹏举等^[6]利用 geostudio 有限元软件,分析了不同降雨强度和时长情况下超高黄土边坡的稳定性。为降低或规避改扩建工程边坡破坏导致的施工及运营安全风险,本文结合我国高速公路建设安全风险评估现状,以吉康高速改扩建边坡为工程依托,对高速公路改扩建边坡工程开展安全风险评估,并量化降雨对边坡的影响,以期减轻或避免强降雨期间高速公路边坡工程的安全风险。

1 工程概况

江西吉安至南康高速公路位于大广高速江西省境内中段,高速改扩建项目为原有双向四车道改建为双向八车道,遂川至横市段内地势陡峭,挖方路段五至七级高边坡工程众多。本文以吉康高速改扩建项目某 7 级边坡为例进行研究,该边坡长 258 m,坡高约 46.6 m,坡度约为 33°~45°。区域内路线沿低丘高岗地展布,地形呈长隆状,起伏较大,植被较茂密,山顶和陡坡局部见块状变余长石石英砂岩出露,地表植被发育,水系不发育。场区表层主要分布为红黏土;下伏基岩为变余长石石英砂岩夹薄层状硅质岩风化层,边坡岩体主要以强风化为主,产状多变,裂隙发育,工程地质条件较复杂,如图 1 所示。

2 边坡安全风险评估

2.1 边坡安全风险评估模型构建

参照《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2013)^[7](以下简称《规范》)将边坡风险等级分为 4 类:稳定、基本稳定、欠稳定、不稳定,以集合形

式表现,各风险等级分类如表 1 所示。

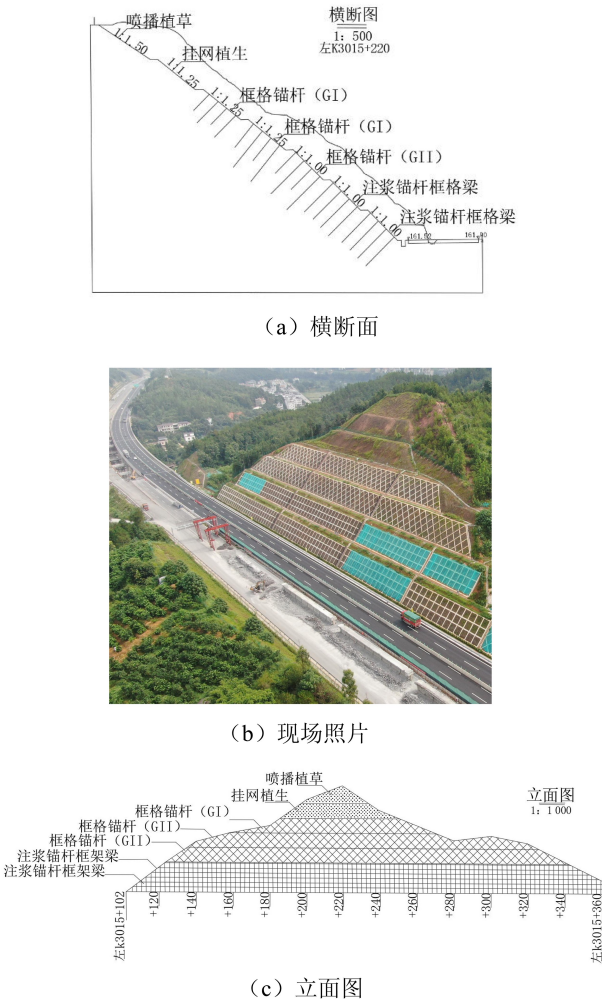


图 1 边坡现场及设计图
Fig.1 Slope site and design drawings

表 1 边坡风险等级分类标准			
Tab.1 Criteria for classification of slope risk classes			
序号	风险等级	防控对策	
1	稳定	保持正常养护	
2	基本稳定	保持正常养护,并对边坡结构损坏处进行小幅加固	
3	欠稳定	重点巡查,并进行详细勘察和稳定性研究,采取一定的加固措施	
4	不稳定	随时可能发生大规模破坏,应及时对其进行加固支护或采取削坡等工程治理措施	

模糊综合评价是在考虑多种因素的影响下,利用模糊变换原理和隶属度最大原则,将定性问

题量化分析的数学方法。其主要步骤为:(1)建立评价指标体系;(2)计算指标隶属度矩阵;(3)计算指标权重;(4)评价边坡稳定性。

根据现场调查与综合研究,建立评估体系中风险指标的集合。一级指标风险因素集: $A=\{A_1, A_2, \cdots, A_n\}$;二级指标风险因素集: $A_i=\{a_{i1}, a_{i2}, \cdots, a_{ij}\} (i, j=1, 2, \cdots, n)$ 。通过专家或经验丰富的技术人员对每个指标的风险等级打分,计算各评价因素集 a_{ij} 对风险评价等级 U_n 的隶属度值 $v_n(a_{ij})$,以矩阵 K 表示所有因素的隶属度。

$$v_n(a_{ij})=\frac{x_{ij}}{x} \tag{1}$$

式中, $v_n(a_{ij})$ 为第 n 个风险等级下风险指标 a_{ij} 属于评价集 U_n 中的隶属度; x_{ij} 为第 i 个一级指标下第 j 个二级指标打分为第 n 个风险等级的专家数; x 为专家总数。则隶属度矩阵为:

$$K=\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_i \end{bmatrix}, K_i=\begin{bmatrix} v_1(a_{i1}) & v_2(a_{i1}) & \cdots & v_n(a_{i1}) \\ v_1(a_{i2}) & v_2(a_{i2}) & \cdots & v_n(a_{i2}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_1(a_{ij}) & v_2(a_{ij}) & \cdots & v_n(a_{ij}) \end{bmatrix}$$

利用层次分析法(analytic hierarchy process AHP)构建改扩建边坡总体风险评估指标判断矩阵,计算各评估指标的主观权重,利用反熵权法(anti-entropy weight AEW)求解指标的客观权重^[8],基于离差最大化的思想进行组合赋权,得到较为合理的组合权重。

AHP 法计算主观权重基本步骤如下:

(1)构造判断矩阵

通过专家评价打分确定各二级指标间的两两重要程度,建立判断矩阵 $B=[b_{ij}]_{n \times n} (i, j=1, 2, \cdots, n)$, b_{ij} 表示指标 i 对指标 j 的重要性。

(2)计算指标权重

计算判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} 与其所对应的特征向量 v ,将 v 正向归一化后,所对应的各分量 ω_{si} 即为对应指标的权重。

(3)一致性检验

一致性比例 CR 的计算公式如下:

$$CR=CI/RI \tag{2}$$

$$CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1) \tag{3}$$

式中, n 为矩阵阶数;CI 为一致性指标;RI 为随机一致性指标,RI 值如表 2 所示。当一致性比例 $CR<0.1$ 时,则认为矩阵一致性通过,否则要重新

调整矩阵直至满足一致性检验。

表 2 随机一致性指标标准值

Tab.2 Standard values for stochastic consistency indicators

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.59	0.89	1.12	1.36	1.41	1.46

AEW 法计算指标客观权重基本步骤如下:

(1)构建评价指标矩阵

假设有 n 个评价对象和 m 个评价指标,指标数据为 $P_{ij} (i=1, 2, \cdots, n; j=1, 2, \cdots, m)$,构造矩阵:

$$P=\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nm} \end{bmatrix}$$

采用 max-min 方法对矩阵 P 进行标准化处理,计算公式为:

$$P' = |(P_{ij}-P_i^{\max})/(P_i^{\max}-P_i^{\min})| \tag{4}$$

式中, P_i^{\max} 为第 i 个评价对象的评价指标数据最大值; P_i^{\min} 为第 i 个评价对象的评价指标数据最小值。

(2)计算反熵值

计算各指标所占的比重 R_{ij} :

$$R_{ij}=P'_{ij}/\sum_{i=1}^n P'_{ij} \tag{5}$$

计算各指标反熵值 h_i :

$$h_i=-\sum_{i=1}^n R_{ij}\ln(1-R_{ij}) \tag{6}$$

(3)确定指标权重

$$\omega_{oi}=h_i/\sum_{i=1}^n h_i \tag{7}$$

基于离差最大化的思想进行组合赋权,令组合权重为:

$$\omega=\alpha\omega_s+\beta\omega_o \tag{8}$$

式中, ω_s 和 ω_o 为各风险指标的主、客观权重集; α 和 β 分别为决策者对主观权重 ω_s 和客观权重 ω_o 的线性表示系数,其满足 $\alpha>0, \beta>0, \alpha^2+\beta^2=1$ 。通过构建最优化模型求解 α, β ,求解过程参见文献[9]。

在综合考虑各因素的权重后,得到边坡风险等级的最终评价集:

$F=\omega\times K$

(9)

级指标权重如表 3 所示。

2.2 风险评估结果

依据《高速公路路堑高边坡工程施工安全风险
评估指南(试行)》^[10](以下简称《指南》),确定
高速公路改扩建边坡安全风险评估体系一级指标
为边坡特征 A_1 、加固措施 A_2 、以及其他因素 A_3 。
在此基础上确定 8 个二级指标,分别为边坡坡高
 a_{11} 、边坡坡脚 a_{12} 、地层岩性 a_{13} 、支挡结构 a_{21} 、排
水设施 a_{22} 、气候因素 a_{31} 、植被密度 a_{32} 和人类活
动 a_{33} 。

以风险发生的可能性为标准,现场有经验的
技术人员对改扩建边坡各级风险指标进行评价
(共收集问卷 12 份),根据所收集的结果,按照 2.1
所述,计算得出隶属度矩阵为

$K=$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0.25 & 0.58 & 0.17 \\ 0.17 & 0.50 & 0.25 & 0.08 \\ 0.33 & 0.33 & 0.08 & 0.25 \\ 0.50 & 0.50 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0.67 \\ 0.42 & 0.42 & 0.17 & 0 \\ 0.17 & 0.83 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

计算各指标层主观权重,征求专家意见,得到
指标层判断矩阵如下

$B=$

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/3 & 1/4 & 1/5 & 4 & 3 \\ 2 & 1 & 1/3 & 1/3 & 1/4 & 1/5 & 5 & 3 \\ 3 & 3 & 1 & 1/4 & 1/5 & 1/3 & 4 & 2 \\ 3 & 3 & 4 & 1 & 1/2 & 1/3 & 5 & 5 \\ 4 & 4 & 5 & 2 & 1 & 1 & 6 & 5 \\ 5 & 5 & 3 & 3 & 1 & 1 & 7 & 4 \\ 1/4 & 1/5 & 1/4 & 1/5 & 1/6 & 1/7 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/2 & 1/5 & 1/5 & 1/4 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

最大特征值 $\lambda_{\max}=8.734\ 7$,一致性检验结果
 $CR=0.074\ 4<0.1$,则计算得到一级指标权重与二

表 3 AHP 法各指标权重

Tab.3 Weights of indicators in the AHP method			
一级指标	权重	二级指标	权重
边坡特征 A_1	0.233 3	边坡坡高 a_{11}	0.060 2
		边坡坡角 a_{12}	0.074 1
		地层岩性 a_{13}	0.099 0
加固措施 A_2	0.432 3	支挡结构 a_{21}	0.173 8
		排水设施 a_{22}	0.258 5
		降雨强度 a_{31}	0.269 1
其他因素 A_3	0.334 3	植被密度 a_{32}	0.023 9
		人类活动 a_{33}	0.041 3

根据《指南》及相关专家经验,对上述风险指
标量化打分,分值越小表示其风险越高,并对其标
准化处理,结果如表 4 所示。

利用反熵权法计算一级指标客观权重 $\omega_o=[0.269\ 8,0.359\ 6,0.370\ 6]^T$,二级指标客观权重
 $\omega_o'=[0.087\ 6,0.086\ 2,0.096\ 0,0.158\ 0,0.201\ 6,0.184\ 9,0.090\ 0,0.095\ 7]^T$ 。

基于离差最大化思想对各指标综合赋权,计
算 α 和 β 分别为 0.726 5 和 0.687 2,组合权重并
对其归一化处理,则一级指标权重 $\omega_1=[0.251\ 0,0.397\ 0,0.351\ 9]^T$,二级指标权重 $\omega_2=[0.073\ 5,0.080\ 0,0.097\ 5,0.166\ 1,0.230\ 9,0.228\ 2,0.056\ 0,0.067\ 7]^T$ 。

计算模糊综合评价集 $F=\omega_2\times V=[0.221\ 2,0.464\ 9,0.156\ 4,0.157\ 4]$ 。基于隶属度最大原
则, $\max[F]=0.464\ 9$,则该改扩建加固后边坡的
最终评估结果为基本稳定。

同理,可计算出原边坡及改扩建未加固边坡
风险评估结果如表 5 所示。

表 4 风险指标量化集标准化结果

Tab.4 Standardization results of risk index quantification set

风险指标	专家 A	专家 B	专家 C	专家 D	专家 E	风险指标分值标准化				
						A	B	C	D	E
a_{11}	33	67	35	48	27	0.85	0.00	0.80	0.48	1.00
a_{12}	48	45	62	95	65	0.94	1.00	0.66	0.00	0.60
a_{13}	74	90	68	58	47	0.37	0.00	0.51	0.74	1.00

						续表				
风险指标	专家 A	专家 B	专家 C	专家 D	专家 E	风险指标分值标准化				
						A	B	C	D	E
a_{21}	81	58	72	90	90	0.28	1.00	0.56	0.00	0.00
a_{22}	92	79	66	91	90	0.00	0.50	1.00	0.04	0.08
a_{31}	73	57	67	58	13	0.00	0.27	0.10	0.25	1.00
a_{32}	66	53	62	65	80	0.52	1.00	0.67	0.56	0.00
a_{33}	71	60	42	55	53	0.00	0.38	1.00	0.55	0.62

表 5 风险指标权重汇总			
Tab.5 Summary of risk index weights			
风险指标	原边坡	改扩建 未加固边坡	改扩建 加固边坡
a_{11}	0.082 0	0.080 8	0.073 5
a_{12}	0.088 4	0.087 2	0.080 0
a_{13}	0.106 9	0.105 5	0.097 5
a_{21}	0.140 9	0.138 1	0.166 1
a_{22}	0.193 8	0.205 9	0.230 9
a_{31}	0.246 3	0.243 6	0.228 2
a_{32}	0.064 7	0.063 4	0.056 0
a_{33}	0.077 0	0.075 7	0.067 7
评估结果	基本稳定	不稳定	基本稳定

3 边坡稳定性分析

3.1 模型建立

对改扩建前后边坡建模(如图 2),原边坡坡高 46.6 m,坡顶距边界 15 m,坡脚距边界 10 m。改扩建边坡高 46.6 m,经分级切削后坡脚距边界 17 m,坡顶距边界 5 m,第一至五级采用框格锚杆支护,同时对一二级注浆加固。

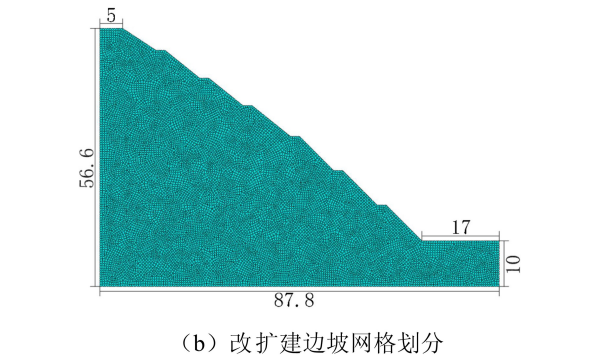
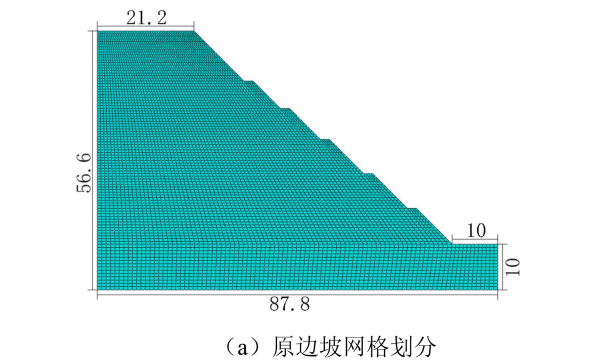


图 2 边坡计算模型(单位:m)
Fig.2 Slope calculation model(unit:m)

边坡网格采用 CPE4P,模型底部边界约束其水平、竖直方向位移,侧边界约束水平位移,坡脚路基处孔隙压力设置为 0,以表面孔隙流模拟降雨,降雨幅值曲线见图 3。锚杆网格单元选择 T2D2,与坡体相互作用关系为内置锚杆。土体为摩尔库伦本构模型,弹性模量 42.59 MPa,黏聚力 73.69 kPa,内摩擦角 18.37°,泊松比 0.3,渗透系数 0.54 mm/h^[11-12]。

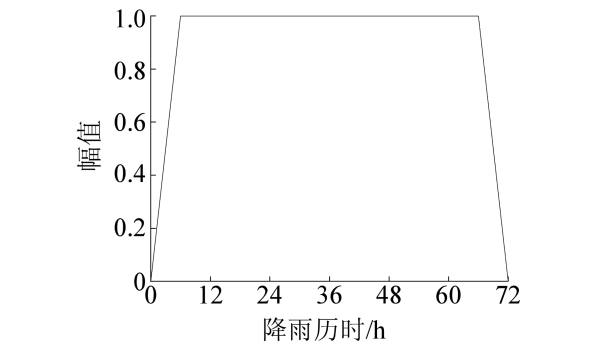


图 3 降雨幅值曲线
Fig.3 Rainfall amplitude curve

采用 VG(van genuchten VG)模型对红黏土体积含水率与基质吸力的关系进行拟合,定义红黏土土-水特征曲线。VG 模型方程如下:

$$\Theta=\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{\left[1+\left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right]^m} \tag{10}$$

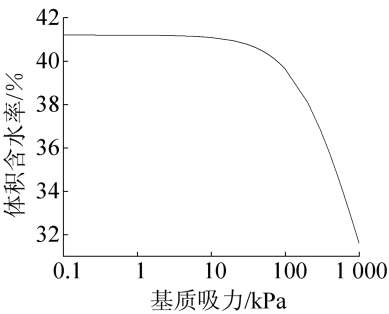
式中, Θ 为体积含水率; ψ 为基质吸力, kPa; θ_s 、 θ_r 分别为饱和含水率与残余含水率, 分别取 0.412、0.007; α 、 n 、 m 为拟合参数, 取 292.973、1.193、0.162^[13]。

此外, 在 VG 模型基础上, 考虑拟合参数得到基质吸力与渗透系数的关系式如下:

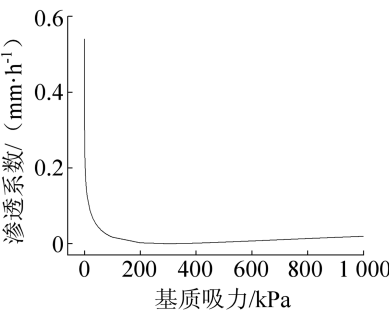
$$k_w=\frac{\left\{1-\left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^{n-1}\left[1+\left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right]^{-m}\right\}^2}{\left[1+\left(\frac{\psi}{\alpha}\right)^n\right]^{\frac{m}{2}}} \tag{11}$$

式中, k_w 为基质吸力 ψ 时渗透系数与饱和渗透系数的比值。

红黏土土-水特征曲线及渗透系数随基质吸力变化如图 4 所示。



(a) 土-水特征曲线



(b) 非饱和土渗透系数

图 4 红黏土土-水特征曲线

Fig.4 Red clay soil-water characteristic curve

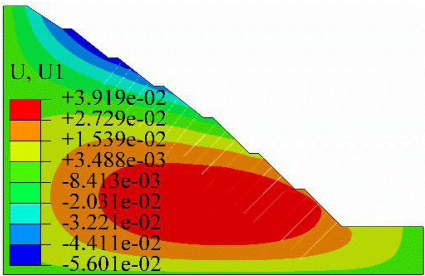
在保持 72 h 降雨时长不变的情况下, 设置 0、96、192、288 mm/d 4 种不同降雨强度工况。使用强度折减法, 分析不同降雨强度下 72 h 降雨后边坡的稳定性。引入抗剪强度折减系数, 通过不断增大折减系数, 在极限状态下的抗剪强度折减系数即为边坡总体安全系数 F_s , 折减后的抗剪强度参数可分别表达为:

$$C_m=C/F_r \tag{12}$$

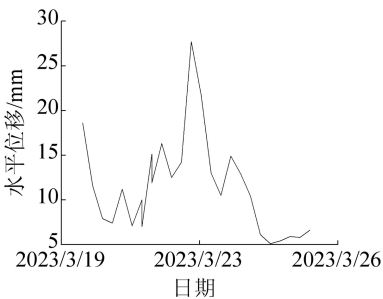
$$\varphi_m=\arctan(\tan\varphi/F_r) \tag{13}$$

式中, C 、 C_m 分别为初始黏聚力和折减后黏聚力, kPa; φ 、 φ_m 分别为初始内摩擦角和折减后内摩擦角, °; F_r 为折减系数。

改扩建加固后, 边坡在折减系数 1.0 时的水平位移, 如图 5(a) 所示。结果显示, 坡面最大水平位移为 27.29 mm, 主要集中在二三级台阶处。GNSS(global navigation satellite system GNSS) 表面位移监测测点, 布置在二级台阶和五级台阶坡顶处。分析二级台阶处监测数据, 结果显示二级台阶处最大水平位移为 27.70 mm, 部分监测数据如图 5(b) 所示。数值模拟结果相较于实际监测结果最大值小 0.41 mm, 模型结果与实际较吻合。



(a) 折减系数1.0时水平位移(单位: m)



(b) 部分监测曲线

图 5 模型验证

Fig.5 Model validation

3.2 边坡稳定性分析

未降雨时, 折减系数达到 1.172, 模型开始出现不收敛现象, 此时原边坡水平位移云图如图 6(a) 所示, 边坡表面水平位移阈值为 68.89 mm。降雨为 288 mm/d 时, 水平位移如图 6(b) 所示。降雨为 96、144、288 mm/d 时, 原边坡安全系数分别为 1.149、1.104、1.093, 分别比未降雨状态下降低 1.96%、5.80%、6.74%, 原边坡表面水平位移阈值分别为 55.81、36.95、32.55 mm, 分别比未降雨时下降了 18.98%、46.36%、52.75%, 表明降雨条件下边坡更易产生失稳风险。

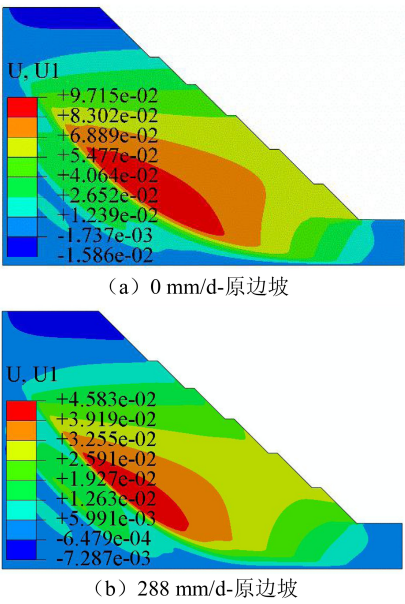


图 6 折减下原边坡水平位移失稳阈值 (单位:m)
Fig.6 Horizontal displacement instability threshold of original slope under discounting (unit: m)

以一级台阶坡顶处为特征点,提取原边坡特征点位移随折减系数变化曲线如图 7(a)所示,折减系数为 1.0 时,原边坡特征点位移随降雨时长变化曲线如图 7(b)所示。

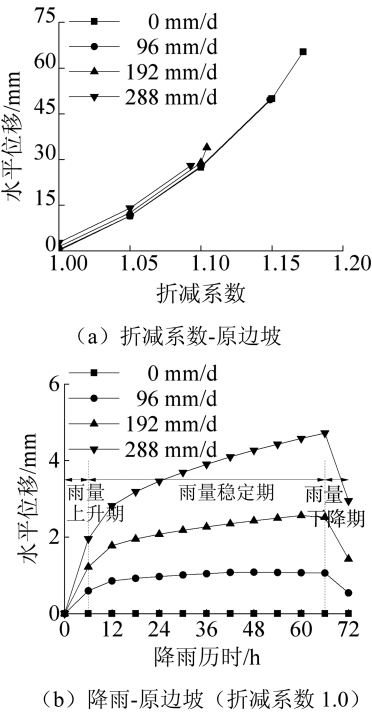


图 7 原边坡特征点水平位移
Fig.7 Horizontal displacement of original slope feature points

随着降雨历时的增长,边坡水平位移呈现先增大后减少的趋势,在 66 h 左右达到最大,与设定的降雨幅值呈现一定的相关性。在 96、192、288 mm/d 的持续降雨 72 h 后,原边坡产生的最大位移分别是 1.08、2.57、4.72 mm。

二次开挖后,未加固时边坡位移云图如图 8 所示,在 0、96、192、288 mm/d 4 种降雨强度下,降雨 72 h 后边坡安全系数分别为 0.877、0.827、0.712、0.637,降雨后比未降雨时安全系数分别下降了 5.69%、18.67%、27.34%,表面水平位移阈值分别为 39.76、39.51、39.67、38.81 mm。

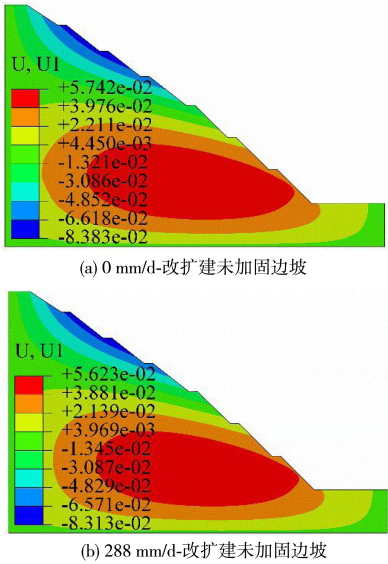


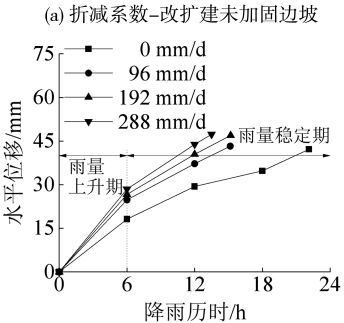
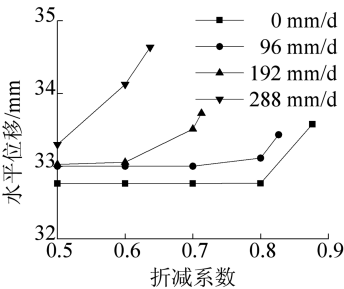
图 8 折减下改扩建未加固边坡水平位移失稳阈值 (单位:m)
Fig.8 Horizontal displacement instability thresholds for reconstructed and expanded unreinforced slopes under discounting (unit: m)

改扩建未加固边坡特征点位移随折减系数及降雨强度变化如图 9 所示。

由图 9 可知,边坡在降雨历时 16 h 左右时,位移达到最大,此时 4 种降雨强度下,水平位移均大于 40 mm,达到了水平位移阈值,说明天然状态下、在未采取任何加固措施时,边坡二次开挖后已经失稳。

边坡二次开挖后,按既定方案对边坡加固,边坡水平位移云图如图 10 所示。在 0、96、192、288 mm/d 4 种降雨强度下,降雨 72 h 后边坡安全系数分别为 1.588、1.495、1.414、1.313,降雨后比未降雨时安全系数分别下降了 5.85%、10.96%、17.31%,表面水平位移阈值分别为 68.19、52.38、

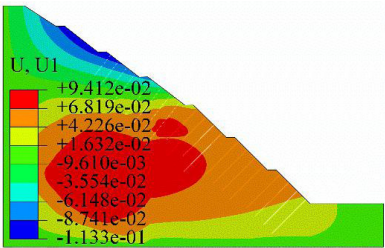
46.04、42.57 mm,降雨后比未降雨时分别下降了 23.18%、32.48%、37.57%,与原边坡相比,在 192、288 mm/d 的特大暴雨强度下,水平位移阈值分别提升了 24.60%、30.78%。



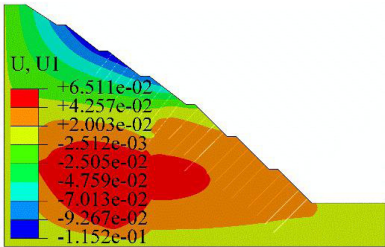
(b) 降雨-改扩建未加固边坡(折减系数1.0)

图 9 改扩建未加固边坡特征点水平位移

Fig.9 Horizontal displacements at feature points of reconstructed and expanded unreinforced slopes



(a) 0 mm/d-改扩建加固边坡

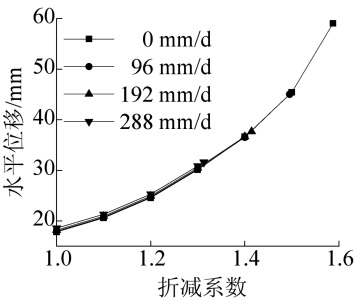


(b) 288 mm/d-改扩建加固边坡

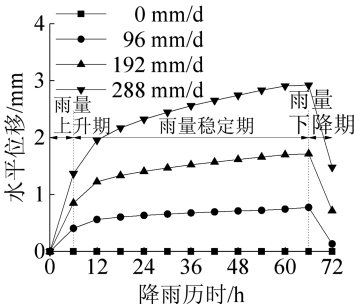
图 10 折减下改扩建加固边坡水平位移失稳阈值
(单位:m)

Fig.10 Horizontal displacement instability thresholds of reconstructed and reinforced slopes under discounting
(unit:m)

改扩建加固边坡特征点位移随折减系数及降雨强度变化如图 11 所示。



(a) 折减系数-改扩建加固边坡



(b) 降雨-改扩建加固边坡(折减系数1.0)

图 11 改扩建加固边坡特征点水平位移

Fig.11 Horizontal displacement at feature points of reconstructed and extended reinforced slopes

相较于原边坡,在 96、192、288 mm/d 历时 72 h 降雨后,改扩建加固边坡水平位移均小于原边坡,最大位移分别为 0.77、1.72、2.92 mm,说明天然状态下,改扩建加固后边坡抵抗降雨能力更强。

根据《规范》中风险等级分级标准,边坡稳定性分析结果如表 6 所示,与风险评估结果基本吻合。

表 6 边坡稳定性分析结果

Tab.6 Results of slope stability analysis

边坡类型	降雨系数/(mm·d ⁻¹)	安全系数	风险等级
原边坡	0	1.172	基本稳定
	96	1.149	基本稳定
	192	1.104	基本稳定
	288	1.093	基本稳定
改扩建未加固边坡	0	0.877	不稳定
	96	0.827	不稳定
	192	0.712	不稳定
	288	0.637	不稳定

续表			
边坡类型	降雨系数/(mm·d ⁻¹)	安全系数	风险等级
改扩建 加固边坡	0	1.588	稳定
	96	1.495	稳定
	192	1.414	稳定
	288	1.313	基本稳定

4 结论

1)采用层次分析法和反熵权法计算风险指标的主、客观权重,基于离差最大化的思想对权重进行修正,计算结果显示,原边坡风险等级为基本稳定,改扩建未加固边坡风险等级为不稳定,改扩建

建加固边坡风险等级为基本稳定。
2)不同阶段改扩建边坡稳定性及其表面水平位移阈值均随降雨强度的提升而降低,为 96、144、288 mm/d 时,改扩建未加固边坡安全系数比未降雨时分别下降了 5.69%、18.67%、27.34%,且二次开挖扰动后处于未支护状态下,边坡失稳风险最高。
3)持续降雨增大了边坡位移,以 288 mm/d 持续降雨 72 h 后,改扩建开挖前以及改扩建加固后,边坡最大表面水平位移比未降雨时增大了 4.72和 2.92 mm。原边坡、改扩建未加固、改扩建加固后,安全系数分别为 1.093、0.637、1.313,比降雨前分别降低 6.74%、27.34%、17.31%,数值模拟结果与风险评估结果较吻合。

参考文献:

[1] DEGN ESKESEN S,TENGBORG P,KAMPMANN J,et al. Guidelines for tunnelling risk management:international Tunneling Association,Working Group No. 2[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2004,19(3):217-237.

[2] 王道隆,向敬,黄亚娥,等. 基于层次可拓集的公路边坡稳定性评估[J]. 交通科学与工程,2022,38(2):13-19.

[3] 王建伟,佟智强,宋林旭,等. 基于模糊综合评价的牡丹江市某高速公路边坡稳定性分析[J]. 世界地质,2023,42(2):318-326.

[4] 李志国,徐涛,刘永杰,等. 露天矿边坡稳定性的层次分析-模糊综合评价耦合分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2024,35(1):116-123.

[5] 施威,刘刚,邵景晨,等. 南京市某下蜀土边坡稳定性分析及加固措施[J]. 西华大学学报(自然科学版),2023,42(6):104-112.

[6] 汤鹏举,阙宏宇,王诗元,等. 降雨工况下超高黄土边坡稳定性分析[J]. 路基工程,2023(6):59-65.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范:GB 50330—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

[8] 吴昱芳. 公路隧道工程施工安全风险评估方法及应用研究[D]. 南宁:广西大学,2021.

[9] 李京峰,项华春,严雅榕,等. 基于离差最大化的组合赋权评价方法及其应用[J]. 火力与指挥控制,2020,45(6):18-23,29.

[10] 中华人民共和国交通运输部. 高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南(试行):交安监发[2014]266号[S]. 北京:人民交通出版社,2015.

[11] 周磊. 微生物改良红黏土的试验研究与边坡稳定性分析[D]. 长沙:中南林业科技大学,2023.

[12] 毛佩强. 红黏土工程性能试验和数值模拟[D]. 南京:南京理工大学,2018.

[13] 余慧聪. 非饱和裂隙红黏土渗流及强度特性研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2022.

(责任编辑:陈雯)