

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.273



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



导流堤遭受泥石流灾害的易损性评价

谷丰宇, 徐林荣, 李永威

(中南大学土木工程学院, 长沙 410075)

摘要:开展导流堤易损性研究,为泥石流地区防治工程等级的划定和导流堤防灾减灾能力的判定提供了一种有效的方法。以雅泸路雀儿沟导流堤遭受的泥石流灾害为工程背景,参照有关易损性的研究成果,提出导流堤易损性的概念。结合泥石流致灾特征和导流堤承灾时的特点,建立泥石流危害作用下导流堤的工程易损性评价方法,并利用所提出的组合层次法处理指标权重问题。采用该评价方法对雀儿沟导流堤进行易损性评价,结果为高度易损性,说明该导流堤工程的整体运行情况较差,防护能力较低,需要及时对其采取相应的应急处理措施,以保证其能够正常服役。评价结果与现场实地调查情况和定量计算结果一致,验证了方法的可行性。

关键词:泥石流;导流堤;工程易损性;防灾减灾;模糊综合评价

中图分类号:X43

文献标志码:A

文章编号:2096-6717(2023)01-0145-10

Evaluation of vulnerability of diversion dike suffering from debris flow disasters

GU Fengyu, XU Linrong, LI Yongwei

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China)

Abstract: The vulnerability assessment of diversion dike was studied in order to provide an effective method for the determination of the rank of prevention and control engineering and the assessment of disaster prevention and mitigation capability of diversion. By taking Queer Gully diversion dike of Yalu Road suffered debris flow disaster as engineering background, referring to previous research results on vulnerability, the concept of vulnerability of diversion dike has been proposed in this paper. According to the characteristics of debris flow to cause disaster and the characteristics of the diversion dike bearing the disaster, the engineering vulnerability evaluation method of diversion dike suffering from debris flow is established, and the combination hierarchy method is used to solve the problem of index weight. The established evaluation method is applied to assess the diversion dike of Queer Gully and the result is highly vulnerable, which shows that the overall operation of the project in the study area is poor and the protection ability is weak. It is necessary to take measures in time to

收稿日期:2021-10-22

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1505403)

作者简介:谷丰宇(1997-),男,主要从事泥石流灾害与防治工程研究,E-mail:1037865949@qq.com。

徐林荣(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,E-mail:lrxu@csu.edu.cn。

Received:2021-10-22

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC1505403)

Author brief: GU Fengyu (1997-), main research interests: debris flow disaster and prevention engineering, E-mail: 1037865949@qq.com.

XU Linrong (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: lrxu@csu.edu.cn.

ensure its normal service. The evaluation results are consistent with the field investigation and quantitative calculation results, which verifies the feasibility of the method.

Keywords: debris flow; diversion dike; engineering vulnerability; disaster prevention and mitigation; fuzzy comprehensive assessment

中国有约65%的国土位于山区,且山区居住人口占全国总人口的1/3,山区的经济发展在全国经济发展中的地位越来越高。近年来,由于人类活动愈加频繁,山区的自然环境遭到了不同程度的破坏,导致泥石流等地质灾害的发生更加频繁,尤其是在地震发生的区域,泥石流强度将显著高于震前水平^[1],例如“汶川5.12”和“九寨沟8.8”地震,导致大量崩塌、滑坡等不良地质灾害的发生,使得泥石流物源储量急剧增加,且受山区地势陡峭的影响,引发的泥石流具有流速快、流量大和破坏力强等特点^[2],表现出的动力特性已超出人们的认知^[3],严重威胁到山区人民的生命财产安全和当地经济的可持续发展^[4]。因此,加强泥石流防治措施的研究不仅可以减少因泥石流地质灾害所造成的损失,而且对于提高防治工程的防灾减灾能力也十分重要。

在现场调查中发现,震前按规范设计的泥石流防治工程在震后均遭到了不同程度的损坏,导致防治工程的易损性发生变化,甚至工程完全失效。然而,目前针对泥石流作用下防治工程的研究多集中在工程的损毁程度上^[5-7],具有很大的局限性,且工程损毁程度并不等同于易损性,还需要考虑防治工程本身防灾减灾能力的损失程度和不良环境因素等对工程所带来的影响,才能够更好地为实际工程服务。再者,由于震后泥石流规模、频率和持续时间远大于震前水平^[8-9],因地震而引发的泥石流长期后效应^[10]和因物源增多而导致的泥石流规模放大效应以及防治工程在服役期间所带来的损耗等一系列问题无法通过定量计算来精确判断,计算结果仅供参考。因此,十分有必要开展对防治工程的易损性评价研究,依据评价结果来进行反馈分析,为泥石流地区的防灾减灾工作提供理论依据与指导,更好地为实际工程服务。

目前,对泥石流作用下工程易损性评价的研究却较为薄弱。徐林荣等^[11]提出了工程易损性的概念,对工程易损性进行了定义,并对隧道工程进行了评价,成功地将易损性评价由宏观层面评判提升至可为实际工程服务;为克服单一结构评判的不足,徐林荣等^[12]在原有的评判基础上增加了使用功

能的影响因素,对桥隧工程进行了易损性评价,使评价结果更加合理;徐士彬等^[13]对泥石流灾害作用下的路基易损性进行了研究,建立了路基易损性评价模型;丁明涛等^[14]则以七盘沟为例,对泥石流灾害作用下建筑物的易损性进行了评价。而对于为保护桥梁、隧道、道路、建筑物等基础设施、在泥石流防灾减灾工作中具有极其重要作用的防治工程而言,却很少有学者对其工程易损性展开研究并建立相应的易损性评价模型,所以十分有必要开展相应研究,这对提高防治工程防灾减灾能力,改善其耐久性,减少因泥石流所造成的损失等具有重要意义。

在诸多泥石流防治工程类型中,导流堤因其能够很好地顺应不同的复杂地形条件,调节泥石流的流向、流速及流势,限制泥石流的影响范围等特点,被广泛应用于泥石流防灾减灾工作中。开展导流堤的相关研究,对于提高工程的排泄能力、保护附近居民生命财产安全、保证该地区基础设施工程免受泥石流的威胁、改善当地生态环境条件、减少泥石流灾害的发生等具有重要价值。笔者以遭受泥石流地质灾害的雅泸路雀儿沟导流堤为工程背景,基于文献[11]中对工程易损性的定义,将泥石流危害作用下的导流堤易损性定义为:“在给定区域中由于泥石流地质灾害致使导流堤可能受到的损失程度”。结合泥石流致灾特征和导流堤承灾特点,将孕灾环境因素和工程自身属性分别视为致灾体、承灾体。在处理指标权重问题上,传统的层次分析法一致性检验保证了判断矩阵的合理性与正确性,但其计算过程复杂,受专家主观性的影响较强;权的最小平方方法概念清晰、计算步骤简单,可使权重结果更具客观性^[15],但缺乏一致性检验,无法验证所赋权重结果的合理性。因此,笔者提出采用传统的层次分析法和权的最小平方方法进行组合赋权的组合层次法来处理指标权重问题,采用以连续性函数构建的隶属度函数确定指标隶属度,运用模糊综合评价法对导流堤进行易损性评价,从而建立不仅考虑承灾体因素(内因),且考虑致灾体因素(外因)的导流堤易损性评价方法。

1 建立导流堤易损性评价指标体系

1.1 评判指标的选取及取值范围

易损性主要用于表达在产生的特定危害事件中被危害对象面对施加危害的相关作用(来自环境中的物体或外力等诸多因素)时表现出的天然缺陷,并以此表征该对象在危害到来前的抵御能力及受到危害时的损失程度。因此,在不同危险性泥石流作用下和不同孕灾环境条件下,导流堤均会呈现出不同的易损性。为更多地考虑外在不良环境因素对工程造成的影响,参照工程易损性的相关文献^[11-13],将一级评价指标重新分设为致灾体因素评判指标 A_1 和承灾体因素评判指标 A_2 两类,将不良孕灾环境因子归入致灾体因素中,并在承灾体因素中考虑导流堤现存的工程性能,使评价因子选取更科学,可以根据实际情况对导流堤的易损性进行合理预判。

在现场调查情况基础上,综合考虑泥石流发生的基本条件、发育特征、不良环境因素及导流堤自

身的工程属性等,在致灾体因素一级指标中,参考相关文献^[11-13,16],选取泥石流发生的基本条件(物源、地形地貌和水利条件)、发生时的主要危险因子、发生规模、发生频率等作为其二级评价指标,并依据不同参考文献^[11-13]确定致灾体因素中各指标的取值范围(如表 1 所示)。同时,考虑到泥石流爆发时不同的致灾模式也会对导流堤易损性产生较大的影响,也将其作为二级指标,并按照影响程度对其指标范围进行定性划定。在承灾体因素一级指标中,参考相关文献^[12-13],将导流堤工程自设计、施工到维修的整个过程综合考虑,并作为其二级评价指标,确定指标取值范围(如表 1 所示)。考虑到导流堤现存的工程性能(结构受损程度和现存防治效果)会对工程易损性产生不可忽视的影响,将其视为二级评价指标,并按照受损程度对其指标范围进行定性划定,从而建立起导流堤层次结构评价指标体系(如图 1 所示),可以依据实际工程状况对导流堤进行预判性评价,使评价结果更加科学。

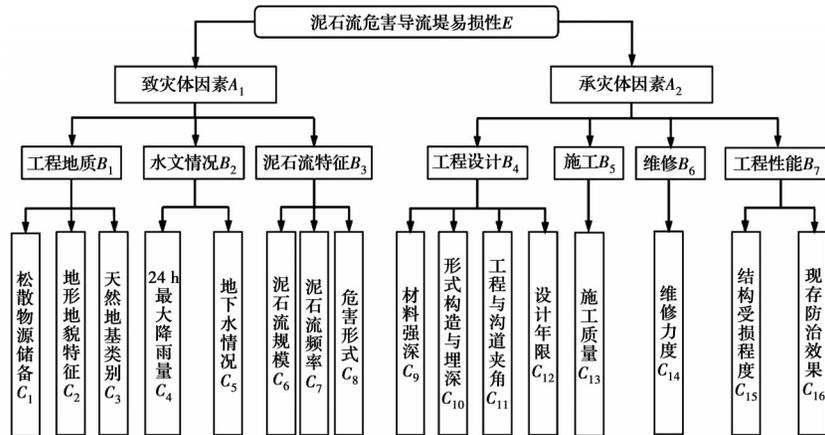


图 1 评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system

1.2 组合层次法处理指标权重

1.2.1 传统层次分析法 传统层次分析法通过采用 Saaty^[17]建议的标度判别方法,经专家判别各个因素间的重要程度,随后对构成的判断矩阵进行一致性检验,检验通过后求得对应的最大特征值及特征向量,经归一化处理后得到最终权重向量。

以 B_1 指标层为例,经专家判定,构造判断矩阵如表 2 所示,求得其最大特征值 $\lambda=3.009$,对应的特征向量为(0.540, 0.297, 0.163)。

对判断矩阵进行一致性检验,通过计算 $CR=$

CI/RI ,当 $CR<0.1$ 时,即认为矩阵满足要求,否则需要重新修改。通过计算,求得此矩阵的一致性指标 $CI=0.005$,相应的随机一致性指标 $RI=0.580$,则 $CR=CI/RI=0.009<0.1$,满足检验要求。

同理,继续重复以上计算步骤,即可得到各级指标的权重(见表 3),经过计算,各判断矩阵均满足一致性检验要求,从而可以得出最终的权重向量 W_1 。

$W_1=(0.072, 0.040, 0.022, 0.133, 0.067, 0.083, 0.083, 0.167, 0.044, 0.015, 0.015, 0.044, 0.052, 0.045, 0.059, 0.059)$

1.2.2 权的最小平方方法 权的最小平方方法是在一定的约束条件下建立目标函数,对其一致性判断矩阵求最小值,即一致性判断矩阵排序向量的最优

解。由权的最小平方方法构成的最优化问题,用向量形式可表示为^[18]

表 1 评价因子的取值范围
Table 1 The value range of evaluation factors

指标	取值范围				
	极高易损性 I	高度易损性 II	中度易损性 III	低度易损性 IV	轻微易损性 V
松散物源储备 $C_1/(10^4 \text{ m}^3)$	>200	100~200	50~100	0.5~50	<0.5
地形地貌特征 C_2	地面起伏极大, 海拔山区或高地	地面起伏较大, 较高海拔山区或高地	地面起伏程度一般, 地貌以低山或丘陵为主	地面起伏程度较小, 地形地貌以低海拔平原或盆地为主	地势平坦, 地形地貌以低海拔平原为主
天然地基类别 C_3	软土、膨胀土	黄土、红黏土	粉土、粉质黏土	碎石土、砂土	岩石地基
24 h 最大降雨量 C_4/mm	>100	50~100	25~50	10~25	<10
地下水水位情况 C_5	影响频繁且时间长 地下水水位高且年升降变化>4次	地下水水位较高且年升降变化 3~4 次	地下水水位高度一般且年升降 2~3 次	地下水水位较低且年升降变化 < 2 次	地下水水位低且全年基本无显著变化
泥石流规模 $C_6/10^4 \text{ m}^3$	>100	100~10	10~5	5~1	<1
泥石流频率 $C_7/(\text{次} \cdot \text{年}^{-1})$	>1	1~0.1	0.1~0.01	0.01~0.001	<0.001
危害形式 C_8	冲击、冲刷、磨蚀联合致灾	冲击、冲刷联合致灾	冲击	冲刷	磨蚀
结构强度 C_9/MPa	<25	25~30	30~35	35~40	>40
形式构造 C_{10}	工程结构的形式构造很难适应需要, 泥石流破坏作用下受力很不合理	形式构造较难适应需要, 泥石流破坏作用下受力较不合理	形式构造适应性一般, 泥石流破坏作用下受力合理性一般	形式构造较好地适应需要, 泥石流破坏作用下受力较为合理	形式构造很好地适应需要, 泥石流破坏作用下受力很合理
工程与沟道走向夹角 $C_{11}/(^{\circ})$	90~80	80~60	60~40	40~20	<20
设计年限 C_{12}/a	10~20	20~30	30~50	50~100	>100
施工质量 C_{13}	很差, 并且无相应监管	较差, 存在一定的质量问题	一般, 基本不存在质量问题	质量较好, 有相应监管	很好, 有严格监管并且严格按照设计施工
维修力度 C_{14}	资金严重匮乏, 监管很不到位, 几乎不做养护和维修	资金较为匮乏, 监管落后	资金较不富裕, 不定期做养护维修, 有常规监测	资金较富裕, 定期做养护, 监测较好	资金充裕, 养护维修到位, 监测手段丰富
结构受损程度 C_{15}	结构已严重损坏	结构损害较为损坏	结构有一定程度的损坏	结构有轻微损坏	结构保存完好
现存防治效果 C_{16}	很差, 基本上已无法起到防治效果	较差, 仅能小幅度上起到防治效果	一般, 能一定程度上起到防治效果	较好, 能够大幅度上起到防治效果	很好, 能够完全程度上起到防治效果

注: 为便于计算结果的定量化, 以上定性因子可转化为有序尺度的变量一年对其进行定量化。在此采用 1~5 的有序尺度对定性指标进行定量化, 即 0~1 代表极高易损性等级, 如此类推, 4~5 代表轻微易损性等级, 量值越大, 代表工程易损性等级越低。

表 2 指标判断矩阵

Table 2 Indicator judgment matrix

B_1	C_1	C_2	C_3
C_1	1	2	3
C_2	1/2	1	2
C_3	1/3	1/2	1

1) 目标函数: $\min J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (\omega_i - a_{ij}\omega_j)^2, (i, j =$

$$B = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n a_{i1}^2 + (n-2) & -(a_{12} + a_{21}) & \dots & -(a_{1n} + a_{n1}) \\ -(a_{21} + a_{12}) & \sum_{i=1}^n a_{i2}^2 + (n-2) & \dots & -(a_{2n} + a_{n2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -(a_{n1} + a_{1n}) & -(a_{n2} + a_{2n}) & \dots & \sum_{i=1}^n a_{in}^2 + (n-2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$e = (1, 1, \dots, 1)^T \quad (3)$

式中: a_{ij} 为判断矩阵的数值; ω_i 或 ω_j 为权重系数。

表 3 各级指标权重

Table 3 The weights of all levels' indices

指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重
A_1	0.67	B_4	0.36	C_2	0.30	C_7	0.25	C_{12}	0.38
A_2	0.33	B_5	0.15	C_3	0.16	C_8	0.50	C_{13}	1.00
B_1	0.20	B_6	0.14	C_4	0.67	C_9	0.37	C_{14}	1.00
B_2	0.30	B_7	0.35	C_5	0.33	C_{10}	0.12	C_{15}	0.50
B_3	0.50	C_1	0.54	C_6	0.25	C_{11}	0.13	C_{16}	0.50

仍以 B_1 的指标层为例, 依据所构造的判别矩阵 (表 2), 利用式 (2) 计算得到矩阵 B 。

$$B = \begin{bmatrix} \frac{85}{36} & -\frac{5}{2} & -\frac{10}{3} \\ -\frac{5}{2} & \frac{25}{4} & -\frac{5}{2} \\ -\frac{10}{3} & -\frac{5}{2} & 15 \end{bmatrix}$$

求解得出可逆矩阵 B^{-1} 。

$$B^{-1} = \begin{bmatrix} 50.4 & 26.4 & 15.6 \\ 26.4 & 14 & 8.2 \\ 15.6 & 8.2 & 4.9 \end{bmatrix}$$

结合式 (1)、式 (3) 计算可得出相应的排序权向量为 (0.544 9, 0.286 39, 0.169 12)。

其他指标权向量的计算重复上述步骤, 可得到最终的权重向量 W_2 。

$W_2 = (0.073, 0.038, 0.023, 0.133, 0.067, 0.083, 0.083, 0.167, 0.043, 0.014, 0.014, 0.043, 0.056, 0.046, 0.058, 0.058)$

1, 2...n)。

2) 约束条件: $S.T. \sum_{i=1}^n a_{ij}\omega_j = 1, (i, j = 1, 2 \dots n)$ 。

通过求解此辅助线性规划模型而得到最佳排序向量最优解为

$W^* = B^{-1}e/e^T B^{-1}e \quad (1)$

式中: W^* 为一致性判断矩阵排序权向量。

1.2.3 组合赋权 对传统层次分析法和权的最小平方法进行组合赋权, 通过引入距离函数来确定各自的权重系数^[19]。设组合权重为 W , W_1 和 W_2 的距离为 $d(W_1, W_2)$, 则

$W = \alpha W_1 + \beta W_2 \quad (4)$

$d(W_1, W_2) = \left[\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (W_1 - W_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$

为使不同权重之间的差异程度和分配系数间的差异一致, 则

$d(W_1, W_2) = (\alpha - \beta)^2 \quad (6)$

$\alpha + \beta = 1 \quad (7)$

联立式 (6)、式 (7), 得出

$\alpha = 0.502, \beta = 0.498$

带入式 (4) 中, 可得到最终权重向量 W 。

$W = (0.072 \ 5, 0.039 \ 0, 0.022 \ 5, 0.133 \ 0, 0.067 \ 0, 0.083 \ 0, 0.083 \ 0, 0.167 \ 0, 0.043 \ 5, 0.014 \ 5, 0.014 \ 5, 0.043 \ 5, 0.054 \ 0, 0.045 \ 5, 0.058 \ 5, 0.058 \ 5)$

2 建立评价模型

由于影响导流堤易损性的诸多评价因子之间关系较为模糊, 为较好地处理这些不确定因素, 获得可靠的评价结果, 采用模糊综合法对导流堤易损性进行评价。将易损程度确定为 5 个等级, 建立导流堤易损性评价集, 即

$V = (\text{极高易损性, 高度易损性, 中度易损性, 低度易损性, 轻微易损性}) \quad (8)$

依据各评价因子的实际情况, 按式 (9) 所示隶

属函数^[20]形式计算确定各级指标的隶属度向量。

$$u_1 = \begin{cases} 1, x \in (0, V_1) \\ \frac{V_2 - x}{V_2 - V_1}, x \in (V_1, V_2) \\ 0, x \in (V_2, +\infty) \end{cases}$$

$$u_2 = \begin{cases} 0, x \in (0, V_1) \cup (V_3, +\infty) \\ \frac{x - V_1}{V_2 - V_1}, x \in (V_1, V_2) \\ \frac{V_3 - x}{V_3 - V_2}, x \in (V_2, V_3) \end{cases}$$

$$u_3 = \begin{cases} 0, x \in (0, V_2) \cup (V_4, +\infty) \\ \frac{x - V_2}{V_3 - V_2}, x \in (V_2, V_3) \\ \frac{V_4 - x}{V_4 - V_3}, x \in (V_3, V_4) \end{cases}$$

$$u_4 = \begin{cases} 0, x \in (0, V_3) \cup (V_5, +\infty) \\ \frac{x - V_3}{V_4 - V_3}, x \in (V_3, V_4) \\ \frac{V_5 - x}{V_5 - V_4}, x \in (V_4, V_5) \end{cases}$$

$$u_5 = \begin{cases} 0, x \in (0, V_4) \\ \frac{x - V_4}{V_5 - V_4}, x \in (V_4, V_5) \\ 1, x \in (V_5, +\infty) \end{cases} \quad (9)$$

式中: x 为各因子实际取值; V_i 为其对应的基础因子分级值。

从而可得到模糊关系矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} u_{c_{11}} & u_{c_{12}} & \cdots & u_{c_{15}} \\ u_{c_{21}} & u_{c_{22}} & \cdots & u_{c_{25}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{c_{51}} & u_{c_{52}} & \cdots & u_{c_{55}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $u_{c_{ij}}$ 为各评价因子对应的隶属度。

由式(11)可得目标层的模糊综合评判集 E 。

$$E = W \cdot R \quad (11)$$

依据最大隶属度原则和加权归一化处理方法确定隶属度,进而确定最终的工程易损性等级。

3 泥石流动力特征参数计算

流速是计算泥石流动力特征的关键参数,也是指导防治工程设计不可或缺的参数,目前,各计算式多采用各地区的孕灾环境特征经验公式。笔者采用的计算式为^[21]

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\gamma_H \phi + 1}} \frac{1}{n_c} H_c^{2/3} J^{1/2} \quad (12)$$

式中: γ_H 为泥石流固体重度, g/cm^3 ; H_c 为计算断面的平均泥深, m ; J 为泥石流水力坡降, $\%$; n_c 为沟床的糙率系数; ϕ 为泥石流泥沙修正系数。

泥石流大石块冲击力则采用可同时考虑冲击物与被冲击物材料特性的计算公式^[22]

$$F = C \left[\left(\frac{E_1 \times E_2}{E_1 + 2E_2} \right) M^2 V^4 \right]^{4/3} \sin^{1/2} \alpha \quad (13)$$

式中: F 为泥石流大石块冲击力, N ;系数 C 的大小与泥石流屈服应力、容重和悬浮粒径有关; E_1 、 E_2 分别为泥石流中大石块、被冲击的物弹性模量, Pa ; M 为泥石流中大石块重量, kg ; V 为泥石流中巨石运动速度, m/s ; α 为大石块运动方向与被冲击物的平面角度, $(^\circ)$ 。

泥石流整体冲击力为^[21]

$$F_b = \lambda \frac{\gamma_c}{g} v_c^2 \sin \alpha \quad (14)$$

泥石流动水压力为^[20]

$$\sigma = (\gamma_c / g) v_c^2 \quad (15)$$

式中: σ 为泥石流动水压力, kPa ; γ_c 为泥石流重度, kN/m^3 ; v_c 为泥石流流速, m/s ; g 为重力加速度, $9.8 m/s^2$ 。

4 工程实例

4.1 雀儿沟沟道与导流堤调查

4.1.1 雀儿沟沟道调查 雀儿沟沟道位于冕宁县托乌乡,地处四川省西南部。现场调查后得知,该沟历史上曾爆发过大规模泥石流,目前仍较为活跃。沟道内汇水面积 $14.19 km^2$,主沟长度 $7.30 km$,平均坡度较大,主沟平均比降 15.73% ,高差大于 $1000 m$,利于泥石流产流及汇流。沟道内松散堆积物较多,岩性多为风化强烈或节理发育的硬岩。从图2中遥感影像可知,沟道上游汇水面宽,沟壑众多,局部岩土裸露,下游汇水面狭窄且流通段短。该沟泥石流物源主要分布在上游沟床和中下游沟床、沟岸(如图3所示),约 $142万 m^3$ (数据的获取方式详见文献[23])。

4.1.2 雀儿沟导流堤调查 雀儿沟曾于1999年7月15日凌晨5点左右受强降雨影响爆发过大规模泥石流,持续时间约为 $2 h$,沟内有明显塌方和堵塞,冲毁了电站厂房,造成 90 多万元的经济损失。后为保护电站,在电站沟道两侧修筑了导流堤(如图4所



图 2 正俯视图
Fig. 2 Front view



图 5 导流堤损毁后
Fig. 5 After the diversion dike was destroyed



图 3 下游物源区
Fig. 3 Downstream provenance area



图 4 导流堤损毁前
Fig. 4 Before the diversion dam was damaged

示),导流堤宽约 1.2 m,沟内侧高约 4 m,背侧高约 2.5 m,采用 C20 混凝土砌筑而成。2005 年 8 月雀儿沟又发生过泥石流,将沟口处电站对面的一段导流堤冲毁,冲毁段破碎散落在沟床内,冲毁长度约 10 m(如图 5 所示)。相应的调查结果如表 4 所示。

4.2 评价结果

采用模糊集的运算方法,求得各级指标的隶属度向量,如表 5 所示。运用式(11),可求得导流堤工程易损性的隶属度向量 E 为

$$E=(0.206\ 95, 0.379\ 81, 0.332\ 04, 0.009\ 00, 0.072\ 00)$$

表 4 泥石流和导流堤的调查结果

Table 4 Survey results of investigation of debris flows and diversion dikes

调查因素	调查结果
C_1	约为 142 万 m^3
C_2	地面起伏较大,较高海拔山区
C_3	以砂土、碎石、岩石为主
C_4	107.3 mm
C_5	地下水位高度一般
C_6	7.65 万 m^3 左右
C_7	20 年一遇
C_8	冲击、冲刷联合致灾
C_9	20 MPa
C_{10}	工程的形式构造适应性一般,泥石流破坏作用下受力合理性一般
C_{11}	工程和沟道走向夹角约为 30°
C_{12}	25 a
C_{13}	基本不存在质量问题
C_{14}	资金相对匮乏,监管落后
C_{15}	结构保存完好
C_{16}	一般

隶属度向量中最大值为 0.379 81,根据最大隶属度原则,结合评价语集合(式(8))可知,雀儿沟导流堤工程易损性隶属于高度易损性,不过对比后发现,虽然 0.379 81 为隶属度最大值,但与中度易损性的隶属度值 0.332 04 相差不大,所以确切来说,雀儿沟导流堤的易损性介于高度易损性和中度易损性之间,而更趋向于高度易损性,即导流堤整体抗击泥石流的能力较为薄弱。

4.3 动力参数计算结果与讨论

经现场调查,雀儿沟中最大的石块体积约为 $3.5\ m \times 2.9\ m \times 1.5\ m$,与导流堤可能接触的最大面积约为 $0.72\ m \times 0.85\ m = 0.612\ m^2$,泥石流容重为 $1\ 710\ kg/m^3$,固体容重为 $2\ 710\ kg/m^3$,大石块为

表5 各级指标的隶属度向量

Table 5 Membership vector of indicators at all levels

指标	隶属度向量
C_1	(0.42, 0.58, 0, 0, 0)
C_2	(0, 0.80, 0.20, 0, 0)
C_3	(0, 0, 0, 0.40, 0.60)
C_4	(1.00, 0, 0, 0, 0)
C_5	(0, 0, 1.00, 0, 0)
C_6	(0, 0.53, 0.47, 0, 0)
C_7	(0, 0.44, 0.56, 0, 0)
C_8	(0, 0.80, 0.20, 0, 0)
C_9	(1.00, 0, 0, 0, 0)
C_{10}	(0, 0.20, 0.80, 0, 0)
C_{11}	(0, 0.50, 0.50, 0, 0)
C_{12}	(0, 0.50, 0.50, 0, 0)
C_{13}	(0, 0.70, 0.30, 0, 0)
C_{14}	(0, 0.50, 0.50, 0, 0)
C_{15}	(0, 0, 0, 0, 1.00)
C_{16}	(0, 0, 1.00, 0, 0)

花岗岩材质,弹性模量约为 $5 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$,导流堤弹性模量约为 $2.55 \times 10^9 \text{ kg/m}^2$, $\alpha=30^\circ$,最大淤积厚度 3.67 m,按式(12)~式(15)计算,结果如表6所示。

表6 动力参数计算结果

Table 6 Calculation results of kinetic parameters

$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	F/kN	F_b/kPa	σ/kPa
5.4	1 351.28	33.84	50.89

经单位换算,最终可得导流堤在泥石流作用下的局部总压强 P 为 2 216.99 kPa,而导流堤所能承受的最大剪应力为 1 370 kPa,超出部分占抗剪强度的比例约为 61.82%,大大超过了导流堤本体抵抗外力的极限。所以,当泥石流发生时,导流堤会在泥石流冲击和冲刷的联合致灾模式下发生局部破坏。评价结果与通过定量计算的结果相吻合,同时,据现场实际调查发现,泥石流爆发后,原位于雅泸路雀儿沟电站对面处的一段导流堤被冲毁,冲毁段破碎并散落在沟床内,冲毁长度约 10 m(实际情况如图4、图5所示),因此,导流堤工程易损性的评价结果也与现场实际调查结果基本一致,从而验证了该评估模型的可靠性。

根据所得结果,可以得到关于优化导流堤抗灾

能力的建议:

1)源头上治理。合理开发山区资源,减少对自然环境的扰动;定时清淤,减少物源储备,降低泥石流发生的风险。

2)优化工程布局。例如,可在沟道上游设置桩林坝等拦挡结构阻隔大石块等向下游移动,防止导流堤遭受巨石冲击而破坏。

3)加强对导流堤的检测力度。发现问题及时处理,防患于未然。

4)定期对其进行维修养护,以增强工程的耐久性。

在灾害发生后,相关部门对导流堤进行了修复处理,加强了检测力度,并对该地区展开了定时清淤工作,极大程度地减少了物源储备量,大大降低了泥石流发生的风险,使导流堤的排导功能和抗灾能力得到了明显改善。多年来该地区很少再有类似的大规模泥石流发生,处理工作取得了显著成效。然而,因尚未在上游设置拦挡结构,使得该地区导流堤仍存在着巨大的安全隐患,有待于进一步解决。

5 结论

1)在易损性定义的基础上,以遭受泥石流灾害的雅泸路雀儿沟导流堤为工程背景,提出了导流堤易损性的概念,即“在给定的区域中由于泥石流地质灾害致使导流堤可能受到的损失程度”。结合泥石流致灾特征和导流堤承灾特点,建立了泥石流危害作用下导流堤的工程易损性评价方法。采用该方法对雅泸路雀儿沟导流堤进行易损性评价,结果表明:雅泸路雀儿沟导流堤为高度易损性,确切来说,其易损性程度介于高度易损性和中度易损性之间,而更趋向于高度易损性,即导流堤整体抗击泥石流的能力较为薄弱。评价结果与现场实际调查结果相一致,验证了该方法的可行性。

2)对雅泸路雀儿沟泥石流的相关动力参数进行了计算,结果表明:在泥石流冲击和冲刷的联合致灾模式下,导流堤受大石块冲击部位的局部总压强为 2 216.99 kPa,而该导流堤所能承受的最大剪应力约为 1 370 kPa,所承受的总压强值约为抗剪强度的 1.618倍,大大超过了导流堤本体抵抗外力的极限。从定量计算的角度验证了评价结果的可靠性。

参考文献

- [1] 田述军, 张静, 张珊珊. 震后泥石流防治工程减灾效益评价研究[J]. 灾害学, 2020, 35(3): 102-109.
TIAN S J, ZHANG J, ZHANG S S. Effectiveness evaluation of disaster reduction for debris flows control engineering after Wenchuan earthquake [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(3): 102-109. (in Chinese)
- [2] ZHANG Z L, XIE J, YU D K, et al. Analysis of a debris flow after Wenchuan Earthquake and discussion on preventive measures [J]. Thermal Science, 2019, 23 (3 Part A): 1563-1570.
- [3] ZHANG N, MATSUSHIMA T, PENG N B. Numerical investigation of post-seismic debris flows in the epicentral area of the Wenchuan earthquake [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(5): 3253-3268.
- [4] WANG J, YU Y, GONG Q H, et al. Debris flow disaster risk analysis and modeling via numerical simulation and land use assessment [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(19): 1-14.
- [5] 余政. 冲击荷载作用下泥石流拦挡坝变形破坏机制[D]. 西安: 西安科技大学, 2016.
YU Z. The mechanism of deformation and failure of debris flow dam under the shock load [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [6] LI B L, WANG C M, LI Y Y, et al. Dynamic response analysis of retaining dam under the impact of solid-liquid two-phase debris flow based on the coupled SPH-DEM-FEM method [J]. Geofluids, 2020, 2020: 6635378.
- [7] YU X B, CHEN X Q, WANG H L, et al. Numerical study on the interaction between debris flow slurry and check dams based on fluid-solid coupling theory [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(3): 2427-2445.
- [8] DAHLQUIST M P, WEST A J. Initiation and runoff of post-seismic debris flows: Insights from the 2015 Gorkha Earthquake [J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(16): 9658-9668.
- [9] 蹇代君, 孙昊, 郎介. “8·8”地震对九寨沟景区泥石流灾害防治的影响[J]. 四川地质学报, 2020, 40(2): 278-283.
JIAN D J, SUN H, LANG J. Influence of the Jiuzhaigou earthquake on Aug. 8, 2017 on control of debris flow in the Jiuzhai valley scenic spots [J]. Acta Geologica Sichuan, 2020, 40(2): 278-283. (in Chinese)
- [10] WU C F, LIN Y P, CHIANG L C, et al. Assessing highway's impacts on landscape patterns and ecosystem services: A case study in Puli Township, Taiwan [J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 128: 60-71.
- [11] 徐林荣, 陈舒阳, 曹禄来. 泥石流危害桥隧工程易损性评价[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2642-2650.
XU L R, CHEN S Y, CAO L L. Engineering vulnerability assessment for bridges and tunnels harmed by debris flow hazards [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2642-2650. (in Chinese)
- [12] 徐林荣, 王磊, 苏志满. 隧道工程遭受泥石流灾害的工程易损性评价[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2153-2158.
XU L R, WANG L, SU Z M. Assessment of engineering vulnerability of tunnel suffering from debris flow [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2153-2158. (in Chinese)
- [13] 徐士彬, 钱德玲, 姚兰飞, 等. 路基遭受泥石流灾害的易损性评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 235-241, 247.
XU S B, QIAN D L, YAO L F, et al. Evaluation of vulnerability of subgrade suffering from debris flow disasters [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 235-241, 247. (in Chinese)
- [14] 丁明涛, 李昱陆, 庞金彪, 等. 泥石流胁迫下建筑物易损性评价: 以汶川县七盘沟为例[J]. 灾害学, 2020, 35 (1): 144-149.
DING M T, LI Y L, PANG J B, et al. Vulnerability assessment of building exposed to debris flow: A case study on Qipan Gully, Wenchuan County [J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 144-149. (in Chinese)
- [15] 刘佳, 赵海军, 马凤山, 等. 基于改进变异系数法的G109拉萨—那曲段泥石流危险性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 63-70.
LIU J, ZHAO H J, MA F S, et al. Risk assessment of G109 Lhasa-Naqu Debris flow based on improved coefficient of variation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 63-70. (in Chinese)
- [16] 殷启睿, 苏娜. 基于DEA冗余分析的泥石流危险度评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 30-34.
YIN Q R, SU N. Debris-flow risk assessment based on DEA redundancy analysis [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 30-34. (in Chinese)
- [17] SAATY T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: McGraw-Hill, 1980: 30-75.
- [18] 周静, 李远富, 何志敏, 等. 基于权的最小平方法和可拓学的高陡岩质边坡稳定性评价[J]. 路基工程, 2018 (4): 1-6.
ZHOU J, LI Y F, HE Z M, et al. Stability evaluation of high steep rock slope based on the weighted least-

- square method and extenics [J]. *Subgrade Engineering*, 2018(4): 1-6. (in Chinese)
- [19] 张晨, 王清, 陈剑平, 等. 金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 831-836.
ZHANG C, WANG Q, CHEN J P, et al. Evaluation of debris flow risk in Jinsha River based on combined weight process [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 831-836. (in Chinese)
- [20] 李晓婷, 刘文龙. 模糊综合评判法在甘肃陇南武都区石门乡泥石流危险性评价中的应用[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(4): 71-76.
LI X T, LIU W L. Application of fuzzy comprehensive evaluation method to debris flow risk evaluation in Shimen Township in Wudu District of Longnan City, Gansu Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 71-76. (in Chinese)
- [21] 韩征. 活动断裂区高速公路泥石流致灾参数计算与防灾措施优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
HAN Z. Research on the calculation methods of debris flow hazard affection parameters and relevant optimizations of countermeasure design along highway at active fault zone [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [22] 易伟. 泥石流冲击力计算方法实验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
YI W. Experimental study on calculation method of impact force of debris flow [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [23] 欧阳猛. 公路泥石流灾害特征参数确定与防治对策研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
OUYANG M. Study on characteristic parameters determination and prevention countermeasures of highway debris flow disaster [D]. Changsha: Central South University, 2008. (in Chinese)

(编辑 胡玲)