

文章编号: 1000-7598 (2014) 09-2642-09

泥石流危害桥隧工程易损性评价

徐林荣, 陈舒阳, 曹禄来

(中南大学 土木工程学院, 长沙 410004)

摘 要: 为将泥石流灾害损失评价由宏观价值评判提升至可为工程服务, 曾提出了基于结构损毁程度评判的工程易损性概念。然而, 诸如桥隧工程在遭受泥石流危害时, 仅靠结构损毁程度无法正确判定实际灾情, 会导致对功能完全损失而结构受损较轻的受灾工况“轻”判、功能尚可而结构损毁较重的受灾工况“重”判。鉴于此, 在原有结构损毁程度评判的基础上, 通过增加承灾特征、线路规格、恢复成本等桥隧工程使用功能的影响因素, 形成了既关注“结构损毁”, 又重视“功能损失”的泥石流危害桥隧工程易损性评价方法。实例分析表明, 该方法克服了单一结构评判的不足, 与现场灾情更为相符。这丰富并发展了工程易损性评价的内涵, 使评价结果更为全面、合理, 对正确预判或验证桥隧工程遭受泥石流危害受灾情况, 合理妥善地准备或及时准确地启动应急预案, 具有重要意义。

关 键 词: 泥石流; 工程易损性; 桥隧工程; 结构损毁; 功能损失

中图分类号: U 45

文献标识码: A

Engineering vulnerability assessment for bridges and tunnels harmed by debris flow hazards

XU Lin-rong, CHEN Shu-yang, CAO Lu-lai

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to advance debris flow loss assessment from macroeconomic evaluation to service for civil engineering, the concept of engineering vulnerability based on structural devastation extent of civil engineering infrastructures is put forward. However, for those engineering harmed by debris flow hazards, such as bridges and tunnels, it is insufficient to determine the actual disaster loss merely according to structural devastation extent. When the engineering function is completely lost but structure slightly damaged, its vulnerability can be underestimated. Besides, when the engineering function is fairly workable but structure severely damaged, its vulnerability can be overestimated. Therefore, on the basis of the conventional assessment of structural devastation extent, the influencing factors for bridges and tunnels' function is introduced, such as hazard-affected characteristics, railway/highway ranking and restoration cost. Thus, the engineering vulnerability assessment method for bridges and tunnels harmed by debris flow hazards is proposed, considering both structural devastation and function loss. In the case study, the assessing results show that the insufficiency of the conventional structural assessment can be overcome by this method. This method extends and develops the concept of engineering vulnerability, which makes the assessment more comprehensive and credible. Hence, it is concluded that this method is of great significance to correctly predict and verify the disaster situation of bridges and tunnels harmed by debris flow hazard, to properly prepare the emergency plans or to initiate a quick response.

Key words: debris flow; engineering vulnerability; bridge and tunnel engineering; structural devastation; function loss

1 引 言

泥石流是我国山区常见的突发性地质灾害, 具有分布广、爆发频率高、破坏性强等特点, 常能在短时间内淤堵或掩埋隧道, 冲毁桥梁、路基等。因

此, 通过易损性评价等手段, 做好泥石流的危害评价, 对防治措施的制定、协助政府指导防灾减灾等具有重要意义^[1]。

学术界对易损性的定义曾存在争议^[1-3], 直到联合国^[4]于 1992 年将易损性定义为“在给定地区由

收稿日期: 2013-05-25

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 41272376); 铁道部专项项目 (No. 2011G017-C); 西部交通建设科技项目 (No. 200831800087)。

第一作者简介: 徐林荣, 男, 1964 年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害防治与预警预报、特殊路基设计理论与施工技术, 地基处理和土工合成材料在土木工程上应用研究。E-mail: lrxu@mail.csu.edu.cn

于潜在损害现象可能造成的损失程度”,才被广泛接受。此后,易损性研究过渡到对固定资产^[5-6]、人口损失^[7-8]等不同评估对象的讨论中。目前,易损性主要被视作对承灾体^[9-10](灾害作用下垫层)的承灾能力、灾情损失等属性的表述。其中,对泥石流易损性而言,具有代表性的是刘希林^[11]定义的“在一定区域和给定时段内,由于泥石流灾害而可能导致的该区域内所存在的一切人、财、物的潜在最大损失”,并被分成物质、经济、环境、社会易损性4类^[11]。按对应属性,桥隧工程等基础设施属于物质易损性的范畴。然而,当桥隧工程遭受泥石流危害时,若仅根据物质易损性的定义,按造价高低所对应的经济损失来计算易损性,并不足以表达基础设施因自身结构、材料、工程地质环境、施工和维护的不同,在受灾损失上所表现出的差异性。鉴于此,笔者^[12]曾提出工程易损性的概念:“由于自然灾害而导致工程体可能受到的损毁程度”,将泥石流灾害损失评价由原来的宏观经济价值衡量提升到能直接为工程服务的工程结构损毁程度评判。

然而,笔者进一步研究后发现,仅靠工程结构的损毁程度,不能真实判别桥隧工程还能否正常使用等实际灾情。例如,隧道遭受泥石流淤堵后,虽结构受损较轻,但使用功能已完全丧失(如图1所示);而另一种情形下,桥梁墩台及护锥遭受冲击导致结构受损较重,但桥面交通功能尚可维持(如图2所示)。此时,若仅按结构损毁程度评判灾情,会导致前者被“轻”判,而后者被“重”判。发生此类混淆,可能误导职能部门对桥隧工程受灾后服役状态的判断,妨碍灾情的识别,甚至贻误救灾和处置的时机。故笔者认为,工程易损性评价应在评判结构损毁程度的基础上,增加对工程体使用功能损失情况的评判。鉴于此,本文提出增加功能损失评判的工程易损性概念:“由于自然灾害导致工程体结构与功能的潜在损失程度”,其反映的是在潜在危害作用下,工程体的结构和使用功能遭到破坏的程度,以及恢复正常的难易程度。



图1 隧道被淤堵后使用功能完全丧失

Fig.1 Tunnel function completely lost after being blocked



图2 桥墩受冲击导致结构受损但交通功能维持

Fig.2 Bridge function fairly maintained with structural devastation induced by impacts on piers

2 增加功能评判的指标体系

2.1 增加功能损失评判标准

本文在文献[12]选取的“选址、设计、施工、运营”等结构评判指标的基础上,为表达桥隧工程因受灾方式与种类,所属铁(公)路的重要性与等级,修复的难度与代价等因素的不同,在使用功能损失程度上所表现出的差异性,增加了“承灾特征、线路规格、恢复成本”等指标,形成了基于结构损毁与功能损失双重评判的指标选取标准。前者偏重于体现泥石流等灾害对土木工程“结构”本身的影响,而后者则关注基础设施所承载的交通“功能”所遭受的损失,二者应综合考虑。

2.2 评价因子选取与指标体系建立

2.2.1 结构损毁程度评判指标 A_1

考虑桥隧工程因设计选址、场地环境及结构形式的不同,造成其结构损毁程度在潜在危害作用下所表现出的差异性。

主要分为以下两项内容:

(1) 桥隧设计和选址指标 B_1 , 分为以下3项内容: 桥隧与沟道夹角 C_1 , 桥隧与沟道距离 C_2 , 桥隧处沟道特征 C_3 。

(2) 桥隧结构和类型指标 B_2 , 分为以下3项内容: 隧道通行方式 C_4 (桥梁孔跨形式 C'_4), 隧道衬砌类型 C_5 (桥梁墩台基础 C'_5), 隧道围岩级别 C_6 (桥下净空高度 C'_6)。

2.2.2 功能损失程度评判指标 A_2

考虑桥隧工程具体的承灾特征和形式、所属线路的规格或重要性、恢复正常功能所需的代价等内容。主要分为以下3项内容:

(1) 承灾特征和形式 B_3 , 分为以下3项内容: 附属构造物受损度 C_7 , 防治措施效果 C_8 , 危害种类和形式 C_9 。

(2) 工程规格和等级指标 B_4 , 分为以下 3 项内容: 铁路/公路等级 C_{10} , 养护维修力度 C_{11} , 应急响应级别 C_{12} 。

(3) 恢复时间和成本指标 B_5 , 分为以下 3 项内容: 恢复正常的时间 C_{13} , 调度及抢修难度 C_{14} , 恢复方式及成本 C_{15} 。

2.3 评价指标体系与指标取值范围

由以上评价因子及从属关系, 形成本文 3 级评价指标体系, 共 3 个层次: 目标层 E 、准则层 $A+B$ 、

指标层 C 。

其中, 目标层为基于结构与功能双重评判的泥石流危害桥隧工程易损性, 是整个评价系统的最终目标; 准则层为结构损毁程度、功能损失程度 2 项 1 级评价因子, 及其包含的设计选址、结构类型、承灾特征和形式、工程规格和等级、恢复时间和成本 5 项 2 级评价因子; 指标层则针对准则层各因子的影响因素逐个分析, 细分为 15 项 3 级评价因子, 指标体系层次结构如图 3 所示。

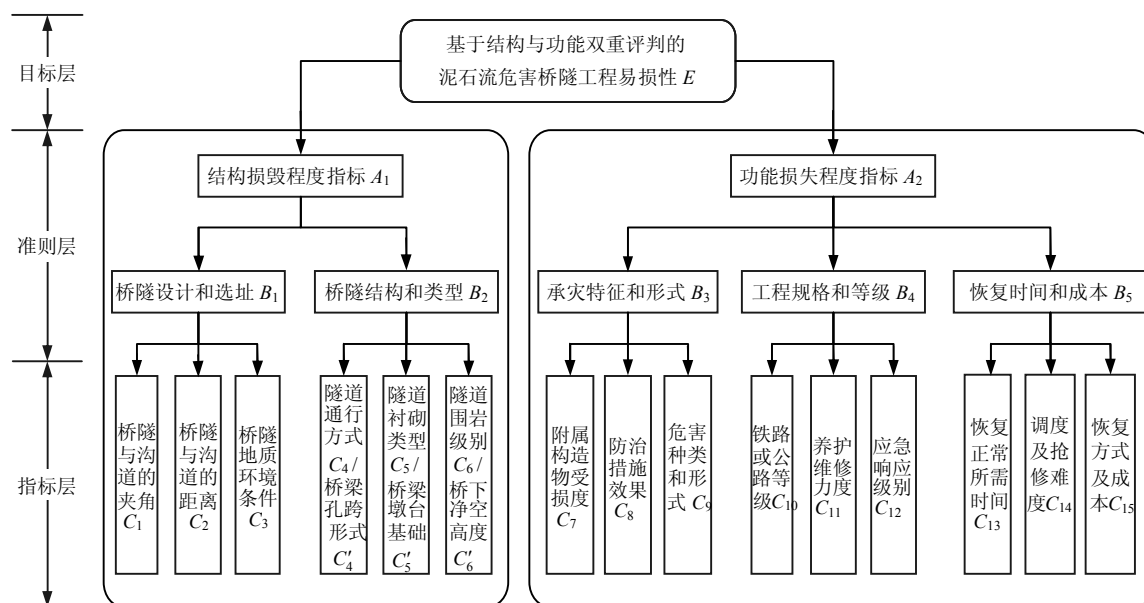


图 3 评价指标体系

Fig.3 Assessment index system

在 3 级评价因子中, 针对结构与功能评判标准在各自数值、性质表达上的差异, 采用定量分析加定性描述的方式, 通过统计归纳桥隧工程设计建造、施工运营、灾害处置、应急抢修等研究成果, 综合确定双重评判下的指标取值范围, 见表 1、2。

3 评价模型及方法

3.1 建立指标集

指标集是影响对象的各种指标所组成的一个普通集合。本文是 3 级评价, 即

$$C = (C_1, C_2, \dots, C_{15}) \quad (1)$$

3.2 建立备择集

备择集是评价对象可能做出的各种总评价结果所组成的集合。通常用 V 表示, 即

$$V = (V_1, V_2, \dots, V_5) \quad (2)$$

各元素 $V_j (j=1, 2, \dots, 5)$ 代表各种可能的总评价结果, 工程易损性评价的目的, 就是在综合考虑所有指标的基础上, 从备择集中得出最佳的评价结果。本文的评价结果分为 5 个等级, 即

$$V = (\text{极高}, \text{高}, \text{中}, \text{低}, \text{极低}) \quad (3)$$

3.3 评价模型的选用

3.3.1 结构损毁程度指标的评价模型

对结构损毁程度指标, 由于各项因子的取值范围有相关设计、施工规范可循, 故数值较为确定, 定量化程度高, 故本文沿用文献[12]中运用的模糊关系矩阵计算隶属度向量。

(1) 指标隶属度的确定

待评指标集 C 和备择集 V 之间的模糊关系用模糊关系矩阵 $R = (u_1, u_2, \dots, u_5)$ 表示, R 代表每个评价因子对备择集各指标等级的隶属程度, 模糊矩阵计算公式为

表 1 基于结构损毁程度评判指标 A_1 的工程易损性评价因子取值范围^[13-15]Table 1 Value range of engineering vulnerability assessment based on structure assessing factors A_1

易损等级	桥隧与沟道夹角 $C_1/(^\circ)$	桥隧与沟道距离 C_2/m	桥隧处沟道特征 C_3	隧道断面类型 C_4	桥梁孔跨形式 C'_4	隧道衬砌类型 C_5	桥梁墩台基础 C'_5	隧道围岩级别 C_6	桥下净空高度 C'_6/m
极高易损性 1	0~20	<500	桥隧处沟道曲率大, 沟床呈上陡下缓状且横断面小, 比降变化率大	横断面宽小于 5 m 的单拱隧道口断面形式	桥梁孔跨数目多且跨度小, 显著压缩沟床, 墩台结构受强烈冲击作用, 桥梁极易整体失稳	简单防护衬砌, 厚度小于 200 mm	墩台基础埋深很浅, 无防淤结构设计, 桥墩迎水面材料耐磨性差, 抗冲击能力低, 墩台基础易倾覆	V	<3
高度易损性 2	20~40	500~1 000	沟道曲率及比降变化率较大, 沟床横断面较小	横断面宽 5~7 m 的单拱或连拱隧道口断面形式	桥梁孔跨数目较多且跨度较小, 墩台结构易遭受较强冲击作用, 桥梁整体稳定性较差	一般拼接衬砌, 厚度为 200~400 mm	墩台基础埋深较浅, 防淤结构设计较差, 桥墩迎水面材料耐磨性较差, 抗冲击能力较弱	IV	3~5
中度易损性 3	40~60	1 000~5 000	沟道曲率及横断面大小一般, 沟床比降变化率不大	横断面宽 7~9 m 的连拱断面形式	桥梁孔跨数目及跨度一般, 墩台受一定的冲击作用, 整体稳定性一般	普通整体衬砌, 厚度为 400~600 mm	墩台基础埋深及迎水面材料耐磨性一般, 具有防淤结构设计, 有一定的抗冲刷能力	III	5~8
低度易损性 4	60~80	5 000~10 000	沟道曲率较小, 横断面较大, 沟床比降变化较小	横断面宽 9~11 m 的连拱断面形式	桥梁孔跨数较少且跨度较大, 墩台受冲击作用可能性较小, 整体稳定性较好	喷锚衬砌, 厚度为 600~800 mm	墩台采用圆端式设计, 基础埋深较大, 加强桥墩迎水面材料耐磨性, 抗冲击冲刷能力较好	II	8~12
轻微易损性 5	80~90	>10 000	沟道曲率很小, 横断面大, 沟床比降变化轻微	横断面宽大于 11 m 的双拱隧道口断面形式	桥梁为单跨、大跨度结构形式, 墩台受冲击作用可能性小, 整体稳定性好	复合式衬砌, 厚度大于 800 mm	基础埋深大, 采用圆形实体桥墩, 迎水面材料整体性高、耐磨性好, 抗冲击冲刷能力强	I	>12

注：为便于计算结果的定量化，对于以上定性因子，可转化为有序尺度的变量对其进行定量化。在此采取 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 基于功能损失程度评价指标 A_2 的工程易损性评价因子取值范围Table 2 Value range of engineering vulnerability assessment based on function assessing factors A_2

易损等级	附属构造物受损度 C_7	防治措施效果 C_8	危害种类和形式 C_9	铁路/公路等级 C_{10}	养护维修力度 C_{11}	应急响应级别 C_{12}	恢复正常的时间 C_{13}/h	调度及抢修难度 C_{14}	恢复方式及成本 C_{15}
极高易损性 1	隧道洞门完全堵塞或被淤积(桥墩护锥严重损坏)	很差, 未设置防治措施, 或几乎没有作用	隧道受淤积、冲击共同作用(桥梁受冲击、冲刷共同作用)	客货流密度很大, 在路网中起骨干作用的高速公路或高铁	资金严重匮乏, 监管缺位, 几乎不养护维修或做灾害监测	需国务院安委会处置的 I 级应急响应	>48	非常大, 地理位置偏僻, 需要长时间等待抢修设备和物资	需重新选址规划重建, 耗资 1 亿元以上
高度易损性 2	隧道洞门大部分被淤堵(桥墩护锥损坏较严重)	较差, 仅能小幅度缓解灾害的影响	隧道受淤积、冲刷共同作用(桥梁受冲击、淤积作用)	客货流密度大, 客货混运的一级公路或铁路等干线	资金较匮乏, 监管落后, 养护维修工作间隔 3 a 以上	需省级政府处置的 II 级应急响应	24~48	较大, 周边地区较难支援, 较难调集抢修设备和物资	需在原址重建, 耗资 5 000 万元左右
中度易损性 3	隧道洞门被部分淤埋(桥墩护锥有一定程度的损坏)	一般, 能一定程度上减缓灾害的影响	隧道受淤积作用(桥梁受冲刷、淤积共同作用)	客货流密度一般, 起联络作用的 2 级公路或铁路	资金较不充裕, 不定期做养护维修, 有常规灾害监测	需市级政府处置的 III 级应急响应	12~24	一般, 周边能提供一定支援, 基本保障设备和物资	需大修、加固多处破损部位, 耗资 500 万元左右
低度易损性 4	隧道洞门基本通畅(桥墩护锥有轻微损坏)	较好, 能较大幅度控制并减缓灾害影响	隧道受冲击作用(桥梁受冲刷作用)	为地区服务的客货流密度较小的 3 级公路或铁路	资金较充裕, 定期做养护, 灾害监测手段较多	需县级政府处置的 IV 级应急响应	6~12	较小, 周边支援较强, 能较快调运设备和物资	需清理疏通及简单修理加固, 耗资 100 万元左右
轻微易损性 5	隧道洞门完全畅通(桥墩护锥保存完好)	很好, 能完全抵御并缓解灾害影响	隧道受冲刷作用(桥梁受淤积作用)	客货流密度小, 偏僻地区的 4 级公路或铁路	资金充裕, 日常养护维修到位, 监测手段丰富	在当地职能部门处置能力范围内	<6	很小, 地理位置好, 便于抢修物资和设备调集	只需简单清理疏通即可, 耗资 30 万元以下

$$u_1 = \begin{cases} 0, & x < \frac{a_3 + a_4}{2} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_4 - a_3} (x - a_4), & \frac{a_3 + a_4}{2} < x \leq a_4 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_5 - a_4} (x - a_4), & a_4 < x \leq \frac{a_4 + a_5}{2} \\ 1, & x > a_5 \end{cases} \quad (4)$$

$$u_2 = \begin{cases} 0, & x < \frac{a_2 + a_3}{2}, x \geq \frac{a_4 + a_5}{2} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_3 - a_2} (x - a_3), & \frac{a_2 + a_3}{2} < x \leq a_3 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_4 - a_3} (x - a_3), & a_3 < x \leq \frac{a_3 + a_4}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_4 - a_3} (x - a_4), & \frac{a_3 + a_4}{2} < x \leq a_4 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_5 - a_4} (x - a_4), & a_4 < x \leq \frac{a_4 + a_5}{2} \end{cases} \quad (5)$$

$$u_3 = \begin{cases} 0, & x < \frac{a_1 + a_2}{2}, x \geq \frac{a_3 + a_4}{2} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} (x - a_2), & \frac{a_1 + a_2}{2} < x \leq a_2 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_3 - a_2} (x - a_2), & a_2 < x \leq \frac{a_2 + a_3}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_3 - a_2} (x - a_3), & \frac{a_2 + a_3}{2} < x \leq a_3 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_4 - a_3} (x - a_3), & a_3 < x \leq \frac{a_3 + a_4}{2} \end{cases} \quad (6)$$

$$u_4 = \begin{cases} 0, & x < \frac{a_0 + a_1}{2}, x \geq \frac{a_2 + a_3}{2} \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_1 - a_0} (x - a_1), & \frac{a_0 + a_1}{2} < x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} (x - a_1), & a_1 < x \leq \frac{a_1 + a_2}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} (x - a_2), & \frac{a_1 + a_2}{2} < x \leq a_2 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_3 - a_2} (x - a_2), & a_2 < x \leq \frac{a_2 + a_3}{2} \end{cases} \quad (7)$$

$$u_5 = \begin{cases} 1, & x < \frac{a_0 + a_1}{2} \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_1 - a_0} (x - a_1), & \frac{a_0 + a_1}{2} < x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} (x - a_1), & a_1 < x \leq \frac{a_1 + a_2}{2} \\ 0, & x \geq \frac{a_1 + a_2}{2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: x 为 3 级指标的具体数值; $a_0, a_1, \dots, a_5$ 为其对应的基础因子分级值。

(2) 模糊综合评价确定工程易损性等级

由 3 级指标 C_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 单因素调查结果, 按式 (4)~(8) 计算, 即得对应的 3 级指标的隶属度矩阵, 并由此可得对应的 2 级指标隶属度矩阵。以 2 级指标 B_1 的隶属度矩阵为例, 得

$$R_{B_1} = \begin{bmatrix} u_{C_{11}} & u_{C_{12}} & \cdots & u_{C_{15}} \\ u_{C_{21}} & u_{C_{22}} & \cdots & u_{C_{25}} \\ u_{C_{31}} & u_{C_{32}} & \cdots & u_{C_{35}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $u_{C_{11}} \cdots u_{C_{35}}$ 分别指 3 级指标 C_1, C_2, C_3 的取值分别对于工程易损性由高到低 5 个等级的隶属度, 共计 15 项。

根据表 3 中所示权重值, 可得 3 级评价指标权向量

$$W_C = (w_{C_1}, w_{C_2}, w_{C_3}) \quad (10)$$

则 2 级模糊综合评价模型为

$$V_{B_1} = W_C R_{B_1} = (w_{C_1}, w_{C_2}, w_{C_3}) \begin{bmatrix} u_{C_{11}} & u_{C_{12}} & \cdots & u_{C_{15}} \\ u_{C_{21}} & u_{C_{22}} & \cdots & u_{C_{25}} \\ u_{C_{31}} & u_{C_{32}} & \cdots & u_{C_{35}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

由此, 同理可得对应的一级模糊评价模型:

$$V_{A_1} = W_B V_B = (w_{B_1}, w_{B_2}) \begin{bmatrix} V_{B_1} \\ V_{B_2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据模糊集的运算方法, 本文采用小中取大、取最大者原则, 通过归一加权确定其隶属度, 进而确定结构损毁程度下的工程易损性等级。

3.3.2 功能损失程度指标的评价模型

对功能损失程度指标, 考虑到定性指标的数值表达可借鉴的规范标准较少, 指标隶属度不确定性较大, 故采用更适合于分析指标从属关系的可拓物元分析法^[16]作为评价模型。

(1) 计算关联度

待评指标集 C 中各指标 C_i 关于备择集 V 各等级 V_j 的关联度 $K_j(c_i)$, 所用的关联函数为

$$K_j(c_i) = \begin{cases} \frac{\rho(c_i, C_{ij})}{\rho(c_i, C_{ip}) - \rho(c_i, C_{ij})} & (c_i \notin C_{ij}) \\ \frac{-\rho(c_i, C_{ij})}{|C_{ij}|} & (c_i \in C_{ij}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\rho(c_i, C_{ij}) = |c_i + (a_{ij} + b_{ij})/2| - (b_{ij} - a_{ij})/2$$

$$\rho(c_i, C_{ip}) = |c_i + (a_{ip} + b_{ip})/2| - (b_{ip} - a_{ip})/2$$

式中: c_i 为第 i 个 ($i = 7, 8, \dots, 15$) 3 级指标的取值; C_{ij} 为第 i 个指标属于第 j 个 ($j = 1, 2, \dots, 5$) 等级的范围, $|C_{ij}| = b_{ij} - a_{ij}$, a_{ij} 与 b_{ij} 分别为第 i 个指标对应第 j 个等级下的基础因子分级值; C_{ip} 为第 i 个指标的取值范围, a_{ip} 与 b_{ip} 分别为第 i 个指标取值的下限和上限。

(2) 可拓物元分析法确定工程易损性等级

根据上述求得的关联函数值, 待评 2 级指标关于第 j 个工程易损性等级 V_j ($j = 1, 2, \dots, 5$) 的关联度, 以 2 级指标 B_3 为例, 公式为

$$K_j(B_3) = \sum_{i=7, 8, \dots, 15}^n w_{C_i} K_j(c_i) \quad (14)$$

式中: w_{C_i} 为各 3 级评价指标的权重。若有

$$K_{j_0}(B_3) = \max_{j_0 \in (1, 2, \dots, 5)} K_j(B_3) \quad (15)$$

则评定得出该 2 级指标下, 功能损失程度的工程易损性等级。2 级指标 B_4 、 B_5 的等级同理可得。由此, 确定一级指标 A_2 的工程易损性等级, 即

$$K_j(A_2) = \sum_{m=3, 4, 5}^n w_{B_m} K_j(B_m) \quad (16)$$

$$K_{j_0}(A_2) = \max_{j_0 \in (1, 2, \dots, 5)} K_j(A_2) \quad (17)$$

式中: w_{B_m} 为各 2 级指标权重。

由于可拓物元分析法算得的关联函数值可能存在负值, 这与模糊综合评价所得的隶属度向量不同。为方便对比两种模型下评价出的工程易损性等级, 本文将在算得 A_2 的关联函数值 $K_{j_0}(A_2)$ 后, 对其进行加权归一化, 即可得关联函数值组成的向量 V_{A_2} , 从而确定功能损失程度下的工程易损性。

3.4 确定指标权重

本文基于层次分析法^[17], 通过引入适当的判断标度, 互相比各因素两两之间的重要度, 并以数值形式表示。根据 Saaty 的 1~9 标度方法^[17]对各因素进行打分, 建立指标因子判别矩阵, 在判别矩阵的随机一致性满足要求的情况下, 得到的 2 级、3 级指标权重见表 3。

表 3 各级指标权重
Table 3 Weights of all levels' index

2 级 指标	权重	3 级 指标	权重	3 级 指标	权重	3 级 指标	权重
B_1	0.29	C_1	0.32	C_2	0.56	C_3	0.12
B_2	0.16	C_4	0.44	C_5	0.24	C_6	0.32
B_3	0.17	C_7	0.33	C_8	0.33	C_9	0.34
B_4	0.16	C_{10}	0.42	C_{11}	0.22	C_{12}	0.36
B_5	0.22	C_{13}	0.57	C_{14}	0.29	C_{15}	0.14

4 工程实例应用

4.1 隧道工程易损性评价实例

4.1.1 卓福泥石流对隧道工程危害

卓福铁路隧道地处焦柳铁路 K996+654.6~K996+750.4, 位于湖南省武陵山区, 东经 109°35'~110°23'E, 北纬 28°42'~29°27'N。2003 年 7 月 8 日至 7 月 10 日, 武陵山区过程总降雨量达 650 mm, 其中 7 月 9 日降水量达 440 mm, 凌晨 3 时的降雨强度为 60 mm/h, 达历史极值^[15]。

暴雨引发强大的泥石流, 一次性冲出约 30 万方固体物质, 掩埋卓福铁路隧道 (如图 4、5 所示), 造成铁路通信系统中断, 行车中断 173.6 h, 造成重大损失。



图 4 卓福泥石流暴发后地貌

Fig.4 Geomorphology after Zhuofu debris flow



图 5 泥石流淤埋的卓福隧道

Fig.5 Zhuofu tunnel blocked by debris flow

4.1.2 研究区调查概况

卓福泥石流是坡面泥石流, 强降雨是其诱发因素, 其危害方式以淤堵为主, 泥石流与暴雨同频, 即泥石流的暴发频率为 0.01 次/a, 据 3 级评价指标体系内容, 调查结果见表 4。

4.2 桥梁工程易损性评价实例

4.2.1 四川冕宁泥石流对桥梁工程危害

雅 (安) — 泸 (沽) 高速公路沿线某泥石流沟

表 4 卓福泥石流和卓福隧道参数调查结果^[12, 15]
Table 4 Investigation results of Zhuofu debris flow and Zhuofu tunnel^[12, 15]

调查因素	调查结果
C ₁	78°
C ₂	较近, 不利于泥石流排泄, 并会导致强烈的冲击与冲刷破坏
C ₃	沟道曲率较小, 横断面较大, 沟床比降变化较小
C ₄	单拱通行, 横断面宽 5.7 m
C ₅	衬砌材料耐久性较好、强度高
C ₆	围岩级别IV
C ₇	隧道入口被大面积堵塞
C ₈	未设置有效的防治措施
C ₉	受淤积作用
C ₁₀	客货流密度一般, 在路网中起联络作用的 2 级铁路
C ₁₁	资金较匮乏, 监管落后, 间隔很久才做养护维修工作
C ₁₂	惊动国务院安委会, 并启动 I 级应急响应
C ₁₃	交通中断超过一周, 对铁路客货运输造成严重干扰
C ₁₄	抢修难度大, 周边地区较难支援, 较难调集抢修设备和物资
C ₁₅	需要清理疏通隧道并耗资修复中断的通信系统

位于安宁河支流右岸, 地处四川冕宁, 地理位置 102°15'32"E, 28°31'76"N。2011 年 6 月 16 日, 四川省凉山州局部地方遭受特大暴雨袭击, 据冕宁县气象局提供的资料, 仅 22:00 至 23:00 时段的降雨量即达 101 mm (超百年一遇), 暴雨造成雅泸高速公路该段多处泥石流暴发。

其中, 该沟道附近的安宁河桥遭受此次泥石流危害 (如图 6、7 所示), 墩台基础遭受冲击, 结构受损, 且桥孔淤堵较为严重。

4.2.2 研究区调查概况

根据现场调查及灾情统计, 按指标体系各项内容, 安宁河桥遭受泥石流危害的调查结果如表 5 所示。



图 6 安宁河桥受泥石流冲刷致淤堵
Fig.6 Anninghe bridge impacted and blocked by debris flow



图 7 墩台受冲击破坏但桥面通行仍可维持
Fig.7 Traffic function of bridge fairly maintained with piers being impacted by debris flow

表 5 雅泸路安宁河桥参数调查结果
Table 5 Investigation results of Anninghe bridge in Yalu highway

调查因素	调查结果
C ₁	81°
C ₂	较不合理, 不利于泥石流排泄, 并易导致冲击与冲刷破坏
C ₃	沟道曲率及比降变化率较大, 沟床横断面较小
C ₄	桥梁孔跨数目为 5, 跨度较小, 显著压缩沟床, 墩台结构受强烈冲击作用
C ₅	墩台基础埋深较浅, 防淤结构设计较差, 桥墩迎水面材料耐磨性较差, 抗冲击力较弱
C ₆	桥下净空 6 m, 对泥石流过流能力有一定影响, 桥孔易受淤堵
C ₇	桥墩迎水面遭受一定的磨蚀, 护锥有部分损坏
C ₈	防治措施起了一定的防护作用, 减缓了泥石流冲击力
C ₉	受泥石流冲刷、淤积共同作用
C ₁₀	客货流密度较大的西部地区高速公路
C ₁₁	资金较充裕, 能定期针对桥面及桥台做好养护维修工作
C ₁₂	现场就地进行结构加固和防护, 较快恢复通车使用
C ₁₃	交通未长时间中断, 桥面通行情况基本正常
C ₁₄	抢修难度较小, 周边地区支援较好, 能较快调运物资设备
C ₁₅	需要清理、疏通桥孔, 并对墩台进行修理和加固

4.3 评价结果及讨论

4.3.1 工程易损性评价结果

基于结构和功能双重评判, 根据指标参数调查结果, 由评价模型中式 (1)~(17), 分别对卓福隧道、雅泸高速安宁河桥进行工程易损性评价。

以卓福隧道为例, 通过模糊综合评价计算, 所得隶属度向量为 [0, 0.215 9, 0.211 0, 0.522 8, 0.044 2]。由式 (3) 可知, 其结构损毁程度评判下的工程易损性等级为低度。同时, 通过可拓物元分析法计算, 其关联函数值为 [0.297 4, 0.315 1, 0.245 1, 0.142 5, 0], 故其功能程度评判下的工程易损性等级为高度。本文计算结果与评价结果对比见表 6、7。

表 6 工程易损性评价计算结果
Table 6 Calculation results of engineering vulnerability assessment

评价对象	评判标准	评价模型	评价计算结果
隧道工程易损性	结构损毁程度	模糊评价法	隶属度向量 [0, 0.215 9, 0.211 0, 0.522 8, 0.044 2]
	功能损失程度	物元分析法	关联函数值 [0.297 4, 0.315 1, 0.245 1, 0.142 5, 0]
桥梁工程易损性	结构损毁程度	模糊评价法	隶属度向量 [0, 0.488 2, 0.383 9, 0.044 2, 0.083 8]
	功能损失程度	物元分析法	关联函数值 [0, 0.134 4, 0.255 2, 0.371 2, 0.239 2]

表 7 基于结构与功能双重评判的桥隧工程易损性评价结果对比
Table 7 Results comparison of bridge and tunnel engineering vulnerability assessment based on the assessing differences of structure and function evaluation factors

评价对象	工程易损性等级		现场实际灾情
	结构损毁程度评判	功能损失程度评判	
卓福铁路隧道	低度易损性	高度易损性	隧道结构受损较轻，但隧道洞门被堵塞，导致通车及通信中断达 173.6 h，国务院启动 I 级应急响应，经济损失较严重
雅泸路安宁河桥	高度易损性	低度易损性	桥梁墩台受冲击，护锥结构损坏，桥孔淤堵，但车辆、行人可限载限速通过桥面，交通在受灾后 12 h 内迅速恢复，经济损失较轻

4.3.2 评价结果的讨论分析

(1) 隧道工程易损性评价实例结果分析

在结构损毁程度评判下，工程易损性为低度易损，这表明该隧道对泥石流造成其结构破坏的抵御能力较好，这也与文献[12]基于单一结构损毁程度的评价结果一致；但在功能损失评判下，工程易损性为高度易损，这与隧道受灾导致交通长时间中断，通车通信遭严重破坏等现场实际灾情更为相符。

(2) 桥梁工程易损性评价实例结果分析

在结构评判下为高度易损，而在功能评判下则为低度易损。这与雅泸路安宁河桥在受灾后，公路管理部门及时做好结构修复和防护，并酌情采用限载、限速等手段维持桥面交通功能，缓解对运输秩序的影响。

在以往的工程易损性评价中，评估重心在结构损毁程度，而对功能损失的评判重视不足，故容易造成对诸如卓福隧道案例“功能丧失而结构受损较轻”受灾工况的“轻”判，与诸如安宁河桥案例“功能尚可而结构损毁较重”受灾工况的“重”判。

从评价结果的指导作用上分析，结构损毁程度评判主要用作指导土木工程基础设施的设计施工、维修加固等；而功能损失程度评判则主要用作指导恢复交通、评估损失等，二者指导方向不同。故不应偏倚于结构评判，以免使结构受损较轻，但功能严重受损的工况得不到重视；或使结构有损坏，而功能受损不严重的工况，在可做好加固和防护的前提下，未及时采取限载、限速等恢复交通，给运输造成沉重负担。因此，工程易损性评价将二者同时考虑，不仅能丰富和发展其内涵，更能全面、合理

地反映出现场实际灾情，进而帮助职能部门提前预判灾情或迅速响应，制定更有针对性的处置措施，并对防治措施优化设计、应急预案部署提供参考。

5 结 论

本文在原有结构损毁程度评判的基础上，通过增加功能评判，使泥石流危害桥隧工程易损性评价得到了发展；采用可拓物元分析法评价模型，使可循规范标准较少的功能评判达到量化计算的程度；评价结果与现场实际灾情更为相符，可为灾后响应和灾前部署提供参考。主要结论如下：

(1) 在结构评判基础上，为表达桥隧工程因受灾方式与种类、所属铁（公）路重要性与等级、修复难度与代价等因素的不同，在使用功能损失程度上所表现出的差异性，增加了“承灾特征、线路规格、恢复成本”等指标，形成了基于结构损毁与功能损失双重评判的指标选取标准。

(2) 鉴于结构损毁程度指标有相关设计、施工规范可循，评价模型沿用模糊矩阵计算隶属度向量；而功能损失程度指标可参考的规范标准较少，指标隶属度不确定性较大，故采用更适合于分析指标从属关系的可拓物元分析法计算关联度，使功能评判达到了量化计算的程度。

(3) 仅按结构损毁程度评判工程易损性，会导致诸如隧道受灾时“功能丧失而结构受损较轻”工况被轻判；或桥梁受灾时“功能尚可而结构受损较重”工况被重判。这可能会误导桥隧工程灾后服役状态的判定与灾情的识别。由此，提出在结构评判基础上，增加功能评判的工程易损性评价理念。

(4) 隧道、桥梁工程易损性评价实例在结构评判下分别为低度、高度易损, 而功能评判下则分别为高度、低度易损。对比发现, 增加功能评判后, 能够更加全面、合理地反映现场实际灾情。本文丰富和发展了工程易损性评价的内涵, 可为灾情预判或灾后响应、调整防灾减灾措施、部署应急预案等工作提供参考。

参考文献

- [1] 刘希林, 莫多闻, 王小丹. 区域泥石流易损性评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(2): 7—11.
LIU Xi-lin, MO Duo-wen, WANG Xiao-dan. Regional vulnerability assessment of debris flows[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2001, 12(2): 7—11.
- [2] MASKREY A. Disaster mitigation: A community based approach(development guidelines 3rd version)[M]. Oxford: Oxfam Press, 1989: 1—100.
- [3] DEYLE R E, FRENCH S P, OLSHANSKY R B, et al. Hazard assessment: The factual basis for planning and mitigation[C]//Cooperating with Nature: Confronting Natural Hazards with Land-Use Planning for Sustainable Communities. Washington D. C.: Joseph Henry Press, 1988: 119—166.
- [4] United Nations, Department of Humanitarian Affairs. Internationally agreed glossary of basic terms related to disaster management[M]. New York: Geneva Press, 1992: 1193—1196.
- [5] JAKOB M, STEIN D, ULMI M. Vulnerability of buildings to debris flow impact[J]. **Nature Hazards**, 2012, 60(3): 241—261.
- [6] WEICHSELGARTNER J, BERTENS J. Natural disasters: Acts of god, nature or society[C]//Risk Analysis II. Southampton: WIT Press, 2000: 3—12.
- [7] FUCHS S, HEISS K, HÜBL J. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment[J]. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 2007, 35(7): 495—506.
- [8] WISNER B. Assessment of capability and vulnerability[C]//Mapping Vulnerability. London: Earthscan Press, 2004: 183—193.
- [9] 赵源, 刘希林. 泥石流灾害损失评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(3): 21—24.
ZHAO Yuan, LIU Xi-lin. Assessment on debris flow disaster losses[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2005, 16(3): 21—24.
- [10] 刘希林, 莫多闻. 泥石流风险及沟谷泥石流风险度评价[J]. 工程地质学报, 2002, 10(3): 266—274.
LIU Xi-lin, MO Duo-wen. Debris flow risk and site-specific debris flow risk assesement[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2002, 10(3): 266—274.
- [11] 刘希林, 莫多闻. 泥石流易损度评价[J]. 地理研究, 2002, 21(5): 569—575.
LIU Xi-lin, MO Duo-wen. Site-specific debris flow vulnerability assessment[J]. **Geographical Research**, 2002, 21(5): 569—575.
- [12] 徐林荣, 王磊, 苏志满. 隧道工程遭受泥石流灾害工程易损度评价[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2153—2159.
XU Lin-rong, WANG Lei, SU Zhi-man. The assessment of the engineering vulnerability of the tunnel suffering from debris flow[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 2153—2159.
- [13] 丁继新, 杨志法, 尚彦军, 等. 区域泥石流灾害的定量风险分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(7): 1071—1076.
DING Ji-xin, YANG Zhi-fa, SHANG Yan-jun, et al. Quantitative risk analysis of regional debris flow hazards[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(7): 1071—1076.
- [14] 徐林荣, 韩征, 苏志满, 等. 泥石流流速横向分布特征与防治工程结构优化[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3715—3728.
XU Lin-rong, HAN Zheng, SU Zhi-man, et al. Research on lateral distribution features of debris flow velocity and structural optimization of prevention and control works[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3715—3728.
- [15] 阮波, 肖武权. 卓福泥石流成因分析和减灾措施[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 12(4): 437—440.
RUAN Bo, XIAO Wu-quan. The cause and controlling countermeasures of Zhuofu debris flow[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2005, 12(4): 437—440.
- [16] 蔡文. 可拓论及其应用[J]. 科学通报, 1999, 44(7): 673—682.
CAI Wen. Extension theory and its application[J]. **Chinese Science Bulletin**, 1999, 44(7): 673—682.
- [17] SAATY T L. The analytic hierarchy process[M]. New York: McGraw Hill, 1980: 30—75.