

唐红梅, 韩明明, 王林峰. 基于 AHP - Fuzzy 法的灰岩地区崩塌体失稳危险性评价[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 1 - 7. [TANG Hongmei, HAN Mingming and WANG Linfeng. Hazard assessment of collapsed rock mass in limestone area based on AHP-Fuzzy method[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 1 - 7. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.001.]

# 基于 AHP-Fuzzy 法的灰岩地区崩塌体失稳危险性评价<sup>\*</sup>

唐红梅, 韩明明, 王林峰

(重庆交通大学 山区公路水运交通地质减灾重点实验室, 重庆 400074)

**摘 要:** 危岩崩塌体的形成是多种影响因素综合作用的结果, 且影响因素具有复杂性与模糊性的特点。基于 AHP 法, 通过分析影响三峡库区灰岩地区崩塌体发育的各种因素, 选取地形和地质条件、崩塌体几何特征及其他 3 个因素作为准则层, 遴选出陡崖高度、陡崖结构特征、陡崖所处地质构造、崩塌体规模、主控结构面倾角、主控结构面贯通度、日最大降雨量、风化作用、地震烈度及人类工程活动等 10 个评价指标作为子准则层, 构成了 AHP 法的层次结构, 建立了危险性评价指标体系。将层次分析法和模糊综合评价法有机结合, 构建了三峡库区灰岩地区崩塌体危险性模糊综合评价模型。通过工程实例磨子岩 W1, W2, W3 三个危岩体对该评价模型进行了检验, 磨子岩危岩危险性评价结果符合磨子岩危岩整体稳定性较差, 已经发生部分崩塌, 危险性极大的客观实际, 表明构建的三峡库区灰岩地区崩塌体危险性评价模型具有较好的适用性。

**关键词:** 崩塌体; 影响因素; 层次分析法; 模糊综合评价法; 危险性评价

**中图分类号:** X43; X915.5; P642      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-811X(2019)03-0001-07  
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.001

危岩崩塌是三峡库区主要地质灾害之一。在河流沿岸、公路和铁路沿线、城镇和农村居民区附近发生的危岩崩塌往往严重威胁着人民群众的生命财产安全。2017 年 1 月 20 日, 湖北省南漳县城关镇便河村发生突发性山体崩塌, 崩塌体约 3 000 m<sup>3</sup>, 导致一家度假酒店部分建筑被压垮, 造成 12 人死亡。2017 年 8 月 28 日, 贵州省纳雍县张家湾镇普洒社区发生山体崩塌地质灾害, 灾害造成 17 人死亡, 8 人受伤, 18 人失联。2018 年 8 月 11 日北京市房山区大安山乡军红路 K19+300 m 处山体发生 1 起崩塌灾害, 崩塌方量约 3 万 m<sup>3</sup>, 由于应对及时, 未造成人员伤亡及车辆损失。因此对危岩崩塌体进行危险性评价具有重要的现实意义。

通过对危岩崩塌体破坏机制的研究, 可以找出和崩塌体发育有关的影响因素。贺凯等人通过离心模型试验, 研究了危岩崩塌启动机制, 量化验证了影响甑子岩危岩失稳的关键因素<sup>[1]</sup>。曾芮通过 ABAQUS 数值模拟软件, 对鄂西赵家岩崩塌的变形破坏机理进行了研究<sup>[2]</sup>。黄达采用 UDEC 离散元软件模拟研究了软弱基座风化深度对危岩变形破坏过程及机制的影响规律<sup>[3]</sup>。李满意以重庆市万盛经开区刀子岩为地质原型, 分析了该陡崖带变形机制, 并提出了该陡崖带的失稳判据<sup>[4]</sup>。许家美通过对重庆涪陵区创新计算机学校危岩的基本特征、破坏方式及形成机制的研究, 发现其破坏类型有坠落式、倾倒式及滑塌式 3 种, 且存在链式反应<sup>[5]</sup>。现阶段, 对地质灾害中的滑坡、泥

石流的危险性评价的研究较多, 对危岩崩塌灾害的危险性评价的研究较少。在危险性评价的方法上, 早期以定性研究为主, 随着研究的不断深入, 越来越多的数学模型被应用到危岩体的危险性评价上。董好刚等利用了层次分析法评价了三峡库区云阳到江津段危岩的稳定性<sup>[6]</sup>。叶四桥等结合了层次分析法和模糊综合评价法的优点, 提出了 AHP-Fuzzy 综合评价方法, 并对万州首立山危岩进行了危险性评价<sup>[7]</sup>。唐红梅等运用范数灰色理论评价了三峡库区危岩形成的影响因素<sup>[8]</sup>。刘晓然等应用可变模糊集理论对地震崩塌危险性进行了评价, 通过与其他方法计算结果的对比, 表明可变模糊集方法在地震崩塌危险性评价上有更好的适用性<sup>[9]</sup>。牛全福等分别利用了概率指数法、信息量法和 Logistic 回归模型对兰州地区的地质灾害进行了危险性分区评价, 并比较了概率指数模型、信息量模型及 Logistic 回归模型三种模型的评价精度<sup>[10]</sup>。王雷等运用层次分析综合指数法对襄渝铁路(胡家营-万源段)各类型单个地质灾害隐患点进行了危险性评价, 并运用模糊综合评判法, 对襄渝铁路(胡家营-万源段)全线地质灾害进行了危险性分区评价<sup>[11]</sup>。齐洪亮等基于区域影响因素叠加理论, 利用 GIS 完成了陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价<sup>[12]</sup>。本文基于三峡库区灰岩地区崩塌体形成条件、变化规律及发育演

\* 收稿日期: 2019-01-14      修回日期: 2019-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378521, 51678097)

第一作者简介: 唐红梅(1968-), 女, 重庆人, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为岩土工程与地质工程。

E-mail: hmtang6778@sina.com

变趋势, 遴选危险性影响因子, 利用层次分析法和模糊综合评价法构建崩塌体危险性评价指标体系和危险性评价模型。利用层次分析法确定评价指标的权重系数, 利用模糊综合评判法中的单因素评判确定评价指标的隶属度, 运用工程实例检验危险性评价模型的适用性。

## 1 崩塌体危险性影响因子遴选

崩塌体的危险性评价是在查清地质灾害活动历史, 形成发育条件及可变因素导致的演化发展趋势的基础上, 对地质灾害活动和危险能力的分析评判。影响崩塌体危险性的因子众多, 可分为内在因子和外在因子两类, 内在因子如陡崖高度、陡崖结构特征、陡崖所处地质构造、崩塌体规模、崩塌体主控结构面特征等, 外在因子如降雨、岩石风化、地震烈度及人类工程活动等。崩塌体的形成和破坏是内外影响因子共同作用的结果, 在综合分析影响崩塌体危险性的各种因子的基础上, 本文遴选出了 10 个影响因子。

### 1.1 陡崖高度

地质调查结果表明, 危岩发育与崩塌多发生在峡谷地带、分水岭地带、库岸地区及陡高边坡地区。被切割形成的陡崖会导致应力重分布, 在崖肩位置形成拉应力集中, 在崖脚位置形成剪应力集中。随陡崖高度的增加, 应力集中会线性增长。

### 1.2 陡崖结构特征

三峡库区危岩崩塌体主要发育于灰岩等脆性硬岩中。陡崖岩体节理裂隙发育, 并且存在临空面, 极易形成崩塌。灰岩等硬岩层下部往往存在脆弱的页岩或泥岩软弱层或煤层采空区。在上部岩体长期的重力作用下, 软弱夹层发生塑性变形, 导致上部岩体产生拉张裂隙, 进而形成崩塌。

### 1.3 陡崖所处地质构造

各种地质构造对危岩崩塌体发育的影响是不同的。①背斜核部, 由于岩层发生强烈弯曲, 曲率最大处的岩层更容易发生断裂, 在垂直岩层的方向, 由于岩层受到张力作用, 还会发育大量的张裂隙, 导致岩层变得更加破碎, 进而容易形成崩塌体。②断层带由于岩体变得十分破碎, 岩体被切割成了大大小小的块体, 而且断裂破碎带有利于地表水的入渗, 软化岩体, 更容易形成崩塌体。③褶皱两翼的岩层呈单斜状, 并且岩层的倾向平行于边坡的倾向时, 易产生滑塌式崩塌, 滑移面常为岩层面、错动面或软弱夹层。

### 1.4 崩塌体规模

与崩塌体稳定性计算有关的力如地震力、重力等与崩塌体的规模正相关, 地震力和重力可以分解成崩塌体主控结构面上的正应力、剪应力及崩塌体主控结构面尖端产生的弯矩。崩塌体规模越大, 相应的主控结构面上的正应力、剪应力越大, 崩塌体越容易发生失稳, 危害程度越大。

### 1.5 崩塌体主控结构面贯通与倾角

崩塌体主控结构面特征对崩塌体的稳定性具有重要的控制作用。崩塌体主控结构面贯通深度、张开度及倾角与崩塌体的稳定性密切相关。崩塌体主控结构面切割越深, 产生的裂隙水压力作用

在主控结构面上导致崩塌体越容易失稳。崩塌体主控结构面的倾角大小直接影响到崩塌体的失稳模式, 倾角缓时可能形成滑塌式崩塌, 倾角较大时可能形成倾倒式崩塌。故选取崩塌体主控结构面的倾角、主控结构面贯通度作为崩塌体危险性影响因子。

### 1.6 降雨的影响

暴雨季节大量降雨容易形成大的静、动裂隙水压力, 同时入渗的裂隙水会对结构面的充填物起软化作用, 同时会软化危岩崩塌体基座软岩, 导致岩体强度参数显著降低, 加剧崩塌体的急剧变形甚至破坏。灰岩地区陡崖崩塌体岩性一般为硬岩灰岩, 崩塌体基座岩性一般为软岩泥灰岩或泥岩, 地层多属易溶性碳酸盐类, 降雨会造成灰岩岩溶, 形成溶隙, 溶孔, 加速地表水的入渗。

### 1.7 风化作用

风化作用会导致陡崖上的岩体变得破碎、疏松, 使裂隙进一步扩展。由于陡崖属于硬岩灰岩, 崖脚属于软岩泥灰岩或泥岩, 岩体差异风化后形成岩腔。随着时间的推移, 崖脚岩腔进一步扩展致使崖脚有效应力面积减小, 加剧主控结构面进一步扩展, 进而容易发生崩塌<sup>[13]</sup>。

### 1.8 地震作用

地震波横波和纵波形成的水平地震力和垂直地震力对陡崖上的崩塌体影响力大小与崩塌体的自重和地震力影响系数有关。垂直地震力使崩塌体变得更加破碎, 水平地震力施加崩塌体是一个指向坡外的力, 使崩塌体更容易失稳。当地震加速度超过崩塌体的临界加速度时, 崩塌体主控结构面的裂缝会失稳扩展, 裂缝扩展的长度与地震输入的能量有关。地震荷载对崩塌体作用的时间越长, 裂缝扩展的累积长度也就越长<sup>[14]</sup>, 崩塌体越容易发生崩塌。当崩塌体固定, 地震力对崩塌体的影响大小与地震烈度密切相关。

### 1.9 人类工程活动

人类工程活动是危岩崩塌体形成和发生崩塌的一个重要的诱因, 如人工爆破、不合理的开挖及地下采矿等都将影响到危岩崩塌体的稳定性。三峡库区灰岩地区的典型危岩崩塌体如重庆武隆鸡尾山崩塌体和合川磨子岩危岩崩塌体失稳均与地下采矿活动有着极大的关联, 地下采矿开挖活动导致了上部岩体应力调整与重分布, 加速了危岩崩塌体的变形, 最终导致了崩塌的发生。

## 2 崩塌体危险性评价模型建立

根据三峡库区灰岩地区崩塌体发育和发生破坏的机理, 结合相关危岩体危险性评价研究文献, 遴选出对崩塌体发生破坏产生较大影响的陡崖高度、陡崖结构特征、陡崖所处地质构造、崩塌体规模、主控结构面倾角、主控结构面贯通度、日最大降雨量、风化作用、地震烈度及人类工程活动 10 个影响因子构成三峡库区灰岩地区崩塌体危险性模糊综合评价指标体系。

### 2.1 AHP 法确定评价指标权重系数

#### 2.1.1 建立评价层次结构图

由于遴选的 10 个影响因子对崩塌体危险性的

影响属于非线性影响,运用美国运筹学家匹茨堡大学教授萨蒂的 AHP 法构建了图 1 所示的评价层次结构图。目标层为崩塌体危险性评价,准则层为地形和地质条件、崩塌体几何特征及其他因素,子准则层为遴选的 10 个影响因子。

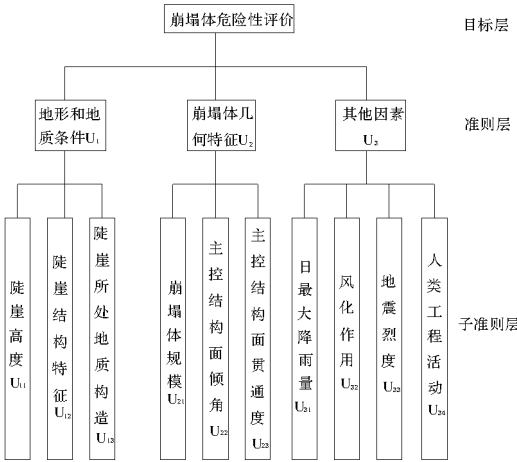


图 1 层次结构图

2.1.2 评价指标权重系数的确定

利用专家系统法构造其判断矩阵,并对判断矩阵进行一致性检验。

一致性检验公式:

$$CR = \frac{CI}{RI}。$$
(1)

式中:  $CR$  为判断矩阵的随机一致性比率;  $CI$  为判断矩阵的一致性指标;  $RI$  为判断矩阵的平均随机一致性指标; 当  $CR < 0.1$  时,表明判断矩阵具有较好的一致性,权重系数的分配较为合理,否则需要调整判断矩阵,直至满足一致性标准。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}。$$
(2)

式中:  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征根,  $n$  为判断矩阵的阶数。  $RI$  由大量实验给出,对于低阶的判断矩阵,其取值见表 1。

表 1 AHP 平均随机一致性指标值表

$n$	1	2	3	4	5	6
$RI$	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24
$n$	7	8	9	10	11	12
$RI$	1.32	1.14	1.45	1.49	1.52	1.54

计算结果如下:

(1)构建准则层  $U_1 \sim U_3$  判断矩阵(表 2),通过计算得到  $\lambda_{\max} = 3.054$ ,  $CI = 0.027$ ,  $CR = 0.047 < 0.1$ ,满足一致性检验,所取权重系数符合要求。得到地形和地质条件的权重系数为 0.311,崩塌体几何特征的权重系数为 0.493,其他因素的权重系数为 0.196。

表 2  $U_1 \sim U_3$  判断矩阵

$U_i$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$W_i$
$U_1$	1	1/2	2	0.311
$U_2$	2	1	2	0.493
$U_3$	1/2	1/2	1	0.196

(2)构建地形和地质条件  $U_{11} \sim U_{13}$  判断矩阵(表 3),通过计算得到  $\lambda_{\max} = 3.009$ ,  $CI = 0.005$ ,  $CR = 0.041 < 0.1$ ,满足一致性检验,所取权重系数符合要求。得到陡崖高度的权重系数为 0.540,陡崖结构特征的权重系数为 0.297,陡崖所处地质构造的权重系数为 0.163。

表 3  $U_{11} \sim U_{13}$  判断矩阵

$U_{1i}$	$U_{11}$	$U_{12}$	$U_{13}$	$W_i$
$U_{11}$	1	2	3	0.540
$U_{12}$	1/2	1	2	0.297
$U_{13}$	1/3	1/2	1	0.163

(3)构建崩塌体几何特征  $U_{21} \sim U_{23}$  判断矩阵(表 4),通过计算得到  $\lambda_{\max} = 3.009$ ,  $CI = 0.005$ ,  $CR = 0.041 < 0.1$ ,满足一致性检验,所取权重系数符合要求。得到崩塌体规模的权重系数为 0.163,主控结构面倾角的权重系数为 0.297,主控结构面贯通度的权重系数为 0.540。

表 4  $U_{21} \sim U_{23}$  判断矩阵

$U_{2i}$	$U_{21}$	$U_{22}$	$U_{23}$	$W_i$
$U_{21}$	1	1/2	1/3	0.163
$U_{22}$	2	1	1/2	0.297
$U_{23}$	3	2	1	0.540

(4)构建其他因素  $U_{31} \sim U_{34}$  判断矩阵(表 5),通过计算得  $\lambda_{\max} = 4.088$ ,  $CI = 0.029$ ,  $CR = 0.032 < 0.1$ ,满足一致性检验,所取权重系数符合要求。得到日最大降雨量的权重系数为 0.422,风化作用的权重系数为 0.119,地震烈度的权重系数为 0.180,人类工程活动的权重系数 0.279。

表 5  $U_{31} \sim U_{34}$  判断矩阵

$U_{3i}$	$U_{31}$	$U_{32}$	$U_{33}$	$U_{34}$	$W_i$
$U_{31}$	1	4	3	2	0.422
$U_{32}$	1/4	1	1/2	1/3	0.119
$U_{33}$	1/3	2	1	1/2	0.180
$U_{34}$	1/2	3	2	1	0.279

综合表 2 至表 5,获得准则层与子准则层各影响因子的权重系数,列表总结如表 6 所示。

层次总排序:  $CR = \frac{\sum_{j=1}^m a_j CI_j}{\sum_{j=1}^m a_j RI_j} = 0.015 < 0.1$ , 满

足一致性的要求。

2.1.3 评价指标分级体系

根据崩塌体危险性的不同,将危险性级别分为危险性小(Ⅰ)、危险性中(Ⅱ)、危险性大(Ⅲ)和危险性极大(Ⅳ)4 个级别,将遴选的 10 个子准则层影响因子利用专家系统进行指标四级分级,同时部分指标的分级参考了重庆市地方标准<sup>[15]</sup>,构建了危险性评价指标分级表,如表 7 所示。

2.2 模糊综合评价评价集的确立

将崩塌体的危险性等级划分为危险性小、危险性中、危险性大及危险性极大 4 个级别。即  $V = (V_1, V_2, V_3, V_4) = (Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ) = (\text{危险性小}, \text{危险性中}, \text{危险性大}, \text{危险性极大})$ 。

表 6 准则层与子准则层各影响因子的权重系数

目标层	准则层	权重系数	子准则层	权重系数
崩塌体危险性评价	地形和地质条件 $U_1$	0.311	陡崖高度 $U_{11}$	0.540
			陡崖结构特征 $U_{12}$	0.297
			陡崖所处地质构造 $U_{13}$	0.163
	崩塌体几何特征 $U_2$	0.493	崩塌体规模 $U_{21}$	0.163
			主控结构面倾角 $U_{22}$	0.297
			主控结构面贯通度 $U_{23}$	0.540
	其他因素 $U_3$	0.196	日最大降雨量 $U_{31}$	0.422
			风化作用 $U_{32}$	0.119
			地震烈度 $U_{33}$	0.180
			人类工程活动 $U_{34}$	0.279

表 7 危险性评价指标分级

评价指标	代号	危险等级			
		危险性小(Ⅰ)	危险性中(Ⅱ)	危险性大(Ⅲ)	危险性极大(Ⅳ)
陡崖高度/m	$U_{11}$	< 15	[15, 50)	[50, 100)	$\geq 100$
陡崖结构特征	$U_{12}$	无软弱结构面	倾向坡内软弱结构面	水平软弱结构面	倾向坡外软弱结构面
陡崖所处地质构造	$U_{13}$	水平岩层	反倾岩层	顺层岩层	背斜核部或断裂带
崩塌体规模/(万 m <sup>3</sup> )	$U_{21}$	[0, 1)	[1, 10)	[10, 100)	$\geq 100$
结构面倾角/(°)	$U_{22}$	[0, 45)	[45, 60)	[60, 75)	[75, 90]
结构面贯通度	$U_{23}$	[0, 0.25)	[0.25, 0.5)	[0.5, 0.75)	[0.75, 1]
日最大降雨量/mm	$U_{31}$	[0, 10)	[10, 25)	[25, 50)	$\geq 50$
风化作用	$U_{32}$	未风化	微风化	中风化	强风化
地震烈度	$U_{33}$	$\leq V$	Ⅵ	Ⅶ	$\geq Ⅷ$
人类工程活动	$U_{34}$	无人类活动	受到人类工程活动的影响较弱, 如少量开挖	受到人类工程活动的影响一般, 如修路	受到人类工程活动的影响强烈, 如采矿, 爆破

2.3 模糊综合评价隶属度函数的建立

评价指标隶属度的确定是模糊综合评判中单因素评判的十分关键的一步。危险性评价指标分为两类：定性指标和定量指标。定性指标隶属度的确定常采用经验赋值的方法，如德尔菲法，定量指标的隶属度通过构造隶属函数的方法求得。

本文定量指标隶属度的确定采用在评价中被广泛应用的“降半梯形”分布的隶属度函数形式，表达式(3)~式(6)：

$$u_1(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a_1; \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1}, & a_1 < x \leq a_2; \\ 0, & x > a_2。 \end{cases} \tag{3}$$

$$u_2(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_1 \text{ 或 } x \geq a_3; \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 < x \leq a_2; \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 < x < a_3。 \end{cases} \tag{4}$$

$$u_3(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_2 \text{ 或 } x \geq a_4; \\ \frac{x - a_2}{a_3 - a_2}, & a_2 < x \leq a_3; \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3}, & a_3 < x < a_4。 \end{cases} \tag{5}$$

$$u_4(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_3; \\ \frac{x - a_3}{a_4 - a_3}, & a_3 < x \leq a_4; \\ 1, & x > a_4。 \end{cases} \tag{6}$$

式中： $u_i(x)$ 为各评价指标的隶属函数， $x$ 为评价指标的实测值， $a_1 = A_1$ ， $a_2 = (A_1 + A_2)/2$ ， $a_3 = (A_2 + A_3)/2$ ， $a_4 = A_3$ ， $A_1, A_2, A_3$ 为评价指标对应崩塌体危险性等级从低到高的的分级阈值。隶属度函数示意图如图 2 所示。

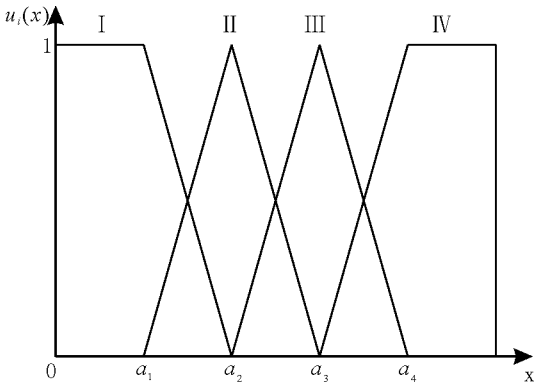


图 2 隶属度函数示意图

定性指标(陡崖结构特征、陡崖所处地质构造、风化作用、人类工程活动)的隶属度，根据评价分级标准，采用专家经验法，直接赋值，如表 8 所示。

表 8 危险性评价定性指标量化表				
陡崖结构特征 $U_{12}$	无软弱结构面	倾向坡内软弱结构面	水平软弱结构面	倾向坡外软弱结构面
隶属度	$U_I = 1, U_{II} = 0,$ $U_{III} = 0, U_{IV} = 0$	$U_I = 0, U_{II} = 1,$ $U_{III} = 0, U_{IV} = 0$	$U_I = 0, U_{II} = 0,$ $U_{III} = 1, U_{IV} = 0$	$U_I = 0, U_{II} = 0,$ $U_{III} = 0, U_{IV} = 1$
陡崖所处地质构造 $U_{13}$	水平岩层	反倾岩层	顺层岩层	背斜核部或断裂带
隶属度	$U_I = 1, U_{II} = 0,$ $U_{III} = 0, U_{IV} = 0$	$U_I = 0, U_{II} = 1,$ $U_{III} = 0, U_{IV} = 0$	$U_I = 0, U_{II} = 0,$ $U_{III} = 1, U_{IV} = 0$	$U_I = 0, U_{II} = 0,$ $U_{III} = 0, U_{IV} = 1$
风化作用 $U_{32}$	未风化	微风化	中风化	强风化
隶属度	$U_I = 1, U_{II} = 0,$ $U_{III} = 0, U_{IV} = 0$	$U_I = 0, U_{II} = 1,$ $U_{III} = 0, U_{IV} = 0$	$U_I = 0, U_{II} = 0,$ $U_{III} = 1, U_{IV} = 0$	$U_I = 0, U_{II} = 0,$ $U_{III} = 0, U_{IV} = 1$
人类工程活动 $U_{34}$	无人类活动	受到人类活动的影响较弱,如少量开挖	受到人类活动的影响一般,如修路	受到人类活动的影响强烈,如采矿爆破活动
隶属度	$U_I = 1, U_{II} = 0,$ $U_{III} = 0, U_{IV} = 0$	$U_I = 0, U_{II} = 1,$ $U_{III} = 0, U_{IV} = 0$	$U_I = 0, U_{II} = 0,$ $U_{III} = 1, U_{IV} = 0$	$U_I = 0, U_{II} = 0,$ $U_{III} = 0, U_{IV} = 1$

表 9 磨子岩典型危岩体基本信息										
评价指标	陡崖高度/m	陡崖结构特征	陡崖所处地质构造	崩塌体规模/(万 m <sup>3</sup> )	倾角/(°)	贯通度	日最大降雨量/mm	风化作用	地震烈度	人类工程活动
$W_1$ 危岩	98	倾向坡内软弱结构面	反倾岩层	16.3	65	0.61	231.1	中风化	Ⅵ	地下采矿活动,影响强烈
$W_2$ 危岩	100	倾向坡内软弱结构面	反倾岩层	3.8	65	0.69	231.1	中风化	Ⅵ	地下采矿活动,影响强烈
$W_3$ 危岩	98	倾向坡内软弱结构面	反倾岩层	10	62	0.72	231.1	中风化	Ⅵ	地下采矿活动,影响强烈

### 3 工程实例分析

#### 3.1 研究区概况

磨子岩危岩区位于重庆市合川区三汇镇(图 3),区内有木姚公路及襄渝铁路穿过,交通较便利,研究区地形以斜坡陡崖为主。磨子岩危岩沿陡崖呈带状分布,南北长近 1 km,发育有 3 个大的独立危岩体,  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$ , 可能崩塌方量 50.6 万 m<sup>3</sup>。崖顶标高 740 ~ 910 m,崖脚标高 640 ~ 850 m,相对高差 60 ~ 100 m。研究区下方有一三汇镇郑家湾煤矿磨子岩井,采空区面积占到了研究区面积的 40%。



图 3 磨子岩危岩全貌图

#### 3.2 磨子岩危岩体危险性评价

磨子岩危岩 3 个典型危岩体  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$  基本信息如表 9 所示。

##### 3.2.1 $W_1$ 危岩体危险性评价

计算得到的  $W_1$  危岩体危险性评价指标的隶属度如表 10 所示。

表 10  $W_1$  危岩体危险性评价指标隶属度分布表

评价指标	危险性等级			
	危险性小(Ⅰ)	危险性中(Ⅱ)	危险性大(Ⅲ)	危险性极大(Ⅳ)
$U_{11}$	0	0	0.16	0.84
$U_{12}$	0	1	0	0
$U_{13}$	0	1	0	0
$U_{21}$	0	0.78	0.22	0
$U_{22}$	0	0.17	0.83	0
$U_{23}$	0	0	0.48	0.52
$U_{31}$	0	0	0	1
$U_{32}$	0	0	1	0
$U_{33}$	0	1	0	0
$U_{34}$	0	0	0	1

$W_1$  危岩体危险性评价指标各子准则层隶属度模糊矩阵  $R_i$  如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.16 & 0.84 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \tag{7}$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.78 & 0.22 & 0 \\ 0 & 0.17 & 0.83 & 0 \\ 0 & 0 & 0.48 & 0.52 \end{bmatrix}; \tag{8}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \tag{9}$$

得到综合评价向量  $R$ :

$$R=B=(B_1, B_2, B_3)=\begin{bmatrix} 0 & 0.460 & 0.086 & 0.454 \\ 0 & 0.178 & 0.542 & 0.281 \\ 0 & 0.180 & 0.119 & 0.701 \end{bmatrix}.$$
  
(10)

式中:  $B_i=A_i\times R_i$ ,  $A_i$  为各子准则层权重系数构成的向量。计算总目标评价向量  $U$  得  $U=A\times R=[0, 0.266, 0.317, 0.417]$ , 其中,  $A$  为准则层权重系数构成的向量,  $A=(0.311, 0.493, 0.196)$ 。

根据最大隶属度准则,  $W_1$  危岩体的危险性等级为Ⅳ级, 危险性极大, 同  $W_1$  危岩体稳定性评价结果一致<sup>[16]</sup>。并且  $W_1$  危岩体已经发生部分崩塌, 危险性极大,  $W_1$  危岩体危险性评价结果符合客观实际。

3.2.2  $W_2$  危岩体危险性评价

计算得到的  $W_2$  危岩体危险性评价指标的隶属度如表 11 所示。

表 11  $W_2$  危岩体危险性评价指标隶属度分布表

评价指标	危险性等级			
	危险性小(Ⅰ)	危险性中(Ⅱ)	危险性大(Ⅲ)	危险性极大(Ⅳ)
$U_{11}$	0	0	0.08	0.92
$U_{12}$	0	1	0	0
$U_{13}$	0	1	0	0
$U_{21}$	0.38	0.62	0	0
$U_{22}$	0	0.17	0.83	0
$U_{23}$	0	0	0.48	0.52
$U_{31}$	0	0	0	1
$U_{32}$	0	0	1	0
$U_{33}$	0	1	0	0
$U_{34}$	0	0	0	1

$W_2$  危岩体危险性评价指标各子准则层隶属度模糊矩阵  $R_i$  如下:

$$R_1=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.08 & 0.92 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
 (11);

$$R_2=\begin{bmatrix} 0.38 & 0.62 & 0 & 0 \\ 0 & 0.17 & 0.83 & 0 \\ 0 & 0 & 0.48 & 0.52 \end{bmatrix}$$
 (12);

$$R_3=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$
 (13)

得到综合评价向量  $R$ :

$$R=B=(B_1, B_2, B_3)=\begin{bmatrix} 0 & 0.460 & 0.043 & 0.487 \\ 0.062 & 0.152 & 0.506 & 0.281 \\ 0 & 0.180 & 0.119 & 0.701 \end{bmatrix}.$$
  
(14)

式中:  $B_i=A_i\times R_i$ ,  $A_i$  为各子准则层权重系数构成的向量。计算总目标评价向量  $U$  得  $U=A\times R=[0.031, 0.253, 0.286, 0.430]$ , 其中,  $A$  为准则层权重系数构成的向量,  $A=(0.311, 0.493, 0.196)$ 。

根据最大隶属度准则,  $W_2$  危岩体的危险性等级为Ⅳ级, 危险性极大, 同  $W_2$  危岩体稳定性评价结果一致<sup>[16]</sup>。并且  $W_2$  危岩体已经发生部分崩塌,

危险性极大,  $W_2$  危岩体危险性评价结果符合客观实际。

3.2.3  $W_3$  危岩体危险性评价

计算得到的  $W_3$  危岩体危险性评价指标的隶属度如表 12 所示。

表 12  $W_3$  危岩体危险性评价指标隶属度分布表

评价指标	危险性等级			
	危险性小(Ⅰ)	危险性中(Ⅱ)	危险性大(Ⅲ)	危险性极大(Ⅳ)
$U_{11}$	0	0	0.16	0.84
$U_{12}$	0	1	0	0
$U_{13}$	0	1	0	0
$U_{21}$	0	0.91	0.09	0
$U_{22}$	0	0.37	0.63	0
$U_{23}$	0	0	0.24	0.76
$U_{31}$	0	0	0	1
$U_{32}$	0	0	1	0
$U_{33}$	0	1	0	0
$U_{34}$	0	0	0	1

$W_3$  危岩体危险性评价指标各子准则层隶属度模糊矩阵  $R_i$  如下:

$$R_1=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.16 & 0.84 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$
 (15)

$$R_2=\begin{bmatrix} 0 & 0.91 & 0.09 & 0 \\ 0 & 0.37 & 0.63 & 0 \\ 0 & 0 & 0.24 & 0.76 \end{bmatrix};$$
 (16)

$$R_3=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$
 (17)

得到综合评价向量  $R$ :

$$R=B=(B_1, B_2, B_3)=\begin{bmatrix} 0 & 0.460 & 0.086 & 0.454 \\ 0 & 0.258 & 0.331 & 0.410 \\ 0 & 0.180 & 0.119 & 0.701 \end{bmatrix}.$$
  
(18)

式中:  $B_i=A_i\times R_i$ ,  $A_i$  为各子准则层权重系数构成的向量。计算总目标评价向量  $U$  得  $U=A\times R=[0, 0.306, 0.213, 0.481]$ , 其中,  $A$  为准则层权重系数构成的向量,  $A=(0.311, 0.493, 0.196)$ 。

根据最大隶属度准则,  $W_3$  危岩体的危险性等级为Ⅳ级, 危险性极大, 同  $W_3$  危岩体稳定性评价结果一致<sup>[16]</sup>。并且  $W_3$  危岩体已经发生部分崩塌, 危险性极大,  $W_3$  危岩体危险性评价结果符合客观实际。

3.3 评价结果

磨子岩危岩三个较大的危岩体  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  的危险性评价结果如表 13 所示, 危险性评价结果和稳定性评价结果基本一致<sup>[16]</sup>。表明本模型在三峡库区灰岩地区崩塌体的危险性评价上具有一定的适用性。

表 13 磨子岩危岩危险性评价结果

	$W_1$	$W_2$	$W_3$
暴雨工况稳定性	不稳定	不稳定	不稳定
危险性	危险性极大Ⅳ	危险性极大Ⅳ	危险性极大Ⅳ

## 4 结 语

基于三峡库区灰岩地区陡高边坡危岩崩塌体大量调查的基础上,根据崩塌体活动历史、形成条件、变化规律及发展演化等方面,遴选崩塌体危险性影响因子,利用 AHP-Fuzzy 方法对崩塌体的危险性进行评价,结果如下。

(1)利用 AHP 法,从影响崩塌体失稳的因素中遴选了准则层的 3 个影响因素,如地形和地质条件、崩塌体几何特征及其他因素,子准则层的 10 个影响因子,如陡崖高度、陡崖结构特征、陡崖所处地质构造、崩塌体规模、主控结构面倾角、主控结构面贯通度、日最大降雨量、风化作用、地震烈度及人类工程活动,构成了 AHP 法的层次结构,通过层次分析法和专家系统得到各评价指标的权重系数。

(2)利用专家系统对子准则层的 10 个影响因子进行了 4 级分级,将层次分析法和模糊综合评价法有机结合,构建了三峡库区灰岩地区崩塌体危险性模糊综合评价模型。

(3)通过对重庆市合川区三汇镇磨子岩  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  三个危岩崩塌体的实例分析,检验了所构建的三峡库区灰岩地区危岩崩塌体危险性评价模型的实用性。磨子岩危岩危险性评价结果符合磨子岩危岩整体稳定性较差,已经发生部分崩塌,危险性极大的客观实际,表明所构建的三峡库区灰岩地区崩塌体危险性模糊综合评价模型具有较好的适用性。

## 参考文献:

[1] 贺凯,李滨,冯振. 危岩崩塌启动机制离心模型试验研究

- [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(1): 131-136.
- [2] 曾芮,姜明顺,孙琳旭. 强降雨条件下岩质边坡倾倒崩塌破坏机理—以鄂西赵家岩崩塌为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 12-17.
- [3] 黄达,杨伟东,陈智强. 考虑软弱基座风化效应的望霞危岩崩塌机制分析[J]. 人民长江, 2018, 49(6): 64-69.
- [4] 李满意,马磊,魏燕珍. 条形孤立单薄陡崖带变形机制与失稳判据[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(2): 1-13.
- [5] 许家美. 三峡库区典型危岩形成机制及治理技术研究[J]. 重庆交通大学学报, 2017, 36(8): 70-75.
- [6] 董好刚,陈立德,黄长生. 三峡库区云阳—江津段危岩形成的影响因素及稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 645-650.
- [7] 叶四桥,唐红梅,祝辉. 基于 AHP-Fuzzy 方法的危岩危险度评价[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 30(5): 800-804.
- [8] 唐红梅,祝辉,李明,等. 范数灰色理论在三峡库区危岩形成影响因子综合评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 2694-2699.
- [9] 刘晓然,杨淳,王威. 基于可变模糊集的地震崩塌危险性评价[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(2): 571-575.
- [10] 牛全福,冯尊斌,张映雪,等. 基于 GIS 的兰州地区滑坡灾害孕灾环境敏感性评价[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 29-35.
- [11] 王雷,赵法锁,白朝能,等. 襄渝铁路(胡家营—万源段)地质灾害发育特征及危险性评价[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 30-34.
- [12] 齐洪亮,田伟平,李家春. 陕西省连阴雨诱发公路崩塌类灾害区域危险性评价[J]. 长安大学学报, 2016, 36(3): 7-12.
- [13] 陈维,徐则民,刘文连. 差异风化型危岩力学模型及破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 195-204.
- [14] 何思明,吴永,李新坡. 地震诱发岩体崩塌的力学机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 3359-3363.
- [15] 重庆市质量技术监督局. 地质灾害防治工程勘察规范(DB50/143-2003)[S]. 重庆:重庆市质量技术监督局, 2003.
- [16] 重庆华地工程勘察设计院. 重庆市合川区三汇镇磨子岩危岩排危抢险设计方案[R]. 重庆:重庆华地工程勘察设计院, 2009.

## Hazard Assessment of Collapsed Rock Mass in Limestone Area based on AHP-Fuzzy Method

TANG Hongmei, HAN Mingming and WANG Linfeng

(Key Laboratory of Geological Disaster Reduction for Highway and Water Transport in Mountainous Area, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 40074, China)

**Abstract:** The formation of collapsed rock mass is the result of the combined action of many influencing factors. These factors are characterized by complexity and ambiguity. Based on AHP method, the factors influencing the development of collapsed rock mass in the limestone area of the three gorges reservoir area are analyzed. Three factors, including topographic and geological conditions, geometric characteristics of the collapsed rock mass and other factors, are selected as the criterion layer. Ten evaluation indexes, such as the height of the escarpments, structural characteristics of escarpments, geological structure of the escarpments, the scale of collapsed rock mass, the dip angle of the main control structural surface, the connectivity of the main control structural surface, daily maximum rainfall, weathering, seismic intensity and human engineering activities, are selected as sub-criteria. The hazard evaluation index system is established. By combining analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method, the hazard assessment model of collapsed rock mass in the limestone area of the three gorges reservoir area is established. The assessment model was tested by three dangerous rock masses of Moziyan,  $W_1$ ,  $W_2$  and  $W_3$ . The hazard assessment results of moziyan is consistent with the actual situation, the overall stability of moziyan is poor, and part of it has collapsed, which is very dangerous. It shows that the risk assessment model of collapsed rock mass in limestone area of the three gorges reservoir area has good applicability.

**Key words:** words: collapsed rock mass; influencing factors; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation method; hazard assessment