

# 基于云模型的路堑高边坡施工安全风险评估研究

李刚, 宁重阳

(湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 高边坡施工安全风险不确定因素众多, 风险评估存在随机和模糊不确定性。文中结合层次分析法构建高边坡施工总体风险评估指标体系, 基于云模型概念将权重语言评价值和指标安全等级转化为云模型, 实现定性概念向定量的转化, 提出一种反映路堑高边坡施工总体风险等级的风险评估方法; 结合某公路路堑高边坡工程进行应用分析, 得到该边坡总体风险等级为 3~4 级, 偏向于 3 级风险。

**关键词:** 工程管理; 高边坡; 施工风险; 风险评估; 云模型

中图分类号: U415.12

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0156-05

高边坡由于受到水文地质、地质构造、岩层性质及施工扰动等多种因素影响, 施工中易出现滑坡和崩塌等安全事故, 高边坡施工风险评估成为一项重要的基础工作。为此, 发布了《高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南》等一系列技术规范和指南。一些学者也对高边坡工程风险评估进行了研究, 如涂圣文等提出了一种基于改进 CRITIC 法与云模型的高速公路路堑高边坡施工安全总体风险综合评估模型; 李炼利用专家调查评估法及指标体系法从多种因素的角度对路堑高边坡施工阶段安全风险进行了评价, 提出不同形式公路路堑应采取不同评价指标; 林俊勇运用模糊综合评判法估计了路堑边坡失稳的可能性, 建立了路堑边坡失稳可能性估计模型; 张雷等构建了边坡工程风险指标体系, 提出了边坡工程风险评估方法; 何海鹰等结合多条高速公路岩质边坡调查结果, 确定了 4 类主要破坏模式, 并针对破坏模式主要影响因素构建了岩质高边坡风险评估指标层次结构体系; 吴忠广等基于蒙特卡洛方法确定了边坡施工总体风险等级, 并结合高边坡施工安全风险传递路径提出了总体风险评估模型; 李典庆等基于子集模拟提出了边坡风险评估方法, 得到了边坡失效概率和失效风险, 给出了基于随机有限元方法的边坡风险评估流程。由于高边坡工程施工安全风险的不确定因素众多, 风险评估过程具有随机性和模糊性, 很难将两者考虑齐全。为研究能同时考虑风险评估随机性和模糊性的综合评估方法, 该文基于层次分析方法构建高边坡施工总体风险评价指标, 采用云模型概念构建风险评价等级, 提出风险评估模型。

## 1 云模型

云模型可实现不确定性问题的描述及定性定量之间的数学转换, 有效兼顾不确定性问题的随机性和模糊性。

### 1.1 云模型数字特征

设  $U$  为具体数值构成的定量论域,  $C$  为论域  $U$  上定性概念, 对于任何元素  $x$  都具有稳随机数  $u(x) \in [0, 1]$  与其对应, 称为  $x$  对  $C$  的隶属度。隶属度  $u$  在定量论域  $U$  的分布构成一朵云  $C(x)$ , 则  $[x, u(x)]$  为云朵中的云滴。

云模型采用期望值  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$  3 个数字特征来表示。数字特征可定量反映描述对象的定性特征, 并构成定性与定量概念之间的转换模型。数值特征中的期望值  $E_x$  最能反映模糊概念在论域  $U$  上的中心值, 熵  $E_n$  能反映定性概念的随机概率和云滴的范围, 超熵  $H_e$  能反映云朵厚度和离散性。

### 1.2 高斯云模型

云模型的形态已发展出梯形云、三角形云、矩形云和高斯云等, 并涉及到二维和三维形态, 其中高斯云模型由于其普适性被广泛应用。这里主要采用高斯云模型进行分析。

高斯云模型用  $(E_x, E_n, H_e)$  来表示, 其形态和各参数含义见图 1。为实现定性概念的定量化描述, 结合正向云发生器(见图 2)进行计算。计算过程如下: 1) 产生期望值为  $E_n$ 、标准差为  $H_e$  的正态随机数  $E'_n$ ; 2) 产生期望值为  $E_x$ 、标准差为  $E'_n$  的正态随机数  $x$ ; 3) 依据公式  $y = e^{-(x-E_x)^2/(2E_n'^2)}$  得到  $x$  属于定性概念  $C$  的确定度; 4) 重复  $N$  次上述计

算过程,生成一个具有  $N$  个云滴的云,  $N$  取 1000 次。

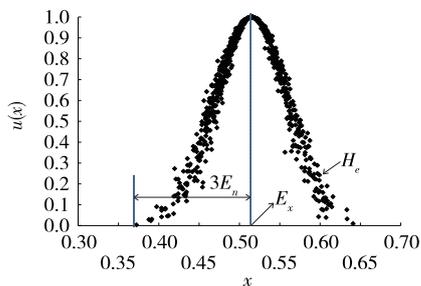


图 1 高斯云模型



图 2 正向云发生器

## 2 高边坡施工总体风险评估

### 2.1 工程案例

某山区高速公路位于山岭重丘区,地形陡峻,自然形成的沟谷较多,山间植被茂盛,种类繁多,地形、地势较复杂,地表高程为 462~501 m,高度差为 39 m。属亚热带地区,气候温和,年平均降水量为 1 538.56 mm,年平均蒸发量为 1 164.82 mm,降雨集中在每年 3—5 月,蒸发量主要集中在 6—8 月。

该地区地层岩性由上到下依次为:残积土,厚度 1~1.5 m;强风化板岩,厚度 1.5~4.0 m;中风化泥质板岩,厚度 2.6~7.0 m;微风化泥质板岩,厚度范围未探明。由于地势、地貌因素,该公路建设存在高边坡工程,以其中某处高边坡工程为例进行分析。该岩质高边坡高度为 42.5 m,为岩层结构面顺向坡,边坡上部岩层较松散,边坡岩体没有穿越破碎带,地下水较发育,周边 100 m 范围内不存在(构)建筑物。但由于岩层性质、开挖扰动和外部环境的影响,该边坡工程诱发滑坡风险极高。

### 2.2 高边坡总体风险评估指标体系

气候条件、工程地质条件、场地环境和边坡高度是影响边坡稳定性的主要因素。依据科学、独立和完备原则,结合高边坡工程施工特点,基于层次分析法构建高边坡工程施工风险评估指标体系。该指标体系包含 3 层,结合高边坡风险源将高边坡施工过程的第一层次指标划分为气候条件、工程地质条件、场地环境和边坡高度,然后将第一层指标细分为第二层次指标,这样层层细分,形成图 3 所示评估指标体系,其中底层指标共 25 个。

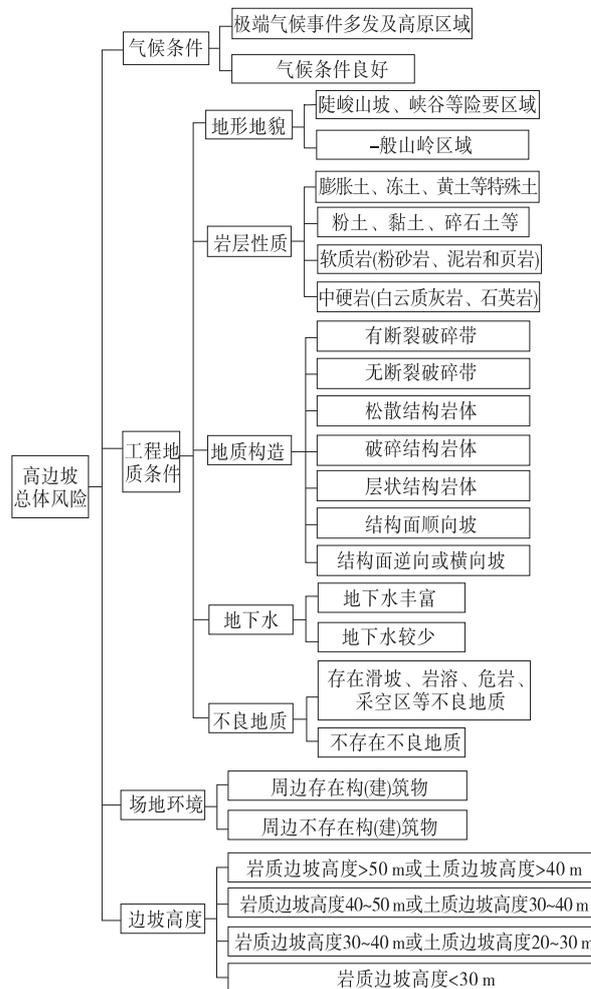


图 3 高边坡施工总体风险评估指标体系

### 2.3 指标权重确定

为反映主观赋权的随意性和客观赋权的模糊性,采用语言变量(极重要、较重要、一般、次重要、不重要)来反映指标的重要性。假设指标权重的论域为  $[0, 1]$ ,由专家对各指标的重要性进行评价并将评价价值转化为相应云模型。云模型采用期望值  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_c$  来表示权重,如次重要的权重云为  $(0.255, 0.068, 0.005)$ ,表示次重要的权重期望值为 0.255,权重的模糊性定量为 0.068,权重的随机性定量为 0.005。表 1 为不同语言评价价值及其对应的评价云模型。

通过 8 个行业专家(4 个来自科研院所,2 个为设计院项目负责人,2 个为施工单位项目负责人)对各子指标进行语言评价,各指标的重要权重结合工程具体情况、个人认识及经验确定,然后通过讨论确定各子指标的最终权重云模型。该高边坡各级指标的权重云模型见表 2~4。

表1 指标语言变量及其对应云模型

语言变量	权重云
极重要	(1.000,0.040,0.003)
较重要	(0.776,0.069,0.005)
一般	(0.515,0.045,0.005)
次重要	(0.255,0.068,0.005)
不重要	(0.000,0.032,0.003)

表2 高边坡施工安全风险评估一级指标的权重云模型

一级指标	权重云模型
气候条件	(0.255,0.068,0.005)
工程地质	(1.000,0.040,0.003)
场地环境	(0.515,0.045,0.005)
边坡高度	(0.776,0.069,0.005)

表3 高边坡施工安全风险评估二级指标的权重云模型

二级指标	权重云模型
极端气候事件	(1.000,0.040,0.003)
多发及高原区域	(1.000,0.040,0.003)
气候条件良好	(0.255,0.068,0.005)
地形地貌	(0.776,0.069,0.005)
岩层性质	(1.000,0.040,0.003)
地质构造	(1.000,0.040,0.003)
地下水	(0.776,0.069,0.005)
不良地质	(0.776,0.069,0.005)
周边存在构(建)筑物	(0.776,0.069,0.005)
周边不存在构(建)筑物	(0.000,0.032,0.003)
岩质边坡高度>50 m	(1.000,0.040,0.003)
或土质边坡高度>40 m	(1.000,0.040,0.003)
岩质边坡高度 40~50 m 或	(0.776,0.069,0.005)
土质边坡高度 30~40 m	(0.776,0.069,0.005)
岩质边坡高度 30~40 m 或	(0.515,0.045,0.005)
土质边坡高度 20~30 m	(0.515,0.045,0.005)
岩质边坡高度<30 m	(0.255,0.068,0.005)

2.4 指标安全等级评价云模型

高边坡施工风险指标均为定性描述,采用定量数值来表示定性指标会掩盖其自身模糊性,影响评估结果的准确性。因此,采用语言变量进行描述,并转化为高斯云模型来表示。依据《高速公路路堑高边坡工程施工安全风险评估指南》,将风险等级划分为等级4(极高风险)、等级3(高度风险)、等级2(中度风险)、等级1(低度风险),并结合平均法将4个语言评价等级转化为云模型。

假设区间为  $[x_{\min}, x_{\max}]$ ,各等级云为  $C_i(E_{xi}, E_{ni}, H_{ei})$ ,上述云模型的数字特征算法为:

$$E_{xi} = x_{\max}(i-1)/3 \tag{1}$$

$$E_{ni} = (E_{xi+1} - E_{xi})/6 \tag{2}$$

表4 高边坡施工安全风险评估中工程地质条件各子指标的权重云模型

底层指标	权重云模型
陡峻山坡、峡谷等险要区域	(0.776,0.069,0.005)
一般山岭区域	(0.255,0.068,0.005)
膨胀土、冻土、黄土等特殊土	(1.000,0.040,0.003)
粉土、黏土、碎石土等	(0.515,0.045,0.005)
软质岩(粉砂岩、泥岩和页岩)	(0.515,0.045,0.005)
中硬岩(白云质灰岩、石英岩)	(0.255,0.068,0.005)
有断裂破碎带	(0.776,0.069,0.005)
无断裂破碎带	(0.000,0.032,0.003)
松散结构岩体	(1.000,0.040,0.003)
破碎结构岩体	(0.776,0.069,0.005)
层状结构岩体	(0.776,0.069,0.005)
结构面顺向坡	(1.000,0.040,0.003)
结构面逆向或横向坡	(0.255,0.068,0.005)
地下水丰富	(1.000,0.040,0.003)
地下水较少	(0.255,0.068,0.005)
存在滑坡、岩溶、危岩、采空区等不良地质	(1.000,0.040,0.003)
不存在不良地质	(0.691,0.064,0.008)

$$\begin{cases} H_{ei} = H_{e0}/0.618 & (i=1,4) \\ H_{ei} = H_{e0} & (i=2,3) \end{cases} \tag{3}$$

定义有效论域为  $[0,1]$ ,  $H_{e0}$  通常为常数,取  $H_{e0} = 0.005$ ,得到指标安全性评价语言所对应的云模型及工程决策(见表5)。

表5 高边坡施工安全风险评估指标安全性评价语言及对应云模型

语言评价	云模型	接受准则及工程决策
极高风险(等级4)	(0.000,0.056,0.008)	拒绝接受,必须停止作业,采取应急措施
高度风险(等级3)	(0.333,0.056,0.005)	不可接受,必须采取安全控制措施,制订风险应急方案
中度风险(等级2)	(0.667,0.056,0.005)	可接受,但需加强防范及监测,采取预防措施
低度风险(等级1)	(1.000,0.056,0.008)	可容许,但需加强管理及巡视

风险准则中的风险等级与指标安全等级评价云模型相对应,如最安全对应1级风险。图4为风险等级对应的高斯云模型。

结合该工程实际情况,对高边坡施工安全风险各指标的安全性进行语言评价,结果见表6、表7。

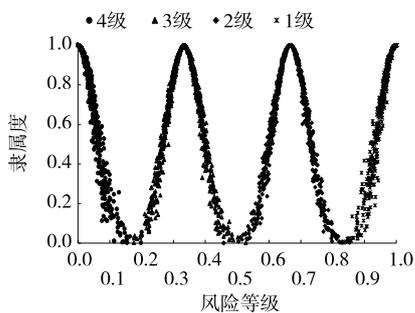


图4 高边坡施工安全风险指标语言评价和风险等级云图

表6 高边坡施工安全风险指标安全性评价云模型

一级指标	二级指标	安全性评价云模型
气候条件	气候条件良好	(0.500,0.039,0.005)
	地形地貌	
	岩层性质	
工程地质	地质构造	
	地下水	
	不良地质	
场地环境	周边不存在 构(建)筑物	(0.500,0.039,0.005)
	边坡高度	
边坡高度	岩质边坡高度 40~50 m	(0.309,0.064,0.008)

表7 高边坡施工安全风险评估中工程地质条件各子指标安全性评价云模型

二级指标	底层指标	安全性评价云模型
地形地貌	陡峻山坡、峡谷 等险要区域	(0.500,0.039,0.005)
	岩层性质	
岩层性质	中硬岩(白云质 灰岩、石英岩)	(0.691,0.064,0.008)
	无断裂破碎带	(1.000,0.104,0.013)
	松散结构岩体	(0.500,0.039,0.005)
地质构造	破碎结构岩体	(0.500,0.039,0.005)
	层状结构岩体	(0.500,0.039,0.005)
	结构面顺向坡	(0.000,0.104,0.013)
地下水	地下水丰富	(0.500,0.039,0.005)
不良地质	存在滑坡、岩溶、危岩、 采空区等不良地质	(0.309,0.064,0.008)

2.5 整体风险等级确定

依据图2,采用加权方法计算得到上一级指标的综合评估云模型  $A_i = (a_1, a_2, \dots, a_k)$ , 其中  $a_k$  表示第  $i$  层中指标  $k$  的云模型结果,按下式计算:

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^n a_{kj} W'_{kj}}{\sum_{j=1}^n W'_{kj}} \quad (4)$$

式中: $a_{kj}$  为第  $i$  层中指标  $k$  的子指标  $j$  的云模型评估结果; $W'_{kj}$  为第  $i$  层中指标  $k$  的子指标  $j$  的权重云模型结果。

依据上述计算方法,结合云模型计算方法得到高边坡施工安全风险评估各指标的评估云模型(见表8、表9、图5)。

表8 高边坡工程地质风险评估结果

指标	计算结果	风险等级
地形地貌	(0.388,0.046,0.005)	2~3级
岩层性质	(0.691,0.070,0.008)	3~4级
地质构造	(0.500,0.040,0.005)	2~3级
地下水	(0.388,0.046,0.005)	2~3级
不良地质	(0.240,0.054,0.006)	1~2级
施工总体风险	3~4级,偏向于3级	

表9 高边坡施工风险评估结果

指标	计算结果	风险等级
气候条件	(0.340,0.013,0.005)	1~2级
工程地质条件	(0.790,0.065,0.008)	3~4级
场地环境	(0.532,0.065,0.008)	2~3级
边坡高度	(0.694,0.080,0.005)	2~3级
施工总体风险	3~4级,偏向于3级	

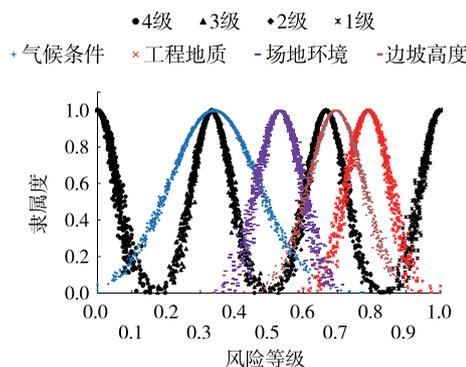


图5 高边坡施工安全风险评估云模型结果

从表8可看出:岩层性质为该高边坡的主要风险来源,风险等级最高,为3~4级,偏向3级风险;地形地貌、地质构造和地下水为次要风险因素,风险等级为2~3级。

从表9可看出:工程地质条件为该高边坡的主要风险来源,风险等级为3~4级,偏向3级风险。

依据最不利原则,选取一级指标的风险等级的最不利结果作为该高边坡工程的施工总体风险等级,即3~4级,偏向于3级风险。同时通过3位行业专家对该高边坡的稳定性进行评价,评价指标与云模型的一致,评价结果显示风险等级为3级(见表10,)与云模型评价准则一致。依据风险接受准则,

表 10 专家法边坡风险评估结果

评估指标	专家1评估结果		专家2评估结果		专家3评估结果		施工总体风险
	分值	信心指数	分值	信心指数	分值	信心指数	
气候条件	3	0.8	3	0.7	2	0.9	打分为3.03, 风险等级为3级
工程地质	4	0.8	4	0.8	4	0.8	
场地环境	3	0.7	3	0.7	2	0.7	
边坡高度	2	0.6	3	0.8	3	0.8	
风险等级	3.07		3.27		2.75		

该工程风险不可接受,必须采取风险管理和技术措施,并制订预防风险事件发生的方案。

### 3 结语

依据公路路堑高边坡的工程特点,采用层次分析法构建高边坡施工总体风险评估指标体系,并基于云模型提出公路路堑高边坡施工风险总体评估方法。将该方法应用于某公路路堑高边坡工程施工风险评估,结果表明工程地质条件为该工程的主要风险,风险等级最高,为3~4级,偏向3级风险,模型判别结果与专家打分法结果一致,证明所提出的路堑高边坡施工风险评估方法能反映其施工总体风险,具有一定应用价值。

采用语言评价反映评估指标权重和指标安全等级,可兼顾评价对象的模糊不确定性和随意性;基于云模型基本理论和计算方法,将指标权重和安全等级评价语言转化为云模型,可实现定性概念的定量表述,保留了指标的模糊性和随机性特点。该方法的评估过程和结果较好地反映了风险评估的随机不确定和模糊不确定的特点,为高边坡施工总体风险评估提供了一种合理新途径。

### 参考文献:

[1] 涂圣文,郑克梅,张尧,等.基于改进 CRITIC 法与云模型相结合的高速公路路堑高边坡工程施工安全总体风险评估模型研究[J].安全与环境工程,2019,26(3):127-132.

[2] 李炼.公路路堑高边坡施工安全风险评估[D].重庆:重庆交通大学,2017.

[3] 林俊勇.高速公路路堑高边坡施工安全风险评估研究[D].广州:华南理工大学,2017.

[4] 张雷,王晓雪.边坡工程风险评估与风险因子比率分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(2):390-394+412.

[5] 何海鹰,胡甜,赵健.基于 AHP 的岩质高边坡风险评估指标体系[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2861-2868.

[6] 吴忠广,王海燕,陶连金,等.高速公路高边坡施工安全总体风险评估方法[J].中国安全科学学报,2014,24(12):124-129.

[7] 李典庆,肖特,曹子君,等.基于高效随机有限元法的边坡风险评估[J].岩土力学,2016,37(7):1994-2003.

[8] LI De-yi.Uncertainty reasoning based on cloud models in controllers journal of computer science and mathematics with application[J].Elsevier Science,1998,35(3):99-123.

[9] 李德毅.不确定性人工智能[M].北京:国防工业出版社,2005.

[10] 刘常昱,李德毅,杜鹃,等.正态云模型的统计分析[J].信息与控制,2005,34(2):236-239.

[11] 黄震,傅鹤林,张加兵,等.基于云理论的盾构隧道施工风险综合评价模型[J].铁道科学与工程学报,2018,15(11):3012-3020.

[12] 傅鹤林,黄震,黄宏伟,等.基于云理论的隧道结构健康诊断方法[J].工程科学学报,2017,39(5):794-801.

收稿日期:2020-07-27

\*\*\*\*\*

(上接第 144 页)

[12] 李瑞鸽,张耀庭.预应力混凝土梁自振频率试验研究[J].桥梁建设,2008(1):33-36.

[13] 刘龄嘉,贺拴海,赵小星.预应力对混凝土简支梁振动频率影响的试验研究[J].铁道建筑,2007(8):10-12.

[14] 闫红,郭良友.多跨桥梁动静载试验时试验桥跨的选择[J].桥梁建设,2005(增刊1):139-141.

[15] 钱寅泉,张学亮,袁桂芳.中小跨径桥梁挠度测试方法

比较[J].中外公路,2012,32(2):89-92.

[16] 白应华,徐志红,罗凯,等.桥梁的动力参数测试及损伤识别的若干讨论[J].中国水运(理论版),2007,5(1):60-61.

[17] 王岐峰,李炎,李万恒,等.桥梁自振特性与承载能力分析[J].公路交通科技,2005,22(11):93-95.

收稿日期:2020-03-31