

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.04.19

基于云模型的黄土区公路边坡灾害风险评价

于伟^{1,2}, 张浩^{1,2}, 杨鹏^{1,2}, 胡玉娇^{1,2}

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064;

2. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:我国黄土区公路边坡灾害多发,对其进行风险评价具有一定的紧迫性。本文在阐述云模型的概念、数字特征和正向正态云发生器原理的基础上,建立了包含指标层、因子层和状态层的风险评价指标体系,并将风险评价结果和各指标的数字特征分为极低风险、低风险、中等风险、高风险和极高风险5级;通过专家调查法和正向正态云发生器建立了风险评价模型,以最大综合确定度对应的风险等级作为风险评价的结果,并以陕西S302的6处边坡潜在灾害点为例对评价模型进行了实例分析。结果表明6处潜在边坡灾害点的风险评价结果与实际调查结果相近,说明本文建立的评价模型是科学、合理的。

关键词:道路工程;黄土区;边坡灾害;风险评价;云模型

中图分类号:U416.02

文献标识码:A

文章编号:1003-8035(2015)04-0111-05

Risk assessment of highway slope disasters in loess areas based on cloud model

YU Wei^{1,2}, ZHANG Hao^{1,2}, YANG Peng^{1,2}, HU Yu-jiao^{1,2}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: There is great urgency to carry out risk assessment for slope disasters in loess areas for their high frequency. The concept and digital characteristics of cloud model, and the positive normal cloud generator were analyzed before the assessment index system was built, which including index layer, factor layer and statement layer. The risk assessment results and the numerical characteristics of each index are divided into very low risk, low risk, moderate risk, high risk and very high risk. The risk assessment model is built through expert investigation method and the positive normal cloud generator. The results show that the risk assessment results of the six potential slope disaster points are close to the actual survey results, which shows that the assessment model is scientific and reasonable.

Keywords: road engineering; loess area; slope disaster; risk assessment; cloud model.

0 引言

黄土在我国分布面积约 $63 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中,陕北黄土高原(包括延安和榆林2市)是黄土分布最集中的地

区,该地区地貌以塬、梁、峁和沟壑纵横交错为主,是典型的半干旱气候区^[1]。由于黄土水理性质极差、降雨集中、生态环境不佳和植被覆盖度低等原因,区内的国省干线公路极易遭受各类灾害的影响,其中,公路边坡灾

收稿日期:2015-01-13;修订日期:2015-05-26

基金项目:西部交通建设科技项目(2008353361420)

第一作者:于伟(1980-),男,山东潍坊人,博士,主要从事岩土工程方面的研究。E-mail:chdyuwei@163.com

害是最为常见的灾种。由于自然环境条件和工程建设强度的不同,导致不同路段发生边坡灾害的可能性及其对交通的影响程度存在差异,为了使有限的灾害防治资金能够发挥最大的社会和经济效益,对各边坡灾害点的风险进行评价成为灾害治理的前提之一^[2]。

长期以来,黄土灾害风险评价都是研究的热点之一。谭成轩建立了包括物质基础因素、边界条件因素和触发条件因素在内的中国典型粘黄土区地质灾害风险评估影响因素体系^[3];唐亚明将黄土滑塌灾害危险性的 22 个评价指标划分为 4 档评分标准,将危害性的 15 个评价指标划分为 5 档评分标准,由此建立了黄土滑塌灾害风险评分系统,并运用该系统完成了 37 个黄土斜坡单元的风险评分和分级^[4];陈国金根据区别对待整体与局部、深层与浅表问题的思路,在论述黄土滑坡地质环境与滑坡成因机制关系的基础上,对长江三峡库区巴东黄土滑坡进行了风险评价^[5]。以往的黄土灾害风险评价方法包括确定性方法和非确定性方法两种,其中,确定性方法可分为定性方法和定量方法,定性方法主要包括历史成因分析法、工程地质类比法等,定量方法主要包括极限平衡法、有限元法和离散元法等。非确定性方法主要包括模糊综合评价法、三角白化权方法和神经网络法等。在实际应用中,这些方法均不能完全合理的描述边坡灾害发生的内在机理,评价结果与灾害发生实际状况存在一定的差异,例如,工程地质类比法将已有边坡工程经验应用于类似边坡工程,存在较大的主观性;极限平衡法将滑体视为刚体,存在一定的不合理性;有限元法不能很好地求解位移不连续问题和大变形问题;神经网络法的训练次数对评价结果有较大扰动等^[6]。

黄土区公路边坡灾害风险评价的复杂性表现在:①自然环境因素、公路边坡自身因素和公路边坡对交通的影响因素 3 者构成了一个复杂的多维异构系统,公路边坡灾害风险受该系统的控制和影响,如何明确不同因素对风险的影响程度是风险评价的难题;②风险评价的结果是以定性的自然语言表达的,而风险评价指标的强度特征是以数字量化方法界定的,如何建立两者的关系是风险评价的另一难题。为解决这些问题,本文引入云模型(Cloud Model)理论进行黄土区公路边坡灾害风险评价,建立各评价指标与风险等级的对应关系,并以陕西 S302 的 6 处潜在边坡灾害点对风险评价模型进行了实例分析。

1 云模型的基本理论

1.1 云模型的概念和数字特征

设 U 为一个用精确数值表示的定量论域, C 为 U 上的定性概念,若定量值 $x \in U$,且 x 是定性概念 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $u_c(x) \in [0,1]$ 是具有稳定倾向的随机数,则 x 在论域 U 上的分布称为云,每个 x 称为一个云滴,每朵云由许多云滴组成,每一个云滴就是这个定性概念映射到数域空间的一个点。云的定义表明,云可以实现某一定性概念与其定量表示之间的不确定性转换,反映了模糊性和随机性的相互关联,构成了定性和定量之间的映射。云模型的数字特征反映了定性概念的定量特征,用期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 表征。

(1) 云的期望 Ex (Expected value)

云的期望是云滴在论域空间的分布期望,是最能代表定性概念的点,也是这个概念量化的最典型样本。

(2) 熵 En (Entropy)

熵是定性概念的不确定性度量,由概念的随机性和模糊性共同决定:一方面熵是定性概念随机性的度量,反映了能够代表这个定性概念的云滴的离散程度;另一方面又是模糊性,即定性概念亦此亦彼性的度量,反映了论域空间中可被概念接受的云滴的取值范围。

(3) 超熵 He (Hyper entropy)

超熵是熵的不确定性的度量,即熵的熵,由熵的随机性和模糊性共同决定。

1.2 正向正态云发生器

云发生器是最简单的云算法,用以表征定性概念与定量概念之间的对应关系和转换关系,可以分为正向云发生器和逆向云发生器两类。正向云发生器是从定性概念向定量概念的转换关系,它根据云的数字特征产生云滴正向云。逆向云发生器是从定量概念向定性概念的转换关系,可以将数量的精确数据转换为以自然语言表示的定性概念。

本文采用最具普适性的正向正态云发生器进行黄土区公路边坡灾害风险评价。正向正态云发生器满足的条件是:

(1) x 的分布服从以 Ex 为均值、以 En^2 为方差的正态分布,即: $x \sim N(Ex, En^2)$;

(2) En 的分布服从以 En 为均值、以 He^2 为方差的正态分布,即: $En \sim N(En, He^2)$;

(3) x 对 C 的确定度 $u_c(x)$ 满足:

$$\mu_c(x) = \exp\left(\frac{-(x - Ex)^2}{2En}\right) \quad (1)$$

2 黄土区公路边坡灾害风险评价模型

2.1 基本思路

根据正向正态云发生器的定义,做出如下假设:①黄土区公路边坡灾害的每一风险等级可视为一个定性概念,即可用一朵云表示;②每一评价指标的数值对应于某一朵云的确定度服从正态分布。则采用云模型进行黄土区公路边坡灾害风险评价的步骤如下:

- (1)选取黄土区公路边坡灾害风险评价指标体系,并对各指标进行分级;
- (2)确定各指标分级对应的云模型数字特征(E_x, E_n, H_e);
- (3)采用专家调查法确定指标权重,根据式 1 计算各指标对应于不同风险等级的确定度,建立云模型;
- (4)结合黄土区公路边坡灾害实例,对云模型的合理性进行验证(图 1)。

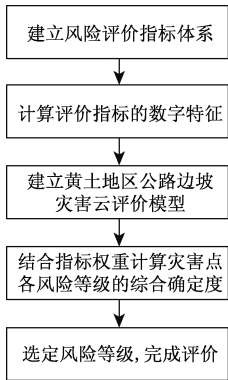


图 1 黄土区公路边坡灾害风险评价流程
Fig. 1 Risk assessment process of highway slope disasters in loess areas

2.2 评价指标的选取

影响黄土区公路边坡灾害风险的因素众多,如何选取风险评价指标是评价成败的关键。由于风险是对灾害事件和灾害后果的综合,因此,风险评价指标应兼

顾自然环境条件和承灾体自身条件。
本文建立包括状态层、指标层和因子层的风险评价指标体系,其中状态层是对风险评价结果的等级划分,同时也是对风险评价指标数字特征的分级,在云模型中,每一等级均对应一朵云,并与众多云滴形成映射。本文参照文献[7]和[8]的研究结果,结合黄土区公路边坡灾害的特点和现场调查结果,将风险等级和各指标的数字特征分为极低风险、低风险、中等风险、高风险和极高风险。

指标层包括公路边坡因素、自然环境因素和交通影响因素 3 方面。在此基础上,选取反映指标层的 8 项评价因子建立因子层,其中,公路边坡因素包括坡度、坡高和植被覆盖度,自然环境因素包括年平均降雨量、年平均暴雨天数和历史最大地震烈度,交通影响因素包括灾害体规模和预计断道时间,见图 2 和表 1。

2.3 云模型数字特征的确定

确定云模型的数字特征是采用云模型进行黄土区公路边坡灾害风险评价的前提。本文采用式 2 ~ 式 4 所示的方法确定 E_x, E_n 和 H_e 。

$$E_x = (S_{x_{max}} + S_{x_{min}})/2$$
$$E_n = (S_{x_{max}} - S_{x_{min}})/3$$
$$H_e = k$$

(2)(3)(4)

式中: $S_{x_{max}}$ 和 $S_{x_{min}}$ 分别为某指标的数量特征对应于某一风险等级的上限值和下限值, E_x, E_n 可以通过两者计算确定。超熵 H_e 的取值 k 为常数,可根据变量的模糊阔度进行调整,参考文献[9],将 k 值取为 0.01。本文根据表 1 所示的黄土区公路边坡灾害风险评价指标分级和式 2 ~ 式 4 的计算方法,计算 E_x, E_n 和 H_e (表 2)。

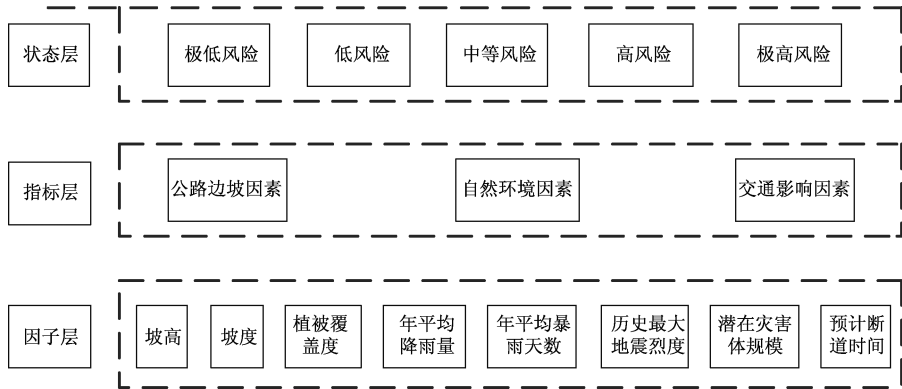


图 2 黄土区公路边坡灾害风险评价指标体系
Fig. 2 Risk assessment factor system of highway slope disasters in loess areas

表 1 黄土区公路边坡灾害风险评价指标分级

Table 1 Grading for risk assessment factors of highway slope disasters in loess areas								
等级	公路边坡因素			自然环境因素			交通影响因素	
	坡度/(°)	坡高/m	植被覆盖度/%	年平均降雨量/mm	年平均暴雨天数	历史最大地震烈度	灾害体规模/m ³	预计断道时间/h
极低风险	0~15	0~6	80~100	0~300	0~1.0	0~3	0~100	0~3
低风险	15~30	6~20	40~80	300~600	1.0~2.5	3~5	100~300	3~12
中等风险	30~45	20~30	15~40	600~900	2.5~4.5	5~7	300~1000	12~24
高风险	45~60	30~90	5~15	900~1200	4.5~6.5	7~8	1000~3000	24~72
极高风险	60~90	90~200	0~5	1200~1500	6.5~12	8~12	3000~10000	72~168

表 2 黄土区公路边坡灾害风险评价指标的云模型数字特征

Table 2 Numerical characteristics of cloud model for risk assessment factors of highway slope disasters in loess areas												
等级	坡度			坡高			植被覆盖度			年平均降雨量		
	Ex	En	He	Ex	En	He	Ex	En	He	Ex	En	He
极低风险	7.50	5	0.01	3	2	0.01	90	6.67	0.01	150	100	0.01
低风险	22.50	5	0.01	13	4.67	0.01	60	13.33	0.01	450	100	0.01
中等风险	37.50	5	0.01	25	3.33	0.01	27.50	8.33	0.01	750	100	0.01
高风险	52.50	5	0.01	60	20	0.01	10	3.33	0.01	1050	100	0.01
极高风险	75	10	0.01	145	36.67	0.01	2.5	1.67	0.01	1350	100	0.01

等级	年平均暴雨天数			历史最大地震烈度			灾害体规模			预计断道时间		
	Ex	En	He	Ex	En	He	Ex	En	He	Ex	En	He
极低风险	0.50	0.33	0.01	1.50	1	0.01	50	33.33	0.01	1.5	1	0.01
低风险	1.75	0.50	0.01	4	0.67	0.01	200	66.67	0.01	7.5	3	0.01
中等风险	3.50	0.67	0.01	6	0.67	0.01	650	233.33	0.01	18	4	0.01
高风险	5.50	0.67	0.01	7.50	0.33	0.01	2000	666.67	0.01	48	16	0.01
极高风险	9.25	1.83	0.01	10	1.33	0.01	6500	2333.33	0.01	120	32	0.01

2.4 云模型的建立

根据云模型的定义,结合某一评价指标对应于各风险等级的确定度和指标权重,计算边坡灾害点的综合确定度,并取综合确定度的最大者对应的风险等级作为风险评价的结果见式 5。

$$Y_j = \sum_{i=1}^8 \mu_j W_i \tag{5}$$

式中: μ_j ——某一风险评价指标对应于第 j 风险等级的确定度;
 W_i ——第 i 风险评价指标的权重;
 Y_j ——某一边坡灾害点对应于第 j 风险等级的综合确定度。

由式 5 可见,在建立黄土区公路边坡灾害风险评价模型时,需要进行两方面的工作:①评价指标权重的确定;②确定度的计算。

(1) 评价指标权重的确定

本文通过专家调查法确定黄土区公路边坡灾害风险评价指标的权重,即相关领域的专家对权重进行调查,并对调查结果进行综合分析(表 3)。

(2) 确定度的计算

根据表 2 确定的 Ex 、 En 和 He ,结合式 1,利用正向正态云发生器,生成黄土区公路边坡灾害风险评价指标的 8 朵云模型,其中坡度指标的云模型见图 3。

表 3 评价指标权重调查结果

Table 3 Weight values of risk assessment factors				
指标	坡度	坡高	植被覆盖度	年平均降雨量
权重	0.125	0.175	0.075	0.100
指标	年平均暴雨天数	历史最大地震烈度	灾害体规模	预计断道时间
权重	0.145	0.075	0.190	0.115

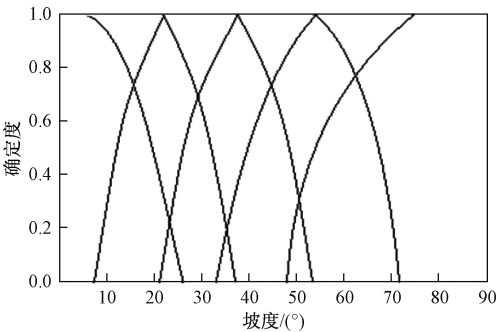


图 3 坡度指标的云模型

Fig.3 Cloud model of slope index

图 3 的横坐标代表坡度取值,纵坐标代表坡度对应的确定度,5 条曲线从左到右分别代表极低风险、低风险、中等风险、高风险和极高风险的云。

3 实例分析

陕西 S302 连接榆林市榆阳区和佳县,是佳县唯一的国省干线公路,途经刘千河、方塌、王家砭和通镇等

村镇,全长 88.7 km,属山岭重丘区三级公路。S302 路线区域属黄土梁、峁地貌,90% 以上被四系砂黄土覆盖,土层厚度达数米至数十米,地形切割剧烈,山间冲沟发育,年均降雨量较少,但多为局地短历时暴雨,每年因降雨造成的公路边坡灾害十分严重,例如,2012 年 7 月 26 日~28 日,陕北地区普降暴雨,造成 S302

全幅冲毁 8 处,半幅冲毁 50 多处,挡土墙破坏 20 处/360 延米,多处边坡坍塌,断道长达 2 个多月,各项经济损失超过 1000 万元。本文通过现场调查,查明了 S302 沿线 6 处潜在灾害点并进行风险评价,各潜在灾害点评价指标取值见表 4。

表 4 灾害点评价指标取值
Table 4 Assessment factor values of disaster points

评价指标	坡度/(°)	坡高/m	植被覆盖度/%	年平均降雨量/mm	年平均暴雨天数	历史最大地震烈度	灾害体规模/m ³	预计断道时间/h	
灾害点	K16 + 400	85	110	3	627.5	3.8	6	4360	120
	K41 + 400	70	60	10	627.5	3.8	6	1950	72
	K64 + 720	75	85	10	627.5	3.8	6	2640	48
	K65 + 300	55	25	20	627.5	3.8	6	2450	72
	K66 + 100	85	135	3	627.5	3.8	6	5790	144
	K78 + 700	60	75	5	627.5	3.8	6	2170	96

根据正向正态云发生器的基本原理和本文 2.4 节建立的云模型,计算各灾害点对应于各风险等级的综合确定度,并选取最大的综合确定度对应的风险等级作为风险评价的结果(表 5)。K16+400、K66+100 灾害点的风险评价结果为极高风险,K41+400、K64+

720 和 K78+700 灾害点的风险评价结果为高风险(表 5),K65+300 灾害点的风险评价结果为中等风险。风险评价结果与灾害点实际调查结果相近,说明本文的评价方法是科学、合理的。

表 5 风险评价结果
Table 5 Results of risk assessment

编号	桩号	相应的综合确定度					评价结果
		极低风险	低风险	中等风险	高风险	极高风险	
1	K16+400	0.0000	0.0765	0.1615	0.3462	0.4158	极高风险
2	K41+400	0.0000	0.0143	0.1916	0.5267	0.2674	高风险
3	K64+720	0.0000	0.0000	0.0861	0.4956	0.4183	高风险
4	K65+300	0.0000	0.0716	0.6257	0.2106	0.0921	中等风险
5	K66+100	0.0000	0.0000	0.0842	0.4259	0.4899	极高风险
6	K78+700	0.0000	0.0000	0.1557	0.6456	0.1987	高风险

4 结论

(1)建立了包含指标层、因子层和状态层的黄土区公路边坡灾害风险评价指标体系,选取坡度、坡高、植被覆盖度、年平均降雨量、年平均暴雨天数、历史最大地震烈度、灾害体规模和预计断道时间作为评价的指标,将风险评价结果和各指标的数字特征分为极低风险、低风险、中等风险、高风险和极高风险 5 级。

(2)通过调查 15 位相关领域的专家得到了评价指标的权重值,通过正向正态云发生器建立了不同评价指标对应于不同风险等级的云模型,以最大综合确定度对应的风险等级作为黄土区公路边坡灾害风险评价的结果。

(3)以陕西 S302 的 6 处潜在边坡灾害点对本文建立的云模型进行了实例分析,发现评价结果与灾害

点的实际调查结果相近,说明该模型是科学、合理的。

参考文献:

[1] 尹超,田伟平,李家春. 黄土区公路排水设施的水毁调查与优化设计[J]. 公路,2013(3):205-208.
YIN Chao, TIAN Weiping, LI Jiachun. Flood damage investigation and optimization design of drainage facilities in loess areas highway [J]. Highway, 2013 (3):205-208.
[2] 尹超,田伟平,马保成. 黄土公路边坡冲刷破坏影响因素和防治对策[J]. 交通企业管理,2012(3):52-54.
YIN Chao, TIAN Weiping, MA Baocheng. Influence factors of slope erosion destruction of loess road and prevention measures [J]. Transportation Enterprise Management, 2012(3):52-54.

(下转第 129 页)