

熵权模糊综合评价法在公路洪灾危险性评价中的应用

曾 蓉, 陈洪凯, 李俊业

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

摘要: 针对公路洪灾的复杂性、模糊性及不确定性, 基于模糊数学理论, 采用熵权法对公路洪灾各危险性指标赋权, 构造基于熵权的模糊综合评价模型, 通过熵权使权重由主观判断转为由各指标数据之间的关系来确定, 将客观权重和专家给出的主观权重综合度量得到评价结果。经过在重庆境内渝黔高速公路洪灾危险性评价实际案例中运用, 结果表明, 该方法是可行的, 能准确反映公路洪灾危险性程度, 在实践中具有一定的应用价值。

关键词: 危险性评价; 公路洪灾; 模糊综合评价法; 熵权

中图分类号: U418.5⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)04-0587-05

Fuzzy Comprehensive Evaluation Method Based on Entropy in Road Flood Risk Assessment

ZENG Rong CHEN Hong-kai LI Jun-ye

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract Due to the complexity, ambiguity and uncertainty of road flood risks, entropy weight method was employed to determine risk index weights based on fuzzy mathematics and establish a fuzzy comprehensive evaluation model on the basis of entropy weight. The evaluation model was determined by relationship among different indexes instead of subjective judgment. The evaluation results could be obtained by integrating objective weight and subjective evaluation by experts. After conducting a case study of flood risk evaluation in Yuqian Expressway, it was demonstrated that the model could exactly show highway flood risk degree, therefore it was feasible and valuable in practice.

Key words risk assessment; road flooding; fuzzy comprehensive evaluation method; entropy weight

由于自然因素作用形成的公路洪灾是世界各国面临的共同问题, 是国内外公路遭到洪水破坏的最大自然灾害之一, 在诸多对公路造成损失的灾害中, 洪灾作用引起的公路毁坏尤为严重^[1]。公路洪灾已成为影响公路交通完好、畅通最主要的灾害。其不仅使公路交通中断, 而且使人民的生命财产受到严重的威胁和损害, 给社会造成极大的经济损失。

模糊综合评价是以模糊数学为基础, 应用模糊关系合成的原理, 将一些边界不清、不易量化的因素量化, 进行综合评价的一种方法^[2-4]。由于公路洪灾危险性评价是一个非常复杂的系统, 由许多因子组成, 一些因子是难以定量或不可量化的, 所以公路洪灾危险性本身存在大量的不确定性因素^[5-7], 因此用模糊综合评判方法评价公路洪灾危险等级可以充分考虑评价因子和评价等级的不确定性, 但单

纯的模糊数学方法在确定各危险因素的权重时存在较大的主观性, 大多按照专家的经验或主观意志来确定, 容易使最终结果与实际情况产生偏差甚至可能失真。因此, 笔者采用基于熵权的模糊综合评价法对公路洪灾危险性进行识别, 该方法在确定危险因素的权重时一定程度上考虑到了各因素的不确定性和模糊性, 能够直接反映因素信息量的多寡从而度量危险性的大小; 若危险因素的熵权较大, 则评价者评价该因素存在较大的差异性, 说明该因素所提供的信息量较少, 具有较大的不确定性, 则该因素的危险性较大, 这在一定程度上避免了模糊综合评价法在权重确定上的不足, 能够比较准确反映公路洪灾危险的等级, 使评判结果更具有可靠性。

1 熵权模糊评价模型

由于公路洪灾是一个多因素耦合的复杂系统,

收稿日期: 2010-04-06 修改日期: 2010-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678182); 交通运输部西部交通科技项目(2009318221035)

作者简介: 曾蓉(1986-), 女, 四川德阳人, 硕士研究生, 从事岩土工程及GIS研究。E-mail: zengrong@163.com

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

各因素间关系错综复杂,表现出极大的不确定性和随机性。灾害危险性等级划分具有相对性和模糊性,没有绝对统一的定量指标,如Ⅰ级危险和Ⅱ级危险的边界是无法用一个绝对的判据划分,因为它是一个连续渐变的过程;各个项目的级别划分、标准确定都具有模糊性,因此用模糊综合评判方法评价公路洪灾风险等级可以充分考虑评价因子和评价等级的不确定性,但在模糊综合评价中,应用客观的指标赋权法,忽视了指标数值对评价结果的影响。例如当某个指标对应各专家的评定取值相同时,即便该指标已被赋予较高权重,现实评价中也会将该指标的权重调整为 0 该指标在评价中提供的信息就为 0 对评价结果的准确性产生重要影响。熵权信息论是用客观赋权法来确定指标的客观权重,对具有不同量纲的分指标进行标准化处理,将客观权重和专家给出的主观权重综合度量得到评价结果,因此将信息熵原理用于公路洪灾的危险性模糊评价中各因素的赋权——熵权模糊综合评价,以尽可能准确地反映公路洪灾危险性程度。

1 1 确定模糊评价集

危险评价指标是衡量危险等级的具体标志,在建立危险模糊评价模型之前,应该确定危险评价的主要影响因素^[8-13],即危险评价指标集、危险评价等级集。

设危险评价指标集为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$, m 为危险指标的个数;危险评价等级集为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, n 为危险等级。在该公路洪灾危险评价中,设有 k 个危险评价指标,选取 f 位评价者,形成原始数据矩阵 $A = (a_{ij})_{f \times k}$:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1f} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2f} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{kf} \end{bmatrix}$$

其中: a_{ij} ($i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, f$) 为第 j 位评价者评价第 i 种指标因素的危险等级,危险等级在危险评价等级集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 之内。

1 2 利用熵权法确定评价因素的权重

熵可以用来度量信息量的大小,某项指标携带和传输的信息越多,表示该指标对决策的作用就越大^[14-15]。熵权并非反映指标在实际意义上的重要性,而是在评估中的相对重要性,它反映的是当给定被评价对象集后各种评价指标值确定情况下,各指标在竞争意义上的相对激烈程度。系统的熵 $H(p_1, p_2, \dots, p_n)$ 形式如下:

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n) = -k \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \tag{1}$$

式中: $k = \frac{1}{\ln n}$ (n 表示系统可能处于的状态数); p_i 表示系统所处的某种状态出现的概率, p_i 满足 $0 \leq p_i \leq 1, \sum p_i = 1$, 并规定当 $p_i = 0$ 时,有:

$$-k \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i = 0 \tag{2}$$

评价指标矩阵标准化处理:

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij} - \min\{a_{ij}\}}{\max\{a_{ij}\} - \min\{a_{ij}\}} \tag{3}$$

通过上述变换,均有 $0 \leq a'_{ij} \leq 1$, 并且各类指标均化成正向指标,最优值为 1,最差值为 0

结合式 (3) 所得的标准化特征矩阵,则第 i 个指标的熵为:

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \tag{4}$$

式中: $f_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}}$ 。

第 i 个指标的熵权定义为:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)} \tag{5}$$

这样就得到基于熵权的危险评价指标权向量集:

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_m) \tag{6}$$

1 3 确定隶属函数和模糊关系矩阵

将模糊数学应用于公路洪灾危险评价时,以隶属函数来描述危险度的模糊界线。本文隶属度采用降半梯形分布法求得,公式如下:

$$r_{i1} = \begin{cases} 1 & x_i \leq v_{i1} \\ \frac{v_{i2} - x_i}{v_{i2} - v_{i1}} & v_{i1} < x_i < v_{i2} \\ 0 & x_i \geq v_{i2} \end{cases} \tag{7}$$

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_i \leq v_{i(j-1)} \text{ 或 } x_i \geq v_{i(j+1)} \\ \frac{x_i - v_{i(j-1)}}{v_{ij} - v_{i(j-1)}} & v_{i(j-1)} < x_i < v_{ij} \\ \frac{v_{i(j+1)} - x_i}{v_{i(j+1)} - v_{ij}} & v_{ij} \leq x_i < v_{i(j+1)} \end{cases} \tag{8}$$

$$r_{in} = \begin{cases} 0 & x_i \leq v_{i(n-1)} \\ \frac{x_i - v_{i(n-1)}}{v_{in} - v_{i(n-1)}} & v_{i(n-1)} < x_i < v_{in} \\ 1 & x_i \geq v_{in} \end{cases} \tag{9}$$

式中: x_i 为第 i 种评价指标的实际评价值,在此定义为 10 位专家评价的平均值,即 $x_i = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} a_{ij}$; v_{ij} 为第 j 种危险等级在第 i 种评价指标的初始值,一般为

危险评价等级集的初始值,在此定义为 $v_{i1} = 1$ $v_{i2} = 2$ $v_{i3} = 3$ $v_{i4} = 4$ $v_{i5} = 5$

计算出隶属度后,可建立危险评价指标与危险评价等级之间的模糊关系隶属度矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

1 4 模糊综合评价

由各评价指标的隶属矩阵和综合权向量,利用模糊数学理论得到模糊综合评价矩阵,为:

$$B = W \times R \quad (11)$$

式中: B 为综合隶属度; W 为危险评价指标权重集; R 为危险评价指标与危险评价等级之间的隶属度矩阵。

2 实例分析

渝黔高速公路是国道主干线重庆至湛江公路在重庆境内的一段,全长 134 km,设计行车速度 80 km/h,已经通车 8 a,车流量大。区内属于亚热带湿润季风气候区,雨量充沛,多年平均降雨量 1 082.6 mm,最大一日降雨量 192.9 mm,暴雨多集中在每年的 5—9 月。区内原始地形东高西低,为阶梯状斜坡地貌,总体上陡下缓,地貌形态受岩性和构造控制,为低山构造剥蚀地貌。区域岩土体主要由透水性差的粉质黏土夹碎块石以及具膨胀特征的强风化泥岩组成,岩层产状较陡^[16]。公路沿线分布大量斜坡,上部植被茂密,杂草丛生,发育众多滑坡,如向家坡滑坡。另外公路 20 km + 200 m 曾由于降雨发生滑坡,约 6 000 m³ 巨石夹杂着泥土从山上垮塌,在高速公路上堆积成高达 10 多 m 的小山,导致公路中断,堵了上万台车辆。以县级为单位,把重庆渝黔高速公路分为属重庆市主城区境内和綦江境内 I 段和 II 段 2 段。本文以綦江境内的渝黔高速公路,即 II 段计算过程为例。

2 1 确定评价因子和评价集

影响公路洪灾危险的因素众多^[17-21],通过对重庆市公路洪灾毁坏工程的调研、历年水毁资料的分析,并结合专家咨询的结果,将降雨、地形地貌、公路沿线地质灾害、公路类型、植被覆盖确定为公路洪灾危险性一级指标,最终确定的公路洪灾危险指标体系如表 1。

危险等级是区域公路洪灾危险程度的重要表征,笔者将危险等级分为 5 级,即危险评价等级集为:

$V = (\text{危险性低 } v_1, \text{危险中度 } v_2, \text{危险性较高 } v_3, \text{危险高 } v_4, \text{危险很高 } v_5)$

表 1 渝黔高速公路洪灾危险性指标体系
Tab 1 Flood risk index system of Chongqing-Guizhou Expressway

一级指标	二级指标
降雨 B_1	年平均降雨量 C_1
	24 h 降雨强度 C_2
地形地貌 B_2	土质边坡 C_3
	岩质顺向边坡 C_4
公路沿线地质灾害 B_3	滑坡发育 C_5
	崩塌发育 C_6
	沿河公路 C_7
公路类型 B_4	边坡填土路基 C_8
	边坡挖方路基 C_9
植被覆盖 B_5	植被覆盖率 C_{10}

2 2 利用熵权法确定评价因素的权重

按照各个指标因素对危险等级的影响,选取 10 位权威专家采用 5 等级标度法分别对 10 种危险评价因子赋予各自的危险等级,即 $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, $k = 10$, $f = 10$ 形成原始数据矩阵 $A = (a_{ij})_{10 \times 10}$ 为:

$$A = \begin{bmatrix} 4 & 2 & 3 & 4 & 4 & 2 & 3 & 4 & 4 & 2 \\ 4 & 3 & 5 & 3 & 3 & 4 & 4 & 5 & 4 & 3 \\ 2 & 2 & 3 & 2 & 2 & 3 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 3 & 3 & 2 & 3 & 4 & 3 & 4 & 3 & 2 & 3 \\ 5 & 4 & 4 & 4 & 5 & 5 & 4 & 5 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 3 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 4 & 3 & 2 & 3 & 3 & 2 & 3 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 2 & 3 & 3 & 1 & 3 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 3 & 1 & 3 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 3 & 3 & 2 & 3 & 2 & 3 & 3 \end{bmatrix}$$

由式 (3) 对原始矩阵进行标准化处理,标准化特征矩阵 A' 为:

$$A' = \begin{bmatrix} 1 & 0.05 & 1 & 1 & 0.05 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0.5 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 & 0.5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0.5 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0 & 0.5 & 1 & 0 & 1 & 0.5 & 1 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

由式 (1)、式 (2), 结合所得的标准化特征矩阵,根据式 (4)、式 (5), 则危险评价指标的熵值及熵权如表 2。

表 2 评价指标熵权
Tab 2 Entropy of index

一级指标	二级指标	熵值	熵权
降雨 B_1	年平均降雨量 C_1	0.828	0.1034
	24 h 降雨强度 C_2	0.753	0.1491
地形地貌 B_2	土质边坡 C_3	0.820	0.1082
	土质边坡 C_3	0.88	0.0726
公路沿线地质灾害 B_3	滑坡发育 C_5	0.699	0.1814
	崩塌发育 C_6	0.828	0.1037
	沿河公路 C_7	0.828	0.1037
公路类型 B_4	边坡填土路基 C_8	0.947	0.0319
	边坡挖方路基 C_9	0.822	0.1070
植被覆盖 B_5	植被覆盖率 C_{10}	0.935	0.0390

基于熵权的危险评价指标权向量集为:

$$W = (0.1034, 0.1491, 0.1082, 0.0726, 0.1814, 0.1037, 0.1037, 0.0319, 0.1070, 0.0390)$$

2.3 危险评价因素隶属度矩阵

根据各评价指标的实际值,由式(7)~式(9)中对应的隶属公式计算隶属度,如表 3。

表 3 各危险指标对应的 5 种危险等级的隶属度
Tab 3 Subjection of the risk index correspond ing to 5 types of danger leveks

评价指标	实值	危险等级					
	x_i	r_{i1}	r_{i2}	r_{i3}	r_{i4}	r_{i5}	
年平均降雨量 C_1	3.2	0	0	0.8	0.2	0	
24 h 降雨强度 C_2	3.8	0	0	0.2	0.8	0	
土质边坡 C_3	1.9	0.1	0.9	0	0	0	
岩质顺向边坡 C_4	3.0	0	0	1	0	0	
滑坡发育 C_5	4.5	0	0	0	0.5	0.5	
崩塌发育 C_6	1.8	0.2	0.8	0	0	0	
沿河公路 C_7	2.8	0	0.2	0.8	0	0	
边坡填土路基 C_8	2.7	0	0.3	0.7	0	0	
边坡挖方路基 C_9	2.1	0	0.9	0.1	0	0	
植被覆盖率 C_{10}	2.5	0	0.5	0.5	0	0	

由式(10),从而得到危险评价指标与危险评价等级之间的模糊关系隶属度矩阵 $R = (r_{ij})_{10 \times 5}$ 。

2.4 模糊综合评价

由 10 种危险评价因子的权重向量和隶属度矩阵,利用模糊数学理论得到模糊综合评价矩阵,由式(11)计算综合隶属度,为:

$$B = W \times R = \begin{bmatrix} 0.1034 & 0.1491 & 0.1082 & 0.0726 & 0.1814 \\ 0.1037 & 0.1037 & 0.0319 & 0.1070 & 0.0390 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0 & 0 & 0.8 & 0.2 & 0.3 & 0.9 & 0.5 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0.8 & 0.7 & 0.1 & 0.5 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T = (0.03156, 0.32645, 0.32063, 0.23066, 0.0907)$$

渝黔高速公路 II 段 5 种危险级别的综合隶属度如表 4。

表 4 5 种危险度的综合隶属度及公路 II 段所属危险等级
Tab 4 Overall subjection of five risks degree and risk degrees of road II

危险等级	较低	中度	较高	高	很高
综合隶属度	0.03156	0.32645	0.32063	0.23066	0.09070
所属等级	中度				

同理按照熵权模糊综合评价法,渝黔高速公路 I 段 5 种危险级别的综合隶属度如表 5。

表 5 5 种危险度的综合隶属度及公路 I 段所属危险等级
Tab 5 Total subjection of five risk degrees and risk degree of road I

危险等级	较低	中度	较高	高	很高
综合隶属度	0.40326	0.29353	0.26271	0.03010	0.01022
公路 I 段所属等级	较低				

渝黔高速公路重庆市主城区境内渝黔高速公路 I 段及綦江境内渝黔高速公路 II 段洪灾危险性等级如表 6。

表 6 渝黔高速公路洪灾风险所属危险等级
Tab 6 Flood risk degree of Chongqing-Guizhou Expressway

重庆渝黔高速公路分段	危险等级
重庆市主城区境内 I 段	较低
綦江境内 II 段	中度

3 结 论

1)通过对公路洪灾危险性构成要素的分析,结合重庆境内渝黔高速的实际情况,在指标选取原则指导下,选取了 10 个评价指标,利用熵权的模糊综合评价法对渝黔高速公路洪灾危险性进行了评价,评价结果为重庆市主城区境内渝黔高速公路 I 段洪灾危险性等级处于较低等级,綦江境内渝黔高速公路 II 段洪灾危险性等级处于中度。

2)将熵权理论和模糊方法应用于公路洪灾危险性评价,采用的熵权,不仅考虑了单个危险指标对危险等级的影响,还考虑到危险指标之间的相互联系对危险等级的影响,结合专家给出的主观权重得出了综合权重,使得确定的权重更科学、合理,从而确保了评判结果的可靠性。

3)评价结果具有一定的实际应用价值,有利于提供公路遭受洪灾潜在损失程度的可靠信息,对于公路洪灾危险区损失评估、政府部门决策,公路防灾工程标准制定具有重要意义。评价模型具有一定的客观性和普遍性,可以推广运用到其他地区进行公路洪灾危险评价。

参考文献:

[1] Amas I, Avran E. Perception of flood risk in Danube Delta Romania[J]. Natural Hazards 2009, 50(2): 269-287.
[2] Zhang Kejiang, Khick C, Achari G. A comparative approach for ranking contaminated sites based on the risk assessment paradigm using fuzzy Promethee[J]. Environmental Management 2009, 44

- (5): 952– 967.
- [3] Feng Lihua, HongW eihu, Wan Zi The application of fuzzy risk in researching flood disasters[J]. Natural Hazards 2010, 53(3): 413– 423.
- [4] 梁婕, 谢更新, 曾光明, 等. 基于随机 – 模糊模型的地下水污染风险评价[J]. 湖南大学学报, 2009, 36(6): 54– 58.
- [5] Bhuyan A, Borah M, Kumar R. Regional flood frequency analysis of north bank of the River Brahmaputra by using LHM onents[J]. Water Resour Manage 2010, 24(9): 1779– 1790.
- [6] Huang Xin, Tan Hongzhan, Zhou Jia Flood hazard in Hunan province of China: an economic loss analysis [J]. Natural Hazards 2008, 47(1): 65– 73.
- [7] 石林, 曾光明, 张硕辅, 等. 基于 GIS 的复杂河网区域洪水灾害风险评价[J]. 湖南大学学报, 2009, 36(7): 68– 72.
- [8] 田伟平, 马保成, 刘春焕, 等. 沿河公路水毁灾害的风险识别 [J]. 交通企业管理, 2009 (5): 66– 67.
- [9] Liu A xia, Lang Yin hai, Xue Li long Probabilistic ecological risk assessment and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from Yellow Sea[J]. Bull Environ Contam Toxicol 2009, 83(5): 681– 687.
- [10] Seifert I, Thieken A H, Merz M. Estimation of industrial and commercial asset values for hazard risk assessment[J]. Natural Hazards 2010, 52(2): 453– 479.
- [11] 蒙古军, 赵春红. 区域生态风险评价指标体系 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(4): 983– 990.
- [12] 许强, 陈伟. 单体危岩崩塌灾害风险评价方法: 以四川省丹巴县危岩崩塌体为例 [J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1039– 1046.
- [13] 杨坤, 周创兵, 王同旭. 多种外界随机荷载综合作用下的坝坡风险评价 [J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3057– 3062.
- [14] 余娜. 基于熵权的 Fuzzy 法在工程风险评价中的应用 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(1): 129– 133.
- [15] 王宝亮, 陈洪凯. 熵权决策法在滑坡治理方案优化选择中的应用 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(6): 1112– 1114.
- [16] 重庆长江工程勘察院. 渝黔高速公路 K13+ 500~ K13+ 960 向家坡立交左侧滑坡治理工程地质勘察报告 [R]. 重庆: 重庆长江工程勘察院, 2004.
- [17] 付意成, 魏传江, 王启猛, 等. 区域洪灾风险评价体系研究 [J]. 灾害学, 2009, 24(3): 27– 32.
- [18] 凌建明, 官盛飞, 崔伯恩. 重庆市公路水毁环境区划指标的研究 [J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 141– 147.
- [19] 韩金良, 燕军军, 孙炜锋, 等. 陕西省宝鸡市陈仓区吴家沟滑坡风险评价 [J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1118– 1125.
- [20] 王生锋. 关于重庆山区公路水毁问题的调查研究及其治理措施 [J]. 中国高新技术企业, 2009 (12): 101– 103.
- [21] Wunsch A, Hermann U, Kreibich The role of disaggregation of asset values in flood loss estimation: a comparison of different modeling approaches at the middle river Germany[J]. Environmental Management 2009, 44(3): 524– 541.

(上接第 567 页)

的绝对线性相关系数 (87. 1%) 高于与冻融前劈裂强度的绝对相关系数 (80%), 说明冻融劈裂强度与 TSR 的线性关系更为密切。

4 结 论

1) 通过对常用 AC – 13 与 AC – 20 热拌改性沥青混合料在多因素作用下的冻融劈裂强度性能分析, 得到了级配是影响表面层 AC – 13 沥青混合料冻融劈裂强度的主导因素, 而油石比影响则较小; 空隙率和砂当量是影响 AC – 20 沥青混合料冻融劈裂强度的关键因素。表明优化矿料级配, 加强细集料质量控制, 适当增加压实功, 可有效提高沥青路面表面层的抗水损害性能。

2) 在以 TSR 评价沥青混合料水稳定性的同时, 应结合冻融劈裂强度绝对值的大小综合考虑沥青混合料冻融劈裂强度大小, 可采用冻融劈裂强度和 TSR 联合作为水稳定性检验控制指标, 以提高路面承载力和耐久性。

3) AC – 13 改性沥青混合料冻融劈裂强度与马歇尔技术指标之间存在较为明显的线性相关性, 表明提高沥青混合料组成设计有助于提高路面的抗水损害能力。

参考文献:

- [1] 孙立军. 沥青路面结构行为理论 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [2] 李美江, 王旭东. 沥青面层间黏结状况对水损坏的影响分析 [J]. 公路交通科技, 2008, 25(3): 13– 17.
- [3] 懂泽蛟, 曹丽平, 谭忆秋, 等. 表面排水条件对饱水沥青路面动力相应的影响分析 [J]. 公路交通科技, 2008, 25(1): 10– 15.
- [4] 刘志明, 王哲人. 沥青路面水损害与车辙的分析研究 [J]. 公路交通科技, 2004, 21(8): 1– 4.
- [5] 潘宝峰, 王哲人, 陈静云. 沥青混合料抗冻融循环性能的试验研究 [J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 1– 4.
- [6] 丁立, 刘朝晖, 史义. 沥青路面冲刷冻融劈裂的水损害试验模拟环境 [J]. 公路交通科技, 2006, 23(9): 15– 19.
- [7] 冯俊领, 郭忠印, 陈崇驹, 等. 高温多雨条件下沥青混合料水损害模拟研究 [J]. 建筑材料学报, 2007, 10(5): 40– 44.
- [8] 马新, 郑传峰. 沥青混合料水稳定性评价方法的试验研究 [J]. 公路, 2008(4): 20– 24.
- [9] 包秀宁, 李燕枫, 王哲人. 沥青混合料水损害试验方法探究 [J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2003, 2(2): 157– 159.
- [10] JTG F 40— 2004 公路沥青路面施工技术规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [11] 汪荣鑫. 数理统计 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998, 148– 158.
- [12] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 35– 55.
- [13] JTJ 052— 2000 公路工程沥青及沥青混合料试验规程 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2000.