

文章编号: 1673-9868(2009)11-0145-05

# 高速公路隧道路面抗滑可靠性分析<sup>①</sup>

杨建国<sup>1,3</sup>, 谢永利<sup>1</sup>, 张晓<sup>2</sup>, 马巍<sup>3</sup>

1. 长安大学公路桥梁与隧道陕西省重点实验室, 西安 710064; 2. 甘肃路桥建设集团有限公司, 兰州 730070;  
3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

**摘要:** 行车环境的特殊性和路面抗滑性能耐久性是影响高速公路隧道交通安全的重要因素. 为了解路面抗滑性能现状, 以某高速公路隧道路面为研究对象, 实测道路交通量和隧道路面不同位置平均构造深度 MTD 和摆值 BPN, 预估了隧道路面抗滑性能的剩余寿命, 并用模糊聚类分析方法对数据进行处理, 得到隧道不同路段路面抗滑水平聚类结果, 分析结果与实际状况吻合. 为制定路面养护对策、进行合理的车速管制提供了科学依据, 减少或避免交通事故的发生, 也为高速公路隧道路面整体可靠性评价提供参考.

**关键词:** 高速公路隧道; 路面抗滑性能; 聚类分析; 路面抗滑寿命

中图分类号: U459.2

文献标识码: A

高速公路隧道路段行车环境相对较差, 是公路交通的咽喉, 易发生交通事故, 且事故后处理困难. 路面抗滑性能是影响高速公路隧道交通安全的重要因素, 资料<sup>[1-4]</sup>表明, 高速公路隧道事故率高达普通路段事故率的 1.34~8 倍, 而 81% 的事故与路面抗滑能力不足导致车辆制动时发生侧滑有关, 其他形态的事故仅占总数的 19%. 路面抗滑性能不足导致巨大经济损失, 欧洲每年隧道事故的直接经济损失达 2.1 亿欧元, 间接经济损失更是高达 3.0~4.5 亿欧元. 影响路面抗滑性能的因素较多, 且无时不在变化, 很难用传统的数学方法进行定量分析与描述. 模糊聚类分析方法<sup>[5]</sup>可以同时考虑许多不定因素, 比回归分析等常规方法具有明显的优越性. 为了解路面现有抗滑性能, 本文通过对高速公路隧道路面进行调查分析, 利用模糊聚类分析方法处理路面抗滑检测数据, 得到路面抗滑状况的聚类结果; 根据目前的交通量及交通量增长水平, 预估隧道路面抗滑性能的剩余寿命. 可为制定合理的路面养护对策, 采取有效的路面抗滑措施提供科学依据, 进而减少和避免交通事故的发生.

## 1 研究路面概况

研究项目为高速公路双向四车道分离式隧道, 设计速度 100 km/h, 上行线全长 3 011 m, 下行线全长 3 056 m. 项目所在地区为黄土高原向青藏高原的过渡地带, 气候属大陆性高原半干旱气候, 一月最低平均气温 -19.5 °C, 年平均降雨量 357.1 mm. 隧道外采用沥青混凝土路面, 隧道内采用水泥混凝土路面, 路面结构形式为: 26 cm 厚混凝土路面+20 cm 厚水泥处治碎石.

## 2 路面抗滑状况的模糊聚类分析

### 2.1 模糊等价关系的建立

为反映隧道路段路面整体状况, 聚类分析时选取上下行线隧道前后洞门内外各 30 m 处、隧道中点以

① 收稿日期: 2009-02-16

基金项目: 甘肃省交通厅科技项目, 甘交(科研)2005 第 004 号.

作者简介: 杨建国(1977-), 男, 甘肃皋兰人, 主要从事隧道工程研究.

及隧道长度 1/4 处共 14 个测试位置, 如图 1 示.

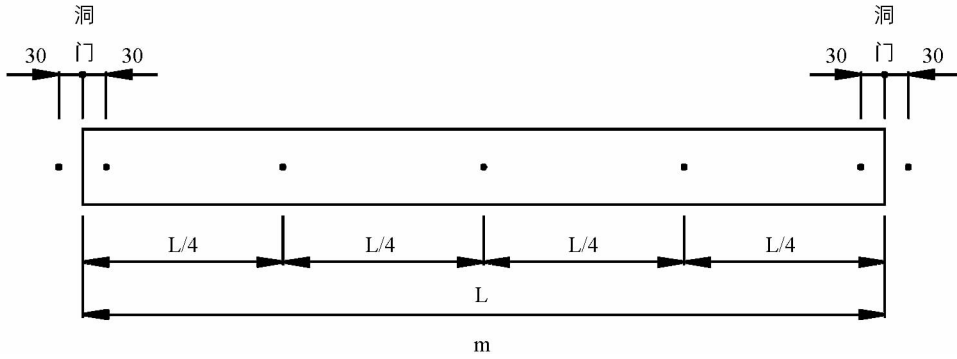


图 1 测试点位示意

每一个测试点由 3 个变量描述, 即: 路面类型(刚性路面或柔性路面)、英国摆式仪测定值(BPN)和铺砂法平均构造深度(MTD). 每一个变量均取样本点沿隧道横断面方向三个不同位置量测值的平均值. 检测数据见表 1.

表 1 隧道路面抗滑检测值

点号	路面类型	BPN	MTD/mm	点号	路面类型	BPN	MTD/mm
Z1	0	63	0.39	Y1	0	60	0.36
Z2	1	62	0.26	Y2	1	59	0.27
Z3	1	64	0.35	Y3	1	62	0.32
Z4	1	65.5	0.32	Y4	1	63.5	0.34
Z5	1	65	0.30	Y5	1	63	0.33
Z6	1	64	0.30	Y6	1	64	0.36
Z7	0	72.5	0.37	Y7	0	69	0.36

表 1 中沥青混凝土路面用“0”表示, 水泥混凝土路面用“1”表示, “Z”表示左线, “Y”表示右线. 按极差正规化公式(1)对数据进行标准化处理, 以无量纲的形式表示变量, 排除对样本相似性的随机影响.

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (1)$$

式中:  $x_{ij}$  为第  $j$  种变量的第  $i$  个实测值;  $X_{ij}$  为第  $j$  种变量的第  $i$  个标准值;  $\min x_j$  为第  $j$  种变量的最小值;  $\max x_j$  为第  $j$  种变量的最大值.

经处理, 由标准值构成的标准矩阵见表 2.

表 2 标准矩阵

0	0.30	1.00	0	0.07	0.77
1	0.22	0.00	1	0.00	0.08
1	0.37	0.69	1	0.22	0.46
1	0.48	0.46	1	0.33	0.62
1	0.44	0.31	1	0.30	0.54
1	0.37	0.31	1	0.37	0.77
0	1.00	0.85	0	0.74	0.77

为了得到模糊相似矩阵, 采用夹余弦公式(2)计算衡量样本相似程度的相似系数, 模糊相似矩阵  $R$  见表 3.

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m X_{ik} \cdot X_{jk}}{\left( \sum_{k=1}^m X_{ik}^2 \cdot \sum_{k=1}^m X_{jk}^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

式中:  $R_{ij}$  为相似系数;  $X_{ik}$  为第  $k$  种变量的第  $i$  个标准值;  $X_{jk}$  为第  $k$  种变量的第  $j$  个标准值;  $m$  为变量数.

表 3 模糊相似矩阵

1.00	0.06	0.60	0.48	0.37	0.36	0.84	0.98	0.08	0.45	0.56	0.51	0.64	0.89
0.06	1.00	0.83	0.90	0.94	0.95	0.16	0.02	0.97	0.91	0.86	0.89	0.80	0.15
0.60	0.83	1.00	0.98	0.95	0.96	0.57	0.57	0.82	0.98	1.00	0.99	1.00	0.59
0.48	0.90	0.98	1.00	0.99	0.99	0.55	0.42	0.86	0.98	0.99	0.99	0.97	0.55
0.37	0.94	0.95	0.99	1.00	1.00	0.47	0.31	0.90	0.97	0.96	0.97	0.94	0.47
0.36	0.95	0.96	0.99	1.00	1.00	0.44	0.31	0.92	0.98	0.97	0.98	0.94	0.43
0.84	0.16	0.57	0.55	0.47	0.44	1.00	0.71	0.05	0.42	0.54	0.49	0.59	1.00
0.98	0.02	0.57	0.42	0.31	0.31	0.71	1.00	0.08	0.43	0.53	0.48	0.61	0.78
0.08	0.97	0.82	0.86	0.90	0.92	0.05	0.08	1.00	0.92	0.86	0.88	0.80	0.06
0.45	0.91	0.98	0.98	0.97	0.98	0.42	0.43	0.92	1.00	0.99	1.00	0.97	0.43
0.56	0.86	1.00	0.99	0.96	0.97	0.54	0.53	0.86	0.99	1.00	1.00	1.00	0.55
0.51	0.89	0.99	0.99	0.97	0.98	0.49	0.48	0.88	1.00	1.00	1.00	0.99	0.51
0.64	0.80	1.00	0.97	0.94	0.94	0.59	0.61	0.80	0.97	1.00	0.99	1.00	0.62
0.89	0.15	0.59	0.55	0.47	0.43	1.00	0.78	0.06	0.43	0.55	0.51	0.62	1.00

模糊相似矩阵具自反性、对称性. 为使模糊相似矩阵具有传递性, 利用传递闭包法可得到  $R^8 = R^4$ ,  $R^4$  即为模糊等价矩阵, 见表 4.

表 4 模糊等价矩阵

1.00	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.89	0.98	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.89
0.64	1.00	0.95	0.95	0.95	0.95	0.64	0.64	0.97	0.95	0.95	0.95	0.95	0.64
0.64	0.95	1.00	0.99	0.99	0.99	0.64	0.64	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	0.64
0.64	0.95	0.99	1.00	0.99	0.99	0.64	0.64	0.95	0.99	0.99	0.99	0.99	0.64
0.64	0.95	0.99	0.99	1.00	1.00	0.64	0.64	0.95	0.99	0.99	0.99	0.99	0.64
0.64	0.95	0.99	0.99	1.00	1.00	0.64	0.64	0.95	0.99	0.99	0.99	0.99	0.64
0.89	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	1.00	0.89	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	1.00
0.98	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.89	1.00	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.89
0.64	0.97	0.95	0.95	0.95	0.95	0.64	0.64	1.00	0.95	0.95	0.95	0.95	0.64
0.64	0.95	1.00	0.99	0.99	0.99	0.64	0.64	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	0.64
0.64	0.95	1.00	0.99	0.99	0.99	0.64	0.64	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	0.64
0.64	0.95	1.00	0.99	0.99	0.99	0.64	0.64	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	0.64
0.64	0.95	1.00	0.99	0.99	0.99	0.64	0.64	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	0.64
0.89	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	1.00	0.89	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	1.00

## 2.2 聚类结果

选取  $\lambda$  水平截集进行模糊聚类分析, 重新安排模糊等价矩阵, 将对应元完全相同的行并为一类. 当  $\lambda = 0.89$  时分为 2 类, 分别是  $(Z1, Z7, Y1, Y7)$  和  $(Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Y2, Y3, Y4, Y5, Y6)$ . 当  $\lambda = 0.98$  时分为 5 类, 分别为  $(Z1)$ 、 $(Z2)$ 、 $(Z3, Z4, Z5, Z6, Y3, Y4, Y5, Y6)$ 、 $(Y1)$ 、 $(Y2)$ . 聚类结果表明: (1) 在交通荷载的磨损作用下, 沥青混凝土路面与水泥混凝土路面具有不同的抗滑性能, 且前者抗滑耐久性较强. 对研究项目而言, 隧道外路面抗滑性能优于隧道内. (2) 为适应隧道环境, 汽车在进出口处连续制动减速, 车流密度增大, 致路面表面抗滑能力下降较多.  $(Z2)$ 、 $(Y2)$  处汽车制动减速频繁, 为隧道路段路面抗滑能力最低点. 隧道洞外  $(Z7, Y7)$  属同一类, 表明两处路面表面抗滑性能相同. (3)  $(Z3, Z4, Z5, Z6, Y3, Y4, Y5, Y6)$  位于隧道内部, 因隧道环境封闭、路面易潮湿, 常形成油腻性薄膜层, 路面附着系数下降多, 路面表面抗滑能力较洞外正常路段差. 上述聚类分析结果与实际情况相吻合.

### 3 路面抗滑性能剩余寿命预估

隧道路面抗滑可靠性在交通荷载作用下迅速衰减,然后逐渐趋于稳定<sup>[6-8]</sup>.由目前的交通量及交通量增长水平可预估隧道路面抗滑性能的剩余寿命.调查表明,该隧道已运营 4a,调查路段左线当前年平均日交通量为 6500veh/d,使用初期交通量的年平均增长率 10%.则可按公式(3)计算竣工后到调查时的累计轴载作用次数  $N_e$ .

$$N_e = \frac{[1 - (1 - \gamma)^n] \times 365}{\gamma} N_1 \eta \quad (3)$$

式中:  $N_e$  为竣工到调查时累计标准轴载的作用次数;  $N_1$  为当前标准轴载的日作用次数;  $\gamma$  为使用初期交通量的年平均增长率;  $n$  为使用期年限(年);  $\eta$  为车道分配系数.

根据调查时路面构造深度  $TD$  或摆式仪测定的抗滑值  $BPN$ ,按公式(4)计算隧道路面抗滑性能衰减率  $K$ .

$$K = -\frac{dTD^*(BPN^*)}{dN} = \frac{TD_0(BPN_0) - TD(BPN)}{N_e} \quad (4)$$

式中:  $TD^*(BPN^*)$  为路面抗滑性能相对值,  $TD^*(BPN^*) = TD(BPN) - TD_s(NPN_s)$ ;  $TD_s(NPN_s)$  为路表抗滑性能不再下降时的稳定终值;  $N$  为累计标准轴载作用次数;  $TD_0(BPN_0)$  为刚开放交通时的隧道路面抗滑值;  $TD(BPN)$  为使用期间路表抗滑值.

由室内实验和室外观测数据得出的路面抗滑性能的衰减方程为:

$$TD^*(BPN^*) = A_{TD(BPN)} e^{-B_{TD(BPN)} N} \quad (5)$$

式中:  $A_{TD(BPN)} = TD_0(BPN_0) - TD_s(NPN_s)$  为抗滑性能最大可衰变落差;  $B_{TD(BPN)}$  为抗滑性能衰减速率同路面抗滑相对值的比值,即:

$$B_{TD(BPN)} = \frac{K}{TD^*(BPN^*)} \quad (6)$$

$TD_0(BPN_0)$  参照<sup>[9-10]</sup>确定,由目前的交通量及交通量增长水平,经计算,隧道进口段路面表面抗滑能力下降到不可接受水平估计还有 0.85 a.

### 4 结 论

1) 采用模糊聚类分析方法,得到高速公路隧道不同位置路面表面抗滑性能聚类结果.路面表面抗滑性能因路面材料、公路交通环境、车辆运行特征等具明显差异性.分析结果表明,隧道路面抗滑性能洞外优于洞内,沥青混凝土路面优于水泥混凝土路面,隧道进洞口路面抗滑性能在隧道路段最差.

2) 高速公路隧道路面表面抗滑性能随交通量增长不断衰减,由交通量及其增长率可预估路面抗滑性能剩余寿命.结果显示,该隧道进口段路面表面抗滑能力衰减速度较快,且 0.85 a 后将下降到不可接受水平,故应及时有针对性的采取必要的工程技术措施,提高路面抗滑能力.

3) 高速公路隧道路面表面抗滑性能直接影响公路交通安全,准确了解和评定路面表面抗滑性能现状是保证安全的重要前提.本文的写作为高速公路实施交通管制措施、制定路面养护方案,从而控制和提高路面表面抗滑能力,减少和杜绝隧道路段滑溜事故的发生提供科学依据;也为进一步进行高速公路隧道路面抗滑可靠性分析提供了必要借鉴和参考.

#### 参考文献:

- [1] 沈艾中. 隧道交通事故多发的成因及预防措施 [J]. 道路交通管理, 2002(2): 40 - 41.
- [2] 马昌喜, 广晓平, 钱勇生, 等. 长公路隧道交通安全研究 [J]. 灾害学, 2008(3): 82 - 87.
- [3] 宋晓春, 孙国华, 鲍平. 浙江省高速公路隧道交通安全情况调查及对策探讨 [DB/OL]. (2006 - 8 - 10) <http://www.tunneling.cn>.
- [4] Ad hoc Multidisciplinary Group of Experts on Safety in Tunnels. Report of the ad Hoc Multidisciplinary Group of Ex-

perts on Safety in Tunnels on Its Sixth Session. P5. 21 – 22 January 2003 [EB/OL]. (2003 – 5 – 6) [2003 – 10 – 16] <http://www.unece.org/trans/doc/2003/ac7/TRANS-AC713e.pdf>.

- [5] 朱伟, 江长胜, 郝庆菊, 等. 安徽省巢湖市集中式供水水源地水质安全评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, (9): 118 – 122.
- [6] 姚思国. 路面长期抗滑性能的研究. 国家“六五”专题报告 [R]. 北京: 交通部公路科学研究所, 1985.
- [7] 杨众. 沥青混合料表面特性评价方法的研究 [D]. 上海: 同济大学, 2001.
- [8] 杨众, 郭忠印, 侯芸, 等. 沥青混凝土防滑磨损层防滑性能加速试验方法的研究 [J]. 华东公路, 2002(2): 50 – 54.
- [9] 中华人民共和国交通部. 公路水泥混凝土路面养护技术规范(JTJ 073.1—2001) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [10] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面养护技术规范(JTJ 073.2—2001) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

## Reliability Analysis on Pavement Skid-Resistant Performance in Expressway Tunnels

YANG Jian-guo<sup>1,3</sup>, XIE Yong-li<sup>1</sup>, ZHANG Xiao<sup>2</sup>, MA Wei<sup>3</sup>

1. Shaanxi Provincial Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Gansu Province Road and Bridge Construction Group, Lanzhou 730000, China;

3. Cold and Arid Regions Environmental Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences

**Abstract:** The particularity of driving environment and durability of pavement skid-resistant performance are important factors which influence traffic safety in expressway tunnels. In order to learn about the present situation of pavement skid-resistant performance, mean pavement texture depth (MTD) and British pendulum number (BPN) of one expressway tunnel pavement were measured in different places of this tunnel. Residual life of its pavement skid-resistant performance was predicted based on surveyed traffic volume. Fuzzy cluster was used to analyze pavement skid-resistant performance. The analysis result showed that the cluster result was in good agreement with the actual situation. This paper provides scientific basis to make reasonable pavement maintenance countermeasures and to define proper speed limitation in tunnels, which will lead to a decrease in or avoidance of traffic accidents. Besides, this paper can also serve as a reference to the whole structure reliability analysis in expressway tunnels.

**Key words:** expressway tunnel; pavement skid-resistant performance; fuzzy cluster analysis; life of pavement skid-resistance

责任编辑 汤振金