

基于分形理论的沥青路面纹理特征与抗滑性能关系

舒春建¹, 胡玉梅²

1. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075;

2. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072

摘要:为提高沥青路面的抗滑性能,根据新疆某公路工程项目已铺筑沥青路面的实体照片和实测模向力系数,运用数字图像处理技术和分形理论研究沥青路面纹理分形维数与抗滑性能的关系,并通过室内试验探讨沥青路面纹理分形维数随车辆荷载作用次数的变化规律。结果表明:随沥青路面横向力系数的增大,路面纹理分形维数呈增大趋势;随荷载作用次数的增加,分形维数总体呈下降趋势,且在沥青路面投入使用初期下降趋势较为明显,抗滑性能降低较快,后减小趋势变慢。

关键词:沥青路面纹理;分形维数;分形理论;数字图像;横向力系数;抗滑性能

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2022)02-0089-05

引用格式:舒春建,胡玉梅.基于分形理论的沥青路面纹理特征与抗滑性能关系[J].山东交通学院学报,2022,30(2):89-93.

SHU Chunjian, HU Yumei. Relationship between the texture feature of asphalt pavement and skid resistant performance based on fractal theory[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2022, 30(2): 89-93.

0 引言

公路沥青路面良好的抗滑性能是保障道路交通安全的重要因素之一,据统计,因路面抗滑性能不足导致的交通事故占道路交通事故总数的30%左右^[1-3]。沥青混合料由沥青、粗骨料、细骨料和矿粉等按一定级配组成,路面纹理呈现显著的随机性和复杂性,对其构造特征的描述往往受到现有检测手段的限制。沥青路面的抗滑性能与其表面的纹理构造密切相关,因沥青路面纹理具有高度的自相似特性,故基于分形理论的沥青路面纹理构造特征描述得到广泛应用。

蒋育红等^[4]、董祥等^[5]、舒春建等^[6]基于分形理论研究沥青路面表面的微观凹凸特征,论证了路面表面凹凸分形维数和颗粒质量分形维数具有宏观和微观的相关性。黄宝涛等^[7]基于分形理论对沥青路面的抗滑性能提出了一种定量评价方法,通过室内试验研究了沥青路面分形维数与抗滑性能的关系,试验结果表明微观凹凸分形维数与路面抗滑性能具有单调递增的一致相关性。彭成坝^[8]运用分形理论评价不同级配的沥青玛蹄脂碎石混合料(stone matrix asphalt, SMA)路面纹理特性,通过室内试验研究了分形维数与路面构造深度、路面摩擦系数的相关性,即沥青路面分形维数与路面构造深度、路面摩擦系数有一定的关联度。

分形维数可较好地表征沥青路面纹理,并有助于研究沥青路面纹理特征与抗滑性能间的关系。但以往的研究成果多侧重在室内试验方面,对实际工程应用较少。本文依托新疆某公路工程项目,基于数字图像处理技术、分形理论和实测沥青路面的横向力系数,从室外实体工程的角度探讨沥青路面纹理的分形特征及其与抗滑性能指标间的相关性,并通过室内试验探讨沥青路面纹理分形维数随车辆荷载作用次数的变化规律。

收稿日期:2021-12-21

第一作者简介:舒春建(1989—),男,河南周口人,工程师,工学硕士,主要研究方向为道路工程,E-mail:shuhuym@126.com。

1 工程概况

三十五团至若羌公路工程项目是乌鲁木齐至若羌国家高速公路的重要组成部分,同时也是文献[9]中“6横、6纵、7枢纽、8通道”战略布局“第6纵”的重要组成部分。本工程项目位于塔克拉玛干沙漠的东缘,新疆巴州若羌县境内,采用双向4车道高速公路标准建设,项目路线全长189.496 km,项目所在区域公路自然区划为Ⅵ₂区,即西北干旱区中的绿洲-荒漠区,属暖温带大陆性干旱气候;项目所建沥青路面的气候分区为1-2-4区(夏炎热冬寒干旱)。从地表向下,该项目的路面结构依次为中粒式苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene butadiene styrene, SBS)改性沥青混凝土(AC-16C,油石比为4.6%)、粗粒式沥青混凝土(AC-25C)、水泥稳定砂砾(水泥与砂砾的质量比为4.5%)、天然砂砾,厚度分别为5、7、36、20 cm。路面上面层AC-16C混合料的生产级配如表1所示。

表1 AC-16C混合料的生产级配

筛孔直径/mm	19.000	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
通过筛孔的质量分数/%	100	97.8	88.4	67.7	35.9	29.6	24.8	18.5	14.3	11.0	5.5

2 沥青路面纹理构造测量及分形维数计算

2.1 基于数字图像处理技术的沥青路面纹理构造测量

获取沥青路面纹理构造信息是计算纹理构造特征参数的前提,测量路面表面纹理可采用直接测量法和间接测量法^[10];直接测量法采用的设备主要有接触式表面轮廓仪和激光轮廓仪,测量结果可能失真;间接测量法是指采用数字图像处理技术获得路面表面纹理构造信息,测量精度高、操作简便且成本较低^[11]。

本文采用数字图像处理技术获取沥青路面纹理构造信息。对已铺筑的沥青路面,采用普通数码相机拍摄其表明纹理的二维图像,借助MATLAB软件将拍摄的图片转换为灰度图像,并输出灰度图像的像素矩阵,再采用明暗恢复形状技术获取沥青路面的三维形貌信息,如图1所示。

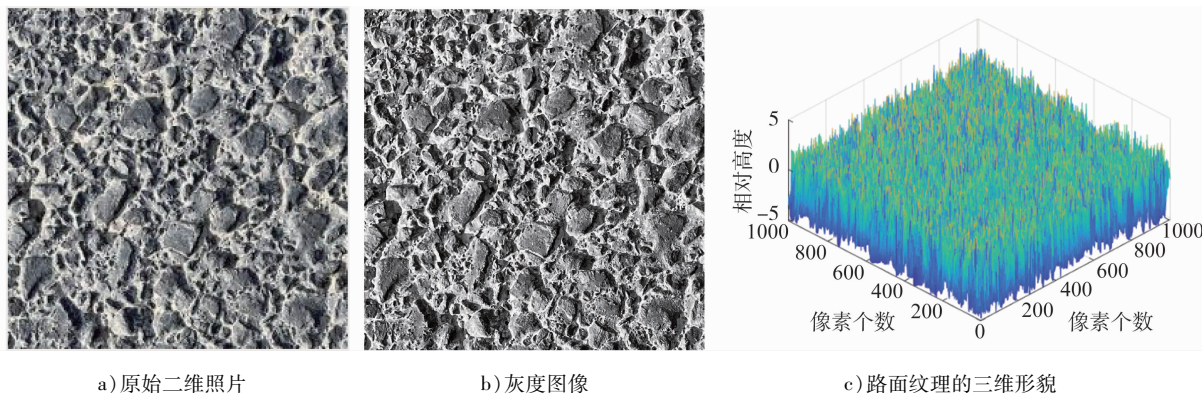


图1 沥青路面纹理构造信息获取流程

2.2 沥青路面纹理分形维数计算

分形理论可有效描述自然界中不规则几何体的特征,分形维数指标是描述分形体复杂结构特征的主要参数。目前,计算分形维数的主要方法包括标尺法、半方差法、功率谱密度(power spectral density)法,还可以根据测度关系、相关函数、分布函数等计算分形维数^[12-14]。

结合抗滑性能指标(摩擦系数)及分形维数的定义,采用三棱锥表面积(triangular prism surface area, TPSA)方法确定分形维数。TPSA采用正方形等具有特征长度的基本图形近似分形图形,属于标尺法的

一种,其具体实现步骤为:1)采用以不同像素数量为边长的正方形(边长为 $2^i, i=0, 1, 2, \dots$)覆盖数字图像,正方形4个角点的高程为其对应的灰度;2)在正方形内取4点,此4点的高程由正方形4个角点的高程插值得到,使4点分别与正方形4个角点相连形成4个三角形;3)计算4个三角形的表面积之和,并统计不同测度下的表面积之和与正方形个数间的关系,在双对数坐标系下进行线性回归分析,得到一条线性相关的直线,其斜率即为图像的分形维数^[12]。

3 纹理分形维数与抗滑性能关系

3.1 沥青路面抗滑参数

沥青路面的摩擦系数反映路面的抗滑性能,按照测试原理和方式的不同,摩擦系数的测试设备主要包括摆式摩擦系数测定仪、制动力系数测试仪和横向力系数测试仪等^[13]。依据文献[15]的要求,本文采用JGMC-2型公路横向力摩擦系数测试仪测量横向力系数,并以此为依据沥青路面的抗滑性能。

选择若羌方向已铺筑完成但尚未通车的的超车道沥青路面作为检测车道,测试车速为10.0~85.9 km/h,测试温度为28.2~48.9℃;测试路段桩号依次为K277+020、K277+025、K277+030、…、K373+950,长约96.930 km,测试间距为5 m,共获得横向力系数19 387个,考虑车速和温度修正后的横向力系数分布见图2。

由图2可知:此AC-16C沥青路面的横向力系数基本分布在50~100,满足文献[15]的要求。

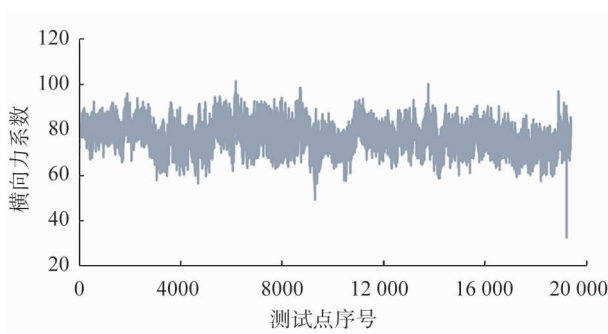


图2 测试点的横向力系数分布图

3.2 沥青路面纹理分形维数与抗滑性能(横向力系数)关系

采用数码相机拍摄不同横向力系数对应桩号位置的沥青路面纹理照片,采用第2章中数字图像处理技术和分形维数计算方法分别获取相应的纹理构造信息,计算其分形维数。

选取横向力系数为55~99的70处桩号位置对应的沥青路面照片,计算分形维数。沥青路面横向力系数与路面纹理分形维数 D 的关系如图3所示。

由图3可知:AC-16C沥青路面的纹理构造 D 分布在[2.145, 2.195],不考虑数据的突变影响,随着路面横向力系数的增大,路面纹理 D 呈总体增大的趋势。有些数据呈下降趋势主要是受拍摄时光线强度和角度的影响,或现场沥青路面施工不均匀所致。

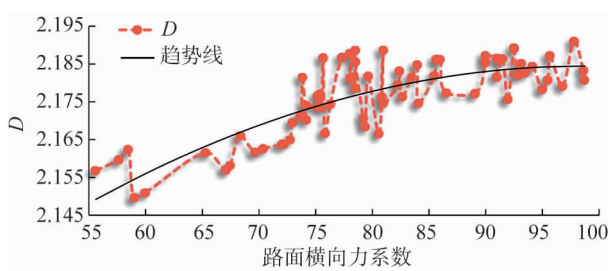


图3 沥青路面横向力系数与路面纹理分形维数的关系

当采用 D 表征沥青路面纹理构造的粗糙程度和复杂度时,计算得到的 D 愈大,路面纹理就愈粗糙,相应的横向力系数也就愈大,沥青路面的抗滑性能更优良^[16-18]。

3.3 沥青路面纹理 D 与车辆荷载作用次数 N 的关系

随着公路使用年限的增加,沥青路面纹理在车辆荷载的作用下发生不同程度的磨损,路面抗滑性能降低。在3.2节静态条件下沥青路面纹理 D 与横向力系数相关性研究的基础上,探讨沥青路面纹理 D 随车辆 N 的变化规律,分析路面抗滑性能的变化。

选用SMA制作车辙板试件,参照文献[19]中沥青混合料的车辙试验方法,采用SYD-0719型自动车辙试验仪的碾轮模拟车辆轮胎进行车辙试验。保持室温20℃,车辙试验仪的碾轮在车辙板试件上做往复运动,模拟车辆荷载对沥青路面的作用。间隔固定时间拍摄车辙板试件的表面形貌照片,并计算其表面纹理 D ,根据试验结果分析研究沥青路面 D 随车辆 N 的变化规律。

具体试验过程为:车辙试验仪的碾轮连续工作6.5 h,碾轮的碾压速度为 (42 ± 1) 次/min(单程),累计

荷载作用 16 380 次;在试验过程的前期,每隔 5 min 采用数码相机获取 1 张车辙板试件表面图像;随 N 的增加,表面纹理逐渐被磨平,且速度会减缓,试验后期采样间隔时间逐步增加至 10、20、30 min,共采样 27 个,分别经过 0、5、10、15、20、25、30、35、40、50、60、70、80、90、105、120、140、160、180、205、230、260、290、320、350、380、410 min 进行采样。 N 与车辙板表面 D 的关系如图 4 所示。

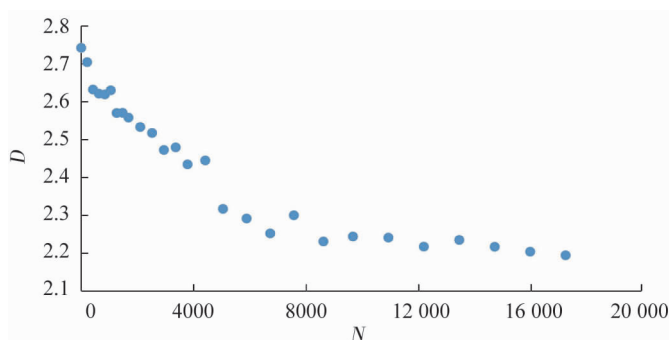


图4 车辙板试件表面 D 随 N 的变化趋势

由图 4 可知:随 N 的增加,车辙板试件的表面纹理 D 总体呈下降趋势,在试验初期 D 下降趋势较快,在荷载作用 12 000 次后其下降趋势逐渐趋于平稳。在多次碾轮荷载作用后,车辙板试件表面纹理的结构特点由原来的不规则变得规则、由复杂变得简单,路面抗滑性能降低。对图 4 数据进行曲线拟合, D 和 N 的函数关系可近似表示为:

$$D(N) = 2.1828 + 0.5369e^{-N/4575.0148} \quad (1)$$

经验证,试验数据与式(1)的相关系数为 97.57%,表明 D 与 N 间具有较强的相关性:随 N 的增大, D 先快速减小,后减小趋势变慢。这与沥青路面投入使用初期 D 明显下降,抗滑性能降低较快的表现一致。

4 结语

依托新疆某公路工程项目,采用分形理论探讨了沥青路面横向力系数与路面纹理的构造间的关系,研究表明沥青路面横向力系数随纹理分形维数的增大而增大。采用数字图像技术和分形理论能够有效地分析沥青路面纹理的构造特征及其抗滑性能,为沥青路面抗滑性能检测和评价提供了较好的思路 and 手段;室内试验结果表明,沥青路面纹理分形维数随车辆荷载作用次数的增加而减小,抗滑性能随之降低。

参考文献:

- [1] 刘林, 吕润华, 李梦茹, 等. 沥青路面级配分形维数与抗滑性能关系研究[J]. 四川建材, 2019, 45(8): 159-160.
- [2] 王书云, 张金喜, 金珊珊, 等. 沥青路面抗滑性能现场测试研究[J]. 中外公路, 2019, 29(4): 70-73.
- [3] ECH M, YOTTE S, MOREL S, et al. Qualification of wearing course material surface evolution after durability test[J]. Construction and Building Materials, 2012, 35: 313-320.
- [4] 蒋育红, 黄宝涛, 李家春, 等. 沥青路面抗滑性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(4): 753-756.
- [5] JIANG Yuhong, HUANG Baotao, LI Jiachun, et al. Slip resistance performance of asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2008, 32(4): 753-756.
- [6] 董祥, 张士萍, 丁小晴, 等. 沥青混凝土路面的纹理构造与抗滑性检测方法[J]. 公路, 2011(11): 14-20.
- [7] DONG Xiang, ZHANG Shiping, DING Xiaoqing, et al. Textures and testing methods of skid resistant performance for asphalt concrete pavement[J]. Highway, 2011(11): 14-20.
- [8] 舒春建, 张晓春. 沥青路面表面形貌的自相似研究[J]. 山东交通学院学报, 2014, 22(4): 57-62.
- [9] SHU Chunjian, ZHANG Xiaochun. Research on self-similarity in asphalt pavement surface topography[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2014, 22(4): 57-62.
- [10] 黄宝涛, 田伟平, 李家春, 等. 沥青路面抗滑性能定量评价的分形方法[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 12-17.
- [11] HUANG Baotao, TIAN Weiping, LI Jiachun, et al. Fractal method based on quantitative evaluation of asphalt pavement anti-slide performance[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 12-17.
- [12] 彭成坝. 沥青混凝土路面纹理构造特征表征技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [13] PENG Chengba. Study on the evaluation of texture structure for asphalt concrete pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [14] [9] 新疆维吾尔自治区综合交通运输“十三五”发展规划[R/OL]. (2018-05-25) [2021-12-10]. <https://www.ccpc360>.

- com/bencandy.php? fid=191&id=72742.
- [10] 桂志敬, 刘恒权, 张智勇. 路面纹理构造特征表征与抗滑性能检测技术研究进展[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2012(4):62-66.
- [11] 王端宜, 李维杰, 张肖宁. 用数字图像技术评价和测量沥青路面构造深度[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2004, 32(2):42-45.
- WANG Duanyi, LI Weijie, ZHANG Xiaoning. Evaluation and measurement of asphalt pavement surface texture depth with digital image technique[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(2):42-45.
- [12] 李契, 朱金兆, 朱清科. 分形维数计算方法研究进展[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(2):71-78.
- LI Jie, ZHU Jinzhao, ZHU Qingke. Review on methods of calculation fractal dimension[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(2):71-78.
- [13] CLARKE K C. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method[J]. Computers & Geosciences, 1986, 12(5):713-722.
- [14] 和松, 夏礼秀. 高速公路路面摩擦系数的测试与评价[J]. 公路交通科技, 2002(1):8-11.
- HE Song, XIA Lixiu. Friction coefficient measurement and evaluation for lane surface of expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002(1):8-11.
- [15] 公路工程质量检验评定标准:第一册 土建工程;JTG F80/1—2017[S]. 北京:人民交通出版社, 2017.
- [16] 王辉. SMA-13 沥青路面抗滑表层抗滑性能分形评价方法研究[J]. 公路交通技术, 2018, 34(1):28-31.
- [17] 崔宇峰. 基于分形理论的高速公路沥青路面抗滑性能衰减规律研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
- CUI Yufeng. Study on attenuation law of asphalt pavement anti skid performance based on Fractal Theory[D]. Xi'an:Chang'an University, 2018.
- [18] 关博文, 刘佳楠, 房建宏, 等. 基于抗滑性能的沥青路面纹理分形特征的研究进展[J]. 青海交通科技, 2018(2):76-80.
- GUAN Bowen, LIU Jianan, FANG Jianhong, et al. Research review of asphalt pavement texture fractal characteristics based on anti-sliding performance[J]. Qinghai Jiaotong Technology, 2018(2):76-80.
- [19] 公路工程沥青及沥青混合料试验规程;JTG E20—2011[S]. 北京:人民交通出版社, 2012.

Relationship between the texture feature of asphalt pavement and skid resistant performance based on fractal theory

SHU Chunjian¹, HU Yumei²

1. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd, Xi'an 710075, China;

2. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: To improve the skid resistance performance of asphalt pavement, combined with the photos of paved asphalt pavement of a highway engineering project in Xinjiang and its measured transverse force coefficient data, the relationship between the fractal dimension of asphalt pavement texture and the skid resistance performance is studied with digital image processing technology and fractal theory, and the change law of fractal dimension of asphalt pavement texture against vehicle loads number is discussed through indoor tests. The results show that the transverse force coefficient of pavement is positively correlated with the fractal dimension of pavement texture and the fractal dimension generally shows a downward trend with the increase the times of loading repetition, and the decrease is sharp in the primary stage of application, which makes the skid resistant performance decrease rapidly.

Keywords: asphalt pavement texture; digital image; fractal dimension; digital image; transverse force coefficient; skid resistant performance

(责任编辑:王惠)