

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.02.022

# 基于数字图像技术的露石混凝土路面纹理构造抗滑性能

宋永朝<sup>1</sup>, 梁乃兴<sup>2</sup>, 闫功喜<sup>1</sup>, 杨永前<sup>1</sup>

(1.重庆交通大学 交通运输学院, 400074 重庆; 2.重庆交通大学 土木建筑学院, 400074 重庆)

**摘要:**为稳定露石水泥混凝土路面高抗滑性能,提出一种基于数字图像技术的露石表面纹理构造分析方法.通过规范数字图像采集过程以缩小露石表面图像信息误差,通过数字图像获取露石表面纹理构造特征,建立像素空间曲面模型,计算露石纹理构造深度.运用图像形态学基础理论,分析二值图像中代表露石颗粒形态的上凸小区域相关参数,计算上凸小区域的数量、面积及大小组成,得到露石表面上凸面积百分数.研究表明:露石表面抗滑值与上凸面积百分数呈近似抛物线关系,为有效发挥露石表面高抗滑性能,建议露石表面上凸面积百分数控制在 $[0.25, 0.43]$ ,露石纹理构造深度合适区间为 $[0.58 \text{ mm}, 1.05 \text{ mm}]$ ,粗集料粒径对露石表面质量影响显著,4.75~19 mm级配的露石表面具有高抗滑性能.

**关键词:**露石水泥混凝土;数字图像技术;纹理构造;上凸面积;抗滑性能

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)02-0123-06

## Skid-resistant performance of texture structure of exposed-aggregate cement concrete pavement based on digital image technology

SONG Yongchao<sup>1</sup>, LIANG Naixing<sup>2</sup>, YAN Gongxi<sup>1</sup>, YANG Yongqian<sup>1</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, 400074 Chongqing, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, 400074 Chongqing, China)

**Abstract:** To stabilize high skid-resistant performance of EACCP, a method is proposed based on digital image technology to analyze texture structure of exposed-aggregate surface. By regulating digital image captured process of asphalt pavement surface, the error of digital image information could be reduced. Texture structure features of exposed-aggregate surface are acquired by means of the digital image. The curved surface model of image pixel space is established to calculate texture depth of exposed-aggregate surface. Utilizing the basic theory of image morphology, the binary image representing texture structure distribution is quantitatively analyzed. Calculating characteristic values of convex regions include number, area and its area ratios. The convex area percentage of exposed-aggregate surface can be contained. The results show that the relationship between convex area percentage and the skid-resistant value of its texture structure is an approximate parabola curve. To achieve high skid-resistant performance, the convex area percentage should be controlled within  $[0.25, 0.43]$ . The texture depth should be controlled within  $[0.58 \text{ mm}, 1.05 \text{ mm}]$ . The grading characteristics of coarse aggregate has a significant effect on quality level of exposed-aggregate surface. The exposed-aggregate surface with 4.75 - 19 mm coarse aggregate gradation possesses high skid-resistant performance.

**Keywords:** EACCP; digital image technology; texture structure; convex area; skid-resistant performance

收稿日期: 2013-08-30.

基金项目: 国家自然科学基金(51278361);重庆市自然科学基金(cstc2012jjA30001);长沙理工大学公路工程教育部重点实验室开放基金(kfj130102).

作者简介: 宋永朝(1975—),男,博士,副教授.

梁乃兴(1957—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 宋永朝, songyc69@163.com.

水泥混凝土路面具有强度高、稳定性好、使用寿命长等优点,同时亦存在抗滑性能差、行车噪声高、易产生眩光等问题.我国拥有丰富的水泥资源,高品质的水泥混凝土路面具有广泛的应用前

景. 露石水泥混凝土路面 (exposed-aggregate cement concrete pavement, 简称 EACCP) 作为一种新型的水泥混凝土路面<sup>[1]</sup>, 拥有独特的露石表面, 克服了普通水泥混凝土路面的诸多缺陷, 具有刚度大、高抗滑、低噪声、防眩等特点, 能广泛适用于城市交叉口、公路隧道、陡坡弯道等路段的铺面工程, 显著提高潮湿不利状态下路表抗滑性能, 有效降低行车噪声, 大大改善机动车行车安全和行车舒适性能。

道路表面抗滑性能与路表纹理构造密切相关<sup>[2]</sup>, 国际道路协会将路面纹理构造分为微观构造和宏观构造, 美国材料与试验协会 (ASTM) 给出了宏观构造和微观构造的定量描述 (ASTM E867), 道路表面纹理构造常用平均断面深度或平均构造深度进行描述<sup>[3-4]</sup>, 表面纹理构造深度 0.5 mm 以下为微观构造, 0.5 mm 以上为宏观构造. EACCP 经露石工艺处理后获得丰富的宏观与微观构造, 形成良好的抗滑表面. 露石纹理构造深度、露石颗粒分布状态是影响 EACCP 高抗滑性能的关键因素. 路表纹理构造主要通过构造深度指标来评定<sup>[5-6]</sup>, 王端宜等提出了运用数字图像技术的沥青路面表面构造深度检测方法<sup>[7]</sup>, 宋永朝等通过数字图像技术对 EACCP 露石表面构造深度进行测量<sup>[8]</sup>, 认为该方法精度高、信息量大、操作简便, 是一种有前景的路表功能测试方法. 对于露石表面纹理构造分布状况通常采用现场目测的方法, 主观性太大, 并不能很好地评判露石表面纹理构造分布优劣程度。

为此, 本文通过对露石混凝土试验块、EACCP 实体路段的露石表面进行大样本量的数字图像采集, 运用数字图像技术分析露石表面纹理特征, 探讨露石纹理构造深度、纹理构造分布与抗滑性能的内在关系, 为稳定露石表面高抗滑品质提供依据。

## 1 数字图像技术运用的基本原理

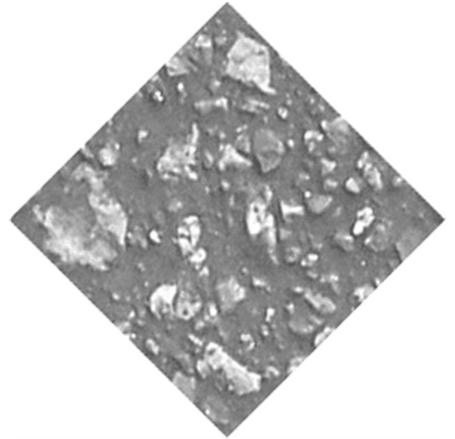
随着计算机技术的快速发展, 数字图像处理技术得到了广泛应用. 数字图像是图像在空间坐标  $(x, y)$  和亮度  $F(x, y)$  的数字化, 一个数字图像可以看成是一个矩阵或一个二维数组, 数字图像是以二维矩阵在计算机中进行存储的, 数字图像处理的实质是对二维矩阵的处理<sup>[9]</sup>. 平行光线照射在粗糙的物体表面上时, 反射到相机感光底片上各点的光线强度存在差异, 图像各点亮度或灰度不同, 拍摄到表面的上凸点位亮度较大 (即灰度值较大), 下凹点位较暗 (即灰度值较小), 可根据

图像各点明暗程度 (灰度值大小差异) 来区分物体表面的凸凹程度<sup>[10-11]</sup>, 数字图像的空间曲面构造模型为

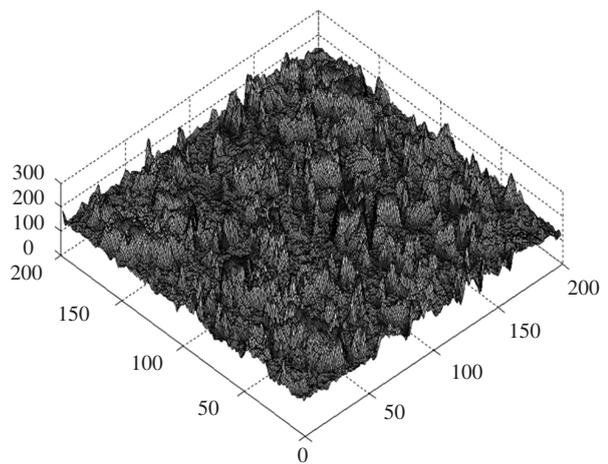
$$Z = F(x, y). \quad (1)$$

式中:  $Z$  为像素值;  $x, y$  分别为该像素所对应的横坐标和纵坐标。

露石表面数字图像通过数字图像处理获得图像像素分布矩阵. 为了说明数字图像技术在 EACCP 表面纹理构造中的应用效果, 将露石表面数字图像旋转  $90^\circ$  与像素空间分布图像进行对比, 如图 1 所示. 将露石表面数字图像图 1(a) 与像素空间分布图 1(b) 的各部分进行逐一对照, 数字图像的像素大小与露石表面凸凹状态呈一一对应关系, 图像像素值的分布情况能客观地反应露石表面纹理构造分布状态。



(a) 露石表面数字图像



(b) 图像像素空间分布

图 1 露石表面数字图像与像素空间分布

采用数码相机对露石表面进行拍摄时, 露石表面上凸、下凹各个点位的亮度不一, 反射到底片上的光线强度存在差异, 根据所采集的数字图像中各点位像素值来获得露石表面纹理构造的凸凹

状态信息,运用计算机数字图像处理技术,分析露石表面纹理构造深度和纹理构造分布状态,确定EACCP露石表面纹理构造的质量水平。

## 2 露石表面纹理构造分析

### 2.1 露石表面图像采集

基于数字图像技术的露石表面纹理构造分析方法,其分析对象为露石表面数字图像,原始图像应能真实反映露石表面纹理构造。露石表面图像采集过程中的光照状态是决定数字图像质量的主要因素,表面清洁程度会影响露石表面数字图像质量,露石表面组成材料的稳定程度亦影响分析结果的准确性。

通过规范EACCP露石表面数字图像的采集操作过程,以便减少或避免露石表面原始图像的信息误差。数字图像的拍摄设备采用普通数码相机,在进行数字图像采集前需清扫道路表面,确保拍摄区域干净整洁。在露石表面数字图像采集过程中,综合考虑发光源的亮度、照射角度等影响因素,在受照状态相同情况下进行多个测点图像采集,拍摄的垂直距离固定为50 cm,拍摄时保持镜头平面与道路表面平行,同时将校准条(或刻度尺)放置于拍摄区域的边缘,在同一画面内拍下测点区域和校准条。露石表面数字图像如图2所示,刻度尺置于拍摄区域下缘,用于纹理构造计算过程中的尺寸换算。

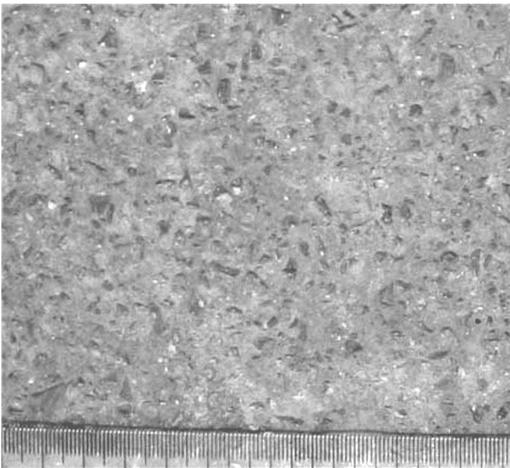


图2 露石表面原始数字图像

### 2.2 露石表面图像分析

按图像采集要求对露石表面进行数字图像采集,将拍摄的数字图像输入计算机进行资料存档和图像分析处理,对数字图像进行灰度分级处理,处理后的灰度图像如图3所示。

从灰度图像中提取图像的像素值,得到露石表面纹理构造的像素曲面分布,将给定平面区域

$D$ 内各点的像素空间曲面 $F(x,y)$ 与像素极大值所在平面围成的体积,确定为该区域 $D$ 内的表面构造像素空间体积,像素空间体积的数学模型为

$$V_{\text{pixel}} = \iint_D [F_{\text{max}} - F(x,y)] dx dy \quad (2)$$

式中: $V_{\text{pixel}}$ 为像素空间体积; $(x,y)$ 为图像坐标; $F(x,y)$ 为 $(x,y)$ 对应的像素值; $F_{\text{max}}$ 为像素极大值; $D$ 为积分区域。

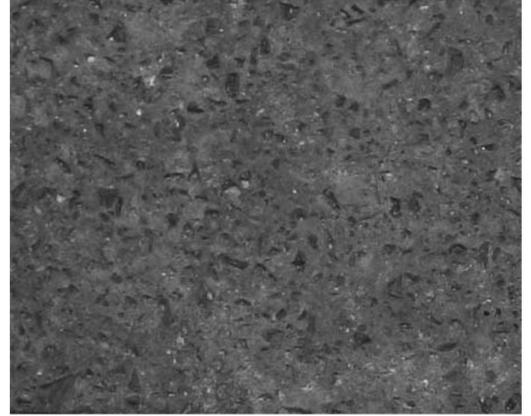


图3 露石表面灰度图像

计算选定的数字图像区域面积 $A$ 内的像素差平均值 $H_{\text{pixel}}$ ,参照文献[7-8],即可计算出数字图像相对应露石纹理构造深度大小,则

$$H_{\text{pixel}} = \frac{V_{\text{pixel}}}{A} \quad (3)$$

采用材料组成稳定、露石工艺相同的露石表面进行数学图像样本采集,得到各样本像素曲面分布状态,计算相应的 $H_{\text{pixel}}$ 。同时,在各图像采集点位进行铺砂法试验,测量其纹理构造深度 $H$ 。分析各样本点 $H$ 与 $H_{\text{pixel}}$ 之间的相关性,分析结果如图4所示, $H$ 与 $H_{\text{pixel}}$ 呈线性相关,回归效果显著。

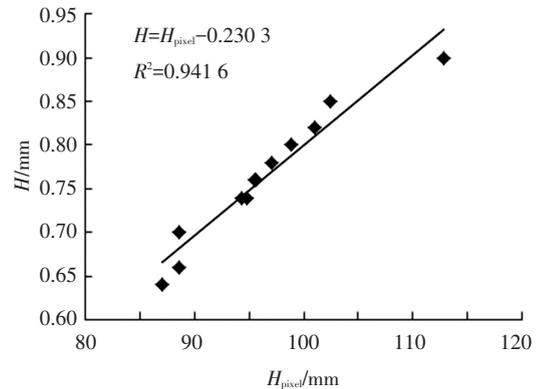


图4 露石表面 $H$ 与 $H_{\text{pixel}}$ 之间关系

我国行业技术规范中路表纹理构造深度检测方法包括铺砂法和激光法<sup>[5-6]</sup>,铺砂法的检测设备便宜、操作简单,但费时费力,检测结果受人为因素影响较大,激光法要通过专用的检测设备,设备昂贵,操作比较复杂。与常规检测方法相比,数

字图像采集便捷,运用数字图像技术的露石表面纹理构造深度检测方法易于增加测试样本数量,数字图像能客观反映露石表面纹理构造的凹凸信息,分析过程可实施程序化运算,便于实现露石表面纹理构造深度的连续化检测。

从灰度图像中提取图像的像素分布矩阵,运用图像形态学基础理论进行图像分割、边缘提取等,将灰度图像转换成二值图像。转换后的二值图像如图 5 所示,二值图像中的白色小区域代表露石表面纹理构造各上凸小区域的分布形态,即露石颗粒分布状态。

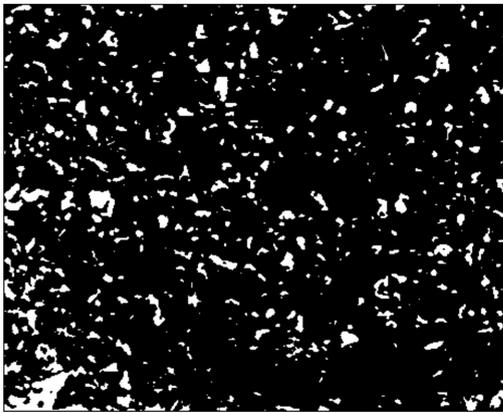


图 5 露石表面二值图像

提取二值图像中白色小区域形态特征,计算白色小区域的个数、面积及大小组成,统计平面区域内校准条刻度尺寸对应数字图像长度范围内的像素数量,数字图像的像素当量为

$$\varepsilon = L/M. \tag{4}$$

式中:  $\varepsilon$  为数字图像的像素当量;  $L$  为校准条长度;  $M$  为校准条长度范围内的像素数。

通过计算程序对二值图像中各白色小区域的非零像素个数进行统计,并计算二值图像中各白色小区域的上凸面积大小,可通过计算机运算得二值图像中各白色小区域的面积为

$$S_i = \varepsilon^2 \times N_i. \tag{5}$$

式中:  $S_i$  为第  $i$  个白色小区域反映的上凸面积;  $N_i$  为第  $i$  个白色小区域范围内非零像素数。

露石表面拥有丰富的纹理构造,在路面潮湿状态的行车过程中,EACCP 纹理构造的下凹部分能快速排离车轮下的路表水,上凸裸露颗粒能嵌入轮胎,提高了轮胎与路面的有效接触面积,从而显著提高了路面的抗滑性能。在潮湿状态下行车时,如何使露石表面既能快速排水又能有效增大轮胎接触面积,是确保露石表面抗滑性能有效发挥的关键,将露石表面纹理构造中的上凸、下凹面积控制在合适范围有利于稳定露石表面的抗滑性能。在此,本文提出用上凸面积百分数作为露石表

面纹理构造分布状态的技术指标,来分析 EACCP 表面纹理构造的抗滑性能,露石表面上凸面积百分数为露石表面上凸部分累计面积占被测表面面积的百分数,即

$$K_a = \sum S_i / S \times 100\%. \tag{6}$$

式中:  $K_a$  为上凸面积百分数;  $\sum S_i$  为路表各上凸小区域的面积和;  $S$  为数字图像相应实际面积。

二值图像的各白色小区域代表露石颗粒的形态特征,可根据二值图像中各白色小区域的数量、面积及组成,计算露石表面纹理构造的上凸小区域数量、面积及组成,得到露石表面上凸面积百分数。

运用数字图像技术检测露石纹理构造深度及纹理构造分布状态,定量分析纹理构造质量水平,具有效率高、费用低、操作便捷、信息量大、客观性强、适用面广等特点,分析过程实行计算机程序化计算,便于实现露石表面纹理构造检测工作的连续化。基于数字图像技术的路面纹理构造分析方法,能很好地适用于 EACCP 露石表面,亦可在沥青路面纹理构造质量检测工作中推广应用。

### 3 露石表面纹理构造抗滑性能

#### 3.1 露石表面上凸面积百分数

通过调整混凝土粗集料粒径、砂率等参数<sup>[12]</sup>,制作大量的尺寸为 30 cm×30 cm×6 cm 水泥混凝土试验块,在试验块边长为 30 cm 正方形表面上进行露石工艺处理,形成纹理构造各异的露石表面。采用数码相机对大样本量试验块的露石表面进行数字图像采集,计算各试验块露石表面的上凸面积百分数。同时,采用摆式摩擦系数测定仪对各试验块表面进行测试,检测各露石表面相应的抗滑值  $y$  大小,试验结果如图 6 所示。

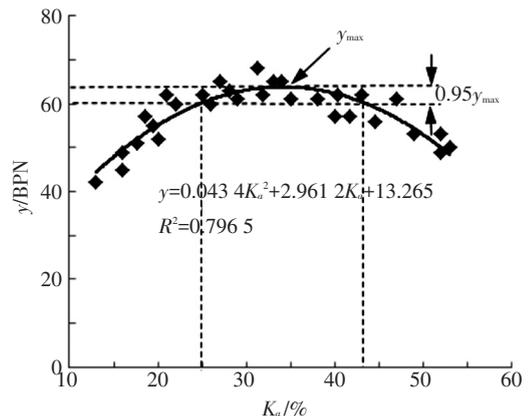


图 6 露石表面上凸面积百分数与抗滑值关系

由图 6 可知,露石表面抗滑值与上凸面积百分数呈近似抛物曲线关系。当上凸面积百分数少

于一定数值时,上凸面积百分数与抗滑值呈正相关,露石表面抗滑性能随上凸面积百分数的增大而增强;上凸面积百分数超过一定数值时,上凸面积百分数与抗滑值呈负相关,露石表面抗滑性能随上凸面积百分数的增大反而有所下降.综合考虑露石表面上凸面积百分数与抗滑值拟合曲线的区间  $[0.95y_{max}, y_{max}]$ , 建议在进行露石混凝土配合比设计、露石工艺设计时,露石表面上凸面积百分数控制在  $[0.25, 0.43]$ , 有利于稳定露石表面的高抗滑性能.

### 3.2 露石纹理构造深度

运用计算机图像处理技术对露石表面的数字图像样本进行分析,计算各图像样本对应的露石纹理构造深度.同时对露石表面相应位置进行抗滑试验,测试其抗滑值大小,试验结果如图 7 所示.

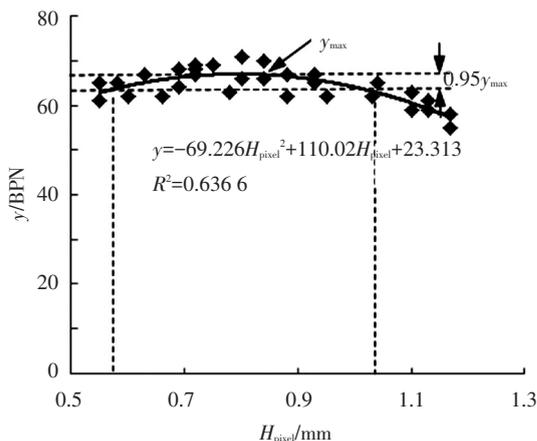


图 7 露石表面纹理构造深度与抗滑值关系

根据露石纹理构造深度与抗滑值之间的拟合曲线可知,露石纹理构造较小时,露石表面抗滑性能随露石纹理构造深度的增大而增强,当构造深度超过一定数值后,露石表面抗滑性能随构造深度的增大反而有所降低.露石表面纹理构造较小则单位面积内露石表面的裸露颗粒多,露石表面纹理构造较大则单位面积内露石表面的裸露颗粒少.现行行业技术规范<sup>[6]</sup>对路面构造深度只提出了最低值要求(高速公路、一级公路不少于 0.8 mm,其他公路为 0.6 mm),本文认为 EACCP 表面纹理构造深度,应既有最小值又有最大值的双要求更为合理.根据露石纹理构造深度与抗滑值拟合曲线的区间  $[0.95y_{max}, y_{max}]$  抗滑极值区间,建议 EACCP 表面纹理构造深度控制在  $[0.58 \text{ mm}, 1.05 \text{ mm}]$ .

### 3.3 露石表面粗集料粒径级配组成

2010 年 11~12 月份在重庆市涪陵区李渡镇、云南省瑞丽市等秀至河边街分别摊铺了 EACCP

试验路段,考虑到施工成本因素,就地取材,选用了当地石灰岩碎石作为粗集料.两段试验路采用相同的露石工艺,露石深度均以 1.5 mm 为控制要求,主要差别在于选用不同粒径级配的石灰岩碎石作为粗集料:重庆试验路段采用 4.75~19 mm 级配,云南试验路段采用 4.75~31.5 mm 级配.

采用数码相机对不同粗集料级配试验路段的露石表面进行数字图像采集,通过计算机图像处理技术计算两试验路段各测点的露石表面上凸面积百分数、露石纹理构造深度,同时测试相应点位露石表面的抗滑值大小,检测结果分别如图 8、9 所示.

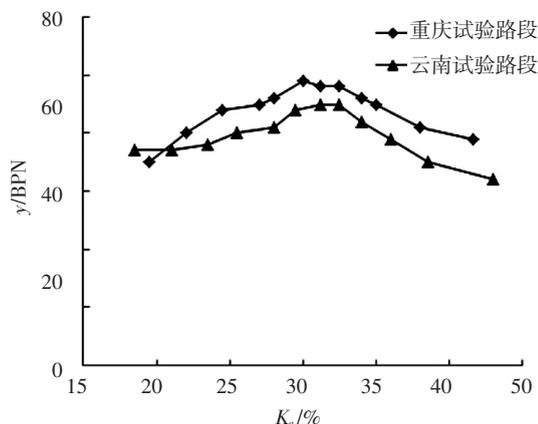


图 8 不同级配的上凸面积百分数与露石表面抗滑值关系

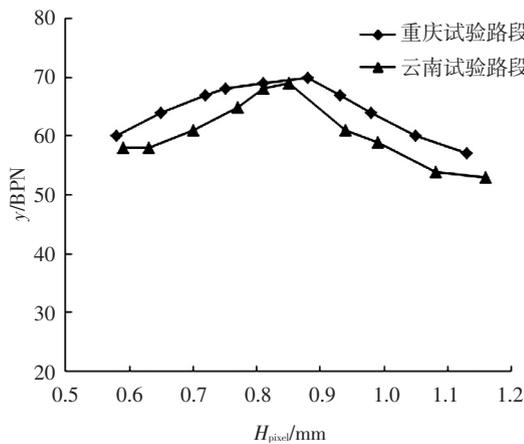


图 9 不同级配的表面纹理构造深度与露石表面抗滑值关系

从图 8、9 中可以看到,重庆试验路段的数据曲线整体抗滑值高于云南试验路段;云南试验路段的数据曲线变化幅度相对较大,靠近极大值附近变化明显;重庆试验路段的数据曲线相对平缓,抗滑值大于 60 BPN 对应的上凸面积百分数、表面纹理构造深度的取值范围相对较宽.从检测结果可知,采用 4.75~19 mm 级配的重庆试验路段抗滑性能优于 4.75~31.5 mm 级配的云南试验路

段,说明4.75~19 mm级配的EACCP获得较高抗滑值,其对应的上凸百分数、露石纹理构造深度技术指标所选择范围相对较大,4.75~19 mm级配的EACCP露石表面施工质量可控性更强,粗集料粒级组成情况影响露石表面纹理构造质量状态较显著.

## 4 结 论

1)提出了采用上凸面积百分数作为露石表面纹理构造分布状态的技术指标,分析得出露石表面上凸面积百分数与露石表面抗滑值呈近似抛物曲线关系,上凸面积百分数的建议控制在[0.25,0.43].

2)运用计算机图像处理技术对露石表面的数字图像样本进行分析,建立了露石表面抗滑性能与露石纹理构造深度的关系曲线,建议露石纹理构造深度控制在[0.58 mm, 1.05 mm].

3)根据不同粗集料级配试验路段的露石表面抗滑性能检测分析,得出4.75~19 mm级配的EACCP抗滑性能整体较高,其露石表面的施工质量可控性更强.

4)基于数字图像技术的EACCP露石表面纹理构造分析方法,可避免人为主观性,具有效率高、费用低、操作便捷、信息量大、客观性强、适用面广等特点,分析过程实行计算机程序化计算,便于实现露石表面纹理构造质量检测的连续化.

## 参 考 文 献

[1] 韩森,李志玲,张东省,等.露石水泥混凝土路面关键技术研究[J].中国公路学报,2004,17(4):17-20.  
[2] HENRY J J. Evaluation of pavement friction of characteristics [R]//National Cooperative Highway

Research Program (NCHRP) Synthesis 291.Washington DC: Transportation Research Board, National Research Council, 2000.

- [3] STROUP G M, STUDDARD J, WAGNER C. Evaluation of hot mix asphalt macro- and microtexture[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2004,32(1): 1-20.  
[4] ERGUN M, IYINAM S, IYINAM A F. Prediction of road surface friction coefficient using only macro- and micro-texture measurements [J]. Journal of Transportation Engineering, 2005,131(4): 311-319.  
[5] JTG E60—2008. 公路路基路面现场测试规程[S]. 北京:人民交通出版社,2008.  
[6] JTG F80/1—2004. 公路工程质量检验评定标准[S]. 北京:人民交通出版社,2004.  
[7] 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.  
[8] 宋永朝,黎富春,梁乃兴.基于数字图像技术的露石混凝土表面构造研究[J].重庆交通大学学报,2012,31(4):785-787.  
[9] 杨帆.数字图像处理与分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2007.  
[10] BUTTON J. Unified imaging approach for measuring aggregate angularity and texture [J]. Journal of Computer, Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2000,15(4):273-280.  
[11] MASAD E, MUHUNTHAN B, SHASHIDHAR N, et al. Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis [J]. Civil Engineering: Special Journal of Computing in Issue on Image Processing, ASCE, 1999,13(2):88-95.  
[12] 宋永朝.低噪音高抗滑露石水泥混凝土路面研究[D].重庆:重庆交通大学,2007.

(编辑 魏希柱)