

文章编号:1007-9629(2023)12-1310-09

集料表面纹理构造波长 SSD 分布规律及特征参数

林江涛¹, 王昊², 樊亮^{1,*}, 李永振¹, 庄传仪³

(1. 山东省交通科学研究院 山东省道路结构与材料重点实验室, 山东 济南 250101; 2. 山东高速股份有限公司, 山东 济南 250101; 3. 山东交通学院 交通土建工程学院, 山东 济南 250357)

摘要:为定量表征集料表面纹理构造,采用激光纹理扫描仪获取单档集料及其混合集料的表面纹理构造信息,对单档集料及其混合集料的表面纹理构造波长斜率谱密度(SSD)曲线的分布规律、特征参数及相互关系进行研究.结果表明:单档集料及其混合集料的表面纹理构造波长 SSD 曲线均符合 Gaussmod 函数方程,决定系数 R^2 均高于 0.99;提出了通过单档集料 SSD 曲线预测混合集料构造波长 SSD 曲线的预测方程,预测方程对 SSD 曲线峰面积、峰值的预测准确度不足,但对 18.3 mm 以下节点波长面积比的预测精度较高.实践表明,SSD 曲线特征参数中节点波长面积比、峰面积与路面车内噪音具有良好的线性关系,其决定系数 R^2 达到 0.957 1、0.887 6.

关键词:道路工程;集料;表面纹理构造波长;功率谱密度;斜率谱密度;特征参数;车内噪音

中图分类号:U414.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.12.010

SSD Distribution Law and Characteristic Parameters of Texture Construction Wavelength on Aggregate Surface

LIN Jiangtao¹, WANG Hao², FAN Liang^{1,*}, LI Yongzhen¹, ZHUANG Chuanyi³

(1. Key Laboratory for Road Structure and Material of Shandong Province, Shandong Transportation Research Institute, Jinan 250101, China; 2. Shandong Hi-speed Company Limited, Jinan 250101, China; 3. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China)

Abstract: In order to quantitatively characterize the surface texture structure of aggregate, the surface texture structure information of single-grade aggregate and its mixture was obtained by the laser texture scanner, and the construction wavelength slope spectral density (SSD) was selected as the characterization parameter to study the distribution rule, characteristic parameters and relationship of the surface texture structure wavelength SSD curve of single-grade aggregate and its mixture were investigated. The results show that the SSD curves of the surface texture construction wavelength of the single-grade aggregate and its mixture aggregate are consistent with the Gaussmod function equation, and the determination coefficient R^2 is higher than 0.99; The prediction equation for predicting the SSD curve of the composite aggregate by single-grade aggregate SSD curve is proposed. The prediction accuracy of the prediction equation for the peak area, peak value of the SSD curve is insufficient, and the prediction accuracy for the node wavelength area below 18.3 mm is higher than that of the characteristic parameters. Engineering practice shows that the characteristic parameters of SSD curve node wavelength area ratio and peak area have a good linear relationship with the interior noise on the road, and the determination coefficient R^2 reaches 0.957 1 and 0.887 6.

收稿日期:2023-01-11; 修订日期:2023-03-24

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFB1600103);交通运输部应用基础研究项目(2015319817110);山东省交通运输科技创新计划(2017B22);山东省交通运输科技创新计划(2021106160297)

第一作者:林江涛(1986—),男,山东莒县人,山东省交通科学研究院高级工程师,硕士.E-mail:linjiangtaokeyan@126.com

通讯作者:樊亮(1981—),男,山东单县人,山东省交通科学研究院研究员,硕士生导师,博士.E-mail:fanliang218@sina.com

Key words: road engineering; aggregate; surface texture structure wavelength; power spectral density; slope spectral density; characteristic parameter; interior noise

众多研究表明,集料作为沥青路面最重要的原材料之一,其表面纹理构造或形态特征不仅与混合料的高温性能、耐久性、黏结特性及水稳定性能等路用性能密切相关^[1-5],同时直接影响路面的抗滑、排水及噪音^[6-10]等特性.因此,对于集料表面纹理构造的量化表征是必要的,这能够为路面原材料选择、配合比设计及混合料性能评价等工作提供更多有益信息.近年,激光纹理扫描技术被广泛应用于道路工程相关工作中,取得了大量成果,但是相关研究多集中于路面实体或混合料,缺乏对于原材料集料表面纹理构造的相关研究.

鉴于此,本文选用玄武岩、石灰岩及安山岩等3种常见岩石集料作为原材料,通过区域三维激光纹理扫描仪提取单档集料与混合集料的表面纹理构造信息,选取构造波长斜率谱密度(SSD)作为表征指标,对单档、混合集料的表面纹理构造波长SSD曲线分布规律、相互关系进行研究,建立集料表面纹理构造波长SSD曲线的函数方程;提出通过单档集料预测混合集料表面纹理构造波长SSD曲线的预测

方程,选取峰面积、峰值以及节点波长面积比等SSD曲线特征参数进行误差分析,从而对预测方程有效性进行验证;最后,结合工程实践,对路面车内噪音与集料SSD曲线特征参数进行相关分析,以期为路面集料原材料选择或级配设计提供技术支撑.

1 试验

1.1 试验对象

试验对象为单档集料及其按照一定比例组成的混合集料.试件制备过程如下:称取 $(1\ 200\pm 10)$ g集料,拌和均匀后,平铺于圆孔型模具内,然后将集料表面整理平整即可.其中,圆孔型模具内径为280 mm、深度为10 mm.图1为试件制作模具及制备完成的典型观测试件.

试验所用集料包括3种岩石,分别为玄武岩、石灰岩及安山岩.考虑到沥青路面表面功能磨耗层常用集料规格,选用的集料规格分别为0~3、3~5、5~10 mm三档,其筛分组成见表1.不同试验阶段所用集料种类有所区别.

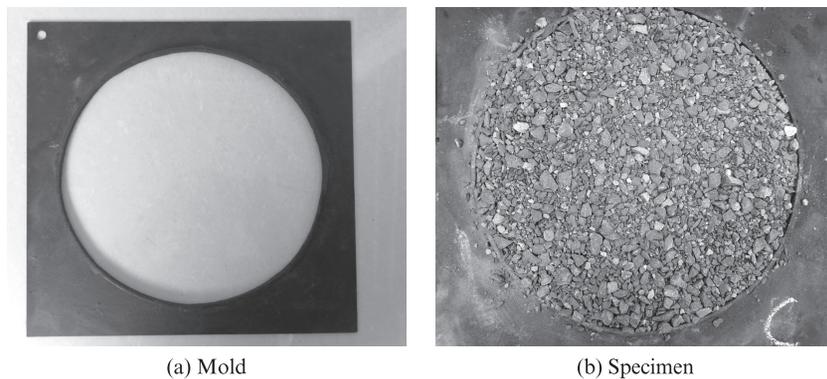


图1 试件制作模具及典型观测试件

Fig. 1 Preparation mold and typical observation specimen

1.2 区域三维表面纹理构造采集

采集设备为AMES LTS-9500型激光纹理扫描仪,扫描区域范围为 $104\text{ mm}\times 72\text{ mm}$.激光点范围中心为 0.025 mm ,边缘约为 $60\text{ }\mu\text{m}$.垂直采样分辨率为 0.005 mm .长度样本间距为 $0.006\ 35\sim 0.806\ 45\text{ mm}$,最小宽度样本间距为 $0.024\ 69\text{ mm}$.

2 结果与分析

2.1 斜率谱密度

表面构造纹理三维特征评价是通过测量表面区域,获得包含X、Y、Z三个维度的表面空间信息,从而

量化集料纹理空间特征和功能特征^[11].表面纹理构造信息数据包括空间域、频率域数据以及上述两种数据的衍生指标,其三维纹理特征参数包括高度参数、体积参数、功能参数、混合参数、空间参数、特征参数、孤岛参数和褶皱参数^[12-14].每类参数又包含数个特征参数及衍生参数,例如:平均构造深度(MTD)、平均断面构造深度(MPD)、均方根高度、支撑体积、峰密度、支撑率、功率谱密度(PSD)等数十种参数,指标繁杂,因此选择合适的指标进行应用分析是极为重要的.结合已有研究成果,分析认为单参数指标(如MTD、MPD等)包含信息相对单一,易导致扫描

表1 集料筛分组成
Table 1 Aggregate gradation composition

Type	Specification/mm	Passing ratio(by mass)/%								
		13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm
Basalt	5-10	100.0	99.3	7.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
	3-5	100.0	100.0	99.8	51.1	31.9	20.1	10.8	7.4	3.8
	0-3	100.0	100.0	100.0	81.7	53.2	27.9	11.6	7.6	2.8
Limestone	5-10	100.0	93.4	4.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
	3-5	100.0	100.0	94.3	48.3	27.5	18.4	9.9	7.0	3.2
	0-3	100.0	100.0	100.0	76.2	49.4	26.1	10.3	7.2	2.0
Andesite	5-10	100.0	95.2	3.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
	3-5	100.0	100.0	98.3	49.6	27.5	15.9	11.4	8.3	3.7
	0-3	100.0	100.0	100.0	77.5	47.2	24.9	11.6	6.9	2.8

区域表面纹理构造信息的缺失,无法完整描述表面的纹理状态^[15].在频率域上,PSD可以描述不同尺度并对集料纹理构造形态进行定量评价^[16-18],信息也更加全面.

在 AMES LTS-9500 型激光纹理扫描仪分析系统中,表面纹理构造波长(或波数)PSD以斜率谱密度 SSD 及高程谱密度(ESD)2种形式进行表述.两者都代表了不同波长(波数)下表面高程起伏程度的分布,但是 SSD 数据能更好地显示高程及粗糙程度的变化差异^[19].因此,本文最终选择构造波长 SSD 作为表面纹理构造的表征指标.构造波长 SSD 的数学意义是所采集坐标处构造纹理坡度分布的均方根值,具体计算见式(1).

$$D_{\lambda} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{z_{i+1} + z_i}{\Delta x} \right)^2} \quad (1)$$

式中: D_{λ} 为构造波长为 λ 时的斜率谱密度; N 为基线内的坐标数; z_i 为坐标 i 的高程值; Δx 为坐标之间的水平距离.

综上,构造波长 SSD 物理意义明确,它将 PSD 转化为物理意义更加明确的表面波动特征,与集料表面纹理轮廓更加接近,纹理构造信息更加全面.

2.2 单档集料构造波长 SSD 分布及特征参数

2.2.1 SSD 分布规律

试验发现,在 0.5 mm 以下波长范围内易产生大量采集噪点,对数据干扰极大,致使数据离散、重复性差.因此,必须设置滤波器对表面纹理数据进行处理^[20].为降低集料微观构造对 SSD 的影响,将低通滤波设置为 0.5 mm.同时,为减少频率域过于分散造成的 SSD 波动,采用倍频程分析方法来获取路面的表面纹理构造波长 SSD 曲线.利用 Origin 9.0 软件对 3 种单档集料的构造波长 SSD 分布数据进行非线性曲线回归分析,根据曲线形态,在数据库中选择单峰函

数进行拟合分析,具体拟合方程见式(2)、(3).单档集料构造波长 SSD 分布曲线及拟合参数见图 2 和表 2.其中 R^2 为决定系数, RSS 为残差平方和.

$$D_{\lambda} = y_0 + \frac{A}{t_0} e^{\frac{1}{2} \left(\frac{w}{t_0} \right)^2 - \frac{\lambda - \lambda_c}{t_0} z} \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (2)$$

$$z = \frac{\lambda - \lambda_c}{w} - \frac{w}{t_0} \quad (3)$$

式中: y_0 、 t_0 、 A 、 w 、 λ_c 为方程参数; y 、 z 均为变量.

图 2 和表 2 显示,试验用玄武岩、石灰岩及安山岩等不同种类、不同规格的集料表面纹理构造波长 SSD 曲线均符合 Gaussmod 函数方程,拟合程度较高,决定系数 R^2 均为 1.000.这表明,不同种类、不同规格的单档集料构造波长 SSD 分布规律具有一致性,单档集料的构造波长 SSD 曲线可通过 Gaussmod 函数方程进行稳定表征.

由图 2 和表 2 还可以发现,不同种类集料规格尺寸越小,其拟合曲线的残差平方和 RSS 相对越小,即拟合程度越好.分析认为,上述现象可能是由采集纹理的激光点尺寸和不同规格集料表面纹理均匀程度差异等因素导致.实际上,拟合所采用的 SSD 曲线是 140 条激光点采集纹理构造 SSD 曲线的均值.由于采集纹理的激光点尺寸远小于集料规格尺寸,因此集料规格尺寸越小,表面纹理构造相对越均匀,不同激光采样纹理间差异程度越小,与实际纹理匹配程度也会越高;反之,集料规格尺寸越大,不同激光采样纹理的不均匀程度越大,采集误差越大.

2.2.2 SSD 曲线特征参数

为方便叙述及后续分析,参照波谱分析方法,本文所用特征参数包括 SSD 曲线峰值、峰面积、节点波长面积及其面积比.其中:(1)峰值代表 SSD 曲线全波段内纹理构造起伏强度最大值,其对应波长可视

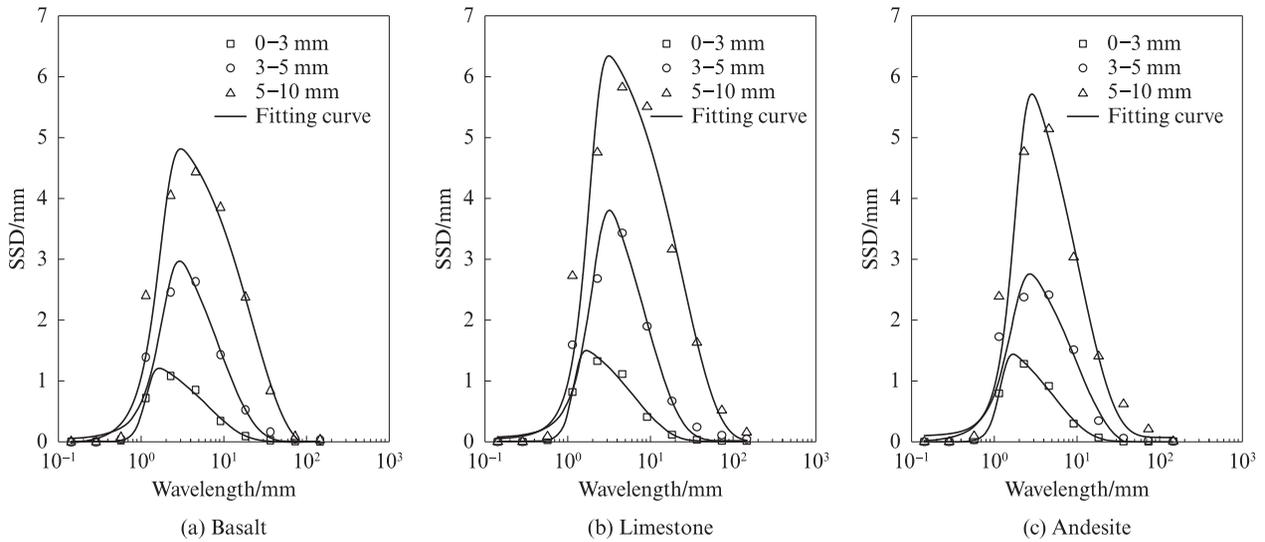


图2 单档集料构造波长SSD分布曲线
Fig. 2 SSD distribution curves of single aggregate construction wavelength

表2 单档集料SSD曲线拟合参数
Table 2 Fitting parameters for SDD curves of single aggregate

Type	Specification/mm	y_0	A	λ_c	ω	t_0	R^2	RSS
Basalt	0-3	0.004	8.578	1.108	0.248	6.436	1.000	0.008
	3-5	0	30.808	1.615	0.695	8.633	1.000	0.000
	5-10	-0.121	116.921	1.499	0.659	21.861	1.000	0.241
Limestone	0-3	0.007	10.739	1.137	0.249	6.507	1.000	0.004
	3-5	0.016	38.837	1.808	0.756	8.367	1.000	0.043
	5-10	0.003	166.822	1.668	0.626	24.547	1.000	0.627
Andesite	0-3	0	8.536	1.136	0.264	5.239	1.000	0.009
	3-5	-0.072	31.944	1.409	0.658	9.599	1.000	0.260
	5-10	0.072	67.681	1.655	0.585	10.465	1.000	0.362

为扫描区域内构造纹理特征波长;(2)峰面积是指构造波长SSD曲线全波段范围内的卷积面积,如图3(a)所示,它体现了SSD曲线整体的高程变化程度;(3)节点波长面积是指大于某节点波长的波段范围内的卷积面积,它体现了大于某节点波长的波段范

围内的高程变化程度,如图3(b)所示阴影面积代表节点波长为10.0 mm时的节点波长面积;(4)节点波长面积比即为节点波长面积与峰面积的比值,它代表大于某节点波长的波段纹理构造起伏变化占全波段高程变化的比例。

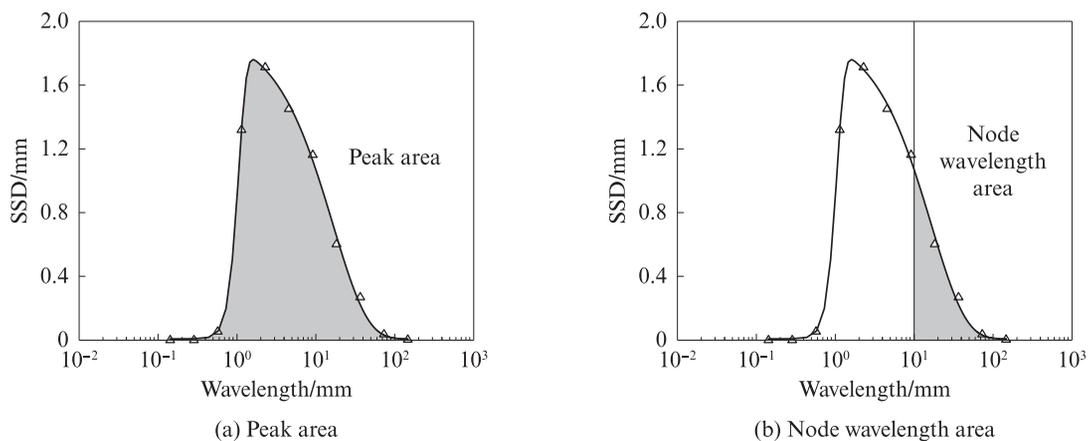


图3 特征参数示意图
Fig. 3 Schematic diagram of characteristic parameters

值得注意的是,节点波长及其相关概念是为方便叙述及数学表达所做的定义,并不体现SSD分布特征,节点波长在波段范围内可任意选择.

2.3 混合集料构造波长分布预测方程

路面工程中,集料多以混合集料方式应用,若通过单档集料SSD曲线能够准确、稳定地预测混合集料SSD曲线,则在混合集料比例调试时,便可以减少不必要的工作,提高配合比调试效率.假设混合集料表面纹理构造波长可由各组成单档集料构造波长线性叠加,即可通过单档集料构造波长SSD曲线及组成比例,来预测混合集料表面纹理构造波长SSD曲线,其预测方程如下:

$$D_i = \sum (P_j \times D_i') \quad (4)$$

式中: D_i 为混合集料第*i*个波长的SSD; P_j 为第*j*档

集料的比例组成; D_i' 为单档集料第*i*个波长的SSD.

为验证上述假设,按照不同集料比例配置混合集料,通过式(4)对混合集料构造波长SSD分布进行预测;并将预测值与实测值进行对比,以验证式(4)的有效性.考虑玄武岩、石灰岩及安山岩等不同岩石、不同规格的单档集料表面纹理构造波长SSD曲线规律的一致性,为了减小试验工作量并结合实际工程验证需求,最终选用玄武岩集料作为典型代表集料,以方便开展后续试验.另外,为了尽量减少研究过程中混合料表面沥青饱和度等变量的影响,对混合料沥青膜厚度进行统一设置.表3为混合集料组成及设计参数.图4为预测、实测的混合集料构造波长SSD曲线.

表3 混合集料组成及设计参数

Table 3 Composition and design parameters of mixed aggregate

Mixed aggregate	Composition(by mass)/%			Specific surface area/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	Asphalt content(by mass)/%	Asphalt film thickness/ μm
	0-3 mm	3-5 mm	5-10 mm			
A	40	20	40	5.094	5.8	10.2
B	25	60	15	6.035	6.6	10.1
C	65	15	20	6.237	6.8	10.1
D	70	25	5	6.669	7.2	10.1

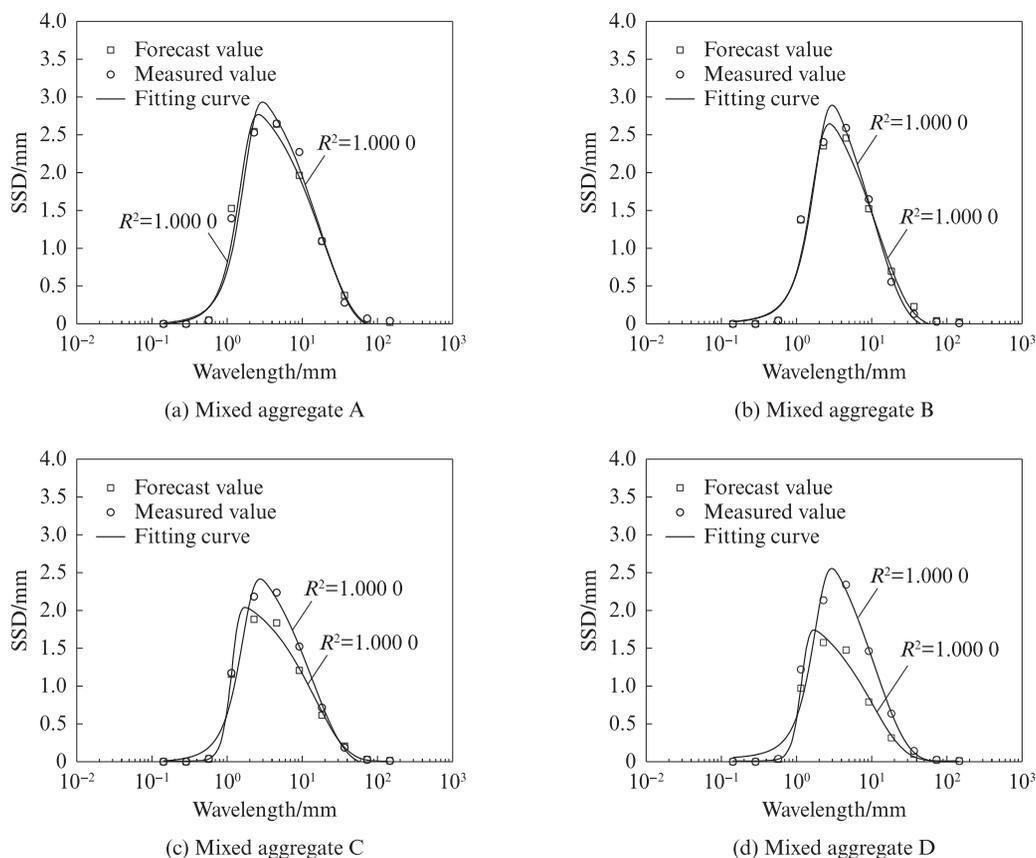


图4 混合集料构造波长SSD曲线

Fig. 4 SSD curves of mixed aggregate construction wavelength

由图4可见,4种预测、实测的混合集料构造波长SSD曲线均符合 Gaussmod 函数方程,决定系数 R^2 均高于0.99,这表明单档集料与混合集料的表面纹理构造分布规律均具有普遍一致性.但是,不同混合集料预测值与实测值的SSD曲线特征形态存在显著差

异,例SSD峰高及其对应波长参数有所不同.为进一步对比预测值与实测值之间的差异,选取SSD曲线峰值、峰面积及节点波长面积比这3个特征参数进行分析,结果见图5和表4.对特征参数预测值与实测值的相对误差(取绝对值)进行分析,结果见图6.

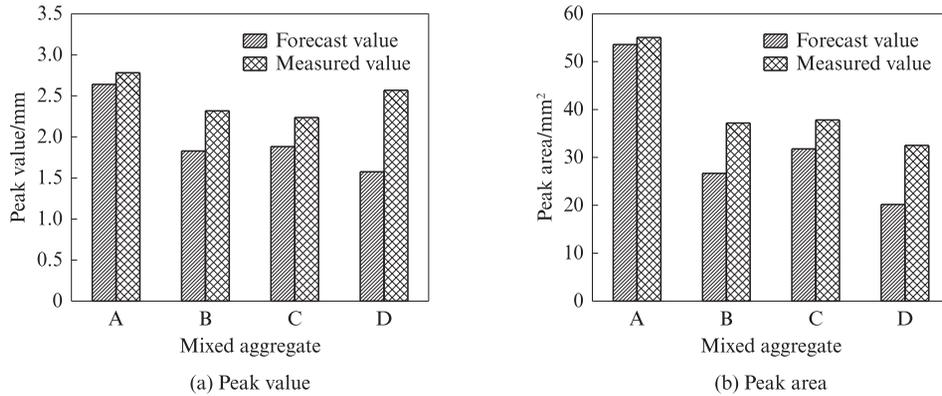


图5 混合集料SDD曲线峰值、峰面积的实测值与预测值

Fig. 5 Measured and forecast peak value and peak area for SDD curves of mixed aggregate

表4 混合集料SDD曲线的节点波长面积比
Table 4 Node wavelength area ratio for SDD curves of mixed aggregate

Node wavelength/ mm	A		B		C		D	
	Measured	Forecast	Measured	Forecast	Measured	Forecast	Measured	Forecast
0.1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
0.3	100.00	100.00	99.98	99.99	99.99	100.00	99.96	99.99
0.6	99.91	99.92	99.85	99.97	99.89	99.98	99.82	99.96
1.1	99.44	99.38	99.19	99.29	99.28	99.38	99.14	99.18
2.3	95.33	94.78	93.43	91.02	93.99	92.31	93.28	89.73
4.6	83.44	83.35	76.36	75.85	79.94	79.10	76.00	72.82
9.1	64.07	64.77	51.63	53.46	58.31	58.59	50.41	49.00
18.3	37.65	38.82	25.63	27.16	31.59	32.11	21.77	23.43
36.5	14.47	14.92	12.48	9.15	12.50	10.59	4.14	8.42
73.0	6.84	5.84	9.44	3.18	8.29	2.15	0.15	3.84
146.1	6.84	5.84	9.44	3.18	8.29	2.15	0.15	3.84

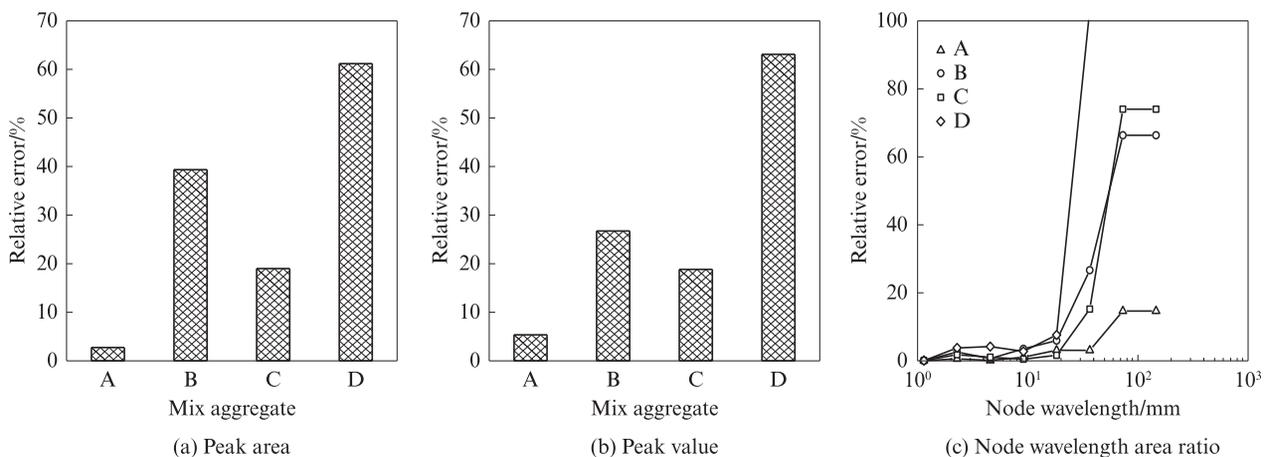


图6 特征参数预测值与实测值的相对误差

Fig. 6 Relative error between forecast value and measured value of characteristic parameters

图6(a)、(b)显示,混合集料SSD曲线的峰面积、峰值的预测值与实测值相对误差均呈现较大差异,最低达3%、最高达60%以上,预测精度不佳.图6(c)显示,当节点波长小于9.1 mm时,混合集料SSD曲线节点波长面积比预测值与实测值的相对误差均小于5%,预测精度良好;当节点波长小于18.3 mm时,相对误差均小于10%;当节点波长大于18.3 mm时,相对误差急剧增大,预测稳定性显著下降.上述结果表明,式(4)不能准确预测混合集料SSD曲线的峰面积、峰值;但是,当选取合适的节点波长时,式(4)能够准确预测混合集料的节点波长面积比.

在采集表面纹理时,会出现大量程度不一的白噪点,即使通过滤波设置也难以消除.白噪点会造成SSD峰值增大,在构造波长固定的情况下,峰面积、峰值的预测值与实测值呈现较大差异,导致预测精度的不稳定性.在数学意义上,节点波长面积比降低

了白噪点的影响.但是,当节点波长超过一定范围后,其波长的SSD大幅下降,节点波长卷积面积变小,这时节点波长面积比的敏感性显著增加,数值上较小的变动便导致较大的误差.因此,采用节点波长面积比作为预测依据时,建议选定的节点波长不宜超过18.3 mm.

2.4 SSD曲线特征参数的应用

项目组将A、B、C、D这4种混合集料作为目标配合比,用于MS-III型微表处路面工程铺筑.开放交通1个月后,按照GB/T 18697—2002《声学 汽车车内噪声测量方法》,对4种微表处路面的车内噪音进行检测.综合考虑车辆工况及高速公路行车速度安全等问题,车内噪音测试车型统一为KIA Sportage,行车速度均为100 km/h.测试完成后,将车内噪音与构造波长SSD曲线特征参数进行相关性分析,结果见图7.

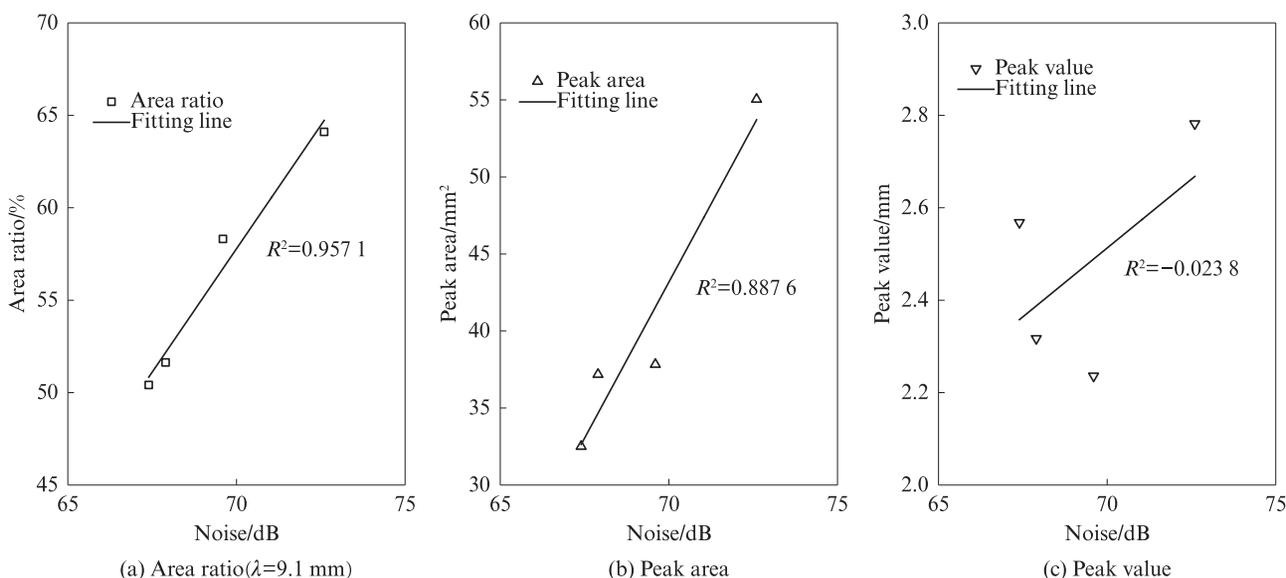


图7 特征参数与车内噪音相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between characteristic parameters and interior noise

图7显示:SSD曲线节点波长面积比、峰面积与车内噪音具有良好的线性关系,其决定系数 R^2 分别为0.9571、0.8876,显然节点波长面积比与车内噪音的相关程度更高;SSD曲线峰值与车内噪音的线性关系不佳,决定系数 R^2 仅为-0.0238.上述结果表明,车内噪音与集料构造波长波段分布特点有更密切的关系,但是其影响机理还需要进一步深入研究.

结合前文认为,通过选择合适的节点波长,可以通过单档集料的SSD曲线来准确稳定地预测混合集料的SSD节点波长面积比,而SSD曲线节点波长面积比与车内噪音具有良好的线性相关性.因此,在原材料选择或级配设计时,应依据集料构造纹理波长

SSD分布及预测规律,以节点波长面积比作为指标,通过控制SSD曲线及节点波长面积比,来达到对原材料或级配进行优化的目的.

3 结论

(1)单档集料、混合集料的表面纹理构造波长分布具有一致性,其表面纹理构造波长SSD曲线均符合Gaussmod函数方程.

(2)通过单档集料构造波长SSD以及线性叠加关系,建立了混合集料SSD曲线预测方程.当节点波长小于18.3 mm时,该方程能够准确预测混合集料SSD曲线节点波长面积比,相对误差在5%以内;预

测方程对SSD曲线峰值和峰面积的预测准确度不足。

(3)SSD曲线节点波长面积比、峰面积与车内噪音具有良好的线性关系,其决定系数 R^2 分别达到0.957 1、0.887 6;SSD曲线峰值与车内噪音的线性关系不佳,决定系数 R^2 仅为-0.023 8。

需要说明的是,限于篇幅等原因,本文所论述的主要是单档集料与混合料集料的表面纹理构造波长SSD分布规律及特征参数的相互关系,其工程应用验证也仅限于MS-III型微表处路面车内噪音,因此在研究的系统性和全面性方面还存在很多不足。下一步需要结合更多路面工程需求,着重从级配类型、混合料性能与表面纹理构造波长分布等相关影响因素角度出发,开展更加系统全面的研究。

参考文献:

- [1] 李晓燕,卜胤,汪海年,等.粗集料形态特征的定量评价指标研究[J].建筑材料学报,2015,18(3):524-530.
LI Xiaoyan, BU Yin, WANG Hainian, et al. Research on quantitative evaluation of morphological characteristic of coarse aggregates[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(3): 524-530.(in Chinese)
- [2] 王端宜,胡迟春, KUTAY E. 沥青混合料集料微观结构的三维重构与计算[J].建筑材料学报,2011,14(1):41-46.
WANG Duanyi, HU Chichun, KUTAY E. Three dimensional reconstruction and calculation of aggregate structure in asphalt mixture[J].Journal of Building Materials, 2011,14(1):41-46. (in Chinese)
- [3] 王志祥,李建阁,张争奇.集料形态特征对集料-沥青黏附及水稳定性的影响[J].建筑材料学报,2021,24(5):1039-1047.
WANG Zhixiang, LI Jiange, ZHANG Zhengqi. Effects of aggregate morphological characteristics on adhesion of aggregate-asphalt and its moisture stability[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5):1039-1047. (in Chinese)
- [4] 季节,郑文华,翟鹏,等.采用原子力显微镜评价集料的微纳观特征[J].建筑材料学报,2018,21(4):667-671,682.
JI Jie, ZHENG Wenhua, ZHAI Peng, et al. Evaluation on micro-and-nano scale characteristics of aggregate based on atomic force microscope technology[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(4):667-671,682. (in Chinese)
- [5] 申爱琴,刘波,郭寅川,等.隧道路面钢渣沥青混合料抗滑性能衰减试验研究[J].建筑材料学报,2019,22(2):284-291.
SHEN Aiqin, LIU Bo, GUO Yinchuan, et al. Skid resistance attenuation of steel slag asphalt mixtures on tunnel pavement[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2):284-291. (in Chinese)
- [6] 胡红松,路国栋,张争奇,等.不同路面加铺层抗滑降噪效果室内研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(1):44-51.
HU Hongsong, LU Guodong, ZHANG Zhengqi, et al. Indoor study on anti-sliding and noise-reducing of different pavement overlays[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(1):44-51. (in Chinese)
- [7] 陈搏.基于胎/路有效接触特性的沥青路面抗滑性能评价方法研究[D].广州:华南理工大学,2018.
CHEN Bo. Research on asphalt pavement skid resistance performance evaluation method of based on tire-pavement effective contact characteristics [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [8] SERIGOS P A, DE FORTIER SMIT A, PROZZI J A. Incorporating surface microtexture in the prediction of skid resistance of flexible pavements[J]. Transportation Research Record, 2014,2457:105-113.
- [9] 刘玉恒.低噪声微表处技术关键技术研究[D].南京:东南大学,2016.
LIU Yuheng. Key technologies of low noise micro-surfacing[D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [10] 张冉.微表处路面噪声机理与减噪技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
ZHANG Ran. Study on noise mechanism and noise reduction measures of micro-surfacing pavement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [11] 中国国家标准化管理委员会.产品几何技术规范GPS表面结构区域法第6部分:表面结构测量方法的分类:GB/T 33523.6—2017[S].
Standardization Administration. Geometrical product specifications GPS_surdace texture areal-Part 6 Classification of methods for measuring surface texture:GB/T 33523.6—2017[S]. (in Chinese)
- [12] 彭毅,李强,战友,等.基于区域三维纹理特征的路面抗滑性能评估[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(4):667-676.
PENG Yi, LI Qiang, ZHAN You, et al. Pavement skid resistance evaluation based on 3D areal texture characterization [J]. Journal of Southeast University(Natural Science), 2020, 50(4):667-676. (in Chinese)
- [13] LI Q J, YANG G W, WANG K C P, et al. Novel macro- and microtexture indicators for pavement friction by using high-resolution three-dimensional surface data[J]. Transportation Research Record,2017,2641(1):164-176.
- [14] 杨洁,李乐.基于机器视觉的表面粗糙度测量与三维评定[J].光学技术,2016,42(6):491-495.
YANG Jie. LI Le. Surface roughness measurement and three-dimensional assessment based on machine vision[J].Optical Technique,2016,42(6):491-495.(in Chinese)
- [15] GARCIA N Z. Predicting friction with improved texture characterization[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2017.
- [16] HARTIKAINEN L, PETRY F, WESTERMANN S. Frequency-wise correlation of the power spectral density of asphalt surface roughness and tire wet friction[J].Wear,2014,317(1/2):111-119.
- [17] 王大为,王宠惠,STEINAUER Bernhard,等.德国不限速高速公路路面平整度评价方法综述[J].中国公路学报,2019,32(4):105-113,129.
WANG Dawei, WANG Chonghui, STEINAUER Bernhard,

- et al. Overview on evaluation methods of pavement evenness for pavements without speed limiting expressway in Germany[J]. Chinese Journal of Highway, 2019, 32(4): 105-113, 129. (in Chinese)
- [18] 段虎明,石锋,马颖,等.基于功率谱密度的路面评价与特征参数提取[J].振动与冲击,2013,32(4):26-30.
DUAN Huming, SHI Feng, MA Ying, et al. Evaluation and extracting characteristic parameters for a road profile based on PSD [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(4): 26-30. (in Chinese)
- [19] SAYERS M W, KARAMIHAS S M. Little book of profiling—Basic information about measuring and interpreting road profiles [M]. Ann Arbor: University of Michigan, 1998.
- [20] KAMPSTRA P. Beanplot: A boxplot alternative for visual comparison of distributions[J]. Journal of Statistical Software, 2007, 28: 1-9.