

文章编号:1672-9331(2017)03-0013-08

基于集料力学指标的沥青路面抗滑性能衰减模型

孔令云¹, 尹果果¹, 林雄伟², 田强春³

(1.重庆交通大学 交通土建工程材料国家地方联合工程实验室, 重庆 400074; 2.江苏交科交通设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001; 3.广东省南粤交通投资建设有限公司, 广东 广州 510101)

摘要: 为了研究沥青路面抗滑表层抗滑性能衰减规律与粗集料力学指标之间的定量关系, 利用小型四轮加速加载试验设备对3个级配、4种粗集料共12组沥青混合料的摩擦系数随着加载次数的衰减规律进行了试验。研究表明, 沥青混合料级配主要影响沥青路面摩擦系数初始值, 而对其摩擦系数的衰减规律(衰减幅度、衰减速率、衰减终值等)影响不显著; 沥青混合料所用粗集料的力学指标(磨耗值、压碎值、磨光值)对沥青路面抗滑性能的衰减规律影响显著: 压碎值、磨耗值越小, 磨光值越大, 其对应的沥青混合料摩擦系数的衰减速率越小, 衰减幅度越小, 衰减终值越小, 反之亦然。最后建立了摩擦系数衰减规律与集料力学指标之间的定量关系模型。

关键词: 道路工程; 沥青路面; 力学指标; 抗滑性能; 衰减规律; 预测模型

中图分类号: U416

文献标识码: A

Anti-sliding performance attenuation model of asphalt pavement based on aggregate mechanical index

KONG Ling-yun¹, YING Guo-guo¹, LIN Xiong-wei², TIAN Qiang-chun³

(1.National and Local Joint Engineering Laboratory of Traffic Civil Engineering Materials, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2.Jiangsu Section Traffic Design and Research Institute Co. LTD., Huaian 223001, China; 3.Guangdong Nanyue Transportation Investment and Construction Co. Ltd., Guangzhou 510101, China)

Abstract: In order to study the quantitative relationship between the attenuation rule of asphalt pavement and the mechanical indexes of coarse aggregate, the friction coefficient of the friction coefficient of the asphalt mixture with three grades, four kinds of coarse aggregate and 12 kinds of coarse aggregate were tested by the small four wheel acceleration loading test equipment. Test results show that the asphalt mixture mainly affect the initial friction coefficient of asphalt pavement, but the influence of attenuation law (attenuation amplitude, decay rate, final value of attenuation etc.) of the friction coefficient is not significant. The mechanical indexes (wear value, crushing value, polishing value) of coarse aggregate used in asphalt mixture have remarkable influence on the anti-sliding performance of asphalt pavement. Crushing value and abrasion value smaller, polished value is greater, the corresponding friction coefficient of asphalt mixture decay rate is smaller, the attenuation amplitude was smaller, the attenuation value is smaller, and vice versa. The quantitative re-

收稿日期: 2017-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508062)

作者简介: 孔令云(1976-), 女, 江苏如皋人, 重庆交通大学副教授, 博士, 主要从事沥青和沥青混合料方面的研究。

relationship model between the attenuation law of friction coefficient and the aggregate index is established.

Key words: road engineering; asphalt pavement; mechanical index; anti-sliding performance; attenuation law; prediction model

对于沥青路面抗滑表层,其抗滑性能是表征路面表面使用性能的重要特征之一。拥有良好抗滑性的路面,将带来良好的舒适性及安全性,故沥青路面抗滑表层抗滑性能衰减预测模型的研究尤为重要^[1,2]。目前,对该预测模型的研究仍处于定性研究的阶段,如基于早先野外调查统计,国内外相关研究人员通过室内模拟试验手段^[3,4]探讨了抗滑性能衰减规律^[5-10]。但是在工程实际应用中,集料的力学指标是控制路面性能指标的重要因素。但目前的沥青路面抗滑性能衰减模型对集料力学指标的关注度不高,无法将原材料的技术指标与沥青路面抗滑能力衰减建立关系。

因此,作者通过对不同料源的集料(2种石灰岩、1种玄武岩、1种花岗岩)在不同级配条件下成型的车辙试件,利用小型加速加载设备,进行沥青路面抗滑性能衰减规律的模拟,并采取相关数据处理手段,将集料的磨光值^[3-4]、磨耗值、压碎值等力学指标与沥青混合料的抗滑性能衰减规律进行关联,从而提出集料力学指标与沥青混合料抗滑性能衰减规律之间的模型,为今后更加科学地选择沥青路面抗滑表层粗集料提供指导。

1 原材料及试验设计

1.1 沥青

试验采用的是 SBS 改性沥青,其相关技术指标汇总于表 1。

由表 1 可知,试验选取的 SBS 改性沥青各项指标均满足规范^[10]中 I—C 要求。

1.2 集料

①粗集料。

为合理评价粗集料种类对抗滑性能衰减规律的影响,选取 4 种不同料源的集料进行试验,分别为石灰岩 I (SH1)、石灰岩 II (SH2)、玄武岩 (XW)、花岗岩 (HG),其相关技术指标汇总于表 2。

②细集料及填料。

细集料主要是石灰岩,填料采用石灰岩矿粉。

表 1 SBS 沥青性能参数

Table 1 Performance parameters of SBS asphalt

指标要求	SBS 改性 沥青	规范	试验 方法
针入度(25℃,100 g,5 s)/ 0.1 mm	72.3	60~80	T0604
针入度指数 PI (不小于)	0.02	-0.4	T0604
延度(5℃,5 cm/min) (不小于)/cm	35.5	30	T0605
软化点(不小于)/℃	77.3	55	T0606
运动粘度(135℃) (不大于)/(Pa·s)	2.6	3	T0625, T0619
闪点(不小于)/℃	328	230	T0611
溶解度(不小于)/%	99.8	99	T0607
弹性恢复(25℃)(不小于)/%	90	65	T0662
TFOT(或 RTFOT)后残留物			
质量变化(不大于)/%	0.01	1	T0610 或 T0609
针入度比(25℃)(不小于)/%	90	60	T0604
延度(5℃,5 cm/min) (不小于)/cm	31.4	20	T0605

表 2 粗集料技术指标汇总

Table 2 Summary of technical indexes
of coarse aggregate

料源	试验编号	压碎值/%	磨耗值/%	磨光值(BPN)
石灰岩 I	SH1	24.3	21.8	43.4
石灰岩 II	SH2	25.2	20.2	44.3
玄武岩	XW	13.0	9.8	56.6
花岗岩	HG	14.5	10.1	49.6
规范规定		≤26	≤28	≥42

1.3 沥青混合料配比

1) 矿料级配。

选用 AC—13C 型级配。为了研究级配对抗滑性能衰减规律的影响,选用 3 种级配进行抗滑性能衰减规律试验研究,其级配曲线见图 1。

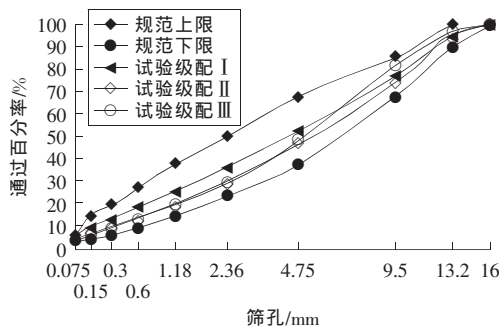


图 1 试验用级配曲线

Fig. 1 Grading curve of test

2) 最佳沥青用量。

沥青采用 SBS 改性沥青,以马歇尔试验确定 3 种级配的最佳沥青用量,基本试验参数见表 3。

表 3 3 种级配沥青混合料的试验参数

Table 3 Test parameters of three kinds of gradation asphalt mixture

级配类型	最佳油石比	空隙率 %
级配 I	5.0	3.4
级配 II	5.0	3.8
级配 III	4.8	3.6

1.4 试验设备

1) 试件成型设备——车辙试件的轮碾成型机。

四轮加速加载试验是在标准条件下成型的车辙试件上进行,车辙试件的成型过程严格参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中 T0703—2011 的要求执行。

2) 加速加载设备——小型加速加载试验机。

参考 ASTM E660—90 标准试验方法,并借鉴标准车辙试验仪的工作原理,在国内现有的加速加载试验机^[11]的基础上,研制了小型加速加载试验机,用于沥青混合料长期抗滑性能评价。其实物图见图 2。



图 2 小型加速加载试验机

Fig. 2 Small accelerated loading test machine

摩擦系数测定设备为进口的 WESSEX 摆式摩擦仪(见图 3)。



图 3 WESSEX 摆式摩擦仪测摆值

Fig. 3 WESSEX tilting friction pendulum value measuring instrument

1.5 加速加载试验设计

沥青混合料抗滑耐磨性能的加速加载试验设计,主要考虑级配和粗集料两因素的影响。级配采用图 1 中的 3 个级配,粗集料采用表 2 中的 4 种集料。抗滑性能指标测定采用摆式摩擦系数仪,试验方案见表 4。

表 4 加速加载试验试验沥青混合料方案

Table 4 Accelerated loading test of asphalt mixture

级配	集料			
级配 1	SH1	SH2	XW	HG
级配 2	SH1	SH2	XW	HG
级配 3	SH1	SH2	XW	HG

注:1.加速加载方案(以上组合,共计 12 种沥青混合料);2.测定初始摩擦系数;3.每加速加载 2 h 测定 1 次摩擦系数。

2 加速加载试验结果及分析

2.1 加速加载试验条件

1) 试验轮为直径 25 cm、宽 10 cm 的真空轮胎,一批轮胎有效使用时间为 2 h。

2) 加载速度为 60 r/min;温度为常温。

3) 根据该轮胎的承载能力进行配重,该轮胎的最大承载能力为 36 psi,即 0.25 MPa,据此通过实测得出该轮胎的配重为 80 kg。

2.2 结果及分析

抗滑衰减曲线方程为 $y = -K \ln(x) + c$,表 5 和表 6 中给出了衰减规律拟合曲线的回归参数。

表5 3个级配衰减规律拟合曲线的回归参数

Table 5 Regression parameters of fitting curve of attenuation law in three grades

级配类型	材料编号	参数K	回归系数K	常数c	相关系数 R^2
级配 I	SH1-I	-13.66	13.66	71.758	0.934 9
	SH2-I	-14.01	14.01	72.258	0.940 8
	XW-I	-12.54	12.54	75.361	0.990 3
	HG-I	-13.07	13.07	73.201	0.951 6
级配 II	SH1-II	-12.85	12.85	70.635	0.938 0
	SH2-II	-12.97	12.97	69.709	0.946 8
	XW-II	-11.56	11.56	75.242	0.994 1
	HG-II	-11.80	11.80	72.333	0.994 4
级配 III	SH1-III	-13.12	13.12	71.093	0.935 1
	SH2-III	-13.28	13.28	70.791	0.945 9
	XW-III	-12.10	12.10	75.275	0.995 7
	HG-III	-12.14	12.14	72.067	0.983 3

表6 4种集料衰减规律拟合曲线的回归参数

Table 6 Regression parameters of fitting curve of attenuation law in four kinds of coarse aggregate

级配类型	材料编号	参数K	回归系数K	常数c	相关系数 R^2
石灰岩 (SH1)	SH1-I	-13.66	13.66	71.758	0.934 9
	SH1-II	-12.85	12.85	70.635	0.938 0
	SH1-III	-13.12	13.12	71.093	0.935 1
石灰岩 (SH2)	SH2-I	-14.01	14.01	72.258	0.940 8
	SH2-II	-12.97	12.97	69.709	0.946 8
	SH2-III	-13.28	13.28	70.791	0.945 9
玄武岩 (XW)	XW-I	-12.54	12.54	75.361	0.990 3
	XW-II	-11.56	11.56	75.242	0.994 1
	XW-III	-12.10	12.10	75.275	0.995 7
花岗岩 (HG)	HG-I	-13.07	13.07	73.201	0.951 6
	HG-II	-11.80	11.80	72.333	0.994 4
	HG-III	-12.14	12.14	72.067	0.983 3

1) 粗集料对沥青路面抗滑性能衰减规律的影响。

沥青路面抗滑表层采用的粗集料对沥青路面的抗滑性能及其衰减规律有直接影响,图4~6及表5均证明了该规律性。

在级配条件一定的情况下,粗集料不同,其所

对应的沥青混合料摩擦系数初值基本相同,而衰减幅度、衰减速率、衰减终值则存在明显的差异,说明粗集料种类对沥青路面抗滑表层抗滑性能的衰减规律影响显著。分析3种不同级配时均可见相似的规律,证明了该结论的合理性。从3个图的衰减曲线均可以直观地看出,压碎值、磨耗值越小、磨光值越大(如玄武岩、花岗岩),所对应的沥青混合料摩擦系数的衰减速率越小(衰减拟合曲线最缓、回归系数绝对值均最小)、衰减幅度最小、衰减终值最大;反之亦然。

结合表2中粗集料抗滑指标数据和抗滑性能衰减过程分析理论,SH1和SH2所对应混合料的抗滑性能衰减规律基本相同,因为磨耗值和磨光值均很接近;集料采用玄武岩和花岗岩沥青混合料抗滑性能衰减的回归系数差异很小(最大差值为0.53),测量值和衰减终值具有明显的差别,因为玄武岩(XW)和花岗岩(HG)的磨耗值差异较小(0.3%),磨光值差异明显(7%)。反之,验证了磨耗值与磨光值对抗滑性能衰减规律影响分析的正确性。

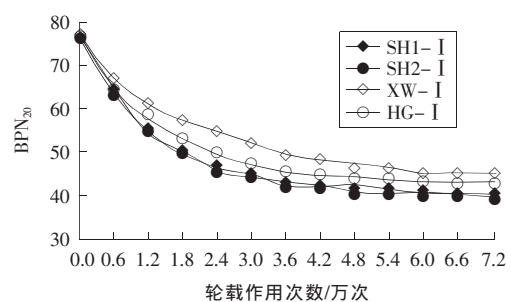


图4 级配I沥青混合料的抗滑衰减曲线

Fig. 4 Anti-slide attenuation curve of grade I asphalt mixture

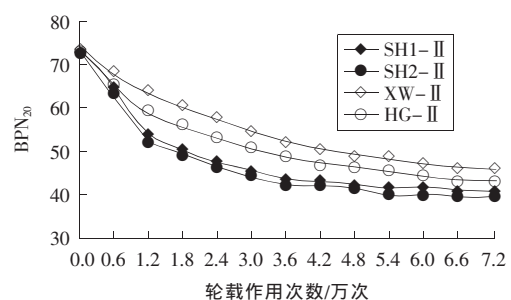


图5 级配II沥青混合料的抗滑衰减曲线

Fig. 5 Anti-slide attenuation curve of grade II asphalt mixture

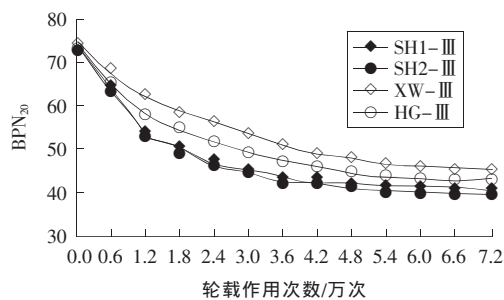


图 6 级配Ⅲ沥青混合料的抗滑衰减曲线

Fig. 6 Anti-slide attenuation curve of grade III asphalt mixture

2) 矿料级配对沥青路面抗滑衰减规律的影响。

此处同样利用上述试验数据,在粗集料相同的条件下,分析矿料级配对沥青路面抗滑衰减规律的影响。图 7~10 分别为粗集料类型相同条件下不同级配沥青路面的抗滑衰减曲线,其衰减曲线的对数回归参数见表 6。

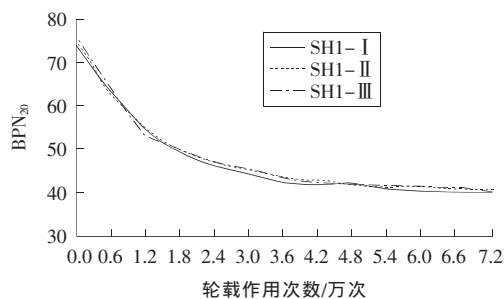


图 7 3 种级配抗滑衰减曲线:粗集料为 SH1

Fig. 7 Three kinds of grading anti-slide attenuation curves; coarse aggregate for SH1

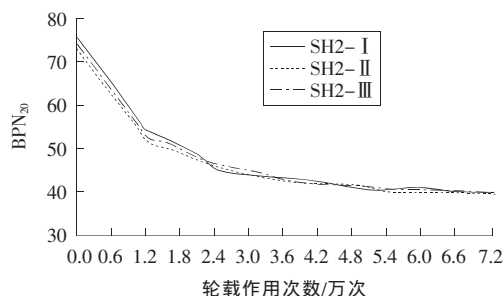


图 8 3 种级配抗滑衰减曲线:粗集料为 SH2

Fig. 8 Three kinds of grading anti-slide attenuation curves; coarse aggregate for SH2

结合图 7~10 及表 6 中的数据可以得出,就整体而言,在粗集料相同的条件下,4 个图中不同级配混合料衰减初值间的差异均较为显著,说明级配与衰减初值之间的关系密切。

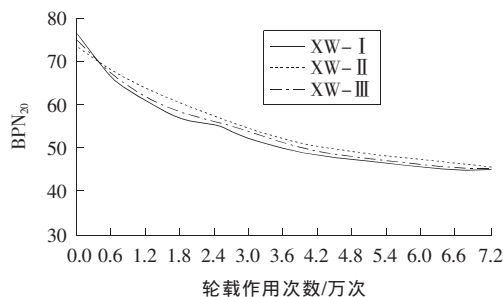


图 9 3 种级配抗滑衰减曲线:粗集料为 XW

Fig. 9 Three kinds of grading anti-slide attenuation curves; coarse aggregate for XW

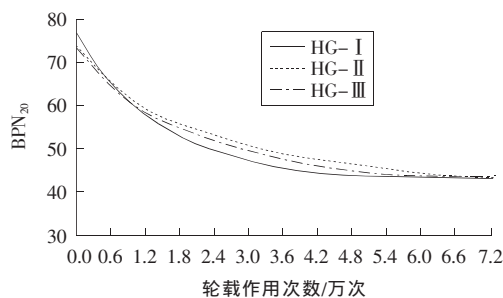


图 10 3 种级配抗滑衰减曲线:粗集料为 HG

Fig. 10 Three kinds of grading anti-slide attenuation curves; coarse aggregate for HG

图 7~10 中 3 种级配在同种粗集料条件下,抗滑性能衰减回归曲线间的差异不明显,且在同种粗集料条件下的回归系数差异很小,说明级配对沥青路面抗滑衰减规律的影响较小。

根据表 5 和表 6 可知,抗滑性能衰减规律回归方程采用式(1)表达,其相关性高:

$$y = lA \ln(x) + C. \quad (1)$$

式中: y 为抗滑性能指标值,此处主要指 BPN_{20} ; A 为衰减速率, $A > 0$; C 为常数项; x 为累计轴载作用次数,万次。

以下分别对 A , x , C 三项进行讨论。

① 衰减速率 A 值的确定。

依据衰减规律的试验研究,可合理地将 A 的物理意义表征为沥青路面抗滑性能衰减速率, A 值大小主要取决于集料力学特性(压碎值、磨光值、磨耗值),同时与级配类型(集料外露尺寸分位数)之间也存在一定的相关性。 A 表征的衰减速率是抗滑性能衰减规律中最典型的特征,也是抗滑性能预测模型中的关键。为合理建立基于集料力学特性和集料级配类型的沥青路面抗滑表层抗

滑性能预测模型,本研究运用 SPSS 对已知的数据进行统计分析。

模型里拟引进的主要控制参数值均来自于四轮加速加载模拟试验的数据,并汇总至表 7。

表 7 录入程序的原始数据

Table 7 Raw data for the input program

技术指标	试验编号	压碎值/% s	磨耗值/% a	磨光值/% b	衰减速率 A
石灰岩 (SH1)	SH1—I	24.3	21.8	43.4	13.66
	SH1—II	24.3	21.8	43.4	12.85
	SH1—III	24.3	21.8	43.4	13.12
石灰岩 (SH2)	SH2—I	25.2	20.2	44.3	14.01
	SH2—II	25.2	20.2	44.3	12.97
	SH2—III	25.2	20.2	44.3	13.28
玄武岩 (XW)	XW—I	13.0	9.8	56.6	12.54
	XW—II	13.0	9.8	56.6	11.56
	XW—III	13.0	9.8	56.6	12.10
花岗岩 (HG)	HG—I	14.5	10.1	49.6	13.07
	HG—II	14.5	10.1	49.6	11.81
	HG—III	14.5	10.1	49.6	12.14

通过进一步迭代运算,可以得出各关键参数与 A 之间的数学关系表达式的系数建立关键参数与衰减速率 A 间的表达式,即 $A = A_1 \cdot s + A_2 \cdot a + A_3 \cdot b + C_0$ 。再考虑压碎值、磨耗值和磨光值,经过 SPSS 正交分析,各参数系数见表 8。

将表 7 中的集料力学参数和表 8 中的模型参

数对应的系数分别带入式 $A = A_1 \cdot s + A_2 \cdot a + A_3 \cdot b + C_0$,可计算得到 4 种材料、3 种级配沥青混合料的抗滑性能衰减系数 $A_{\text{计}}$,同时可计算得到其与试验结果回归得出的衰减速率 $A_{\text{试}}$ 的相对误差(见表 9)。

表 8 考虑三因素 SPSS 分析关键参数系数表

Table 8 The key parameters of SPSS analysis with three factors

参数系数	模型 I (级配一)	模型 II (级配二)	模型 III (级配三)	均值
C_0 (常数项)	14.114 0	11.448 4	11.122 3	12.228 2
A_1 (压碎值 s)	0.043 5	0.056 0	0.048 9	0.049 5
A_2 (磨耗值 a)	0.012 0	0.039 9	0.045 9	0.032 6
A_3 (磨光值 b)	-0.039 5	-0.017 4	-0.002 3	-0.019 7
相关系数 R	0.956 5	0.993 0	0.987 5	/

注: A_1 为压碎值对衰减系数 A 的影响,其值为正值,表明压碎值越大,沥青路面抗滑性能衰减越快,符合客观规律; A_2 为磨耗值对衰减系数 A 的影响,回归系数值为正,表明沥青路面抗滑性能随着磨耗值的增大而加速衰减,同样符合客观规律; A_3 为磨光值对衰减系数 A 的影响,磨光值越大,沥青路面抗滑性能衰减越慢,该回归系数为负,与客观规律吻合。

由表 9 可以发现,采用上述模型得到的沥青混合料的衰减速率与试验结果的相对误差较小,可以满足工程的需要。基于此,所提出的沥青混合料抗滑性能衰减速率 A 衰减模型可以表示为:

$$A = 0.049 5 \cdot s + 0.032 6 \cdot a - 0.019 7 \cdot b + 12.228 2. \quad (2)$$

表 9 衰减速率 A 模型计算值以及与试验回归值相对误差汇总表

Table 9 Calculation values of attenuation rate (A) model, and the relative error summary table

级配	A_{SH1}		A_{SH2}		A_{XW}		A_{HG}	
	计算值	相对误差/%	计算值	相对误差/%	计算值	相对误差/%	计算值	相对误差/%
级配一	13.718 4	0.427 2	13.702 8	2.193 1	12.561 4	0.170 7	12.906 8	1.249 0
级配二	12.923 9	0.574 8	12.894 8	0.580 1	11.582 6	0.195 3	11.800 4	0.081 7
级配三	13.211 4	0.696 4	13.179 9	0.754 0	12.077 6	0.184 8	12.180 9	0.336 6

② 模型变量 x 的确定。

在应用过程中,应将各类轴载作用次数经过相应的换算,以得到累计当量轴载作用次数,进而进行抗滑性能的预测。

③ C 值的确定。

衰减规律曲线中 C (常数项系数)与抗滑指标初始值(初始 BPN_{20})之间的关系见表 10。

由表 10 可知,衰减曲线中常数项 C 与初始 BPN_{20} 相对误差最大值为 6.08%,变异系数最大值为 4.4%,而变异系数均值为 2.7%,所以 C 值基本可以由初始 BPN_{20} 代替。同时,预测模型方程与衰减曲线方程一致,所以最终模型中的 C 由摩擦系数初值(初始 BPN_{20})表征; C 值主要取决于沥青混合料级配类型(集料外露尺寸位数)。

表 10 C 与抗滑性能指标初值统计

Table 10 Initial value statistics of C and anti-slip performance index

混合料编号	初始 BPN ₂₀	C	相对误差/%
SH1—I	76.4	71.758	6.08
SH2—I	76.2	72.258	5.17
XW—I	76.8	75.361	1.87
HG—I	76.9	73.201	4.81
SH1—II	74.1	70.635	4.68
SH2—II	73.5	69.709	5.16
XW—II	74.0	75.242	1.68
HG—II	73.8	72.333	1.99
SH1—III	75.0	71.093	5.21
SH2—III	74.5	70.791	4.98
XW—III	75.0	75.275	0.37
HG—III	74.4	72.067	3.14

3 结论

通过室内试验,作者研究了沥青抗滑表层抗滑性能的衰减规律及其影响因素,最终提出了基于集料力学指标的沥青路面抗滑性能衰减预测模型,得到如下结论。

1) 沥青混合料级配主要影响沥青路面摩擦系数初始值,对沥青路面摩擦系数的衰减规律(衰减幅度、衰减速率、衰减终值)影响不显著。

2) 沥青混合料所用的粗集料的力学指标(磨耗值、压碎值、磨光值)对沥青路面抗滑性能的衰减规律影响显著:压碎值、磨耗值越小、磨光值越大,其所对应的沥青混合料摩擦系数的衰减速率越小、衰减幅度最小、衰减终值最大;反之亦然。

3) 基于上述研究,提出了基于粗集料力学指标的沥青路面抗滑表层摩擦系数随着交通量增加的衰减模型:

$$Y = lA \ln(x) + C。$$

式中:Y 为抗滑性能指标值,此处主要指 BPN₂₀;A 为衰减速率, $A > 0$, $A = 0.0495 \cdot s + 0.0326 \cdot a - 0.0197 \cdot b + 12.2282$;a,b,s 分别为粗集料的磨耗值、磨光值、压碎值;x 为累计轴载作用次数,万次;C 为摩擦系数初值,与沥青混合料级配有关,可直接测得。

〔参考文献〕

- [1] 曾庆成,王端宜,蔡旭.基于能量等价损耗原理的路面抗滑性能预测[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2012(3):532-536.
ZENG Qing-cheng, WANG Duan-yi, CAI Xu. Based on the energy loss of the principle of equivalent pavement anti-sliding performance prediction[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering Edition, 2012 (3): 532-536.
- [2] 刘亚敏,韩森,徐鸥明.基于遗传算法的 SMA 路面抗滑性能预测模型[J].应用基础与工程科学学报,2013(5):890-898.
LIU Ya-min, HAN Shen, XU Ou-ming. Based on the genetic algorithm of SMA pavement anti-sliding performance prediction model[J]. Journal of Applied Foundation and Engineering Science, 2013 (5): 890-898.
- [3] 张小瑞.基于集料性质的沥青混合料磨光特性研究[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
ZHANG Xiao-rui. Study on polishing characteristics of asphalt mixture based on aggregate properties [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [4] 钱振东,薛永超,张令刚.沥青路面三维纹理分形维数及其抗滑性能[J].中南大学学报:自然科学版,2016,10:3590-3596.
QIAN Zhen-dong, XUE Yong-chao, ZHANG Ling-gang. 3D texture fractal dimension of asphalt pavement and anti-sliding performance[J]. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2016(10): 3590-3596.
- [5] 宋勇,梁彦龙,马学军.汽车轮胎与路面接触应力分布特点及力学模型[J].公路交通科技,2014(10):112-118.
SONG Yong, LIANG Yan-long, MA Xue-jun. Automobile tires and the road surface contact stress distribution characteristics and the mechanics model[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2014 (10): 112-118.
- [6] 陈先华,陈胜霞,黄晓明,等.沥青路面的磨光研究:从宏观到微观尺度[J].中外公路,2013(2):45-50.
CHEN Xian-hua, CHEN Sheng-xia, HUANG Xiao-ming, et al. The asphalt surface polishing research: from macro to micro scale[J]. Highway, 2013(2): 45-50.
- [7] 董申家,谢祥兵,赵大勇.沥青路面纹理分布的分形描

- 述及抗滑性能评价[J].中国公路学报,2016(2):1-7.
- TONG Shen-jia, XIE Xiang-bing, ZHAO Da-yong. The distribution of the asphalt pavement texture fractal description and anti-sliding performance evaluation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016(2):1-7.
- [8] 冉茂平,肖旺新.基于三维分形维数的沥青路面抗滑性能研究[J].公路交通科技,2016(2):28-32.
- RAN Mao-ping, XIAO Wang-xin. Based on the three-dimensional fractal dimension of the asphalt pavement anti-sliding performance study[J]. Highway Traffic Science and Technology, 2016(2):28-32.
- [9] 王超逸.基于多重分形特征的道路平整度评价研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- WANG Chao-yi. Evaluation of road roughness based on multi fractal feature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [10] JTJ 073.2—2001,公路沥青路面养护技术规范[S].北京:人民交通出版社,2001.
- JTJ 073.2—2001, Technical specifications for maintenance of highway asphalt pavement[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [11] MHT 5024—2009,民用机场道面评价管理技术规范[S].北京:中国民航出版社,2009.
- MHT 5024—2009, Technical specifications of aerodrome pavement evaluation and management[S]. Beijing: China Civil Aviation Press, 2009.
- [12] MH 5001—2013,民用机场飞行区技术标准[S].北京:中国民航出版社,2013.
- MH 5001—2013, Aerodrome technical standards[S]. Beijing: China Civil Aviation Press, 2013.
- [13] GB/T 13477.5—2002,建筑密封材料试验方法(第5部分:表干时间的测定)[S].北京:中国标准出版社,2002.
- GB/T 13477.5—2002, Test method for building sealants(Part 5: determination for tack-free time)[S]. Beijing: China Standard Press, 2002.

(上接第12页)

- [8] 杨波.沥青雾封层技术在高速公路路面养护中的应用研究[D].南宁:广西大学,2013.
- YANG Bo. Application research on asphalt fog-seal technology of freeway pavement maintenance[D]. Nanning: Guangxi University, 2013.
- [9] 范斌卫.沥青路面雾封层应用技术研究[D].西安:长安大学,2012.
- FAN Bin-wei. Study on the application technologies of fog seal for asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [10] JTJ 073.2—2001,公路沥青路面养护技术规范[S].北京:人民交通出版社,2001.
- JTJ 073.2—2001, Technical specifications for maintenance of highway asphalt pavement[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.

- [11] MHT 5024—2009,民用机场道面评价管理技术规范[S].北京:中国民航出版社,2009.
- MHT 5024—2009, Technical specifications of aerodrome pavement evaluation and management[S]. Beijing: China Civil Aviation Press, 2009.
- [12] MH 5001—2013,民用机场飞行区技术标准[S].北京:中国民航出版社,2013.
- MH 5001—2013, Aerodrome technical standards[S]. Beijing: China Civil Aviation Press, 2013.
- [13] GB/T 13477.5—2002,建筑密封材料试验方法(第5部分:表干时间的测定)[S].北京:中国标准出版社,2002.
- GB/T 13477.5—2002, Test method for building sealants(Part 5: determination for tack-free time)[S]. Beijing: China Standard Press, 2002.