

文章编号:1005-0523(2019)04-0017-07

# 环境与车辙影响下 OGFC 空隙率与吸声系数相关性

吴建涛,马鑫源,王浩安,吴俊扬,王志新

(河海大学道路与铁道工程研究所,江苏 南京 210098)

**摘要:**取配合比相同的 OGFC 车辙板,利用自主开发的“老化+水损害”环境模拟装置对车辙板分别进行单一热氧老化作用、单一水损害作用、老化-水分共同作用的环境处理,并进行车辙试验,试验后于车辙板胶轮碾压处取直径为 50 mm 的圆柱体芯样。测试并计算各芯样空隙率及连通空隙率,后采用传递声函数法对所有芯样进行吸声系数测试。在此基础上分析试件空隙率、连通空隙率与吸声系数均值、吸声系数峰值的关系。结果表明,试件空隙率、连通空隙率与吸声系数峰值之间相关性更高,其中连通空隙率与吸声系数峰值的相关性优于空隙率。对比之前的研究得到,本实验对车辙板所做的环境处理及车辙试验对试件空隙率、连通空隙率与吸声系数峰值的相关性无明显影响,用吸声系数峰值表征环境及车辆荷载作用后的 OGFC 混合料的连通空隙率是更加有效的。

**关键词:**OGFC;老化-水分共同作用;车辙试验;空隙率;连通空隙率;吸声系数均值;吸声系数峰值

**中图分类号:**U416.217 **文献标志码:**A

大空隙开级配沥青磨耗层(OGFC)是一种具有互相连通孔隙的开级配沥青混合料,从安全和环境方面来说,OGFC 较传统密级配沥青混凝土具有少水雾和眩光、防水漂、改善路面标志的可见度、提高路面的抗滑性、降低噪音等一系列优点<sup>[1]</sup>。另外,因为其优越的排、透水性能非常符合海绵城市构想的要求,所以近年来多孔性排水沥青面层在国内外得到了广泛的应用<sup>[2-3]</sup>。

然而,由于空隙较大等结构特点,路面本身强度较低,且容易受到环境因素的作用使路面耐久性和功能耐久性受到影响<sup>[4-7]</sup>。在降噪功能方面,由于受到交通荷载的压密作用和路表污染物的堵塞作用<sup>[8]</sup>,大空隙路面的连通空隙率可能会降低,导致其吸声性能衰减,许多学者的研究也证实了这一点。苗英豪等<sup>[9]</sup>在沥青路面降噪性能研究综述中表明,OGFC 的降噪能力较好,但由于空隙逐渐被堵塞使得降噪能力下降较快;张锐等<sup>[10]</sup>在隧道噪声的调查与分析中也提到 OGFC 路面具有优良的降噪功能,而且排水性能比较好,对于改善公路隧道服务环境具有特殊意义,但这种多孔沥青面层的空隙容易被堵塞,从而丧失排水与降噪功能。

在已有的沥青混合料空隙率与吸声系数的相关研究<sup>[11-12]</sup>中,其不同的空隙率是根据配合比设计得到的且成型试件不经过环境处理,而实际使用情况下,沥青混合料会受到环境、车辆荷载、污染物堵塞等因素影响,故此情况下沥青混合料空隙率衰减与吸声性能下降之间的关系较之前研究可能有所不同,即之前的研究成果是否适用于路面沥青混合料空隙率及吸声系数的预测还值得商榷。

本研究采用不同环境处理后的 OGFC 车辙板,经车辙实验后在胶轮碾压处取芯,测试并计算出试件在室内模拟环境、车辆荷载共同作用下的空隙率及连通空隙率,并进行了吸声系数测试,然后针对空隙率、连通空隙率和吸声系数均值、吸声系数峰值的相关性进行了分析。

收稿日期:2019-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108157);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015B17214)

作者简介:吴建涛(1981—),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为沥青材料力学及路用性能。

## 1 实验材料及实验方案

### 1.1 实验材料

1) 沥青。采用 TPS 高粘改性剂对宝利 70# 基质沥青进行改性(掺量为 15%)。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》<sup>[13]</sup>对所用高粘改性沥青进行测试,基本指标见表 1。

表 1 TPS 高粘改性沥青基本指标  
Tab.1 Basic indexes of TPS high viscosity modified asphalt

试验项目	70# 基质沥青	TPS 高粘沥青(掺量 15%)	规范
25 °C 针入度/(0.1 mm)	72.8	41.4	
15 °C 延度/(5 cm/min, cm)	>100	80.2	
软化点/°C	53.1	85.6	JTG E20-2011
60 °C 动力粘度/(Pa·s)	195	116 082	

2) 集料。本研究采用的粗集料和细集料均为玄武岩,矿粉为石灰岩,按照《公路工程集料试验规程》<sup>[14]</sup>中相关试验规程对集料进行密度测试,结果见表 2。表 3 是所用 OGFC-13 的合成级配,其级配曲线见图 1。

表 2 集料密度测试结果  
Tab.2 Aggregate density test results

集料类型	表观相对密度	毛体积相对密度
1#	2.915	2.802
2#	2.907	2.729
3#	2.907	2.690
4#	2.689	2.611

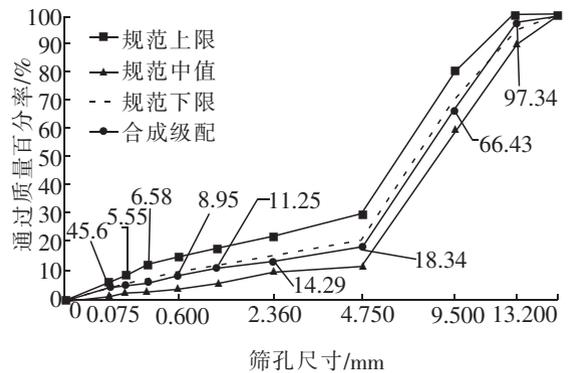


图 1 OGFC-13 级配曲线  
Fig.1 OGFC-13 gradation curve

表 3 OGFC-13 合成级配  
Tab.3 OGFC-13 synthesis gradation

参数	筛孔尺寸/mm									
	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
规范级配	100	90~100	60~80	12~30	10~22	6~18	4~15	3~12	3~8	2~6
中值/%	100	95.0	70.0	21.0	16.0	12.0	9.5	7.5	5.5	4.0
合成/%	100	97.34	66.43	18.34	14.29	11.25	8.95	6.58	5.55	4.56

### 1.2 试件准备

#### 1.2.1 车辙板试件制作

根据上述级配,将集料和沥青拌合后在混合料松散状态下进行 135 °C,4 h 的短期老化,然后轮碾成型车辙板试件。

#### 1.2.2 环境处理

将得到的车辙板分为 4 组,0# 不做任何环境处理作为对照,A 组分别进行 1,2,5 d 的单一热氧老化环

境处理,B组分别进行1,2,5 d的单一水损害环境处理,C组分别进行1,2,5 d的老化-水分共同作用环境处理。其中老化-水分共同作用环境处理使用了自主研发的环境处理系统,该系统能精确控制系统温度及滴水量。

为了便于对比,本研究参照 SHRP 沥青混合料长期老化条件(时间:5 d,温度:85 ℃),所以环境处理的温度均为 85 ℃,对统一标准制作的不同试件进行单一热氧老化、单一水损害、老化-水分共同作用。其中,老化-水分共同作用环境采用“老化+水损害”环境模拟装置中 1/4 滴水板条件来实现,该滴水板条件下滴水速率为 0.0132 g/(h·cm<sup>2</sup>)。

### 1.2.3 车辙试验及取芯

将以上不同环境下处理后的车辙板按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行车辙试验,并在胶轮碾压处取直径为 50 mm(由于车辙宽度限制)的圆柱体芯样作为实验材料,如图 2 所示。

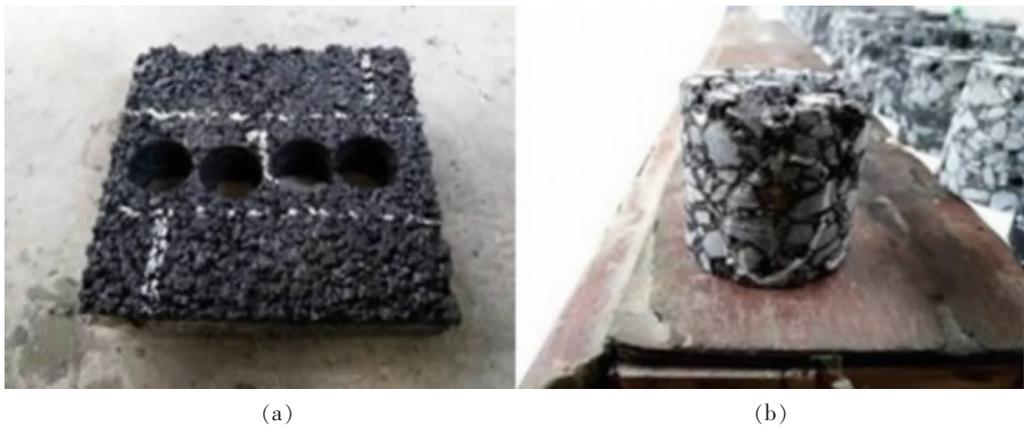


图 2 车辙板胶轮碾压处所取芯样

Fig.2 The core sample from wheel tracking of rutting plate

## 1.3 试验方案

### 1.3.1 空隙率、连通空隙率的测量与计算

取上述环境处理后的车辙板进行车辙试验,在胶轮碾压处取芯,由于部分车辙试件老化严重,内部结构产生破坏,取出完整芯样较为困难。因此选取完整的芯样,进行尺寸、干重及水中重测量,并根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》计算各个芯样的空隙率及连通空隙率。

### 1.3.2 吸声系数测量

本研究选择传递声函数法<sup>[15]</sup>来测量试件吸声系数。

1) 设备构造。本研究测试装置系统为北京声望 SW 型号阻抗管测试系统,系统示意图如图 3 所示,包括了驻波管(内径 100 mm)、信号处理设备(包括信号发生器、PA50 型功率放大器、MC3242 型数据采集器)、传声器(灵敏度为 50 mV/Pa)、声压标定器(94 dB 校准器)、计算机。

研究中试件为车辙板胶轮碾压处取处的芯样直径 50 mm,而驻波管内径为 100 mm。由于上述硬件限制,本研究加工了不吸声金属试件外壳,尺寸为内径 50.8 mm、外径 99.5 mm、高 48 mm,保证与驻波管测试壁间隙小于 1 mm,除此之外,为最大化防止外壳吸声对实验结果的影响,还对试件外壳进行了特殊涂层处理。

2) 测试步骤。① 传声通道适配矫正。将吸声标定样品(圆柱状海绵)放入阻抗管,测试计算两个传声器交换位置和测试位置的传递函数。② 试件测试。完成标定样品的吸声系数曲线后,将两个传声器交换回原来位置。将试件装入加工的试件套中,并将整个试件套装入驻波管样品桶。启动测试系统,测试结果由计算机记录。

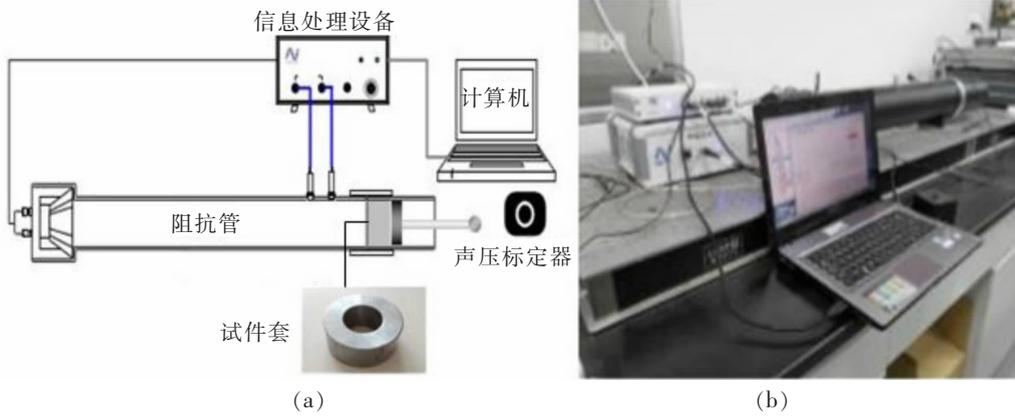


图3 测试装置系统示意图及实物图

Fig.3 Schematic diagram and physical drawing of the test device system

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验结果

根据处理环境对实验所取整体芯样进行编号,并将其空隙率、连通空隙率以及吸声系数平均值与峰值进行汇总,结果见表4。

根据吸声测试结果,绘制不同频率下吸声系数图,但由于所有芯样在不同频率下的吸声系数数据量过大,故选取 A3,B2,C3 共 3 个试件频率在 300~1 600 Hz 之间的片段作频率-吸声系数图,如图 4。

### 2.2 实验结果分析

#### 2.2.1 空隙率与连通空隙率

根据表 4,绘制所有芯样空隙率与连通空隙率关系图见图 5,并得出本实验芯样空隙率  $n_0$  与连通空隙率  $n_e$  的整体关系式:

$$n_e = 0.864 7n_0 - 0.412 6 \quad R^2 = 0.959 1 \quad (1)$$

式中: $n_e$  为连通空隙率; $n_0$  为空隙率。

表 4 整体芯样实验数据

Tab.4 Experimental data of complete core samples

车辙板处理环境	编号	处理时间/d	空隙率/%	连通空隙率/%	吸声系数均值	吸声系数峰值
未处理	0#		19.83	16.79	0.201 8	0.338 9
单一热氧 老化	A1	1	19.10	15.43	0.163 8	0.325 8
	A2	2	23.31	18.48	0.154 4	0.345 9
	A3	5	21.58	19.30	0.191 9	0.398 0
单一水损	B1	1	13.11	10.86	0.139 4	0.229 8
	B2	2	16.82	15.23	0.165 2	0.290 5
	B3	5	14.45	12.13	0.174 7	0.249 4
老化-水分共同作用	C1	1	16.88	14.75	0.208 4	0.302 7
	C2	2	11.63	9.26	0.162 1	0.223 4
	C3	5	11.19	8.84	0.128 5	0.188 8

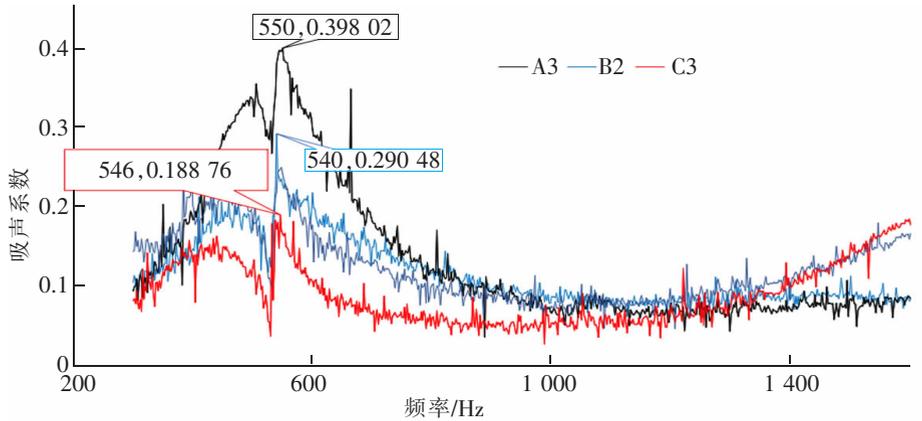


图 4 试样 A3,B2,C3 在不同频率下吸声系数测试结果

Fig.4 Test results of sound absorption coefficients of samples A3, B2 and C3 at different frequencies

由图 5 可以看出,本实验试件的空隙率与连通空隙率相关性较高,相关系数达到 0.959 1,对比赵文娇等<sup>[16]</sup>在排水性沥青混凝土路面空隙率研究中得到的 OGFC-13 混合料  $V_v$  与  $V_e$  关系: $V_e=1.162V_v-9.095 2(R^2=0.966 9)$ ,表明在本研究所做的环境处理条件下,环境及车轮碾压作用对试件空隙率与连通空隙率的相关性几乎没有影响。

2.2.2 空隙率、连通空隙率与吸声系数

根据表 4,绘制全部试件空隙率与吸声系数均值、峰值关系图(见图 6)和连通空隙率与吸声系数均值、峰值关系图(见图 7)。

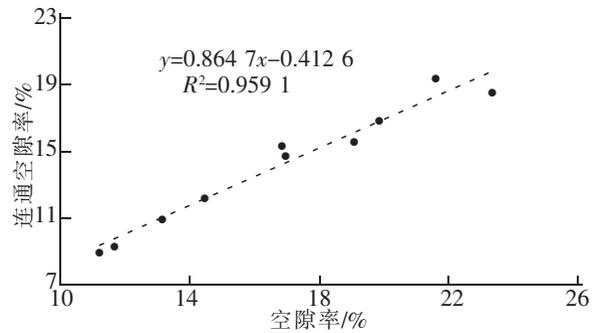


图 5 整体芯样空隙率与连通空隙率关系图

Fig.5 Relationship between  $n_0$  of complete core sample and  $n_e$

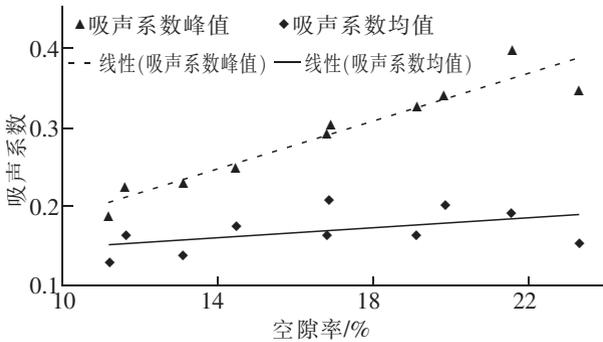


图 6 空隙率与吸声系数关系图

Fig.6 Relationship between  $n_0$  and  $\bar{\alpha}$ ,  $n_0$  and  $\alpha_p$

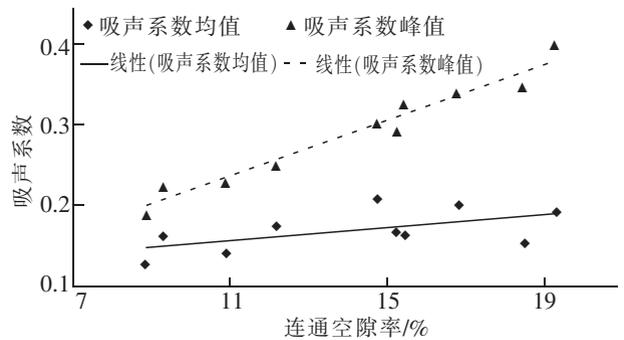


图 7 连通空隙率与吸声系数关系图

Fig.7 Relationship between  $n_e$  and  $\bar{\alpha}$ ,  $n_e$  and  $\alpha_p$

由图 6 和图 7 可以看到,吸声系数峰值整体上都随着空隙率和连通空隙率的增大而增大,而吸声系数均值则呈现不稳定波动。造成这一现象的可能原因是本研究中芯样较小,测得吸声系数普遍较低,在大量数据取平均值时离散性较高。因此,在本研究中用吸声系数峰值表征空隙率、连通空隙率效果更佳。另外,由图 4 所示曲线可以看出整体吸声系数在频率约为 550 Hz 处达到峰值,并且随着连通空隙率的下降,峰值降低也较明显。因此选择吸声系数峰值表征该试件吸声能力受到频率影响也较小,进一步保证了其有效性。空隙率与吸声系数均值、峰值关系式和连通空隙率与吸声系数均值、峰值关系式如下:

空隙率与吸声系数关系式:

$$\bar{\alpha}=0.003 0n_0+0.119 5 \quad R^2=0.227 7 \quad (2)$$

$$\alpha_p=0.014 9n_0+0.038 9 \quad R^2=0.905 0 \quad (3)$$

连通空隙率与吸声系数关系式:

$$\bar{\alpha}=0.004 0n_e+0.112 7 \quad R^2=0.324 8 \quad (4)$$

$$\alpha_p=0.011 4n_e+0.044 5 \quad R^2=0.956 0 \quad (5)$$

式中: $\bar{\alpha}$ 为吸声系数均值; $\alpha_p$ 为吸声系数峰值; $n_0$ 为空隙率; $n_e$ 为连通空隙率。

其中空隙率与吸声系数峰值相关系数为0.905 0,连通空隙率与吸声系数峰值相关系数为0.956 0;因此连通空隙率与吸声系数峰值相关性更高。徐皓等在对排水性沥青混合料降噪性能研究时发现:随着空隙率或有效空隙率(即本文中连通空隙率)的增大,吸声系数也增加,并成线性关系,但有效孔隙率与吸声系数的相关性更好。故本实验得到的结果与之前的研究较为相符。为更直观地表示各变量之间的相关性,绘制各变量之间相关系数直方图,如图8。

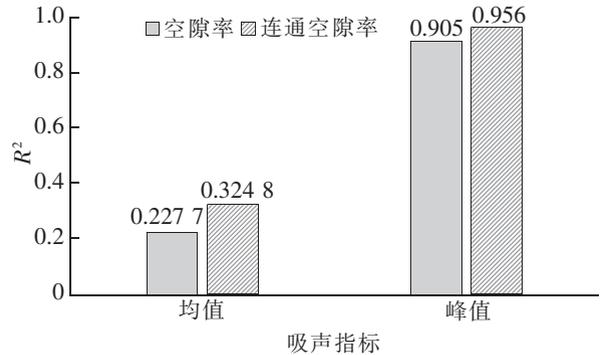


图8 试验芯样各参数间相关系数

Fig.8 Correlation coefficient between various parameters of the test core sample

由此得出,本实验目前所涉及的单一热氧老化、单一水损、老化-水分共同作用环境处理及车辙试验对试件空隙率、连通空隙率与吸声系数峰值的相关性无太大影响。

### 3 结论

1) 本研究设计了一种小尺寸试样条件下用传递声函数法测吸声系数的测试方法并加工了不吸声金属试件套。结果表明,采用较小尺寸试件及试件套测得吸声系数普遍较低,在大量数据取平均值时离散性较高,对空隙率与吸声系数均值的相关性影响较大。

2) 测试结果表明,试件空隙率、连通空隙率与吸声系数峰值之间相关性更高,其中连通空隙率与吸声系数峰值的相关性优于空隙率,故用吸声系数峰值表征连通空隙率更加合理有效。

3) 结论2)与之前的相关研究相符,表明本实验对车辙板所做的环境处理及车辙试验对试件空隙率、连通空隙率与吸声系数峰值的相关性无明显影响。但本实验仅对实验材料进行了单一热氧老化环境、单一水损害环境、老化-水分共同作用环境3种环境处理,后续将会增加更多的处理环境,以验证上述结论是否具有普遍性。

### 参考文献:

- [1] 李闯民. 开级配沥青磨耗层(OGFC)的研究[J]. 公路,2002(3):73-78.
- [2] HUBER G. Performance survey on open-graded friction course mixes NCHRP Synthesis 284[M]. Washington, D C:Transportation Research Board,2000.
- [3] ALVAREZ A E,MARTIN A E,ESTAKHRI C K,et al. Synthesis of current practice on the design,construction and maintenance of porous friction courses[R]. Texas FHWA;2006.
- [4] 沙庆林. 提高沥青路面使用性能和耐久性的最关键因素[J]. 中外公路,2005,25(1):1-5.
- [5] 黄学文. 大空隙沥青混合料的耐久性研究[J]. 中外公路,2013(4):296-299.
- [6] QURESHI N A,KHURSHID M B,DONALD WATSON . Evaluation of premature failures of open-graded friction course pavements in Alabama[J]. Revue Canadienne De Génie Civil,2015,42(12):1104-1113.
- [7] QURESHI N A,FAROOQ S H,BILAL KHURSHID. Laboratory evaluation of durability of open-graded friction course Mixtures [J]. International Journal of Engineering and Technology (IJET),2015,7(3):956-964.

- [8] 李波,孟繁宇,李淑明,等. 开级配抗滑磨耗层材料堵塞行为和疏通方法[J]. 华东交通大学学报,2013,30(4):69-74.
- [9] 苗英豪,王秉纲. 沥青路面降噪性能研究综述[J]. 中外公路,2006(4):65-68.
- [10] 张锐,黄晓明,赵永利,等. 隧道噪声的调查与分析[J]. 公路交通科技,2006,23(10):33-36,44.
- [11] 徐皓,倪富健,刘清泉,等. 排水性沥青混合料降噪性能测试研究[J]. 公路交通科技,2005(5):10-13.
- [12] 王辉,董欣雨,邓乔,石磊. 沥青混合料吸声性能[J]. 建筑材料学报,2018,21(4):634-638.
- [13] 交通运输部公路科学研究院. JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [14] 交通部公路科学研究所. JTG E42-2005 公路工程集料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [15] 袁健,林胜,贺才春. 阻抗管中吸声系数的传递函数测量法[J]. 噪声与振动控制,2006,26(1):68-70.
- [16] 赵文姣,李晓娟,韩森,等. 排水性沥青混凝土路面空隙率研究[J]. 公路,2009(6):168-171.

## Correlation Between OGFC's Void and Sound Absorption Coefficient Under the Influence of Environment and Rut

Wu Jiantao, Ma Xinyuan, Wang Hao'an, Wu Junyang, Wang Zhixin

(Institute of Road and Railway Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** OGFC slabs with the same mixture design were treated by SHRP aging, water damage, and self-developed aging+water damage coupling environment simulator. Then, rutting tests were applied to the environment treated specimens, and cylindrical specimens with a diameter of 50 mm were cored from the tracking sites of rutting wheel. The void and sound absorption properties of these cylindrical specimens were tested and their relationships were analyzed. The results showed that the peak acoustic absorption coefficient correlates better than average acoustic absorption coefficient to the void content and the connected void content. In addition, by comparing with previous studies, it is concluded that the environmental treatment conditions in this study have no significant impacts on the voids, connected voids and the peak acoustic absorption coefficient of the specimen. It is more effective to use the peak acoustic absorption coefficient to represent the connected voids of OGFC mixture under the action of environment and vehicle load.

**Key words:** OGFC; aging-water interaction; rutting test; void fraction; connectivity void ratio; mean absorption coefficient; peak absorption coefficient