

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.03.011

饱水 OGFC 沥青路面力学分析

黄海港, 彭妙娟*

(上海大学 土木工程系, 上海市 200444)

摘要: 基于弹性多孔介质理论, 利用 Abaqus 软件建立了饱水 OGFC 沥青路面的轴对称有限元模型, 分析了在水荷载耦合作用下, 上面层 OGFC 不同动态压缩模量对应力、应变和孔隙水压力影响的变化规律; 研究了不同车速和渗透系数情况下孔隙水压力的时程变化曲线。结果表明: 随着 OGFC 动态压缩模量的增大, 沥青面层的水平应力呈下降趋势, 中面层底部的水平应力受影响最大, 上面层底部次之, 下面层底部最小; 随着 OGFC 动态压缩模量的增加, 特征点 A 最大水平应变不断减小, 特征点 B、C 随上面层动态压缩模量的增大, 最大水平应变影响不大; 面层结构内的孔隙水压力在水和车载耦合作用下呈现明显的正负逆转现象, 且与车速有关, 车速越大, 孔隙水压力越大; OGFC 动态压缩模量和上面层渗透系数的增大均可降低上面层孔隙水压力。

关键词: 道路工程; OGFC 沥青路面; 弹性多孔介质理论; 有限元法; 动态压缩模量; 孔隙水压力

1 引言

沥青路面具有平整、无接缝、振动小等优点, 成为中国高等级公路的主要结构形式, 但车辙、水损害等早期破坏在众多沥青公路投入使用后迅速产生。目前国内外研究主要集中在对密级配沥青路面的力学性能的分析, 大量研究表明路面内部存在的动水压力是该类沥青路面出现早期损害的主要原因之一。随着建设海绵城市理念的提出, 中国城市道路建设的重要任务已经转变成建设生态、排水并具有较好使用性能的路面, 即排水性沥青路面。

关于排水性沥青路面的研究最早出现于 20 世纪 50 年代的德国, 随后美、英等国相继进行了大量的研究。Beecham 通过微观成像, 分析了 OGFC 的抗滑性能; Kuang 研究了 OGFC 材料空隙特性与渗透速率的关系; 沈金安对开级配多空隙排水型沥青路面及形式进行了论述和分析; 关彦斌分析了大孔隙沥青路面的透水机理, 建立了透水性沥青混合料的雨水渗透模型, 通过对沥青混合料的渗透试验分析, 得出了渗透系数与空隙率的关系; 薛晓飞研究了 OGFC-13 静态模

量、动态模量和劈裂强度, 得到了 OGFC 在路面设计时动态模量参考值; 刘胜通过试验研究了 OGFC-13 在不同空隙率时的力学表现, 建议以排水为主要目的 OGFC 混合料空隙率最佳范围为 20%~25%; 李新贺通过 Abaqus 软件, 建立了透水性沥青路面的有限元模型, 分析了路面各结构层厚度对透水性沥青路面的力学影响; 锁利军对具有排水基层的沥青路面进行了力学分析, 研究了沥青面层厚度、基层厚度、地基模量对基层应力的影响。

关于沥青路面水损害的研究, Muhammed 基于 Lattice Boltzmann 法分析了动水对沥青路面孔隙水压力的影响; Kringos 从微观的角度, 通过有限元理论研究了沥青混合料在动水作用下的脱散现象; Cui 在 Biot 固结方程的基础上, 将沥青混合料视为多孔介质, 通过快速拉格朗日有限差分法对饱水沥青路面进行了分析; 罗志刚建立了多层饱和弹性半空间轴对称模型, 推导了沥青路面在水荷载耦合作用下孔隙水压力的精确解; 郭乃胜基于多孔介质理论, 分析了 16 种典型高速公路沥青路面结构, 结果表明: 设置 ATPB 层的 OGFC 沥青路面能够有效减小孔隙水压力; 王振勇建立了简化模型, 计算了特定条件下饱水沥青路面内部空

收稿日期: 2019-04-30

基金项目: 国家自然科学基金委员会—中国民航局民航联合基金资助项目(编号: U1433104)

作者简介: 黄海港, 男, 硕士研究生, E-mail: 649786101@qq.com

* 通信作者: 彭妙娟, 女, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: mjpeng@shu.edu.cn

隙产生的孔隙水压力并分析了孔隙水压力的传播规律和影响因素;郭建国分析了透水性路面材料对路面温度的影响。

目前,对 OGFC 排水性沥青路面的研究主要集中在研究排水沥青混合料的性质,研究大多数采用静态压缩模量。该文的创新点是采用动态压缩模量对水荷耦合作用下 OGFC 沥青路面的力学性能进行研究。

该文采用 Biot 弹性多孔介质理论,运用有限元软件 Abaqus,建立轴对称有限元分析模型,模拟饱水状态下 OGFC 排水性沥青路面结构,分析其在水荷耦合作用下,上面层不同动态压缩模量对应力、应变和孔隙水压力影响的变化规律,研究不同车速和渗透系数下孔隙水压力的时程变化。

2 有限元模型及计算参数

2.1 排水性沥青路面结构

OGFC 排水性沥青路面兼顾了排水性能优越和 OGFC 磨耗层抗磨良好的优点,结合 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》和 JTG/T F20—2015《公路路面基层施工技术细则》,该文的 OGFC 排水性沥青路面结构如表 1 所示。

表 1 OGFC 排水性沥青路面结构

结构层	厚度/cm	结构层	厚度/cm
OGFC—13	4	水泥稳定碎石	36
AC—20	6	级配碎石	20
ATPB—25	8	土基	—

2.2 有限元模型

路面结构为 3.0 m×3.74 m 的计算模型,路面宽

度方向 3.0 m,道路深度方向 3.74 m,即 x 方向 3.0 m, y 方向 3.74 m。各结构层的层间接触为完全连续,计算中假定路面结构初始状态为 0。

边界条件为:固相:在 $x=3$ m 面上无 x 方向位移,即 $u_x=0$;在 $y=0$ 平面上无 x 方向和 y 方向位移,即 $u_x=0$ 、 $u_y=0$ 。液相:在 $x=3$ m 面上为排水条件,即 $P=0$;在 $y=3.74$ m 面上,除荷载作用位置外为排水条件,即 $P=0$ 。

采用局部细化的方法划分网格,面层和基层结构、荷载作用部分到模型底部细化,网格尺寸为 0.03 m×0.03 m,其他部分网格尺寸为 0.06 m×0.06 m,网格采用八结点平面应力四边形单元 CPE8RP 划分,用缩减积分计算,有限元分析模型如图 1 所示。

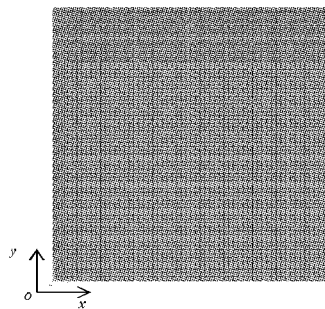


图 1 有限元分析模型

2.3 材料参数

对 OGFC 排水性沥青路面,假定路面结构为线弹性多孔介质体,固相为道路各层结构材料组成的骨架,液相为充满骨架孔隙不可压缩的水。沥青混合料 OGFC—13 的渗透系数取自文献[6],其他各层渗透系数取自文献[19],其路面各结构层及其参数见表 2。

表 2 路面结构层及其参数

结构层	厚度/ cm	动态压缩模量/ MPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	渗透系数/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	阻尼比
OGFC—13	4	6 000、7 500、9 000、10 500、12 000	0.30	2 400	1 000	2.75×10^{-3}	0.05
AC—20	6	11 000	0.35	2 400	1 000	5.38×10^{-7}	0.05
ATPB—25	8	9 000	0.35	2 400	1 000	2.04×10^{-4}	0.05
水泥稳定碎石	36	17 000	0.25	2 200	1 000	2.62×10^{-4}	0.05
级配碎石	20	350	0.25	2 200	1 000	5.00×10^{-5}	0.05
土基	—	40	0.40	1 900	1 000	1.00×10^{-8}	0.05

上面层 OGFC—13 和中面层 AC—20 采用了温度为 20 ℃、加载频率为 10 Hz 条件下的动态模量,ATPB—25 采用了温度为 20 ℃、加载频率为 5 Hz 条件下的动态模量,水泥稳定碎石基层采用了经调整系

数修正后的弹性模量、级配碎石底基层采用了经湿度调整的回弹模量、路基采用了平衡湿度状态下并考虑干湿与冻融循环作用后的顶面当量回弹模量。考虑到路面结构层在行车荷载作用下,上面层受温度和荷载

作用时间影响最大,由上而下逐渐递减,且行车速度越大,车载影响深度越小,通过有限元计算分析,对上面层 OGFC-13 动态压缩模量分别选择 6 000、7 500、9 000、10 500、12 000 MPa 共 5 个模量,其他层模量不变的情况下,研究上面层 OGFC-13 模量变化对沥青路面应力应变和孔隙水压力的影响。

2.4 荷载条件

行车荷载为垂直均布荷载,根据 JTG D50-2017《公路沥青路面设计规范》,设计参数为:标准轴载 100 kN,轮胎接地压力 0.7 MPa,单轮接地当量圆直径 213.0 mm,两轮中心距 319.5 mm;荷载作用模式如图 2 所示。

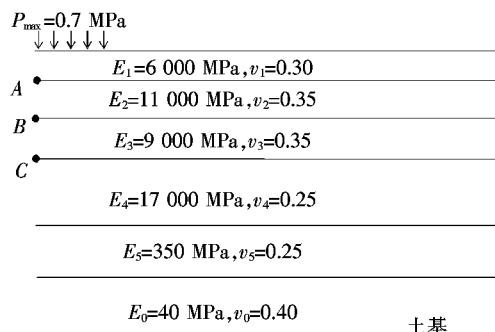


图 2 荷载作用模式

采用半正弦波瞬态荷载模拟实际路面所承受的车辆动载作用,均布荷载的峰值定义为 $P_{\max}=0.7$ MPa,动载单次作用时间为 T ,分析时段为 $T_a=0.2$ s。任意时刻的均布荷载函数为:

$$P = \begin{cases} P_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{T}t\right) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & T \leq t \leq T_a \end{cases} \quad (1)$$

为分析不同车速下排水性沥青路面孔隙水压力的时程变化,不同车速与作用时间如表 3 所示。

表 3 不同车速与作用时间

车速/ (km · h ⁻¹)	荷载作用 时间/s	车速/ (km · h ⁻¹)	荷载作用 时间/s
60	0.076	120	0.038
90	0.052		

3 计算结果与分析

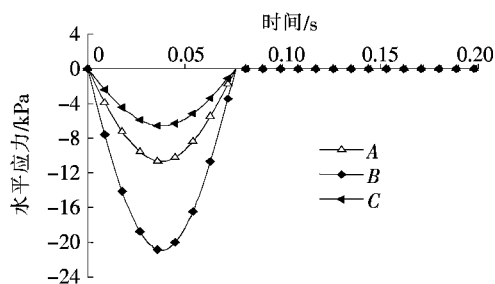
该文选取荷载作用中心线下上面层与中面层的交界点 A、中面层与下面层的交界点 B、下面层与基层的交界点 C 为特征点分析 OGFC 路面结构的力学性能

(图 2)。

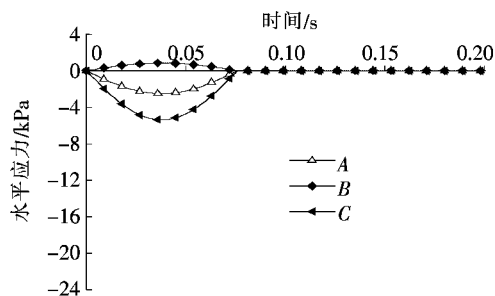
3.1 OGFC-13 动态压缩模量对水平应力、应变的影响

建立了车速为 60 km/h 时,OGFC-13 动态压缩模量分别为 6 000、7 500、9 000、10 500、12 000 MPa 的 5 种饱水有限元分析模型,研究沥青面层动态压缩模量的变化对路面水平应力、应变的影响。

图 3 为 OGFC-13 动态压缩模量为 6 000、12 000 MPa 时,特征点 A、B、C 水平应力的时程变化。图 4 为 OGFC-13 不同动态压缩模量时特征点 A、B、C 的最大水平应力。



(a) 动态压缩模量为 6 000 MPa



(b) 动态压缩模量取 12 000 MPa

图 3 OGFC-13 动态压缩模量为 6 000、12 000 MPa 时,特征点 A、B、C 水平应力的时程变化

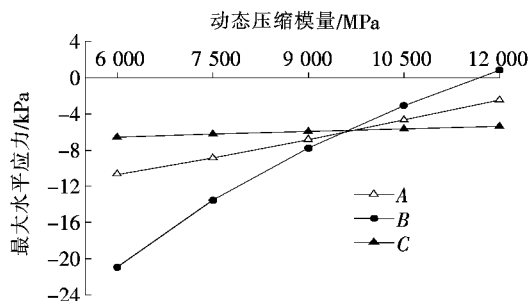


图 4 不同 OGFC-13 动态压缩模量时特征点 A、B、C 的最大水平应力

从图 3 可以看出:面层的水平应力随时间变化呈现先增大后减小最后逐渐消散的过程。当 OGFC-13 动态压缩模量为 6 000 MPa 时,面层结构首先表现为压应力且以中面层底部的压应力最大,为 -20.92

kPa;当 OGFC-13 动态压缩模量增大到 12 000 MPa 时,特征点 A 和特征点 C 仍为压应力,但较动态压缩模量为 6 000 MPa 时明显减小,而特征点 B 处由压应力转变为拉应力。

从图 4 可以看出:随着 OGFC-13 动态压缩模量的增大,面层的最大水平压应力逐渐减小,且有向拉应力转变的趋势。

从以上分析可知:随着上面层动态压缩模量的增大,中面层底部的水平应力受影响最大,上面层底部次之,下面层底部最小,说明沥青路面的中面层底部最易产生破坏。

图 5 为 OGFC-13 动态压缩模量为 6 000、12 000 MPa 时,特征点 A、B、C 水平应变的时程变化。图 6 为 OGFC-13 不同动态压缩模量时特征点 A、B、C 的最大水平应变。

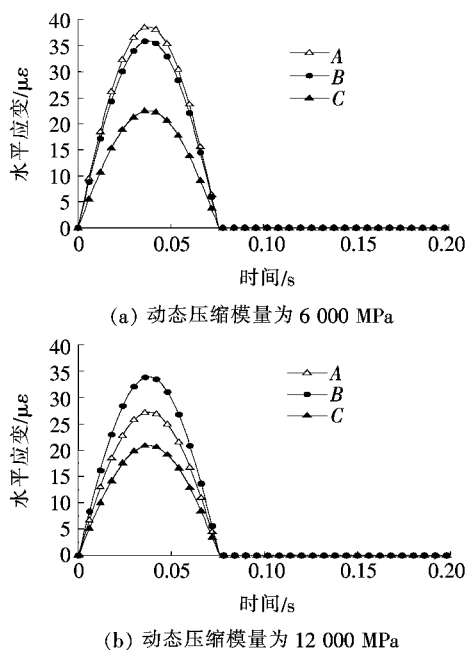


图 5 OGFC-13 不同动态压缩模时特征点 A、B、C 水平应变的时程变化

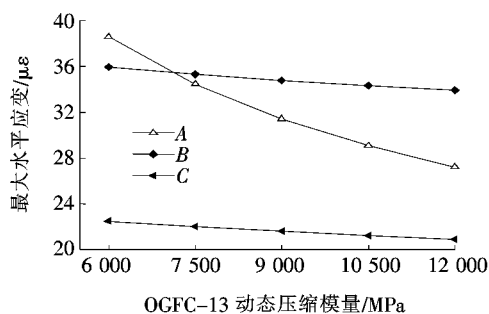


图 6 OGFC-13 不同动态压缩模量时特征点 A、B、C 的最大水平应变

从图 5 可以看出:面层的水平应变随时间变化呈现先增大后减小最后逐渐为 0 的过程。面层的水平应变在水和车载耦合作用时持续表现为拉应变,其中特征点 B 的水平拉应变变化率最大并始终较特征点 A 和特征点 C 高。

从图 6 可以看出:随着 OGFC-13 动态压缩模量的增大,特征点 A、B、C 的最大水平拉应变不断减小,其中以特征点 A 的变化最快。

从以上分析可知:随着动态压缩模量的增大,特征点 A 最大水平应变不断减小,说明增大动态压缩模量,可以有效地降低特征点 A 上面层的最大水平拉应变;特征点 B、C 随上面层动态压缩模量的增大,最大水平应变变化不大,其中特征点 C 最大水平应变最小。

3.2 沥青上面层动态压缩模量对孔隙水压力的影响

仍取上文所建立的 5 种上面层不同动态压缩模量的有限元模型进行分析。图 7 为上面层不同动态压缩模量时,特征点 A 孔隙水压力的时程变化。表 4 为特征点 A、B、C 在上面层不同动态压缩模量时的最大孔隙水压力。

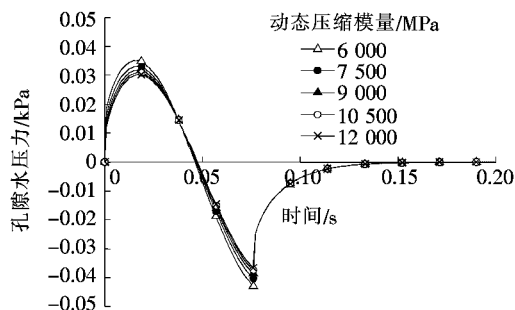


图 7 上面层不同动态模量时,特征点 A 处孔隙水压力的时程变化

从图 7 可以看出:在水和车载耦合作用下,上面层孔隙水压力具有波的传递性,呈现明显的抽吸现象。在荷载作用的初期,孔隙水压力迅速增大至正向峰值;随后在车辆逐渐驶离时达到负向峰值;在车辆完全驶离后,孔隙水压力逐渐消失。

从表 4 可以看出:上面层的孔隙水压力远远小于中面层和下面层,且上面层动态压缩模量的变化对下面层的最大孔隙水压力影响较小。

由以上分析可知:具有 OGFC 上面层的排水性沥青路面具有良好的排水性能,能够有效地降低上面层的孔隙水压力,缓解沥青路面雨天积水现象,进而提高雨天的行车安全。

表 4 特征点 A、B、C 在上面层不同动态压缩模量时的最大孔隙水压力

特征点	不同 OGFC-13 动态压缩模量(MPa)时最大孔隙水压力/kPa									
	6 000		7 500		9 000		10 500		12 000	
	正向	负向	正向	负向	正向	负向	正向	负向	正向	负向
A	0.035	-0.043	0.033	-0.040	0.032	-0.039	0.031	-0.037	0.030	-0.036
B	21.160	-24.700	21.180	-24.720	21.210	-24.750	21.230	-24.770	21.250	-24.790
C	21.260	-24.820	21.290	-24.850	21.310	-24.870	21.330	-24.900	21.350	-24.920

3.3 车速对孔隙水压力的影响

选取 OGFC-13 动态压缩模量为 6 000 MPa,车速分别为 60、90 和 120 km/h 的 3 种有限元模型,分析 3 个特征点 A、B 和 C 处的孔隙水压力。

图 8 为不同车速下特征点 A、B、C 处孔隙水压力的时程变化。

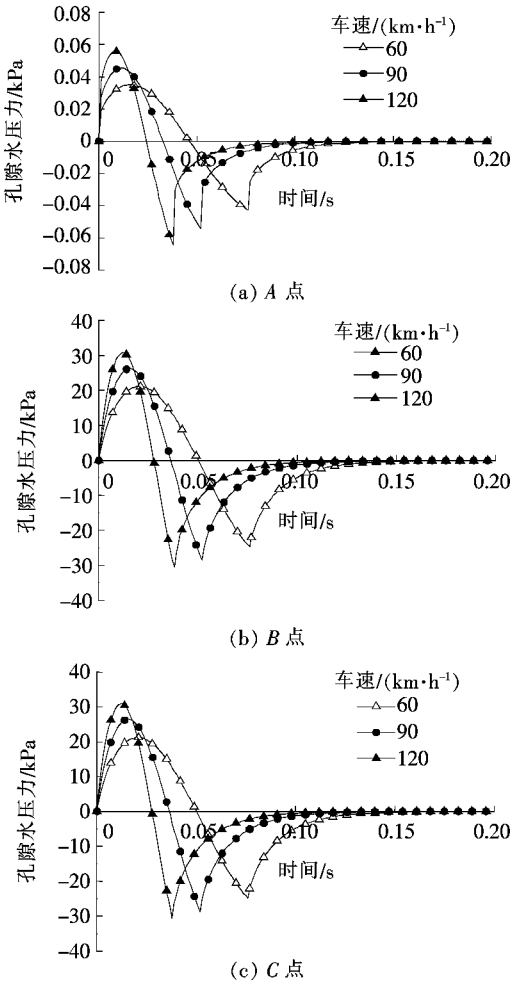


图 8 不同车速下各特征点处孔隙水压力的时程变化

从图 8 可以看出:随着车速的增大,面层内的孔隙水压力均呈增大趋势,且车速越快,最大正负孔隙水压力出现得越早。

分析可知:车速越大,孔隙水压力越大,且孔隙水

压力的正负交替作用越快;OGFC 排水性沥青路面上面层的孔隙水压力最小,由此可见,OGFC 路面能抑制沥青结合料黏附性的丧失,从而降低高速行驶带来的水损害。

3.4 渗透系数对孔隙水压力的影响

选取 OGFC-13 动态压缩模量为 6 000 MPa,车速为 60 km/h,渗透系数如表 5 所示的 6 种有限元模型分析特征点 A 处的孔隙水压力变化情况,结果见图 9。

表 5 OGFC-13 空隙率与相应渗透系数

空隙率/ %	渗透系数/ ($\times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	空隙率/ %	渗透系数/ ($\times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)
16	1.67	22	3.52
18	2.14	24	4.51
20	2.75	26	5.78

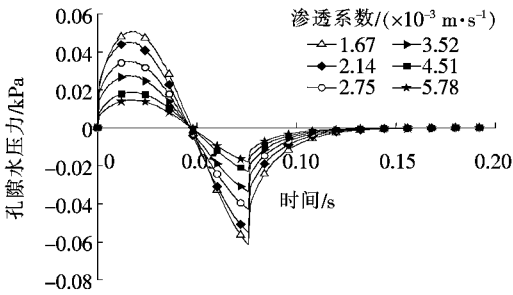


图 9 上面层不同渗透系数时特征点 A 处孔隙水压力的时程变化

从图 9 可以看出:上面层渗透系数的变化会影响层内的孔隙水压力的分布。当上面层的渗透系数由 $1.67 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 增大到 $5.78 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 时,上面层正向最大孔隙水压力由 0.051 kPa 逐渐降低到 0.015 kPa,上面层负向最大孔隙水压力由 -0.062 kPa 逐渐降低到 -0.018 kPa,且渗透性系数越大,孔隙水压力下降越快,说明上面层空隙率即渗透系数的增大可以有效地降低孔隙水压力。而相关研究表明:OGFC-13 沥青混合料空隙率的增大会在一定程度上降低其

高温稳定性、骨料的结合性能等,所以 OGFC-13 渗透系数的选择不仅需要考虑排水性能,还需综合考虑其在大空隙情况下的骨料结合性能等相关路用指标。

4 结论

采用弹性多孔介质理论,建立了考虑水荷载耦合作用下 OGFC 排水性沥青路面轴对称有限元模型,分析了饱水 OGFC 排水性沥青路面在水荷耦合作用下,上面层不同动态压缩模量对应力、应变和孔隙水压力影响的变化规律,研究了不同车速和渗透系数情况下孔隙水压力的时程变化,得出以下结论:

(1) 中面层底部的水平应力受上面层动态压缩模量影响最大,上面层底部次之,下面层底部最小,增大上面层动态压缩模量可以有效地降低路面的疲劳开裂和永久变形,但要充分考虑中面层的弯拉应力限值。

(2) 排水性沥青路面的中面层底部最易受到破坏,从计算结果可知:增大上面层动态压缩模量可以有效地减小上面层底部的最大水平应变,但对中下面层底部影响不大,且中面层底部最大水平应变最高,下面层底部最大水平应变最小。

(3) OGFC-13 上面层具有良好的排水性能,能够显著地降低水荷耦合作用下上面层的孔隙水压力,且上面层动态压缩模量越大,上面层底部的孔隙水压力越小。

(4) 高速行驶会使路面结构快速地产生较大的正负孔隙水压力,加剧路面的破坏,但使用 OGFC 作为沥青路面上面层可以有效减小高速行驶对路面结构的水损害。

(5) 上面层渗透系数的增大能降低上面层的孔隙水压力,但过大的空隙会降低 OGFC 沥青结合料的结合性能、高温稳定性能等,因此渗透系数的选取仍需在排水性能的基础上考虑路用性能。

参考文献:

- [1] Haselbach LM, Valavala S, Montes F. Permeability Predictions for Sand - Clogged Portland Cement Pervious Concrete Pavement Systems[J]. Journal of Environmental Management, 2006, 81(1): 42-49.
- [2] Beecham S, Myers B. Structural and Design Aspects of Porous and Permeable Block Pavement[J]. Journal of the Australian Ceramic Society, 2007, 43(1): 74-81.
- [3] Kuang X, Sansalone J, Ying G. Pore-Structure Models of Hydraulic Conductivity for Permeable Pavement [J]. Journal of Hydrology, 2011, 399(3): 148-156.
- [4] 沈金安. 开级配多空隙排水型沥青路面[J]. 国外公路, 1994(8).
- [5] 关彦斌. 大孔隙沥青路面的透水机理及结构设计研究[D]. 北京交通大学博士学位论文, 2008.
- [6] 薛晓飞. 基于低影响开发的城市路面材料与结构研究[D]. 北京建筑大学硕士学位论文, 2013.
- [7] 刘胜. 孔隙率对 OGFC 路用性能的影响研究[J]. 北方交通, 2013(10).
- [8] 李新贺. 基于有限元法的透水沥青路面结构分析[J]. 中外公路, 2014(6).
- [9] 锁利军. 海绵型道路沥青路面排水基层结构力学分析[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2017(3).
- [10] Muhammed EK, Ahmet H. Laboratory Validation of Lattice Boltzmann Method for Modeling Pore - Scale Flow in Granular Materials[J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(8): 381-395.
- [11] Niki Kringos, Tom Scarpasa, Cor Kasbergen. Modelling of Combined Physical - Mechanical Moisture - Induced Damage in Asphaltic Mixes[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2008, 9(2): 115-128.
- [12] Cui X, Jin Q, Shang Q. Numerical Simulation of Dynamic Pore Pressure in Asphalt Pavement [J]. Journal of Southeast University, 2009, 25(1): 79-82.
- [13] 罗志刚, 凌建明, 周志刚, 等. 沥青混凝土路面层间孔隙水压力计算[J]. 公路, 2005(2).
- [14] 郭乃胜, 赵颖华. 考虑孔隙水压力不利影响的沥青路面结构组合分析[J]. 大连海事大学学报, 2011(2).
- [15] 王振勇. 动水压力作用下沥青路面水损坏研究[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2017.
- [16] 郭建国. 透水性路面材料对路面温度影响的研究[J]. 中外公路, 2014(6).
- [17] JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [18] JTG/T F20-2015 公路路面基层施工技术细则[S].
- [19] 陈景, 孙澎涛, 李福普, 等. 沥青混合料渗水系数的研究[J]. 公路交通科技, 2006(1).
- [20] 仇敏玉, 俞亚南. 道路行车荷载影响深度分析[J]. 岩土力学, 2010(6).