

动水压力作用下沥青路面渗水量影响分析

高俊启¹ 盛余祥² 张世铎² 于凤强² 蒋泽民¹

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016; 2. 日照市公路管理局, 日照, 276826)

摘要: 沥青路面渗水量对于沥青路面内部排水设计非常重要。为计算动水压力作用下沥青路面渗水量, 实地测试了不同车速下沥青路面表面的动态水压力数值, 建立了动态水压力与车速的关系。根据变水头试验方法, 测试了沥青混合料芯样在 40~350 kPa 水压力下的渗透系数, 建立了沥青混合料渗透系数与水压力的关系。为研究路面在交通荷载作用下的动态渗透性能, 设计了动态渗透试验测量系统。建立了动水压力作用下沥青路面渗水量的计算模型。结果表明: 沥青路面渗水量与路面渗透系数、轮胎有效接地面积成正比, 与路面厚度成反比; 随车速增加, 动水压力作用下沥青路面渗水量减小。

关键词: 道路工程; 沥青路面; 动水压力; 渗透系数; 渗水量

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2013)02-0266-05

Analysis on Infiltration Capacity in Asphalt Pavement Subjected to Dynamic Hydraulic Pressure

Gao Junqi¹, Sheng Yuxiang², Zhang Shiduo², Yu Fengqiang², Jiang Zemin¹

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Rizhao Highway Administration, Rizhao, 276826, China)

Abstract: It is important of infiltration capacity for the drainage design in asphalt pavement. In order to calculate infiltration capacity in asphalt pavement subjected to dynamic hydraulic pressure, the dynamic hydraulic pressures in asphalt pavement at some running speeds are measured, and the relationship of the hydraulic pressure and car speed is built. Furthermore, a falling head permeameter method is used to measure the permeability coefficients of asphalt mixture exposed to hydraulic pressures whose peak values are from 40 to 350 kPa, and the correlation between permeability and hydraulic pressure is obtained. In addition, a dynamic permeability test system is presented to measure the dynamic permeability of asphalt mixture subjected to vehicle impulsive pressures, and the calculation formula for calculating infiltration capacity in asphalt pavement subjected to dynamic hydraulic pressure is established. The results show that the infiltration capacity is proportionate to the permeability coefficient and effective tire ground area respectively, and is inversely proportional to the thickness of asphalt pavement. The infiltration capacity decreases with the increment of car's speed.

Key words: road engineering; asphalt pavement; dynamic hydraulic pressure; permeability coefficient; infiltration capacity

水分进入沥青混凝土面层有几个主要途径。地下水或雨水可能透过土路肩、基层、中央分隔带或边坡渗透到面层; 沥青路面出现不同类型、不同

程度的裂缝, 当裂缝宽度超过一定限值, 雨水将进入沥青混凝土面层; 路面雨水在高速行车动水压力作用下进入路面面层。

基金项目: 国家自然科学基金(51078183)资助项目。

收稿日期: 2012-04-24; 修订日期: 2012-10-11

通信作者: 高俊启, 男, 博士, 副教授, 1973 年生, E-mail: junqi-gao@nuaa.edu.cn。

目前,国外关于路表水渗入率的设计方法主要为 Cedergren 代表的水文学方法和 Ridgeway 代表的水力学方法^[1-2]。国内目前采用的是 Ridgeway 提出的设计方法。对于沥青路面,现行 JTJ018—97《公路排水设计规范》推荐的渗入率设计值为 $0.15 \text{ m}^3/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ ^[3]。该设计值考虑了路面的轻微损害,但没有考虑车轮的动力作用。吉青克建立了正常路面的渗入率模型,并通过利用路面破损与渗透系数的关系,将路面破损对渗入率大小的影响做了归纳性的阐述和分等级计算^[4]。Chen 采用室内试验仪器制作出带有不同裂缝宽度的沥青玛蹄脂碎石 (Stone matrix asphalt, SMA) 和多孔沥青混合料 (Porous asphalt, PA) 试件,建立渗透系数和裂缝之间的关系式,采用图像分析技术研究了沥青路面裂缝宽度和渗透性对水损坏的影响^[5]。但汉成基于裂缝渗流理论建立了裂缝和龟裂路面中雨水渗流的数学物理计算模型,推导了考虑裂缝和龟裂的沥青路面雨水渗入量的理论计算公式^[6]。

计算沥青路面渗水性,必然涉及描述液体流动的重要参数——渗透系数。除了可以用常水头试验、变水头试验直接测量沥青混合料的渗透系数^[7],国内外学者也提出很多的模型用来估计沥青混合料渗透系数。Kozeny-Carman 公式一直被用来估算颗粒材料的渗透性,该公式建立在以毛细管表征孔隙率和水力半径理论基础之上。Masad 对 Kozeny-Carman 公式进行了简化,提出了修正形式^[8]。国内学者也对各种沥青混合料的纵向渗透系数、横向渗透系数做了大量的工作^[9-10]。但由于沥青混凝土路面渗水量的准确计算非常复杂,上述计算模型中大多考虑了路面的开裂破坏情况,但没有考虑轮胎荷载的动力作用。在计算过程中,一般认为渗透系数是恒定不变的。对于低压水头这种假定是合适的,但在较高水头的动水压力作用下,这种假定不甚合适^[11]。本文主要考虑车轮荷载的动力作用以及渗透系数的变化,对动力压力作用下沥青路面的渗水量计算进行研究。

1 沥青路面动水压力测试

为了测量沥青路面动水压力的数值,水压力传感器被埋入扩建公路路面结构中。水压力传感器呈圆盒形,高 26 mm,水平截面半径为 27 mm。光纤光栅粘贴于传感器的平膜片中央。动水压力传递到传感器腔体中的液态水并作用在膜片上,膜片发生形变而引起光纤光栅中心波长偏移。通过

检测波长偏移量,就可以测量沥青路面动水压力的数值^[12]。现场测量时,首先利用取芯机在沥青混凝土路面钻孔,取出芯样用于渗透系数测试。然后,把传感器放进测孔中,并调整传感器上部距离路表面多于 1 cm,以保证车辆从测孔上部通过时,车轮荷载不直接作用在传感器上。同时,将传感器与数据采集设备连接,以保证测试时能收集信号。接着,用洒水车洒水,始终使测孔及其周围路面处于淌水状态,以模拟雨天路面流水状态。最后,汽车分别以不同的速度通过测点,并多次测量同一速度下的动水压力值。数据采集设备采用 Si425-500 光纤光栅解调仪,采集频率 250 Hz。车辆采用小汽车,前后轴距 2.578 m,轮胎规格 205/55 R16,车质量为 1.4 t,胎压 0.26 MPa。图 1 为不同车速下动态水压力测试结果。

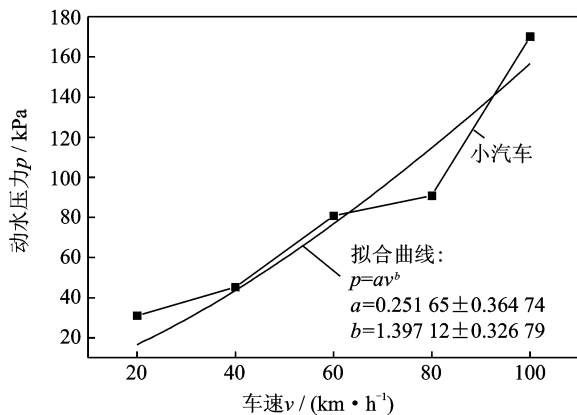


图 1 路表动水压力与汽车速度的关系曲线

由图 1 可见,小汽车车速分别为 20, 40, 60, 80 和 100 km/h 时,路面表面的动态水压力数值为 31.0, 45.2, 80.8, 90.9 和 170.2 kPa;随着车速增加,动态水压力增加。通过回归分析可见,动态水压力与车速的关系为

$$p = 0.251\ 65v^{1.397\ 12} \quad (1)$$

式中: p 为动态水压力; v 为车速。

2 沥青混合料渗透系数

AASHTO T215—70/ASTM D2434—74 认为,低压实度材料的水力梯度值为 0.2~0.3,高压实度材料为 0.3~0.5,就可以满足水流的层流状态。水头差较大时,渗透系数随着水头差的增大不断减小,渗透系数非线性变化趋势明显,显示出紊流的特征。但水力坡度或者水头差太小会使数据误差增大。根据路面中动水压力的实际情况,选择较大的压力水头。渗透系数根据式(2)进行计算

$$k = \frac{\alpha L}{Ft} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) C \quad (2)$$

式中： α 为变水头管断面积； L 为渗径，即试样高度； F 为试件的断面积； t 为测读水头的起始和终止时间差； h_1, h_2 分别为起始和终止水头； C 为温度修正系数，将渗透系数转换为20℃标准条件下的渗透系数。

选取不同类型的两组沥青混合料进行渗透试验，一组为SMA-13(编号A)，另一组为AC-20(编号B)，每组均为6个试件。试验时，记录测读水头的时间差 t ，变水头管断面积 α ，水压 p ，平均温度 T ，渗透水量 Q ，试件高度 L ，试件横截面积 F ，以及水压 p 转化的压力水头 h_1, h_2 ；并将以上数据代入

式(2)，即可获得不同压力下试件的渗透系数。表1为A2, A3, B3, B5, B7在不同水压力下的渗透系数。其余试件与表1所列试件具有相同的变化规律，未列出。由表1可以看出，随作用在沥青混合料上的水压力增加，其渗透系数逐渐减少。为分析沥青混合料渗透系数随水压力增加而减小的规律，以40 kPa时的渗透系数为基准值，对表1中的试验数据进行归一化处理，回归分析结果见图2。由图2可以看出，沥青混合料在不同压力下的渗透系数可以采用式(3)来表达

$$k = k_0 \times 5.6408 \times p^{-0.47362} \quad (3)$$

式中： k 为沥青混合料渗透系数； p 为水压力； k_0 为40 kPa压力作用下的渗透系数。

表1 沥青混合料渗透系数

芯样	空隙率/ %	渗透系数 $k/(10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1})$								
		40 kPa	60 kPa	80 kPa	100 kPa	150 kPa	200 kPa	250 kPa	300 kPa	350 kPa
A2	5.3	2.79	2.18	1.74	1.64	1.44	1.24	1.13	1.07	1.15
A3	3.9	1.05	0.77	0.66	0.61	0.49	0.41	0.38	0.36	0.35
B3	7.2	5.27	4.41	4.05	3.70	2.88	2.57	2.35	2.21	2.08
B5	4.5	0.28	0.22	0.20	0.18	0.15	0.12	0.11	0.11	0.10
B7	7.1	4.91	4.25	3.57	3.32	2.68	2.27	2.15	2.07	1.85

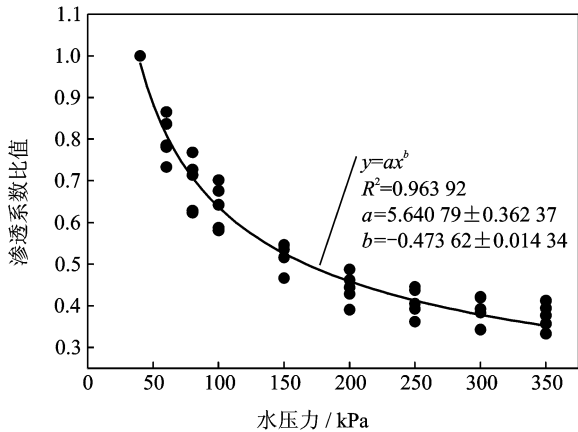


图2 沥青混合料渗透系数与水压力关系曲线

3 沥青混合料动态渗透性能

雨期，当车辆行驶在路面上时，沥青路面表面受到的动态水压力呈波动性。为研究路面在连续交通荷载作用下的渗透性能，设计了动态渗透试验测量系统，见图3。在可调压力表和密封充水容器之间增加了高频控制器，它通过信号发生器已设定的频率自动开合，把动态的水压力施加到沥青混合料芯样上。

采用正弦波形荷载进行水压力施加，加载频率采用10 Hz，加载时间为 $t = 1/(2\pi f) = 0.016 \text{ s}$ ，施加的水压力大致相当于60~65 km/h的行车速度

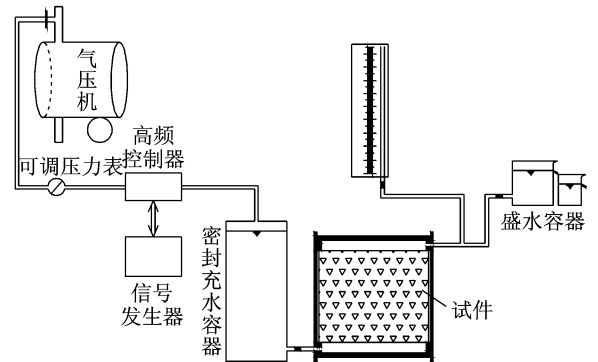


图3 动态渗透系统

产生的动水压力分布。为分析低速行车时沥青混合料的渗透性能，同时测量了1 Hz频率下的渗透系数。图4为A3和B7试件在两种频率不同水压力作用下的动态渗透性能。由图4可见，相对静态水压力，在各级动态水压力作用下沥青混合料透水量要低。对于A3混合料，施加静态水压力时，其透水量由60 kPa时的110.3 ml/min增加到350 kPa时的282 ml/min，而其动态透水量只达到同级水压力时静态的50%~75%。对于B7混合料，施加静态水压力时，其透水量由60 kPa时的394.8 ml/min增加到350 kPa时的974.4 ml/min，而其动态透水量是静态的48%~56%。在1和10 Hz两种频率作用下，其透水性能变化不大。

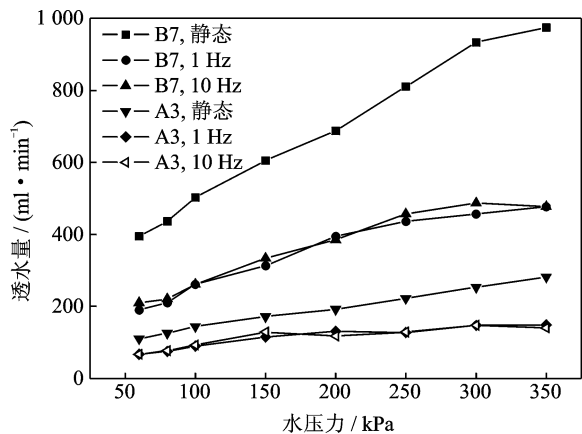


图4 沥青混合料动态透水曲线

这说明沥青混合料的渗透性能对水压力的变化频率不敏感,对水压力的峰值敏感。

4 沥青路面渗水量计算与分析

现有研究表明^[12],在车辆以20~80 km/h的速度行驶时,动水压力作用时间大约在0.04~0.01 s之间。动水压力荷载的持续时间可表达为

$$t = \frac{3.6 \times 2 \times R}{v} \quad (4)$$

式中: t 为时间; R 为单轮传压面当量圆半径; v 为车速。

根据式(1,3,4),一个轮胎作用下沥青路面渗水量可以采用式(5)计算

$$q = kIFt = 200.3848 \frac{k_0 FR}{\Delta l} \times v^{-0.26458} \quad (5)$$

表2 动态水压力作用下沥青路面渗水量

参数	数值				
车速/(km · h ⁻¹)	20	40	60	80	100
水压力/kPa	16.5	43.6	76.8	114.7	156.7
渗透系数/(cm · s ⁻¹)	4.17 × 10 ⁻⁴	2.63 × 10 ⁻⁴	2.01 × 10 ⁻⁴	1.67 × 10 ⁻⁴	1.44 × 10 ⁻⁴
一个轮胎下渗水量/ml	5.61 × 10 ⁻²	4.68 × 10 ⁻²	4.21 × 10 ⁻²	3.91 × 10 ⁻²	3.69 × 10 ⁻²
一辆汽车作用下渗水量/ml	0.22	0.19	0.17	0.16	0.15
考虑动态效应/ml	0.11	0.095	0.085	0.08	0.075

5 结论

(1)实地测试了不同车速下沥青路面表面的动态水压力数值。通过回归分析,建立了动态水压力与车速的关系。

(2)根据试验路表动态水压力的实际情况,选择较大的压力水头,根据变水头试验方法,测试了沥青混合料芯样在不同水压力下的渗透系数。结果表明,随作用在沥青混合料上的水压力增加,其渗透系数逐渐减少。并通过归一化处理,建立了沥

青混合料渗透系数与水压力的变化关系。

(3)为研究路面在连续交通荷载作用下的渗透性能,设计了动态渗透试验测量系统。结果表明,沥青混合料的渗透性能对水压力的变化频率不敏感,对水压力的峰值敏感。动态透水量是静态的48%~75%。

(4)建立了动水压力作用下沥青路面渗水量的计算模型。沥青路面渗水量与路面渗透系数、轮胎有效接地面积成正比,与路面厚度成反比;随车速增加,动水压力作用下沥青路面渗水量减小。

参考文献:

- [1] Cedergren H R. Drainage of highway and airfield pavement[M]. New York: John Wiley & Sons, 1974.
- [2] Ridgeway H H. Infiltration of water through the pavement surface[J]. Transportation Research Record, 1976, 616: 98-100.
- [3] 中华人民共和国交通部. JTJ018—97 公路排水设计规范[S]. 北京:人民交通出版社, 1997.
Ministry of Transport of the P. R. C. JTJ018—97 specifications of drainage design for highways[S]. Beijing: China Communications Press, 1997.
- [4] 吉青克. 基于面层渗透系数的路表水渗入率设计[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1045-1049.
Ji Qingke. Design of road infiltration based on infiltration coefficient of pavement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1045-1049.
- [5] Chen J S, Lin K Y, Young S Y. Effects of crack width and permeability on moisture-induced damage of pavements[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004: 276-282.
- [6] 但汉成, 李亮, 李凌. 开裂沥青路面结构渗水量计算[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(6): 105-111.
Dan Hancheng, Li Liang, Li Ling. Calculation for infiltration rate of flow in cracking asphalt pavement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(6): 105-111.
- [7] Kanitpong K, Benson C H, Bahia H U. Hydraulic conductivity (permeability) of laboratory compacted asphalt mixtures[J]. Transportation Research Record, 2001, 1767: 25-32.
- [8] Masad E, Birgisson B, Al-Omari A, et al. Analytical derivation of permeability and numerical simulation of fluid flow in hot-mix asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(5): 487-496.
- [9] 徐皓, 倪富健, 刘清泉, 等. 排水性沥青混合料渗透系数测试研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 1-5.
Xu Hao, Ni Fujian, Liu Qingquan, et al. Research on hydraulic conductivity of porous asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 1-5.
- [10] 张林洪, 王苏达, 吴培关, 等. 沥青路面结构的渗透性能测试研究[J]. 中南公路工程, 2005, 30(3): 10-14.
Zhang Linhong, Wang Suda, Wu Peiguan, et al. Permeability test of asphalt pavement structure[J]. Central South Highway Engineering, 2005, 30(3): 10-14.
- [11] 张璠, 陈荣生, 倪富健. 排水性沥青路面混合料的渗透性能试验测试技术[J]. 东南大学学报, 2010, 40(6): 1288-1292.
Zhang Fan, Chen Rongsheng, Ni Fujian. Techniques of permeability testing for porous asphalt pavement mixture[J]. Journal of Southeast University, 2010, 40(6): 1288-1292.
- [12] 高俊启, 陈昊, 季天剑, 等. 沥青路面动水压力光纤传感测量研究[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 59-61.
Gao Junqi, Chen Hao, Ji Tianjian, et al. Measurement of dynamic hydraulic pressure in asphalt pavement using fiber bragg grating[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2009, 28(9): 59-61.

