

基于非达西渗流定律的沥青饱水路面结构动力特性研究

宋福春,白祥鸽

(沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 提出考虑非线性渗流定律的沥青饱水路面模型,对其结构力学性能进行研究,为道路结构排水设计提供参考。方法 利用 COMSOL 有限元软件,对动荷载作用下的路面结构进行有限元建模,分析动荷载下 Forchheimer 非线性渗流时饱水沥青路面的动孔隙水压力、水平应力以及剪切应力的变化,并通过正交试验探寻轮载峰值、孔隙率、弹性模量三种变量参数对沥青路面结构的动孔隙水压力的影响。结果 动孔隙水压力在动荷载的作用下先到达正向峰值后逐渐减小至出现负向峰值后慢慢减小至平稳;水平压应力在动荷载的作用下随着结构层的深度增加而减小;剪切应力随着荷载的增加而增加,随着荷载的减小而减小。由正交试验结果可得,轮载峰值对沥青饱水路面动孔隙水压力的影响呈正相关特征,而孔隙率、弹性模量呈负相关特征。其中考虑轮载峰值时,沥青饱水路面的最大动孔隙水压力均值增幅最大,达 56%。结论 数值模拟结果验证了结构层内正负水压力随时间交替存在,证实了水损害过程中的泵吸作用,非线性渗流对沥青面层的冲刷作用较强;动孔隙水压力受轮载峰值的影响较大,孔隙率对其影响次之,弹性模量影响最小。

关键词 道路工程;动孔隙水压力;沥青饱水路面;Forchheimer 型非达西渗流定律

中图分类号 TU411

文献标志码 A

Dynamic Characteristics of Asphalt Saturated Pavement Based on Non-Darcy Seepage Law

SONG Fuchun, BAI Xiangge

(School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: To propose put forward the asphalt saturated pavement model considering the nonlinear seepage law, the mechanical properties of its structure were studied, which can provide reference for the design of road structure drainage. COMSOL finite element software was used to model the

收稿日期:2022-03-21

基金项目:“十三五”国家重点研发计划重点专项基金项目(2018YFC0809600, 2018YFC0809606);辽宁省重点研发计划指导计划基金项目(2018416028);沈阳市建委城乡系统科研项目(201904)

作者简介:宋福春(1971—),男,副教授,博士,主要从事桥梁组合结构与计算理论等方面研究。

pavement structure under dynamic load, and the changes of dynamic pore water pressure, horizontal stress and shear stress of saturated asphalt pavement under dynamic load were analyzed. Through orthogonal test, the influence of three variables on dynamic pore water pressure of asphalt pavement structure is explored. Under the action of dynamic load, the dynamic pore water pressure first reached the positive peak and then gradually decreased to the negative peak. The horizontal compressive stress decreases with the depth of the structural layer under the action of dynamic load. Shear stress increases with the increase of load and decreases with the decrease of load. According to the orthogonal test results, the influence of wheel load peak on dynamic pore water pressure of asphalt saturated pavement is positively correlated, while the porosity and elastic modulus are negatively correlated. When the peak of wheel load is considered, the mean value of the maximum dynamic pore water pressure on the asphalt saturated surface increases the most, reaching 56%. The numerical simulation results verify the alternating existence of positive and negative water pressure in the structural layer with time, and confirm the pumping action in the process of water damage. Nonlinear seepage has a strong scouring effect on asphalt surface. The dynamic pore water pressure is greatly affected by the peak of wheel load, followed by the porosity, and the elastic modulus.

Key words: road engineering; dynamic pore water pressure; asphalt saturated pavement; Forchheimer non Darcy flow law

水损害是我国早期沥青路面主要的破坏形式^[1-3]。大量的研究和工程实践表明,沥青路面水损害由两种机理组成:物理作用和水动力作用。其中水动力作用机理是在重复的移动交通荷载的作用下,路面结构内部的动孔隙水压力的产生以及沥青路面结构层内部应力^[4]频繁变化,从而导致路面结构产生“泵吸”和“冲刷”现象^[5]。

目前,国内外学者在研究道路的动孔隙水压力时常用的方法是將沥青混合料看成多孔介质,应用 Biot^[6]固结理论计算路面结构内部的孔隙水压力^[7-13]。在这些研究工作中,大部分学者将水在沥青路面结构内部的流动看作为一种具有线性特性的渗流形式,该流动特性符合达西渗流定律,且可以通过该定律进行压力的计算与分析。由于路面结构的渗流在很多情况下不满足达西定律,在春融季节以及夏天多雨季节,沥青路面结构因厚雪消融和连续暴雨而产生严重水损害。此时的水力坡度较大与渗流速度已然不呈线性关系而是非线性关系。因此,采用非达西渗流探索新的固结模型更接近实际情况。目前非达西渗流模型的研究很少应用于分析沥

青饱水路面结构的渗流问题。1901年,Forchheimer发现流速与水力梯度会随着流速的逐渐增大而逐渐偏离线性关系,即随着流速增大,非线性特征就越明显,从而得出Forchheimer型非达西渗流这一经典方程^[14]。

综上所述,笔者从不同的渗流定律角度考虑沥青路面的动孔隙水压力,研究基于Forchheimer型非达西渗流定律的动孔隙水压力变化规律以及该条件下沥青路面结构的各力学特性;应用COMSOL有限元软件建立水-荷载耦合作用下的模型,针对沥青饱水路面在Forchheimer型非达西渗流定律时的动荷载响应进行分析,并探讨不同孔隙率、弹性模量、轮载等因素对路面结构内部力学特性的影响。

1 非达西渗流理论

线性渗流的达西定律为

$$V = KJ. \quad (1)$$

式中: K 为渗流系数, m/d ; J 为水力梯度; V 为渗流速度, m/s 。

在超出达西定律上限的非达西渗流研究中,应用较多的是Forchheimer型非达西渗

流,即:

$$J = av + bv^2. \tag{2}$$

式中: a 、 b 是由流体性质、多孔介质孔隙结构以及水流条件决定的系数。其中 $a = \frac{\mu}{\gamma k}$, $b = \frac{\beta \rho}{\gamma}$ 。

γ 为水的容重, N/m^3 ; μ 为水的动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; k 为介质渗透率, m^2 ; β 为非达西渗流影响系数, m^{-1} 。当 β 为 0 时,该定律即为达西定律。

非达西稳定渗流基本微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + S = 0. \tag{3}$$

式中: k_x 、 k_y 分别为 x 、 y 方向上的渗透系数; S 为源汇项。

2 沥青路面结构及其有限元模型

2.1 路面结构及材料参数

笔者参考高等级路面常采用的典型结构形式,从上到下依次为上面层、中面层、下面层、基层、底基层。路基各层材料的力学参数^[15]见表 1。

表 1 沥青路面结构层材料参数

Table 1 Material parameters of asphalt pavement structure layer					
分层名称	厚度/cm	弹性模量/MPa	泊松比	渗透系数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	非达西渗透系数/ m^{-1}
上面层	4	2 000	0.3	3.44	8.60
中面层	6	1 800	0.3	8.16	6.97
下面层	8	1 800	0.3	5.29	3.40
基层	36	1 600	0.2	1.23	—
底基层	20	225	0.2	2.65	—

2.2 有限元模型

假设行车的方向为纵向,与其垂直的方向为横向。由于均布荷载作用的范围与路面的尺寸相比要小很多,故建立饱水沥青路面结构轴对称有限元模型,横向与纵向尺寸均为 3 m。固体力学物理场上边界条件为除荷载作用处,均为自由。下边界设置为固定约束的边界条件,周围边界表现为竖向自由,且

与面垂直的方向均为固定。流体物理场设置的下边界位置与荷载作用的位置为不透水约束型边界,其余边界皆为透水边界条件,所得模型见图 1。



图 1 饱水沥青路面结构有限元计算模型

Fig. 1 Finite element calculation model of water saturated asphalt pavement structure

2.3 车辆荷载模型

车辆荷载模型将轮载简化为位置不变的单圆型均布荷载,采用半正弦波瞬态荷载来模拟实际路面所承受的车辆动态作用^[16]。

据文献[17],轮载由标准轴载(BZZ-100)得到,均布荷载的峰值 $P_{\max} = 0.7 \text{ MPa}$ 。 T 为单次荷载作用的时间,与车速成反比关系,可用式(4)表示,当车速为 100 km/h 时,等效的 T 约为 0.046 s。当量圆半径 δ 为 10.65 cm,则车辆荷载对某一点的作用随时间的历程变化曲线如图 2 所示,表达式见式(5)。行车荷载作用模型如图 3 所示。

$$T = \frac{12R}{V}. \tag{4}$$

$$P = \begin{cases} P_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{T}t\right), & 0 \leq t \leq T; \\ 0, & t > T. \end{cases} \tag{5}$$

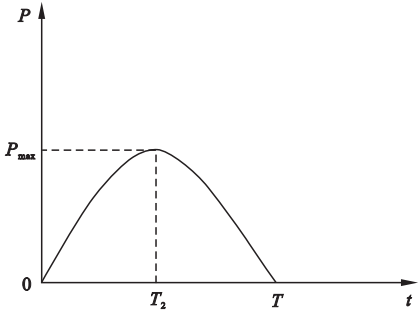


图 2 轮载的加载历程曲线

Fig. 2 Loading history curve of wheel load

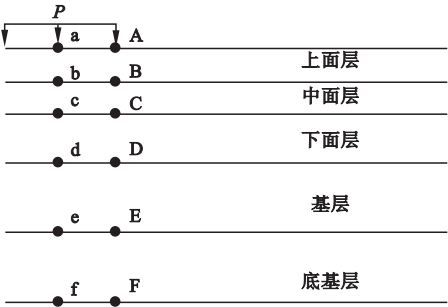


图3 行车荷载作用模型

Fig.3 Driving load action model

2.4 力学响应

- (1)动孔隙水压力。在车辆荷载经过沥青饱水路面时,会对存在于空隙中的水产生挤压,路面内部则会产生动孔隙水压力。
- (2)水平应力。沥青路面的面层层底弯拉应力作为路面设计的一项重要控制指标,主要目的是控制路面结构的裂缝产生。
- (3)剪切应力。沥青路面结构内部的剪应力值是路面产生鼓包、车辙等危害的主要原因,也作为路面设计的一项重要分项指标。

3 结果与分析

假设车轮荷载边缘与路面结构各层的交点为A、B、C、D、E、F,正弦车轮荷载中心线与路面结构各层的交点为a、b、c、d、e、f(见图3)。笔者对在动荷载作用下的路面结构内部的动孔隙水压力、水平应力以及剪切应力的变化规律进行研究。

3.1 动孔隙水压力

图4为沥青路面各计算点位置不同深度的动孔隙水压力时程变化曲线。

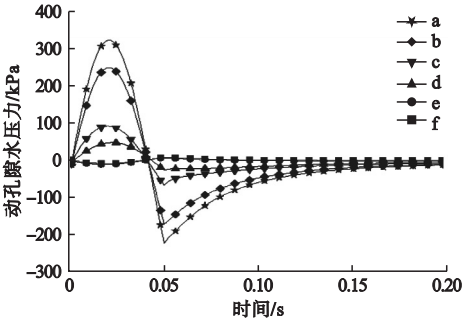


图4 动孔隙水压力随时间变化曲线

Fig.4 Dynamic pore water pressure curves with time

由图4可知,动孔隙水压力具有波的传递性,基于Forchheim非达西渗流定律的动孔隙水压力曲线会随着时间的不断增长出现三个阶段。第一阶段为动孔隙水压力会随着荷载的增加而随之增加,在 $t=0.023\text{ s}$ 时,面层a点的动孔隙水压力达到峰值 332.5 kPa ;第二阶段为动孔隙水压力减小,水再次被吸收进孔隙中;第三阶段为动孔隙水压力会从负值慢慢增大,逐渐趋于平稳,该稳定值称为静水压力。分析各层的计算点时发现,最大正孔隙水压力的最大值在数值上有着较大差别,说明在动荷载作用下,上面层结构内部的动孔隙水压力随着时间的波动较大,中面层次之。

3.2 水平应力

图5为沥青路面各计算点位置不同深度的水平压力时程变化曲线。

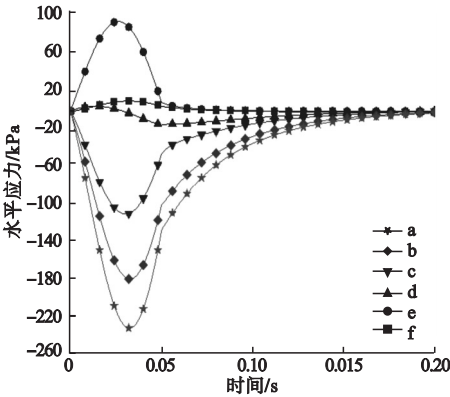


图5 水平应力随时间变化曲线

Fig.5 Curves of horizontal stress with time

从图5可以看出,基于Forchheim非达西渗流定律得到的各点的水平应力,面层表面均出现了一定的压应力,下面层、基层和底基层也出现了不同程度的拉应力,在同一时刻 $t=0.03\text{ s}$ 时,上面层达到压应力最大值 229.8 kPa ,随着路面结构深度的不断增加,各层压应力峰值会逐渐减小,中面层层底压应力最大值为 109 kPa 。随即,下面层层底出现了拉应力,于底基层层底到达拉应力最大值 94.9 kPa 。虽然在一次荷载作用下,上述结构层层底的拉压应力不足以超过材料的容

许拉应力而产生破坏,然而上述结构层的水平正应力状态会由于拉应力和压应力在车轮荷载的反复作用下而来回变换,这样会导致路面结构层出现疲劳破坏,层底产生裂缝,裂缝慢慢向上延伸到面层,最终出现反射裂缝。若不及时进行处理就会有水顺着裂缝进入结构内部,从而加剧沥青路面损害。

3.3 剪切应力

图 6 为沥青路面各计算点位置不同深度的剪切应力时程变化曲线。

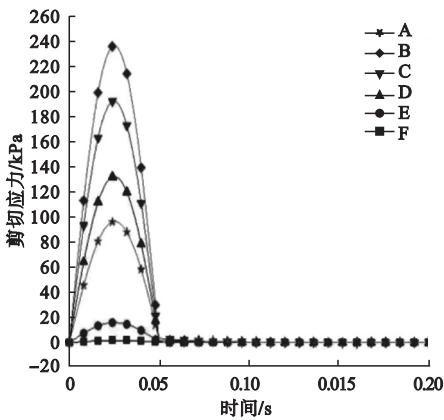


图 6 剪切应力随时间变化曲线

Fig. 6 Variation curves of maximum shearing stress with time

从图 6 可以看出,剪切应力的时程变化趋势与荷载作用的曲线变化趋势相似,均呈现出半正弦的变化形式,随着荷载的不断增大,各点的剪切应力也会随之增加,在荷载达到最大值时,剪切应力亦达到最大值。在 $t = 0.023\text{ s}$ 时,上面层层底出现剪切应力峰值 238.3 kPa ,随着荷载的减小和消散,剪切应力亦逐渐减小至消失。这种现象说明,在沥青路面的面层范围内会产生较大的剪切应力,即使沥青路面在某一次荷载作用下产生的剪切应力不一定会出现剪切破坏,然而在现实情况中,车辆荷载会反复作用,沥青路面的剪切应力会持续处在加载与卸载状态,从而使路面结构出现剪切疲劳破坏,导致裂缝的产生,从而加剧水损害。

4 多因素对沥青饱水路面动孔隙水压力的影响

笔者设计了交互模拟试验,共 3 个影响因素,每个影响因素考虑了 3 个变化量,交互模拟共分为 27 组,分析不同影响因素的交互改变对沥青饱水路面动孔隙水压力的影响。交互模拟试验与动孔隙水压力计算结果见表 2。

表 2 交互模拟试验与动孔隙水压力计算结果

Table 2 Results of interactive simulation test and dynamic pore water pressure calculation			
孔隙率/%	轮载峰值/ MPa	弹性模量/ MPa	动孔隙 水压力/kPa
4	0.7	2 000	335.7
4	0.7	2 200	330.0
4	0.7	2 400	326.1
4	0.9	2 000	429.5
4	0.9	2 200	423.0
4	0.9	2 400	418.8
4	1.1	2 000	524.1
4	1.1	2 200	517.0
4	1.1	2 400	511.7
5	0.7	2 000	334.1
5	0.7	2 200	328.3
5	0.7	2 400	324.7
5	0.9	2 000	427.4
5	0.9	2 200	421.9
5	0.9	2 400	417.1
5	1.1	2 000	522.1
5	1.1	2 200	515.5
5	1.1	2 400	509.6
6	0.7	2 000	332.5
6	0.7	2 200	327.3
6	0.7	2 400	323.3
6	0.9	2 000	425.7
6	0.9	2 200	420.5
6	0.9	2 400	415.3
6	1.1	2 000	520.0
6	1.1	2 200	513.7
6	1.1	2 400	507.4

图 7 ~ 图 9 为根据均值和极差计算得出

各影响因素动孔隙水压力效应图。

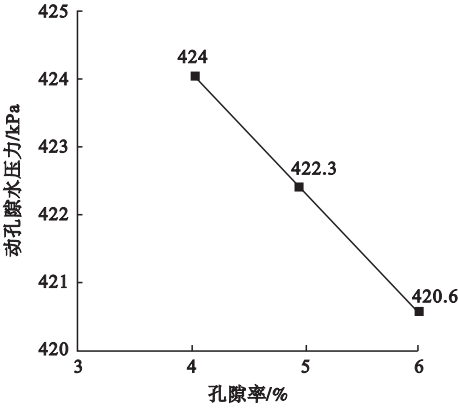


图7 孔隙率对动孔隙水压力的效应图

Fig.7 Effect diagram of porosity on dynamic pore water pressure

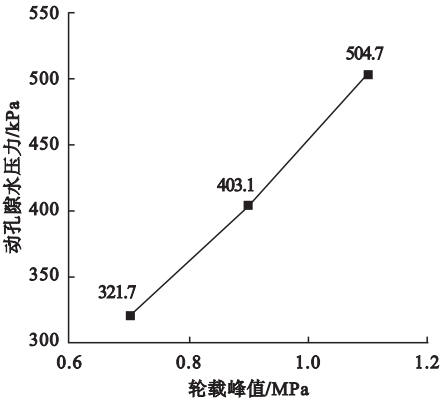


图8 轮载峰值对动孔隙水压力的效应图

Fig.8 Effect diagram of wheel load peak on dynamic pore water pressure

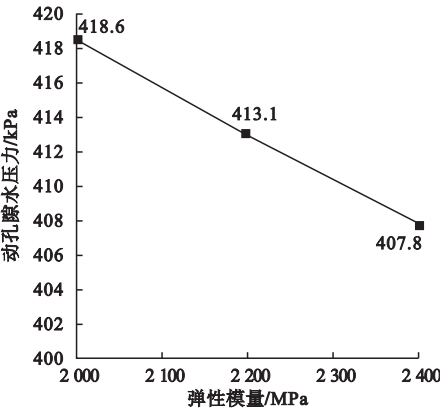


图9 弹性模量对动孔隙水压力的效应图

Fig.9 Effect diagram of elastic modulus on dynamic pore water pressure

由正交实验结果可知:轮载峰值与动孔隙水压力呈正相关,而孔隙率、弹性模量与动孔隙水压力呈负相关;考虑轮载峰值时,沥青饱水路面的最大动孔隙水压力均值增幅最大(56%);轮载峰值的参数敏感性较大,孔隙率与弹性模量的参数敏感性较小。在饱水条件下,沥青混合料动孔隙水压力受轮载峰值影响较大,在其余变量正常的前提下,孔隙率以及弹性模量影响不大。

5 结 论

(1) 基于 Forchheimer 非达西渗流定律下的沥青路面结构内部的动孔隙水压力、水平应力以及剪切应力均在水-荷载耦合作用下呈现出波动的形式。

(2) 在加载过程中,面层内部的水存在反复泵吸的现象,这是由于正负孔隙水压力交替出现,从而出现沥青路面水损害。动孔隙水压力的最大值出现在上面层,非线性渗流对沥青路面上面层的冲刷损害较强,容易造成沥青路面的面层产生弯曲拉伸疲劳损伤以及表面层材料脱落或层间脱粘,若在设计时在面层处加设排水层,可有效抑制水损害的发生。

(3) 由参数交互模拟试验可知,三种变量参数中轮载峰值对动孔隙水压力的影响最大,孔隙率次之,弹性模量最小。因此在设计沥青路面时应着重对暴雨天气情况下的车辆载重进行监管控制以及考虑混合料设计与排水设计。

参考文献

[1] 沙庆林. 高速公路沥青路面主. 要早期破坏的现象、原因和预防[J]. 交通世界, 2004(9): 92-93.
(SHA Qinglin. Phenomena, causes and prevention of main early damage of expressway asphalt pavement [J]. Transportation world, 2004(9): 92-93.)
[2] 郭芳, 谭海洲, 邵腊庚. 基于沥青路面早期水损害的水-荷载耦合 CT 扫描试验和力学响应分析[J]. 公路交通科技, 2014, 31(10): 38-44.

- (GUO Fang, TAN Haizhou, SHAO Lageng. Analysis of CT scanning test and mechanical response of water-load coupling based on asphalt pavement early water damage [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2014, 31(10): 38-44.)
- [3] 罗志刚, 周志刚, 应荣华, 等. 沥青路面水损害浅析与排水处治措施[J]. 湖南交通科技, 2002(4): 47-49.
(LUO Zhigang, ZHOU Zhigang, YING Ronghua, et al. Analysis of asphalt pavement water damage and drainage treatment measures [J]. Human communication science and technology, 2002(4): 47-49.)
- [4] 傅搏峰, 周志刚, 陈晓鸿, 等. 沥青路面水损害疲劳破坏过程的数值模拟分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006(1): 51-58.
(FU Bofeng, ZHOU Zhigang, CHEN Xiaohong, et al. Numerical simulation analysis of water damage fatigue failure process of asphalt pavement [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2006(1): 51-58.)
- [5] KETTIL P, ENGSTRM G, WIBERG N E. Coupled hydro-mechanical wave propagation in road structures [J]. Computers & structures, 2005, 83(21/22): 1719-1729.
- [6] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation [J]. Journal of applied physics, 1941, 12(2): 155-164.
- [7] 董泽蛟, 谭忆秋, 曹丽萍, 等. 水-荷载耦合作用下沥青路面孔隙水压力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007(10): 1614-1617.
(DONG Zejiao, TAN Yiqiu, CAO Liping, et al. Research on pore pressure with in asphalt pavement under the coupled moisture-loading action [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2007(10): 1614-1617.)
- [8] 罗志刚, 周志刚, 郑健龙, 等. 沥青路面水损害分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006(3): 504-509.
(LUO Zhigang, ZHOU Zhigang, ZHENG Jianlong, et al. Analysis of moisture damage of asphalt pavement [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2006(3): 504-509.)
- [9] 崔新壮, 金青. 轮载作用下饱水沥青路面的动力响应[J]. 山东大学学报(工学版), 2008(5): 19-24.
(CUI Xinzhuang, JIN Qing. The dynamic response of saturated asphalt pavement under wheel loads [J]. Journal of Shandong university (engineering science), 2008(5): 19-24.)
- [10] 周长红, 陈静云, 王哲人, 等. 沥青路面动水压力计算及其影响因素分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008(5): 1100-1104.
(ZHOU Changhong, CHEN Jingyun, WANG Zheren, et al. Dynamic numerical method of pore water pressure and its influence parameters for asphalt pavement [J]. Journal of central south university (science and technology), 2008(5): 1100-1104.)
- [11] 祁文洋, 任瑞波, 李美玲. 饱和沥青路面孔隙水压力研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2011, 25(3): 63-66.
(QI Wenyang, REN Ruibo, LI Meiling. Research on pore pressure within saturated asphalt pavement [J]. Journal of Shandong university of technology (Natural science edition), 2011, 25(3): 63-66.)
- [12] 吴国雄, 周宇, 杨锐. 降雨入渗时沥青路面流固耦合作用的力学响应[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(6): 1141-1144.
(WU Guoxiong, ZHOU Yu, YANG Rui. Mechanical response of asphalt pavement under fluid-solid coupling in the case of rainfall infiltration [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2012, 31(6): 1141-1144.)
- [13] 蔡燕霞, 申爱琴, 郭寅川, 等. 沥青混合料动水破坏行为与动力渗水试验模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(2): 13-18.
(CAI Yanxia, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan, et al. Dynamic water damage behavior and dynamic seepage test for asphalt mixture [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2015, 35(2): 13-18.)
- [14] FORCHHEIMER P. Wasser bewegun durch boden [J]. Zeitscheift des vereines deutscher ingenieure, 1901, 45: 1782-1788.
- [15] 中交公路规划设计院. 公路沥青路面设计规范: JTG D50—2006 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
(CCCC Highway Planning and Design Institute. Specifications for design of highway asphalt pavement: JTG D50—2006 [S]. Beijing: China Communications Press, 2006.)
- [16] 耿树泽. 沥青路面渗流场-应力场耦合作用分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(7): 69-72.
(GENG Shuze. Analysis on coupling action of seepage field and stress field of asphalt pavement [J]. Maintenance construction and machinery, 2013, 30(7): 69-72.)
- [17] 邓融. 水和荷载耦合作用下沥青路面动力响应研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
(DENG Rong. Study on dynamic response of asphalt pavement under coupling action of water and load [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)