

道路表面动水压力的计算和分析

董强柱¹,李彦伟²,石 鑫²,李志勇³

(1. 长安大学 公路养护装备国家工程实验室,陕西 西安 710064; 2. 石家庄市交通运输局,
河北 石家庄 050051; 3. 重庆交通大学 土木建筑学院,重庆 400074)

摘 要:针对雨天行车轮胎所产生的动水压力易导致水损害和车辆打滑的问题,运用计算流体力学理论建立路表径流条件下的道路-轮胎有限元模型,采用 $k-\epsilon$ 模型解析紊流闭合方程,VOF 模型解析两相流的水流自由表面流动,SIMPLE 算法对模型计算域内有限体积中速度-压力的耦合进行离散化,计算了不同轮胎花纹深度、水膜厚度和行车速度下的动水压力,并预测了不同条件下车辆出现“水漂”的临界行车速度。计算结果表明:随着水膜厚度的增加,轮胎所受的动水压力持续增长;当水膜厚度小于花纹深度时,动水压力随车速增长缓慢,当水膜厚度大于花纹深度时,动水压力与车速近似为线性关系;对于小型轿车,路表水膜厚度为 8 mm 时,车速为 145 km/h 时可出现“水漂”现象,水膜厚度为 12 mm 时,出现“水漂”的车速降低为 133 km/h。

关键词:道路工程;动水压力;计算流体力学;有限元

中图分类号:U416.14 **文献标志码:**A

Calculation and analysis of hydrodynamic pressure on road surface

DONG Qiang-zhu¹, LI Yan-wei², SHI Xin², LI Zhi-yong³

(1. National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Equipment, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shijiazhuang Transportation Bureau, Shijiazhuang 050051, Hebei, China;
3. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Aimed at the fact that hydrodynamic force caused by tires is the main reason for water-damage of asphalt mixture and skid of vehicle in rainy condition, a finite element model of road surface and tires in runoff on road surface was founded using CFD technique; the $k-\epsilon$ model was used to solve the turbulence closure equations; the free surface flow of water in two-phase flow was solved by using VOF option; and the discretization of pressure-velocity coupling for the finite volumes in the domains was computed using SIMPLE algorithm. At last, hydrodynamic force was calculated under different tire tread depths and water film depths and running speeds and the speed for hydroplaning was forecasted in different conditions. The results indicate that the hydrodynamic force increases gradually with the thickness of water film; the hydrodynamic force increases slowly when the water film thickness is less than tread depth of tire, and the linear relationship between hydrodynamic force and speed occurs; to a car, hydroplaning will occur when the thickness of water film is 8 mm and the speed of car reaches 145 km/h; while the thickness of water is 12 mm, the speed for hydroplaning will fall to 133 km/h. 1 tab, 6 figs, 11 refs.

Key words: road engineering; hydrodynamic pressure; computational fluid dynamics; finite element

0 引言

雨天行车,路表水流会被车轮轮胎渠化,当水流厚度过大或车速过快时,“渠”内排水不及时,在轮胎和路表间会形成动水压力^[1-2]。在整个接触长度范围内,相对车辆而言分 3 个阶段:水流迎面接触到车轮轮胎和路面为第 1 阶段;第 2 阶段为形成“水楔”的过渡段,车辆处于薄层水流上;第 3 阶段为轮胎和路面完全接触段。动水压力的形成主要在第 2 阶段^[3]。当动水压力达到足够大时,会将车轮抬离路面,即第 3 阶段完全消失,等于车轮在水面上行驶。因水流不提供任何剪切力,使车辆失去动力,驾驶人失去对车辆的控制^[4-5]。此种情况对行车安全是非常有害的。

动水压力的大小与水膜厚度、车速、轮胎形式等因素有关。中国不乏针对路面动水压力的研究,但多是针对单一因素,对上述几种因素综合作用下动水压力的研究较为少见。因此,鉴于问题的复杂性,本文采用数值模拟的方式(CFD 技术)对不同轮胎花纹深度、水膜厚度和行车速度下的动水压力进行研究,建立动水压力与 3 个因素之间的多元回归模型,并对不同条件下车辆出现“水漂”的临界车速进行预测,为中国沥青路面水损害研究工作提供一定的参考依据^[6-9]。

1 有限元模型与求解

1.1 有限元模型

选用 CFD 技术中的 FLUENT 软件来进行数值模拟,建立模型如图 1 所示。

该轮胎模型的 3 种花纹深度分别为 7、4、1 mm,以代表新胎、中度磨损的轮胎和严重磨损的轮胎。模型中对轮胎施加的荷载为 4 000 N(假设车辆加乘客的总质量为 1.6 t),轮胎气压为 250 kPa。对模型进行四面体网格划分,共生成 1 843 222 个单元体。由于轮胎花纹的几何复杂性,在花纹与路面接触的区域,软件自动用三棱柱代替四面体进行网格划分。

1.2 边界条件和初始条件

为解决 CFD 问题,在区域的进口及出口处采用

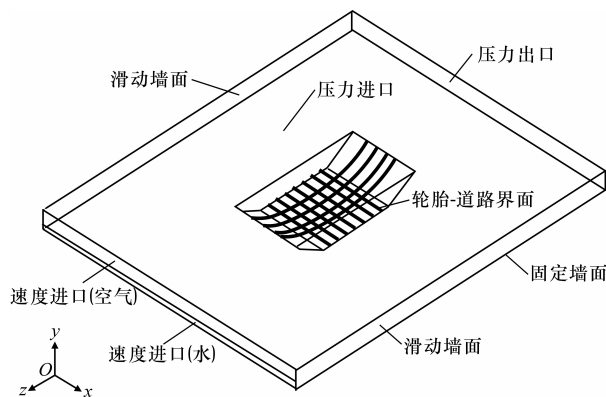


图 1 动水压力计算模型

Fig. 1 Calculation model for hydrodynamic pressure

了真实的边界条件。由于全部模型的坐标系统都位于轮胎的轴线上,轮胎模型是锁定的,空气和水以汽车行驶的速度流向轮胎,因此使用固定的结构解决问题相对较为容易。

计算流域内的边界条件如图 1 所示。由于引入两相流来解决问题,因此,在进口处有 2 个区域,它们有着相似的边界条件,只是一个为水进口,一个为空气进口。从较低处的边界到一个特定高度(如 8 mm 或 12 mm)的部分为水的速度进口,其余部分为空气的速度进口^[10]。

为解决水流的自由表面问题,在初始化流量之前,水流量区域的容量以全部水流量来确定,水膜以上部分全部以空气填充,以保证此部分全部由空气流过。整个计算域的计算高度保持不变。采用 3 种计算速度,分别是 60、90、120 km/h。

轮胎后部的出口定义为一个标准大气压的压力出口,计算域的上表面同样定义成标准压力出口,以保持和大气相通。路面转化成墙壁边界条件。平行于轮胎侧壁且远离轮胎轴线的边定义成理想墙壁,即不产生摩擦力的墙壁,这样做的目的是使此边对流动不产生任何影响。

1.3 解算器

质量、动量和能量的守恒是基本控制方程,轮胎周围的水和空气流动被假设成不可压缩,流动属于完全紊流状态,且其雷诺数大于 10^5 数量级,由此可知它们的密度是常数。解算器采用分离式解算器。按此方法,控制方程按顺序被分别解算。计算时,使用流量值和压力值修正速度场,并按此解算动量方

程。然后,采用压力校正方程以获得必要的压力、速度、紊流场及流量的校正值,并使其满足连续方程。用通用的 $k-\epsilon$ 模型解算紊流闭合方程,两相流的水流自由表面流动采用 VOF 模型解算。计算域内有限体积中速度-压力耦合的离散化采用 SIMPLE 算法。

2 计算结果及讨论

2.1 轮胎周围的分相

由图 2 可以看出,水流在轮胎前产生了正激波,因流动取决于接触区域及轮胎侧壁的尺寸,因此水流开始在轮胎的最前沿处分离,也就是说,提升力仅仅在轮胎的前半部分产生,在轮胎中心处生成了最大的提升力,并且在轮胎的侧壁处不会产生过大的提升力。这种接触类型不会允许过多的水流经过轮胎侧壁处,因此,加大接触面积,可有更大的宽度来分布水压力,从而削弱提升力。由此可见,加宽车胎可使动水压力变小,但会使受动水压力的路面面积增大。在紧邻轮胎后部的部分保持干燥,形成了空气通道。

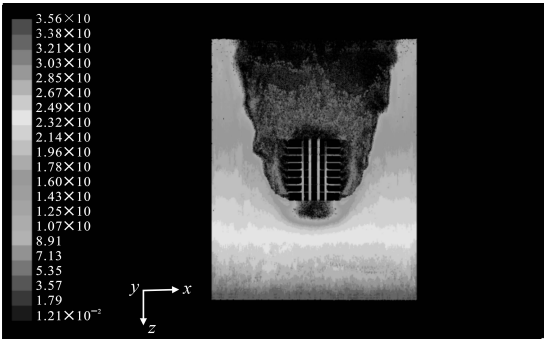


图 2 轮胎周围相分布

Fig. 2 Phase map around tire

2.2 压力分布

图 3 为水膜厚度 h_w 为 1.2 cm、车速 V 为 90 km/h 时,轮胎周围的压力分布。

由图 3 可以看出,压力出现在胎前水流不能溢出的区域。由于轮胎的纵向花纹,水流被花纹所渠化,压力降低。当车辆速度增加时,压力亦随之增加,水深增加时,压力进一步增加。在轮胎的前沿处,动水压力开始增加,当超过轮胎中心轴线后,压力开始减速,直至标准大气压力。当水深值较大时,胎面后部压力略有减小,在轮胎后沿,压力减至标准大气压。但当车速过快时,在轮胎后部会出现负的低压,形成抽吸作用,使水流冲刷沥青混合料,造成

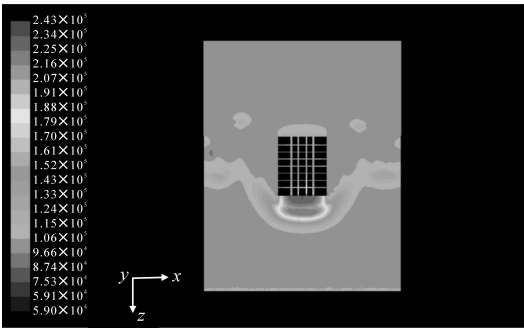
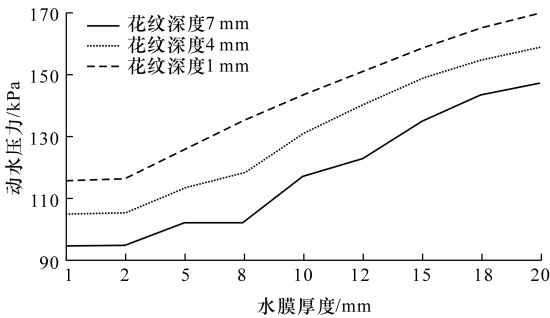


图 3 动水压力分布

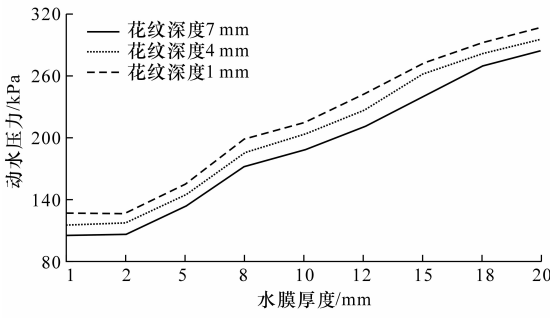
Fig. 3 Hydrodynamic pressure distribution
混合料出现剥落现象^[11]。

2.2.1 水膜厚度对动水压力的影响

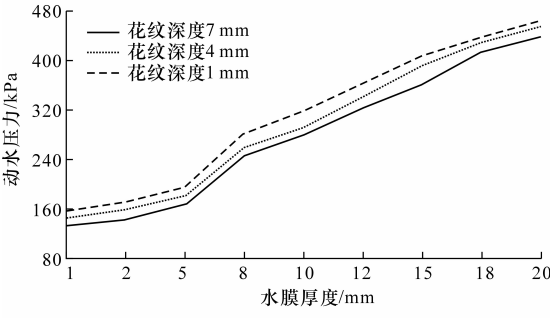
从图 4 可以看出:



(a) 行车速度 60 km/h



(b) 行车速度 90 km/h



(c) 行车速度 120 km/h

注:图中为方便绘制,横坐标未按比例标注。

图 4 3 种车速下动水压力与水膜厚度的关系

Fig. 4 Relationship between hydrodynamic pressure and water film thickness under three speeds

(1)随着水膜厚度的增加,轮胎所受的动水压力持续增长,其关系曲线在花纹深度尺寸附近产生改变。

(2)当水膜厚度小于花纹深度时,动水压力增长缓慢,当水膜厚度大于花纹深度时,动水压力与水膜厚度近似为线性关系。

原因分析:当水膜厚度较小时,轮胎花纹能够及时将水排出,轮胎前端没有产生雍水,轮胎沟槽内动水压力较小,胎面与路面存在良好接触;随着水膜厚度的增加,同一时间内通过轮胎花纹过水断面的水量加大,导致轮胎不能及时将积水排出,由此产生较大的动水压力。

2.2.2 行驶速度对动水压力的影响

从图 5 可以看出:

(1)当水膜厚度远小于轮胎花纹深度($h_w = 2\text{ mm}$),车辆以正常速度($V \leq 120\text{ km/h}$)行驶时,动水压力增长缓慢,轮胎花纹排水效果明显。

(2)当水膜厚度与轮胎花纹深度差别不大($h_w = 5\text{ mm}$)时,由于轮胎的阻挡,轮胎前段形成一条与行驶方向几乎平行的速度界限,影响轮胎后部排水速度。此时,轮胎花纹已不能完全将积水排出,轮胎前端发生雍水现象,使得动水压力增大、沟槽内水流速度下降,动水压力与车速已逐渐转化为线性关系,花纹较浅的轮胎已经丧失排水能力,导致动水压力增长幅度加快。

(3)当水膜厚度远大于轮胎花纹深度时($h_w = 10.15\text{ mm}$),轮胎前端的雍水现象更加明显,动水压力迅速增大,轮胎前端的速度界限由于轮胎的阻挡则向后偏移,其偏移量随着速度的增大而增大,动水压力与车速已成为线性关系;当车速达到 75 km/h 左右时,中度磨损的轮胎也丧失排水能力,3 种花纹轮胎的排水性能差异更为显著。

2.2.3 动水压力影响因素的多元回归分析

由于行驶速度、水膜厚度和轮胎花纹深度对动水压力有很大影响,而且上述因素之间有很好的相关关系,因此可以通过行驶速度、水膜厚度、轮胎花纹深度与动水压力之间的关系,建立四者的多元回归模型。

假设上述 3 个因素与动水压力呈线性关系,即

$$P=b_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_3 \tag{1}$$

通过对试验中的 351 组数据进行多元线性回归

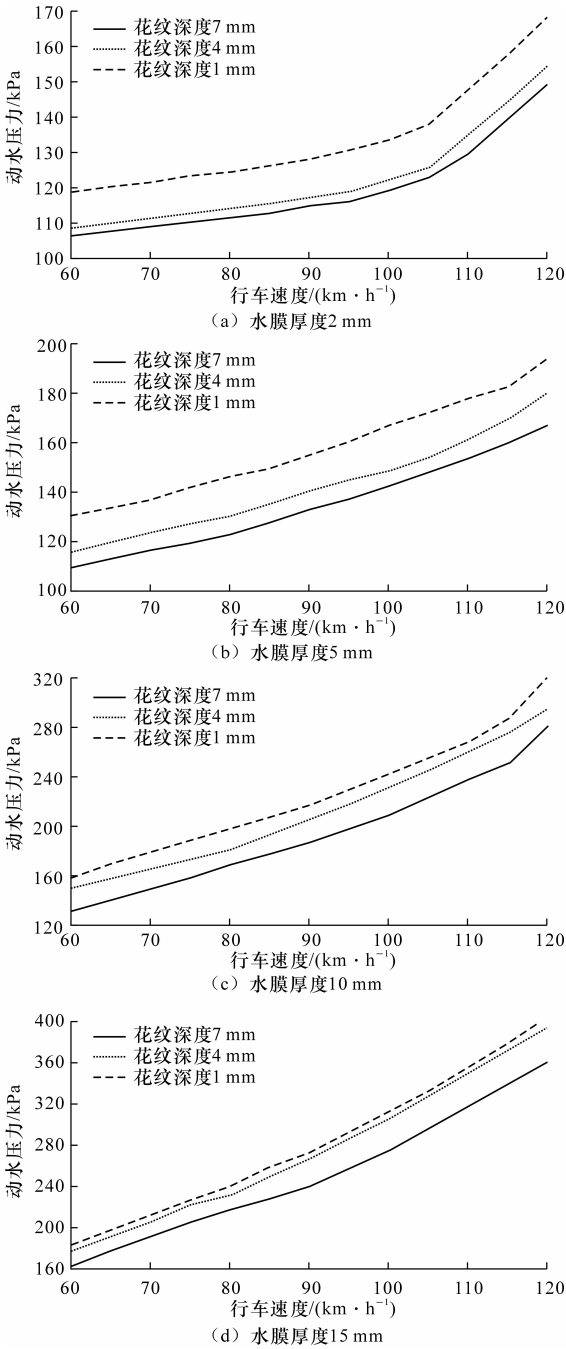


图 5 不同水膜厚度下动水压力与车速的关系

Fig. 5 Relationship between hydrodynamic pressure and speed under different water film thickness

分析,求得回归系数的估计值 $\hat{\beta}^T$

$$\hat{\beta}^T=(\hat{\beta}_0,\hat{\beta}_1,\hat{\beta}_2,\hat{\beta}_3)=(-84.686,2.26,9.437,-0.9996) \tag{2}$$

因此多元样本线性回归方程为

$$\hat{y}=-84.686+2.26x_1+9.437x_2-0.9996x_2 \tag{3}$$

式中: $\hat{\beta}_0,\hat{\beta}_1,\hat{\beta}_2,\hat{\beta}_3$ 分别为待定系数 b_0,a_1,a_2,a_3 的估计值; \hat{y} 为动水压力 P ; x_1 为车辆行驶速度 V ; x_2

为道路水膜厚度 h_w ; x_3 为轮胎花纹深度 h_t ; R^2 为判定系数。

因此,式(3)可以改写为

$$P = -84.686 + 2.26V + 9.437h_w - 0.9996h_t \quad (R^2 = 0.9329) \tag{4}$$

对式(4)进行显著性检验,行车速度、水膜厚度、轮胎花纹深度对动水压力的线性影响在显著水平为 0.01 下是显著的。

对上述 3 个因素进行主成分分析评价,结果表明行车速度对动水压力的影响最为明显(贡献率为 48.43%),水膜厚度和轮胎花纹深度对动水压力的影响几乎相同(贡献率分别为 25.82%和 24.07%)。因此,仅靠改变轮胎花纹深度以避免滑水的方法效果不理想。

2.3 提升力与“水漂”临界车速

将沿 z 方向轮胎表面的投影面积上的压力进行合并,可以得到作用于轮胎的提升力。取轮胎花纹深度 7 mm,当水膜厚度为 8 mm 和 12 mm 时,不同车速下的提升力如表 1 和图 6 所示。

表 1 轮胎提升力计算结果
Tab. 1 Lifting force of tire

行车速度/(km·h ⁻¹)	不同水膜厚度(mm)下的提升力/N	
	8	12
60	702	835
90	1 563	1 863
120	2 934	3 396

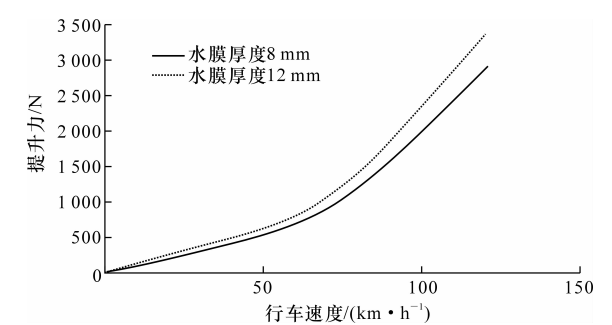


图 6 车辆“水漂”临界车速预测

Fig. 6 Prediction for hydroplaning critical speed

从表 1 和图 6 可以看出:当车速增加时,轮胎提升力增大;当水膜厚度加大时,提升力加大。因此在降雨量较大时,应降低车速以避免出现“水漂”现象。另外,未在表 1 中列出的计算结果表明,轮胎花纹深度减小,提升力会增加,说明在同样的条件下,磨损过的轮胎更容易出现“水漂”现象。

当提升力等于 4 000 N 时,即可发生“水漂”现象。通过对 60、90、120 km/h 车速条件下提升力的计算,可看出车速和提升力呈抛物线关系,通过差值即可确定出“水漂”的临界车速。结果表明:当水膜厚度为 8 mm 时,“水漂”车速为 145 km/h,水膜厚度为 12 mm 时,“水漂”车速 133 km/h。研究还表明,轮胎花纹深度越小,出现“水漂”的车速越低,同时也应注意到水膜厚度的增加会降低打滑车速,即水膜厚度加大,“水漂”车速降低。

3 结 语

(1)采用数值模拟方法(CFD)建立了动水压力计算模型,研究了不同轮胎花纹深度、水膜厚度和行车速度下的动水压力,得出水膜厚度和行驶速度对动水压力的影响规律。

(2)对行车速度、水膜厚度和轮胎花纹深度对动水压力的影响进行了多元回归,得出 3 个因素的影响贡献率由大到小为:行车速度、水膜厚度、花纹深度,其中水膜厚度和花纹深度贡献率差别较小。

(3)预测了不同水膜厚度下的“水漂”临界车速,为交通管理部门提供了雨天行车的限速依据,亦可为后续分析沥青路面的水损害提供基础数据。

参考文献:

References:

[1] Moore D F. The friction of pneumatic tires[M]. Amsterdam;Elsevier Scientific Publishing Company,1975.

[2] 李少波,张宏超,孙立军. 动水压力的形成与模拟测量[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007,35(7):915-918.

LI Shao-bo,ZHANG Hong-chao,SUN Li-jun. Development and simulation measurement of dynamic hydraulic pressure[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2007,35(7):915-918. (in Chinese)

[3] 罗苏平,但汉城,李 亮,等. 移动交通荷载下饱和沥青路面的水力耦合分析[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2012,40(2):104-111.

LUO Su-ping,DAN Han-cheng,LI Liang,et al. Coupled hydro-mechanical analysis of saturated asphalt pavement under moving traffic loads[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition,2012,40(2):104-111. (in Chinese)

[4] 季天剑,高玉峰,陈荣生. 轿车轮胎动力滑水分析[J].

交通运输工程学报,2010,10(5):57-59.

Ji Tian-jian, GAO Yu-feng, CHEN Rong-sheng. Dynamic hydroplaning analysis of car tire[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(5): 57-59. (in Chinese)

- [5] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉. 部分滑水对路面附着系数的影响[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(4): 10-12.

Ji Tian-jian, HUANG Xiao-ming, LIU Qing-quan. Part hydroplaning effect on pavement friction coefficient [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 10-12. (in Chinese)

- [6] Isam J, Ali R, Vincent E. Towards free surface hydroplaning over a loaded tire[C]//Computational Fluid and Solid Mechanics. First MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics. Amsterdam: Elsevier Press, 2001: 1250-1253.

- [7] 魏江波. 浅碟式拦水带施工技术[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10): 93-95.

WEI Jiang-bo. Construction technology of shallow-dish dike[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(10): 93-95. (in Chinese)

- [8] 李卫华. 高速公路给排水网络设计[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10): 182-184.

LI Wei-hua. Design of water supply and drainage network for expressway [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(10): 182-184. (in Chinese)

- [9] 吕应臣. 考虑水渗透的路基稳定可靠性简化算法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10): 223-226.

LU Ying-chen. Simplified algorithm of road bed stability reliability considering water penetration [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(10): 223-226. (in Chinese)

- [10] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉, 等. 道路表面水膜厚度预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(3): 1-3.

Ji Tian-jian, HUANG Xiao-ming, LIU Qing-quan, et al. Prediction model of rain water depth on road surface [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 1-3. (in Chinese)

- [11] 李志勇, 王江帅, 李彦伟. 道路防排水技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

LI Zhi-yong, WANG Jiang-shuai, LI Yan-wei. The general technique to protect and drain water on road [M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)

(上接第 16 页)

参考文献:

References:

- [1] 周庆华. 高模量沥青混凝土性能与路面结构研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.

ZHOU Qing-hua. Study on performance and pavement structure of high modulus asphalt concrete[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)

- [2] 廖公云, 黄晓明. ABAQUS 有限元软件在道路工程中的应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008.

LIAO Gong-yun, HUANG Xiao-ming. The application of ABAQUS finite element software in road engineering [M]. Nanjing: Southeast University, 2008. (in Chinese)

- [3] 胡小弟, 孙立军, 刘兆金. 沥青路面非均布荷载下层间接触条件不同时力学响应的三维有限元分析[J]. 公路交通科技, 2003, 20(3): 1-4.

HU Xiao-di, SUN Li-jun, LIU Zhao-jin. Stress response analysis of asphalt pavement with different interlayer touch types under non-uniform distributed tire pressure through 3d finite element method[J]. Journal

of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(3): 1-4. (in Chinese)

- [4] 黄菲. 沥青路面永久变形数值模拟及车辙预估[D]. 南京: 东南大学, 2006.

HUANG Fei. Permanent deformation simulation and rutting depth prediction of asphalt pavement[D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)

- [5] 苏凯, 孙立军. 车辙等效温度确定方法探讨[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(增1): 162-167.

SU Kai, SUN Li-jun. Discussion of methods for determining effective temperature of rutting [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(S1): 162-167. (in Chinese)

- [6] 张志清, 傅海滨, 李东辰. 防止沥青路面车辙产生的结构设计参数分析[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(5): 475-479.

ZHANG Zhi-qing, FU Hai-bin, LI Dong-chen. The analysis of control parameter of structure design for preventing the rut of bituminous pavement [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(5): 475-479. (in Chinese)