doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.011

带裂缝桥面铺装内部动水行为仿真模拟

万晨光, 申爱琴, 王德强

(长安大学 公路学院,西安 710064)

摘 要: 为了解带裂缝桥面铺装在内部动水压力作用下的力学响应情况,采用 LS-DYNA 有限元分析软件,建立沥青铺装层内部饱水裂缝模型,施加车辆正弦动态荷载,对内部动水行为进行流固耦合仿真模拟分析. 结果表明:车辆动载作用下,饱水微裂缝所受最大压、剪应力均位于裂缝尖端,而最大拉应力则位于裂缝周围;饱水裂缝尖端最大压、剪应力与车速和荷载水平都有很好的线性相关性,在 120 km/h 速度、1.5 MPa 荷载水平下, X、Y 向最大压应力和最大剪应力分别达到 0.472、1.101、0.361 MPa,在如此大应力反复作用下微裂缝将迅速扩展,加速铺装结构破坏. 导致沥青铺装层内饱水微裂缝扩展、恶化的最主要因素是车辆的超载,交通管理部门应严格限制超载超限车辆的上路.

关键词: 桥面铺装;水损害;裂缝;动态荷载;内部动水压力

中图分类号: U443.33 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2016)09-0060-05

Dynamic water behavior simulation of bridge deck pavement with cracks

WAN Chenguang, SHEN Aiqin, WANG Deqiang

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to figure out the mechanical response of bridge deck pavement with cracks, under internal dynamic water pressure, using the LS-DYNA finite element analysis software, a model of asphalt pavement with crack was established to analyze the stress state of crack. The results showed that under the action of vehicle dynamic load, the maximum pressure and shear stress of the micro cracks are located at the crack tip, while the maximum tensile stress is located around the crack; the maximum pressure and shear stress have a good linear correlation with the vehicle speed and load level, in the case of 120 km/h velocity and 1.5 MPa load level, the maximum X direction, Y direction pressure and shear stress respectively reach to 0.472 MPa, 1.101 MPa and 0.361 MPa, under which micro cracks will expand rapidly. The main factor leading to the expansion of the water filled micro cracks in asphalt pavement is the overloading of vehicles, so the traffic management department should strictly limit the overloading of vehicles.

Keywords: bridge deck pavement; water damage; crack; dynamic load; internal dynamic water pressure

水泥混凝土桥桥面铺装典型结构由水泥混凝土调平层、防水粘结层和沥青铺装层组成[1]. 近年来,随着车速的普遍提高和货车载重量的增加,由水引起的早期病害在桥面铺装常见病害中所占比重越来越大[2-3]. 桥面铺装水损害,主要是指桥面铺装表面自由水在车辆荷载作用下产生动水压力,并逐步穿透集料表面沥青膜,导致沥青膜从集料表面脱落、集料间丧失粘结力,或者水分直接渗入调平层,腐蚀调平层配筋而产生破坏的过程[4]. 铺装结构上动水行为有两种方式[5]:一是铺装层表面自由水在车辆荷载作用下产生的表面动水压力;二是通过空隙或裂缝渗入铺装层内部的自由水,在车辆荷载作用下产生内部动水压力,两种方式同时作用,加速铺装结构破坏.

关于动水压力的试验测定,目前还没有一种准确、规范且被广泛应用的方法,相关研究主要采用有限元法[6]. 同时,现阶段关于桥面铺装动水行为的研究,主要集中在表面动水压力以及结构层层间动水压力[6-7],对于沥青铺装层内部动水行为还鲜有研究. 为此,本文将在铺装结构内部动水压力破坏机理及影响因素分析的基础上,采用 LS-DYNA 有限元分析软件,建立桥面铺装沥青铺装层内部饱水裂缝模型,对内部动水行为进行流固耦合仿真模拟.

收稿日期: 2015-07-20

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(310821165004)

作者简介: 万晨光(1988—),男,博士研究生;
申爱琴(1957—),女,教授,博士生导师

通信作者: 万晨光,610510686@qq.com

1　内部动水压力作用机理及影响因素

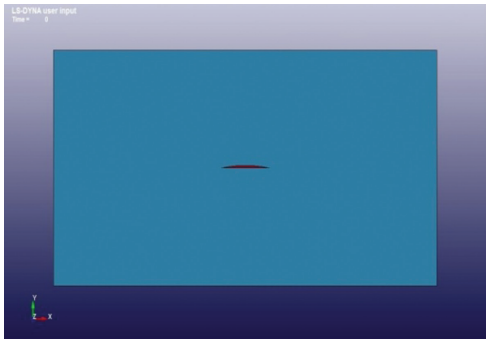
已有研究[4,8-9]成果表明，内部动水压力对铺装结构的破坏作用远大于表面动水压力. 表面动水压力的作用更多体现在将表面自由水，通过空隙或微裂缝压入铺装结构内部，然后在内部动水压力的作用下使沥青铺装层相继出现斑状泛油、内部松散、开裂、坑槽等病害[10]. 内部动水压力首先会击穿集料表面的沥青膜，造成沥青结合料与集料的粘附性降低，严重时甚至从集料表面剥落而成为自由沥青在水中自然上浮，自由沥青在车辆轮胎经过和离开时产生的冲刷和真空抽吸作用下[10]，逐渐向铺装结构表面迁移、积聚并形成斑状泛油现象.

随着自由沥青的向上迁移，沥青铺装层内部集料间的粘结力、沥青混凝土强度都会逐渐降低，且泛油越严重，粘结力与强度的丧失就越多. 此时，在车辆荷载以及温度荷载的作用下，铺装结构内部松散或表面开裂就出现了. 铺装结构内部松散的发生使沥青铺装层的有效厚度减小，降低了桥面铺装的整体抗力. 随着内部松散的继续发展，沥青铺装上层会出现裂块很小的开裂，开裂进一步加快了沥青铺装下层的松散进程，并最终导致沥青铺装层出现坑洞. 所以，沥青铺装层出现的斑状泛油、内部松散、开裂和坑洞是一个完整的水损害过程，这是动水压力没有穿透沥青铺装层时的情况. 当沥青铺装层存在贯穿裂缝或整体空隙率太大时，动水压力将穿透整个沥青层到达混凝土调平层表面，当调平层因为干缩或温缩而存在裂缝时，水会进入调平层并腐蚀调平层钢筋，进而使调平层产生更大的开裂. 同时，动水压力对调平层的冲刷作用还会带走部分细料，在车辆轮胎过后的抽吸作用下细料被带至表面形成泛白病害，影响汽车驾驶员的观感. 国内外基于多孔介质理论的研究发现，车速和荷载是影响路面结构内部孔隙水压力的最主要因素[4,7]. 因此，本文着重分析车速和荷载对铺装结构内部动水压力的影响.

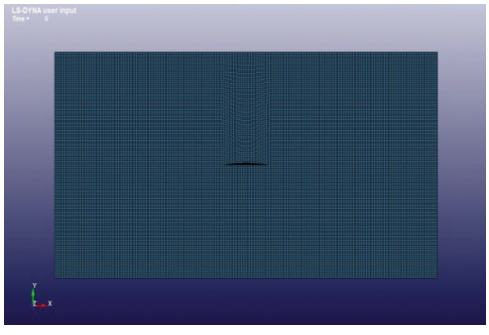
2　模型的建立及参数的设置

2.1　模型及边界条件

本文运用 LS-DYNA 有限元分析软件，对存在于沥青铺装上层中部的饱水裂缝建立二维有限元模型，微裂缝长度取为 0.008 m，与水平方向倾角为 10°，采用 ALE(arbitrary La-grangian-Eulerian) 流固耦合方法进行分析. 由于裂缝尺寸微小，为了尽可能减小模型边界条件对计算结果的影响，经各方面综合考虑及试算[6]，将模型尺寸取为 0.1 m×0.04 m. 模型中，水和沥青铺装上层材料均采用实体欧拉单元，同时采用 * MAT_NULL 空白材料模型来模拟动水压力的作用. 沥青铺装及裂缝模型如下图 1 所示.



(a)划分网格前



(b)划分网格后

图 1　裂缝分析模型及网格划分

Fig.1　Fracture analysis model and mesh generation

计算时，模型中的自由水选用 Gruneisen 状态方程，水压力方程为

$$P=(\gamma_0+\alpha\mu)E+\frac{\rho_0C^2\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_0}{2}\right)\mu-\frac{\alpha}{2}\mu^2\right]}{\left[1-(s_1-1)\mu-s_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-s_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}\right]}. \tag{1}$$

式中：C 为 u_s-u_p 曲线截距，在此取 $C=1\ 480$ m/s；s_1、s_2、s_3 为 u_s-u_p 曲线斜率系数，分别取 $s_1=2.56$，$s_2=-1.986$，$s_3=0.226\ 8$；γ_0 为 Gruneisen 常数，取 $\gamma_0=0.50$；α 为 γ_0 一阶体积修正；$\mu=\rho/\rho_0-1$；$E=2.859\times10^{-6}$[11].

模型中沥青铺装层密度取 2 400 kg/m^3，厚度为 4 cm，弹性模量取 1 400 MPa，泊松比取 0.25，模型中各材料单元均采用 Plane162. 模型边界条件设置为：左右两侧边界无约束，下边界为全约束，即认为沥青铺装下层、混凝土调平层和桥面板对裂缝区域受力无影响，而模型上边界施加均布车辆荷载[6].

2.2　车辆动态荷载描述

目前，对于桥面铺装结构的受力分析多以静荷载为主，而实际情况则是在车辆行驶过程中，铺装结

构表面的不平整会使车辆轮胎对铺装结构产生振动冲击作用,进而使轮胎的接地压力瞬间增大,加速铺装结构的破坏. 黄立葵等[12]对车辆动荷载进行了深入研究,建立了荷载与平整度、车速的关系,并提出了动荷系数的概念,其计算公式为

$$D = a\sqrt{v} + 1. \tag{2}$$

式中: D 为动荷系数; v 为车速,km/h; a 为表征路表平整度的量,新建路面取 $a = 0.035$.

为了尽可能真实的模拟车辆动荷载的作用,本文应用稳态正弦波动荷载来表征车辆动态荷载,计算公式为

$$p_t = p_{\max}\sin(\pi\frac{t}{T}). \tag{3}$$

式中: p_t 为不同时刻的车辆荷载,MPa; $p_{\max}$ 为动荷载峰值,MPa,由 $p_{\max} = p \cdot D$ 来确定,其中 p 为静荷载; T 为荷载作用周期,s,由 $T = 12R/v$ 来确定,其中 R 为轮胎接地等效圆半径, v 为车速,60、80、100、120 km/s车速所对应的荷载作用周期分别为0.076、0.057、0.046、0.038 s. 不同静荷载条件下的荷载峰值见表 1 所示.

表 1 不同静载条件下的动载峰值

Tab.1 Peak value of dynamic load under different static load conditions

车速/(km · h^{-1})	$p_{\max}$/ MPa				
	0.7 MPa	0.9 MPa	1.1 MPa	1.3 MPa	1.5 MPa
60	0.889	1.143	1.397	1.651	1.905
80	0.917	1.179	1.441	1.703	1.965
100	0.945	1.215	1.485	1.755	2.025
120	1.001	1.287	1.573	1.859	2.145

3 流固耦合计算结果分析

根据前文建立的流固耦合模型、设置的边界条件以及施加的动态荷载,分别在不同车速、不同荷载条件下,对沥青铺装层中的微裂缝进行受力分析. 以标准荷载 0.7 MPa、速度 100 km/h 为代表,图 2~4 为模型的应力分布云图.

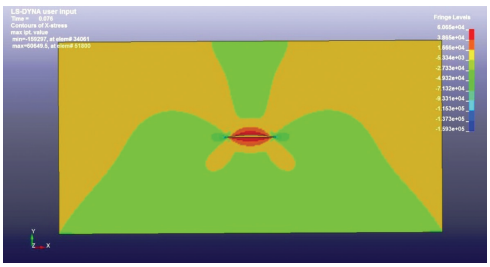


图 2 X 方向拉应力分布云图

Fig.2 Distribution of tensile stress in X direction

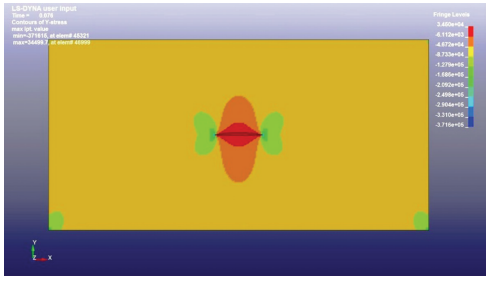


图 3 Y 方向拉应力分布云图

Fig.3 Distribution of tensile stress in Y direction

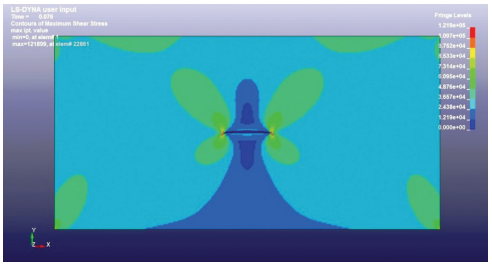


图 4 剪应力分布云图

Fig.4 Distribution of shear stress

由应力分布云图可知, 车辆动载作用下,当铺装结构内部存在微裂缝时,裂缝周围及尖端部位将出现应力集中现象;铺装结构 X、Y 向最大拉应力出现在裂缝上下部,最大压应力和最大剪应力则均出现在裂缝尖端部位,这些力均有将微裂缝进一步撕裂、使裂缝增宽、增长的趋势. 同时,裂缝尖端 4 个单元的受压情况与动载的变化情况密切相关,其中尚未开裂的两个单元所受 X、Y 向压应力远大于已开裂的两个单元,这说明尚未开裂两个单元极有可能被撕裂而使裂缝进一步扩大.

以上分析是在代表荷载和代表车速下进行的,为了进一步分析车速、荷载对铺装结构受力的影响,下面分别在不同车速、不同荷载条件下对模型的受力情况进行分析. 不同条件下裂缝尖端 X、Y 向最大压应力如图 5 所示.

由图 5 可知, 不同速度下,随着静荷载的增加, X、Y 向压应力均呈线性规律增加, 以 100 km/h 速度下的压应力为例,1.5 MPa 静荷载下 X、Y 向压应力分别为 0.461、1.075 MPa,较 0.7 MPa 下的 0.215、0.502 MPa分别增加了 114%、115%;当静荷载一定时,压应力同样随着速度的增加而增加,以 1.3 MPa 静荷载下压应力为例,120 km/h 速度下 X、Y 向压应力分别为 0.409、0.954 MPa,较 60 km/h 下的 0.376、0.877 MPa 分别增加了 9%、8%. 二者相比,静荷载对压应力的影响更大,因此要严格控制超载、超限车辆的通行.

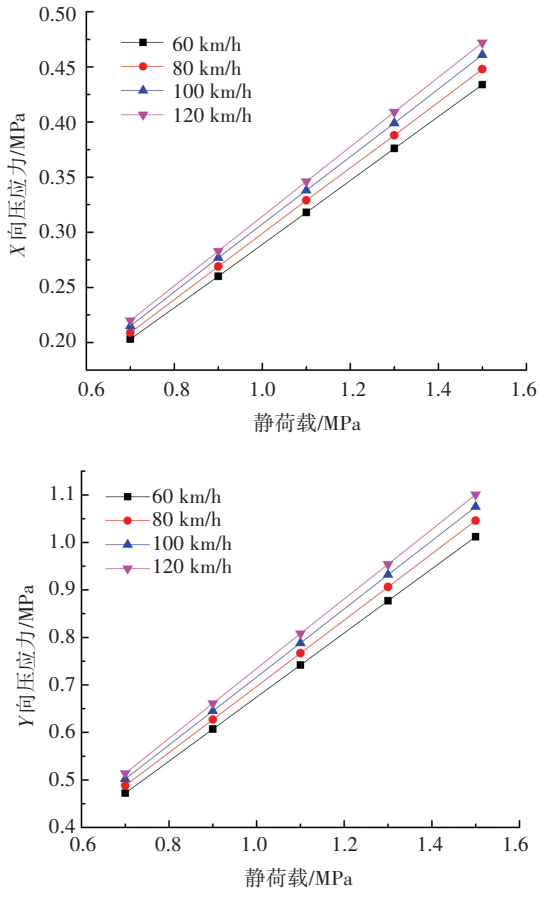


图 5　不同荷载不同速度条件下 *X*、*Y* 向压应力变化情况

Fig.5　Changes of *X* and *Y* direction compressive stress under different load and speed conditions

由前文计算可知，微裂缝最大压应力出现在裂缝尖端尚未开裂的两个单元上，由于压应力的方向与模型中坐标轴的方向相反，因此 *X*、*Y* 向压应力均有使裂缝扩大的作用. 在 100 km/h 速度、1.3 MPa 静荷载下，*X*、*Y* 向最大压应力分别高达 0.399 MPa 和 0.932 MPa，微裂缝在如此大的压应力反复作用下会迅速扩大，加速铺装结构的破坏，减少桥面铺装的寿命.

不同条件下裂缝尖端最大剪应力图 6 所示. 由图 6可知，裂缝尖端最大剪应力与压应力有着相似的变化规律，即随着静荷载和车速的增大而增大，且剪应力与静荷载和车速均呈线性规律变化，两者相比，静荷载对剪应力的影响较车速更大. 在 100 km/h 速度、1.3 MPa 静荷载下，裂缝尖端最大剪应力达到了 0.306 MPa，微裂缝在如此大剪应力反复作用下同样会迅速扩展，加速铺装结构的破坏.

为了进一步分析铺装结构微裂缝的受力情况，表 2 列出了对裂缝的扩展影响较大的 *Y* 向最大拉应力 p_Y 在不同车速条件下的变化情况.

由表 2 可知，当静荷载一定时，不同速度下裂缝周围 *Y* 向最大拉应力几乎不变；而车速一定时，随着静荷载的增加，拉应力也呈增加趋势变化，以 100 km/h速度为例，1.5 MPa 静荷载下拉应力为 0.074 MPa，较 0.7 MPa 静荷载下的 0.034 MPa 增加了 118%，这说明荷载水平是影响裂缝周围拉应力的主要因素. 同时，微裂缝周围所受 *Y* 向拉应力较裂缝尖端压应力和剪应力小一个数量级，因此裂缝周围 *Y* 向拉应力不是导致微裂缝扩展的主要原因.

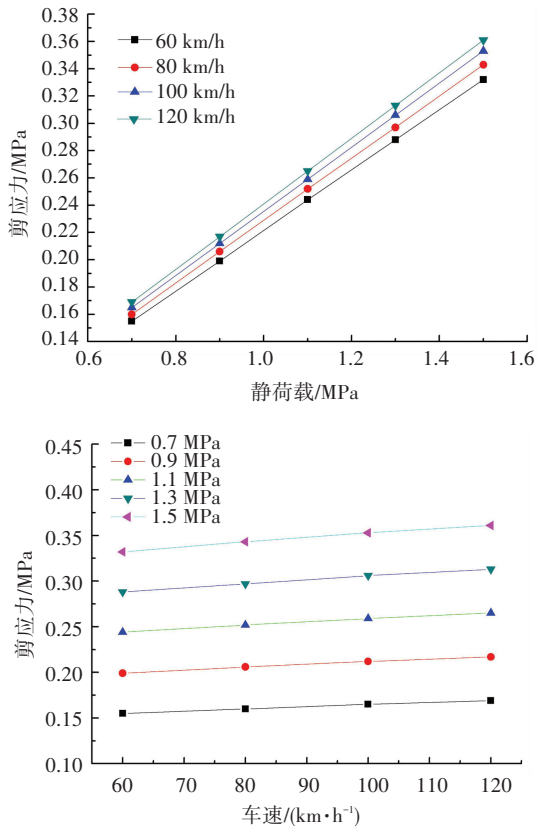


图 6　不同荷载不同速度条件下剪应力变化情况

Fig.6　Changes of shear stress under different load and speed conditions

表 2　不同车速条件下裂缝周围 *Y* 向最大拉应力

Tab.2　The maximum *Y* direction tensile stress around the crack under different speed conditions

静荷载/MPa	p_Y/ MPa			
	60 km/h	80 km/h	100 km/h	120 km/h
0.7	0.035	0.034	0.034	0.034
0.9	0.044	0.044	0.044	0.044
1.1	0.054	0.054	0.054	0.054
1.3	0.064	0.064	0.064	0.064
1.5	0.074	0.074	0.074	0.074

4　结　论

1）车辆动荷载作用下，饱水微裂缝所受最大压应力和最大剪应力均位于裂缝尖端，而最大拉应力则位于裂缝周围，这些力共同促使裂缝进一步扩展.

2）随着车速和荷载值的增加，饱水裂缝尖端最

大压应力和最大剪应力均近似呈线性规律增加,在高达 1.075 MPa 的 Y 向压应力和 0.361 MPa 剪应力的反复作用下,裂缝会迅速扩展,加速铺装结构的破坏;裂缝周围所受 Y 向拉应力较小,且主要受荷载水平的影响,受车速影响较小,裂缝周围 Y 向拉应力不是导致微裂缝扩展的主要原因.

3)导致沥青铺装层内饱水微裂缝扩展、恶化的最主要因素是车辆的超载,交通管理部门应严格限制超载超限车辆的上路.

参考文献

[1] 臧继成,潘正华,罗君,等.超载及调平层厚度对连续刚构桥桥面铺装层受力的影响[J].重庆交通大学学报(自然科学版)2013,32(6):1137-1140.
ZANG Jicheng, PAN Zhenghua, LUO Jun, et al. Effect of overloading and the leveling layer thickness on deck pavement stress of continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Chougqing Jiaotong University (Natural Science), 2013, 32(6): 1137-1140.

[2] 黄晓明.水泥混凝土桥面沥青铺装层技术研究现状综述[J].交通运输工程学报,2014,14(1):1-10.
HUANG Xiaoming. Research status summary of asphalt pavement technology on cement concrete bridge deck[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1): 1-10.

[3] 刘黎萍,彭一川,邵静.混凝土桥面铺装黏结防水层材料关键性能研究[J].建筑材料学报,2010,13(1):48-51.
LIU Liping, PENG Yichuan, SHAO Jing. Study on essential performance of waterproof material on concrete bridge deck[J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(1): 48-51.

[4] 蔡云梅.沥青路面水损害—空隙水压力影响因素的研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2010.
CAI Yunmei. Research on moisture damage of asphalt pavement about factor of pore water pressure[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2010.

[5] 王德强.湿热地区桥面铺装内部动水行为及材料组成设计优化研究[D].西安:长安大学,2011.
WANG Deqiang. Hydrodynamic behavior & meterial optimization research of bridge deck pavement in moist eeat areas[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.

[6] 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,2007,39(10):1614-1617.
DONG Zejiao, TAN Yiqiu, CAO Liping, et al. Research on pore pressure within asphalt pavement under the coupled moisture-loading action[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(10): 1614-1617.

[7] 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),2008,39(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 (Natural Science), 2008, 39(5): 1100-1104.

[8] BOER R D. Theory of porous media : highlights in historical development and current state[M]. Heidelberg: Springer, 2000.

[9] 彭永恒,任瑞波,潘宝峰.沥青路面层状黏弹体超空隙水压力的求解[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(9):1291-1294.

[10] 孙立军.沥青路面结构行为理论[M].北京:人民交通出版社,2005.
SUN Lijun. Structural behavior study for asphalt pavement[M]. Beijing: China Communication Press, 2005.

[11] KATAYAMA M, KIBE S, YAMAMOTO T. Numerical and experimental study on the shaped charge for space debris assessment[J]. Acta Astronautica, 2001, 48: 363-372.
PENG Yongheng, REN Ruibo, PAN Baofeng. Solution to superpressure of multi-layered viscolastic body in small opening water on asphalt pavement[J]. Journal of Harbin University of Commerce, 2005, 37(9): 1291-1294.

[12] 黄立葵,盛灿花.车辆动荷系数与路面平整度的关系[J].公路交通科技,2006,23(3):27-30.
HUANG Likui, SHENG Canhua. Relationship between vehicle dynamic amplification factor and pavement roughness[J]. Journal of Highway & Transportation Research & Development, 2006, 23(3): 27-30.

(编辑 魏希柱)