

## 移动荷载作用下沥青路面应力响应的持续时间

宋小金<sup>1,2†</sup>, 樊亮<sup>3</sup>

1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;
2. 湖南中大建设工程检测技术有限公司, 湖南 长沙 410205;
3. 山东省交通科学研究院, 山东 济南 250031)

**摘要:**在实测4种沥青路面结构应力响应的基础上,系统研究了行车速度与不同深度下的荷载响应持续时间的关系。研究表明,行车荷载沿路线方向的应力影响的有效长度在速度为20 km/h左右时存在峰值,沥青结构层内应力响应的持续时间与行车速度、深度存在显著的非线性关系。通过非线性数据拟合,得到了行车速度大于20 km/h时的荷载时间与荷载速度和结构深度的关系式,该公式意义明确,相对于已有的理论方法,其拟合精度大为提高。对大于20 km/h的行车速度与路面荷载频率之间的关系进行分析,建立了行车速度与不同路面深度的荷载频率的关系,为室内试验有效模拟行车荷载提供了依据。

**关键词:**沥青路面;应力;速度;频率

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

## Durations of Stress Response in Asphalt Pavement under Moving Load

SONG Xiaojin<sup>1,2†</sup>, FAN Liang<sup>3</sup>

1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Hunan Zhongda Construction Engineering Testing Technology Co Ltd, Changsha 410205, China;
3. Shandong Transportation Institute, Jinan 250031, China)

**Abstract:** Based on the measured stress response of 4 kinds of asphalt pavement structures, the relationship between the driving speed and the load response duration under different depths was systematically studied. The results show that the effective length of the impact of the traffic load along the route direction has a peak at the speed of about 20km/h. There is a significant nonlinear relationship between the duration of the stress response in the asphalt structure and the speed and depth of the traffic. Through the nonlinear data fitting, the relationship between the load time and the load velocity and the structural depth when the driving speed is greater than 20km/h was obtained. The formula has clear meaning, and the fitting accuracy is greatly improved compared with the existing theoretical methods. The relationship between the driving speed of more than 20km/h and the road load frequency was analyzed, and the relationship between the driving speed and the load frequency of different pavement depth was established, which provides a basis for the effective simulation of the driving load in the laboratory.

**Key words:** asphalt pavements; stress; speed; frequency

\* 收稿日期:2017-02-26

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2126), Natural Science Foundation of Hunan Province(2018JJ2126);湖南省交通科技计划项目(201705), Transportation Science and Technology Project of Hunan Province(201705)

作者简介:宋小金(1980—),男,山东荣成人,湖南大学博士研究生,高级工程师

† 通讯联系人, E-mail:27719264@qq.com

沥青材料具有黏弹性,其劲度模量对加载时间具有依赖性,实际沥青路面表现为应力脉冲时间越短,沥青混合料表现出的模量越大,具有高频高弹的特点<sup>[1-2]</sup>。由于行车荷载对沥青路面具有连续、瞬时的冲击作用,其速度的变化影响着路面结构内的应力持续时间,因而沥青层材料在不同行车速度下,所表现出来的模量值是不同的,而对沥青路面的力学响应分析更是与行车速度紧密相关<sup>[3-5]</sup>。

国内外对沥青路面应力脉冲和行车荷载因素的关系开展了一定的研究。1971年巴克斯达用有限元和弹性理论计算了柔性路面不同点位的竖向应力脉冲,得到了路面结构中某点的应力脉冲是车速和深度的函数的结论,并根据研究结果绘制了应力脉冲与车速和深度关系图。1973年布朗通过理论分析提出了加载时间与车速和深度的关系式,其研究认为,荷载时间是根据弹性理论计算的三个方向上脉冲时间的平均值,该式的计算结果与巴克斯达方法相比,脉冲时间短,是同条件下巴克斯达方法的0.48倍<sup>[6]</sup>。黄仰贤<sup>[7]</sup>假设荷载强度随时间的变化符合半正弦函数,采用简易公式得出了荷载持续时间与行车速度的关系,但未能考虑路面结构厚度的影响。美国最新的路面力学-经验设计法中使用了 Odemark 方法,该方法将各结构层与路基建立等效厚度,并假设应力以 45°角向下扩散,提出了用于表达应力扩散范围的有效长度概念,其计算应力时间随深度线性增加<sup>[8-9]</sup>;赵延庆采用移动荷载模式,利用有限元分析研究表明:应力脉冲时间与深度存在明显的非线性关系,Odemark 方法仅仅是建立在静态荷载的基础上,未能考虑沥青混合料黏弹性对行车荷载作用时间的影响,具有较大的局限性<sup>[10]</sup>。总体上,上述研究均是针对沥青路面受力特点、结合材料性质进行的理论推导,属于理论解释范畴,山东大学管志光则通过足尺试验中在沥青路面埋设应力传感器的方式,采集了不同速度作用下应力的持续时间,建立了应力脉冲时间-车速的关系式<sup>[11]</sup>,但可惜样本数量较少,且未能考虑路面厚度带来的影响。

本文通过各沥青路面结构沥青层底应力计,对常温下不同车速时的应力响应持续时间进行采集并分析,探讨沥青路面结构内不同深度应力响应持续时间与行车速度的关系。

## 1 沥青路面方案及应力计设置

试验路在国家重点公路长(春)至深(圳)线滨州至大高高速公路上。

试验路共四种沥青路面结构,包括两种全厚式沥青路面(结构 1,结构 2),一种山东省高速公路大

量采用的永久性沥青路面(结构 3),一种国内较为常用的半刚性沥青路面(结构 4)<sup>[5]</sup>。沥青层厚度在 15~50 cm 之间,分别为结构 1 的 50 cm,结构 2 的 38 cm,结构 3 的 33 cm,结构 4 的 15 cm。表 1 为试验路面结构,其中 LSPM(Large Stone Porous Asphalt Mixture)为大粒径透水性沥青混合料。

表 1 试验路面结构

Tab.1 Pavement structures for test					
结构 1			结构 2		
结构层	厚度 /cm	材料	结构层	厚度 /cm	材料
面层	5	SMA-13	面层	5	SMA-13
	33.5	7.5 AC-20		21.5	7.5 AC-20
	21	AC-25		9	AC-25
基层	16.5	9 LSPM-25	基层	16.5	LSPM-25
	7.5	AC-13F		7.5	AC-13F
底基层	30	石灰土	底基层	30	石灰土
路基		土	路基		土
结构 3			结构 4		
结构层	厚度 /cm	材料	结构层	厚度 /cm	材料
面层	4	SMA-13	面层	15	SMA-13
	18	6 AC-20		8	AC-20
	8	AC-25		8	AC-25
基层	35	15/20 LSPM-25/ 二灰碎石	基层	36	二灰碎石
	20	二灰土		底基层	50
底基层	50	30 石灰土	底基层		30
		土		路基	

每种结构均布设了应力计,其位于行车道轮迹带的沥青层底,可测量动态荷载作用下沥青层下层所受到的垂直压力。借鉴 NCAT 等试验路的铺设经验,先将应力计布置于下结构层,然后再进行沥青层的铺筑。试验路采用的压力装置为 Geokon 3500 型,其量程最大可达 250 kPa。如图 1 所示,压力盒由两圆形不锈钢片从外围焊接而成,压力盒直径为 225 mm,传感器总长度为 690 mm,两圆形钢片夹层间空隙中充满无空气的油液。压力的变化挤压两层钢片导致钢片夹层中的液体压力发生变化。半导体传感器将液体压力的变化转换为电子信号通过电缆传送到输出终端。

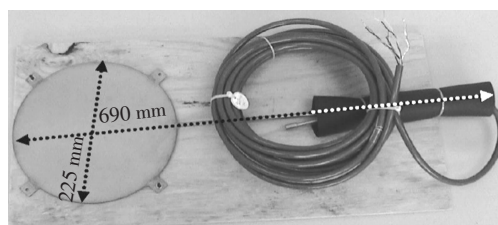


图 1 Geokon 压力计

Fig.1 Geokon pressure meter

为了确保采集数据的精度,需进行采集频率的设定.频率设的太高,数据的容量非常大,占用计算机的存储空间过多,也影响下一步数据处理的速度,设的低则可能错过应力的峰值或起止点,因此宜对采集频率进行试验确定.FWD 承载板对路面结构加载的速度非常快,加载时间稳定,在 0.03 s 左右,应力峰值出现的时间更短,不到加载时间的十分之一;而时速 120 km/s 的行车荷载,路表通过 30 cm 的轮迹时间为 0.009 s,远大于 FWD 荷载的峰值时间,因此通过对 FWD 峰值采集的稳定性来确定采集频率,可以满足对行车荷载应力采集的需要.

一般来讲,采集频率的增加,采集点靠近峰值的概率也会增加,因此当采集频率增大到一定值时,获取的最大应力值将逐渐稳定,即可确定为实际应用的采集频率.图 2 为最大应力与采集频率的关系,可以看出,当采集频率大于 2 000 Hz 后,采集的最大应力值无明显变化,因此确定试验采集频率为 2 000 Hz.

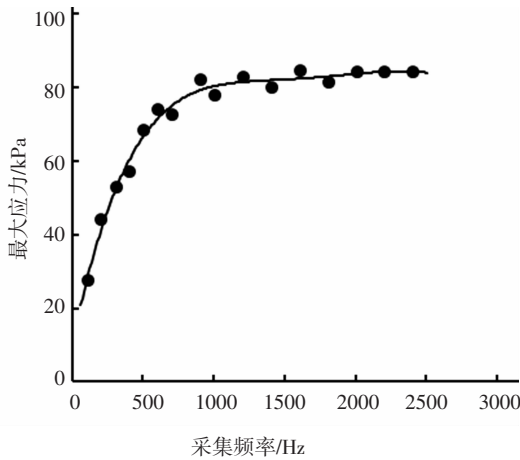


图 2 最大应力与采集频率趋势

Fig.2 Maximum stress and acquisition frequency trend

## 2 车载脉冲时间模型

研究行车速度对路面结构的荷载时间,参考 Odemark 方法<sup>[9]</sup>,引入有效长度,即计算点应力脉冲影响的长度,并建立:有效长度、行车速度、荷载作用时间的关系.

$$L_{\text{eff}} = v \cdot t \quad (1)$$

式中, $L_{\text{eff}}$  为有效长度,它代表了计算点处应力脉冲持续的长度; $v$  为行车速度; $t$  为荷载作用时间.

$L_{\text{eff}}$  的概念绘于图 2. 图中给出了完整的路面结构,应力由上向下传播,每结构层的应力扩散能力与该层材料的模量相关<sup>[12]</sup>,图中,AA 线和 BB 线分别代表沥青层和无机结合料基层的有效长度.

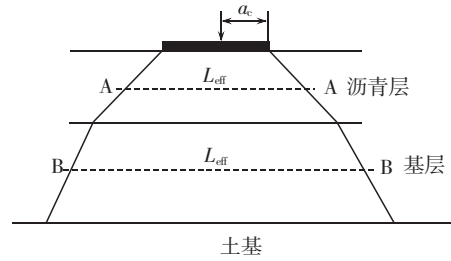


图 2 路面结构的有效长度

Fig.2 Effective length in pavement structure

试验段采用单后轴标准轴载(BZZ-100)对路面采用不同车速进行加载,行车速度采用应力传感器旁边的动态称重系统(WIM)进行采集,WIM 的速度测试范围为 5 ~ 200 km/h,精度为 3 km/h.利用应力计,采集 4 种结构的路面在不同行车荷载作用下标准轴载后轴对沥青层底的荷载作用时间  $t$ ,由于本试验重点是测量后轴加载的完整波形时间,而不是应力值,因此前轴对试验结果无影响.利用式(1)计算  $L_{\text{eff}}$ ,结果见图 3.可以看出,深度对  $L_{\text{eff}}$  的影响显著,位置越深, $L_{\text{eff}}$  越大;而速度对  $L_{\text{eff}}$  影响也较为明显,当速度为 20 km/h 时, $L_{\text{eff}}$  存在峰值.分析认为,速度较低时,随着荷载速度的增加,沥青路面材料表现更高的弹性,应力扩散角增加,继而应力影响的有效长度增加;但由于路面结构中应力传递是通过材料相邻颗粒来完成的,当荷载速度逐渐增加到一定值时,持续增加,沥青路面材料的应力传播因出现时间短而不及传递,导致行车荷载在速度较高时  $L_{\text{eff}}$  的减小趋势,该结论也验证了山东大学管志光的研究结果.

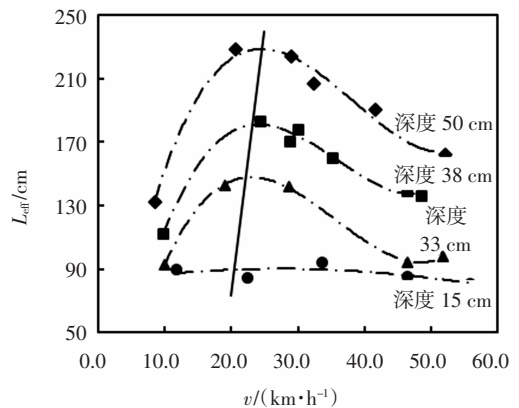


图 3 实测路面脉冲有效长度与行车速度的关系

Fig.3 Relationship between measured effective pulse length and driving speed

山东大学的管志光对足尺沥青混凝土路面进行了加速加载动力响应研究<sup>[11]</sup>,认为结构层内的应力脉冲时间与车速存在相关性较高的指数关系,并建

立了路面结构的应力脉冲时间与车速的相关关系式,见式(2),根据式(1)和式(2)可计算得到 $L_{\text{eff}}$ 值.结果表明, $L_{\text{eff}}$ 值随行车荷载速度的增加存在峰值,且峰值在荷载速度 20 km/h 左右.

$$t = 0.848 2e^{-0.049v} \quad (2)$$

式中, $t$ 为应力脉冲时间,s; $v$ 为行车速度,km/h.

由于本文讨论的4个试验结构的沥青层厚度不同,通过实测车载以不同时速对试验段应力加载时间进行采集,分析沥青层底应力脉冲时间与路面深度、荷载速度之间的关系.考虑到路面实际行车荷载的速度及试验中 $L_{\text{eff}}$ 峰前数据量过少,因此根据表2数据,仅对 $L_{\text{eff}}$ 峰后脉冲时间的变化规律进行研究并建立关系模型.拟合结果见式(3).

$$t = \frac{0.169h \cdot e^{-0.00941v} + 0.036d}{v} \quad (R^2=0.9766) \quad (3)$$

式中, $t$ 为脉冲时间,s; $h$ 为路面深度,cm; $d$ 为轮胎当量圆直径,默认取值30,cm; $v$ 为行车速度,km/h; $L_{\text{eff}} = (0.169h \cdot e^{-0.00941v} + 0.036d)/0.036$ ,cm;当 $v \rightarrow \infty$ 时,应力的水平方向来不及传递,扩散角为0, $L_{\text{eff}} \rightarrow d$ ,符合实际意义.

表2 实测路面结构应力脉冲时间与车速结果

Tab.2 The results of measured stress pulse time and driving speed

试验段	沥青层厚/cm	速度/(km·h <sup>-1</sup> )	时间/s
结构1	50	20.6	0.400
	50	29.1	0.278
	50	32.4	0.230
	50	41.6	0.165
	50	52.1	0.112
结构2	38	24.4	0.270
	38	28.9	0.212
	38	30.1	0.213
	38	35.3	0.163
	38	46.4	0.108
结构3	33	19.0	0.270
	33	28.6	0.179
	33	51.8	0.068
结构4	15	22.5	0.135
	15	33.6	0.101
	15	46.5	0.066
	15	55.8	0.052

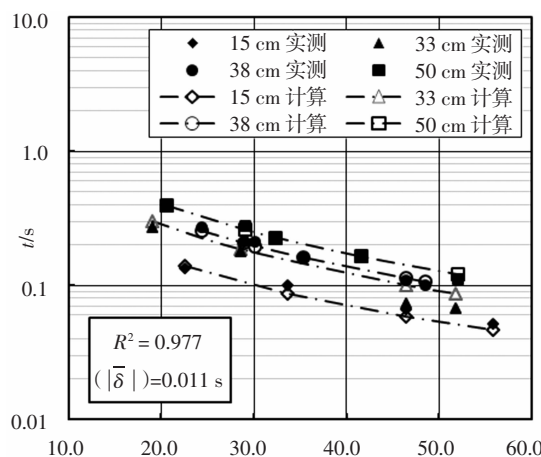
### 3 脉冲时间计算结果的验证

目前所采用的脉冲时间计算方法大多为理论推

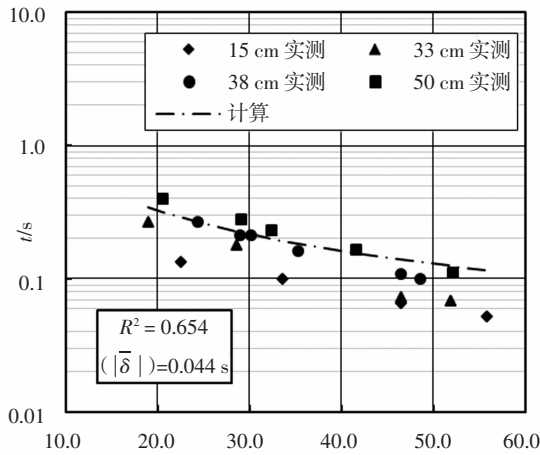
导值,且每种方法所得出的结果存在一定的差异,其有效性没有得到实际验证.文献<sup>[6]</sup>介绍了Huang、Odemark、Brown等方法的详细计算公式和步骤.本文对这几种常用方法通过实测结果进行验证比较.

图4为实测脉冲时间及公式(3)、Huang、Odemark和Brown方法计算结果.可以看出,实测脉冲时间随着行车速度的增加,逐渐减小,且脉冲时间随着厚度的增加也呈现增加的趋势.其主要原因是随着深度的增加,应力向下逐渐扩散,因此应力范围增加.

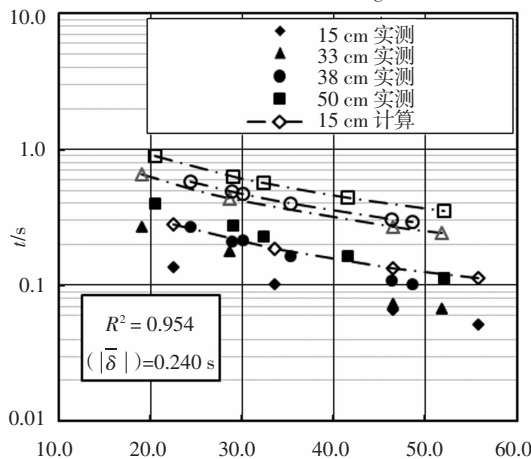
可以看出,不同方法得出来的结果相差较远.Huang方法为简便方法,但忽略了厚度对脉冲时间的影响(而实际采集与理论分析的结论均表明厚度是脉冲时间的重要影响因素),该方法的结论与38~50cm深度的结果较为接近.Odemark方法是通过应力对路面结构材料的扩散角计算受力范围从而得出脉冲时间,该方法是通过厚度-模量关系进行等效路面厚度进行换算,得到单一的路基厚度,并以一定的传递角度计算受力有效长度.该方法未考虑沥青材料的黏弹性行为,车速的变化会影响到路面材料的模量取值,因此路基与路面的模量取值及应力传递角度的选取就不会是一个定值,假设条件不成立,而且路基等效厚度的方法也需要进一步的验证,Odemark计算结果要大于实测结果.Brown公式计算值比实测值明显偏小.总体而言,Huang方法与目前其余方法相比较,虽然 $R^2$ 相对较低,但残差绝对值的平均值( $|\bar{\delta}|$ )相对较小,说明其拟合结果与实际规律的吻合程度差,但总体预测与实际的偏离值较其他方法小,本文拟合结果式(3)与实际测试结果的相关系数 $R^2$ 最高,且 $|\bar{\delta}|$ 最小,说明公式预测结果与实际结果的变化规律一致,且准确度高.



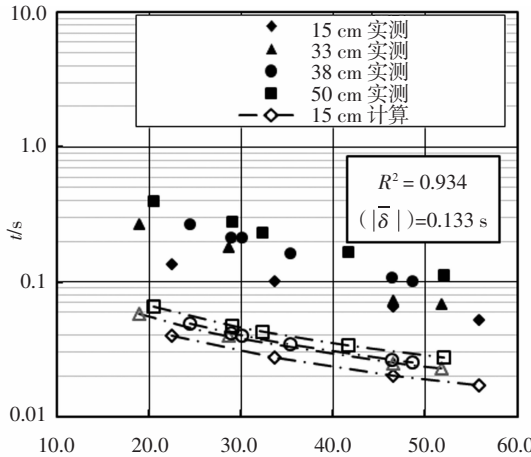
(a) 实测应力脉冲时间与式(3)



(b) 实测应力脉冲时间与 Huang 方法



(c) 实测应力脉冲时间与 Odemark 方法



(d) 实测应力脉冲时间与 Brown 方法

图 4 实测应力脉冲时间与计算结果

Fig.4 Measured stress pulse time and calculation results

### 4 路面荷载频率与行车速度的关系

行车速度会导致沥青路面结构内应力脉冲时间的差异.沥青是黏弹性材料,其劲度对荷载作用时间存在依赖性,因此沥青面层的动态模量的取值与结

构层的脉冲时间及行车速度相关.行车速度对沥青混合料力学参数的影响是通过改变荷载作用频率来实现的<sup>[13]</sup>.试验室对路面材料模量的获取应在模拟路面受力方式的条件下进行,因此其加载频率应与车辆对路面的作用统一.

室内动态模量的加载频率采用了正弦波周期的倒数<sup>[14]</sup>,为保持室内试验和现场荷载作用时间的一致,根据公式(3),可得到路面荷载频率与行车速度的关系<sup>[15-16]</sup>,见公式(4).

$$f = \frac{v}{0.169h \cdot e^{-0.00941v} + 0.036d} \quad (4)$$

图 5 为根据公式(4)计算得到的路面荷载频率与行车荷载速度的关系.可以看出,路面荷载频率与行车速度、路面结构层深度具有较强的相关性;随着行车速度的增加和结构层深度的减小,对应的频率随之增加.而目前大多数的研究及结构计算,大多采用 10 Hz 时沥青混合料的动态模量值(认为代表 60 km/h 的行车速度),从图 5 中可知该值相当于大概在 50 cm 深度时结构层的实际加载时间,而我国的沥青路面其沥青层厚度一般不超过 20 cm,因此该频率的取值是偏小的,在具体路面结构计算时,应根据不同材料所处的结构层位置,采用不同的加载频率对沥青混合料模量参数进行取值会更意义.

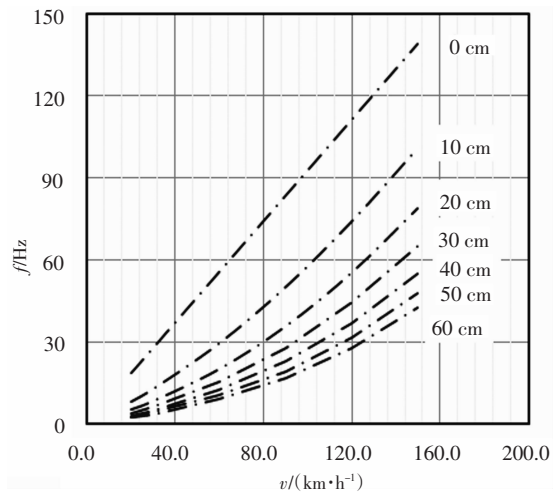


图 5 路面行车荷载频率与行车速度的关系

Fig.5 Relationship between driving load frequency and driving speed

### 5 结 论

1) 根据 Odemark 研究成果,引入荷载影响的有效长度  $L_{eff}$  概念,即在一定深度处,行车荷载沿路线方向的应力影响的有效长度.采用压力计对试验路

结构在行车荷载下进行测试,结果表明  $L_{eff}$  在行车荷载速度为 20 km/h 左右时存在峰值。

2)对试验段行车荷载下采集的应力时间、行车速度及荷载采集深度等数据进行拟合,得到应力时间与荷载速度和深度的关系式,公式意义明确,相关性良好,  $R^2 = 0.9766$ 。考虑到路上行车荷载的实际时速及低速条件下采集的数据量过少,因此该拟合公式仅考虑峰后的情况。拟合结果与 Huang、Odemark、Brown 等理论方法相比,精度得到了很大的提高。

3)对大于 20 km/h 的行车速度与路面荷载频率之间的关系进行分析,建立了行车速度与不同路面深度的荷载频率的关系,结果表明,随着行车速度的增加和路面深度的减小,对应的荷载频率随之增加,为室内试验有效模拟行车荷载提供了依据。

## 参考文献

- [1] 张丽娟,陈页开. 重复荷载下沥青混合料变形的粘弹性有限元分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2009,37(11):12—16.  
ZHANG L J, CHEN Y K. Viscoelastic finite element analysis of deformation of asphalt mixtures under repeated load [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 37(11): 12—16. (In Chinese)
- [2] 张久鹏,黄晓明,高英. 沥青混合料非线性蠕变模型及其参数确定[J]. 长安大学学报(自然科学版),2009,29(2):24—27.  
ZHANG J P, HUANG X M, GAO Y. Nonlinear creep model of asphalt mixture and parameter determination [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, 29(2): 24—27. (In Chinese)
- [3] 黄立葵,孙晓立,易志华. 路面结构的动荷载效应及对反分析结果的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2003,30(4):78—81.  
HUANG L K, SUN X L, YI Z H. Response of pavement to dynamic load and its influences on inverse analysis [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2003, 30(4): 78—81. (In Chinese)
- [4] 梁洪涛. 移动荷载作用下层状沥青路面结构时程响应分析[D]. 长沙:中南大学土木工程学院,2013:40—44.  
LIANG H T. Analysis of time-history responses of layered asphalt pavement structure under moving load [D]. Changsha: School of Civil Engineering, Central South University, 2013: 40—44. (In Chinese)
- [5] SIDDHARTHAN R V, SEBAALY P E, EI-DESOUKY M, et al. Heavy off-road vehicle tire-pavement interactions and response [J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(3): 239—247.
- [6] 杨永顺,王林,高雪池,等. 永久性沥青路面设计方法研究[R]. 济南:山东省交通运输厅公路局,2008:337—340.  
YANG Y S, WANG L, GAO X C, et al. Research on perpetual pavement design method [R]. Jinan: Highway Bureau of Shandong Provincial Transport Department, 2008: 337—340. (In Chinese)
- [7] 黄仰贤. 路面分析与设计 [M]. 北京:人民交通出版社,1998:63—64.  
HUANG Y X. Pavement analysis and design [M]. Beijing: China Communications Press, 1998: 63—64. (In Chinese)
- [8] Applied Research Associates. Guide for mechanistic-empirical pavement design: NCHRP project 1—37A [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2004: 2—7.
- [9] 赵延庆,王国忠,王志超,等. 基于动态模量的沥青路面开裂分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2010,37(7):7—11.  
ZHAO Y Q, WANG G Z, WANG Z C, et al. Cracking analysis of asphalt pavement based on dynamic modulus [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2010, 37(7): 7—11. (In Chinese)
- [10] 赵延庆,王志超,王国忠,等. 移动荷载下沥青路面内应力脉冲的持续时间[J]. 交通运输工程学报,2009,9(6):11—15.  
ZHAO Y Q, WANG Z C, WANG G Z, et al. Stress pulse durations in asphalt pavement under moving load [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(6): 11—15. (In Chinese)
- [11] 管志光,庄传仪,林明星. 足尺沥青混凝土路面加速加载动力响应[J]. 交通运输工程学报,2012,12(2):24—31.  
GUAN Z G, ZHUANG C Y, LIN M X. Accelerated loading dynamic response of full-scale asphalt concrete pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(2): 24—31. (In Chinese)
- [12] Applied Research Associates. Guide for mechanistic-empirical design: NCHRP Project 1—37A [R]. Washington DC: Transportation Research Board, March, 2004: 19—20.
- [13] 赵延庆,于新,谭忆秋. 行车速度对沥青路面力学参数及响应的影响[J]. 北京工业大学学报,2010,36(9):1253—1257.  
ZHAO Y Q, YU X, TAN Y Q. Effects of vehicle speed on mechanical properties of asphalt mixtures and pavement responses [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(9): 1253—1257. (In Chinese)
- [14] Applied Research Associates. Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures [R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2001: 2—3.
- [15] 赵延庆,潘友强. 沥青路面结构内荷载频率分布与变化规律研究[J]. 长沙交通学院学报,2007,23(4):7—17.  
ZHAO Y Q, PAN Y Q. Study on loading frequency distribution and changes with in asphalt pavements [J]. Journal of Changsha Communications University, 2007, 23(4): 7—17. (In Chinese)
- [16] 徐志荣,常艳婷,陈忠达,等. 沥青混合料动态模量试验标准研究[J]. 交通运输工程学报,2015,15(3):1—8.  
XU Z R, CHANG Y T, CHEN Z D, et al. Study on test standard of asphalt mixture dynamic modulus [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(3): 1—8. (In Chinese)