

制动力对沥青路面纵向应力及变形的影响分析

张兰峰¹, 庞立果²

(1.广东交通职业技术学院, 广东 广州 510650; 2.广东南粤交通投资股份有限公司, 广东 广州 521051)

摘要: 利用 ABAQUS 有限元软件建立半刚性基层沥青路面三维模型, 对路面施加垂直荷载和制动力荷载, 比较路面结构在不同车辆制动力作用下的纵向受力和变形, 分析制动力变化对路面结构纵向受力和变形的影响, 得出在制动力荷载较大路段, 沥青面层推移和波浪等破坏是沥青路面设计中应重点考虑的问题。

关键词: 公路; 制动力; 纵向变形; 纵向应力

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)03-0060-06

车辆以一定速度在路面行驶, 路面承受的载荷是移动的动态瞬时载荷。静态荷载模拟路面受力变形只能用于低速、荷载较小的情况。而车辆运行会受路面线形、运行状况(匀速行驶、正常加速、一般制动、紧急制动)等的影响, 路面受到的水平荷载比匀速行驶时更大, 水平力和垂直力的综合作用在路面结构内产生较大剪应力和拉应力, 故路面受力分析要同时考虑垂直荷载和水平荷载。水平荷载的作用会导致沥青路面拥包和波浪等, 给道路养护和改建带来很大麻烦; 在停车场、交叉路口、爬坡车道、收费站及其他车辆行驶缓慢的地方, 路面受到车辆水平荷载的作用较大, 更易产生车辙、坑槽等破坏。因此, 有必要明确沥青路面在水平荷载作用下的受力状态。钱振东等利用三维有限元模型分析不同车速及其变化对沥青路面力学响应的影响, 得出较低车速更易导致路面结构产生疲劳损伤, 车辆加速度增加会使结构面层内剪应力峰值增长较大, 易导致车辙、拥包等剪切破坏。李江将汽车荷载简化为均布移动荷载, 采用 ABAQUS 有限元软件建立三维动力有限元模型, 分析了车辆以不同速度匀速通过和刹车状态下路面结构的动力响应。该文通过 ABAQUS 建立典型半刚性基层沥青路面模型, 变化制动力系数以改变路面对车辆的制动力, 分析制动力变化对路面结构纵向受力和变形的影响。

1 沥青路面结构动力学分析理论

根据弹性力学的 Hamilton 变分原理, 可得到弹性系统动力问题的有限元基本方程:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚

度矩阵; $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ 分别为节点加速度、速度、位移; $\{F(t)\}$ 为荷载向量。

对于小阻尼结构, 单元阻尼矩阵根据 Rayleigh 于 1877 年提出的线形阻尼假设来确定:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

式中: α 、 β 分别为与结构固有频率和阻尼比相关的常数, 由任意两个振型的固有频率和相应的阻尼比确定[见式(3)、式(4)]。

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j(\omega_j\xi_i - \omega_i\xi_j)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2(\omega_j\xi_i - \omega_i\xi_j)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \quad (4)$$

式中: ω_i 、 ω_j 为任意两个振型的固有频率; ξ_i 、 ξ_j 为相应振型对应的阻尼比。

振型阻尼比通常由试验确定, 一般取 $i=1$ 、 $j=2$ 。假设阻尼比在某个频率范围内近似为某一常数, 即 $\xi_i = \xi_j = \xi$, 则式(3)、式(4)可简化为:

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2\xi}{\omega_1 + \omega_2}, \beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \quad (5)$$

在动力学分析计算时, 必须考虑路面结构的整体阻尼矩阵。可采用 ABAQUS 中线性摄动分析提取路面结构的整体频率, 从而确定阻尼系数 α 、 β 。

2 建立路面结构三维模型

基于粘弹性层状结构体系的基本假设建立 ABAQUS 三维半刚性基层沥青路面有限元模型。假设如下: 1) 路面各层间完全连续, 应力、变形传导连续; 2) 荷载作用在路表面上的压力均匀分布; 3) 面层材料为粘弹性体, 基层、土基材料为线弹性。

模型宽度 2 m, 长 5.7 m, 深 1.53 m, 其中荷载

作用长度范围为 3.07 m(见图 1)。对模型施加对称的边界条件:横向两侧面设置为 XSYMM($U_X=U_{RY}=U_{RZ}=0$),纵向两侧面设置为 ZSYMM($U_Z=U_{RX}=U_{RY}=0$),底部设置为 ENCASTRE($U_1=U_2=U_3=U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$)。沥青路面结构土基底面的应力应变很小,故模型底面采用固定端约束。模型采用三维六面体八节点线性减缩积分等参单元(C3D8R)。

2.1 沥青路面材料参数

沥青路面材料参数选取温度为夏季高温状况,

路面结构参数见表 1。沥青面层材料蠕变模型采用时间硬化模型。

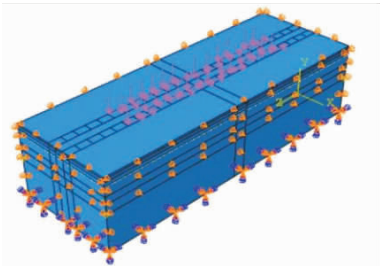


图 1 沥青路面动荷载模型

表 1 沥青路面各结构层参数

材料	A	n	m	弹性模量/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	阻尼比
SMA-13	1.464×10^{-5}	0.336	-0.502	526	2 300	0.05
AC-20	4.802×10^{-6}	0.595	-0.532	440	2 300	0.05
AC-25	1.956×10^{-8}	0.830	-0.562	710	2 300	0.05
水泥稳定碎石				1 200	2 200	0.05
石灰土				300	2 100	0.05
土基				45	1 800	0.05

2.2 荷载简化形式

研究表明,载货汽车轮胎的接地形状更接近于矩形,特别是荷载较大时。模拟计算时采用标准轴载 BZZ-100 单轴双轮模式,荷载模型尺寸简化为 18.6 cm×19.2 cm(见图 2)。对应于图 1,荷载带上每个小矩形的长度为 19.2 cm,宽度为 18.6 cm。

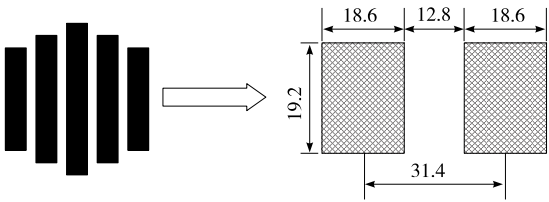


图 2 轮胎接地形状简化模型(单位:cm)

2.3 模态分析与阻尼比相关常数计算

模态分析用来确定结构的频率响应和模态,研究模型在动态荷载下的响应。路面结构前 10 阶固有频率见表 2。

表 2 完整路面结构前 10 阶固有频率

阶次	固有频率	阶次	固有频率
1	7.039 5	6	9.346 6
2	8.279 2	7	9.582 7
3	9.278 8	8	9.679 9
4	9.286 4	9	9.744 6
5	9.321 9	10	9.937 2

动荷载引起的振动波在结构内部传播时会受到阻尼抗力的约束,振动波传播过程中将产生能量耗散。根据表 2,路面结构前 5 阶的固有频率分别为 7.039 5、8.279 2、9.278 8、9.286 4、9.321 9,则:

$$\omega_1=2\pi f_1=2\pi\times7.039\ 5=44.208\ \text{rad/s}$$

$$\omega_2=2\pi f_2=2\pi\times8.279\ 2=51.993\ \text{rad/s}$$

路面结构的阻尼比一般为 0.02~0.2,这里将阻尼比设置为 0.05,将 ω_1 、 ω_2 代入式(5),得到阻尼系数 $\alpha=2.389$ 、 $\beta=0.001\ 039$ 。

2.4 移动荷载的施加

使用 ABAQUS 建模时,移动荷载的施加通过在路面划分荷载移动带来实现。在车辆荷载移动方向设置 2 条荷载移动带,每条荷载带横向宽度为轮胎简化荷载两个外边缘之间的距离。使用 Fortran 语言编写程序 Dload 和 Utracload 子程序实现荷载带向前移动,分别施加垂直荷载和水平荷载。

2.5 制动力计算

一般认为制动水平载荷与垂直载荷有一定的线性关系,可用水平力系数来描述:

$$T=\mu P \tag{6}$$

式中: T 为制动情况下路面所受水平荷载; μ 为制动力系数。

当车辆对路面存在水平荷载时,经过每个小矩形所用的时间由于减速度的作用会不一样。减速度

a 按下式计算:

$$a = \mu g \quad (7)$$

每向前移动一个小矩形长度所用的时间 t_n 按式(8)计算,将加速度 a 代入式(8),可计算出每个荷载步的作用时间。

$$t_n = \frac{\sqrt{v^2 - 2a(n-1)\Delta s} - \sqrt{v^2 - 2an\Delta s}}{a} \quad (8)$$

式中: n 为从开始移动位置向后的第 n 个矩形; Δs 为每个小矩形的长度。

3 移动荷载作用下路面结构的变形和应力

分析不同荷载制动力对路面结构层内应力、变形的影响时,分别取制动系数 μ 为 0、0.3、0.5、0.7 模拟车辆匀速和不同制动状态,垂直荷载为 0.7 MPa,行车速度为 30 m/s,荷载带长度为 3.07 m。纵向位移 U_3 选取位置为轮隙中心 C 点,纵向应力 S_{33} 选取位置为轮载正下方 F_1 点,剪应力 S_{13} 、 S_{23} 选取位置为轮迹边缘 B 点(见图 3)。

3.1 纵向变形 U_3

图 4 为不同制动力系数下的纵向变形 U_3 。由

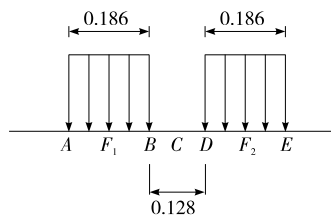


图 3 轮胎荷载各点位分布(单位:m)

图 4 可知:1) 在移动荷载作用下, $\mu=0$ 时,纵向位移关于 $t=0.05$ s 坐标点呈反对称关系,各层纵向位移呈正负交替变化,路表以下 78 cm 处纵向变形的正负最大值分别为 -0.005 、 0.005 cm。2) μ 为 0.3、0.5、0.7 时,制动力的存在导致沥青面层内的纵向变形全部转为负值,且其值随着制动力的增加而增大。由于纵向位移的方向是行车方向,在制动力作用下,沥青面层各层位全部发生与行驶方向相同的位移,即向前推移。这是收费站、交叉路口等位置夏季容易出现推移、拥包破坏的原因。只有路表以下 58、78 cm 处的纵向变形仍呈正负交替变化,且其值相对于 $\mu=0$ 时的数值几乎不变,说明制动力的增加对于基层底面和底基层底面的纵向变形没有影响。

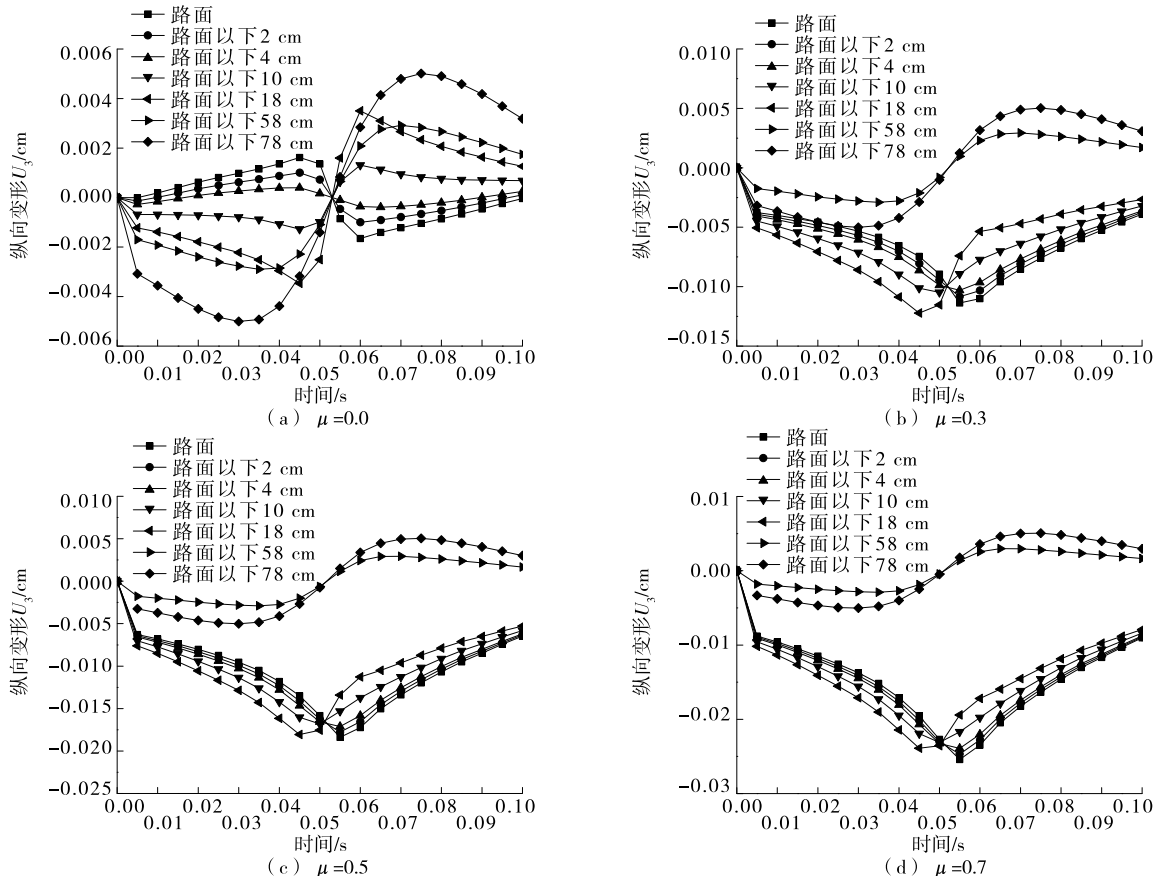


图 4 不同制动力系数下的纵向变形 U_3

图5为制动力系数与纵向变形的关系。由图5可知:制动力对沥青面层的纵向变形影响很大,随着制动力系数的增加,各层位的纵向变形明显增大,即制动力越大,沥青层内的推移位移越显著。

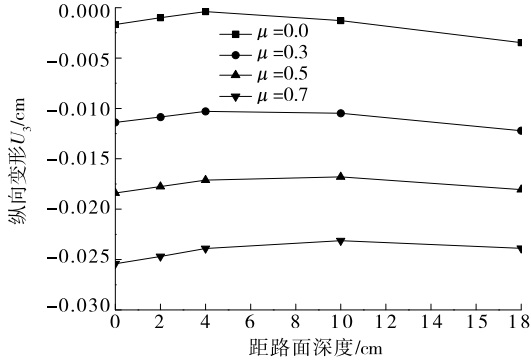
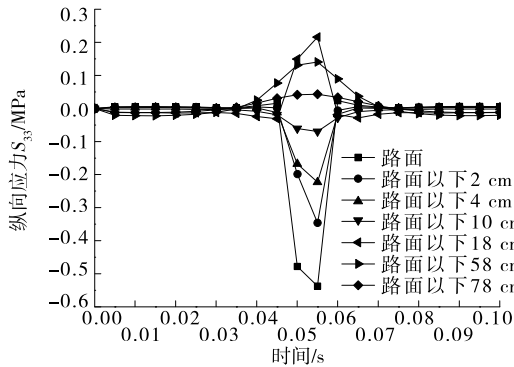
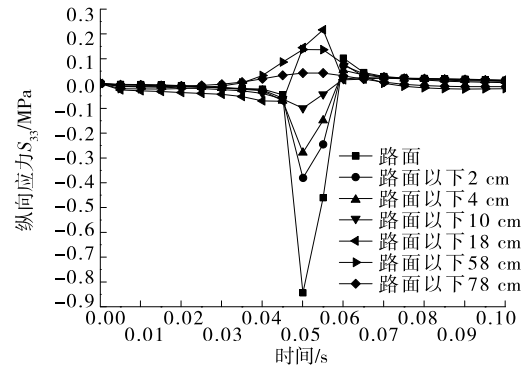


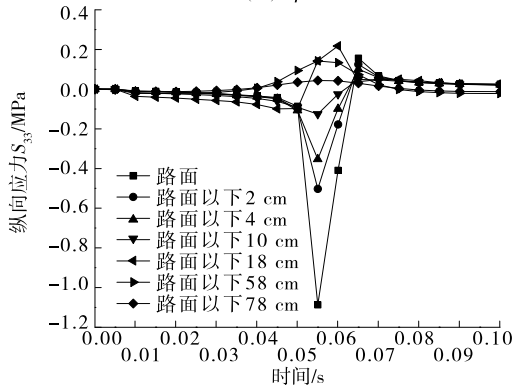
图5 制动力系数与纵向变形的关系



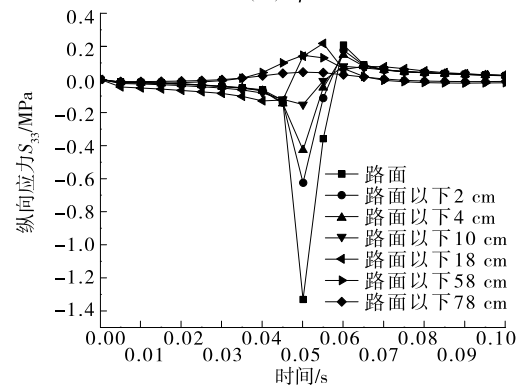
(a) $\mu=0.0$



(b) $\mu=0.3$



(c) $\mu=0.5$



(d) $\mu=0.7$

图6 不同制动力系数下的纵向应力 S_{33}

图7为纵向压应力 S_{33} 最大值与制动力系数的关系。由图7可知:路表面处纵向压应力受制动力的影响最大,沥青面层10 cm以内纵向压应力随制动力系数的增加而增加。制动力系数增加时,路表纵向压应力增幅最大,路面以下10 cm处增幅最小;制动力系数不变时,路面以下10 cm内纵向压应力随着深度增加而减小。

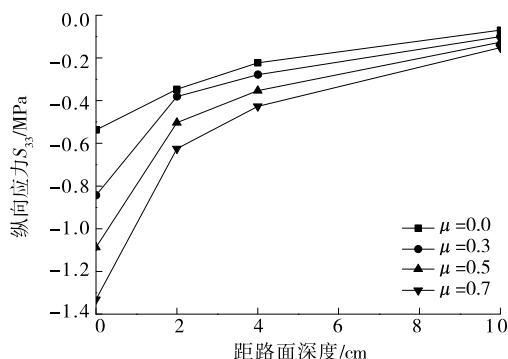
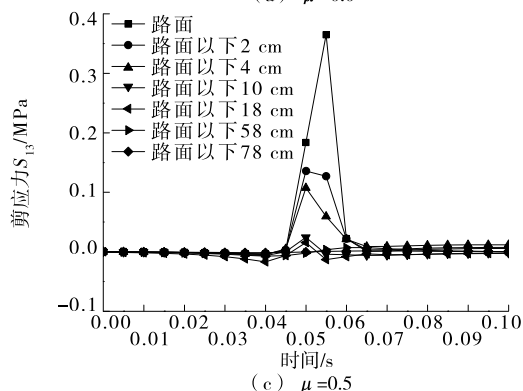
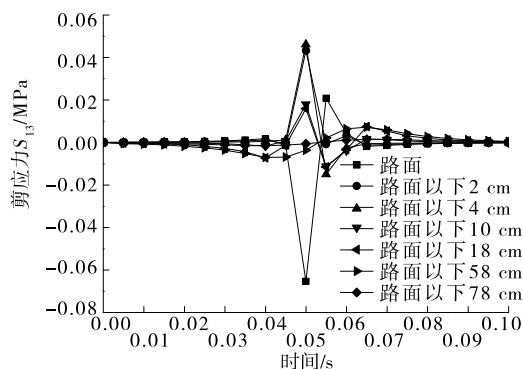
3.2 纵向应力 S_{33}

图6为不同制动力系数下的纵向应力 S_{33} 。由图6可知: $\mu=0$ 时,路面10 cm范围内全部受到纵向压应力,且随着沥青层深度的增加而减小,沥青路表面层受到的纵向压应力最大;路面以下18 cm处即沥青面层层底的纵向应力呈正负交替变化;纵向最大拉应力出现在沥青面层层底,沥青面层以下58 cm处受到的拉应力次之,沥青面层以下78 cm处受到的拉应力最小。 μ 为0.3、0.5、0.7时,路表以下10 cm范围内的纵向应力呈正负交替变化,且这些层位的纵向压应力随着制动系数的增加而明显增加。沥青面层内由于制动力的存在出现正负交替的纵向应力,易导致路面产生疲劳破坏。制动力的变化对沥青路面以下18、58、78 cm处纵向应力的影响很小。

3.3 剪应力 S_{13}

图8为不同制动力系数下的剪应力 S_{13} 。由图8可知: $\mu=0$ 时,最大负剪应力 S_{13} 出现在路表面,为-0.07 MPa; $\mu=0.3$ 时,路表的剪应力 S_{13} 全部转为正值,且其最大值随着制动力系数的增加而增加。

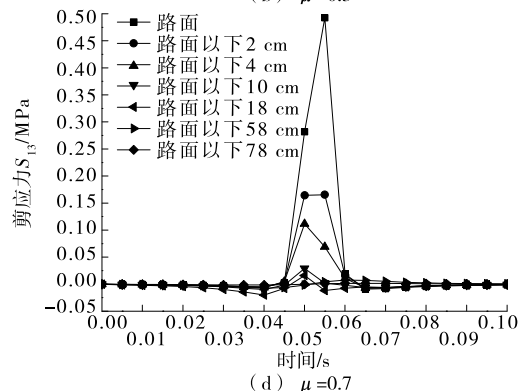
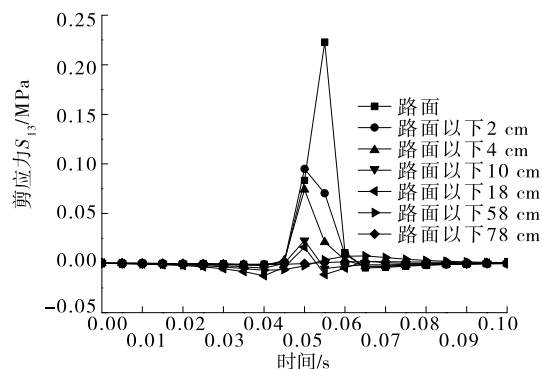
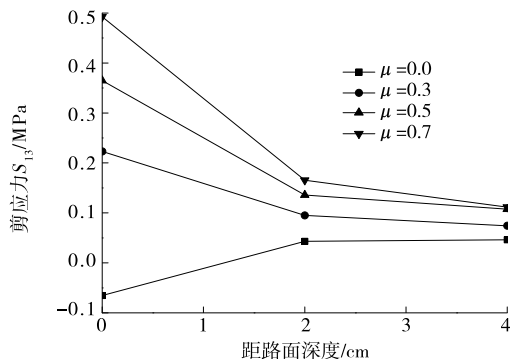
图9为各层剪应力 S_{13} 最大值与制动力系数的关系。由图9可知:路表以下2、4 cm处的 S_{13} 最大

图7 纵向压应力 S_{33} 最大值与制动系数的关系

值均为正值,均随着制动力系数的增加而增加;路表10 cm以下各层位 S_{13} 受制动力变化的影响很小。

3.4 剪应力 S_{23}

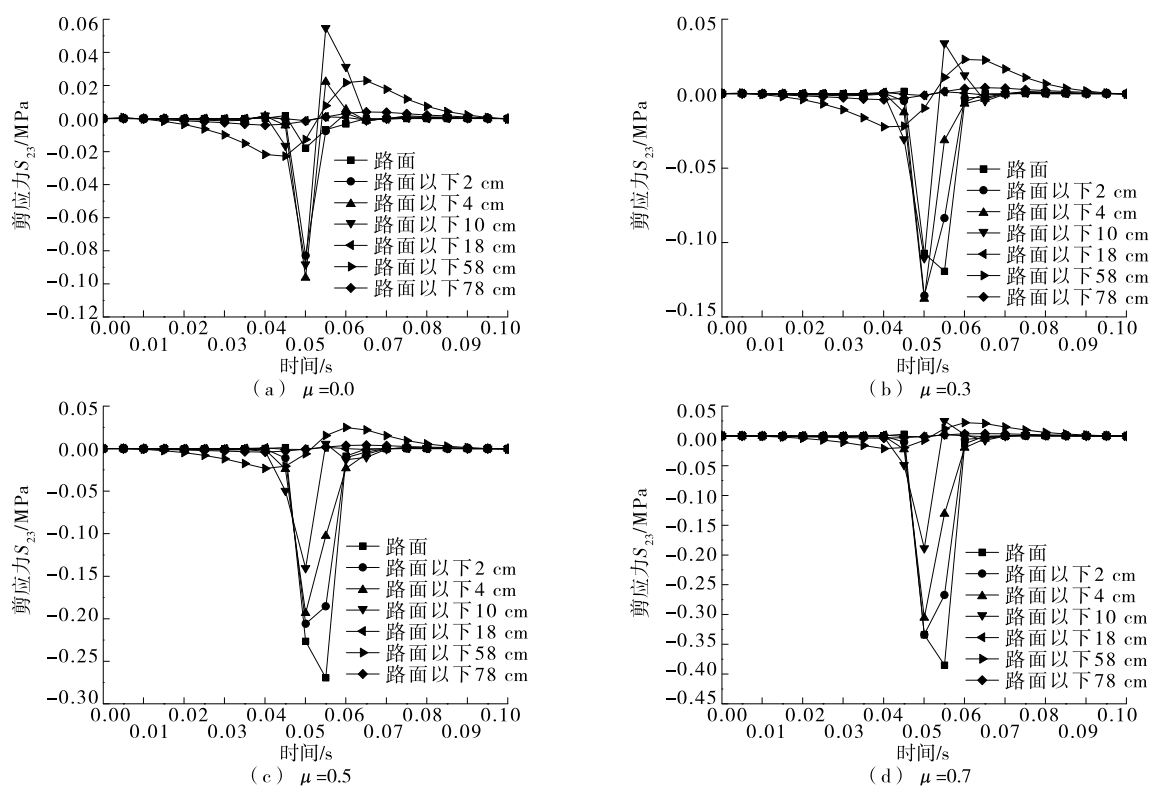
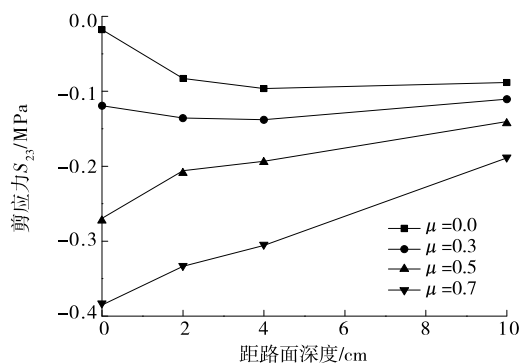
图10为不同制动力系数下的剪应力 S_{23} 。由图10可知:1) $\mu=0$ 时,沥青面层内最大负剪应力 S_{23} 出现在沥青面层以下4 cm,沥青面层层底的 S_{23} 几乎为零;沥青面层内正剪应力 S_{23} 按数值大小依次出现在沥青面层以下10、4 cm,且 S_{23} 呈正负交替变化,易产生剪切疲劳破坏。2) $\mu=0.3$ 时,路表面层、路面层以下2、4、10 cm处的负剪应力 S_{23} 增大,

图8 不同制动力系数下的剪应力 S_{13} 图9 各层剪应力 S_{13} 最大值与制动力系数的关系

路面以下4 cm处的正剪应力 S_{23} 不再存在,10 cm

处的 S_{23} 正剪应力也由0.055 MPa减小为0.034 MPa。3) $\mu=0.5$ 时,最大 S_{23} 负剪应力出现位置由原来路表以下4 cm变化为路表。4) $\mu=0.7$ 时,各层剪应力 S_{23} 变化规律类似于 $\mu=0.5$ 时,沥青层内 S_{23} 负剪应力最大值进一步增大。面层以下58、78 cm处受制动力系数变化的影响较小。

图11为各层负剪应力 S_{23} 最大值与制动力系数的关系。由图11可知:最大负剪应力 S_{23} 随着制动力系数的增加而增大,制动力系数增大到0.5、0.7时,最大负剪应力 S_{23} 出现位置由路面以下4 cm变化为路表。

图 10 不同制动力系数下的剪应力 S_{23} 图 11 各层剪应力 S_{23} 负最大值与制动力系数的关系

4 结论

(1) 制动力的存在导致沥青面层内各层位全部发生与行驶方向相同的向前推移。随着制动力系数的增加,各层位的纵向变形明显增大,沥青层内的推移位移越显著。制动力的增加对基层底面和底基层底面的纵向变形没有影响。

(2) 制动力系数增加对纵向应力 S_{33} 的影响范围为路表以下 10 cm 内,且随着制动力系数的增加,该范围内的纵向压应力最大值明显增加,易导致路面在夏季高温下出现推移与波浪破坏,其中路表的

纵向压应力最大。制动力的存在使路表以下 10 cm 范围内的纵向压应力变为正负交替变化,易使沥青路面产生疲劳破坏。

(3) 制动力对上面层 S_{13} 剪应力的影响较大。制动力从零增大到 0.3 时,路表剪应力全部转为正值,且上面层内的 S_{13} 最大值随着制动力系数的增加而增加。路表 10 cm 以下各层位 S_{13} 受制动力变化的影响很小。

(4) 制动力系数为零时,路表以下 4、10 cm (中面层) 受到较大的 S_{23} 剪应力,且正负交替变化。路表以下 10 cm 范围内, S_{23} 剪应力负最大值随制动力系数的增加而增大;制动力系数增大到 0.5、0.7 时, S_{23} 负最大值出现位置由路面以下 4 cm 转为路表。

(5) 在制动力荷载较大的路段,沥青面层推移、波浪等破坏是沥青路面设计中应重点考虑的问题。

参考文献:

- [1] 郑仲浪.重载车辆作用下沥青路面层间力学行为研究[D].西安:长安大学,2010.
- [2] 王强.水平荷载作用下沥青路面表面开裂机理分析[J].广东公路交通,2008(2).

(下转第 79 页)

病害,设计、施工中应引起重视,加强防水设计。该文通过对临水路基垮塌工程实例的分析,找到主要诱发因素,进而确定有针对性的处治措施,可为类似工程提供参考。临水路基的设计要点是准确进行稳定性分析,充分考虑影响稳定的主要因素,综合采取临水侧路基防护、加固等措施,保证路基有足够的安全储备。

参考文献:

- [1] 杨刚毅.福州市某公路工程沿河高路堤处置方案[J].福建交通科技,2018(2).
- [2] 孟宝华,邓宇,章宁,等.加筋土柔性结构在深厚填方边坡治理工程中的应用[J].土工基础,2018,32(4).
- [3] 丹增平措,肖亚军.西藏昌都地区沿河公路路基水毁抢修措施探讨[J].西藏科技,2017(10).
- [4] 黄良娟,贺春,沈士军.沿河路基拼宽方案设计[J].中国水运:下半月,2014,14(5).
- [5] 蒲增刚.福厦铁路玉塘洋特大桥台尾路基垮塌原因分析及处理措施[J].路基工程,2014(6).
- [6] 徐东伟.沿河路基冲刷机理与防护措施初探[J].北方交通,2013(3).
- [7] 葛海军,江明明.广东某高速公路沿河路堤边坡处治设计方案[J].江苏建筑,2013(1).
- [8] 陈远川,陈洪凯.山区沿河公路路基洪水毁损过程及机理研究[J].公路,2012(11).
- [9] 窦彦磊,阎宗岭,王敏.复合加筋土挡墙在沿河路基中的应用[J].路基工程,2010(5).
- [10] 柴贺军,李海平,王俊杰.山区公路斜坡地形路基病害类型及处治方法[J].公路交通技术,2008(6).
- [11] 杨烨.山区公路沿河路基稳定性分析评价与设计[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [12] 朱孟坤.临水高填土路堤加宽加高边坡稳定性分析[D].南京:南京林业大学,2011.
- [13] 赵庆如,王更贵.浅谈在河道整治工程中石笼的应用[J].智能城市,2018,4(7).
- [14] 黄保荣,徐仁山.浅谈加筋格宾挡墙在高填土边坡中的应用[J].低碳世界,2017(34).
- [15] 丁莲姬.浅谈沿河路堤防护设计措施[J].科技创新导报,2011(34).
- [16] 路云,王亚玲,宋路娟.沿河路基坡脚处防护措施的综合应用[J].北方交通,2010(7).

收稿日期:2018—10—17

(上接第 59 页)

- high and low-temperature properties of asphalt-mineral filler mastic[J].Journal of Materials in Civil Engineering,2010,22(8).
- [7] 叶奋,黄彭.强紫外线辐射对沥青路用性能的影响[J].同济大学学报:自然科学版,2005,33(7).
- [8] 余建英,庞凌,吴少鹏.沥青材料老化与防老化[M].武汉:武汉理工大学出版社,2012.
- [9] 谭忆秋.沥青及沥青混合料[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [10] 李祖仲,吴江龙,陈栓发,等.沥青胶浆中矿粉沉降的影响因素及沉降检验[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(4).
- [11] 李丽.沥青胶浆技术性能及评价方法研究[D].西安:长安大学,2004.

收稿日期:2018—11—22

(上接第 65 页)

- [3] 王宝峰.车辆制动对沥青路面结构影响分析[J].公路,2016(2).
- [4] 郑木莲.水平荷载作用下高模量沥青混凝土路面力学响应数值分析[J].公路,2013(9).
- [5] 沈金安.沥青及沥青混合料路用性能[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [6] 钱振东,杨宇明.低速与变速动载作用下沥青路面动力响应[J].中南大学学报:自然科学版,2015,46(3).
- [7] 李江.不同车速下沥青路面结构的动力响应[J].公路交通科技,2015,32(8).
- [8] 杨博.基于有限元方法的沥青路面车辙影响因素分析及其应用研究[D].西安:长安大学,2010.
- [9] 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.
- [10] 李皓玉.车辆与路面相互作用下路面结构动力学研究[D].北京:北京交通大学,2011.
- [11] 龙超.车辆与路面相互作用下路面结构动力分析[D].长沙:湖南大学,2013.
- [12] 王保实.移动荷载作用下半刚性基层沥青路面结构的动力响应研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011.

收稿日期:2018—10—23