

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.12.044

移动荷载下反 h 桩陡坡路基结构时程响应分析

李 伟, 郭芳山

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092)

摘 要: 试验以阿拉山口市温泉县 G30 公路建设项目为依托,通过数值模拟方法,建立设置反 h 型桩的陡坡路基典型数值模型。研究在车辆行驶过程中对陡坡路基造成的影响因素,其中主要分析了在不同车辆行驶速度、载荷及数量对陡坡的影响。通过 ABAQUS 有限元试验,结果表明:一辆空载汽车以 20 m/s 的行驶速度行驶下对陡坡路基的影响效果最小,陡坡路基所受应力应变及加速度均处于最小;当三辆满载汽车以 28 m/s 的行驶速度在该段路面行驶时,汽车对陡坡路基造成的的应力应变及加速度最大,同时将会对陡坡路基的稳定性产生较大的影响。

关键词: 陡坡路基;有限元;动力学;时程响应

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)12-0162-04

0 引 言

高速公路作为国家主要的运输渠道,以逐渐成为评判一个国家发展程度的标准。在上个世纪八十年代,我国基础建设的能力比较薄弱,还没有一条完成的高速公路。随着改革开放以及工业技术的成熟,我国高速公路发展迅速,逐渐迈向一个黄金时代。现如今,我国的基础建设发展迅速,其代表性的高速公路总长度已超过 8 万 km,随与发达国家还有一定的差距,但我国的发展前景是十分巨大的。但随着交通的迅速发展,伴随而来的是道路大量的损坏,这问题不仅使道严重威胁了驾驶员的安全,同时也给管护人造成巨大的困难^[1]。

为了应对我国迅速发展的高速公路带来的问题,人们逐渐开始了针对车辆和道路之间相互关系的研究。在研究过程中,科学家们逐渐发现高速公路的破坏主要来自于车辆与道路之间的相互作用。荣超等^[2]建立两种频域路面激励下的整车行驶动力学模型,研究了不同车速下时域和空间域路面激励下的轮胎法向作用力变化规律。侯占峰^[3]对 C 级公路路面进行数值模拟,基于汽车两自由度模型,应用 SMULINK 软件仿真分析了车轮的随机动载特性。研究发现,车辆在行驶过程中产生的振动及冲击是十分巨大的。这种振动及冲击不仅与路面的不平顺程度密切相关,同时也与车辆的载荷、速度及数量有着不可分割的关系。在路面结构动态响应的研究过程中,路面结构动力学是十分重要的一项研究内容,在当今高速公路快速发

展的中国,其研究方向已逐渐成为科学家们研究的主要重点之一^[4-6]。

现如今有限元结构模型主要进行在静荷载下路面的振动分析,无法正确体现车辆在不同载荷、车速、数量等方面的影响因素。随着载荷、车速、数量的不断变化,以静力学为计算依据的试验方案不能正确且全面分析路面在车辆行驶过程的受力,这使得列车的动力分析成为我们深入学习的重要内容。

综合上述论点,通过 ABAQUS 有限元软件,建立车辆-道路动力耦合模型,研究在不同载荷、车速及数量情况下车辆在设有反 h 型桩陡坡路基的影响情况。并通过有限元模拟过程为日后的建设过程提供设计方法及参考。

1 方案分析

本文所研究内容为移动荷载下对设有反 h 型桩陡坡路基结构时程响应分析,分别讨论在不同载荷、车速、数量下车辆在路面行驶过程中的振动情况。通过参考阿拉山口市温泉县地质调查报告,采用弹性层状理论分析在该情况下路面所受应力应变及位移的变化情况。

2 有限元试验

ABAQUS 有限元计算软件自问世以来,能够有效模拟物体在一个时间段内的运动情况,并能够对其应力应变等变化做出详细准确的分析。本文在进行计算过程中,为保证车辆在整个计算过程中能够正常行驶,采用隐式动力学分析车辆在整个路面的型式过程。在通过 ABAQUS 进行计算过程主要分为四个步骤:(1)建模;(2)设置材料属性;(3)设

收稿日期:2020-05-29

作者简介:李伟(1968—),男,本科,高级工程师,从事道路设计工作。

置边界条件;(4)添加动能和载荷;(5)计算。

2.1 三维模型建立

本文通过 ABAQUS 有限元软件模拟移动汽车荷载在陡坡路基行驶过程中的时程响应问题,在进行路面设计过程中因充分考虑路面的面层、基层以及底基层等划分。在模型内部,路基土体内部及运动车辆均采用 AC3D8 六面体网格单元来塑造三维有限元实体模型,模型内每个实体单元均保持 XYZ 三个方向自由度,可在收到应力作用时产生变形。同时,由于公路的在空间上可视为无线长度,在建模过程中模型的边界均设置为无限元构件,在模型网格设置过程中将其属性由 AC3D8 修改成为 CIN3D8,避免汽车与地面产生的振动效果发生反弹。有限元模型见图 1,整体模型共 39 482 个网格。

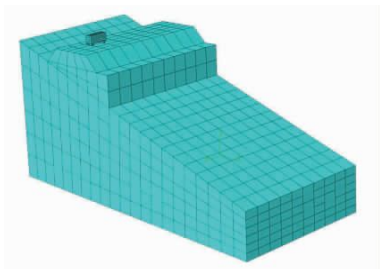


图 1 陡坡路基有限元模型

该实验模型选取阿拉山口市温泉县 G30 公路某一段陡坡路基作为试验模拟对象,试验模型底部整体尺寸为顶部车道高 30 m、宽 50 m,根据《公路桥涵设计通用规范》(JTC D60—2015)^[7],公路 II 级车道道路宽度采用 3.5 m,在 ABAQUS 有限元模型设计中采用双向单车道进行有限元模拟计算。同时,参考《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》^[8]规定,车速小于 100 km/h 时最小应保持 50 m 安全距离,结合汽车长度为 4.7 m,设置模型长度为 70 m。并在模型边界 4 处设置无限元结构,以确保振动加速度在传递至边界处不发生反弹。李小雷等^[9]采用非线性有限元分析的方法,研究了膨胀土及其与反 h 桩的相互关系,通过研究发现反 h 型桩桩间距不应小于 4 m,在本文中以 4 m 为排桩间距,在模型路面下靠近边坡处埋置 15 根反 h 型桩,模型尺寸见图 2,以增强陡坡路基的强度。

2.2 材料属性

根据阿拉山口市温泉县地质报告,该处工程地质土体主要可分为持力层及填土层,其土体材料属性见表 1。同时在山体边坡处,公路路基下方采用反 h 型桩进行加固处理

2.3 动力学属性

为确保有限元模拟试验结果与实际相符合,

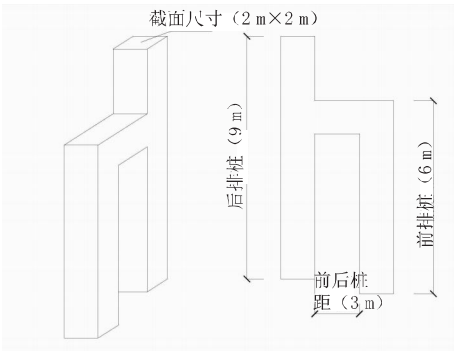


图 2 反 h 型桩尺寸

表 1 陡坡路堤及反 h 型桩物理力学参数设置

陡坡路基材料	弹性模量 <i>E</i> /MPa	重度 γ /(kN·m ⁻³)	泊松比 μ	粘聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦角 φ /(°)
路基持力层	3.8×10^7	2 400	0.25	2×10^5	35
填土部分	3.2×10^9	2 000	0.30	3×10^4	20
反 h 桩	3.2×10^7	7 500	0.20	—	—

本文双向车道行驶车辆均采用普通四轮轿车,具有前两轮后两轮结构,每个轮胎对地面的作用力为 3.625 kN。在 ABAQUS 有限元计算过程中,车辆将分为两步进行运动,在分析步第一步首先考虑模型整体包括车辆及路基仅在重力作用下的变形,第二步则考虑车辆的运动过程,该步骤对车辆车轮分别给予水平移动力,并赋予该车轮在 Y 轴方向行驶转动。由于在计算过程中不需要考虑车辆变形同时减少计算量,将车辆整体设置为刚体。

3 移动荷载作用下不平顺路面结构时程响应分析

当车辆在路面行驶过程中,路基所受应力应变及表面加速度是评判其动力响应的三个标志,因此在 ABAQUS 有限元模型分析步中仅设置该三种变形标准。有限元计算方法采用 ABAQUS 软件中的隐式动力学功能进行整体模型的计算求解。该试验主要分析车辆在其行驶过程中速度、载荷及车辆数量对该反 h 桩路基结构下的影响情况。在分析过程中均采用道路两旁路面中心点进行进行分析。

3.1 不同速度下路面结构动力响应分析

当车辆行驶在不同路段时,其速度也会产生一定的变化,在埋置有反 h 型桩的路面同样适用。因此研究车辆在埋有反 h 型桩路面行驶产生的动力响应具有十分重大的意义。

表 2 为在一辆车在恒载状态下以不同的速度行驶产生的动力响应变化曲线。由图 3~ 图 5 可知,在不同速度行驶下的表面最大竖向压应力、表

面最大应变和表面最大振动加速度并不是单纯的随着速度的增大而上升或下降,而是随着速度增大产生表面最大竖向压应力、表面最大应变和表面最大振动加速度逐渐减小,而在 20 m/s 时产生一个拐点,随后各数值不断增大。在随后增大的过程中,各点的增大幅度均小于之前的下降幅度,即在速度通过拐点后,各项数值均呈现趋于平缓的趋势。

表 2 车辆行驶速度对陡坡路基动力响应影响

车辆行驶速度 / (m/s)	表面最大竖向压应力 /MPa	表面最大应变 /mm	表面最大振动加速度 / (m·s ⁻²)
12	0.187	0.312	0.426
16	0.164	0.337	0.398
20	0.158	0.356	0.342
24	0.142	0.328	0.297
28	0.139	0.301	0.246

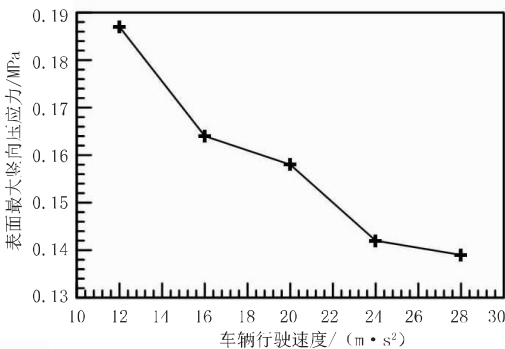


图 3 面层表面最大竖向压应力

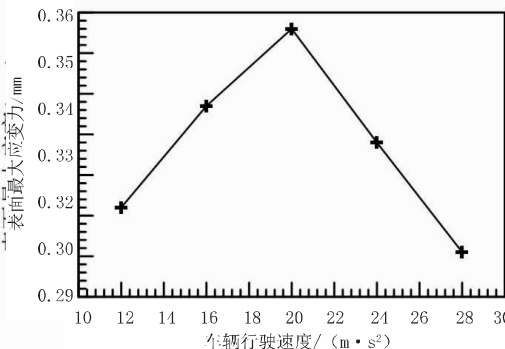


图 4 面层表面最大竖向应变

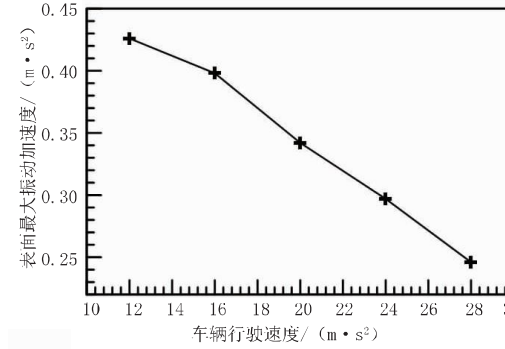


图 5 面层表面最大加速度

3.2 不同载荷下路面结构动力响应分析

为了能够充分研究不同荷载对反 h 型桩路面动力响应的影响作用,因此分别考虑车辆在满载、恒载及空载作用下的路面响应作为对比研究不同情况下的变形程度。在有限元计算过程中,通过国内陕汽重卡、一汽、二汽的相关产品数据和《公路工程技术标准》(JTG B01—2014),其恒载及满载状态其荷载分别可达到 15.2 kN 和 17.3 kN。此时,车辆将以 20 m/s(72 km/h)的速度在车道上行驶,模型在不同荷载情况下的动力响应结果见表 3。

表 3 车辆荷载对陡坡路基动力响应影响

荷载类型	表面最大竖向压应力 /MPa	表面最大应变 /mm	表面最大振动加速度 / (m·s ⁻²)
①空载	0.346	12.764	0.344
②恒载	1.304	15.246	0.462
③重载	1.706	20.154	0.579

通过 ABAQUS 有限元软件模拟不同荷载车辆行驶过程,通过图 6~ 图 8 可知表面最大竖向压应力、表面最大应变和表面最大振动加速度在空载、恒载及重载下路堤表面的变化规律呈相同的变化趋势,三者均随车辆的内部荷载的增加而不断增大。但表面应变变化值相较于竖向压应力变化值及最大加速度值在经过重载车辆时会产生更大的变化值,可得出在陡坡路堤结构路面,较大的重力将会对地基路面造成较大的影响,进一步说明在动荷载情况下试验设计的合理性。

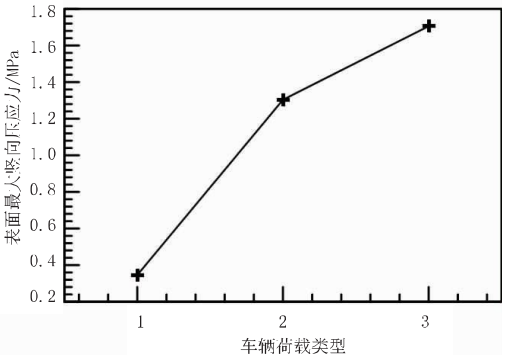


图 6 面层表面最大竖向压应力

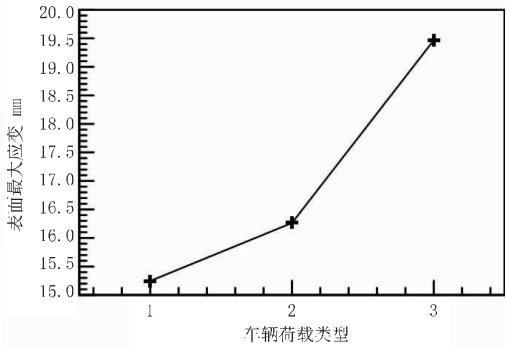


图 7 面层表面最大竖向位移

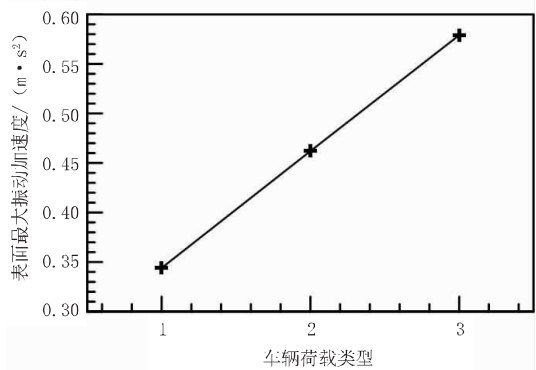


图 8 面层表面最大加速度

3.3 不同移动荷载数量对路面结构动力相应分析

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTC D60—2015)规定,在双向车道,车辆应保持 50 m 安全距离,本文模型尺寸道路长度为 70 m,因此在该模型最大可同时行驶 3 辆车,分别模拟 1~3 辆在恒载状态下以 20 m/s 行驶速度在反 h 桩陡坡表面车道行驶,见表 4。

表 4 车辆数量对陡坡路基动力响应影响

车辆数量	表面最大竖向压应力 /MPa	表面最大应变 /mm	表面最大振动加速度 /(m·s ⁻²)
1	1.304	15.246	0.462
2	1.564	16.264	0.584
3	1.834	19.466	0.712

由图 9~ 图 11 可得,在设有反 h 型桩的陡坡路基路段,分别设计一辆,二辆及三辆汽车依次行驶该段路面。由图所示,该段陡坡路基所受最大竖向压应力、最大变形及表面加速度随行驶车辆数量的增加而不断增大,整体呈正比例上升趋势。其中,当车辆行驶数量由一辆增加至两辆时,陡坡路基所受到大应变呈现一处缓慢增长,当车辆行驶数量增加至三辆时,陡坡路基所受最大应变发生一个较大的增长,其变化原因可能是由于不同车辆在行驶过程中相互作用产生的影响效果,同时,可验证该试验设计的合理性。

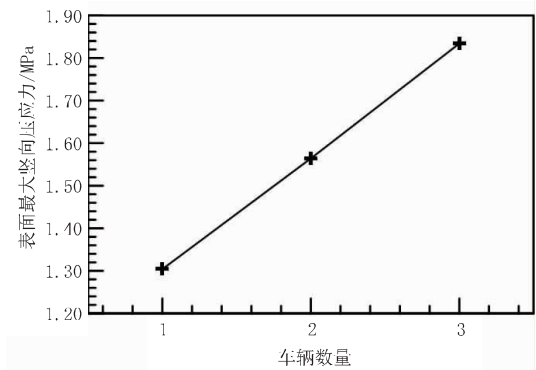


图 9 面层表面最大竖向压应力

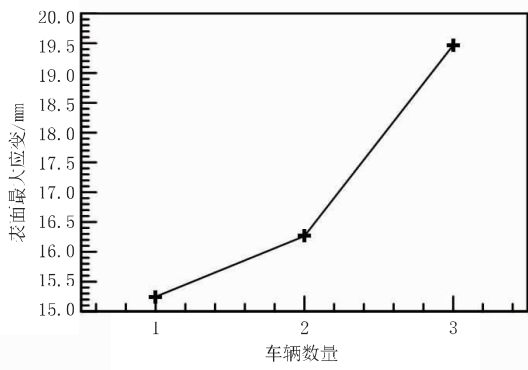


图 10 面层表面最大竖向位移

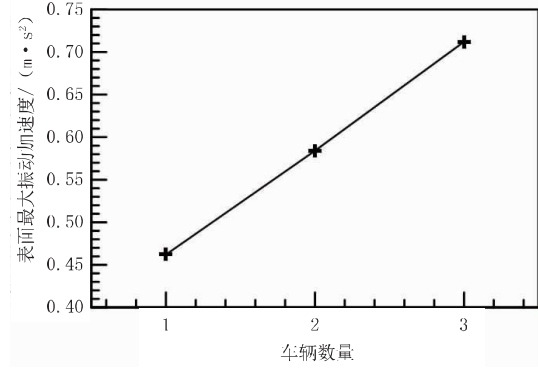


图 11 面层表面最大加速度

4 结 论

本文通过 ABAQUS 数值模拟的方法研究在不同车速、载荷及数量情况下车辆行驶对设有反 h 型桩的陡坡路基的影响,其研究结果如下:

(1)当载荷及汽车数量相同的情况下,陡坡路基所受最大应力应变及加速度并不随着车辆行驶速度的增加而增大,随着车辆行驶速度的增加,陡坡路基所受应力应变及加速度逐渐减小,当车辆行驶速度达到 20 m/s 时出现拐点,随后在此基础上随着速度的增加不断增大。

(2)在一辆车以 20 m/s 的速度行驶中,陡坡路基所受最大应力应变及加速度均随着车辆载荷的增加呈正比例增大,且动力相应变化符合变化标准。

(3)通过不同数量车辆在陡坡路基行驶过程可得,车辆行驶数量的增加对其道路的影响较大,且当该路段行驶数量大于 2 辆时,陡坡路基最大应变发生了较明显的变化,在实际行驶过程中应保持最大安全距离。

参考文献:

[1] 交通部公路司.公路工程质量通病防治指南[M].北京:人民交通出版社,2002.
[2] 蒋荣超,刘大维,王松,等.时域和空间域路面激励下重型车辆动荷载仿真分析[J].公路交通科技,2012,29(5):152-158.

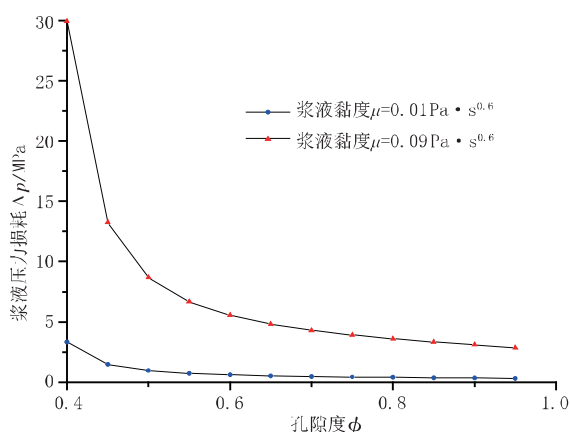


图5 浆液压力损耗随孔隙度的变化规律

($\tau_0=0.003 \text{ Pa}$, $L_0=0.5 \text{ m}$, $D_f=1.9$)

(2) 孔隙通道的曲折度分形维数对浆液在孔隙介质中的扩散规律具有显著影响。受注介质的孔隙通道曲折度分形维数越大, 则孔隙通道的真实长度越长, 同时孔隙通道的接触面积越大, 浆液在孔隙通道中扩散时所受的剪切力也越大。因此, 浆液在高孔隙通道曲折度分形维数的多孔介质中扩散时, 其压力损耗较大。

(3) 浆液的流体特性是影响浆液在孔隙介质中扩散规律的一个重要参数。浆液的黏度越大, 则浆液的流变性能越差, 浆液在孔隙通道中扩散的能耗也越大。

参考文献:

- [1] 杨坪, 唐益群, 彭振斌, 等. 砂卵(砾)石层中注浆模拟试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2134-2138.
- [2] 杨秀竹, 王星华, 雷金山. 宾汉体浆液扩散半径的研究及应用[J]. 水利学报, 2004(6): 75-79.
- [3] 杨秀竹, 雷金山, 夏力农, 等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 112-115.
- [4] 邹金锋, 李亮, 杨小礼. 劈裂注浆扩散半径及压力衰减分析[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 314-319.
- [5] 邹金锋, 童无欺, 罗恒, 等. 基于 Hoek-Brown 强度准则的裂隙岩体劈裂注浆力学机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(7): 2889-2896.
- [6] 王晓晨, 刘人太, 张春雨, 等. 裂隙注浆浆液浓度分布试验研究与机制探讨[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2872-2879.
- [7] 沙飞, 李术才, 林春金, 等. 砂土介质注浆渗透扩散试验与加固机制研究[J]. 岩土力学, 2019(11): 1-11.
- [8] 张志沛, 彭惠, 饶晓. 软土地基注浆扩散过程数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 652-655.
- [9] 杨志全, 侯克鹏, 程涌, 等. 幂律型流体的柱-半球形渗透注浆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 3840-3846.
- [10] 杨志全, 牛向东, 侯克鹏, 等. 流变参数时变幂律型水泥浆液的柱形渗透注浆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1415-1425.
- [11] 杨志全, 侯克鹏, 郭婷婷, 等. 黏度时变宾汉体浆液的柱-半球形渗透注浆机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2697-2703.
- [12] XU P, YU B. Developing a new form of permeability and Kozeny-Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry [J]. Advances in Water Resources, 2008, 31(1): 74-81.
- [13] XIAO B, FAN J, FENG D. A fractal analytical model for the permeabilities of fibrous gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells [J]. Electrochimica Acta, 2014, 134(21): 222-231.
- [14] LIANG M, YANG S, YU B. A fractal streaming current model for charged microscale porous media [J]. Journal of Electrostatics, 2014, 72(6): 441-446.
- [15] WANG S, YU B, ZHENG Q, et al. A fractal model for the starting pressure gradient for Bingham fluids in porous media embedded with randomly distributed fractal-like tree networks [J]. Advances in Water Resources, 2011, 34(12): 1574-1580.
- [3] 侯占峰. 基于时域模型的车轮随机动载特性仿真分析[J]. 拖拉机与农用运输车, 2010, 37(6): 35-37.
- [4] 清华大学汽车实验室测试技术组. 信号处理实例[Z]. 1982.
- [5] 姚祖康, 等. 路面管理系统[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.
- [6] 孙璐, 邓学钧. 平整度与机场道面谱分析[J]. 华东公路, 1996(2): 35-39.
- [7] JTC D60—2015. 公路桥涵设计通用规范[S].
- [8] 《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》[Z]. 2004.

(上接第165页)