

文章编号:1671-8879(2014)04-0045-07

公路软基过渡段车辆振动特性影响因素

高志伟^{1,2},雷 剑²,王选仓²

(1. 西藏民族学院 信息工程学院,陕西 咸阳 712082; 2. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为了分析沉降变形后路面结构对车辆行驶振动特性的影响作用,采用两自由度1/4车辆模型及随机激励与离散型激励相结合的路面模型建立车辆路面耦合系统,以车身垂向振动加速度为指标,分析了路面变形模式、车辆参数、车辆行驶速度、行驶方向等因素对车辆行驶振动响应量的影响规律。研究表明:绝对沉降量相同时,不同路面变形模式下车辆垂向振动加速度相差为32.2%~84.6%,车身垂向振动加速度对大于80 km/h的车速变化较为敏感,路面破坏变形模式与车辆行驶速度是影响车辆振动特性的主要因素,制定基于车辆振动特性的沉降控制标准时,应针对不同沉降变形模式与不同车速分别制定相应的控制标准。

关键词:道路工程;振动特性;动力响应分析;公路软基;过渡段

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

Influencing factors for vehicle vibration characteristics in transition section of highway soft ground

GAO Zhi-wei^{1,2}, LEI Jian², WANG Xuan-cang²

(1. School of Information Engineering, Tibet University for Nationalities, Xianyang 712082, Shaanxi, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to analyze the influence on vehicle vibration characteristics after settlement deformation occurred on pavement structure, a vehicles pavement coupled system was established by 1/4 vehicle model with two degrees of freedom, random excitation pavement model and discrete incentive model. Take vertical vibration acceleration as indicator, influence to vehicle vibration response from pavement deformation mode, vehicle parameters, speed, travel direction and other factors were analyzed. The results show that difference of vehicle vertical vibration acceleration of different pavement deformation mode are about 32.2% to 84.6% with the same absolute settlement, vertical vibration acceleration is more sensitive to speed change when it is higher than 80 km/h. Pavement deformation mode and vehicle speed are major factors of influencing vehicle vibration characteristics, the settlement control standards based on vehicle vibration characteristics should consider the settlement deformation mode and speed. 6 tabs, 11 figs, 11 refs.

Key words: road engineering; vibration characteristic; dynamic response analysis; highway soft ground; transition section

收稿日期:2013-08-20

基金项目:河北省交通科技项目(Y2010049);西藏自治区自然基金项目(12KJZRZMY01);西藏民族学院青年学人培育计划资助项目(13myQP08);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1321038)

作者简介:高志伟(1984-),男,山西浑源人,西藏民族学院讲师,长安大学工学博士,E-mail:gaozhiwy@163.com。

0 引言

复合地基法是目前处治公路软土地基的常用技术之一,经过加固处理的软土地基承载力显著提高,工后沉降大大降低,使得软基与普通路基过渡段容易发生差异沉降,从而引起路面开裂、错台等病害的产生^[1-3]。在路面不平度激励下,车辆会产生振动响应,改变其行驶状态及行驶方向,降低了车辆行驶的舒适性与安全性^[4-7]。因此,控制沉降成为公路软基路段施工质量控制的关键环节,尽管在设计及施工过程中将软基路段作为重点工程进行处治,但实际工程中软基路段路面病害仍无法避免,其主要原因是目前公路软基设计施工缺乏科学合理的沉降控制标准^[8]。

现行公路路基设计规范中对不同路基段工后沉降值作出了具体说明,该标准不同路段沉降允许值相差较大,不利于有效控制路基差异沉降。目前,中国尚未建立一套完整的车辆与公路路面相互作用动力学特性评价体系。有关学者以车辆行驶时驾乘人员舒适度为指标建立了相应的沉降控制标准,但该标准受车辆类型、车辆性能影响较大,且舒适度标准的制定以国际标准化组织提出的 ISO2631《人体承受全身振动的评价指南》中长时间持续振动对人体影响为基础,不能直接反映车辆行驶时的振动特性^[9-11]。为此,本文以车辆垂向振动加速度为指标,通过建立车辆路面耦合系统模型,对路面结构破损后车辆振动特性影响因素进行分析,研究路面变形模式、车辆参数、车辆行驶速度、行驶方向等因素对车辆行驶振动响应量的影响作用,确定车辆振动特性关键影响因素,为制定基于车辆振动特性的沉降控制标准提供依据。

1 车辆-路面耦合系统模型建立

1.1 车辆模型建立与参数选择

本文在车辆行驶平顺性的分析中主要以车辆垂向振动加速度为指标进行研究,车辆路面耦合系统中的车辆模型采用两自由度的 1/4 模型。该模型中对车辆的假设包括:车身为刚体;车辆在行驶过程中只发生垂向振动;车辆在平直路面上行驶时,路面与轮胎始终保持接触。

两自由度 1/4 车辆模型系统如图 1 所示,应用牛顿第二定律可得

$$\begin{cases} m_s \ddot{z}_s + c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_t) + k_s(z_s - z_t) = 0 \\ m_t \ddot{z}_t - c_s(\dot{z}_s - \dot{z}_t) - k_s(z_s - z_t) + \\ k_t(z_t - z_w) + c_t(\dot{z}_t - \dot{z}_w) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

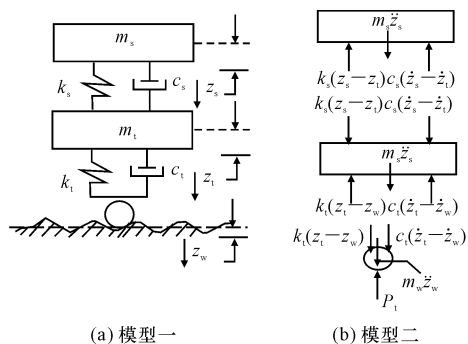


图 1 1/4 车辆模型

Fig. 1 1/4 vehicle model

$$m_w \ddot{z}_w - k_t(z_t - z_w) - c_t(\dot{z}_t - \dot{z}_w) + P_t = 0 \quad (2)$$

式中: m_s 为悬挂系统质量; m_t 为非悬挂系统质量; m_w 为轮胎质量; k_s 为悬挂系统刚度; k_t 为轮胎刚度; c_s 为悬挂系统阻尼; c_t 为轮胎阻尼; z_s 为悬挂系统竖向位移; z_t 为非悬挂系统竖向位移; z_w 为轮胎竖向位移; P_t 为车辆作用于道路的动荷载。

进行车辆模型参数选择时,选取中国产某微型轿车和载重汽车作为基本分析车型,车辆参数如表 1 所示。

表 1 车辆模型参数

Tab. 1 Vehicle model parameters

车辆参数	微型轿车	载重轿车
悬挂系统质量/kg	320	2 225
非悬挂系统质量/kg	25	245
轮胎质量/kg	26	50
悬挂系统刚度/(kN · m ⁻¹)	15 000	1 000 000
非悬挂系统刚度/(kN · m ⁻¹)	117 000	1 750 000
悬挂系统阻尼/(N · s · m ⁻¹)	1 082	15 000
轮胎阻尼/(N · s · m ⁻¹)	0	2 000
车体静重/N	3710	252 000

1.2 路面激励模型构造

路面激励模型包括随机激励和离散型激励两部分,随机激励模拟路面平整度变化,离散激励模拟路面某处发生变形破坏后的空间特征。对于发生沉降变形的软基过渡段路面激励模型是由随机激励和离散型激励叠加而成的模型。对于随机激励,可以根据一些仿真软基中给出的标准函数进行构造, MATLAB/SIMULINK 计算软件中就存在这一类型的函数。对于离散型激励,通常采用确定的时间函数进行描述。

本文路面随机平整度数据生成是基于 MATLAB/SIMULINK 环境实现的,路面平整度生成方法采用谐波叠加法。其主要原理是采用大量随机相位的正弦、余弦波叠加表示路面平整度。输入

有效空间频率上限值和下限值,参考空间频率、频率指数、路面平整度系数、路面模型长度、随机采样的步长等参数就可以生成随机路面激励的平整度值。对路面激励模型中的离散型激励采用确定性函数进行模拟。

1.3 路面结构模型振动方程建立

路面结构模型动力方程可表示为

$$m\ddot{\delta} + c\dot{\delta} + k\delta = p \quad (3)$$

式中: m 、 k 、 c 分别为路面结构模型质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; δ 、 $\dot{\delta}$ 、 $\ddot{\delta}$ 分别为路面结构模型位移矢量、速度矢量、加速度矢量; p 为路面结构模型荷载矢量。

路面结构有限元模型节点较多,式(1)与式(3)联立进行计算难度较大,可以先对路面结构的子结构进行模态分析,将式(3)转化为相互独立的模态方程。在路面随机激励模拟时保证一般车辆振动的频率范围能够包括道路各阶振动频率。在分析计算中取前几阶振型即可,以减小计算量。由振型分解得到对应于第 n 阶振型的模态方程为

$$M_n \ddot{A}_n + C_n \dot{A}_n + K_n A_n = P_n \quad (4)$$

式中: M_n 、 K_n 、 C_n 分别为广义质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; A_n 为广义坐标矩阵, P_n 为第 n 阶振型广义力。

广义力 P_n 包括车辆静载与动载,动载 P_t 的表达式为式(2), P_n 表达式为

$$P_n = \varphi_n(x)(P_t + P_s) = \varphi_n(x)[k_t(z_t - z_w) + c_t(\dot{z}_t - \dot{z}_w) - m_w \ddot{z}_w + P_s] \quad (5)$$

式中: $\varphi_n(x)$ 为路面结构水平位置 x 处第 n 阶振型函数; P_s 为车辆静载。

路面结构模型中某一横截面处竖向位移 $z_r(x)$ 可由各阶振型函数叠加而成,其表达式为

$$z_r(x) = \sum_{n=1}^N A_n \varphi_n(x) \quad (6)$$

2 车辆路面耦合系统模型求解

2.1 位移联系方程建立

根据本文假定,车辆行驶时路面与轮胎始终保持接触,路面结构竖向位移与车辆轮胎竖向位移相等,路面竖向位移由路面平整度值和振动产生的竖向位移组成。因此,轮胎竖向位移 z_w 可表示为

$$z_w = z_r(x) + z_p(x) \quad (7)$$

式中: $z_p(x)$ 为离散型路面激励函数。

式(7)为轮胎与路面位移联系方程,通过该方程将路面动力平衡方程与车辆振动平衡方程联立,建

立车辆路面耦合系统动力平衡方程。

将式(6)代入式(7)中就可得

$$z_w = \sum_{n=1}^N A_n \varphi_n(x) + z_p(x) \quad (8)$$

2.2 车辆路面耦合系统动力平衡方程建立

将车辆振动平衡方程与路面结构振动平衡方程联立,并将位移方程式(8)代入得出车辆路面耦合系统动力平衡方程组为

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_s \\ z_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & -c_s \\ -c_s & c_s + c_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_s \\ \dot{z}_t \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} k_s & -k_s \\ -k_s & k_s + k_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_s \\ z_t \end{bmatrix} = \{k_t[z_p(x) + \\ & \sum_{n=1}^N A_n \varphi_n(x)] + c_t[z_p(x) + \sum_{n=1}^N A_n \varphi_n(x)]\} A_n + \\ & 2\xi_n \omega_n A_n + \omega_n^2 A_n = \varphi_n(x)(k_t z_t + c_t \dot{z}_t + P_s) - \\ & \varphi_n(x)\{k_t[\sum_{n=1}^N A_n \varphi_n(x) + z_p(x)] + \\ & c_t[\sum_{n=1}^N A_n \varphi_n(x) + \dot{z}_p(x)]\} - \\ & \varphi_n(x)m_w[\sum_{n=1}^N A_n \varphi_n(x) + \ddot{z}_p(x)], \\ & n=1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (9)$$

式中方程总数为 $N+2$, N 为路面结构子模型的模态方程组数,计算时取低阶振型进行叠加。

车辆路面耦合系统动力平衡方程组是一个高度的二阶非线性微分方程组。求解该方程组可以得出任一位置处悬挂系统和非悬挂系统的位移、速度和加速度。

2.3 车辆路面耦合系统动力平衡方程求解

根据本文分析原理,采用MATLAB计算软件编制车辆路面耦合系统振动响应量求解程序,通过输入车量参数和路面结构模型参数,生成车辆路面系统振动方程,并对方程进行求解,不同路面变形模式下路面激励仿真分析结果如下页图2所示。

3 车辆行驶振动特性影响因素敏感性

3.1 路面变形模式对车辆振动特性影响分析

为了对比分析不同路面变形模式对车辆振动特性影响的差异性,对沉降区长度相同、绝对沉降值相同的各种路面变形模式下车辆振动特性进行计算分析。沉降区长度取10、20 m两种工况,绝对沉降值取1、2、5、8 cm,车辆行驶速度为100 km/h。采用本文建立的车辆路面耦合系统模型及计算方法对不同工况下的车辆垂向振动加速度进行分析计算,结果如下页表2、表3所示。

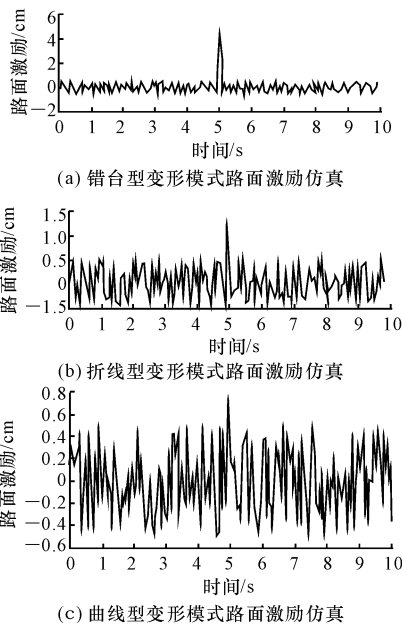


图2 不同路面变形模式下路面激励仿真分析结果
Fig.2 Simulation results of pavement with different deformation modes

表2 沉降区长度 10 m 时不同路面变形模式下车身垂向振动加速度
Tab.2 Vertical vibration acceleration with different pavement deformation (settlement area 10 m)

绝对沉降值/cm	不同路面变形模式下车身垂向振动加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		
	错台型	折线型	曲线型
1	1.3	0.3	0.5
2	1.6	1.1	0.9
5	3.6	3.4	2.8
8	8.5	5.6	5.4

表3 沉降区长度 20 m 时不同路面变形模式下车身垂向振动加速度
Tab.3 Vertical vibration acceleration with different pavement deformation (settlement area 20 m)

绝对沉降值/cm	不同路面变形模式下车身垂向振动加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)		
	错台型	折线型	曲线型
1	1.3	0.1	0.2
2	1.6	0.3	0.3
5	3.6	1.3	1.1
8	8.5	2.3	2.3

分析计算结果可以得出:绝对沉降量相同时,折线型路面变形模式下车身垂向振动加速度约为错台型模式的 23.1%~68.8%,曲线型路面变形模式下车身垂向振动加速度约为错台型模式的 15.4%~63.5%,路基沉降后路面变形破坏模式对于车辆振动特性影响较大,以垂向振动加速度为控制指标时,需针对不同沉降类型分别制定相应的沉降控制标准,同时考虑沉降过渡段长度,使路基差异沉降能够得到有效缓和。

3.2 车辆参数对高频振动特性影响分析

3.2.1 不同车型振动响应分析

分别选择小型客车、中型客车、小型货车、中型货车 4 种车型参数建立模型,分析其在不同路面变形模式下的振动特性,分析中沉降区长度为 10 m,绝对沉降值为 5 cm,车辆行驶速度分别取 100、40 km/h,计算结果如图 3、图 4 所示。

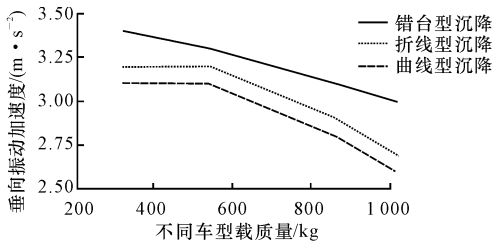


图3 不同车型振动响应变化规律(车速 100 km/h)
Fig.3 Vibration response of different vehicles (100 km/h)

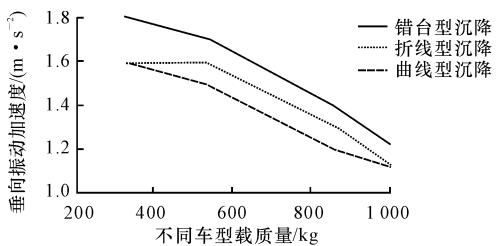


图4 不同车型振动响应变化规律(车速 40 km/h)
Fig.4 Vibration response of different vehicles (40 km/h)

分析计算结果可以得出:轻型车辆行驶在变形后的路面上产生的垂向振动加速度较大,车速为 100 km/h 时,轻型客车垂向振动加速度比中型货车高 11.8%~16.1%,车速为 40 km/h 时,轻型客车垂向振动加速度比中型货车高 16.1%~31.3%。相同工况条件下,轻型车辆振动加速度较大,制定平顺性控制标准时考虑最不利情况应以轻型车辆为标准。

3.2.2 同一车型,不同载质量条件下振动响应分析

采用车辆路面耦合系统分别对空载、半载、满载、超载 4 种载质量条件下车辆对路面变形模式的振动响应特性进行分析,沉降区长度为 10 m,绝对沉降值为 5 cm,车辆行驶速度分别取 100 km/h 和 40 km/h,计算结果下页如图 5,图 6 所示。

分析图 5、图 6 结果可以得出:车速为 100 km/h 时,空载条件下车身垂向振动加速度为 2.0~2.1 m/s^2 ,超载条件下车身垂向振动加速度为 0.7~1.0 m/s^2 ,载质量增加 223.6%,身垂向振动加速度减小 52.3%~65.0%。载质量越大,振动加速度越小,以重型车辆为基本车型制定基于行驶平顺性的

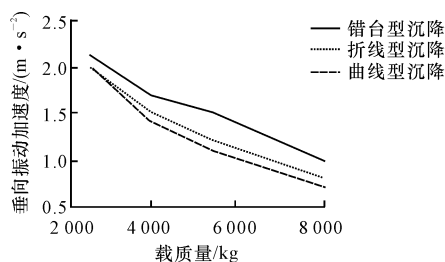


图 5 不同载质量条件下振动响应(车速 100 km/h)

Fig. 5 Vibration response of different loads (100 km/h)

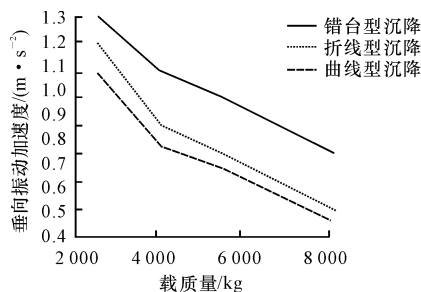


图 6 不同载质量条件下振动响应(车速 40 km/h)

Fig. 6 Vibration response of different loads (40 km/h)

沉降控制标准时,应以空载时的车质量为计算标准。

3.3 车辆行驶速度对高频振动特性影响分析

3.3.1 错台型路面变形模式下车速对振动特性影响

以车辆路面耦合系统模型为基础,对不同车速下车辆经过路面错台时的最大垂向振动加速度进行分析,车辆参数采用微型轿车参数,路面错台高度 s 取 1~6 cm 的 6 种工况,行车速度取值为 40、60、80、100、120 km/h 这 5 种工况,计算结果如图 7 所示。

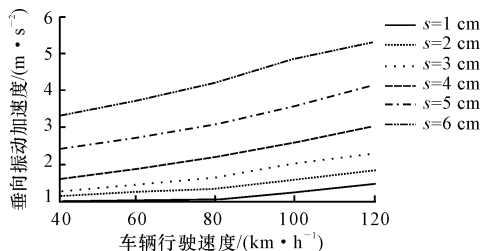


图 7 错台型路面变形模式下车身垂向振动加速度随车速变化规律

Fig. 7 Variation of vehicle vertical vibration acceleration with speed

分析图 7 计算结果可以得出:车辆行驶速度小于 80 km/h 时,车身垂向振动加速度随车速的增长率相对较小,车速大于 80 km/h 后,随车速增加,车身垂向振动加速度增长率逐渐增大,车速每增加 20 km/h,振动加速度增加 12.2%~15.4%,错台型路面变形模式下,车身垂向振动加速度对车速变化较为敏感,以车辆行驶平顺性为指标制定路基沉降控制标准时应针对不同车速分别制定相应标准。

3.3.2 折线型沉降模式下的影响分析

折线型路面坡差 i 分别取 0.1%、0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 五种工况,行车速度取值为 40、60、80、100、120 km/h 五种工况,计算结果如图 8 所示。

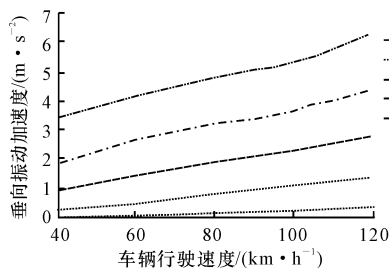


图 8 折线型路面变形模式下车身垂向振动加速度随车速变化规律

Fig. 8 Variation of vehicle vertical vibration acceleration with speed

分析图 8 计算结果可以得出:路面坡差相同条件下,车身垂向振动加速度随车速的增加而增大,车速由 40 km/h 增大到 120 km/h,车身最大垂向振动加速度由 0.1~3.4 m/s² 增加到 0.4~6.3 m/s²,增加 1.9~4.0 倍,与错台型路面变形相比,折线型路面变形条件下车辆振动特性对车速变化更为敏感。折线型路面变形模式下,路面坡差大于 0.2% 时对车辆行驶平顺性影响较严重。以车辆行驶平顺性为指标制定路基沉降控制标准时应针对不同车速分别制定相应标准。

3.3.3 曲线型沉降模式下车速对振动特性影响分析

曲线型路面变形绝对沉降值 s_2 取 1.0、2.0、5.0、8.0 cm 四种工况,沉降区长度取 5、10、20 m 三种工况,行车速度取值为 40、60、80、100、120 km/h 五种工况,计算结果如图 9、下页图 10~图 11 所示。

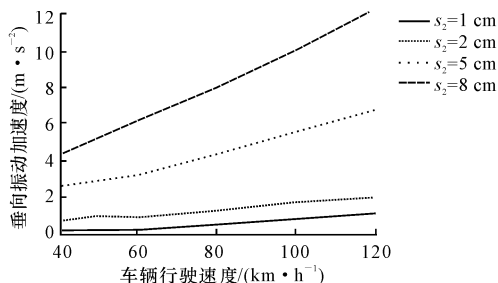


图 9 振动加速度随车速变化规律(沉降区 5 m)

Fig. 9 Variation of vibration acceleration with different speed (settlement area 5 m)

分析图 9 计算结果可知:曲线形路面变形模式下,沉降区长度为 5 m 时,车速由 40 km/h 增加到 120 km/h,车身垂向振动加速度增加 2.5~6.0 倍。沉降区长度为 10 m 时,车速由 40 km/h 增加到 120 km/h,车身垂向振动加速度增加 1.6~3.5 倍;

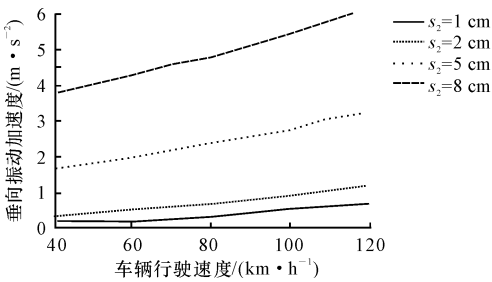


图 10 振动加速度随车速变化规律(沉降区 10 m)
Fig. 10 Variation rules of vibration acceleration with different speeds (settlement area 10 m)

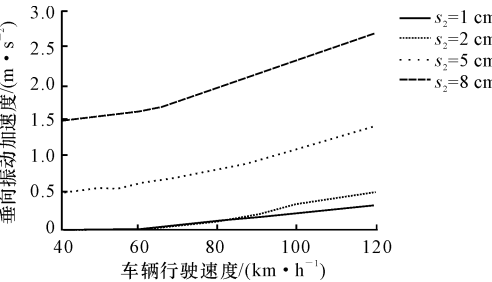


图 11 振动加速度随车速变化规律(沉降区长度 20 m)
Fig. 11 Variation rules of vibration acceleration with different speeds (settlement area 20 m)

沉降区长度为 20 m 时,车速由 40 km/h 增加到 120 km/h,车身垂向振动加速度增加约 1.8 倍,随着沉降区长度增加,振动加速度随车速增长率减缓,适当延长软基过渡段长度,可以有效降低路面变形对车辆振动特性的影响,提高行驶平顺性。

曲线形路面变形模式下,车身垂向振动加速度对车速及沉降区长度变化均较为敏感,以车辆行驶平顺性为指标制定路基沉降控制标准时应针对不同车速和不同沉降区长度分别制定相应标准。

3.4 车辆行驶方向对振动特性影响分析

对不同路面变形模式下车辆正向行驶和逆向行驶时的振动响应量进行分析,行驶方向示意图如图 12 所示。

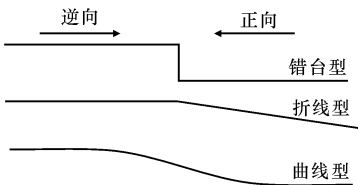


图 12 车辆行驶方向示意图
Fig. 12 Vehicle traveling direction

路面变形模式取错台型、折线型、曲线形三种工况,错台型路面变形错台高度分别为:1、2、4、6 cm,折线型路面变形沉降坡差为 0.1%、0.2%、0.4%、0.8%,曲线形路面变形沉降绝对值为 1、2、5、8 cm,

沉降区长度为 10 m,行车速度取值 40、80、100 km/h 三种工况,计算结果如表 4~表 6 所示。

表 4 错台型变形模式下不同行驶方向时车身最大垂向振动加速度

Tab. 4 Largest vertical vibration acceleration of different driving directions							m/s ²	
沉降台阶高度/cm	车速 100 km/h		车速 80 km/h		车速 40 km/h			
	正向	逆向	正向	逆向	正向	逆向		
1	1.3	1.3	1.1	1.1	1.0	1.0		
2	1.6	1.5	1.4	1.4	1.2	1.2		
4	2.6	2.5	2.2	2.3	1.7	1.7		
6	4.8	4.7	4.2	4.1	3.3	3.3		

表 5 折线型变形模式下不同行驶方向时车身最大垂向振动加速度

Tab. 5 Largest vertical vibration acceleration of different driving directions							m/s ²	
沉降坡差	车速 100 km/h		车速 80 km/h		车速 40 km/h			
	正向	逆向	正向	逆向	正向	逆向		
0.1	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1		
0.2	1.1	1.1	0.8	0.8	0.3	0.3		
0.4	2.3	2.3	1.9	1.9	1.0	1.0		
0.8	5.3	5.3	4.8	4.8	3.4	3.4		

表 6 曲线型变形模式下不同行驶方向时车身最大垂向振动加速度

Tab. 6 Largest vertical vibration acceleration of different driving directions							m/s ²	
绝对沉降量	车速 100 km/h		车速 80 km/h		车速 40 km/h			
	正向	逆向	正向	逆向	正向	逆向		
1	0.5	0.5	0.3	0.3	0.2	0.2		
2	0.9	0.9	0.7	0.7	0.3	0.3		
5	2.8	2.8	2.4	2.4	1.7	1.7		
8	5.4	5.4	4.8	4.8	3.8	3.8		

分析表 4 和表 6 计算结果可以得出:对于不同的路面变形模式,车辆正向行驶和逆向行驶时车身最大垂向振动加速度基本相同,行驶方向对车辆行驶平顺性影响较小,尤其是车速较低时,行驶方向对振动特性基本无影响,制定基于行驶平顺性的沉降控制标准时可不考虑行车方向的影响。

4 结 语

(1)绝对沉降量相同时,折线型路面变形模式下车身垂向振动加速度约为错台型模式的 23.1%~68.8%,曲线型路面变形模式约为错台型模式的 15.4%~63.5%,路面变形破坏模式对于车辆振动特性影响较大,以垂向振动加速度为控制指标时,需针对不同沉降类型分别制定相应的沉降控制标准。

(2)相同工况时,轻型客车行驶在变形后的路面上产生的垂向振动加速度较大,车速为 100 km/h,轻型客车垂向振动加速度比中型货车高 11.8%~

16.1%,车速为40 km/h时,轻型客车垂向振动加速度比中型货车高16.1%~31.3%,制定平顺性控制标准时考虑最不利情况应以轻型车辆为标准。

(3)错台型与折线型路面变形模式下,车身垂向振动加速度对车速变化较为敏感,以车辆行驶平顺性为指标制定路基沉降控制标准时应针对不同车速分别制定相应标准,曲线形路面变形模式下应针对不同车速和不同沉降区长度分别制定相应标准。

参考文献:

References:

- [1] 徐毅,洪宝宁,符新军,等. CFG桩复合地基加固高速公路软基的现场试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(3): 305-309.
- XU Yi, HONG Bao-ning, FU Xin-jun, et al. In-situ experiments of CFG pile composite foundation for strengthening soft foundations of highway[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(3): 305-309. (in Chinese)
- [2] 周爱军, 栗冰. CFG桩复合地基褥垫层的试验研究和有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1803-1808.
- ZHOU Ai-jun, LI Bing. Experimental study and finite element analysis of cushion in CFG pile composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1803-1808. (in Chinese)
- [3] 但汉成, 李亮, 赵炼恒, 等. CFG桩复合地基桩土应力比计算与影响因素分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(5): 7-12.
- DAN Han-cheng, LI Liang, ZHAO Lian-heng, et al. Calculation and influence factors analysis on pile-soil stress ratio of CFG pile composite foundation[J]. China Railway Science, 2008, 29(5): 7-12. (in Chinese)
- [4] 廖公云, 黄晓明, 杨庆刚. 不同路面结构对软基不均匀沉降的适应性研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(4): 34-38.
- LIAO Gong-yun, HUANG Xiao-ming, YANG Qing-gang. Adaptability of different asphalt pavement structures on soft ground with differential settlements [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(4): 34-38. (in Chinese)
- [5] 梁波, 苏世毅, 罗红. 不平整条件下车-路耦合作用动力分析[J]. 工程力学, 2009, 26(3): 189-194.
- LIANG Bo, SU Shi-yi, LUO Hong. Coupled dynamic

analysis of vehicle-road system under roughness conditions[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(3): 189-194. (in Chinese)

- [6] 王国林, 胡蛟, 钱金戈, 等. 路面对汽车非平稳激励的时域仿真及小波分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 803-805, 811.

WANG Guo-lin, HU Jiao, QIAN Jin-ge, et al. Simulation in time domain for non stationary road disturbances and its wavelet analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(7): 803-805, 811. (in Chinese)

- [7] 葛剑敏, 郑联珠. 路面特性对车辆振动影响规律研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 117-121.

GE Jian-min, ZHEN Lian-zhu. Effects of terrain characteristic on vehicle vibration[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 117-121. (in Chinese)

- [8] 周华飞, 蒋建群, 毛根海. 路面不平整引起的车辆动荷载分析[J]. 中国市政工程, 2002, 30(3): 10-13.

ZHOU Hua-fei, JIANG Jian-qun, MAO Gen-hai. Analysis of dynamic vehicle load caused by pavement roughness[J]. China Municipal Engineering, 2002, 30(3): 10-13. (in Chinese)

- [9] 于清, 曹源文. 不平整路面上的汽车动荷载[J]. 重庆交通学院学报, 2003, 22(4): 32-34.

YU Qing, CAO Yuan-wen. Vehicle dynamic loads caused by the surface evenness [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2003, 22(4): 32-34. (in Chinese)

- [10] 梁波. 高速铁路路基的动力特性及土工合成材料的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1998.

LIANG Bo. The dynamic characteristics of high speed railway subgrade and geosynthetics' application[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1998. (in Chinese)

- [11] 梁波, 张艳美, 韩自力. 京秦提速工程车-路动力仿真与试验的对比研究[J]. 工程力学, 2004, 21(1): 159-164.

LIANG Bo, ZHANG Yan-mei, HAN Zi-li. Dynamic computer simulation and experimental investigation of the vehicle subgrade system for the speed enhancement and remodeling engineering of the Jing-Qin railway line [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(1): 159-164. (in Chinese)

