

文章编号: 1000-7598 (2009) 04-0890-07

交通荷载作用下 Kelvin 地基上 不平整路面的动力响应分析

姚海林¹, 卢 正¹, 罗海宁², 杨 洋¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 中国长航集团工程总公司, 武汉 430014)

摘 要: 为了评价不平整路面在交通荷载作用下的动态响应, 从路面几何不平整出发, 假设路面不平整服从正弦函数曲线, 并把 1/4 车身结构简化为 2 个自由度振动体系, 得到了不平整路面上的动荷载表达式。又将此荷载模式看成是作用在 Kelvin 地基上无限大路面板表面的移动矩形荷载, 采用双重 Fourier 变换方法得到了不平整无限大路面板竖向位移的积分形式解, 此解析解可以退化为静荷载作用下的经典解答。并利用快速傅立叶变换(FFT)方法得到了数值计算结果。分析了荷载速度, 路面不平整波长、不平整幅值以及地基阻尼和地基刚度对板的动力响应的影响。结果表明, 板竖向位移的分布受荷载移动速度的影响; 位移幅值随着路面不平整波长和荷载速度的变化出现 2 个峰值; 路面不平整使得位移峰值出现滞后现象, 且不平整波长越小或不平整幅值越大, 滞后现象越明显。

关 键 词: 交通荷载; 不平整路面; 双重 Fourier 变换; 动力响应

中图分类号: U 416

文献标识码: A

Dynamic response of rough pavement on Kelvin foundation subjected to traffic loads

YAO Hai-lin¹, LU Zheng¹, LUO Hai-ning², YANG yang¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Chinese Changhang Group Inc, Wuhan 430014, China)

Abstract: To evaluate the dynamic responses of rough pavement subjected to traffic loads, research is focused on the geometric roughness of pavement, and by regarding the pavement roughness as sine function and simplifying the quarter vehicle to a two DOF vibration system, the dynamic loads expressions of the system are obtained and used to analyze the steady-state responses of infinite rough pavement on Kelvin foundation. The theoretical solutions of vertical displacement of the pavement are derived using the double Fourier transform, and the solutions can be degenerated to the corresponding classical solution of static problem. By employing fast Fourier transform (FFT), the numerical results are obtained and used to analyze the influence of moving load velocity, rough pavement parameters and foundation parameters on the dynamic displacement responses. Computed results show that the distribution and variation of pavement's vertical displacement are influenced by load moving velocity. Two peaks of the deflection can be observed with increase of the rough pavement wavelength and the load velocity because of resonance. The lag effect of maximum displacement caused by pavement roughness becomes strong with the decrease of rough pavement wavelength and the increase of rough pavement amplitude.

Key words: traffic loads; rough pavement; double Fourier transform; dynamic response

1 前 言

用弹性地基上的薄板理论来分析路面结构的动力响应已经得到了广泛应用, 工程中常用该理论结

合静荷载条件作为路面设计的依据^[1]。然而, 车辆荷载是一种施加在路面上的运动荷载, 受到车辆构造、路面性能、路表状况、行车速度等因素的影响, 因此如何精确模拟车辆荷载是研究路基路面系统动

收稿日期: 2008-05-26

基金项目: 西部交通建设科技项目(No. 200531849305); 湖北省自然科学基金(No. 2007ABA033); 岩土力学与工程国家重点实验室项目(SK-LQ016)。

第一作者简介: 姚海林, 男, 1965 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事软基及环境岩土工程及环境岩土工程方面的研究。E-mail: hlyao@whrsm.ac.cn

力响应的关键所在。文献[2]把汽车简化为2个自由度体系,初步分析了车辆荷载和行车速度的关系。文献[3]在上述模型基础上利用随机过程理论,分析了随机动荷载的统计特性,并对荷载试验提出了试验方法和分析手段。文献[4-5]假设路面不平顺为正弦函数,分析了车辆附加动荷载随路面不平顺波长和行车速度的关系。文献[6]直接把车辆附加动荷载简化为 $P(t) = 10 + 5\sin(2\pi ft)$ 的形式,分析了柔性路面的动力响应。文献[7-8]利用有限元方法分别研究了不平顺条件下公路路基和铁路路基的动力响应问题。文献[9]给出了移动点荷载作用下半无限体的动力响应解析解。文献[10]用积分变换法研究了移动荷载下 Kelvin 地基上无限大板的稳态响应问题。文献[11]研究了弹性半空间上高速移动点荷载作用下的动力响应问题。文献[12-13]考虑了地基土的黏滞阻尼,以矩形均布荷载来研究地基的振动问题。文献[14-15]对变幅值荷载下 Winkler 黏弹性地基上无限大板的动力响应进行了研究。

纵观上述研究成果可知,有的研究把重点放在某种简化的车辆模型下附加动荷载的确定^[2-5],却没有将这些荷载形式应用到路基路面结构动力响应的分析中;有的着重研究某种简化的理想荷载作用下的动力响应问题^[9-15],而在考虑汽车动荷载作用时所建的模型与实际荷载作用有较大差距。事实上,受路面不平顺的影响,真正的车辆荷载不仅是大小随时间变化,而且空间位置也是随着时间变化的。

本文在上述研究的基础上,首先从路面不平顺出发,假设路面不平顺服从正弦函数曲线,并把汽车简化为2个自由度振动体系得到了不平顺路面上的动荷载表达式,然后将此荷载模式看成是作用在 Kelvin 地基上无限大路面板表面的移动矩形荷载,采用双重 Fourier 变换方法得到了不平顺无限大路面板竖向位移的积分形式解,此解析解可以退化为静荷载作用下的经典解答,并利用快速傅立叶变换(FFT)方法得到了数值计算结果,分析了荷载速度,路面不平顺波长、不平顺幅值以及地基阻尼和刚度对板的动力响应的影响。

2 问题的模型和基本解

假设路面不平顺服从正弦规律变换,其表达式^[4-5]可以表示为

$$y_0(t) = h_0 \sin(\omega t) \quad (1)$$

式中: h_0 为路面不平顺幅值; $\omega = 2\pi V/\lambda$, V 为荷载运行速度, λ 为路面不平顺波长; t 为时间。

国内外已有的研究报告和实测资料指出:采用 1/4 车身结构的 2 个自由度车辆振动模型来测定车辆垂直振动的加速度时能达到令人满意的精度,而车辆动荷载是车辆垂直振动加速度的函数,因此采用该模型来分析车辆动荷载也不会产生过大的误差^[4]。2 个自由度车辆振动模型如图 1 所示,图中 m_2 为车辆系统后悬挂部分的质量; k_2 为板簧刚度; c_2 后悬挂部分的阻尼; m_1 为后非悬挂部分的质量; k_1 、 c_1 分别为轮胎的刚度和阻尼。

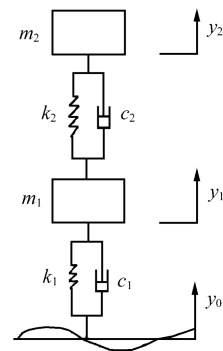


图1 2个自由度车辆振动模型
Fig.1 Two DOF vibration system

该 2 个自由度系统受迫振动的微分方程为

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + c_1(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) + k_1(y_1 - y_0) ; \\ -c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) - k_2(y_2 - y_1) = 0 ; \\ m_2 \ddot{y}_2 + c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) + k_2(y_2 - y_1) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

容易求得系统无阻尼自由振动的固有频率:

$$\left. \begin{aligned} \omega_1^2 &= \frac{1}{2} \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right)^2 - \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2}} ; \\ \omega_2^2 &= \frac{1}{2} \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right)^2 - \frac{k_1 k_2}{m_1 m_2}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

文献[4]给出了 2 个自由度振动系统在式(1)正弦波形路面上的动荷载表达式:

$$F(t) = P_0 + k_1 Z_1 \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

式中各项表达式见式(5)~(8)。

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 0 & \frac{c_1\omega}{m_1} & -\frac{k_2}{m_1} & -\frac{c_2\omega}{m_1} \\ h_0\omega^2 & \frac{k_1}{m_1} - \omega^2 & \frac{c_2\omega}{m_1} & -\frac{k_2}{m_1} \\ 0 & 0 & \frac{k_2}{m_2} - \omega^2 & \frac{c_2\omega}{m_2} \\ h_0\omega^2 & -\omega^2 & -\frac{c_2\omega}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} - \omega^2 \end{vmatrix} \quad (5)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} \frac{k_1}{m_1} - \omega^2 & 0 & -\frac{k_2}{m_1} & -\frac{c_2\omega}{m_1} \\ -\frac{c_1\omega}{m_1} & h_0\omega^2 & \frac{c_2\omega}{m_1} & -\frac{k_2}{m_1} \\ -\omega^2 & 0 & \frac{k_2}{m_2} - \omega^2 & \frac{c_2\omega}{m_2} \\ 0 & h_0\omega^2 & -\frac{c_2\omega}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} - \omega^2 \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{k_1}{m_1} - \omega^2 & \frac{c_1\omega}{m_1} & -\frac{k_2}{m_1} & -\frac{c_2\omega}{m_1} \\ -\frac{c_1\omega}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} - \omega^2 & \frac{c_2\omega}{m_1} & -\frac{k_2}{m_1} \\ -\omega^2 & 0 & \frac{k_2}{m_2} - \omega^2 & \frac{c_2\omega}{m_2} \\ 0 & -\omega^2 & -\frac{c_2\omega}{m_2} & \frac{k_2}{m_2} - \omega^2 \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= (m_1 + m_2)g, \quad g = 9.8 \text{ N/kg}; \\ A_1 &= \Delta_1 / \Delta; \quad A_2 = \Delta_2 / \Delta; \\ Z_1 &= \sqrt{A_1^2 + A_2^2} = \frac{1}{\Delta} \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2}; \\ \theta &= \arctan(A_1 / A_2) = \arctan(\Delta_1 / \Delta_2) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

本文假设路面板满足 Kirchhoff 薄板理论, 地基采用黏弹性 Kelvin 地基, 则无限大路面板的运动控制方程为

$$D\nabla^2\nabla^2 W(x, y, t) + KW + c\frac{\partial W}{\partial t} + \rho_c h\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = q(x, y, t) \quad (9)$$

式中: ∇^2 为二维 Laplace 算子, 且 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$;

K 为地基刚度; c 为黏弹性地基的阻尼常数; D 为板的抗弯刚度, 且有 $D = Eh^3/[12(1-\mu^2)]$; ρ_c 、 h 、 E 和 μ 分别为板的材料密度、厚度、弹性模量和泊松比; $W(x, y, t)$ 为板的竖向位移; $q(x, y, t)$ 为作用于板上的荷载。

问题的边界条件为

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{\partial^n W(x, y, t)}{\partial x^n} = 0; \quad \lim_{y \rightarrow \pm\infty} \frac{\partial^n W(x, y, t)}{\partial y^n} = 0, \quad \left\{ \begin{aligned} (n=0, 1, 2, 3) \end{aligned} \right. \quad (10)$$

假设移动荷载的速度为 V , 沿 x 方向直线运动, 令 $x' = x - Vt$, 并将其代入式(9)可得

$$D\left(\frac{\partial^4 W}{\partial x'^4} + 2\frac{\partial^4 W}{\partial x'^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial y^4}\right) + KW + c\left(\frac{\partial W}{\partial t} - V\frac{\partial W}{\partial x'}\right) + \rho_c h\left(\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} - 2V\frac{\partial^2 W}{\partial x' \partial t} + V^2\frac{\partial^2 W}{\partial x'^2}\right) = q(x', y, t) \quad (11)$$

从式(1)和式(4)可以看出, 当假设路面几何不平整为正弦函数时, 车辆作用在路面上的动荷载可以看成是静荷载和按正弦规律变化的附加动荷载之和, 路面波形函数和附加动荷载函数之间有一个相位差 θ 。为了分析方便, 本文参照式(4), 取初相位 $\theta = 0$, 采用大小随时间变化的矩形简谐荷载来模拟移动荷载, 荷载表达式为

$$q(x', y, t) = \frac{[P_0 + k_1 Z_1 \sin(\omega t)]e^{i\omega_0 t}}{4l_1 l_2} [H(y + l_2) - H(y - l_2)][H(x' + l_1) - H(x' - l_1)] \quad (12)$$

式中: ω_0 为荷载的自振频率; l_1 、 l_2 为荷载的长和宽; H 为 Heaviside 单位阶跃函数; P_0 、 k_1 、 Z_1 、 ω 的意义同式(4)。

本文定义对 x' 、 y 的双重 Fourier 变换及其逆变换为

$$\left. \begin{aligned} \bar{W}(\beta, \gamma, t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(x', y, t) e^{-i(\beta x' + \gamma y)} dx' dy; \\ W(x', y, t) &= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{W}(\beta, \gamma, t) e^{i(\beta x' + \gamma y)} d\beta d\gamma \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

对式(11) x' 、 y 进行双重 Fourier 变换并结合式(10)可得

$$\bar{W}(\beta, \gamma, t) = \frac{[P_0 + k_1 Z_1 \sin(\omega t)] \sin(\gamma l_2) \sin(\beta l_1) e^{i\omega_0 t}}{\beta \gamma l_1 l_2 [D(\beta^2 + \gamma^2)^2 + K + c(i\omega_0 - i\beta V) - \rho_c h(\omega_0 - V\beta)^2]} \quad (14)$$

对式(14)进行 Fourier 逆变换可得

$$W(x', y, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[P_0 + k_1 Z_1 \sin(\omega t)] \sin(\gamma l_2) \sin(\beta l_1) e^{i(\beta x' + \gamma y)} e^{i\omega_0 t}}{\beta \gamma l_1 l_2 [D(\beta^2 + \gamma^2)^2 + K + c(i\omega_0 - i\beta V) - \rho_c h(\omega_0 - V\beta)^2]} d\beta d\gamma \quad (15)$$

将 $x' = x - Vt$ 代入式 (15) 则可得到几何不平整条件下无限大路面板的竖向位移的积分形式解:

$$W(x, y, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{[P_0 + k_1 Z_1 \sin(\omega t)] \sin(\gamma l_2) \sin(\beta l_1) e^{i[\beta(x-Vt) + \gamma y]} e^{i\omega_0 t}}{\beta \gamma l_1 l_2 [D(\beta^2 + \gamma^2)^2 + K + c(i\omega_0 - i\beta V) - \rho_c h(\omega_0 - V\beta)^2]} d\beta d\gamma \quad (16)$$

对式(16), 如果取极限 $l_1 \rightarrow 0$ 、 $l_2 \rightarrow 0$, 并注意
到 $\lim_{l_1 \rightarrow 0} \frac{\sin(\beta l_1)}{\beta l_1} = 1$, $\lim_{l_2 \rightarrow 0} \frac{\sin(\gamma l_2)}{\gamma l_2} = 1$, 则可分别得到
移动集中荷载和移动线源荷载作用下的相应解。

作为一个特例, 这里对静荷载也进行了分析, 并与既有结果进行了比较, 以验证本文所得结果的正确性。不考虑路面不平整以及荷载自振频率的影响, 即 $\lambda = \infty$, $\omega_0 = 0$, 并令 $V = 0$, 则可得到平整路面上静荷载作用下板的竖向位移解:

$$W(x, y) = \frac{P_0}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(\gamma l_2) \sin(\beta l_1)}{\gamma l_2 \beta l_1} \frac{e^{i(\beta x + \gamma y)}}{D(\beta^2 + \gamma^2)^2 + K} d\beta d\gamma \quad (17)$$

将式 (17) 取极限 $l_1 \rightarrow 0$, $l_2 \rightarrow 0$ 即可得到集中荷载作用下板的竖向位移解:

$$W(x, y) = \frac{P_0}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{i(\beta x + \gamma y)}}{D(\beta^2 + \gamma^2)^2 + K} d\beta d\gamma \quad (18)$$

在式 (18) 中作如下代换 (ϕ 、 φ 均为代换参数): $x = r \cos \Phi$, $y = r \sin \Phi$, $\beta = r_1 \cos \varphi$, $\gamma = r_1 \sin \varphi$, 则式 (18) 可改写成

$$W(x, y) = \frac{P_0}{4\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{e^{i[r r_1 \cos(\Phi - \varphi)]}}{D r^4 + K} r_1 dr_1 d\varphi \quad (19)$$

当集中荷载沿直线 x 方向移动时, 板的竖向最大位移总是发生在该直线方向, 因此可以假定 $\Phi = 0$, 取式 (19) 的实部, 并注意到 Bessel 函数的积分表达式:

$$\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \cos[r r_1 \cos \varphi] d\varphi = J_0(r r_1) \quad (20)$$

将式 (20) 代入式 (19), 并利用函数的奇偶性可得

$$W(R) = \frac{P_0}{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{J_0(R r)}{D r^4 + K} r dr \quad (21)$$

即是无限大板在静荷载作用下的挠度解。从而验证了本文所得解析解的正确性和一般性。

3 数值计算分析

通过上述分析, 得到了不平整无限大路面板在移动矩形荷载作用下的竖向位移解。本文使用 Fast

Fourier Transform(FFT) 来计算 Fourier 逆变换。截断积分范围, 令 $-16 < \beta, \gamma < 16$, 取 2 048 个积分点, 则可满足精度^[13]。所取车辆系统参数^[4]和路面材料参数^[14]见表 1。

表 1 计算参数
Table 1 Computational parameters

参数	量值
后非悬挂部分质量 m_1 /kg	473
车辆轮胎刚度 k_1 /(10^5 N/m)	4.8
车辆轮胎阻尼 c_1 /(10^3 N · s/m)	8
后悬挂部分质量 m_2 /kg	2 885
后悬挂部分刚度 k_2 /(10^5 N/m)	1.9
后悬挂部分阻尼 c_2 /(10^3 N · s/m)	14
路面不平整幅值 h_0 /m	0.02
路面杨氏模量 E /(10^{10} Pa)	3.45
路面泊松比 μ	0.15
路面厚度 h /m	0.25
路面密度 ρ_c /(10^3 kg/m ³)	2.12
荷载长 l_1 /m	0.15
荷载宽 l_2 /m	0.15

为了分析路面不平整对竖向位移响应的影响, 本文在计算过程中暂不考虑荷载自振频率 ω_0 的影响。由式 (3) 可以计算得到 2 个自由度车辆系统的固有频率 $\omega_1 = 6.82$ rad/s, $\omega_2 = 37.89$ rad/s。

图 2、3 给出了原点处 ($x = 0$, $y = 0$) 板的竖向位移随时间的变化规律。从图中可以看出, 当荷载移动速度较低时, 板竖向位移随时间的变化较为缓和, 随着荷载移动速度的增大, 板竖向位移随时间的变化则变得较为剧烈。当不考虑地基阻尼时, 竖向位移的最大值出现在荷载离开该点的稍后时刻 (图 2)。这是由于荷载的大小是不断变化的, 在 $t = 0$ 时刻, 荷载并未达到最大值, 路面的几何不顺造成了这种滞后现象的发生。当考虑地基阻尼时, 由于路面不顺和地基阻尼的共同作用使得滞后现象更加明显 (图 3)。比较图 2 和图 3 还可以发现, 地基为弹性时位移曲线关于峰值时刻是对称的, 地基为黏弹性时位移曲线并不对称, 这与以往的研究结论一致^[10-14]。

图 4 为不同的路面不平整波长下原点处竖向位移随时间的变化规律。从图中可以看出, 当路面波长较小时, 位移峰值较大, 且滞后现象比较明显; 随着路面波长的增加, 位移峰值逐渐减小, 且位移

峰值出现时刻渐渐靠近 $t = 0$ 时刻。当路面波长 $\lambda = \infty$ 时, 路面完全平顺, 此时车辆不产生任何振动, 因此位移幅值最小。

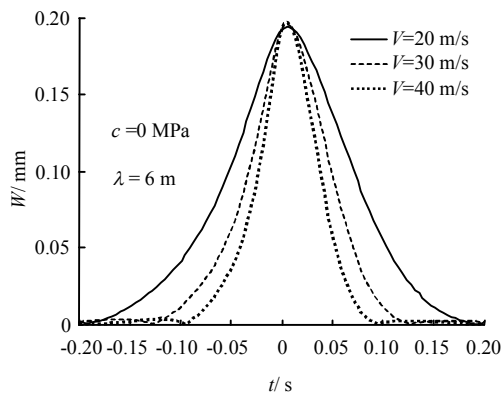


图 2 地基弹性时竖向位移随时间的变化规律
Fig.2 Variation of vertical displacement with time on elastic foundation

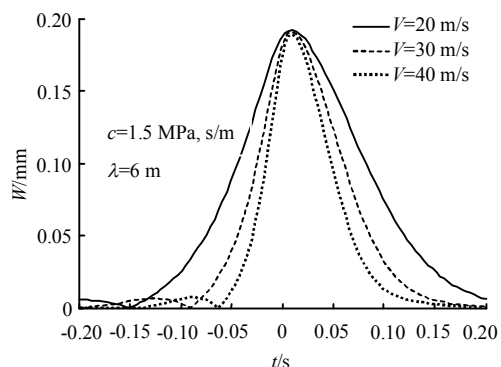


图 3 地基黏弹性时竖向位移随时间的变化规律
Fig.3 Variation of vertical displacement with time on visco-elastic foundation

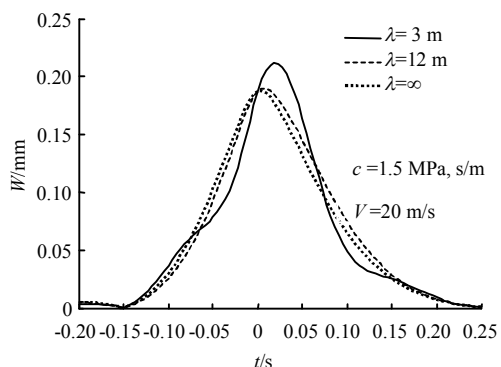


图 4 路面不平波长不同时竖向位移随时间的变化规律
Fig.4 Variation of vertical displacement with time under various wavelength

不同的路面不平幅值下板的竖向位移随时间的变化规律如图 5 所示。从图中可见, 路面完全平整时板的位移幅值最小, 路面不平幅值越大, 相

应板的位移幅值也越大, 而且达到最大值的时刻越滞后。因此在路面施工中应尽量减少路面不平整幅值。

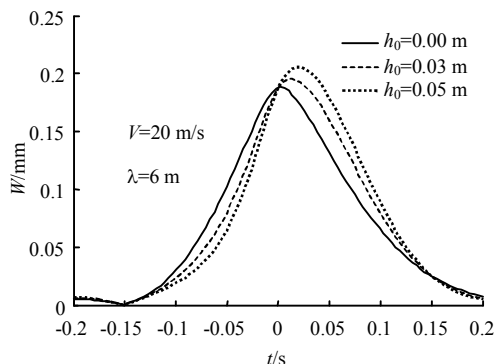


图 5 路面不平幅值不同时竖向位移随时间的变化规律
Fig.5 Variation of vertical displacement with time under various rough pavement amplitude

图 6 为不同行车速度下板的竖向位移幅值随路面不平波长变化规律。从图中可以看出, 随着路面不平波长的增大, 板的位移幅值会出现 2 个峰值, 第 1 个峰值大于第 2 个峰值, 且 2 个峰值位置对应的频率正好和 2 个自由度车辆系统的 2 个固有频率接近, 说明此时车辆系统产生了共振。同时也可看出, 板的竖向位移出现峰值时的波长是随着车速而变化的, 随着车速的增大, 位移峰值逐渐减小。而随着路面不平波长的增大, 位移幅值趋于稳定。所以, 当路面不平波长足够大时可以近似认为路面是平整的。

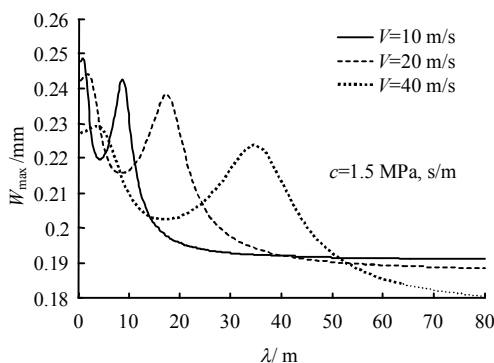


图 6 车速不同时位移幅值随路面不平波长变化规律
Fig.6 Variation of maximum displacement with wavelength under various load velocity

图 7、8 分别给出了地基为弹性和黏弹性时位移幅值随着车速的变化曲线。从图中可以看出, 随着车速的变化, 板的位移幅值同样出现 2 个峰值, 这是车辆系统发生共振的缘故。当地基为弹性时

(图 7), 第 2 个峰值大于第 1 个峰值, $\lambda=12$ m 时, 由于车速的限制, 位移幅值只出现 1 个峰值; $\lambda=\infty$ 时, 路面完全平整, 此时位移幅值随着车速的增加略有增大。当地基为黏弹性时 (图 8), 第 2 个峰值小于第 1 个峰值, 且当路面完全平整时, 位移幅值随着车速的增大逐渐减小, 可见考虑地基阻尼和不考虑地基阻尼有着很大的差别。

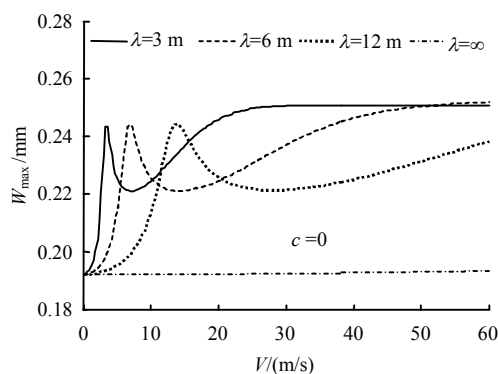


图 7 路面不平整波长不同时位移幅值随速度变化规律
Fig.7 Variation of maximum displacement with load velocity under various wavelength

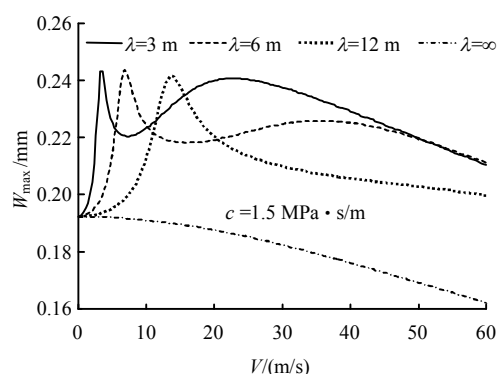


图 8 路面不平整波长不同时位移幅值随速度变化规律
Fig.8 Variation of maximum displacement with load velocity under various wavelength

图 9 反映了地基阻尼对位移幅值的影响, 从图中可以看出, 路面平整和不平整时阻尼对位移幅值的影响规律是一致的, 即随着地基阻尼的增大, 位移幅值都逐渐减小。图 10 为不同的路面不平整波长时位移幅值随着地基刚度的变化曲线。由图可知, 地基刚度对位移幅值的影响很大, 随着地基刚度的增加, 这种影响愈小。同时发现, 路面完全平整时位移幅值最小, 但 $\lambda=24$ m 时的位移幅值比 $\lambda=6$ m 和 $\lambda=12$ m 的位移幅值大, 这是由于此时的振动频率更接近车辆模型的固有频率, 因此位移幅值更大。

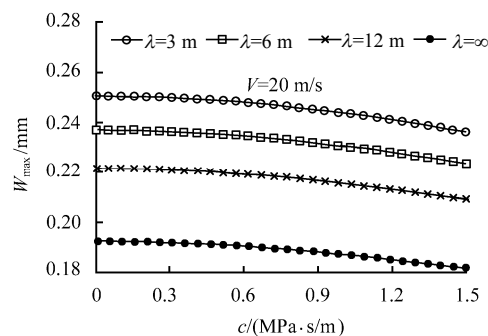


图 9 路面不平整波长不同时位移幅值随地基阻尼变化规律
Fig.9 Variation of maximum displacement with damping under various wavelength

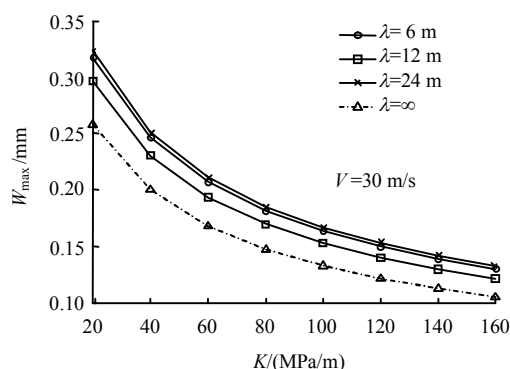


图 10 路面不平整波长不同时位移幅值随地基刚度变化规律
Fig.10 Variation of maximum displacement with rigidity under various wavelength

4 结 论

本文从路面几何不平整出发, 假设路面不平整服从正弦函数曲线, 并把汽车简化为 2 个自由度振动体系, 得到了不平整路面上的动荷载表达式, 然后将此荷载模式看成是作用在 Kelvin 地基上无限大路面板表面的移动矩形荷载, 采用双重 Fourier 变换方法得到了不平顺无限大路面板竖向位移的积分形式解, 此解析解可以退化为静荷载作用下的经典解答, 并利用快速傅立叶变换(FFT)方法得到了数值计算结果。分析了荷载速度, 路面不平整波长、不平整幅值以及地基阻尼和地基刚度对板的动力响应的影响, 分析结论如下:

(1) 板竖向位移的分布受荷载移动速度的影响。当荷载移动速度较低时, 板竖向位移随时间的变化较为缓和, 随着荷载移动速度的增大, 板竖向位移随时间的变化则变得较为剧烈。

(2) 路面不平整使得位移峰值出现滞后现象。这种滞后现象受路面不平整波长和不平整幅值的影

响, 不平整波长越小或不平整幅值越大, 滞后现象越明显。

(3) 由于共振, 位移幅值随着路面不平整波长和荷载速度的变化出现 2 个峰值, 且峰值出现的位置与路面不平整波长和车速密切相关, 因此, 在路面设计和施工中可以根据路面上行驶车辆的主要车速来控制路面不平整波长, 以避免共振的发生。

(4) 考虑路面不平整和路面完全平整的动力响应结果有较大差别。但当路面不平整波长足够大时, 在常见车速范围内系统不会发生共振, 此时可认为路面是平整的, 一般平整路面的动力响应问题可认为是本文所得不平整情况下的特例。

参考文献

- [1] 邓学钧, 孙璐. 车辆-地面结构系统动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [2] 钟阳, 王哲人, 张肖宁. 不平整路面上行驶的车辆对路面随机动压力的分析[J]. 中国公路学报, 1992, 5(2): 40—43.
ZHONG Yang, WANG Zhe-ren, ZHANG Xiao-ning. Random dynamic pressure of moving vehicle on rough pavement[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1992, 5(2): 40—43.
- [3] 孙璐, 邓学均. 路面动荷载数学模型与实验设计[J]. 西安公路交通大学学报, 1996, 16(4): 50—53.
SUN Lu, DENG Xue-jun. Mathematic model and experiment design of pavement dynamic load[J]. *Journal of Xi'an Highway University*, 1996, 16(4): 50—53.
- [4] 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, (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, (3): 10—13.
- [5] 徐建平, 尚刚, 梁乃兴. 路面不平整引起的汽车动荷载计算分析[J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(1): 26—28.
XU Jian-ping, SHANG Gang, LIANG Nai-xing. Analysis of dynamic load caused by driving automobile on undulate pavement[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2001, 20(1): 26—28.
- [6] HARDY M S A, CEBON D. Importance of Speed And Frequency in Flexible pavement Response[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1994, 120(3): 463—482.
- [7] 张艳美, 梁波. 几何不平顺下高速公路路基的动态响应[J]. 兰州铁道学院学报, 2001, 20(4): 66—69.
ZHANG Yan-mei, LIANG Bo. Dynamic response to subgrade of Highway in geometric irregularity condition[J]. *Journal of Lanzhou Railway University*, 2001, 20(4): 66—69.
- [8] 梁波, 蔡英. 不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J]. 铁道学报, 1999, 21(2): 84—87.
LIANG Bo, CAI Ying. Dynamic analysis on subgrade of high speed railways in geometric irregular condition[J]. *Journal of China Railway Society*, 1999, 21(2): 84—87.
- [9] 张昀青, 移动荷载作用下半无限体的动力响应解[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 955—957.
ZHANG Yun-qing. Dynamic response of semi-infinite body under moving loads[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(6): 955—957.
- [10] 蒋建群, 周华飞, 张土乔. 移动荷载下 Kelvin 地基上无限大板的稳态响应[J]. 浙江大学学报, 2005, 39(1): 27—32.
JIANG Jian-qun, ZHOU Hua-fei, ZHANG Tu-qiao. Steady-state response of infinite plate on Kelvin foundation subjected to moving loads[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2005, 39(1): 27—32.
- [11] JIN Bo. Dynamic response of a poroelastic half space generated by high speed load[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2004, 25: 168—174.
- [12] 刘干斌, 汪鹏程, 姚海林, 等. 矩形运动荷载作用下软土地基的三维振动研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1658—1662.
LIU Gan-bin, WANG Peng-cheng, YAO Hai-lin, et al. 3D ground vibration of a soft subgrade in the vicinity of a moving rectangular load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(10): 1658—1662.
- [13] JONES D V, HOUED Dec D L, PELOW A T, PETYT M. Ground vibration in the vicinity of a moving harmonic rectangular load on a half-space[J]. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 1998, 17: 153—166.
- [14] KIM S M, FRANK B, McCullough. Dynamic response of plate on viscous Winkler foundation to moving loads of varying amplitude[J]. *Engineering Structure*, 2003, 25: 1179—1188.
- [15] KIM S M. Influence of horizontal resistance at plate bottom on vibration of plates on elastic foundation under moving loads[J]. *Engineering Structure*, 2004, 26: 519—529.