

文章编号: 1000-7598(2009)02-0367-07

黏弹性地基上路面板在多轮荷载作用下的响应分析

姚海林¹, 卢正¹, 刘干斌², 骆行文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. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 宁波 315211)

摘要: 将内配纵向钢筋的路面视为置于黏弹性 Winkler 地基上的正交各向异性薄板, 假设板在荷载运动方向上为无限长, 车辆轮载被简化成包含自振频率的矩形均布移动荷载。应用三角级数及 Fourier 变换方法, 得到了单轮荷载作用下路面竖向位移的表达式。在 Fourier 变换域内, 利用叠加原理分别得到了前后双轮荷载和平行双轮荷载作用下路面竖向位移的解析解答。在此基础上, 推导出连续配筋混凝土路面上受 4 轮车辆荷载作用时轮载附近位移的稳态响应表达式。利用数值积分方法对表达式进行 Fourier 逆变换, 得到了数值结果, 并全面地分析了多轮荷载作用时荷载间距、相位差、荷载速度、频率、地基阻尼以及配筋率对路面竖向位移响应的影响。

关键词: 黏弹性地基; 多轮荷载; Fourier 变换; 前后双轮荷载; 平行双轮荷载

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Dynamic response of pavement resting on viscoelastic foundation under multiple moving loads

YAO Hai-lin¹, LU Zheng¹, LIU Gan-bin², LUO Xing-wen¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Faculty of Civil, Construction and Environment Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The dynamic displacement response of continuously reinforced concrete pavement (CRCP) resting on viscoelastic Winkler foundation has been investigated when the system is subjected to multiple rectangular moving loads. The pavement is treated as an orthotropic plate and infinite in the moving direction. The theoretical solutions of the vertical displacement of CRCP under single moving load are obtained by using the trigonometric series and Fourier transform, and the superposition method is used to obtain the analytical solutions of CRCP under tandem-axle, dual-wheel and four-wheel loads in the transformed field domains of moving space. By employing fast fourier transform (FFT), the numerical results are derived and used to analyze the influence of the load velocity, frequency, viscous damping, reinforced ratio and the distance and phase between the multiple loads on the maximum deflection and on the deflection distributions.

Key words: viscoelastic foundation; multiple loads; Fourier transform; tandem-axle loads; dual-wheel loads

1 引言

一直以来, 国内外许多学者对单轮荷载作用下的结构动力响应问题进行了大量的研究。事实上, 车辆荷载是以多轮运动荷载的形式作用在路面上的, 受路面性能、车辆构造、行车速度等因素的影响, 路面在多轮荷载作用下的动力响应与单轮情况有所不同, 因此, 有必要对多轮荷载作用下的路面动力响应进行分析。Sheng、Li 等^[1-2]利用傅立叶级

数方法研究了多轮荷载作用下列车车轮-轨道的耦合动力响应; Picoux 和 Houedec^[3]把列车轮载当作集中荷载研究了层状弹性介质的动力响应问题; Yang^[4]、Galvin^[5]分别运用有限元方法和边界元方法对列车轮载作用下的弹性土层的动力响应问题进行了分析; 梁波^[6]考虑了列车相邻轮对间轮轨力的相互叠加和轨枕的分散作用, 对已有的列车荷载表达式进行了修正和完善; 王常晶^[7]和高广运^[8]将列车荷载简化为一系列以列车车速移动的集中荷载,

收稿日期: 2008-05-26

基金项目: 西部交通建设科技项目资助 (No.200531849305); 宁波市自然科学基金资助 (No.2007A610062); 中科院知识创新工程青年人才领域前沿项目资助 (No.0724041Q01)。

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

利用叠加原理分析了多荷载作用下 Timoshenko 梁及弹性地基的动力响应; Artur Rystwej 等^[9]对简谐荷载作用下的无限大板和矩形板的动力学问题进行了研究; 王虎^[10]则以连续配筋混凝土路面为研究对象, 对其上作用有矩形简谐荷载时的动力响应问题进行了求解; Kim 和 Mccullough^[11]考虑了前后双轮荷载的情况, 主要分析了双轮荷载间的相位差对无限大板的动力响应的影响。纵观上述研究成果可知, 在分析列车荷载动力响应问题时, 研究者们一般是将列车荷载看成是一系列作用在某种简化的无限长梁上的集中荷载, 考虑了各荷载间的叠加作用, 而在分析汽车荷载时, 则很少有人考虑多轮荷载的情况, 使得分析结果和实际情况存在一定差距。

本文在上述研究的基础上, 将配有纵向钢筋的路面视为置于黏弹性 Winkler 地基上的正交各向异性薄板, 假设板在荷载运动方向上为无限长, 车辆轮载被简化成包含自振频率的矩形均布移动荷载。首先, 应用三角级数及 Fourier 变换方法得到了单轮荷载作用下路面竖向位移的表达式, 在 Fourier 变换域内利用叠加原理分别得到了前后双轮荷载和平行双轮荷载作用下路面竖向位移的解析解答; 并在此基础上, 推导了连续配筋混凝土路面上受 4 轮车辆荷载作用 (简称 CRCP) 时轮载附近位移的稳态响应表达式, 同时利用数值积分方法对表达式进行 Fourier 逆变换, 得到了数值结果。利用计算结果, 分析了荷载间距、相位差、荷载速度、频率、地基阻尼以及路面配筋率对路面板竖向位移响应的影响。

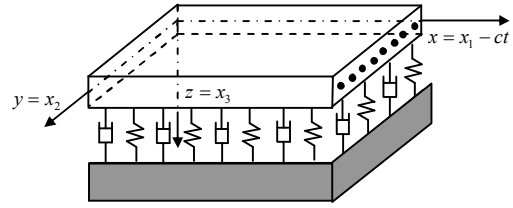
2 基本控制方程

考虑路面配筋作用, 地基模型采用图 1 (a) 所示的黏弹性 Winkler 模型, 多轮荷载模式如图 1 (b) 所示。其中, q_0 为单轮荷载大小, b 为路面宽, $2l_1$ 、 $2l_2$ 分别为荷载的长和宽, ξ 为荷载中心到板边缘的距离, L_x 和 L_y 分别为轮载的纵向和横向间距。

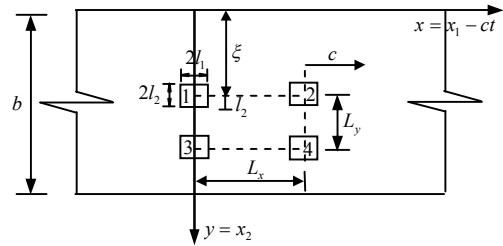
根据小挠度弹性薄板理论以及黏弹性地基假设, 在笛卡尔坐标系 (x_1, x_2, x_3) 中, 正交各向异性路面板的运动控制方程如下:

$$D_{11} \frac{\partial^4 W}{\partial x_1^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 W}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + D_{22} \frac{\partial^4 W}{\partial x_2^4} + \rho_c h \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + KW(x_1, x_2, t) + \eta \frac{\partial W(x_1, x_2, t)}{\partial t} = q(x_1, x_2, t) \quad (1)$$

式中: ρ_c 为路面板的密度; h 为板厚; K 为地基刚度; η 为黏弹性地基的阻尼系数; $q(x_1, x_2, t)$ 为运动荷载; $W(x_1, x_2, t)$ 为板的竖向位移; D_{ij} 为正交各向异性板的刚度系数, 具体表达式同文献[12]。



(a) 路基和路面板计算模型



(b) 多轮荷载模式

图 1 计算模型示意图
Fig.1 The computation model

本文考虑移动多轮荷载, c 为速度, 引入移动坐标系 (x, y, z, t) , 令 $x = x_1 - ct$, $y = x_2$, $z = x_3$, 在移动坐标系中, 式 (1) 可以写成:

$$D_{11} \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{22} \frac{\partial^4 W}{\partial y^4} + \rho_c h \left(\frac{\partial^2 W}{\partial t^2} - 2c \frac{\partial^2 W}{\partial t \partial x} + c^2 \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) + \eta \left(\frac{\partial W}{\partial t} - c \frac{\partial W}{\partial x} \right) + KW = q(x, y, t) \quad (2)$$

按照文献[12]的方法, 假设路面板边缘简支, 车辆荷载被模拟成矩形均布简谐荷载, 将路面简支边界条件和荷载的表达式代入式 (2), 可得

$$D_{11} \frac{\partial^4 W_m}{\partial x^4} - 2\alpha_m^2 (D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^2 W_m}{\partial x^2} + \alpha_m^4 D_{22} W_m + \rho_c h \left(\frac{\partial^2 W_m}{\partial t^2} - 2c \frac{\partial^2 W_m}{\partial t \partial x} + c^2 \frac{\partial^2 W_m}{\partial x^2} \right) + KW_m + \eta \left(\frac{\partial W_m}{\partial t} - c \frac{\partial W_m}{\partial x} \right) = q_m(x, t) [H(x + l_1) - H(x - l_1)] \quad (3)$$

引入对 x 的 Fourier 变换及其逆变换:

$$\left. \begin{aligned} \bar{W}_m(\beta, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} W_m(x, t) e^{-i\beta x} dx \\ W_m(x, t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{W}_m(\beta, t) e^{i\beta x} d\beta \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $i = \sqrt{-1}$; $\bar{W}_m(\beta, t)$ 为 $W_m(x, t)$ 的 Fourier 变换; β 为 Fourier 变换参数。

结合式(3)和式(4)式容易得到:

$$\bar{W}_m(\beta, t) = \frac{\bar{q}(\beta, t)}{\Delta} \quad (5)$$

其中:

$$\bar{q}(\beta, t) = \frac{2q_0}{b\alpha_m\beta l_1 l_2} \sin(\alpha_m \xi) \sin(\alpha_m l_2) \sin(\beta l_1) e^{i\omega t} \quad (6)$$

$$\Delta = D_{11}\beta^4 + 2\alpha_m^2\beta^2(D_{12} + 2D_{66}) + D_{22}\alpha_m^4 - \rho_c h(\omega - \beta c)^2 + i\eta(\omega - \beta c) + K \quad (7)$$

对式(5)进行 Fourier 逆变换, 即可以得到简谐运动单轮荷载作用下连续配筋混凝土路面(CRCP)的竖向位移表达式:

$$W(x, y, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\bar{q}(\beta, t) \sin(\alpha_m y) e^{i\beta x}}{\Delta} d\beta \quad (8)$$

实际上, 真实的车辆荷载往往是以多轮荷载的形式作用在路面上的。Kim 等^[11]通过研究发现, 当车辆以一定速度行驶在不平整路面上时, 车辆的各轮载之间总是存在一定的相位差。因此, 要分析每一点由多轮荷载作用引起的响应, 必须考虑相位差的影响。本文先考虑双轮情况, 令车辆前后双轮中心的距离为 L_x , 荷载之间的相位差为 φ_x , 则由荷载 $\sin \omega t$ 引起的位移响应, 将式(8)写成以下形式^[11]:

$$W(x, y, t) = \sqrt{a(x, y)^2 + b(x, y)^2} \sin\left(\omega t + \arctan \frac{b(x, y)}{a(x, y)}\right) \quad (9)$$

其中:

$$a(x, y) + ib(x, y) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\bar{q}(\beta, t) \sin(\alpha_m y) e^{i\beta x}}{\Delta} d\beta \quad (10)$$

由荷载 $\sin(\omega t + \varphi_x)$ 引起的位移响应可表示为

$$W^x(x, y, t) = \sqrt{a_2(x - L_x, y)^2 + b_2(x - L_x, y)^2} \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_x + \arctan \frac{b_2(x - L_x, y)}{a_2(x - L_x, y)}\right) \quad (11)$$

将式(9)和式(11)叠加, 即可以得到 CRCP 在前后双轮荷载作用下的位移响应解:

$$W_2^x(x, y, t) = \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + a_2^2 + b_2^2 + 2[(a_1 a_2 + b_1 b_2) \cos \varphi_x - (a_1 b_2 - b_1 a_2) \sin \varphi_x]} \quad (12)$$

式中: $a_1 = a(x, y)$, $b_1 = b(x, y)$, $a_2 = a(x - L_x, y)$, $b_2 = b(x - L_x, y)$ 。

对于平行双轮的情况, 假设轮载中心的距离为 L_y , 荷载之间的相位差为 φ_y , 则由荷载 $\sin(\omega t + \varphi_y)$ 引起的位移响应可表示为

$$W^y(x, y, t) = \sqrt{a_3(x, y - L_y)^2 + b_3(x, y - L_y)^2} \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_y + \arctan \frac{b_3(x, y - L_y)}{a_3(x, y - L_y)}\right) \quad (13)$$

式中: $a_3 = a(x, y - L_y)$, $b_3 = b(x, y - L_y)$ 。

将式(13)和式(9)叠加, 则可得到 CRCP 在平行双轮荷载作用下的位移响应解:

$$W_2^y(x, y, t) = \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + a_3^2 + b_3^2 + 2[(a_1 a_3 + b_1 b_3) \cos \varphi_y - (a_1 b_3 - b_1 a_3) \sin \varphi_y]} \quad (14)$$

对于如图 1(b) 所示的 4 轮荷载的情况, 可以用上述同样方法得到 CRCP 的竖向位移响应解答:

$$W_4(x, y, t) = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (15)$$

式中: $A = a_1 + a_2 \cos \varphi_x + a_3 \cos \varphi_y + a_4 \cos \varphi_{xy} - b_2 \sin \varphi_x - b_3 \sin \varphi_y - b_4 \sin \varphi_{xy}$; $B = b_1 + b_2 \cos \varphi_x + b_3 \cos \varphi_y + b_4 \cos \varphi_{xy} + a_2 \sin \varphi_x + a_3 \sin \varphi_y + a_4 \sin \varphi_{xy}$; $a_4 = a(x - L_x, y - L_y)$; $b_4 = b(x - L_x, y - L_y)$; φ_{xy} 为轮 4 与轮 1 之间的相位差。

如果在式(15)中令 $a_j = b_j = 0$ ($j = 2, 3, 4$), $\varphi_x = \varphi_y = \varphi_{xy} = 0$, $V_f = 0$, 则可退化到单轮荷载下素混凝土路面的解答。进一步, 令 $c = 0$, $\omega = 0$, $K = 0$, 并注意到 $l_1 \rightarrow 0$ 、 $l_2 \rightarrow 0$ 时, $\lim_{l_1 \rightarrow 0} [\sin(\beta l_1) / \beta l_1] = 1$, $\lim_{l_2 \rightarrow 0} [\sin(\alpha_m l_2) / \alpha_m l_2] = 1$, 利用留数定理积分, 可将式(15)退化为如下形式:

$$W(x, y) = \frac{q_0 b^2}{2\pi^3 D} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^3} (1 + \alpha_m x) e^{-\alpha_m x} \sin(\alpha_m \xi) \sin(\alpha_m y) \quad (16)$$

上式与用李维法求无限长简支板在集中力作用下的解答完全一致^[10], 这也表明本文所得解答的正确性和一般性。

3 数值计算及分析

通过上述分析, 得到了连续配筋混凝土路面在矩形多轮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, 取 2 048 个积分点, 则可满足精度^[13]。

计算时地基刚度取 60 MPa, 地基阻尼取为 1.6 MPa·s/m, 荷载速度为 20 m/s, 其他参数同文献[12]。

图 2、3 分别给出了前后双轮荷载作用时, 不同荷载间距及不同荷载频率下竖向位移沿 x 方向的变化曲线。从图 2 可以看出, 由于响应的叠加, 双轮荷载作用时位移响应幅值要大于单轮荷载引起的位移响应。随着轮载间距的增大, 两轮载对位移的影响的独立作用越来越明显。当荷载间距 $L_x \geq 4$ m 时, 两轮轮轴连线中点处产生的位移响应较小, 此时可认为, 由各轮轮载产生的位移响应彼此独立。从图 3 可以看出, 荷载频率对路面竖向位移的影响较为明显, 随着频率的增大, 两轮中心位移幅值逐渐减小。

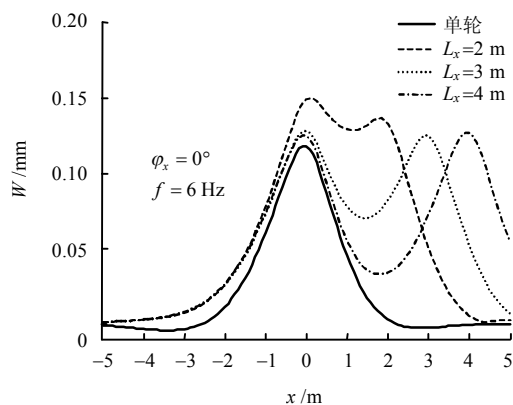


图 2 不同荷载间距下竖向位移沿 x 轴变化曲线
Fig.2 Effect of loads distance on vertical displacement along x direction

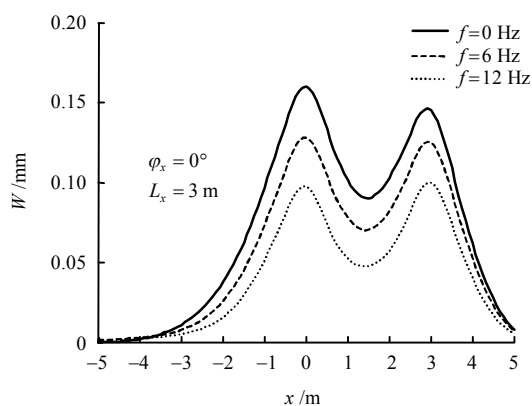


图 3 不同荷载频率下竖向位移沿 x 轴变化曲线
Fig.3 Effect of load frequency on vertical displacement along x direction

图 4 为当前后双轮荷载的相位差 φ_x 分别为 0° 、 90° 和 180° 时, 路面板的竖向位移沿 x 方向的分布曲线。由图可知, 随着相位差的增大, 轮载中心位移先增大后减小。相位差的改变对各轮轮载中心的位移幅值影响较小, 而对轮轴连线中点附近的位移影响十分明显。当 $\varphi_x = 180^\circ$ 时, 轮轴连线中点附近

的位移接近于 0, 这是由于两轮在此处产生的位移响应大小相等、方向相反而相互抵消。同时, 还可以发现, 位移曲线呈现出不完全对称性, 这是由于地基阻尼引起了位移响应的滞后造成的。

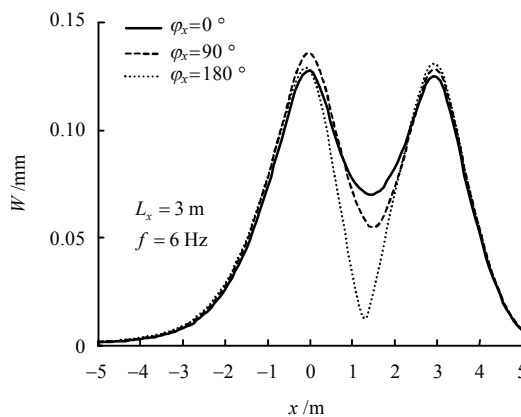


图 4 不同荷载相位差下竖向位移沿 x 轴变化曲线
Fig.4 Effect of loads phase on vertical displacement along x direction

图 5 给出的是前后双轮的相位差对轮载中心位移 W_0 的影响曲线。从图中可以看出, 当轮载间距较小时, 相位差的改变对轮载中心位移的影响很大, 且呈波动变化。当轮载间距 $L_x \geq 4$ m 时, 轮载中心位移随相位差的改变变化很小, 此时可认为由各轮轮载产生的位移响应彼此独立。

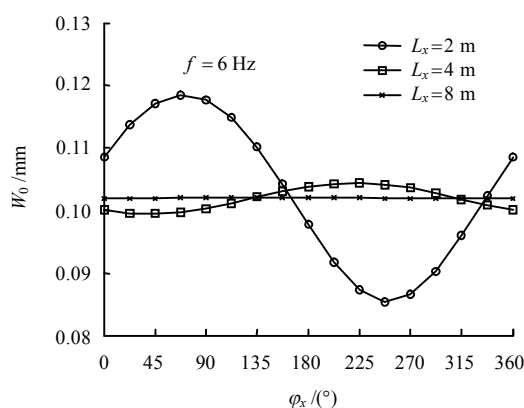


图 5 不同荷载间距下竖向位移随相位差变化曲线
Fig.5 Effect of phase on maximum vertical displacement

图 6 考虑了地基为弹性和黏弹性两种情况, 给出了不同的轮载相位差时竖向位移的分布曲线。由图可知, 相同条件下, 弹性地基引起的位移响应大于黏弹性地基, 地基为弹性时 ($\eta = 0$), 位移曲线关于 $x = 1.5$ m (轮轴连线的中点) 对称, 且当 $\varphi_x = 180^\circ$ 时, 在 $x = 1.5$ m 处, 位移为 0; 地基为黏弹性 (图中 $\eta = 1.6$ MPa·s/m) 时, 位移曲线不再关于轮轴连线的中点 ($x = 1.5$ m 处) 对称, $x = 1.5$ m 处的位移

也不为 0。

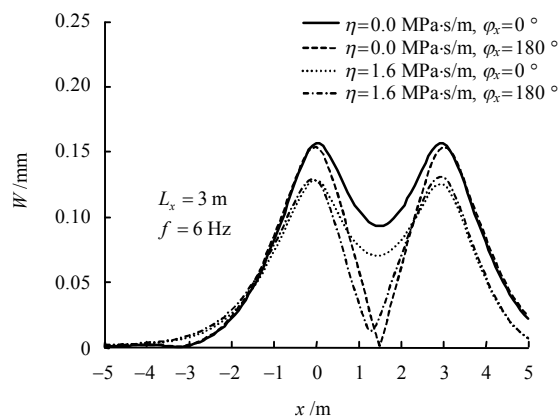


图6 不同阻尼和相位差下竖向位移沿 x 轴变化曲线

Fig.6 Effect of damping and phase on vertical displacement along x direction

平行双轮荷载作用时,不同荷载间距下 CRCP 竖向位移沿 y 方向的变化曲线如图 7 所示。从图中可以看出,当荷载间距较小时,双轮荷载引起的位移响应幅值明显大于单轮荷载引起的位移响应。随着荷载间距的增大,两轮载对位移响应的影响的独立作用越来越明显,这与前后双轮情况时的规律是一致的。

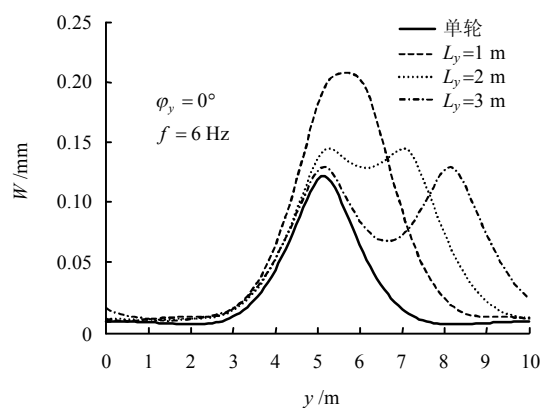
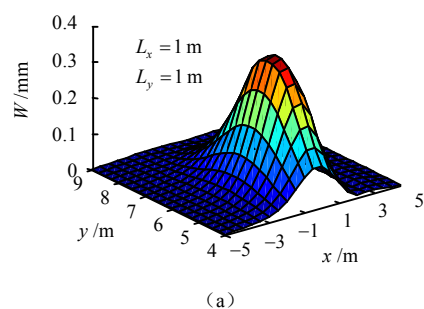


图7 不同荷载间距下竖向位移沿 y 轴变化曲线

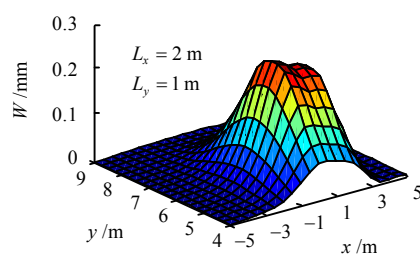
Fig.7 Effect of loads distance on vertical displacement along y direction

图 8 描述了 4 轮荷载作用下,不同的荷载间距时,CRCP 竖向位移在平面内的分布规律。为了便于分析,暂不考虑各轮之间相位差的影响,即 $\phi_x = \phi_y = \phi_{xy} = 0$ 。由图可见,当 $L_x = L_y = 1$ m 时,位移响应在平面内只出现一个峰值,峰值的位置是车辆的 4 个轮子所组成的矩形的形心,此时由各轮引起的位移响应在形心处叠加,因此,位移最大;随着荷载间距的增大,各轮所引起的位移响应的独

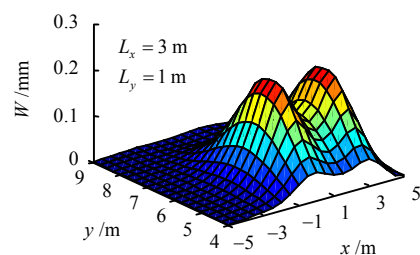
立作用逐渐明显,峰值处的位移逐渐减小;当 $L_x = L_y = 3$ m 时,在平面内出现明显的 4 个峰值,峰值出现在各轮的轮载中心,峰值处的位移最小。



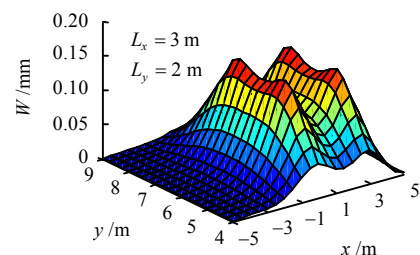
(a)



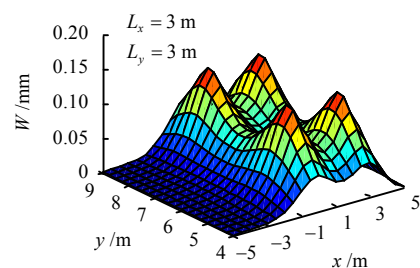
(b)



(c)



(d)



(e)

图8 不同荷载间距下平面内的竖向位移分布
Fig.8 Distribution of vertical displacement under different loads distances

图9给出了4轮荷载作用下,轮1中心处CRCP的竖向位移 W_0 随荷载速度的变化规律。从图中可以看出,考虑和不考虑地基阻尼有很大差别。不考虑地基阻尼时,位移随荷载速度 c 的增加而缓慢增大,此时频率对位移的影响很小。当考虑地基阻尼时,位移随着荷载速度的增加而先增大后减小,此时频率对位移的影响非常明显。可见,频率对位移响应的的影响依赖于地基的阻尼。图10给出的为4轮荷载作用下,轮1中心处CRCP的竖向位移 W_0 随路面配筋率的变化规律。由图可见,弹性地基和黏弹性地基有所不同,地基为弹性时,荷载速度对位移的影响很小;地基为黏弹性时,荷载速度越大,位移随配筋率 V_f 的变化越平缓。但无论是弹性地基,还是黏弹性地基,配筋率从0.75%增大到4.5%时,轮1中心处路面板位移的变化都很小。

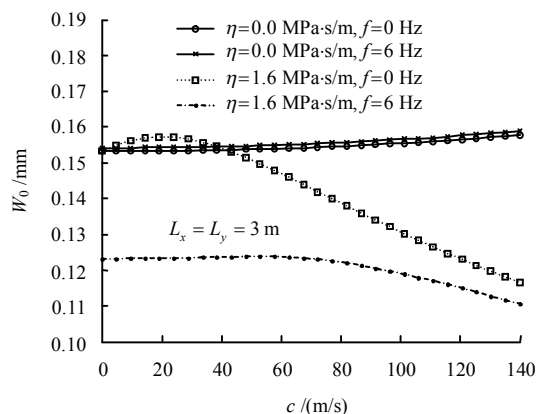


图9 荷载中心处竖向位移随速度变化曲线

Fig.9 Effect of load velocity on maximum displacement

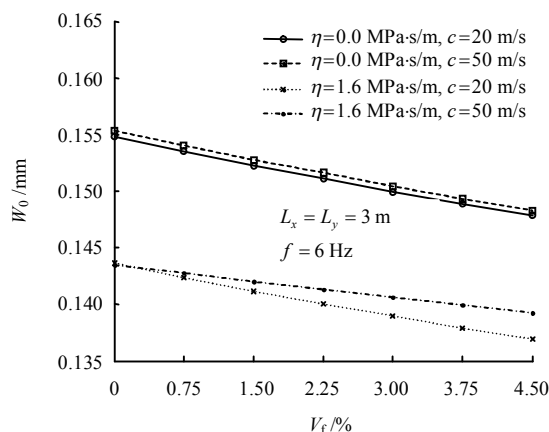


图10 荷载中心处竖向位移随路面配筋率变化曲线

Fig.10 Effect of reinforced ratio on maximum displacement

4 结论

本文以连续配筋混凝土路面为研究对象,利用

三角级数、Fourier变换以及叠加原理分别得到了前后双轮荷载和平行双轮荷载作用下路面竖向位移的解析解。在此基础上,推导出了连续配筋混凝土路面上受4轮车辆荷载作用时轮载附近位移的稳态响应表达式,同时利用数值积分方法得到了数值结果。计算结果表明:

(1) 双轮荷载作用时的位移响应幅值要明显大于单轮荷载作用的情况。随着轮载间距的增大,两轮载对位移的影响的独立作用越来越明显。荷载频率和相位差对路面竖向位移的影响较为显著。随着频率的增大,两轮中心位移幅值逐渐减小。相位差对轮载中心位移的影响依赖于荷载间距,荷载间距较小时,轮中心位移呈现出波动状态;当荷载间距超过4 m时,相位差对两轮位移的影响可以忽略不计。

(2) 4轮荷载作用下,荷载间距较小时,位移响应在平面内只出现一个峰值,峰值的位置是车辆的4个轮子所组成的矩形的形心;随着荷载间距的增大,各轮所引起的位移响应的独立作用逐渐明显,峰值处的位移逐渐减小;当 $L_x = L_y = 3$ m时,在平面内出现明显的4个峰值,峰值出现在各轮的轮载中心,峰值处的位移最小。

(3) 4轮荷载作用下,当地基为弹性时,板的竖向位移随荷载速度的增大缓慢增大,此时频率对位移响应的的影响很小;当地基为黏弹性时,位移随着荷载速度的增大先增大后减小,此时频率对位移响应的的影响非常明显。但无论是弹性地基还是黏弹性地基,配筋率的大小对位移响应的的影响都不显著。

参考文献

- [1] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293(3-5): 575-586.
- [2] SHENG X, LI M, JONES C J C, et al. Using the Fourier-series approach to study interactions between moving wheels and a periodically supported rail[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2007, 303(3-5): 873-894.
- [3] PICOUX B, LE HOUDEC D. Diagnosis and prediction of vibration from railway trains[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25(12): 905-921.
- [4] YANG Y B, HUANG H H, CHANG D W. Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite

- element simulation[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2003, 23(4): 263—278.
- [5] GALVIN P, DOMINGUEZ J. Analysis of ground motion due to moving surface loads induced by high-speed trains [J]. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, 2007, 31(11): 931—941.
- [6] 梁波, 罗红, 孙常新. 高速铁路振动荷载的模拟研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(4): 89—94.
LIANG Bo, LUO Hong, SUN Chang-xin. Simulation study on vibration load of high speed railway[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2006, 28(4): 89—94.
- [7] 王常晶, 陈云敏. 列车荷载在地基中引起的应力响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1178—1186.
WANG Chang-jing, CHEN Yun-min. Analysis of stresses in train-induced ground[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(7): 1178—1186.
- [8] 高广运, 李志毅, 冯世进, 等. 秦沈铁路列车运行引起的地面振动实测与分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1817—1822.
GAO Guang-yun, LI Zhi-yi, FENG Shi-jin, et al. Experimental results and numerical predictions of ground vibration induced by high-speed train running on Qin-Shen Railway[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(9): 1817—1822.
- [9] ARTUR RYSTWEJ, PAWEL SNIADY. Dynamic response of an infinite beam and plate to a stochastic train of moving forces[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2007, 299(4—5): 1033—1048.
- [10] 王虎, 胡长顺, 王秉刚. 连续配筋混凝土路面动荷响应分析[J]. 工程力学, 2001, 18(5): 119—126.
WANG Hu, HU Chang-shun, WANG Bing-gang. Responses of continuously reinforced concrete pavement under transient load[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2001, 18(5): 119—126.
- [11] KIM S M, MCCULLOUGH B F. Dynamic response of plate on viscous Winkler foundation to moving loads of varying amplitude[J]. **Engineering Structure**, 2003, 25(9): 1179—1188.
- [12] 卢正, 姚海林, 罗海宁, 等. 双参数黏弹性地基上连续配筋混凝土路面振动参数分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2177—2182.
LU Zheng, YAO Hai-lin, LUO Hai-ning, et al. Parameter analysis continuously reinforced concrete pavement resting on two-parameter foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2177—2182.
- [13] JONES D V, HOUE D D L, PELOW A T, et al. Ground vibration in the vicinity of a moving harmonic rectangular load on a half-space[J]. **European Journal of Mechanics-A/Solids**, 1998, 17(1): 153—166.

上接第 366 页

- HUANG Hong-nv, ZHOU Qiong, HUA Xi-sheng. Actuality on the theory and technology of monitoring and controlling for dam safety[J]. **Dam and Safety**, 2005, (2): 54—57.
- [4] 洪云. 综论大坝安全管理技术[J]. 大坝与安全, 2004, (5): 38—40.
HONG Yun. Dam safety management technology[J]. **Dam and Safety**, 2004, (5): 38—40.
- [5] 张进平. 大坝安全监测资料分析方法及信息处理技术的若干进展[J]. 大坝与安全, 2003, (6): 19—23.
ZHANG Jin-ping. Reviews on progresses of data analysis and information processing[J]. **Dam and Safety**, 2003, (6): 19—23.
- [6] 吴中如, 顾冲时. 大坝安全综合评价专家系统[M]. 北京: 科学技术出版社, 1997.
- [7] 吴中如, 顾冲时, 胡群革. 综论大坝安全综合评价专家系统[J]. 水电能源科学, 2000, 18(2): 1—5.
- WU Zhong-ru, GU Chong-shi, HU Qun-ge. An investigation on the dam safety comprehensive appraisal expert system[J]. **Water Resources and Power**, 2000, 18(2): 1—5.
- [8] 李婷婷, 吴中如. 大坝群在线安全监控管理决策系统[J]. 水电能源科学, 2005, 23(5): 58—60.
LI Ting-ting, WU Zhong-ru. On-line safety monitoring management decision-making system of dam group[J]. **Water Resources and Power**, 2005, 23(5): 58—60.
- [9] 酆能惠. 土石坝安全监测分析评价预报系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [10] 董泽荣, 赵华, 邱小弟. 小湾水电站高边坡安全稳定监测综述[J]. 水力发电, 2004, 30(10): 74—78.
DONG Zhe-rong, ZHAO Hua, QIU Xiao-di. Summary on the safety and stability monitoring of the high slope in Xiaowan Hydropower Station[J]. **Water Power**, 2004, 30(10): 74—78.