

文章编号: 1000-7598 (2013) 02-0316-07

交通荷载作用下公路路基工作区深度研究

卢 正¹, 王长柏², 付建军³, 詹永祥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.安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 3.中国水电顾问集团中南勘察设计研究院, 长沙 410014)

摘 要: 根据路面不平整实测资料, 获得了汽车动荷载的计算模型和参数, 并利用此荷载模式来分析公路结构的动力响应。考虑到公路结构的三维分层性状, 利用 Fourier 变换技术和求解层状结构的精确刚度矩阵法, 研究了公路结构在移动汽车荷载作用下的动力响应问题。为了方便工程应用, 利用 Odemark 厚度和模量的当量转换公式, 将公路结构简化为由路面、路基及地基组成的 3 层体系, 并以此为基础分析了路基动应力的衰减规律, 同时重点研究了汽车轴载大小、当量路面厚度及路基模量对路基工作区深度的影响, 最后建议了路基工作区深度的定量表达式, 研究结果可为公路路基设计提供参考。

关 键 词: 影响深度; 汽车荷载; 精确刚度矩阵法; 动力响应; 路面不平整; 公路工程设计

中图分类号: TU 413.6+2

文献标识码: A

Research on influence depth of road subgrade induced by vehicle loads

LU Zheng¹, WANG Chang-bo², FU Jian-jun³, ZHAN Yong-xiang¹

(1.State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Department of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China;

3. Mid-South Design and Research Institute, China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Changsha 410014, China)

Abstract: Based on the field test data of pavement roughness, the computational parameters of vehicle loads are derived, and they are used to calculate the dynamic responses of road structures. By regarding the road structures as a three-dimensional multi-layered system, the dynamic responses and the influence depth of the road subgrade induced by the moving vehicle load are studied. The governing equations of motion are solved by employing the Fourier transform technique; and the theoretical solutions of the vertical stress of subgrade are deduced with the exact stiffness matrix method. A simplified three-layer structure composed of pavement, subgrade and half-space ground is obtained by employing the method of Odemark equivalent hypothesis of thickness-modulus. Then, the distribution of vertical stress and the influence depth of road subgrade are derived. The influence of different parameters such as load amplitude, equivalent pavement thickness and the subgrade modulus on the influence depth are carefully discussed; and the formulas of subgrade influence depth induced by vehicle loads are further derived. The method developed herein may be used as a preliminary reference in road engineering design.

Key words: influence depth; vehicle load; exact stiffness matrix method; dynamic response; pavement roughness; road engineering design

1 前 言

目前, 我国正在倡导节约型公路建设, 如在平原地区采取低路堤设计方案, 既可节约土地资源、减少造价, 还能实现公路建设与自然环境的和谐统一。然而, 公路路堤的降低意味着汽车荷载的作用

深度会发生变化, 特别是修建在软土地基上的公路, 部分软基可能处于交通荷载的影响范围内, 这将导致更大的沉降变形。Fujikawa 等^[1]对日本 Saga 滨海机场高速公路的监测结果表明, 交通荷载引起的沉降为 400~600 mm, 约占总工后沉降的 50%。建于 Ariake 黏土上的日本某低路堤高速公路, 在投入运

收稿日期: 2011-11-09

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51209201, No. 51279198); 武汉市青年科技晨光计划项目 (No. 201150431070); 西部交通建设科技项目 (No. 2011318493720, No. 20113184931700, No. 2011318775680)。

第一作者简介: 卢正, 男, 1982 年生, 博士, 副研究员, 主要从事土力学及路基工程方面的研究工作。E-mail: lzwhrsm@163.com

营后发生了惊人的沉降，5 年达 1~2 m^[2]。上海地铁一号线建成未通车的两年多时间内基本没有产生沉降，但通车后 8 个月内沉降达到 30~60 mm，4 年内基本达到了 140 mm^[3]。可见，在交通荷载作用下道路的沉降问题不容忽视。而研究道路在行车荷载下的工作区深度是计算道路沉降的重要依据，同时对路基的设计具有重要的参考意义。

现有规范^[4]给出的路基工作区深度计算方法是基于静荷载作用下的弹性半空间理论，轮载被假设为集中荷载，利用 Baussinesq 解来确定汽车作用深度。事实上，作用于路面表面的交通荷载是一种大小和位置都时刻变化的运动荷载，轮胎与地面属于面源接触，公路结构也具有明显的分层特性。因此，有必要建立符合工程实际的汽车荷载模式和公路结构计算模型，利用动力学方法来研究交通荷载的影响深度。

本文针对上述问题，利用基于实测路面不平整资料获得的汽车动荷载参数作为交通荷载计算模型，将公路结构看成是三维弹性层状体系，采用积分变换方法对公路结构的动力响应问题进行求解。给出了方便工程应用的路基顶面动应力分布诺模图和路基工作区深度查询诺模图。同时研究了典型结构下路基工作区深度随汽车轴载和路基模量的变化规律。

2 考虑路面不平整的交通荷载

相对于铁路交通而言，作用在公路路面的交通荷载移动速度较低，一般不超过 120 km/h。近年来，大量的研究表明，移动荷载对地基的动力响应的影响只有当其与地基表面波速或地基内部模态波速接近时，才会十分明显。而公路结构表面波速及内部模态波速均远大于行驶在其上的汽车车速。因此，在路面完全平整时，可以忽略车速对公路结构动力响应的影响。然而，实际高速公路路面是不可能完全平整的，且路面平整度会随着运营时间的增长日益恶化。如图 1 所示的河南省许漯高速公路的实测路形^[5]，其最大不平整幅值已超过 6 mm，图中两测点之间的间距是 0.16 m。当车辆在不平整路面上行驶时，会不可避免地发生振动，从而产生超出静荷载那部分的附加动荷载。这部分附加动荷载是引起公路结构静、动应力差别的关键所在。

本文为了获得车辆附加动荷载的大小，首先应对车体模型进行简化。汽车研究部门的大量试验结果表明，1/4 车体模型在预测车辆竖向振动方面是相当成功的。因此，利用与文献[5-6]相同的方法，

把车辆简化为具有两个自由度的 1/4 车体模型，对后轴载为 100 kN 的典型车辆进行分析，结合国际高速公路路面不平整控制标准（不平整幅值≤2 mm），可得到车辆附加动荷载的表达式。同时，轮胎与地面的接触分布假定为矩形分布，考虑双轮荷载的叠加作用，荷载间距符合《公路沥青路面设计规范》中的规定^[7]。最终获得了考虑路面不平整的交通荷载计算参数如表 1 所示^[8-9]。

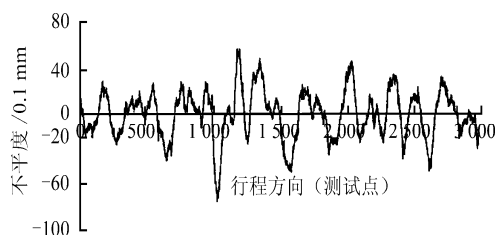


图 1 许漯高速公路路形
Fig.1 Road profile of Xuluo highway

表 1 考虑路面不平整的交通荷载参数
Table 1 Parameters of vehicle loads based on pavement roughness

后轴载 <i>P</i> /kN	荷载速度 <i>V</i> /(km/h)	动荷载系数 <i>α</i>	轮胎接地 动压强 <i>p</i> /MPa	矩形荷载的 长和宽 <i>l</i> ₁ = <i>l</i> ₂ /cm	两轮形心距 <i>L</i> /cm
100	100	1.2	0.765	19.8	31.95

3 公路路基动力响应计算

高速公路修建时往往是自下而上分层填筑的，其主要结构由路面、路基及地基组成。路面上承受着低幅值、多循环的交通荷载，在单次荷载作用下，相应的公路结构产生的变形以弹性变形为主。因此，可假设公路结构为多层线弹性介质组成，由弹性动力学原理，忽略土体自重的线弹性介质动力控制方程为

$$Gu_{ijj} + (\lambda + G)u_{jji} = \rho\ddot{u}_i \quad (1)$$

式中：*u_i* (*i* = *x, y, z*) 为弹性土体的位移矢量； \ddot{u}_i 为位移对时间的二阶偏导；*G*、 λ 为弹性土体的 Lamé 常数； ρ 为土体密度。

线弹性介质的本构关系可表示为

$$\sigma_{ij} = \lambda\theta\delta_{ij} + 2G\varepsilon_{ij} \quad (2)$$

式中： σ_{ij} 和 ε_{ij} 分别为弹性介质的各应力分量和应变分量； θ 为弹性介质的体积应变； δ_{ij} 为 Kronecker 符号。

利用势函数分解法对动力方程 (2) 进行求解，三维情况下，弹性土体的位移场可分解为由标量势 ϕ 和矢量势 ψ 表示的如下形式^[10]：

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \frac{\partial \phi}{\partial x_1} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1 \partial x_3} \\ u_y &= \frac{\partial \phi}{\partial x_2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_2 \partial x_3} \\ u_z &= \frac{\partial \phi}{\partial x_3} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

为了方便分析，可进行静止坐标系与移动坐标系的转换，即令 $x = x_1 - Vt$, $y = x_2$, $z = x_3$ ，在移动坐标系 (x, y, z) 中，引入对 x, y 的 Fourier 变换为

$$\bar{f}(\beta, \gamma, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y, z, t) e^{-i(\beta x + \gamma y)} dx dy \quad (4)$$

其逆变换为

$$f(x, y, z, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{f}(\beta, \gamma, z, t) e^{i(\beta x + \gamma y)} d\beta d\gamma \quad (5)$$

同时定义关于时间的 Fourier 变换为

$$\bar{\bar{f}}(\beta, \gamma, z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{f}(\beta, \gamma, z, t) e^{-i\omega t} dt \quad (6)$$

其逆变换为

$$\bar{f}(\beta, \gamma, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\bar{f}}(\beta, \gamma, z, \omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (7)$$

对式(1)~(3)进行式(4)和式(6)的 Fourier 变换，即可得到变换域内弹性土体的动力响应解为

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_x &= i\beta e^{-\nu_p z} A + i\beta e^{\nu_p z} B - i\beta \nu_s e^{-\nu_s z} C + i\beta \nu_s e^{\nu_s z} D \\ \bar{u}_z &= -\nu_p e^{-\nu_p z} A + \nu_p e^{\nu_p z} B + (\nu_s^2 - \omega^2 / c_s^2) e^{-\nu_s z} C + (\nu_s^2 - \omega^2 / c_s^2) e^{\nu_s z} D \\ \bar{\sigma}_z &= (2G\nu_p^2 + \lambda\omega^2 / c_p^2)(e^{-\nu_p z} A + e^{\nu_p z} B) - 2\nu_s(G\nu_s^2 - \rho\omega^2)(e^{-\nu_s z} C - e^{\nu_s z} D) \\ \bar{\tau}_{xz} &= 2Gi\beta\nu_p(-e^{-\nu_p z} A + e^{\nu_p z} B) + i\beta(2G\nu_s^2 - \rho\omega^2) \cdot (e^{-\nu_s z} C + e^{\nu_s z} D) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中： A, B, C 和 D 为待定系数，由边界条件确定。

$$\nu_p = \sqrt{\beta^2 + \gamma^2 - \omega^2 / c_p^2}, \quad \nu_s = \sqrt{\beta^2 + \gamma^2 - \omega^2 / c_s^2}, \\ c_p = \sqrt{(\lambda + 2G) / \rho}, \quad c_s = \sqrt{G / \rho}.$$

考虑一个包括面层在内的 N 层公路结构体系，其任意第 n 层 ($n=1 \sim N-1$) 和第 $n+1$ 层的交界面完全联结， z_n ($n=0, 1, \dots, N$) 表示层表面，每层厚度为 $h_n = z_n - z_{n-1}$ 。在变换域内，根据精确刚度矩阵方法推导得到每一层的应力分量和位移分量的关系为

$$\begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_z(\beta, \gamma, z_n) \\ \bar{\tau}_{xz}(\beta, \gamma, z_n) \\ \bar{\tau}_{yz}(\beta, \gamma, z_n) \\ \bar{\sigma}_z(\beta, \gamma, z_{n-1}) \\ \bar{\tau}_{xz}(\beta, \gamma, z_{n-1}) \\ \bar{\tau}_{yz}(\beta, \gamma, z_{n-1}) \end{Bmatrix} = \frac{G}{\Delta} [K]^n \begin{Bmatrix} \bar{u}_z(\beta, \gamma, z_n) \\ \bar{u}_x(\beta, \gamma, z_n) \\ \bar{u}_y(\beta, \gamma, z_n) \\ -\bar{u}_z(\beta, \gamma, z_{n-1}) \\ \bar{u}_x(\beta, \gamma, z_{n-1}) \\ \bar{u}_y(\beta, \gamma, z_{n-1}) \end{Bmatrix} \quad (9)$$

式中： $[K]^n$ 为 6×6 的对称矩阵，其具体元素及 Δ 的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta &= a\Delta_1[(3-4\mu)^2\Delta_1^2 - 4a^2h^2(1+\Delta_1)] \\ k_{11} &= 4a^2\Delta_1(1-\mu)[\Delta_1\Delta_2(3-4\mu) - 4(1+\Delta_1)ah^2] \\ k_{12} &= 2\beta\Delta_1[\Delta_1^2(1-2\mu)(3-4\mu)] - 4(1+\Delta_1)a^2h^2 \\ k_{13} &= k_{12}\gamma/\beta, k_{14} = 8a^2\Delta_2\Delta_3(1-\Delta\mu) \\ &\quad [(3-4\mu)\Delta_2 + ah\Delta_1] \\ k_{15} &= 8\beta a^2 h(1-\mu)\Delta_1^2\Delta_3, k_{16} = k_{15}\gamma/\beta, \\ k_{22} &= \Delta_1^2\Delta_2(3-4\mu)[\beta - 4(1-\mu)] + 4ah(1+\Delta_1)[ah\gamma^2\Delta_2 - 4\beta^2\Delta_1(1-\mu)] \\ k_{25} &= 2(1+\Delta_1)\{4ah[\beta^2(1-\mu)]\Delta_1\Delta_2 - ah\gamma^2(1+\Delta_1) - \Delta_1^2(3-4\mu)[\gamma^2 - 4a^2(1-\mu)]\} \\ k_{26} &= 2\beta\gamma\Delta_3[(3-4\mu)\Delta_1 + 4a^2h^2(1+\Delta_1)^2 + 4(1-\mu)\Delta_1\Delta_2] \\ k_{33} &= a^2\Delta_1[4\beta^2h^2(\Delta_1-1) - (3-4\mu)\Delta_2^2] - \beta^2[(3-4\mu)\Delta_1\Delta_2 + 16ah(1-\mu)(1+\Delta_1)] \\ k_{36} &= (1+\Delta_1)\{2\Delta_1^2(3-4\mu)[\gamma^2 + (3-4\mu)a^2] + 4ah[\beta^2h(1+\Delta_1) - \gamma^2\Delta_1\Delta_2(1-\mu)]\} \\ k_{24} &= k_{15}, k_{34} = k_{16}, k_{35} = k_{26}, k_{44} = k_{11}, k_{45} = k_{12}, \\ k_{46} &= k_{13}, k_{55} = k_{22}, k_{56} = k_{23}, k_{66} = k_{33} \\ \Delta_1 &= e^{-2ah} - 1, \Delta_2 = e^{-2ah} + 1, \Delta_3 = e^{-ah}, a = \sqrt{\beta^2 + \gamma^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

根据层间的连续条件可以得到整个层状体系的总刚度矩阵为

$$\begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_z(\beta, \gamma, 0) \\ \bar{\tau}_{xz}(\beta, \gamma, 0) \\ \bar{\tau}_{yz}(\beta, \gamma, 0) \\ \vdots \\ \bar{\sigma}_z(\beta, \gamma, z_N) \\ \bar{\tau}_{xz}(\beta, \gamma, z_N) \\ \bar{\tau}_{yz}(\beta, \gamma, z_N) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K^1 & & & & & & \\ & K^2 & & & & & \\ & & \ddots & & & & \\ & & & K^{N-1} & & & \\ & & & & K^N & & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_x(\beta, \gamma, 0) \\ \bar{u}_y(\beta, \gamma, 0) \\ \bar{u}_z(\beta, \gamma, 0) \\ \vdots \\ \bar{u}_x(\beta, \gamma, z_N) \\ \bar{u}_y(\beta, \gamma, z_N) \\ \bar{u}_z(\beta, \gamma, z_N) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

假设柔性路面由面层、基层和底基层组成，则在面层表面边界条件为

$$\sigma_z|_{z=0} = -q(x, y, t), \quad \tau_{xz}|_{z=0} = \tau_{yz}|_{z=0} = 0 \quad (12)$$

如果底层土体为半无限空间，则如下条件成立：

$$(\sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}, u_x, u_y, u_z)_{z \rightarrow \infty} = 0 \quad (13)$$

若底层土体置于刚性基岩上，则须满足

$$(u_x, u_y, u_z)_{z=z_N} = 0 \quad (14)$$

本文以一般载重车辆的后轴的一对轮胎组来进行分析，根据前文的假设，在移动坐标系中，移动轮胎组的荷载表达式可为

$$q(x, y, t) = -\frac{P(1+\alpha)}{4l_1l_2} H \left(x^2 - \frac{l_1^2}{4} \right) \left[H \left(y + \frac{L+l_2}{2} \right) - H \left(y - \frac{L-l_2}{2} \right) \right]^2 \quad (15)$$

式中： H 为 Heaviside 单位阶跃函数，其他符号的意义同表 1。

对荷载表达式 (15) 及多层体系边界条件式 (12) ~ (14) 进行式 (4) 和式 (6) 的 Fourier 变换，结合式(11)即可求出任何一层土体的位移和应力响应。然后进行式 (5) 和 (7) 的 Fourier 逆变换，最终获得各响应分量在时域内的解答。本文仅给出竖向动应力和竖向动位移的表达式为

$$u_z = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ [-v_p e^{-v_p z} A + v_p e^{v_p z} B + (v_s^2 - V^2 \beta^2 / c_s^2) e^{-v_s z} C + (v_s^2 - V^2 \beta^2 / c_s^2) e^{v_s z} D] \cdot e^{i[\beta(x-Vt)+\gamma y]} \right\} d\beta d\gamma \quad (16)$$

$$\sigma_z = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ [(2Gv_p^2 + \lambda V^2 \beta^2 / c_p^2) (e^{-v_p z} A + e^{v_p z} B) - 2v_s (Gv_s^2 - \rho V^2 \beta^2) \cdot (e^{-v_s z} C - e^{v_s z} D)] e^{i[\beta(x-Vt)+\gamma y]} \right\} d\beta d\gamma \quad (17)$$

从理论上讲，精确刚度矩阵方法可以解决任意多层结构的力学计算问题，但当层数过多时，随着层数的增加，矩阵的维数随之增大，计算量大幅度增加，为分析和设计带来不便。实际上，对于一般组成路面结构的面层、基层和底基层而言，其密度、回弹模量及泊松比等主要力学参数相差并不大，对于路基土体同样如此。因此，在进行公路结构动力学计算时，可预先利用 Odemark 厚度和回弹模量的当量转换公式，以底层结构为基础，将不同回弹模量的面层和基层的厚度折算成与底基层同

回弹模量的等效厚度^[8, 11]，即

$$H_e = \left(\frac{E}{E_1} \right)^{1/3} H \quad (18)$$

式中： H_e 为折算后的等效厚度； E 为折算前的回弹模量； H 为折算前的厚度； E_1 为底层结构的参考回弹模量。

利用上述思想可将公路结构转换为由当量路面、路基及半无限地基组成的 3 层体系，如图 2 所示。在此基础上利用上述精确刚度矩阵解进行路基动应力计算及路基工作区深度研究。

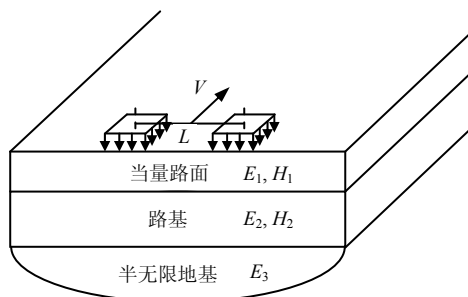


图 2 公路结构计算模型

Fig.2 Computational model of road structure

4 交通荷载的作用深度

利用快速傅立叶变换 (FFT) 对推导得到的动应力响应表达式进行数值求解。将 $-16 < \beta, \gamma < 16$ 的区间分割为 $2\ 048 \times 2\ 048$ 个区间进行计算，以确保足够的精度^[12-14]。本文下述数值计算时半无限地基的模量为 15 MPa。图 3 给出了 3 层结构体系的路基顶面动应力分布图。对于更多层的公路结构，可根据上节的转换方法，转换为图 2 所示的 3 层结构后，再查图 3 得到路基顶面动应力。当图中给出的路基高度为 3.0 m 时，当量路面厚度范围为 0.4~1.0 m，路基模量为 20~200 MPa 的计算结果，对于路基高度介于各值之间的情况，可用同样方法计算后，采用线性插值获得。

图 4 给出了当量路面厚度为 1.0 m，路基模量为 20~200 MPa 时，路基动应力沿深度方向的衰减规律。从图中可见，动应力沿深度方向衰减迅速。在浅层范围内，路基模量越大，动应力越大。而当深度大于 2.3 m 后，路基模量越大，动应力反而越小。可见，路基存在一个临界深度，小于临界深度时，路基模量越大，动应力越大。而当深度超过临界深度后，路基模量越大，动应力反而越小。一般来说，当车辆荷载引起的附加应力与自重应力之比为 0.1 时对应的路基深度，可认为是路基工作区深

度。图中直线是 1/10 自重应力线，直线和动应力衰减曲线的交点即是交通荷载的影响深度。通过图 4 可以查到不同路面厚度 (0.4~1.0 m) 和路基模量 (20~200 MPa) 下的路基动应力分布及路基工作区深度。

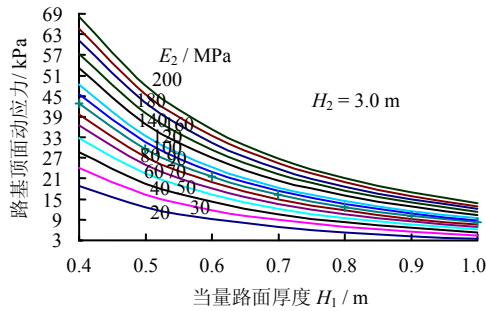


图3 汽车荷载引起的路基动应力分布规律
Fig.3 Distributions of vertical stress induced by vehicle loads

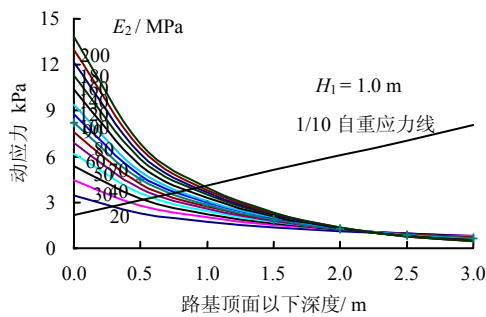


图4 汽车荷载作用下的路基工作区深度
Fig.4 Influence depths for roads induced by vehicle loads

上述计算都是在轴载为 100 kN 下的结果。事实上，我国目前公路超载严重。为了探讨超载车辆对路基工作区深度的影响。本文还计算了汽车轴载分别为 130、170、200 kN 情况下的路基工作区深度。计算过程中，取当量路面厚度为 1.0 m，同时考虑轮胎接触面积随轴载增大而增加，引入比利时方法中的轮载 P (kN) 与轮胎接地面积 A (cm^2) 关系的经验公式：

$$A = 0.008P + 152 \quad (19)$$

表 2 给出了不同路基模量和不同交通轴载下的计算结果。表中得到的路基工作区深度是从路基顶面开始记起，未包括路面的厚度。

不同路基模量下的路基工作区深度随着轴载的变化如图 5 所示。从图中可以看出，随着交通轴载的增加，路基工作区深度呈线性增大。不同路基模量下的直线几乎平行，说明其增长幅度相当。路基模量对路基工作区深度的影响如图 6 所示。从图中可见，路基工作区深度随着路基模量的增加非线性

增大，路基模量从 20 MPa 增大到 60 MPa 时，工作区深度迅速增加；路基模量超过 60 MPa 后，路基工作区深度增加趋势变缓。

表 2 不同轴载下的路基工作区深度 (m)

Table 2 Influence depths for roads under different loads

路基模量 / MPa	轴载 / kN			
	100	130	170	200
20	1.28	1.47	1.69	1.84
40	1.52	1.71	1.93	2.08
60	1.65	1.84	2.06	2.21
80	1.74	1.93	2.13	2.26
100	1.80	1.99	2.19	2.31
120	1.85	2.03	2.23	2.35
160	1.92	2.10	2.29	2.41
200	1.97	2.15	2.33	2.45

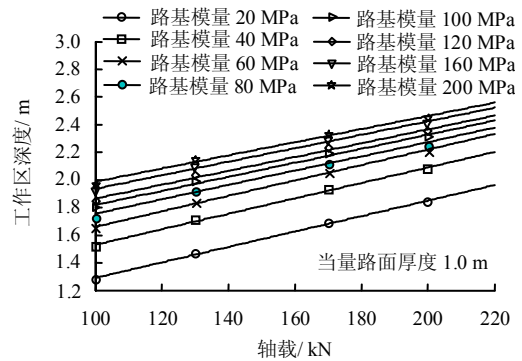


图5 轴载对工作区深度的影响
Fig.5 Influence depths varied with different loads

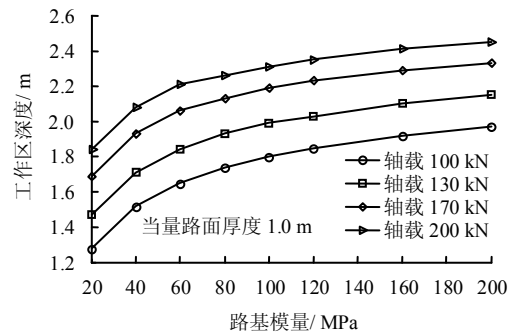


图6 路基模量对工作区深度的影响
Fig.6 Influence depths varied with different subgrade moduli

为了方便工程设计人员查询，本文利用上述 3 层结构进行了大量的计算，计算中主要考虑当量路面厚度、路基模量及交通轴载 3 个因素对路基工作区深度的影响，最终得到了路基工作区深度的定量表达式为

$$H = H_{100} + k(P - 100) \quad (20)$$

式中： H 为工作区深度； P 为轴载； H_{100} 为标准轴

载,即轴载 100 kN 下的工作区深度(可由图 4 查得), k 为拟合参数,其取值与路基模量和当量路面厚度有关。

$$\left. \begin{aligned} k &= 0.0066 - 0.0017(H_1 - 0.4) - \frac{0.0016 - 0.0025(H_1 - 0.4)}{40} \cdot (E_2 - 20) \\ &\quad (20 \text{ MPa} \leq E_2 \leq 60 \text{ MPa}) \\ k &= 0.0050 + 0.0008(H_1 - 0.4) - \frac{0.0006 - 0.0002(H_1 - 0.4)}{60} \cdot (E_2 - 60) \\ &\quad (60 \text{ MPa} < E_2 \leq 120 \text{ MPa}) \\ k &= 0.0044 + 0.0010(H_1 - 0.4) - \frac{0.0004 - 0.0003(H_1 - 0.4)}{80} \cdot (E_2 - 120) \\ &\quad (120 \text{ MPa} < E_2 \leq 200 \text{ MPa}) \end{aligned} \right\} (21)$$

由式(21)得:

$$\left. \begin{aligned} k &= 0.0065 - 0.0015(H_1 - 0.4) \\ &\quad (20 \text{ MPa} \leq E_2 \leq 60 \text{ MPa}) \\ k &= 0.0045 + 0.0010(H_1 - 0.4) \\ &\quad (60 \text{ MPa} < E_2 \leq 120 \text{ MPa}) \\ k &= 0.0042 + 0.0012(H_1 - 0.4) \\ &\quad (120 \text{ MPa} < E_2 \leq 200 \text{ MPa}) \end{aligned} \right\} (22)$$

根据图 6 所得到的结果,可将模量分为 3 段来对 k 值进行拟合,在每一段上,利用线性插值来求不同路基模量下的 k 值,如式(21)所示。若不考虑路基模量对 k 值的影响,则取每段的平均值,见式(22)。求得 k 值后再代入式(20)即可得到不同轴载下的工作区深度。

通过式(20)~(22)和图 4 便可获得不同交通轴载、不同当量路面厚度和不同路基模量下的公路路基工作区深度,对于更多层的情况,可根据本文提供的方法转换为 3 层结构后,再通过上述方法求得。

5 结 论

(1) 本文以典型三层公路结构为例,获得了方便工程应用的路基顶面动应力分布诺模图和路基工作区深度诺模图以及路基工作区深度定量计算式。

(2) 路基动应力沿深度方向衰减迅速。路基存在一个临界深度,小于临界深度时,路基模量越大,动应力越大。而当深度超过临界深度后,路基模量越大,动应力反而越小。

(3) 路基工作区深度与交通轴载之间有良好的线性关系;而工作区深度随路基模量增大呈非线性变化,路基模量小于 60 MPa 时,路基工作区深度迅速增加;路基模量超过 60 MPa 后,路基工作区深度增加趋势变缓。

(4) 确定路基工作区深度的根本依据是路基动应力,因此,要减小路基工作区深度,应从控制路基动应力入手。而路面不平整是引起路基动应力增大的关键因素,实际工程中,应尽量保证路面平整度,减小因不平整造成的附加动应力,从而减小路基工作区深度和处理深度,达到降低造价、节约投资的目的。

参 考 文 献

- [1] FUJIKAWA K, MIURA N, BEPPU I. Field investigation on the settlement of low embankment road due to traffic load and its prediction[J]. *Soils and Foundations*, 1996, 36(4): 147-153.
- [2] YASUHARA K, HIRAO K, HYODO M. Partial-drained behavior of clay under cyclic loading[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Rotterdam: Balkema, 1988: 659-664.
- [3] 王常晶. 列车移动荷载作用下地基的动应力及饱和软黏土特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [4] 中华人民共和国交通部. JTGD30-2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [5] 姚海林, 卢正, 罗海宁, 等. 交通荷载作用下 Kelvin 地基上不平路面动力响应分析[J]. *岩土力学*, 2009, 30(4): 890-896.
- [6] YAO Hai-lin, LU Zheng, LUO Hai-ning, et al. Dynamic response of rough pavement on Kelvin foundation subjected to traffic loads[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(4): 890-896.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 中华人民共和国交通部. JTG D50-2006 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [10] 卢正, 姚海林, 吴万平, 等. 高速公路路基结构分析及动变形设计方法[J]. *岩土力学*, 2010, 31(9): 2907-2912.

- Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)**, 2007, 34(3): 221—224.
- [9] 刘汉乐, 周启友, 徐速. 非饱和带中非均值条件下 LNAPL 运移与分布特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, (5): 52—57.
LIU Han-le, ZHOU Qi-you, XU Su. An experimental investigation of LNAPL migration and redistribution in unsaturated heterogeneous porous media[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2006, (5): 52—57.
- [10] 林琳, 杨金忠, 史良胜, 等. 区域饱和-非饱和地下水流运动数值模拟[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6): 53—57.
LIN Lin, YANG Jin-zhong, SHI Liang-sheng, et al. Saturated and unsaturated groundwater flow numerical simulation in large scale zone[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2005, 38(6): 53—57.
- [11] OUNG O, HASSANIZEDEH S M, BEZUIJEN A. Two-phase flow experiments in a geocentrifuge and the significance of dynamic capillary pressure effect[J]. **Journal of Porous Media**, 2005, 8(3): 247—257.
- [12] FINSTERLE S, FAYBISHENKO B. Inverse modeling of a radial multistep outflow experiment for determining unsaturated hydraulic properties[J]. **Advances in Water Resources**, 1999, 22(5): 431—444.
- [13] OCARROLL D M, PHELAN T J, ABRIOLA L M. Exploring dynamic effects in capillary pressure in multistep outflow experiments[J]. **Water Resources Research**, 2005, 41(11): W11419, doi: 10.1029/2005WR004010.
- [14] HASSANIZEDEH S M, GRAY W G. Thermodynamic basis of capillary pressure in porous media[J]. **Water Resources Research**, 1993, 29(10): 3389—3405.
- [15] WEI C F, DEWOOLKAR M M. A continuum theory of nonequilibrium two-phase flow through porous media with capillary relaxation[C]//Advances in Unsaturated Soil, Seepage, and Environmental Geotechnics, Proceedings of Sessions of GeoShanghai. Shanghai: Geotechnical Special Publications, 2006: 246—254.
- [16] WEI C F, MURALEETHARAN K K. Acoustical characterization of fluid-saturated porous media with local heterogeneities: Theory and application[J]. **International Journal of Solids and Structures**, 2006, 43(5): 982—1008.
- [17] LU N, WAYLLANCE A, CARRERA L, et al. A constant flow for concurrently measuring soil water characteristic curve and hydraulic conductivity function[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2006, 29(3): 230—241.
- [18] 陈辉, 韦昌富, 陈盼, 等. 一种测定非饱和土-水力参数的方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3348—3353.
CHEN Hui, WEI Chang-fu, CHEN Pan, et al. A method for determining hydraulic parameters of unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3348—3353.

上接第 321 页

- LU Zheng, YAO Hai-lin, WU Wan-ping, et al. Structural analysis and design method of dynamic deformation of expressway subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2907—2912.
- [9] 卢正. 交通荷载作用下公路结构动力响应及路基动强度设计方法研究[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2009.
- [10] PICOUX B, HOUEDDEC D. Diagnosis and prediction of vibration from railway trains[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2005, 25(12): 905—921.
- [11] 张千里, 韩自力, 吕宾林. 高速铁路路基基床结构分析及设计方法[J]. 中国铁道科学, 2005, 26(6): 53—57.
ZHANG Qian-li, HAN Zi-li, LÜ Bing-lin. Structural analysis and design method for subgrade bed of high speed railway[J]. **China Railway Science**, 2005, 26(6): 53—57.
- [12] JONES D V, HOUEDDEC 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: 153—166.
- [13] SHENG X, JONES C J C, PETYT M. Ground vibration generated by a load moving along a railway track[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 1999, 228(1): 129—156.
- [14] TAKEMIYA H, BIAN X C. Substructure simulation of inhomogeneous track and layered ground dynamic interaction under train passage[J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 2005, 131: 699—711.