文章编号:1673-0291(2026)02-0046-10 **DOI**:10.11860/j.issn.1673-0291.20250020

车辆–温度荷载耦合作用下层状道路结构动力响应研究

辛 剑[1],孙海峰[1],刘 永[1,2],李春宇[1,2]
(1.中交一公局第七工程有限公司,郑州 451450;
2.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)

摘 要:针对道路结构动力响应分析中,车辆荷载与自然环境温度荷载长期耦合作用机理尚不清晰的问题,提出了一种综合考虑移动车辆荷载与昼夜温度变化耦合效应的分析模型.利用热弹性理论描述路面、基层与路基,并引入热耦合饱和多孔弹性介质理论模拟软土地基,从而构建了一个车辆荷载-温度荷载-层状道路的全耦合分析模型.基于此模型,结合Laplace-Hankel积分变换方法,得到系统在变换域内的解,并通过数值逆变换获得物理时域内的解.结果表明:在昼夜温度变化作用下,温度波动随深度增加而急剧衰减,其每日波动主要集中于道路顶面以下0.3 m的浅层范围内;该浅层温度变化会直接引发面层结构的热变形,并进一步向深层传递,诱发路基与地基的动力响应,软土地基内的超孔隙水压力响应在深度约2 m处达到峰值.在温度与车辆荷载的耦合作用下,道路顶面的最大竖向位移以及软土地基内的孔隙水压力变化量,分别可达仅考虑车辆荷载单独作用时的61%与240%.研究结果可以为准确评估道路结构在复杂环境与交通荷载耦合作用下的动力响应与长期性能提供了理论方法与定量参考.

关键词:动力响应;层状道路结构;温度荷载;车辆荷载
中图分类号:TU443 **文献标志码**:A

Study on dynamic response of layered pavement structure under coupled vehicle and thermal loads

XIN Jian[1], *SUN Haifeng*[1], *LIU Yong*[1,2], *LI Chunyu*[1,2]
(1.The Seventh Engineering Co., Ltd. of CFHEC, Zhengzhou 451450, China;
2.State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: To address the unclear long-term coupling mechanisms between vehicle loads and environmental thermal loads in the dynamic response analysis of pavement structures, this study proposes an analytical model that comprehensively considers the coupled effects of moving vehicle loads and diurnal temperature variations. By utilizing thermoelastic theory to describe the pavement surface, base, and subgrade, and introducing the theory of a thermally coupled saturated porous elastic medium to simulate the soft soil foundation, a fully coupled analytical model encompassing the vehicle load, thermal load, and layered pavement system is established. Based on this model, combined with the

收稿日期:2025-02-18;**修回日期**:2025-04-15
基金项目:国家自然科学基金(42077262)
Foundation item: National Natural Science Foundation of China(42077262)
第一作者:辛剑(1982—),男,陕西宝鸡人,高级工程师.研究方向为道路工程.**email**:26266249@qq.com.
通信作者:刘永(1987—),男,黑龙江巴彦人,高级工程师.**email**:1037467957@qq.com.

引用格式:辛剑,孙海峰,刘永,等.车辆-温度荷载耦合作用下层状道路结构动力响应研究[J].北京交通大学学报,2026,50(2):46-55.
XIN Jian, SUN Haifeng, LIU Yong, et al. Study on dynamic response of layered pavement structure under coupled vehicle and thermal loads[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(2): 46-55.(in Chinese)

Laplace-Hankel integral transforms, the system's solutions in the transform domain are derived, and solutions in the physical time domain are obtained through numerical inversion. The results indicate the following: Under diurnal temperature variations, thermal fluctuations attenuate rapidly with increasing depth, with daily variations primarily concentrated within a shallow depth of 0.3 m below the pavement surface; These shallow temperature changes directly induce thermal deformation in the surface layer, which further propagates downward to trigger dynamic responses in the subgrade and foundation, and the excess pore water pressure in the soft soil foundation peaks at a depth of approximately 2 m; Under the coupled action of thermal and vehicle loads, the maximum vertical displacement at the pavement surface and the variation in pore water pressure within the soft soil foundation reach 61% and 240% of the values induced by the vehicle load alone, respectively. This research provides a theoretical framework and quantitative reference for accurately evaluating the dynamic responses and long-term performance of pavement structures under the coupled effects of complex environmental and traffic loads.

Keywords: dynamic response; layered pavement structure; thermal load; vehicle load

公路的长期性能受到车辆载荷和环境因素的共同影响,其中温度是最重要的影响因素之一,温度变化可能导致道路劣化,引起路面的不均匀变形和热裂缝等病害[1].为了研究温度变化导致道路损害的机理,通常将道路结构模拟为热弹性介质以研究道路内部的热应力响应.文献[2]针对刚性路面,将其简化为在Winkler弹性基础上的各向同性板,利用有限元方法研究了其热应力分布规律.文献[3]基于数值方法分析了混凝土路面中的热应力,并通过实验结果验证了计算结果的正确性.文献[4]基于完整的道路模型与轴对称多层弹性介质假设,研究了柔性路面的热应力.文献[5-6]基于多层弹性理论,研究了路面的热裂缝现象.为了进一步研究由温度荷载和机械载荷共同引起的响应,文献[7]基于考虑土体惯性的多层热弹性介质模型,推导出了其解析解.

与道路上部结构不同,由于地下水和降雨入渗等影响,软土地基的含水率通常较高且接近饱和状态[8].由于孔隙水对土体的力学特性和热传导特性影响较大[9-10],使用饱和多孔弹性介质描述软土地基的物理力学特性比弹性介质更合适.针对文献[10]提出的饱和多孔介质理论,文献[11-13]基于该理论框架研究了饱和多孔弹性介质在动力荷载作用下的响应.文献[14]建立了温度影响的多孔弹性理论控制方程,研究了深埋点热源作用下多孔弹性介质中孔压的消散问题.文献[15]基于一维饱和多孔弹性模型研究了热-水-力耦合效应,并发现在渗透率低且孔隙率高时耦合效应影响显著.文献[16]基于拉普拉斯变换方法推导出了一维固结问题的控制方程解.上述研究主要关注多孔弹性介质的热固结行为,控制方程中没有包含土颗粒和孔隙水质量,导致无法准确模拟车辆等高频机械荷载作用下土体的动力响应,因此现有的模型不适用于描述车辆载荷引起的地基土体动力特性[17].在控制方程内考虑土颗粒和孔隙水的惯性,文献[18]基于控制方程中考虑土颗粒和孔隙水惯性的思路,提出了轴对称热耦合多孔弹性模型,并详细研究了半空间内的动态热-力学响应.

综上所述,本文基于文献[18]的模型,考虑道路各层之间的协调变形,构建了考虑热弹性与热耦合饱和多孔介质效应的层状道路耦合动力模型,并结合Laplace-Hankel积分变换推导解析解,系统揭示温度对道路结构动力响应的影响机制,为道路评估提供了新依据.

1　层状道路动力学模型建立

为了研究在车辆荷载和环境温度荷载耦合作用下道路整体的动力响应,建立了车辆荷载-温度荷载-多层道路-软土地基模型,见图1.图1中,$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}$、$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}$分别为不同界面处的动力响应;$R_{\mathrm{V}}$、$R_{\mathrm{T}}$分别为车辆与

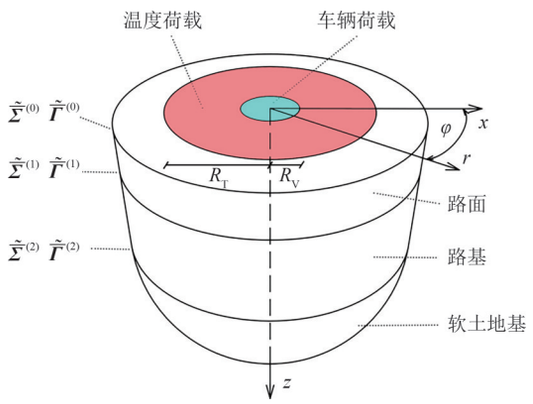


图1　计算模型示意图

Fig.1　Schematic diagram of the calculation model

环境温度荷载；x、z为模型的坐标轴；r、φ为坐标轴与水平面夹角.在道路的表面模拟实际工况施加等效荷载半径为R_V的车辆荷载和半径为R_T的环境温度荷载.考虑到道路结构具有层状特性，每层的力学性质和热传导特性相差较大，因此按照实际道路的结构形式，建立由刚性路面、基层、路基和软土地基组成的道路模型.由于路面、基层和路基的含水率通常较低，可以使用热弹性模型进行模拟.而软土地基通常接近于饱和状态，采用热耦合饱和多孔弹性介质模拟更合适.需要说明的是，深厚软土地基通常会采用堆载预压法、真空预压法、复合地基法等方法处理，由于本文建立的模型未考虑桩体的影响，不适用于采用复合地基工况模拟.考虑到实际工程中软土地基顶面也会设置砂层等排水通道，模型中软土地基顶部设置为透水边界，但由于砂层厚度较小，且与路基力学性质差别不大，模型中未单独设置砂层.

1.1 热弹性面层、基层和路基模型

考虑热效应的弹性模型本构方程可表示为[7]

$$\sigma_{z,\mathrm{p}}=\lambda e_{\mathrm{p}}+2G_{\mathrm{p}}\frac{\partial u_{z,\mathrm{p}}}{\partial z}-\beta_{1,\mathrm{p}}\theta_{\mathrm{p}} \tag{1}$$

$$\sigma_{rz,\mathrm{p}}=G_{\mathrm{p}}\left(\frac{\partial u_{r,\mathrm{p}}}{\partial z}+\frac{\partial u_{z,\mathrm{p}}}{\partial r}\right) \tag{2}$$

式中：$\sigma_{z,\mathrm{p}}$为z方向的正应力；$\sigma_{rz,\mathrm{p}}$为rz方向的剪切应力；$u_{r,\mathrm{p}}$、$u_{z,\mathrm{p}}$分别为r、z方向上的正应变；λ_{p}、G_{p}为路面材料Lamé常数；$e_{\mathrm{p}}=\frac{\partial u_{r,\mathrm{p}}}{\partial r}+\frac{u_{r,\mathrm{p}}}{r}+\frac{\partial u_{z,\mathrm{p}}}{\partial z}$为路面材料的体应变；$\beta_{1,\mathrm{p}}=(3\lambda_{\mathrm{p}}+2G_{\mathrm{p}})\alpha_{\mathrm{s,p}}$为热模量，$\alpha_{\mathrm{s,p}}$为路面材料的线性热膨胀系数；$\theta_{\mathrm{p}}=T_{\mathrm{p}}-T_{0,\mathrm{p}}$为路面的温度增量，$T_{\mathrm{p}}$、$T_{0,\mathrm{p}}$分别为路面的温度、初始温度.

轴对称线弹性模型的运动方程为

$$\frac{\partial\sigma_{r,\mathrm{p}}}{\partial r}+\frac{\partial\sigma_{rz,\mathrm{p}}}{\partial z}+\frac{\sigma_{r,\mathrm{p}}-\sigma_{\theta,\mathrm{p}}}{r}=\rho_{\mathrm{p}}\frac{\partial^2u_{r,\mathrm{p}}}{\partial t^2} \tag{3}$$

$$\frac{\partial\sigma_{z,\mathrm{p}}}{\partial z}+\frac{\partial\sigma_{rz,\mathrm{p}}}{\partial r}+\frac{\sigma_{rz,\mathrm{p}}}{r}=\rho_{\mathrm{p}}\frac{\partial^2u_{z,\mathrm{p}}}{\partial t^2} \tag{4}$$

式中：$\sigma_{r,\mathrm{p}}$、$\sigma_{\theta,\mathrm{p}}$分别为$r$、$\theta$方向的正应力；$\rho_{\mathrm{p}}$为材料密度；$t$为时间.

将本构方程(1)、方程(2)代入方程(3)、方程(4)中，可得到用位移形式表示的运动方程

$$\nabla^2u_{r,\mathrm{p}}+\eta_{\mathrm{p}}\frac{\partial e_{\mathrm{p}}}{\partial r}-\frac{1}{r^2}u_{r,\mathrm{p}}-\frac{\beta_{1,\mathrm{p}}}{G_{\mathrm{p}}}\frac{\partial\theta_{\mathrm{p}}}{\partial r}=\frac{\rho_{\mathrm{p}}}{G_{\mathrm{p}}}\frac{\partial^2u_{r,\mathrm{p}}}{\partial t^2} \tag{5}$$

$$\nabla^2u_{z,\mathrm{p}}+\eta_{\mathrm{p}}\frac{\partial e_{\mathrm{p}}}{\partial z}-\frac{\beta_{1,\mathrm{p}}}{G_{\mathrm{p}}}\frac{\partial\theta_{\mathrm{p}}}{\partial z}=\frac{\rho_{\mathrm{p}}}{G_{\mathrm{p}}}\frac{\partial^2u_{z,\mathrm{p}}}{\partial t^2} \tag{6}$$

式中：$\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}$为Laplace算子；$\eta_{\mathrm{p}}=\frac{1}{1-2\mu_{\mathrm{p}}}$；$\mu_{\mathrm{p}}$为路面材料的泊松比.

从0到t内流过单位面积的热量Q_{p}可以表示为

$$Q_{\mathrm{p}}=\int_0^t q_{z,\mathrm{p}}\mathrm{d}t \tag{7}$$

式中：$q_{z,\mathrm{p}}=-K_{\mathrm{p}}\frac{\partial\theta_{\mathrm{p}}}{\partial z}$为$z$方向的热通量，$K_{\mathrm{p}}$为热传导系数.

考虑热松弛效应的热传导方程可以表示为

$$m_{\mathrm{p}}\left(\frac{\partial}{\partial t}+\tau_{\mathrm{p}}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\theta_{\mathrm{p}}=K_{\mathrm{p}}\nabla^2\theta_{\mathrm{p}} \tag{8}$$

式中：$m_{\mathrm{p}}=\rho_{\mathrm{p}}C_{\mathrm{p}}$，$C_{\mathrm{p}}$为路面材料的比热容；$\tau_{\mathrm{p}}$为路面材料的热松弛系数.

为了求解上述偏微分方程，需要对r和z方向使用式(9)的m阶拉普拉斯-汉克变换和式(10)的m阶拉普拉斯-汉克逆变换.

$$\tilde{f}^m(\xi,z,s)=\int_0^{+\infty}\int_0^{+\infty}f(r,z,t)J_m(\xi r)r\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}r\mathrm{d}t \tag{9}$$

$$f(r,z,t)=\frac{1}{2\pi\mathrm{i}}\int_{a-\mathrm{i}\infty}^{a+\mathrm{i}\infty}\int_0^{+\infty}\tilde{f}^m(\xi,z,s)J_m(\xi r)\xi\mathrm{e}^{st}\mathrm{d}\xi\mathrm{d}s \tag{10}$$

式中：f为在空间和时间域内的变量；$\tilde{f}^m$为f在m阶拉普拉斯-汉克变换后得到变量；ξ、s分别为汉克、拉普拉斯的变换参数；J_m为m阶拉普拉斯-汉克变换.

Ai等[7]使用Laplace-Hankel变换对热弹性介质的控制方程进行了求解，并得到了热弹性层在变换域内的动力响应关系

$$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}_{\mathrm{p}}=\boldsymbol{K}_{\mathrm{p}}\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}_{\mathrm{p}} \tag{11}$$

式中：$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}_{\mathrm{p}}=\begin{bmatrix}-\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}^{(0)}\\ \tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}^{(1)}\end{bmatrix}$和$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}_{\mathrm{p}}=\begin{bmatrix}\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}^{(0)}\\ \tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}^{(1)}\end{bmatrix}$分别为路面层顶面和底面的动力响应向量；$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}^{(j)}=\begin{bmatrix}\tilde{\tilde{\sigma}}^0_{z,j} & \tilde{\tilde{\sigma}}^1_{zr,j} & \tilde{\tilde{\theta}}^0_j\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$和$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}^{(j)}=\begin{bmatrix}\tilde{\tilde{u}}^0_{z,j} & \tilde{\tilde{u}}^1_{r,j} & \tilde{\tilde{Q}}^0_j\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$为第$j$个分界面上的动力响应；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{p}}$为$6\times6$的矩阵，其具体表达式见文献[7].

类似的，可以得到热弹性基层和路基的动力响应关系

$$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}_{\mathrm{b}}=\boldsymbol{K}_{\mathrm{b}}\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}_{\mathrm{b}} \tag{12}$$

$$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}_{\mathrm{s}}=\boldsymbol{K}_{\mathrm{s}}\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}_{\mathrm{s}} \tag{13}$$

式中：$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}_{\mathrm{b}}=\begin{bmatrix}-\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}^{(1)}\\ \tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}^{(2)}\end{bmatrix}$和$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}_{\mathrm{b}}=\begin{bmatrix}\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}^{(1)}\\ \tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}^{(2)}\end{bmatrix}$分别为基层顶面和底面的动力响应向量；$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}_{\mathrm{s}}=\begin{bmatrix}-\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}^{(2)}\\ \tilde{\tilde{\boldsymbol{\Sigma}}}^{(3)}\end{bmatrix}$和$\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}_{\mathrm{s}}=\begin{bmatrix}\tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}^{(2)}\\ \tilde{\tilde{\boldsymbol{\Gamma}}}^{(3)}\end{bmatrix}$分别为路基顶面和底面的动力响应向量.

1.2 软土地基模型

考虑热耦合效应的多孔介质材料本构方程可以表示为[14]

$$\sigma_z=\lambda e+2G\frac{\partial u_z}{\partial z}-\beta_1\theta-p_w \tag{14}$$

$$\sigma_{rz}=G\left(\frac{\partial u_r}{\partial z}+\frac{\partial u_z}{\partial r}\right) \tag{15}$$

式中:σ_z、σ_{rz}分别为应力在z、rz方向的分量;u_r、u_z分别为位移在r、z方向的分量;λ、G为软土地基土体Lamé常数;$e=\frac{\partial u_r}{\partial r}+\frac{u_r}{r}+\frac{\partial u_z}{\partial z}$为软土的体应变;$\beta_1=(3\lambda+2G)\alpha_s$为热模量,$\alpha_s$为线性热膨胀系数;$\theta=T-T_0$为软土的温度增量,$T$为软土的温度,$T_0$为软土的初始温度;$p_w$为孔隙水压.

考虑土体和孔隙水的惯性,在柱坐标系下多孔介质的运动控制方程可以表示为

$$\frac{\partial\sigma_r}{\partial r}+\frac{\partial\sigma_{rz}}{\partial z}+\frac{\sigma_r-\sigma_\theta}{r}=\rho\frac{\partial^2u_r}{\partial t^2}+\rho_w\frac{\partial^2w_r}{\partial t^2} \tag{16}$$

$$\frac{\partial\sigma_z}{\partial z}+\frac{\partial\sigma_{rz}}{\partial r}+\frac{\sigma_{rz}}{r}=\rho\frac{\partial^2u_z}{\partial t^2}+\rho_w\frac{\partial^2w_z}{\partial t^2} \tag{17}$$

式中:σ_r、σ_θ分别为应力在r、θ方向的分量;$\rho=n\rho_w+(1-n)\rho_s$为软土密度,n为软土的孔隙度,ρ_s、ρ_w分别为土颗粒、孔隙水的密度;w_r、w_z分别为孔隙水在r、z方向相对于土颗粒的位移.

将式(14)、式(15)代入式(16)、式(17)可得

$$(\lambda+G)\frac{\partial e}{\partial r}+G\nabla^2u_r-\frac{G}{r^2}u_r-\beta_1\frac{\partial\theta}{\partial r}-\frac{\partial p_w}{\partial r}=\rho\frac{\partial^2u_r}{\partial t^2}+\rho_w\frac{\partial^2w_r}{\partial t^2} \tag{18}$$

$$(\lambda+G)\frac{\partial e}{\partial z}+G\nabla^2u_z-\beta_1\frac{\partial\theta}{\partial z}-\frac{\partial p_w}{\partial z}=\rho\frac{\partial^2u_z}{\partial t^2}+\rho_w\frac{\partial^2w_z}{\partial t^2} \tag{19}$$

基于Biot的理论[10],流体的运动方程和渗流连续方程分别为

$$-p_{w,i}=\rho_w\frac{\partial^2u_i}{\partial t^2}+\frac{\rho_wg}{k_d}\frac{\partial w_i}{\partial t}+\frac{\rho_w}{n}\frac{\partial w_i}{\partial t^2} \tag{20}$$

$$\frac{\partial e}{\partial t}+\frac{\partial\varsigma}{\partial t}+\frac{n}{K_w}\frac{\partial p}{\partial t}-3\alpha_u\frac{\partial\theta}{\partial t}=0 \tag{21}$$

式中:下标$i=z,r$;k_d为孔隙水的渗透系数;ς为孔隙水的体应变;K_w为孔隙水的体积模量;$\alpha_u=n_0\alpha_w+(1-n_0)\alpha_s$为软土的线膨胀系数,$\alpha_w$、$\alpha_s$分别为孔隙水、土颗粒的线性热膨胀系数.

基于Lord-Shulman模型[19],带有热松弛时间的热传导方程可以表示为

$$m\left(\frac{\partial}{\partial t}+\tau\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\theta+\beta_1T_0\left(\frac{\partial}{\partial t}+\tau\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)e=K\theta_{ii} \tag{22}$$

式中:τ为热松弛时间;K为热传导系数;$m=n_0\rho_wc_w+(1-n_0)\rho_sc_s$为软土的比热容,$c_w$、$c_s$分别为孔隙水、土颗粒的比热容.

通过单位面积的热量Q可以表示为

$$Q=\int_0^t q_z\mathrm{d}t \tag{23}$$

式中:$q_z=-K\frac{\partial\theta}{\partial z}$为$z$方向单位面积的热通量.

Tang等[18]使用Laplace-Hankel变换对上述偏微分方程进行了求解,其解也可以表示为

$$-\tilde{\bar{\boldsymbol{\Sigma}}}_h=\boldsymbol{K}_h\tilde{\bar{\boldsymbol{\Gamma}}}_h \tag{24}$$

式中:$\tilde{\bar{\boldsymbol{\Sigma}}}_h=[\tilde{\bar{\sigma}}_h\ \ \tilde{\bar{\sigma}}_{zr}^1\ \ \tilde{\bar{\theta}}\ \ \tilde{\bar{p}}_w^0]^T$;$\tilde{\bar{\boldsymbol{\Gamma}}}_h=[\tilde{\bar{u}}_z^0\ \ \tilde{\bar{u}}_r^1\ \ \tilde{\bar{Q}}^0\ \ \tilde{\bar{w}}_z^0]^T$;$\boldsymbol{K}_h$为软土地基模型的单元刚度矩阵.

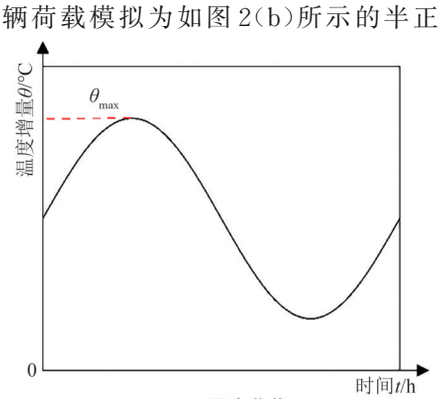
1.3　道路温度和车辆荷载

根据文献[20],在一天内道路表面的温度变化可以用如图2(a)所示的正弦函数波表示.本模型中将道路温度表面温度荷载模拟为半径为R_T的圆形荷载,路表温度增量$\theta(r,0,t)$的变化可以表示为

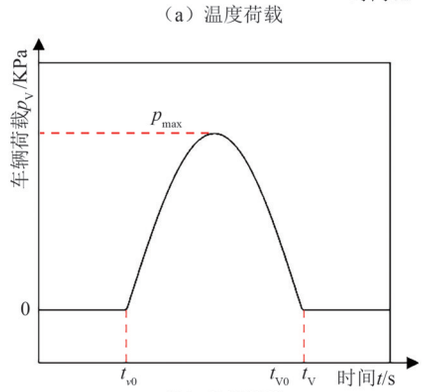
$$\theta(r,0,t)=T(r,0,t)-T_0=H(R_T-r)\theta_{max}\sin\omega_Tt \tag{25}$$

式中:T_0为道路的平均温度;$T(r,0,t)$为道路表面的温度;θ_{max}为道路表面温度变化幅值;$\omega_T=2\pi/(24\times3\,600)$ rad/s为地球转动的角速度;$H(\cdot)$为Heaviside阶跃函数;本文将平均温度T_0和温度变化幅值θ_{max}均取为20 ℃,模拟温带地区的春秋季节.

车辆荷载模拟为如图2(b)所示的半正弦冲击



(a) 温度荷载



(b) 车辆荷载

图2　荷载示意图

Fig.2　Schematic diagram of loads

波，可以表示为

$$p_{\mathrm{V}}(r,0,t)=p_{\max}\sin\left[\omega_{\mathrm{V}}(t-t_{\mathrm{V_0}})\right]H(R_{\mathrm{V}}-r)\times H(t-t_{\mathrm{V_0}})\mathrm{H}(t_{\mathrm{V_0}}+t_{\mathrm{V}}-t) \tag{26}$$

式中：$p_{\max}$为车辆荷载的峰值；$\omega_{\mathrm{V}}=\pi/t_{\mathrm{V}}$为圆频率；$t_{\mathrm{V_0}}$为半正弦车辆荷载开始作用的时间；$t_{\mathrm{V}}$为半正弦车辆荷载持续的时间.

对温度和车辆荷载的表达式使用0阶Laplace-Hankel变换，可以得到温度和车辆荷载在变换域内的表达式为

$$\tilde{\bar{\theta}}^{0}(\xi,0,s)=\frac{\theta_{\max}R_{\mathrm{T}}J_1(\xi R_{\mathrm{T}})\omega_{\mathrm{T}}}{\xi(\omega_{\mathrm{T}}^2+s^2)} \tag{27}$$

$$\tilde{\bar{p}}_{\mathrm{V}}^{0}(\xi,0,s)=\frac{p_{\max}R_{\mathrm{V}}J_1(\xi R_{\mathrm{V}})}{\xi(s^2+w_{\mathrm{V}}^2)}(\mathrm{e}^{-st_{\mathrm{V_0}}}w_{\mathrm{V}}-\mathrm{e}^{-s(t_{\mathrm{V_0}}+t_{\mathrm{V}})})\cdot(\cos(w_{\mathrm{V}}t_{\mathrm{V}})w_{\mathrm{V}}+\sin(w_{\mathrm{V}}t_{\mathrm{V}})s) \tag{28}$$

道路表面的外部荷载可以表示为

$$\tilde{\bar{F}}(\xi,0,s)=\left[\tilde{\bar{p}}_{\mathrm{V}}^{0}(\xi,0,s)\quad\tilde{\bar{\theta}}^{0}(\xi,0,s)\right]^{\mathrm{T}} \tag{29}$$

式中：J_1为1阶Laplace-Hankel变换.

1.4 层状系统建立和求解方法

假设道路各层之间紧密连接且软土地基顶面完全透水，则各个界面之间的动力响应连续，软土地基顶面完全透水透气孔隙水压为0.道路表面的边界条件可以表示为

$$\tilde{\bar{\boldsymbol{\Sigma}}}^{(0)}(\xi,0,s)=\tilde{\bar{F}}(\xi,0,s) \tag{30}$$

根据路面、基层、路基和软土地基的动力响应关系、道路表面的边界条件以及各层之间的连续性，整个道路体系的动力响应关系可以表示为

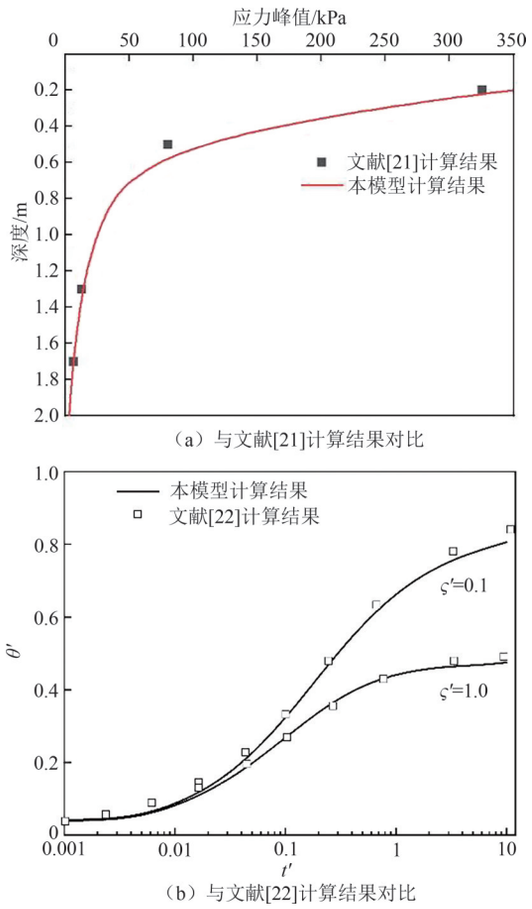
$$[\tilde{\bar{\boldsymbol{\Gamma}}}(\xi,s)0000000000]=\boldsymbol{K}[\tilde{\bar{\boldsymbol{\Gamma}}}^{(0)}\tilde{\bar{\boldsymbol{\Gamma}}}^{(1)}\tilde{\bar{\boldsymbol{\Gamma}}}^{(2)}\tilde{\bar{\boldsymbol{\Gamma}}}^{(3)}] \tag{31}$$

式中：$\boldsymbol{K}$为道路整体的刚度矩阵，由$\boldsymbol{K}_{\mathrm{P}}$、$\boldsymbol{K}_{\mathrm{b}}$、$\boldsymbol{K}_{\mathrm{s}}$和$\boldsymbol{K}_{\mathrm{h}}$组成，其大小为13×13.

在给定边界条件后，可以算出各层面上的$\tilde{\bar{\boldsymbol{\Gamma}}}^{(j)}$，进而可以算出道路各层的积分常数，最后即可算出道路任意位置处动力响应在变换域内的值.由于通过上述推导得到的动力响应结果是在变换域内的值，仍然需要使用Laplace-Hankel逆变换得到最终时域内的值.本文使用包含两个步骤的数值积分方法来完成Laplace-Hankel逆变换，先使用6点高斯积分进行Hankel逆变换，然后使用Durbin方法实现Laplace逆变换.

1.5 动力学模型正确性验证

为了验证模型的正确性，需要与已有的文献做对比.首先将本文计算模型与文献[21]实测路基内动应力曲线进行对比.文献[21]通过现场测试得到了路基内部的动应力分布规律，文中也给出了土体和测试车辆的具体力学参数，计算模型中机械荷载的作用面积与现场试验卡车轮胎和路基接触面积保持一致，其他荷载与土体的力学参数也保持一致.实测与计算得到的动应力随深度分布曲线见图3(a).由图3(a)可知，实测与计算得到的动应力符合较好.



(a) 与文献[21]计算结果对比

(b) 与文献[22]计算结果对比

图3 计算模型与已有文献对比

Fig.3 Comparison between computational models and existing literature

为了进一步验证在温度荷载作用下动力响应计算结果的正确性，通过将软土地基的n、ρ_{w}、c_{w}设置为可以忽略的值0.001，将热耦合饱和多孔介质退化成热弹性介质，并与文献[22]计算结果进行了对比.在内部矩形脉冲热源荷载作用下，热弹性半空间表面$r=0,z=0$处的温度变化时程曲线见图3(b).图中比较了本模型和文献[22]在两种表面热传导系数($\varsigma'=0.1$、1.0)下的计算结果，且对计算结果进行了无量纲化，无量纲参数定义为$t'=\dfrac{Kt}{mR_{\mathrm{T}}^2}$、$\theta'=\dfrac{K\theta}{R_{\mathrm{T}}q_{\max}}$和$\varsigma'=\dfrac{\varsigma}{R_{\mathrm{T}}}$.由图3(b)可知，本模型和文献[22]的计算结果符合较好.

2　数值计算结果与讨论

基于层状道路-软土地基模型,研究了在昼夜温度变化以及车辆荷载作用下层状道路和软土地基的动力响应规律.模型中的面层材料选取为水泥混凝土,面层、基层和路基的力学参数选取参照文献[23-24],见表1.软土地基的力学参数参考文献[24],见表2.需要说明的是,本文道路结构参数选取参考文献[24]中的Saga机场公路结构,具体的公路结构参数不影响本文模型方法的适用性.

表1　路面-基层-路基计算参数

Tab.1　Calculation parameters of pavement-base-roadbed

各层性质	混凝土面层	基层	路基
厚度/m	0.1	0.3	1.0
弹性模量E/MPa	15 000	1 000	60
泊松比ν	0.2	0.25	0.3
密度ρ/(kg·m^{-3})	2 400	2 250	2 100
热传导系数K/(W·(m·℃)$^{-1}$)	1.4	1.2	1.0
热膨胀系数$\alpha\times10^{-5}$/(℃$^{-1}$)	1.01	1.5	5.2
热松弛系数τ	0.02	0.02	0.02
初始温度T_0/K	293	293	293
比热容C/(J/(kg·℃))	800	1 000	1 500

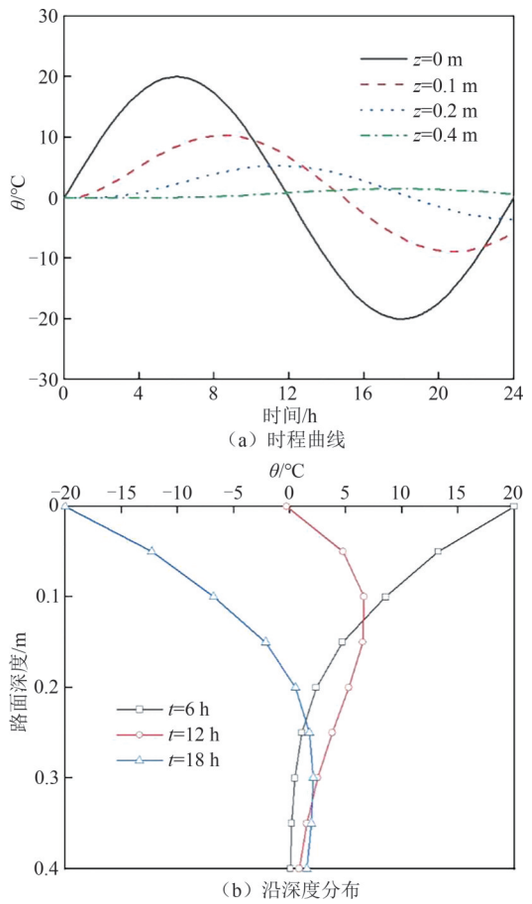
表2　软土地基计算参数

Tab.2　Calculation parameters for soft soil foundation

土体结构	参数(符号)	数值
土骨架	弹性模量E/MPa	10
	泊松比ν	0.4
	孔隙率n	0.3
	渗透系数k_d/(m·s^{-1})	1×10^{-9}
	热传导系数K/[W·(m·℃)$^{-1}$]	1
	热松弛时间τ	0.02
	初始温度T_0/K	293
土颗粒	热膨胀系数α_s/℃	1.5×10^{-5}
	比热容c_s/[J·(kg·℃)$^{-1}$]	800
	密度ρ_s/(kg·m^{-3})	2 600
孔隙水	体积模量K_w/GPa	5
	热膨胀系数α_w/℃	2×10^{-4}
	比热容c_w/[J·(kg·℃)$^{-1}$]	4 200
	密度ρ_w/(kg·m^{-3})	1 000

2.1　昼夜温度变化对路面结构层的影响

图4为在昼夜温度变化下混凝土面层和基层的温度响应,观测点分布在r=0 m的不同深度处.由图4(a)可知:随着深度增加,1 d内温度的幅值显著降低,当深度z=0 m增加到0.1、0.4 m时,温度变化的幅值分别降低48.5%、92.4%;随着深度增加,温度达到峰值对应的时间显著滞后,当深度z=0 m增加到0.1、0.4 m时,达到温度峰值的时间分别延后2.4、5.6 h.由4(b)可知,温度波动主要集中在道路的0.3 m内.

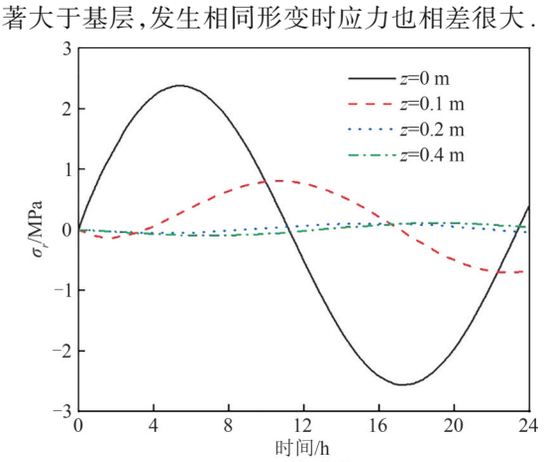


(a) 时程曲线　　(b) 沿深度分布

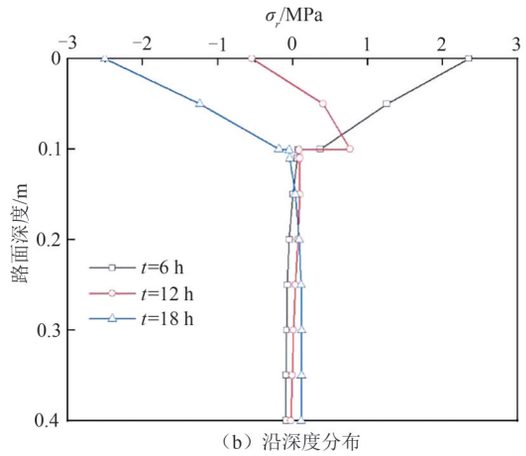
图4　昼夜温度变化下路面结构层内温度响应

Fig.4　Temperature response within the pavement structural layer under diurnal thermal variations

图5为在昼夜温度变化下路面结构层内水平方向应力的响应.由图5(a)可知,与路面结构层内温度响应类似,水平方向应力的幅值随着深度增加而显著降低,温度达到峰值对应的时间随着深度增加也逐渐延后.由图5(b)可知,温度引起的水平方向应力主要集中于0.1 m的混凝土面层内,水平应力在基层内出现明显的陡降,这是因为混凝土面层的模量显著大于基层,发生相同形变时应力也相差很大.



(a) 时程曲线

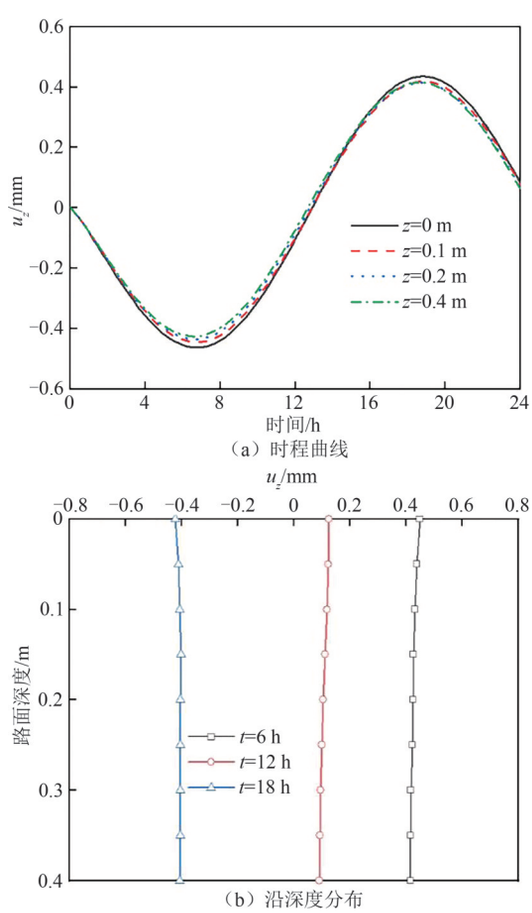


（b）沿深度分布

图 5 昼夜温度变化下路面结构层内水平应力响应

Fig. 5 Horizontal stress response within the pavement structural layer under diurnal thermal variations

图 6 为在昼夜温度变化下路面结构层竖向位移的响应，假设竖向位移向下为正．由图 6 可知：路面结构层内的竖向位移响应和在路表施加的温度荷载变化形式一致，在 1 d 内呈现出正弦函数的形态；随着深度增加，路面结构层内竖向位移的变化很小，且位移响应没有展现出明显滞后效应，这是因为路面结构层较浅处的温度变化幅值明显，导致竖向位移也主要产生于路面结构层较浅处的温度变形，较浅处的竖向位移进一步引起了较深处的竖向位移．



（a）时程曲线

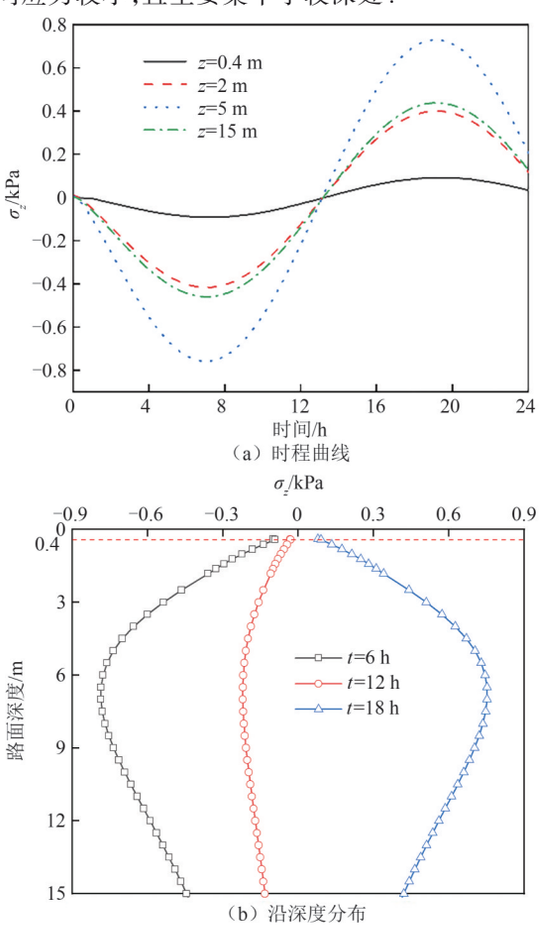
（b）沿深度分布

图 6 昼夜温度变化下路面结构层内竖向位移响应

Fig. 6 Vertical displacement response within the pavement structural layer under diurnal thermal variations

2.2 昼夜温度变化对路基和软土地基的影响

除面层外，昼夜温度变化同样会引起路基和软土地基内的动力响应．图 7 为路基和软土地基内的竖向压力响应．由图 7 可知，由于路表的竖向应力为 0，温度变化影响下的竖向应力随深度增加先逐渐增加，在 6.5 m 附近达到峰值后再逐渐降低．对比图 6(a)和图 7(a)可知：不同深度处的竖向应力时程曲线和路表面的竖向位移时程曲线的形态类似，没有峰值的滞后效应，这是因为路基和软土地基内的温度变化很小，内部的竖向应力主要由面层随温度的变形引起；道路产生膨胀变形时，内部的竖向应力为负，当道路温度低于平衡温度时会产生收缩变形，内部应力为正．整体来看，昼夜温度荷载在道路结构和地基内部引起的竖向应力较小，且主要集中于较深处．



（a）时程曲线

（b）沿深度分布

图 7 昼夜温度变化下路基和软土地基内竖向压力响应

Fig.7 Vertical pressure response within subgrade and soft soil foundation under diurnal thermal variations

图 8 为在昼夜温度变化作用下软土地基内部超孔隙水压力的响应．由图 8 可知：由于软土地基表面假设为完全透水，所以超孔隙水压力随深度增加先

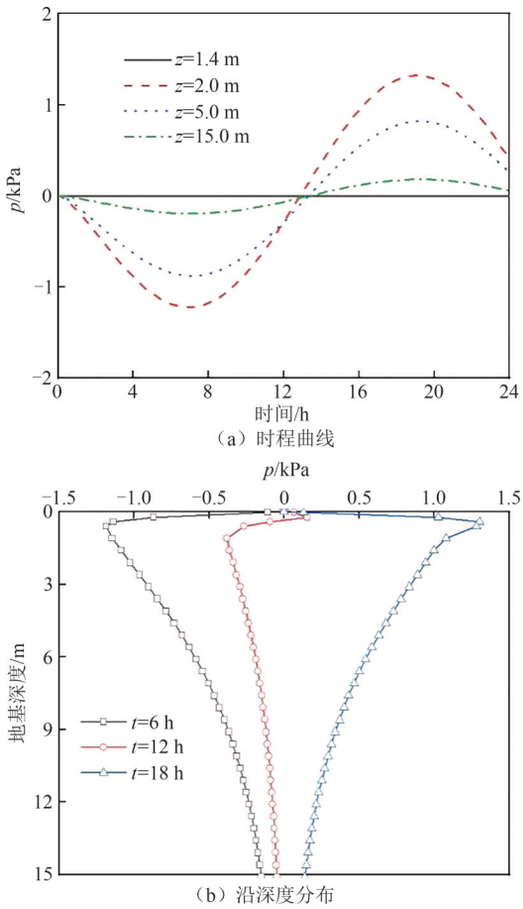


图 8　昼夜温度变化下软土地基内孔隙水压响应

Fig. 8　Pore water pressure response within soft soil foundation under diurnal thermal variations

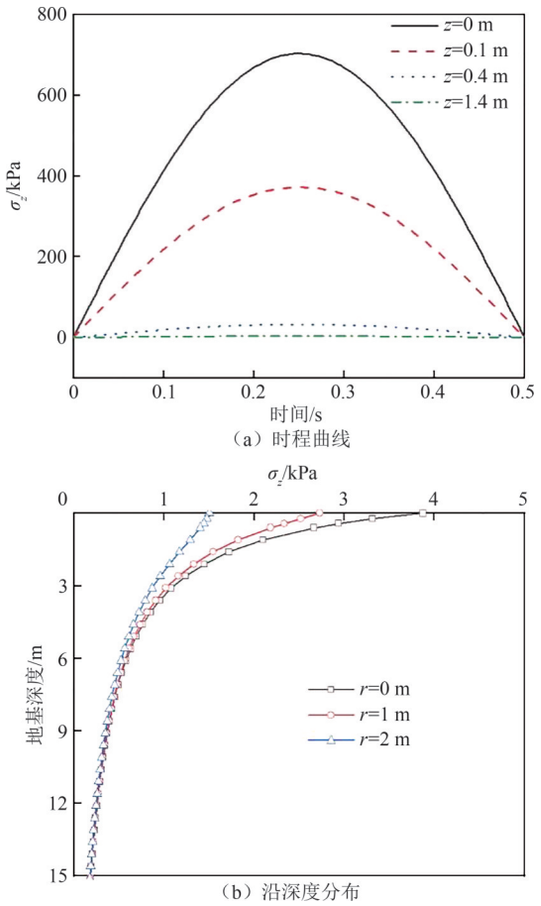


图 9　车辆荷载作用下道路内竖向应力响应

Fig.9　Vertical stress response within the roadway under vehicle loading

迅速增加,在道路深度 2 m 附近达到峰值,随后缓慢消散;相较在昼夜温度荷载作用下的道路内竖向应力响应,超孔隙水压力响应在道路较浅处更为显著.

2.3　交通荷载对道路的影响

根据文献[21]实测,满载三轴整体式货车后轴的一组双轮承受荷载 $P_V=-85.6$ kN,轮胎压力 $p_V=702.9$ kPa.可以将双轮用一个半径为 0.2 m 的圆形荷载表示为

$$R_V=\sqrt{P_V/\pi p_V} \tag{32}$$

图 9(a)为在车辆荷载作用下道路内 $r=0$ m,不同深度处的竖向应力响应.由图 9(a)可知,路面结构能显著降低车辆荷载引起的竖向应力幅值,车辆荷载经过混凝土面层、基层和路基后引起的竖向应力分别降低了 47.0%、95.3% 和 99.5%.为了清晰地观察软土地基内的竖向应力分布,将在不同 r 处地基内的竖向应力幅值沿深度分布曲线绘制于图 9(b)中.由图 9(b)可知,软土地基顶部的竖向应力最大值约为 3.87 kPa,随着深度增加竖向应力幅值迅速降低,在软土地基 3 m 以下衰减速度逐渐放缓.

车辆荷载作用下软土地基内孔隙水压的响应见图 10.由图 10 可知:由于假设软土地基表面完全透水,所以软土地基顶面的孔隙水压为 0;由于计算中使用的软土地基渗透系数较低,随着深度增加孔隙水压迅速增加,然后再逐渐降低;在不同 r 处,孔隙水压幅值在软土地基 3 m 以内衰减较快,在软土地基 3 m 以下衰减速度逐渐放缓.

2.4　昼夜温度变化和交通荷载的耦合作用

为了研究车辆和温度荷载的耦合作用,考虑到在 1 d 内温度荷载引起的动力响应变化较为复杂,且温度荷载作用时间远远大于车辆荷载作用时间,计算对比在 1 d 内不同时刻(t=0、6、12、18 h)时,施加车辆荷载引起的道路顶面竖向位移响应见图 11,道路深度为 2 m 处的孔隙水压响应见图 12.

由图 11 可知:在不同时刻作用相同的车辆荷载,道路顶面的竖向位移相差较大,当 t=6、12 h 时,在车辆荷载作用的 0.5 s 内道路顶面的竖向位移会经历从膨胀变形到压缩变形,再恢复膨胀变形的过程;当 t=18 h 时,温度荷载和车辆荷载引起的压缩变形相互叠加,让最大的竖向位移达到了 1.86 mm.

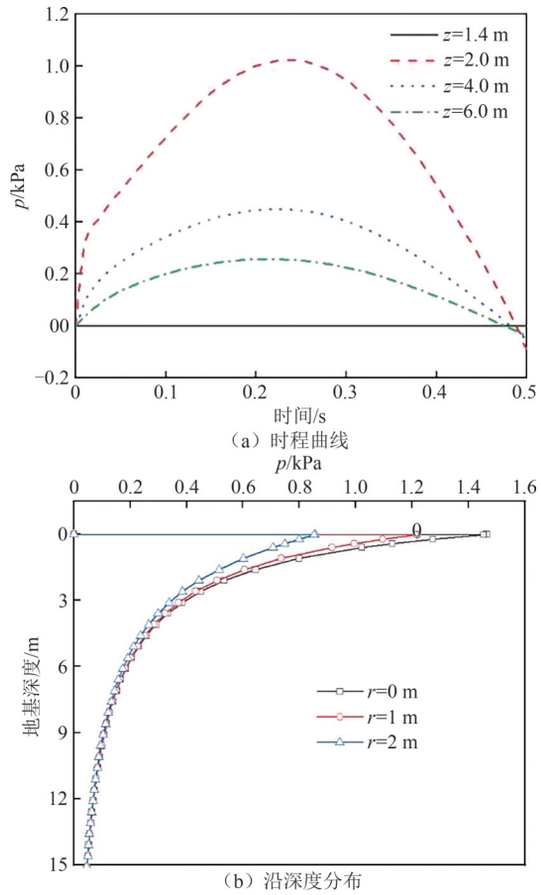


图 10 车辆荷载作用下软土地基内孔隙水压响应

Fig. 10 Pore water pressure response within soft soil foundation under vehicle loading

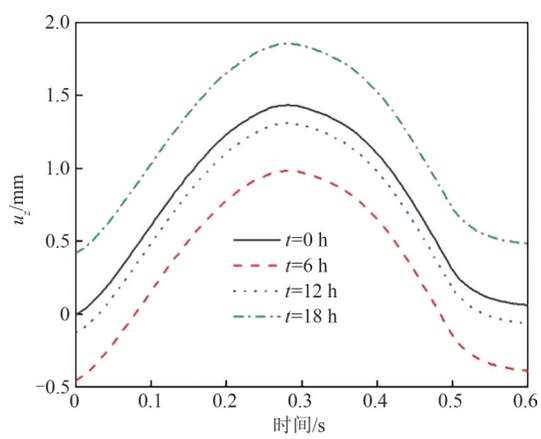


图 11 温度和车辆荷载作用下道路顶面竖向位移响应

Fig.11 Vertical displacement response at the top surface of the roadway under the combined effects of thermal and vehicle loading

由图 12 可知：在温度和车辆荷载耦合作用下，在车辆荷载作用期间，t=6 h时孔隙水压均为负值；t=12 h时主要为正超孔隙水压力；t=0、18 h均为正超孔隙水压力．在相同车辆荷载作用下，t=6、18 h时的超孔隙水压力幅值相差达到了 2.5 kPa，是仅车辆荷载引起孔隙水压幅值的 2.4 倍．文献[25]的研究表明，交

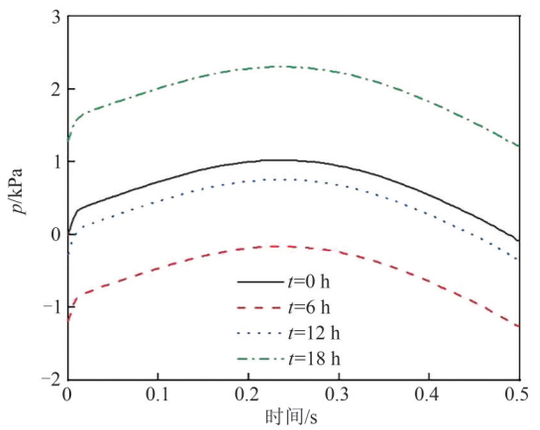


图 12 温度和车辆荷载作用下地基内部孔隙水压响应

Fig.12 Pore water pressure response within the roadway under the combined effects of thermal and vehicle loading

通荷载作用下软土地基内承受的竖向动应力和超孔隙水压力是决定其累积塑性变形大小的主要因素，地基的累积塑性变形会进一步引起路面沉降，影响道路服役性能．因此，在计算道路软土地基动力响应时，车辆和温度荷载的耦合作用是不可忽视的．

3 结 论

1）在昼夜温度变化作用下，随着深度增加，温度变化幅度显著降低，在 1 d 中的温度波动主要集中在道路顶面以下的 0.3 m 内．

2）温度波动会直接引起面层内的热变形，浅层的热变形会进一步引发道路更深处的动力响应，软土地基内的超孔隙水压力约在深度 2 m 处达到峰值．

3）由于昼夜温度变化的影响，在 1 d 内的不同时刻，即使是在相同的车辆荷载作用下刚性路面道路内的动力响应也会发生变化．在温度和车辆荷载耦合作用下，1 d 内道路顶面的竖向位移和软土地基内的孔隙水压变化量可以达到仅车辆荷载作用时的 61% 和 240%，因此在计算道路内的动力响应时温度荷载的影响不可忽略．

本文在构建车辆荷载-层状道路模型时，将车辆荷载模拟为分布在圆形区域内的冲击荷载，如果能在模型中考虑车辆荷载的移动特性，则将更符合实际工况，可作为下一步的研究内容．

参考文献(References)：

[1] 宋宏芳，王天亮，岳祖润，等．寒区铁路站场路基服役性能评价与分析[J]．北京交通大学学报，2017，41(1)：20－27．SONG Hongfang，WANG Tianliang，YUE Zurun，et al．Evaluation and analysis of service performance of railway yard subgrade in cold regions[J]．Journal of Beijing Jiaotong University，2017，41(1)：20－27．(in Chinese)

[2] HARIK I E, JIANPING P, SOUTHGATE H, et al. Temperature effects on rigid pavements[J]. Journal of Transportation Engineering, 1994, 120(1): 127－143.

[3] CHOUBANE B, MANG T A. Analysis and verification of thermal-gradient effects on concrete pavement[J]. Journal of Transportation Engineering, 1995, 121(1): 75－81.

[4] WONG W G, ZHONG Y. Flexible pavement thermal stresses with variable temperature [J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, 126(1): 46－49.

[5] PRIETO-MUÑOZ P A, YIN H M, BUTTLAR W G. Two-dimensional stress analysis of low-temperature cracking in asphalt overlay/substrate systems[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(9): 1228－1238.

[6] WANG H, BUTTLAR W G. Three-dimensional analytical model for exploration of the block cracking phenomenon in asphalt pavements[J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(4): 985－1005.

[7] AI Z Y, YE Z K, YANG J J. Thermo-mechanical behaviour of multi-layered media based on the Lord-Shulman model[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 129: 103897

[8] 张晶,杨吉红,卢正,等. 考虑非饱和路基性能劣化的路表振动响应研究[J]. 岩土力学,2023,44(增1):678－686.
ZHANG Jing, YANG Jihong, LU Zheng, et al. Vibration response of pavement surface considering unsaturated subgrade performance deterioration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(S1): 678－686.(in Chinese)

[9] LI K Q, LI D Q, LIU Y. Meso-scale investigations on the effective thermal conductivity of multi-phase materials using the finite element method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 151: 119383.

[10] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. low-frequency range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1955, 28(182): 168－178.

[11] LEFEUVE-MESGOUEZ G, MESGOUEZ A. Three-dimensional dynamic response of a porous multilayered ground under moving loads of various distributions[J]. Advances in Engineering Software, 2012, 46(1): 75－84.

[12] BA Z N, KANG Z Q, LEE V W. Plane strain dynamic responses of a multi-layered transversely isotropic saturated half-space[J]. International Journal of Engineering Science, 2017, 119: 55－77.

[13] TANG C X, LU Z, DUAN Y H, et al. Dynamic responses of the pavement-unsaturated poroelastic ground system to a moving traffic load[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 25: 100404.

[14] BOOKER J R, SAVVIDOU C. Consolidation around a point heat source[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1985, 9(2): 173－184.

[15] GIRAUD A, ROUSSET G. Consolidation around a volumic spherical decaying heat source[J]. Journal of Thermal Stresses, 1995, 18(5): 513－536.

[16] BAI B. Thermal Consolidation of layered porous half-space to variable thermal loading[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(11): 1531－1539.

[17] 蔡小培,单文娣,魏金彩. 高速铁路路基不均匀沉降的动力学识别[J]. 北京交通大学学报,2014,38(1):49－54.
CAI Xiaopei, SHAN Wendi, WEI Jincai. Dynamic recognition method of subgrade differential settlement on high-speed railway[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(1): 49－54.(in Chinese)

[18] TANG C X, LU Z, GOH S H, et al. Dynamic responses of an axisymmetric thermo-poroelastic half-space subjected to thermo-mechanical loads[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 154: 105147.

[19] LORD H W, SHULMAN Y. A generalized dynamical theory of thermoelasticity[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1967, 15(5): 299－309.

[20] GAO Z, HORTON R, LIU H P. Impact of wave phase difference between soil surface heat flux and soil surface temperature on soil surface energy balance closure[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, 115(D16): 2009JD013278.

[21] LU Z, TANG C X, DUAN Y H, et al. Field test and semi-analytical simulation of unsaturated road subgrade in various water content subjected to a heavy duty truck[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 144: 106667.

[22] NODA N, ASHIDA F. Transient thermoelastic fields in a transversely isotropic infinite solid with a penny-shaped crack[J]. Journal of Applied Mechanics, 1987, 54(4): 854－860.

[23] 艾智勇,王路君,曾凯. 稳定温度场下层状路面体系的解析层元解[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014,42(11):1665－1669.
AI Zhiyong, WANG Lujun, ZENG Kai. Analytical layer-element solution for layered pavement in stable temperature field[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(11): 1665－1669.(in Chinese)

[24] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907－916.

[25] LU Z, FANG R, YAO H L, et al. Evaluation and analysis of the traffic load-induced settlement of roads on soft subsoils with low embankments[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(6): 04018043.