

季节变化对列车行驶路基动应力的影响及简化计算方法^①

李琼林^{1,2,3}, 凌贤长^{1,2,3}, 张 锋^{2,4}, 王立娜^{1,2,3}

(1.哈尔滨工业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090; 2.中国科学院冻土工程国家重点实验室,甘肃 兰州 73000; 3.云南农业大学建筑工程学院,云南 昆明 650201; 4.哈尔滨工业大学交通科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:我国众多铁路干线分布于深季节冻土地区。铁路路基土层的冻融状态随着季节的交替变化而改变,相应的列车行驶时引起的路基动应力分布也有所不同。考虑路基土体的参振效应,通过改进车辆-轨道-路基垂向耦合动力学模型获取不同季节列车行驶振动荷载时程,进而通过动力有限元数值模拟方法,研究季节变化对列车行驶引起的路基动应力分布规律的影响。研究表明:路基土中的动应力幅值及其沿路基深度的分布规律与该时期路基土的冻融状态密切相关,基于此结论,提出深季节冻土地区不同季节铁路冻土下限范围内路基动应力的简化计算方法。该研究对于优化季节性冻土地区铁路路基设计方法,完善路基长期动力稳定性能评价方法等具有重要意义。

关键词:深季节冻土地区; 季节变化; 车辆-轨道-路基垂向耦合动力学模型; 动应力比; 当量最大剪切模量

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)03-0782-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0782

Effect of Seasonal Variations on the Dynamic Stress in Subgrade Soils Induced by Passing Trains and a Simplified Calculation Method on It

LI Qiong-lin^{1,2,3}, LING Xian-zhang^{1,2,3}, ZHANG Feng^{2,4}, WANG Li-na^{1,2,3}

(1.School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China;

2.State Key Laboratory of Frozen Soil, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3.College of Architecture and Civil Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China;

4.School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: Many railways were constructed in regions of China that experience seasonal freezing and thawing cycles in subgrade soils. Consequently, the dynamic stress distribution in subgrade soils induced by passing trains was observed to vary in different seasons. The research first focused on the development of a vertical train-track-subgrade coupled dynamic model, which considered the vibration of soil layers and the time histories of loading. Second on the effect of seasonal variations on the dynamic stress in subgrade soils, which was conducted by FEM computational simulations. Based on the results, the dynamic stress distribution and amplitudes were closely related to the frozen or thaw states of the subgrade soil. Third on the development of a simplified method for calculating the dynamic stress in subgrade soils induced by passing trains,

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2012CB026104);国家自然科学基金项目(51174261);冻土工程国家重点实验室开放基金(SKLFSE201216)

作者简介:李琼林(1986—),山东肥城人,博士研究生,主要从事寒区岩土工程防灾减灾方面的研究。E-mail:qionglin_li@126.com。

通信作者:凌贤长(1963—),男,安徽庐江人,博士,教授,博士生导师,主要从事寒区岩土工程防灾减灾及岩土地震工程方面的研究。E-mail:xiangzhang_ling@263.net。

which could be used in railway subgrade designs in seasonal frozen regions. The achievements of this research will be useful for optimizing the subgrade design method and completing the evaluation method of the long-term stability of the subgrade soil.

Key words: deep seasonal frozen region; seasonal variation; vertical train-track-subgrade coupled dynamic model; dynamic stress ratio; maximum shear modulus equivalent

0 引言

中国冻深超过 1.5 m 的深季节冻土地区面积约为 $3.67 \times 10^6 \text{ km}^2$, 在这些地区, 季节交替变化严重影响铁路路基的长期服役性能。作为铁路路基设计中的关键力学参数, 路基动应力在不同季节的分布规律显然是不同的。开展深季节冻土地区列车行驶引起的路基动应力研究对于合理评价铁路路基长期动力稳定性能, 优化铁路路基设计方法均具有重要意义^[1]。

研究列车行驶引起路基动应力特性的方法主要有现场监测与数值模拟两种。相关学者针对非冻土地区列车行驶引起的路基动应力特性的研究较多, 得到了一些较为有益的结论。日本学者^[2]最早对列车行驶引起的动应力和振动下沉进行了现场监测研究。在国内, 蔡英^[3]通过大秦线万吨列车试验研究了动应力沿路基深度的衰减规律。王炳龙等^[4]、律文田^[5]、聂志红^[6]也开展了类似研究, 得到列车行驶速度、列车轴重及作用率等因素对路基动应力分布的影响。梁波等^[7]利用有限元模型分析了列车行驶作用下路基内动力响应分布特性, 发现了路基动力响应随车速增加产生的双峰现象。宫全美等^[8]利用有限元方法分析了高速铁路路基动力响应的分布规律及衰减特性, 并提出了相应的工程措施, 特别分析了路基刚度匹配对路基动力响应的影响。边学成等^[9]利用 2.5 维有限元研究了列车荷载作用下地基土体动力特性及土体单元经历的应力路径, 发现列车行驶过程中主应力轴会发生连续的旋转现象。Zhu 等^[10]针对多年冻土区青藏铁路路基动力特性进行了研究, 分析了季节变化、行车速度和路基高度的对最大动应力的影响。

然而, 针对季节变化对列车行驶路基动应力分布特性影响的报道并不多见。本文首先通过改进现有的列车-轨道耦合动力学模型, 建立了能够反映季节性冻土地区土层冻融状态变化的列车-轨道-路基垂向耦合动力学模型, 实现季节性冻土地区列车行驶振动荷载的模拟。进而以既有线京哈铁路为工程背景, 研究不同季节列车行驶路基动应力的分布特性, 分析季节变化对动应力分布特性的影响规律, 并

提出相应的简化计算方法。

1 深季节冻土区列车行驶路基振动荷载模拟

在相关学者提出的列车-轨道垂向耦合动力学模型^[9-10]的基础上, 考虑路基土体的参振效应, 将路基土体离散为刚性质量块, 路基土层分为两层, 相邻土块和土层间由并联弹簧-阻尼单元相联, 模拟土层的剪切与压缩性能。路基的冻融状态可以通过调节土层间并联弹簧-阻尼单元参数模拟。基于上述简化方法, 建立车辆-轨道-路基垂向耦合动力学模型(图 1), 并编制相应的计算程序 ZL-TNTLM 1.2^[11]。

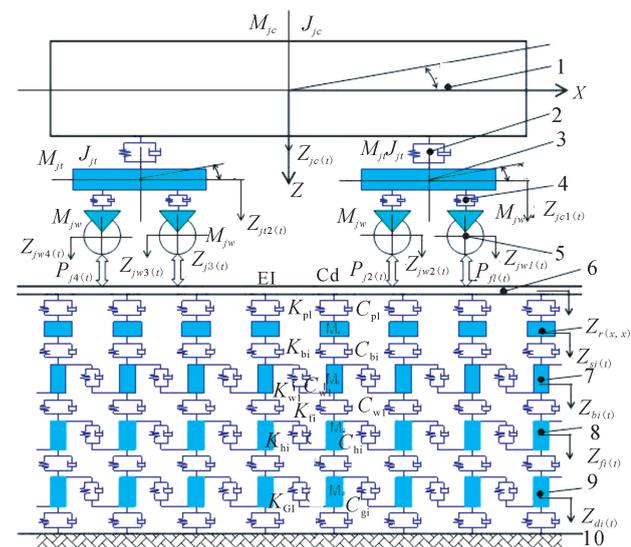


图 1 车辆-轨道-路基垂向耦合动力学模型^[11]

Fig.1 The vertical train-track-subgrade coupled dynamic model

利用该模型进行动力仿真计算时, 将京哈线王岗段实测的高低不平顺谱作为激励输入, 将轨枕作用力作为列车行驶振动荷载。计算得到的正常期振动荷载时程如图 2 所示。

2 计算模型

2.1 几何模型与基本假定

选取京哈铁路 K1229+135 断面作为典型范例, 建立计算模型。经现场实测, 路堤高 4.9 m, 基床顶面宽 15.5 m, 双线通行。经多年运行, 路基土层与原设计状况已明显不同。根据现场剪切波数测

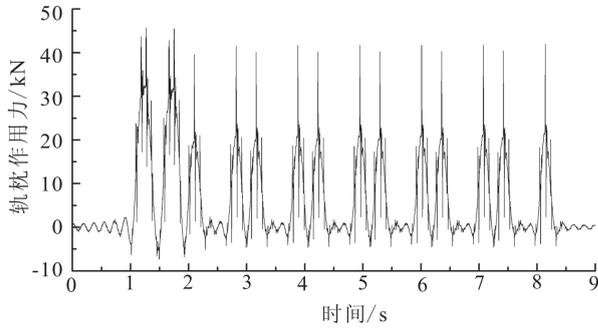


图2 列车行驶振动荷载时程(机车+普通客车 YZ25)
Fig.2 Time history of loading induced by passing trains
(locomotive+passenger train YZ25)

试结果,将路堤分为3层,①层厚度为1.5 m,②层厚2.3 m,③层厚1.1 m。最大冻深根据哈尔滨地区冻土下限选为2 m。春融期,融化土层深度与冻结土层深度各取1 m。具体土层分层如图3所示。计算域在路基两侧延伸35.85 m,深度取为地表以下30 m。

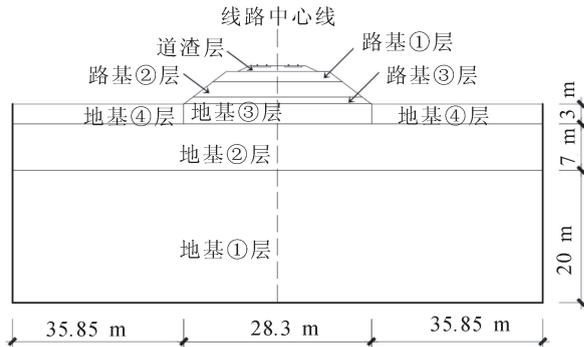


图3 京哈铁路 K1229+135 断面计算域
地层结构分布图

Fig.3 Distribution of soil layers in the K1229+135 section of Beijing-Harbin Railway

2.2 材料的本构关系和参数

土体和道床的本构关系选用非线性弹性模型,模型参数主要通过现场波速试验和路基填土的室内动力三轴试验选取,取值见表1。京哈铁路为Ⅱ型轨枕。轨枕采用梁单元进行模拟,弹性模量 $E=30$ GPa,轨下轨枕横截面面积 $A=0.04585$ m²,惯性矩 $I=1.59 \times 10^{-4}$ m⁴。轨枕中间段横截面面积 $A=0.04585$ m²,惯性矩 $I=7.639 \times 10^{-5}$ m⁴。

2.3 边界条件和动力荷载输入

计算域的边界条件为黏性辐射边界。振动荷载时程选取普通货车 C62A 以 90 km/h 的速度行驶时引起的轨枕作用力时程。数值计算由动力有限元程序 ZL-RNTLM 进行,分为两个施工步:第一个施

工步进行地应力平衡的静力计算;第二施工步输入振动荷载时程,进行动力计算(图4)。

表1 土体物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical indices of soils

土层名称	温度条件	天然重度/ (kN·m ⁻³)	最大剪切 模量/kPa	泊松比	剪切波速/ (m·s ⁻¹)
道渣	常温	20.0	2.860E+05	0.30	264
路基①层	常温	19.5	2.930E+04	0.30	123
路基②层	常温	19.2	3.860E+04	0.30	142
路基③层	常温	19.0	1.067E+05	0.29	237
地基①层	常温	18	9.018E+04	0.29	224
地基②层	常温	18	4.742E+04	0.30	162
地基③层	常温	18	4.331E+04	0.30	155
地基④层	常温	18	1.721E+04	0.34	98
弱冻结土	-2℃	21	6.091E+05	0.35	885
强冻结土	-8℃	21	1.352E+06	0.35	1381
融土	1℃	21	2.540E+04	0.42	110

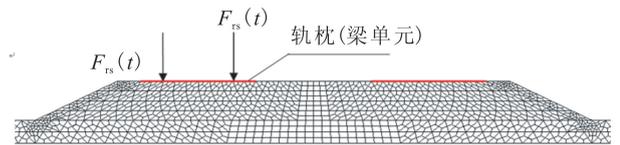


图4 轨枕(梁单元)和振动荷载输入

Fig.4 The beam element and input of dynamic loading

3 计算结果与分析

深季节冻土地区季节变化引起路基土层的冻融层厚度及分布有所不同。因此,首先选取正常期、冻结期和春融期三个典型季节,研究不同季节对路基动应力分布的影响规律。然后选取秋冬交季路基冻结过程中冻土层不断变厚和春融期路基融化层不断变厚建立不同的数值模型,研究冻土层厚度与融土层厚度对路基动应力分布的影响规律,系统分析深季节冻土地区季节变化对列车行驶路基动应力影响特性。引入动应力比的概念,即路基面以下某处竖向动应力幅值与路基面处竖向动应力幅值之比,据此反映并分析动应力沿深度的衰减特性。

3.1 路基的冻融状态

不同季节路基土层结构假定如下:春融期路基表面以下1 m 范围内为融土,融土以下1 m 范围内为-2℃的弱冻结土;正常期土层均处于常温状态;冻结期路基表面下2 m 范围内均为-8℃的冻结土。按照上述土层结构的分布形式建立数值模型,研究不同季节动应力的分布规律。

图5为不同季节路基表面动压应力的横向分布图。从图中可以看出,春融期和正常期动压应力在路基表面的横向分布形式基本相同,而冻结期有所不同(呈现出马鞍形分布)。动压应力幅值冻结期最

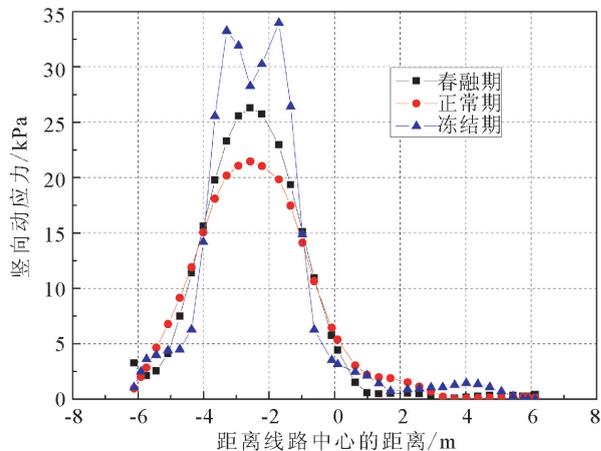


图 5 不同季节列车行驶路基表面竖向动应力横向分布

Fig.5 Transverse distribution of vertical dynamic stress on the subgrade surface in different seasons

大,春融期次之,正常期最小。这说明路基土层的冻结加剧了路基表层的振动反应,冻胀期从路基表面至冻土下限均处于强冻结状态,因此路基表层的动压应力最大,且呈现出马鞍形分布。春融期由于季节冻融底层处于冻结状态,使得路基表面的动压应力也相对正常期要大。

不同季节动应力比沿路基深度的分布如图 6 所示。从图中可以看出,动应力比沿路基深度的衰减曲线形式基本相同。在冻结期路基表层 2 m 范围内均为强冻结土,在此范围内动应力沿深度的衰减速率最大,至路基面以下 2 m 处动压应力衰减了约 80%。春融期在融土层范围内,动应力的衰减速率最小,但是在冻土夹层内的衰减速率较快,两层界面

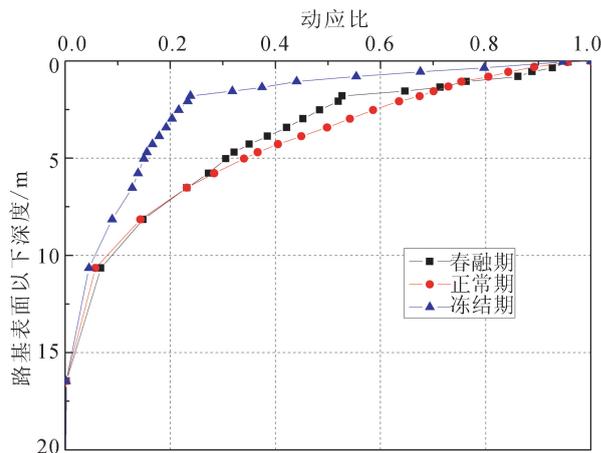


图 6 不同季节时路基动应力比沿深度的分布图

Fig.6 Distribution of dynamic stress ratio along the depth of subgrade in different seasons

处存在明显拐点。至路基面下 2 m 时动压应力衰减了约 50%。正常期在路基面以下 2 m 范围内动压应力的衰减速率基本一致,至路基面以下 2 m 处动应力衰减了约 30%。从图中还可以看出:动应力的强烈深度影响范围也有所不同,冻结期最小,春融期次之,正常期最大。

3.2 冻土层厚度

路基土体在秋冬交替时节的冻结过程是一个连续的过程,路基土层的冻土层厚度随着时间的推移不断增加,直至冻土下限处。以 0.25 m 为冻土层厚度增量,建立相应的数值计算模型,研究冻结过程中冻土层厚度对列车行驶路基动应力分布的影响规律。在计算模型中,冻土层为 -8℃ 的冻结土,冻土层以下为常温土。

图 7 给出了不同冻土层厚度时路基表面竖向动应力的横向分布图。从图中可以看出,不同冻土层厚度时路基表面的动应力横向分布变化形式基本一致,均呈马鞍形分布。冻土层厚度越大,动应力幅值越大。从图 7 还可以看出,路基冻土层厚度越小,动应力横向分布范围越广。

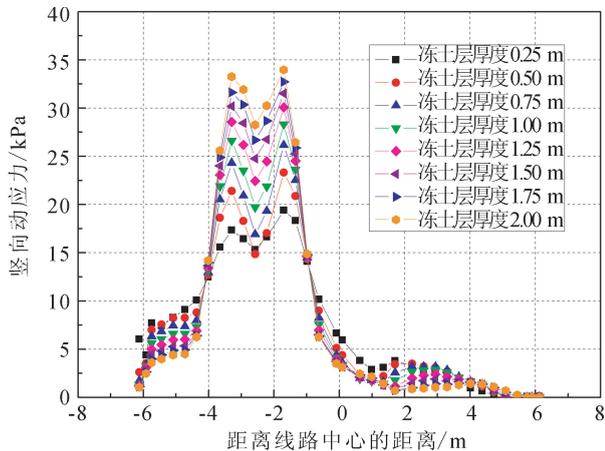


图 7 不同冻土层厚度时路基表面动应力横向分布图

Fig.7 Transverse distribution of dynamic stress on the subgrade surface with different thickness of frozen soil layer

图 8 为不同冻土层厚度时动应力比沿路基深度的分布图。从图中可以看出,动应力在冻土层内的衰减速率基本一致且衰减速率较大,在冻土层与其下的未冻土层交界位置,曲线存在着拐点,拐点以下的深度范围内动应力衰减速率相对较小,且沿着深度连续变化。在路基土表面以下的 2 m 处,冻结土层厚度越大其动压应力越小,这种分布规律一直延伸至路基表面以下 10 m 左右。相应的,冻土层厚

度越大,列车行驶引起的路基动应力的强烈影响深度也就越小。

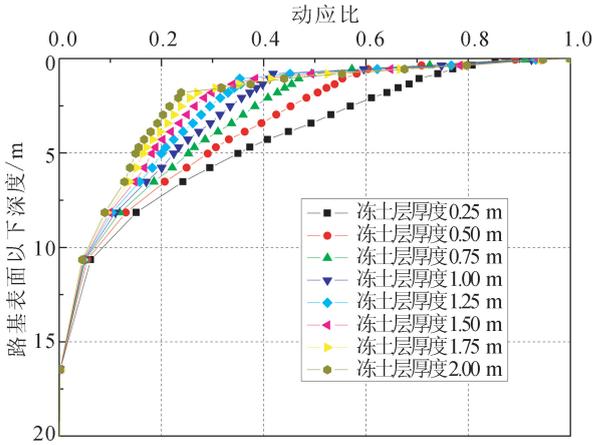


图8 不同冻土层厚度时路基动应力比沿深度的分布
Fig.8 Distribution of dynamic stress ratio along the depth of subgrade with different thickness of frozen soil layer

3.3 融土层厚度

路基土体冬春时节的融化过程也是一个连续的过程,由于气温的升高,融土层从路基表面开始不断增厚,相应的冻土层厚度不断减小。以0.25 m为融土层厚度增量建立相应的数值计算模型,研究融化过程中融土层厚度对列车行驶引起的路基动应力分布的影响规律。在计算模型中,融土层以下为-2℃的弱冻结土。

图9为不同融土层厚度时路基表面动应力的横向分布图。从图中可以看出,路基表面动应力分布形式基本相同,但与图6中冻土层分布于路基表面时的动应力分布形式有所不同,马鞍型的分布消失,

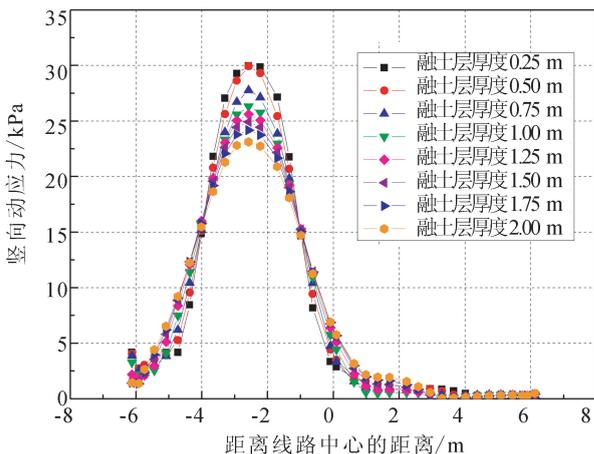


图9 不同融土层厚度时路基表面动应力横向分布图
Fig.9 Transverse distribution of dynamic stress on the subgrade surface with different thickness of thawed soil layer

变为开口向下的抛物线型。说明路基表面土层冻融状态对路基动应力的分布形式及幅值具有较大的影响,这与图5所表现出的规律是一致的。从图9中还可以看出随着融土层厚度的增加,动压应力幅值不断减小;融土层厚度越大,动压应力的横向分布范围也越大。

图10为不同融土层厚度时动应力比沿路基深度的分布图。从图中可以看出,不同融土层厚度时动应力比沿深度变化曲线的形式基本一致,在融土层内动应力沿深度的衰减速率相近且较小,在融土层与冻土层交界处曲线存在明显拐点,经过此拐点后动应力在其下的冻土层内迅速衰减,到达路基表面以下2 m处的冻土夹层与常温土层的交界处,曲线又出现一个拐点,经过拐点之后曲线保持连续衰减。这种变化规律与春融期特殊的融土层、冻土层和常温土层的分布是相对应的,在融土层内动应力衰减最慢,常温土层次之,冻土层最快。在路基表面以下2 m处,融土层厚度越大,动应力衰减比值越大,这种分布规律一直延伸至路基表面以下10 m左右,相应的,融土层厚度越大,动应力强烈影响深度也就越大。

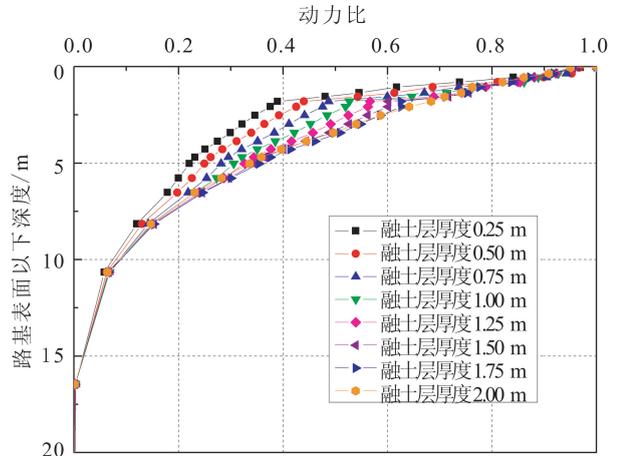


图10 不同融土层厚度时路基动应力比沿深度的分布图

Fig.10 Distribution of dynamic stress ratio along the depth of subgrade with different thickness of thawed soil layers

4 深季节冻土区列车行驶路基动应力简化计算方法

由前所述,深季节冻土地区冻土下限范围内路基土的冻融状态对路基竖向动应力沿深度的传播具有显著影响。显然,利用普通地区铁路路基设计方

法或病害治理措施对深季节冻土地地区铁路路基进行设计和维护有失妥当。在工程应用中动应力的计算方法应该简单合理。基于此,本文提出合理的深季节冻土地地区列车行驶竖向动应力的简化计算方法。

数值模拟结果发现,路基冻融状态不仅影响竖向动应力在其本身内的传播效率,也影响动应力在道渣层内的传播效率,基于此,引入道渣层动应力比衰减率和动应力比衰减率的定义分别如式(1)和式(2):

$$\delta_{bal} = \frac{\left(\frac{\sigma_{z,b1} - \sigma_{z,b2}}{\sigma_{z,b1}} \right)}{H_b} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{z,b1}$ 为轨枕底面处的竖向动应力; $\sigma_{z,b2}$ 为道渣层底面处的竖向动应力; H_b 为道渣层的厚度。

$$\delta_{sub} = \frac{\left(\frac{\sigma_{z,s1} - \sigma_{z,s2}}{\sigma_{z,s1}} \right)}{H} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{z,s1}$ 为路基表面处的竖向动应力; $\sigma_{z,s2}$ 为冻土下限处的竖向动应力; H 为冻土下限范围之内土层厚度之和。

冻融状态引起路基冻土下限范围内土体力学性能分布不均,引入当量最大剪切模量的概念作为力学指标反映其不均匀性,其定义如式(3):

$$G_{max,eq} = \sum_{i=1}^n \frac{G_{max,i} \cdot h_i}{H} \quad (3)$$

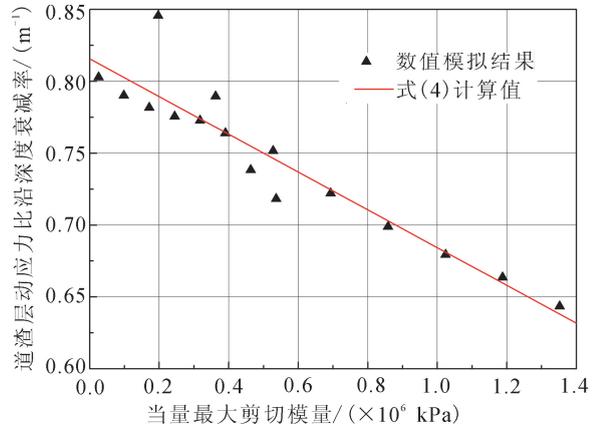
式中: $G_{max,eq}$ 为当量最大剪切模量; $G_{max,i}$ 为第*i*层土的最大剪切模量; h_i 为第*i*层土的土层厚度。

根据数值仿真结果,分别得到当量最大剪切模量与道渣层动应力比衰减率和路基土层内动应力比衰减率的关系(图 11)。从图 11(a)中可以看出,路基冻土下限范围内土体当量最大剪切模量与道渣层内动应力比沿深度的衰减率基本呈线性减小的关系。从图 11(b)中可以看出当量最大剪切模量与路基土层内动应力比衰减率呈非线性增长的关系。分别将数据拟合得到了当量最大剪切模量与道渣层动应力比衰减率和路基土层动应力比衰减率的关系式如式(4)和式(5):

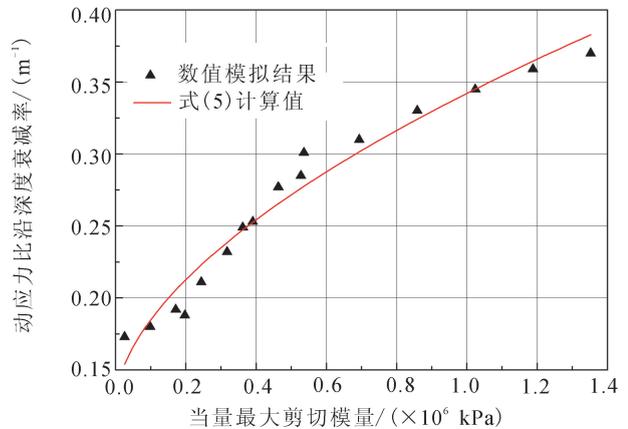
$$\delta_{bal} = 0.82 - 0.13 \times \left(\frac{G_{max,eq}}{10^6} \right) \quad (4)$$

$$\delta_{sub} = 0.13 + 0.21 \times \left(\frac{G_{max,eq}}{10^6} \right)^{0.58} \quad (5)$$

通过上述研究,得到计算路基冻土下限范围内动应力的简化计算方法。步骤如下:①通过现场波速测试或原状路基土的室内试验,获取冻土下限范围内不同深度处土体的最大剪切模量;②由式(3)得



(a) 当量最大剪切模量与道渣层内动应力比衰减率



(b) 当量最大剪切模量与路基土层内动应力比衰减率

图 11 冻融层范围内土的当量最大剪切模量与道渣层内及路基土层内动应力比衰减率的关系

Fig.11 Relationship between the equivalent maximum shear modulus of soil in freezing-thawing layer and the decay rate of dynamic stress ratio in ballast layer and in subgrade-soil

到冻土下限范围内路基土层的当量最大剪切模量;③由式(4)和式(5)分别得到道渣层竖向动应力比衰减率和冻土下限范围内竖向动应力比衰减率;④轨枕底面的动应力可由 0.4 倍的动轮载除以轨枕底与道渣接触面尺寸得到。普通线路的动轮载由铁道部科学研究院^[13]推荐的公式(6)计算得到。

$$P_d = P_s(1 + 0.4v/100) \quad (6)$$

式中: P_d 为动轮载; P_s 为静轮载; v 为列车行驶时速(km/h);⑤最后根据步骤③与步骤④的结果可以得到冻土下限范围内路基表面以下*h*处的竖向动应力:

$$\sigma_{z,h} = \sigma_{z,b1}(1 - \delta_{bal}H_b)(1 - \delta_{sub}h) \quad (7)$$

5 结论

(1) 季节变化影响列车行驶路基竖向动应力及

竖向动应力比沿深度的衰减规律。路基表面的动应力幅值在冻结期最大、春融期次之、正常期最小。动应力比沿深度的衰减速率在冻结土层中最大、正常土层中次之,融土层中最小。

(2) 冻土层厚度越大,路基表面的动应力幅值越大。动应力比在冻土层中的衰减率基本一致,在冻土层与正常土层的分界面处,动应力比沿深度的分布曲线存在一个明显的拐点。

(3) 融土层厚度越大,路基表面的动应力幅值越小。动应力比在融土层中的衰减率基本一致。动应力比沿深度的衰减曲线中存在两个拐点,分别位于融土层与冻结夹层的分界面和冻结夹层和正常土层的分界面处。

(4) 利用当量最大剪切模量与竖向动应力比衰减率的关系,提出深季节冻土地地区冻土下下层范围内路基竖向动应力的简化计算方法。

参考文献(References)

- [1] 李琼林. 深季节冻土地地区列车行驶振动模拟与路基振动反应分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
LI Qiong-lin. Train-induced Vibration Load and Vibration Response of Subgrade in Seasonally Frozen Regions[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] Sunaga M, Sekine E, Ito T. Vibration Behavior of Roadbed on Soft Grounds under Trainload[J]. Quarterly Report of RTRI, 1990(31):29-35.
- [3] 蔡英,黄时寿.重载铁路的线路动力学测试及分析:大秦线万吨列车试验分析[J].西南交通大学学报,1993,3:92-98.
CAI Ying, HUANG Shi-shou. Dynamic Measurements, Investigation and Analysis of Da-qin Heavy-haul Railways Track Structure[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1993, 3:92-98. (in Chinese)
- [4] 王炳龙,余绍锋,周顺华,等.提速状态下路基动应力测试分析[J].铁道学报,2000,22(增刊):79-81.
WANG Bing-long, YU Shao-feng, ZHOU Shun-hua, et al. Analysis of Subgrade Dynamic Stress Under increase Speed [J]. Journal of China Railway Society, 2000, 22 (Supl.): 79-81. (in Chinese)
- [5] 律文田,王永和.秦沈客运专线路桥过渡段路基动应力测试分析[J].岩石力学与工程学报,2006,23(3):500-504.
LV Wen-tian, WANG Yong-he. Dynamic Stress Analysis of Subgrade-bridge Transition Section of Qin-Shen Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 23 (3):500-504. (in Chinese)
- [6] 聂志红. 高速铁路轨道路基竖向动力响应研究[D].长沙:中南大学,2005.
NIE Zhi-hong. Vertical Dynamic Response of Track-subgrade of High-speed Railway[D]. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese)
- [7] 梁波,孙常新. 高速铁路路基动应力响应中的双峰现象分析[J].土木工程学报,2006,39(9):117-122.
LIANG Bo, SUN Changxin. A Study on the Sudden Changes or Double Peaks in the Dynamic Response of Subgrade of High Speed Railway[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (9): 117-122. (in Chinese)
- [8] 宫全美,王炳龙,周顺华,等. 路基刚度匹配对高速铁路路基动应力响应的影响[C]//第六届全国土动力学学术会议.2002.
GONG Quan-mei, WANG Bing-long, ZHOU Shun-hua, et al. Influence on Dynamic Response of High-speed Railway Roadbed under Different Roadbed's Stiffness[C]//The 6th National Conference on Soil Dynamics, 2002. (in Chinese)
- [9] 边学成,胡婷,陈云敏.列车交通荷载作用下地基土单元体的应力路径[J].土木工程学报,2008,41(11):86-92.
BIAN Xue-cheng, HU Ting, CHEN Yun-min, et al. Stress Path in Soil Element of Ground under Moving Traffic Loads [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41 (11): 86-92. (in Chinese)
- [10] ZHU Zhan-yuan, LING Xian-zhang, et al. Analysis of Dynamic Compression Stress Induced by Passing Trains in Permafrost Subgrade Along Qinghai-Tibet Railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(1):465-473.
- [11] LI Qiong-lin, LING Xian-zhang, FENG Zhang. The Effect of Subgrade Inhomogeneity Induced by Freeze-thaw on the Dynamic Response of Track-subgrade System[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2013, 5(5):0554-0561.
- [12] 郝瀛.铁道工程[M].北京:中国铁道出版社,2000.
HAO Ying. Railway Engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000. (in Chinese)