

文章编号:1005-0523(2021)04-0045-09



高速移动荷载作用下无砟轨道路基动位移研究

冯靖淳, 罗文俊, 徐鑫洋, 杜可

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:建立三维有限元 CRTS III 型板式无砟轨道-路基-天然地基土非线性数值分析模型, 基于轨道随机不平顺条件下计算得到轮轨载荷, 通过有限元软件二次开发子程序将轮轨载荷导入有限元模型, 路基两端及天然地基土体四周采用等效三维一致粘弹性人工边界模拟工程实际半无限空间体, 在此基础上研究分析高速移动荷载作用下路基的动位移分布规律。研究结果表明: 文章采用的有限元模型计算得到的路基竖向动位移远小于我国现行高速铁路标准的控制值 3.5 mm, 满足要求; 列车模型为两节动车, 中间两组轮对移动产生的动位移叠加, 竖向动位移在各结构层中的时程曲线峰值与转向架数目进行对应; 沿横向分布, 在混凝土底座范围内, 路基各结构层竖向动位移幅值沿横向分布变化较小, 各结构层横向最大差值仅为 0.129 mm; 在混凝土底座范围外, 路基各结构层竖向动位移幅值横向分布差异较大, 横向最大差值均超过 0.5 mm; 随着深度的增加, 竖向动位移在路基中随着深度的增加逐渐衰减, 最大值位于基床表层顶部, 近似线性衰减; 基床表层刚度的变化对系统动力响应影响作用较有限, 基床底层刚度的增大对降低路基中的动位移影响作用较显著, 有利于行车运行的平稳、舒适及安全, 提高列车时速会加大路基的变形位移, 地基土刚度的变化对路基中对降低系统动位移的作用最显著。

关键词: 随机不平顺; 无砟轨道; 动位移; 高速铁路

中图分类号: U216

文献标志码: A

本文引用格式: 冯靖淳, 罗文俊, 徐鑫洋, 等. 高速移动荷载作用下无砟轨道路基动位移研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(4): 45-53.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2021.04.006

Study on Dynamic Displacement of Ballastless Track Subgrade Under High-Speed Moving Load

Feng Jingchun, Luo Wenjun, Xu Xinyang, Du Ke

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: A nonlinear numerical analysis model for three-dimensional finite element of CRTS III slab ballastless track-subgrade-natural foundation soil is established, and the wheel/rail load is calculated based on the random irregularity of the track. The wheel/rail load is imported into the finite element model by secondary development subroutine of finite element software, and the equivalent three-dimensional uniform viscoelastic artificial boundary is used to simulate the actual semi-infinite space at both ends of the subgrade around the natural foundation soil. Accordingly, the dynamic displacement distribution of subgrade under high speed moving load is studied and analyzed. The results show that the vertical dynamic displacement of the subgrade calculated by the finite element model is far less than the current standard control value of China's high-speed railway of 3.5 mm,

收稿日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(51978265); 江西省主要学科科学技术带头人培养计划(2019-ABC122009) <http://www.cnki.net>

作者简介: 冯靖淳(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨道路基动力学。E-mail: 237475477@qq.com。

通信作者: 罗文俊(1979—), 女, 教授, 博士, 研究方向为车辆系统动力学, 路基动力学。E-mail: lwj06051979@163.com。

which meets the requirements. The train model adopts two bullet cars, and the dynamic displacement generated by the movement of two sets of wheel sets in the middle is superimposed. The peak value of the vertical dynamic displacement in the time history curve of each structure layer corresponds to the number of bogies. In the range of concrete base, the vertical dynamic displacement amplitude of each structural layer of subgrade changes little along the transverse distribution, and the maximum transverse difference of each structural layer is only 0.129 mm. Outside the range of concrete base, the vertical dynamic displacement amplitude of each structural layer of subgrade has a great difference in transverse distribution, and the maximum transverse difference is more than 0.5 mm. With the increase of depth, the vertical dynamic displacement in the subgrade gradually attenuates, and the maximum value is located at the top surface of the foundation bed, which attenuates approximately linearly. The impact of roadbed surface stiffness changes on the system dynamic response is limited. The increase of the roadbed foundation stiffness has a significant effect on reducing the dynamic displacement of the subgrade, which is conducive to the smooth, comfortable and safe running of the train. The increase of the train speed increases the deformation displacement of the subgrade. The change of the foundation soil stiffness has the most significant effect on reducing the dynamic displacement of the system in the subgrade.

Key words: random irregularity; ballastless track; dynamic displacement; high-speed railway

Citation format: FENG J C, LUO W J, XU X Y, et al. Study on dynamic displacement of ballastless track subgrade under high-speed moving load[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(4): 45-53.

近些年我国高铁步入快速发展时代,具有完全自主知识产权的“复兴号”于2017年投入运营,实现350 km/h运营,中国成为世界上高铁商业运营速度最高的国家^[1]。高速铁路迅速发展的同时伴随产生的路基动力学及岩土工程问题不容忽视。列车在线路上高速运行产生的荷载传递至轨道结构,然后向下传递至路基及路基土体,在路基土体中产生振动和变形,加剧轨道结构的不平顺,从而影响列车运行的平稳和安全性^[2]。

目前已有一些学者针对列车高速移动荷载对路基土体产生的影响开展过研究, Chebli等^[3]利用周期性假定,提出了土体-铁路轨道系统三维模型,考虑土-结构动力相互作用,研究了高速移动荷载作用下有砟铁路轨道的响应。聂志红等^[4]基于层状梁和黏弹性半空间体理论建立轨道-路基耦合动力分析模型,考虑轨道和路基的耦合作用,利用移动坐标和双重傅里叶变换,得到系统稳态响应解,对移动荷载作用下路基表面位移进行了研究。Eason^[5]利用傅立叶变换求得移动荷载作用下半无限弹性体内的应力解。薛富春和张建民^[6-7]建立了精细化非

线性高速铁路轨道-路基-地基耦合模型,得出了竖向动位移沿线路横向在路基各结构层地面近似均匀分布,沿深度按照指数函数衰减的结论。Kim^[8]研究了弹性连续体结构在分布移动荷载下的动力问题。Auersch^[9]运用有限元和边界元建立了轨道-地基模型,分析了列车荷载作用下的地面振动问题,结果表明地面振动的频率成份以低频为主。已有研究工作取得了一些进展和成果,但动荷载模拟及采用的轨道路基模型等仍有一些值得商榷的地方,例如:模型采用对称结构进行简化,造成动力响应数值在空间传播时产生一定的误差;在涉及地基土这种无穷边界区域的动力分析中,人为地截断地基土边界会使波在边界面上的反弹,反弹回来的波会对分析区域的结果产生影响,实际上,波会向无穷远方向传递;在模拟列车移动荷载上没有考虑到轨道随机不平顺等因素对轮轨荷载产生的影响,轮轨荷载模拟不够精确等。

针对上述问题,本文通过多体动力学软件UM建立车辆-轨道垂向耦合精细化模型和有限元软件Abaqus建立无砟轨道-路基-天然地基土非线性数值

分析三维有限元模型,通过 Fortran 语言二次开发子程序 VD LOAD,将轮轨荷载加载到模型上,基于大规模计算技术研究了高速移动荷载作用下无砟轨道路基的动位移随时间、空间的变化规律,以期为高速铁路路基修建、运营维护及评价提供一定的理论依据。

1 模型分析

1.1 模型概述

模型整体由无砟轨道-路基-土体组成,模型如图 1 所示。无砟轨道结构包括钢轨、轨道板、自密实混凝土及混凝土底座;路基包括基床表层、基床底层及基床以下路堤本体部分;地基土体为天然地基土。模型整体沿轨道前进方向的长度为 130 m,宽度方向为 60 m,地基土厚度取为 30 m,其余尺寸按《高速铁路设计规范》及相关研究确定参数并建立模型^[10-11]。

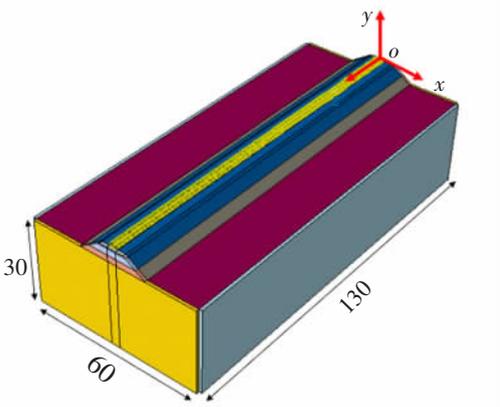


图1 三维整体模型(单位:m)

Fig.1 Three-dimensional overall model(Unit:m)

1.2 模型参数和本构关系

1.2.1 轨道结构

本文采用的是高速铁路的 CRTS III 型板式无砟轨道,全程采用无缝线路,断面尺寸如图 2 所示,在实际应用中钢轨的截面较为复杂,在以往的研究中大多将钢轨工字型截面进行简化处理,考虑为矩形截面,且在对轨道板的模型建立过程中,通常忽略了轨道板之间的伸缩缝,导致轨道板内部的附加应力对计算结果造成影响,产生一定的误差,故本文钢轨

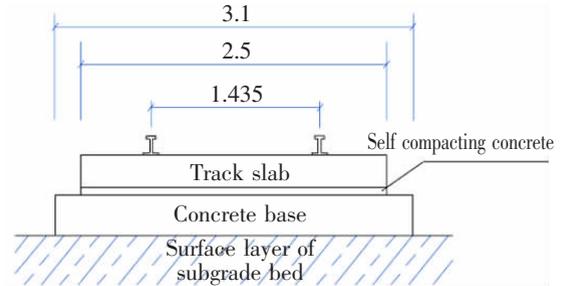


图2 CRTS III 型板式无砟轨道(单位:m)

Fig.2 CRTS III slab ballastless track (Unit: m)

采用我国的 T60 钢轨,截面面积 $7.725 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,截面惯性矩 $3.217 \times 10^{-5} \text{ m}^4$,每块轨道板之间的伸缩缝间距设置为 70 mm。轨道结构除钢轨和轨道板之间的扣件外,其他均采用线弹性本构模型,材料参数见表 1,本文模型将扣件系统模拟为线性的弹簧-阻尼单元,扣件间距为 0.63 m,其横向,垂向,纵向的动刚度分别为 50, 35, 15 kN/mm,横向、垂向、纵向的阻尼系数分别为 50, 48, 46 kN·s/m。

1.2.2 路基土体和天然地基土

路基采用 Drucker-Prager 弹塑性本构模型,同时考虑到材料的硬化,研究表明^[12]交通荷载作用下

表 1 轨道系统材料参数
Tab.1 Material parameters of track system

| Name | Density/ (kg/m ³) | Elastic modulus/Pa | Poisson's ratio | Damping ratio | Rayleigh damping coefficient | |
|--------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------|------------------|------------------------------|---------|
| | | | | | α | β |
| Rail | 7 830 | 2.06×10^{11} | 0.30 | 0.01 | 0.032 5 | 0.002 8 |
| Track slab | 2 500 | 3.65×10^{10} | 0.20 | 0.02 | 0.098 1 | 0.009 1 |
| Self compacting Concrete | 2 450 | 3.25×10^{10} | 0.20 | 0.04 | 0.098 1 | 0.009 1 |
| Concrete base | 2 500 | 3.25×10^{10} | 0.20 | 0.02 | 0.098 1 | 0.009 1 |

地基土动应变一般小于 10^{-5} m, 故对地基土进行简化处理, 考虑为弹性本构, 各参数见表 2^[12]。由于路基土体各结构层之间错动很小, 可近似认为变形是连续的, 各结构层间考虑为 TIE 连接。各结构

层单元采用共节点方式进行连接, 路基两端及地基土四周通过设置等效三维一致粘弹性人工边界, 以消除截取边界尺寸造成波的反射对计算结果的影响。

表 2 路基及地基土材料参数

Tab.2 Material parameters of subgrade and foundation soil

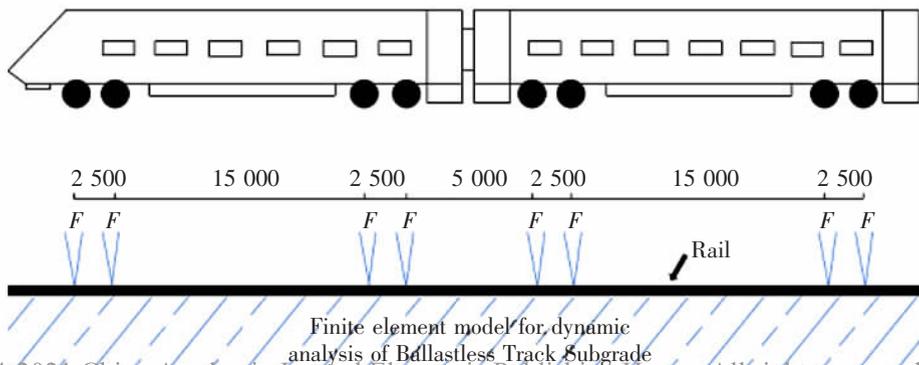
| Name | Layer thickness/m | Density/(kg/m ³) | Elastic modulus/MPa | Poisson's ratio | Cohe-sion/MPa | Internal friction angle/(°) | Damping ratio | Expan-sion angle/(°) | Flow stress ratio | Compres-sive yield stress/MPa | Absolute plastic strain |
|-------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------------|-----------------|---------------|-----------------------------|---------------|----------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Surface layer of subgrade bed | 0.4 | 2 184 | 120 | 0.30 | 0.07 | 27 | 0.045 | 0 | 0.855 | 0.178 | 0 |
| Bottom layer of subgrade bed | 2.3 | 1 939 | 70 | 0.30 | 0.05 | 23 | 0.039 | 0 | 0.876 | 0.122 | 0 |
| Embankment body | 2.3 | 1 837 | 50 | 0.35 | 0.04 | 20 | 0.035 | 0 | 0.892 | 0.095 | 0 |
| Foundation soil | 30 | 1 800 | 60 | 0.28 | - | - | 0.075 | - | - | - | - |

1.3 荷载计算与边界条件

1.3.1 荷载计算

基于车辆 - 轨道耦合动力学理论利用 UM 建立列车 - 轨道垂向耦合模型, 车辆模型采用我国 CRH3 型高速列车, 具体参数见表 3。车轮踏面类型为 LMA, 钢轨采用 60 kg/m 的轨道结构形式, 在 UM 软件自带接口通过快速傅里叶逆变换 IFFT 方法将轨道不平顺功率谱^[13]转换为时域函数。在后处理仿真阶段采用赫兹接触模型模拟轮轨接触, 得到基于中国高速铁路轨道不平顺谱下的轮轨激励时程数据。图 3 为列车荷载施加示意图^[11]。轮轨垂向力如

图 4 所示。在做轨道路基动力分析时, 首要问题是基于轨道随机不平顺条件下如何实现对移动荷载的模拟, 采用的方法是通过有限元软件 ABAQUS 进行二次开发, 使用 Fortran 语言编写荷载子程序 VDLOAD, 通过子程序将上述轮轨载荷数据加载至轨道路基模型, 施加的轮轨载荷在空间上与高速列车轮轨位置相对应。研究表明^[11, 14-15]: 2 节车辆模型比单节车辆模型能更精确地考虑到轮对之间的叠加效应, 同时在满足计算精度的前提下, 比 4 节车辆模型或全列车车辆模型更加节省计算时间成本。故本文模型采取 2 节动车组 8 轮对模型进行计算。



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.

图 3 列车荷载施加示意图(单位:mm)

Fig.3 The applied loads (Unit: mm)

表 3 高速列车参数
Tab.3 High-speed train parameters

| Car body mass /t | Frame quality /t | Wheelset quality /t | Moment of inertia of car body/(kg·m ²) | Moment of inertia of frame/ (kg/m) | Primary vertical stiffness/ (kN/m) | Primary vertical damping/ (kN·s/m) |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| 42.4 | 3.4 | 22 | 2.74×106 | 7 200 | 1.04×103 | 50 |
| Secondary vertical stiffness /(kN/m) | Secondary vertical damping /(kN·s/m) | Anti-snake damper damping /(kN·s/m) | Lateral damper damping/ (kN·s/m) | Stiffness of anti- roll torsion bar /(kN·m/rad) | Wheel rolling radius/m | Wheelbase of bogies/m |
| 0.4×10 ³ | 50 | 2 500 | 40 | 3 000 | 0.457 5 | 2.5 |

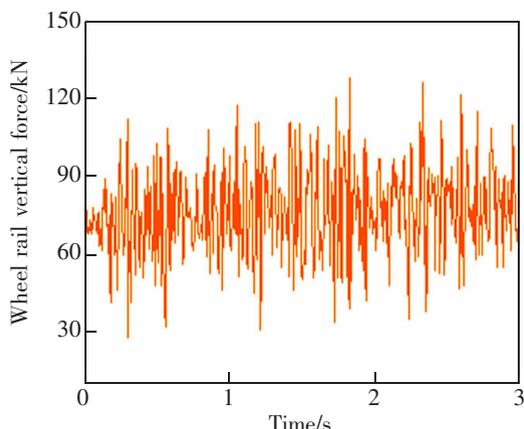


图 4 轮轨垂向力

Fig.4 Wheel-rail vertical force

1.3.2 边界条件

在涉及地基土这种半空间无限区域的动力分析中,直接截断地基土边界会使波在边界面上反弹,从而产生误差,本文模型路基两端及天然地基土四周采用清华大学谷音,刘晶波等^[6]提出的等效三维一致粘弹性人工边界,其实质是通过在路基两端及天然地基土四周设置一层实体单元来等效替代弹簧-阻尼单元的方法吸收能量,模拟波在半空间无限区域的传播,可较好地解决波在人工边界反射的问题,满足本文动力分析的精度需要。

2 数值分析结果

2.1 竖向动位移时程曲线

无砟轨道单线路堤标准横断面,各结构层自上而下分别为:轨道板,自密实混凝土,混凝土底座,路基及天然地基土等。提取路基及地基土各结构层顶面的竖向动位移时程曲线,如图 5 所示。由图 5 可知,竖向动位移时程曲线具有明显的峰值规律,随着列车的驶近和驶离,伴随着监测点竖向动位移

峰值的产生和消失。在路基基床可以看到 4 个峰值,对应了动车模型的 4 位转向架,随着路基深度的增加,峰值数目由 4 个减为 3 个,这是由于中间邻近的两位转向架距离较近,产生的峰值进行了叠加。且由图 5 可以明显的看出,两位相邻转向架经过监测点上方时,后一位转向架下方的动位移幅值更大,这是由于产生的叠加效应所致。

2.2 竖向动位移沿各结构层横向分布

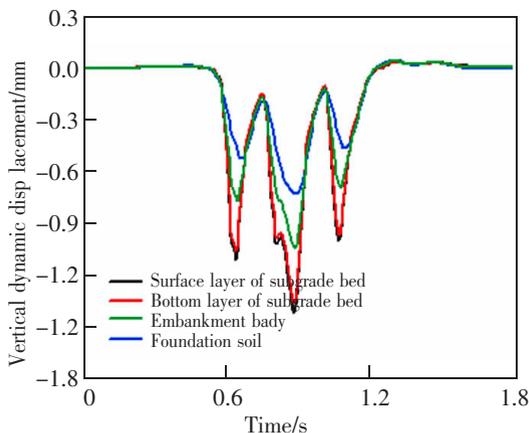
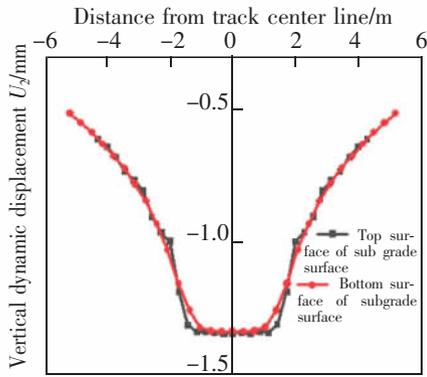
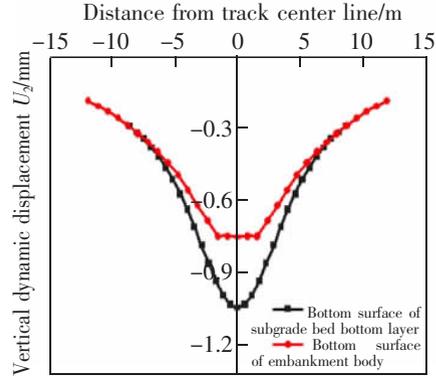


图 5 路基及地基土体各结构层顶部竖向动位移时程
Fig.5 Time history of vertical dynamic displacement of top surface of each structural layer of subgrade and foundation soil

提取路基各结构层的竖向动位移沿横向分布曲线,如图 6 所示。可以看到,在混凝土支撑层范围内,路基结构层动位移横向分布的差异较小,最大差值仅为 0.129 mm,在混凝土支撑层范围外,路基结构层动位移横向分布的差异较大,最大差值达 0.701 mm。且基床表层顶面及基床表层底面的动位移分布规律十分相似,且数值相差很小,这是因为基床表层的厚度较小,仅为 0.4 m。



(a) Surface layer of subgrade bed



(b) Bottom layer of subgrade bed and embankment body

图6 路基竖向动位移幅值横向分布曲线

Fig.6 Vertical dynamic displacement of subgrade in transverse direction

2.3 竖向动位移沿路基深度方向分布

竖向动位移沿路基的深度分布及衰减规律如图7和图8所示。随着深度的增加,竖向动位移逐渐减小,曲线近似线性衰减,最大值位于基床表层顶面,在不同深度处轨道中心线下方的动位移幅值最大,钢轨下方的次之,混凝土底座边缘下方的动位移幅值最小,动位移量为 1.350 mm,远小于我国高速铁路现行标准控制值 3.5 mm。说明本文采用的路基土体符合高速铁路运行标准,满足要求。越接近路堤本体底面,这3条路径下的竖向动位移幅值差异越小。这是因为随着深度的增加,由上部结构传递下来的动力响应经过路基各层吸收和再分配,在到达路堤本体底面时,动位移幅值沿横向分布的差异变小。

2.4 参数分析

表4和表5为列车在不同路基基床刚度、地基土刚度和列车时速下路基基床各结构层的竖向动位移幅值曲线,为了更形象直观地描述不同参数对竖向动位移幅值的影响,同时结合图9来共同说明。由图表可知,基床表层弹性模量在 120~210 MPa,基床表层、基床底层及路堤本体的竖向动位移幅值均随着弹性模量的增大而减小,但各结构层动位移衰减幅均不超过 3%,对动位移的影响作用较为有限。基床底层弹性模量在 70~160 MPa,基床表层、基床底层及路堤本体的竖向动位移幅值均随着弹性模量的增大而减小,且在基床表层和基床底层的动位移减幅更加明显,最大减幅达 17.13%,相较于基床表层弹性模量变化的影响,基床底层的影响更加显著。地基土弹性模量在 20~80 MPa,自上而下路基

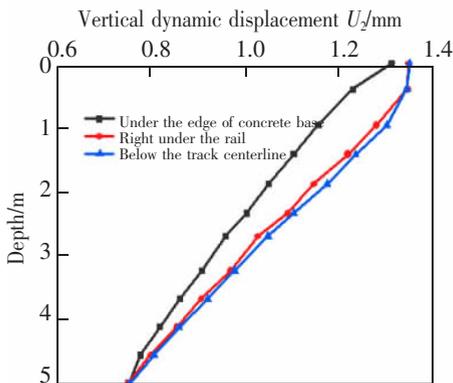


图7 竖向动位移沿深度分布曲线
Fig.7 Vertical dynamic displacement distribution along the depth direction

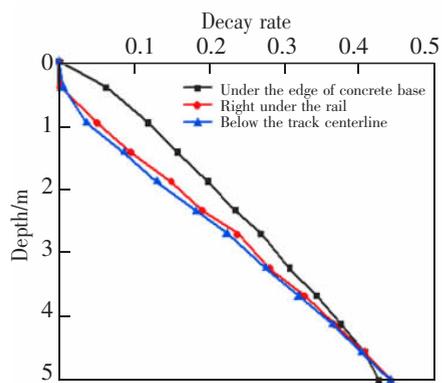


图8 竖向动位移沿深度衰减规律
Fig.8 Vertical dynamic displacement attenuation law along the depth direction

各结构层面的动位移均有不同程度的降低,其中基床表层顶面,底面的竖向动位移分别减小了 32.77%,33.19%,基床底层底面和路堤本体底面则分别减小了 40.89%和 48.86%。可以看出地基土弹性模量的变化对动位移的影响十分显著,对降低路基动位移具有较大积极意义。速度在 200~350 km/h 范围内,随着列车移动速度的增加,动位移幅值呈

逐渐增大趋势。其中,基床表层顶面动位移幅值对速度变化最敏感,速度由 200 km/h 增大至 350 km/h,动位移幅值增长了 49.60%,由上至下其他路基结构层动应力幅值分别增长了 33.55%,36.40%,39.98%。列车时速对路基结构的位移变形有显著的影响,在实际高速铁路运行中要合理设定列车行驶速度。

表 4 路基基床刚度对路基动位移的影响

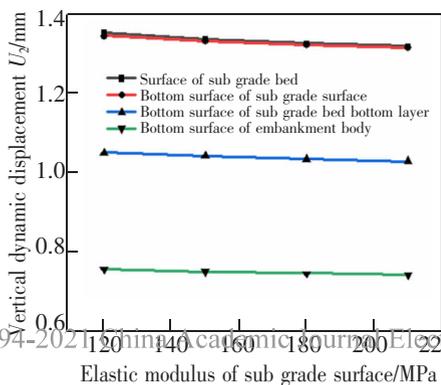
Tab.4 Influence of subgrade bed stiffness on dynamic displacement of subgrade

| Position | Depth /m | Dynamic displacement amplitude of different subgrade surface elastic modulus/mm | | | | Dynamic displacement amplitude of different elastic modulus of subgrade bottom/mm | | | |
|---------------------------------------------|----------|---------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|
| | | 120 MPa | 150 MPa | 180 MPa | 210 MPa | 70 MPa | 100 MPa | 130 MPa | 160 MPa |
| | | Top surface of subgrade surface | 0 | 1.350 | 1.334 | 1.324 | 1.316 | 1.350 | 1.236 |
| Bottom surface of subgrade surface | 0.4 | 1.343 | 1.330 | 1.321 | 1.314 | 1.343 | 1.230 | 1.161 | 1.113 |
| Bottom surface of subgrade bed bottom layer | 2.7 | 1.049 | 1.041 | 1.034 | 1.028 | 1.049 | 1.025 | 1.005 | 0.987 |
| Bottom surface of embankment body | 5.0 | 0.755 | 0.750 | 0.745 | 0.741 | 0.755 | 0.738 | 0.726 | 0.716 |

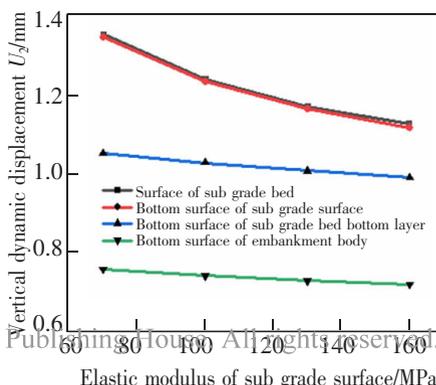
表 5 地基土刚度和列车时速对路基动位移的影响

Tab.5 Influence of foundation soil stiffness and train speed on dynamic displacement of subgrade

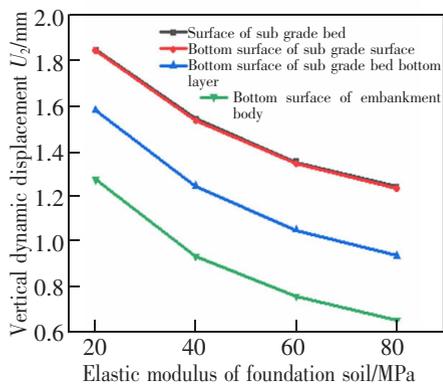
| Position | Depth/m | Dynamic displacement amplitude of different foundation soil elastic modulus/mm | | | | Dynamic displacement amplitude at different speed/mm | | | |
|---------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|------------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| | | 20 MPa | 40 MPa | 60 MPa | 80 MPa | 200 km/h | 250 km/h | 300 km/h | 350 km/h |
| | | Top surface of subgrade surface | 0 | 1.846 | 1.540 | 1.350 | 1.241 | 0.903 | 0.927 |
| Bottom surface of subgrade surface | 0.4 | 1.844 | 1.533 | 1.343 | 1.232 | 0.893 | 0.919 | 1.003 | 1.343 |
| Bottom surface of subgrade bed bottom layer | 2.7 | 1.580 | 1.243 | 1.049 | 0.934 | 0.667 | 0.692 | 0.772 | 1.049 |
| Bottom surface of embankment body | 5.0 | 1.273 | 0.932 | 0.755 | 0.651 | 0.453 | 0.470 | 0.544 | 0.755 |



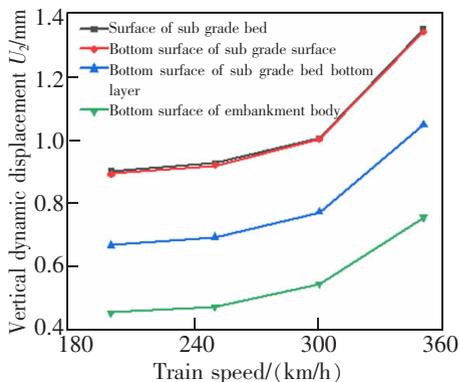
(a) Surface stiffness of subgrade bed



(b) Bottom stiffness of subgrade bed



(c) Foundation soil stiffness



(d) Train speed

图9 影响竖向动位移的参数分析

Fig.9 Analysis of parameters affecting vertical dynamic displacement

3 结论

本文建立了三维有限元 CRTS III 无砟轨道-路基-土体模型,通过数值分析计算得到了如下结论:

1) 采用的有限元模型计算得到的路基竖向动位移远小于我国现行高速铁路标准的控制值 3.5 mm,满足要求。列车模型为 2 节动车,中间两组轮对移动产生的动位移叠加,竖向动位移在各结构层中的时程曲线峰值与转向架数目进行对应。

2) 由于转向架二次作用产生的叠加效应,两个相邻的转向架经过时后一个转向架经过时的动位移幅值明显大于前一个转向架经过时的动位移幅值。沿横向分布,在混凝土底座范围内,路基各结构层竖向动位移幅值沿横向分布变化较小,各结构层横向最大差值仅为 0.129 mm;在混凝土底座范围外,路基各结构层竖向动位移幅值横向分布差异较大,横向最大差值均超过 0.5 mm。竖向动位移在路基中随着深度的增加逐渐衰减,最大值位于基床表层顶部,近似线性衰减。

3) 基床表层弹性模量的变化对系统动力响应影响作用较有限;基床底层弹性模量的增大对降低路基中的动位移影响作用较显著,有利于行车运行的平稳、舒适及安全。地基土弹性模量的变化对路基中对降低系统动位移的作用最显著。提高列车时速会加大路基的变形位移,应根据具体线路实际运营情况合理控制列车运行速度。

参考文献:

[1] 孙章,ZHANG L M. 高速铁路化—中国铁路又出发[J]. 城

市轨道交通研究,2020,8(2):148-149.

SUN Z,ZHANG L M. High speed railway:China railway starts again[J]. Research on Urban Rail Transit,2020,8(2):148-149.

[2] KERR A D. 轨道力学及轨道工程[M]. 上海铁道学院,译. 北京:中国铁路出版社,1983.

KERR A D. Track Mechanics and Track Engineering[M]. Translated by shanghai railway institute. Beijing:China Railway Press,1983

[3] CHEBLI H,CLOUTEAU D,SCHMITT L. Dynamic response of high-speed ballasted railway tracks:3D periodic model and in situ measurements[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2008,28:118-131.

[4] 聂志红,刘宝琛,李亮,等. 移动荷载作用下轨道路基动力响应分析[J]. 中国铁道科学,2006,27(2):15-19.

NIE Z H,LIU B C,LI L,et al. Dynamic response analysis of track subgrade under moving load[J]. China Railway Science,2006,27(2):15-19.

[5] EASON G. The stress produced in a semi-infinite solid by a moving surface force [J]. International Journal of Engineering Science,1965(2):581-609.

[6] 薛富春. 移动荷载下高速铁路轨道-路基的动位移分析[J]. 地震工程学报,2019,41(5):1105-1113.

XUE F C. Dynamic displacement analysis of high speed railway track subgrade under moving load[J]. Journal of Earthquake Engineering,2019,41(5):1105-1113.

[7] 薛富春,张建民. 移动荷载作用下高速铁路路基动应力的空间分布[J]. 铁道学报,2016,38(1):86-91.

XUE F C,ZHANG J M. Spatial distribution of dynamic stress of high speed railway subgrade under moving load[J]. Acta Railway Sinica,2019,41(5):1105-1113.

[8] KIM S M. Vibration and stability of axial loaded beam on elastic foundation under moving harmonic loads[J]. Engi-

- neering Structures, 2004, 26(1):95-105.
- [9] AUERSCH L. The excitation of ground vibration by rail traffic: theory of vehicle-track-soil interaction and measurement on high-speed lines[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 284(1):103-132.
- [10] 国家铁路局. 高速铁路设计规范: TB 10621-2014[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
National Railway Administration of China. Code for design of high speed railway: TB 10621-2014[S]. Beijing: China Railway Press, 2014.
- [11] 董小龙, 冯靖淳, 刘刚, 等. 高速列车随机激振载荷无砟轨道路基的动应力分布规律[J]. 土木与环境工程学报, 2021, 43(4):42-51.
DONG X L, FENG J C, LIU G, et al. Dynamic stress distribution of ballastless track subgrade under random excitation load of high speed train[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(4):42-51.
- [12] 王福星. 基于 ABAQUS 对高速铁路环境振动的数值模拟及振动特性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
WANG F X. Numerical simulation and vibration characteristics analysis of environmental vibration of high speed railway based on ABAQUS[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [13] 康熊, 刘秀波, 李红艳, 等. 高速铁路无砟轨道不平顺谱[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(7):687-696.
KANG X, LIU X B, LI H Y, et al. Irregularity spectrum of ballastless track of high speed railway[J]. Science of China: Technology Science, 2014, 44(7):687-696.
- [14] 王启云. 高速铁路无砟轨道路基动力特性及参数研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
WANG Q Y. Study on dynamic characteristics and parameters of ballastless track subgrade of high speed railway [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [15] XU J, ZHANG J S, HUANG Y. The analysis of servo loading effect in high-speed railway[C]/ICRE 2010 International Conference on Railway Engineering, 2010.
- [16] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007, 24(12):31-37.
GU Y, LIU J B, DU Y X. 3D uniform viscoelastic artificial boundary and equivalent viscoelastic boundary element[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12):31-37.
- [17] 周镇勇. 武广客运专线路基动力响应特性试验及数值模拟分析[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
ZHOU Z Y. Test and numerical simulation analysis of subgrade dynamic response characteristics of Wuhan Guangzhou passenger dedicated line[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [18] 叶阳升, 蔡德钧, 魏少伟, 等. 高速铁路无砟轨道路基动力分布特征及解析算法[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(6):1-9.
YE Y S, CAI D G, WEI S W, et al. Dynamic stress distribution characteristics and analytical algorithm of ballastless track foundation of high speed railway[J]. China Railway Science, 2020, 41(6):1-9.
- [19] 王炳龙, 杨新文, 周宇, 等. 高速铁路路基与轨道工程[M]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
WANG B L, YANG X W, ZHOU Y, et al. Subgrade and Track Engineering of High Speed Railway[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015.
- [20] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
ZHAI W M. Vehicle Track Coupling Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [21] ZHANG X Y, DAVID T, SHENG X Z. Differences between Euler-Bernoulli and Timoshenko beam formulations for calculating the effects of moving loads on a periodically supported beam[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 481:115432.
- [22] TANG L, KONG X, LI S, et al. A preliminary investigation of vibration mitigation technique for the high-speed railway in seasonally frozen regions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 12:105841.
- [23] 雷晓燕, 刑聪聪, 吴神花. 轨道结构中高频振动特性分析[J]. 振动工程学报, 2020, 33(6):1245-1252.
LEI X Y, XING C C, WU S H. Analysis of medium and high frequency vibration characteristics of track structure[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(6):1245-1252.
- [24] 罗文俊, 曹浩, 张子正, 等. 基于 FE-SEA 混合法列车交会桥梁振动噪声分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(2):1-7.
LUO W J, CAO H, ZHANG Z Z, et al. Analysis of bridge vibration and noise caused by train intersection based on FE-SEA hybrid method[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(2):1-7.
- [25] 罗强, 张瑞国, 谢宏伟, 等. 400 km/h 高速铁路无砟轨道基床结构及关键参数研究[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(2):34-44.
LUO Q, ZHANG R G, XIE H W, et al. Study on subgrade structure and key parameters of 400 km/h high speed railway ballastless track[J]. China Railway Science, 2020, 41(2):34-44.



特约专家徐长节:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学党委副书记、副校长(主持行政工作),教育部“长江学者”特聘教授,国家杰出青年基金获得者,“万人计划”科技领军人才,国家百千万人才工程入选者,国务院特殊津贴获得者。主持及参与国家及省部级科研项目 10 余项、工程项目 100 余项。获国家科技进步二等奖等。



特约专家陈梦成:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学党委委员、副校长,江西省先进工作者,中国优秀留学回归人员,赣鄱英才 555 工程领军人才,江西省优势科技创新团队学术带头人。主持完成及在研国家 973、国家自然科学基金江西省等各类科研项目 30 余项;发表学术论文 400 余篇。获省部级奖项 5 项等。



特约专家刘林芽:男,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学副校长,国家百千万人才工程国家级人选,教育部新世纪优秀人才,享受国务院特殊津贴专家,赣鄱英才 555 工程领军人才,主持国家自然科学基金、教育部等各类科研项目 50 余项。获国家科技进步二等奖,江西省自然科学一等奖等奖项 11 项。



特约专家杨辉:男,二级教授,博士生导师。新世纪百千万人才工程国家级人选,赣鄱英才 555 工程领军人才,江西省优势科技创新团队领军人才,获国务院特殊津贴、江西省突出贡献人才等荣誉,现任华东交通大学副校长,江西省人大常委。获江西省自然科学奖一等奖、江西省技术发明一等奖等省部级奖项 7 项。



特约专家罗文俊:女,教授,博士生导师。现任华东交通大学副校长,防灾减灾研究所所长。教育部青年长江学者,江西省主要学科学术及技术带头人,首批江西省青年井岗学者,享受国务院特殊津贴专家。主持国家自然科学基金 4 项,省部级科研课题 10 余项。获教育部科技进步二等奖 2 项,江西省科技进步一等奖等。



特约专家刘燕德:女,二级教授,博士生导师。现任华东交通大学首席教授,华东交通大学首批天佑学者,智能机电装备创新研究院院长,第三批国家“万人计划”领军人才,科技部重点领域创新团队负责人,江西省光电检测工程技术中心主任等。获江西省科技进步一等奖、江西省自然科学二等奖等省部级奖项 8 项。



特约专家宋立军:男,教授,博士生导师,智能激光制造湖南省重点实验室主任。研究方向:激光智能制造(3D 打印、超快激光微纳制造)、激光光谱学、激光制造材料科学、传感及控制。主持及参与多项国家自然科学基金、湖南省等各类科研项目。获中国机械工业联合会和中国机械工程学会一等奖等。



特约专家肖乾:男,教授,博士生导师。现任华东交通大学机电与车辆工程学院院长,华东交通大学天佑拔尖人才,江西省百千万人才工程人选,获全国詹天佑铁道科学技术奖青年奖、茅以升铁道科学技术奖、江西省科技进步一等奖等。近 5 年来,主持国家自然科学基金 3 项,省部级科研课题多项以及企业横向课题等近 20 项。