

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



高速列车随机激振载荷无砟轨道路基的动应力分布规律

董小龙¹, 冯靖淳², 刘刚², 胡瑞奇²

(1. 中铁隧道集团二处有限公司, 河北 廊坊 065000; 2. 华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013)

摘要:相较于传统的列车-轨道-路基整体耦合三维有限元模型,提出一种优化处理列车荷载的方法,基于多体系统动力学理论建立列车-轨道垂向耦合模型,并通过数值计算得到考虑了轨道随机不平顺条件下的轮轨激振载荷,随后利用二次开发子程序将轮轨载荷导入无砟轨道-路基-天然地基土非线性数值分析三维有限元模型,在此基础上研究分析高速移动荷载作用下路基的动应力分布规律。研究表明:采用的车辆荷载处理方法在保证计算精度的前提下代替车辆-不平顺轨道-路基-地基整体耦合振动模型,降低了建模及计算时间成本;竖向动应力沿横向分布规律,在轨道结构中数值较大,路基基床内远小于轨道结构中的数值,基床表层及基床底层底面出现“马鞍形”分布;沿纵向分布,随着深度的增加,竖向动应力逐渐减小,在基床表层内的衰减率较大,甚至超过50%;沿纵向分布,在各结构层内产生了与转向架数目相等的应力峰值数目,列车运行过程中轨道及路基动应力的变化可以看作是反复的加、卸载过程;列车移动速度对路基动力响应影响作用明显,时速由200 km/h增长到350 km/h时,各结构层动应力幅值增长均超过30%。

关键词:列车荷载;高速铁路路基;随机不平顺;无砟轨道;动应力

中图分类号: U213.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)04-0042-10

Dynamic stress distribution law of ballastless track subgrade under random excitation load of high-speed train

DONG Xiaolong¹, FENG Jingchun², LIU Gang², HU Ruiqi²

(1. China Railway Tunnel Group Second Engineering Co., Ltd., Langfang 065000, Hebei, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China)

Abstract: In this study, compared with the traditional train-track-subgrade integral coupling three-dimensional finite element model, an optimized method for handling train loads has been proposed. The train-track vertical coupling model was established based on the multi-body system dynamics theory, and the wheel-rail excitation load under the condition of random track irregularity was obtained through numerical calculation. Then the wheel-rail load was imported into the ballastless track-subgrade-natural foundation soil nonlinear numerical analysis three-dimensional finite element model by using the secondary

收稿日期: 2020-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(51978265);江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(20194BCJ22009)

作者简介: 董小龙(1973-),男,高级工程师,主要从事市政工程研究, E-mail: 3012546031@qq.com.

冯靖淳(通信作者),男, E-mail: feng1997fjc@163.com.

Received: 2020-07-19

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51978265); Training Plan for Academic and Technical Leaders of Major Disciplines in Jiangxi Province (No. 20194BCJ22009)

Author brief: DONG Xiaolong (1973-), senior engineer, main research interest: municipal engineering, E-mail: 3012546031@qq.com.

FENG Jingchun(corresponding author), E-mail: feng1997fjc@163.com.

development subroutine. On this basis, the dynamic stress distribution law of subgrade under high-speed moving load was studied and analyzed. The research results show that the vehicle load processing method used in this paper replaces the vehicle-irregular track-subgrade-foundation integrated vibration model under the premise of ensuring the calculation accuracy, reducing the modeling and calculation time cost, which has certain reference significance; The vertical dynamic stress distribution law along the transverse direction shows that the value is larger in the track structure, and the value in the subgrade bed is much smaller than that in the track structure. The surface layer of the subgrade bed and the bottom surface of the subgrade bed appears "saddle-shaped" distribution; The vertical dynamic stress distribution law along the vertical shows that as the depth increases, the vertical dynamic stress gradually decreases, and the attenuation rate in the surface layer of the subgrade bed is relatively large, even exceeding 50%; The vertical dynamic stress distribution law along the longitudinal direction shows that the number of stress peaks equal to the number of bogies is produced in each structural layer. The dynamic stress changes of the track and subgrade during train operation can be regarded as repeated loading and unloading processes; The moving speed of the train has an obvious effect on the dynamic response of the subgrade. When the speed increases from 200 km/h to 350 km/h, the dynamic stress amplitude of each structural layer increases by more than 30%.

Keywords: train load; high-speed railway subgrade; random irregularity; ballastless track; dynamic stress

近年中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,标志着中国高铁发展进入2.0时代^[1]。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,从而影响列车运行的安全性。如日本的第一条高速铁路东海新干线在修建时对路基问题没有足够的重视,自1964年10月通车后,在长达29 km的土质路基地段出现了大量路基病害问题,包括道床翻浆冒泥等,同时还造成上部轨道结构的不均匀沉陷,迫使列车的运营速度由最初的210 km/h降至160 km/h,在一些路基病害频发路段,时速甚至降至110 km/h。类似工程案例还有许多,由此可见,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。

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,聂志红等^[2]考虑了轨道和路基的耦合作用,研究了高速移动荷载作用下路基表层的动力问题。薛富春等^[3-4]采用三维精细化建模技术,同时考虑了轨道结构与路基之间的动力相互作用,研究了移动荷载作用下轨道及路基的动力响应问题。宋小林等^[5]通过建立CRTS II型板式无砟轨道路基的动力有限元模型,对不同移动速度荷载作用下轨道和路基动应力的分布和传递规律进行了分析研究。Shanhu^[6]将钢轨考虑为一维梁单元,在此基础上建立了线弹性轨道路基三维有限元

模型,研究了轨枕间距、基床刚度等对路基动力特性的影响。Hu等^[7]采用2.5维有限元结合薄层单元法,研究了移动荷载作用下轨道路基的动力特性问题。

值得注意的是,正确处理列车荷载求解高速铁路路基动力响应问题的一个关键环节是准确模拟列车荷载,是后续计算结果科学合理的重要前提,通常数值仿真分析在处理列车荷载时主要采用两种方法,一种是建立包括列车-轨道-路基三维耦合动力学模型,整个耦合模型由多个子系统共同组成,包括列车子系统、轨道子系统及路基子系统等,同时,模拟各组成部分的动力作用,包括轮轨法向接触、垂向接触,计算求解得到轮轨作用荷载;另一种方法是对列车子系统进行简化处理、通过轮轨激振荷载随时间、空间位置的表达式模拟列车荷载,而实际列车荷载是一个较为复杂的问题,列车荷载的准确模拟对于后续的计算十分重要,学者们先后提出了一些荷载模拟方法,李军世等^[8]、陈岳源^[9]将荷载简化为一个包含振动幅值和频率的指数函数形式,并通过傅里叶级数来反映每组轮对随时间、空间位置的变化。梁波等^[10]提出一种与轨道随机不平顺相对应的由静荷载和正弦函数共同组成的表达式来模拟列车荷载。Matsuura^[11]将移动荷载简化处理为移动简谐荷载,建立了日本新干线的轨道-路基耦合模型,对整个模型的动力特性做了系统的分析。有学者^[12-13]在分析列车荷载时,基于轮轨不规则接触而受到强

迫振动的考虑,将荷载模拟为受多种因素影响的静载与附加动载之和的形式。

已有研究工作取得了一些进展和成果,但在处理车辆荷载等方面仍有一些值得商榷的地方,例如,在处理列车荷载时采用传统建立三维列车-轨道-路基耦合动力分析模型的方法,由于列车子系统内的车体、转向架、轮对、一系悬挂、二系悬挂等构件众多,涉及伸缩、横移、沉浮、摇头、侧滚及点头多种自由度,同时,为了保证计算精度和准确性,需要对上述构件的网格进行细分,并模拟轨道随机不平顺、轮轨接触模型、与下部结构的动力相互作用等计算条件,导致整个数值分析模型的求解计算成本较高,应用和推广性受到了一定的限制。而上述采用简化处理列车荷载代替列车子系统的方法或荷载表达式参数过于复杂,应用繁琐、计算成本高,或考虑影响因素不够全面、偏于简化,包括在模拟列车移动荷载上,有些没有考虑到轨道随机不平顺等因素对轮轨载荷产生的影响,轮轨载荷模拟不够精确,以及未能充分考虑列车轮轨载荷在线路上的移动、叠加组合与钢轨的分散传递因素等。

针对已有研究中存在的问题,笔者对列车荷载的模拟进行了一定的改进,利用多体动力学软件 Universal Mechanism 基于车辆-轨道耦合动力学理论建立列车-轨道垂向耦合模型,采用赫兹接触模拟轮轨接触,同时考虑轨道横向、竖向的随机不平顺下计算得到轮轨载荷数据,并通过 Fortran 语言二次开发子程序 Vdload,将轮轨载荷加载至有限元软件 Abaqus 建立的无砟轨道-路基-天然地基土三维有限元模型,相较于传统建立列车-轨道-路基三维耦合动力学模型或将列车荷载简化为表达式来代替列车子系统的方法,既保证了列车荷载模拟的准确性,又较好地解决了传统三维列车-轨道-路基耦合动力分析模型求解计算成本高的问题。基于此开展对高速移动荷载作用下无砟轨道系统及路基的动应力随时间、空间变化规律的研究。

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,如图 1 所示。无砟轨道结构包括钢轨、轨道板、CA 砂浆层及混凝土底座;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。该模型为有限元-无限元耦合模型,路基两端及土体四周

采用无限元单元模拟半无限空间体,其余内部单元为有限元单元。模型整体沿轨道前进方向的长度为 150 m,宽度为 60 m,厚度为 60 m,其余尺寸按《高速铁路设计规范》建立模型^[14]。

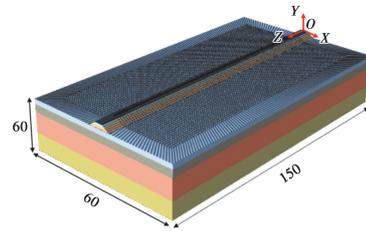


图 1 三维整体模型(单位:m)

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 采用高速铁路的 CRTS 型单线无砟轨道,断面尺寸如图 2 所示。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,扣件动刚度为 60 kN/mm,阻尼系数取 50 kN·s/m。

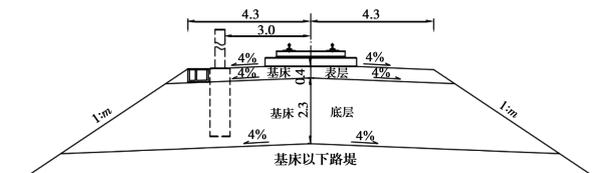


图 2 无砟轨道单线路堤标准横断面示意图(单位:m)

Fig. 2 Standard cross section diagram of ballastless track single line embankment (unit: m)

表 1 轨道系统材料参数

Table 1 Material parameters of track system

名称	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/Pa	泊松 比	阻尼 比	瑞利阻尼系数	
					α	β
钢轨	7 800	2.06×10^{11}	0.25	0.01	0.032 5	0.002 8
轨道板	2 400	3.55×10^{10}	0.16	0.02	0.098 1	0.009 1
CA 砂浆层	1 800	1.00×10^8	0.40	0.04	0.098 1	0.009 1
混凝土底座	2 400	3.00×10^{10}	0.20	0.02	0.098 1	0.009 1

1.2.2 路基土体和天然地基土 土体属于粘弹塑性变形的混合物,其应力应变是非线性的,考虑到路基基床填料属于颗粒状材料,其受压屈服强度远大于受拉屈服强度,不仅静水压力可以引起岩土塑性体积变化,而且偏应力也可能引起塑性体积变化(剪胀),故路基采用能准确描述这类材料的 Drucker-Prager 模型^[15]。而列车交通荷载引起地基土动应变一般在 10^{-5} 或者更小,基本属于弹性变形

阶段,因此,对地基土体采取简化假设,即不考虑地基土塑性性质,采用线弹性本构模型^[16]。这样做既可以保证计算结果的准确性,也较大地减少了计算的时间成本。路基土体和天然地基土参数见表 2^[16]和表 3^[4]。由于路基土体各结构层之间错动很小,可近似认为变形连续,各结构层间考虑为 tie 连接。路基土体内部有限元单元采用沙漏控制的 C3D8R 单元,路基两端及地基土四周无限元单元采用 CIN3D8 单元。

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多体动力学软件 Universal Mechanism 建立列车-轨道垂向耦合模型,车辆模型采用德国 ICE3 型高速列车,具体参数见表 4,车轮踏面类型为 LMA,钢轨采用 60 kg/m 的轨道结构形式,钢轨高 176 mm,轨头宽 73 mm,轨底宽 150 mm。结合高速铁路实际运行情

表 2 路基材料参数^[16]

Table 2 Material parameters of subgrade^[16]

名称	层厚/m	密度/ (kg · m ⁻³)	弹性模 量/MPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦 角/(°)	阻尼比	膨胀角/(°)	流应 力比	受压屈服 应力/MPa	绝对塑 性应变
基床表层	0.4	2 184	120	0.3	0.07	27	0.045	0	0.855	0.178	0
基床底层	2.3	1 939	70	0.3	0.05	23	0.039	0	0.876	0.122	0
路堤本体	3.6	1 837	50	0.35	0.04	20	0.035	0	0.892	0.095	0

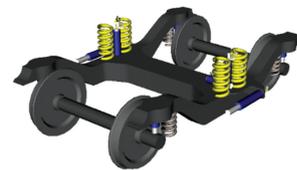
表 3 地基土材料参数^[4]

Table 3 Material parameters of foundation soil^[4]

名称	层厚 /m	密度/ (kg · m ⁻³)	弹性模 量/MPa	泊松 比	阻尼 比	瑞利阻尼系数	
						α	β
粉质黏土	6	1 800	27	0.28	0.075	0.261	2 0.023
淤泥质黏土	9	1 860	20	0.29	0.070	0.228	7 0.022
砂质粉土	24	1 930	65	0.30	0.065	0.211	7 0.019
粉土	21	1 980	72	0.32	0.055	0.176	2 0.015

况,考虑到列车在轨道上高速运行时轨道随机不平顺对列车轮轨载荷的影响,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^[17]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,建立较为精细化的列车-轨道垂向耦合模型,见图 3,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 4 为列车荷载施加示意图。图 5、图 6 为高速铁路无砟轨道横向、高低不平顺样本模拟结果。因研究重点是荷载向路基土体传递产生的竖向动应力 σ_{22} ,故只计算了轮轨垂向力,如图 7 所示。在做轨道路基动力分析时,其首要问题是基于轨道随机不平顺条件下如何实现移动荷载的模拟,采用的方法是通过对有限元软件 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,采取 2 节动车组 8 轮对模型进行计算。



(a) 转向架



(b) 机车车辆

图 3 整车模型

Fig. 3 Vehicle model

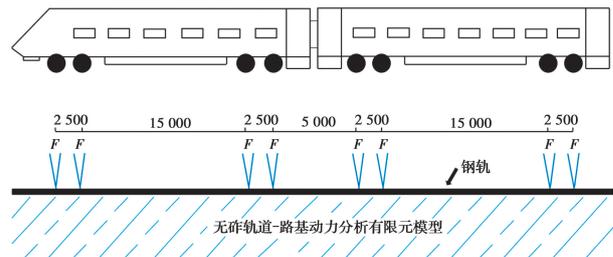


图 4 列车荷载施加示意图(单位:mm)

Fig. 4 Applied loads (Unit: mm)

表 4 高速列车参数

Table 4 High-speed train parameters

车体质量/t	构架质量/t	轮对质量/t	车体点头转动惯量/(kg·m ²)	构架点头转动惯量/(kg·m ²)	一系垂向刚度/(kN·m ⁻¹)	一系垂向阻尼/(kN·s·m ⁻¹)
48	3.2	24	2.7×10^6	7 200	1.04×10^3	45
二系垂向刚度/(kN·m ⁻¹)	二系垂向阻尼/(kN·s·m ⁻¹)	抗蛇形减振器阻尼/(kN·s·m ⁻¹)	车轮滚动半径/m	车辆定距/m	转向架轴距/m	
0.4×10^3	50	2 500	0.46	17.375	2.5	

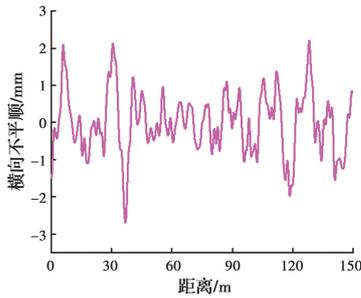


图 5 横向不平顺

Fig. 5 Lateral irregularities

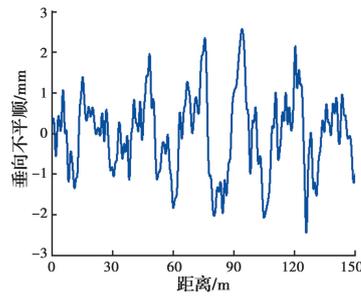


图 6 垂向不平顺

Fig. 6 Vertical irregularities

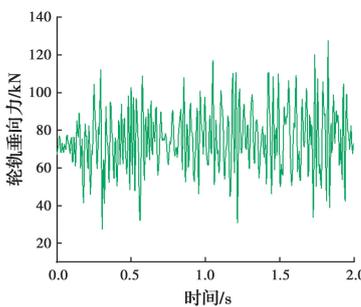


图 7 轮轨垂向力

Fig. 7 Wheel-rail vertical force

1.3.2 边界条件与地应力平衡 模型路基两端及天然地基土四周采用无限元单元,其实质是通过设置阻尼的方法吸收能量,模拟波在半空间无限区域的传播,但有限元软件 Abaqus/CAE 目前不支持直接对无限元单元的设定,需要通过 inp 文件的修

改来实现对无限元单元的定义。采用三维有限元-无限元耦合人工边界,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。

在涉及岩土地基等的数值动力分析时,为了保证计算的精度和准确性,首先需要进行地应力平衡,使地基获得初始地应力,而不存在初始应变,模拟地基土在土的自重作用下处于平衡状态。地应力平衡效果如图 8、图 9 所示。由图 9 可知,经过地应力平衡后模型计算的位移幅值为 7.57×10^{-15} m, 小于 10^{-4} m, 满足精度要求。

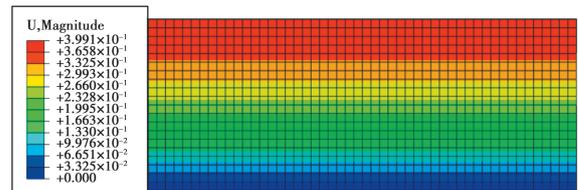


图 8 自重作用下的位移云图

Fig. 8 Displacement nephogram under gravity

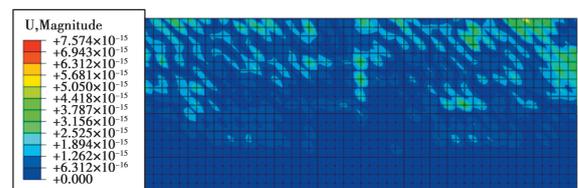


图 9 地应力平衡后的位移云图

Fig. 9 Displacement nephogram after geostress balance

1.4 验证模型

根据参考文献[18]给出的武广客运专线板式无砟轨道路基现场测试动力响应数据,在计算中采用与参考文献[18]相同的列车轴重、移动速度等参数,并通过与其计算结果进行对比来验证模型的可靠性与合理性,结果对比如图 10 所示。从图 10 可知,数值模拟计算路基中动应力沿深度分布的规律曲线与参考文献[18]实测动应力变化规律基本一致,数值模拟计算结果略大于实测值,但其最大差值仅为 2.282 kPa。

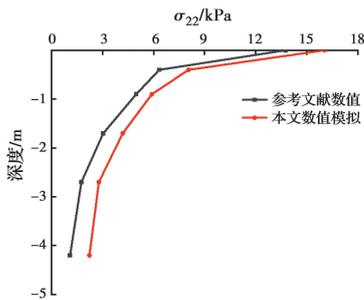


图 10 路基动应力数值对比

Fig. 10 Numerical comparison of subgrade dynamic stress

为了进一步说明模型建立及采用两步法处理车辆荷载的合理性、优越性,采用文献[19]中相关参数,模拟单列动车组 2 位转向架加载,求解得到了钢轨正下方基床表层的动应力时程曲线,如图 11 所示。由图 11(a)、(b)对比可知,无论是曲线规律还是幅值大小都非常接近,计算结果时程数据发展规律与对比文献中的结果吻合情况较好。文献[19]采取的是传统建立列车-轨道-路基耦合模型的方法,本文所建模型及采用两步法处理列车荷载的方法与对比文献不同,尽管本文通过多体动力学软件 UM 也建立了列车-轨道耦合模型,但在 UM 前处理 Input 模块可利用软件自带的参数化建模、子系统 (Subsystem) 模块等通过多层嵌套的形式大大节省建模时间,同时用户可根据计算分析的需要通过 UM Loco 选取轮轨接触模型、轨道型式、线路不平

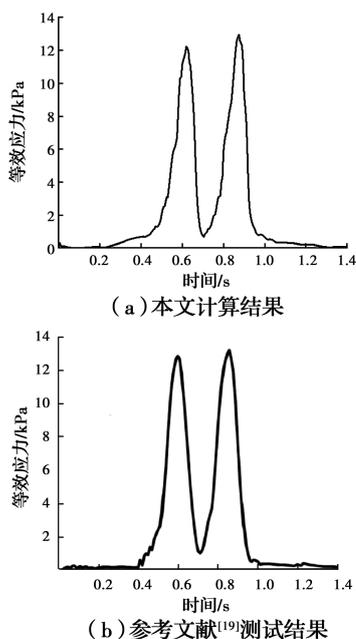


图 11 动应力时程数据结果对比

Fig11 Comparison of dynamic stress time history data results

顺等;UM 后处理仿真分析 Simulation 模块在求解轮轨接触等复杂接触问题、刚性问题优势非常明显,可以较准确地模拟车辆完整的结构运动关系和动力特性,在保证求解精度的同时也非常高效,极大地缩短了计算时间成本(仿真分析时间成本远小于传统有限元整体模型法)。因此可认为,相较于传统建立列车-轨道-路基三维耦合动力学模型或将列车荷载简化为表达式来代替列车子系统的方法,本文采取的方法在满足计算精度的同时十分高效便捷,极大地缩短了建模及仿真的时间成本。

2 数值分析结果

在列车高速移动的荷载作用下,轨道结构及路基土体的振动及变形主要发生在竖向,因此,重点对竖向动应力 σ_{22} 进行分析研究。

2.1 竖向动应力 σ_{22} 沿各结构层横向分布

根据无砟轨道单线路堤标准横断面示意图(如图 2 所示),各结构层自上而下分别为:轨道板、CA 砂浆层、混凝土底座、路基本体及天然地基土等。各结构层底面竖向动应力 σ_{22} 见图 12。

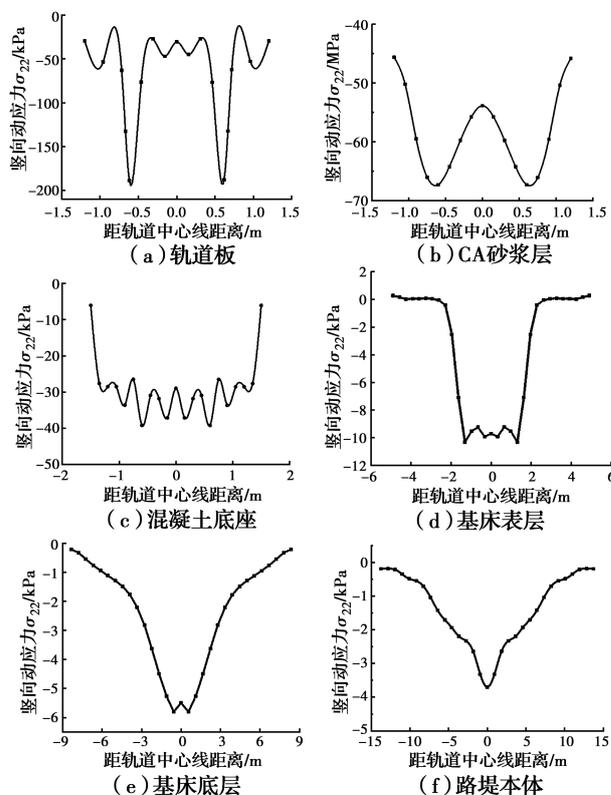


图 12 竖向动应力 σ_{22} 沿各结构层横向分布

Fig. 12 Horizontal distribution of vertical dynamic stress σ_{22} along each structural layer

从图 12 可以看出,在轨道板、CA 砂浆层及混凝土底座均产生了两个明显的峰值,其峰值出现位置与荷载作用位置相对应,而在基床表层及基床底层竖向动应力呈现出“马鞍形”分布,在混凝土底座与基床表层的接触部位出现突变,说明此接触部分容易发生破坏,在设计中应引起重视。同时,随着深度的增加,竖向动应力逐渐减小,轨道结构中的竖向应力值较大,路基结构中的竖向应力值相对较小,说明路基基床在分散和缓冲竖向动应力中起了较大作用,当应力传递至路堤本体底面时有明显衰减。

2.2 竖向动应力 σ_{22} 在路基内竖向分布规律

竖向动应力 σ_{22} 在路基内沿深度分布如图 13 所示。选取混凝土底座边缘、轨道中心线及钢轨下方 3 条深度方向的路径对比分析竖向动应力 σ_{22} 在路基内沿竖向分布的衰减曲线,从图 13 可以看出,随着深度的增加,竖向动应力 σ_{22} 逐渐减小,在基床表层内最大,其中,混凝土底座边缘下方基床表面的 σ_{22} 为 22.341 kN,轨道中心线下方基床表面的 σ_{22} 为 20.113 kN,钢轨正下方基床表面的 σ_{22} 为 18.682 kN。混凝土底座边缘下基床表面动应力大于轨道中心线及钢轨正下方基床表面动应力,这是因为在列车高速移动的动荷载作用下,混凝土底座边缘产生了应力集中效应。

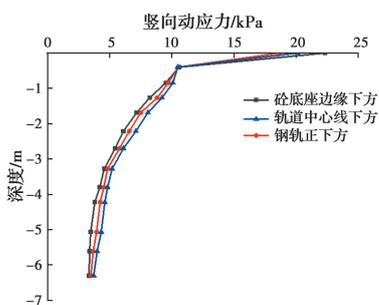


图 13 竖向动应力 σ_{22} 沿深度分布

Fig. 13 Variation of vertical dynamic stress σ_{22} along depth

由图 14 可知,竖向动应力 σ_{22} 沿深度方向衰减率随深度的增加逐渐增大,3 条路径竖向动应力 σ_{22} 的衰减规律基本一致,在基床表层内的衰减较大,混凝土底座边缘下的基床表层内衰减率达到 52.7%,轨道中心线下的基床表层内衰减率达到 47.9%,钢轨正下方的基床表层内衰减率达到 43.7%,基床底层及路堤本体内衰减率逐渐趋于平缓,最终到达路基地面时衰减率均达到 80% 以上。经过计算,无论

是混凝土底座边缘下方还是钢轨、轨道中心线下方,竖向动应力衰减速度(即动应力单位深度衰减量)均是基床表层内最快,基床底层次之,路堤本体最慢。可见路基对应力波的吸收起到了重要作用,在工程实际中应当对路基的设计引起足够重视。

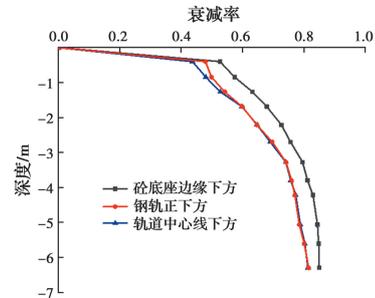


图 14 竖向动应力 σ_{22} 沿深度衰减规律曲线

Fig. 14 Attenuation curve of vertical dynamic stress σ_{22} along depth

2.3 竖向动应力 σ_{22} 沿各结构层纵向分布

图 15 为不同结构层底面竖向动应力 σ_{22} 沿纵向(列车前进方向)分布规律。从图 15 可以看出,沿线路纵向不同结构层的竖向动应力分布规律类似,数值大小随着深度的增加逐渐减小。在无砟轨道系统和路基各结构层中,各层的竖向动应力分布曲线中产生了明显的 4 个峰值,这 4 个峰值即对应了本文模型中两节动车组的 4 位转向架。列车运行过程中轨道及路基动应力的变化可以看作是反复的加、卸载过程。当高速移动的动荷载逐渐远去时,竖向动应力 σ_{22} 也逐渐趋于 0。

2.4 列车时速对竖向动应力 σ_{22} 的影响

表 5 为列车在不同时速 $V_1 = 200$ km/h、 $V_2 = 250$ km/h、 $V_3 = 300$ km/h、 $V_4 = 350$ km/h 下路基基床各结构层的竖向动应力幅值曲线,为了更形象直观地描述列车移动速度对竖向动应力幅值的影响,同时结合图 16 来共同说明。由图 16 和表 5 可知,速度在 200~350 km/h 范围内,随着列车移动速度的增加,动应力幅值呈逐渐增大趋势。其中,基床表层顶面动应力幅值对速度变化最敏感,速度由 200 km/h 增大至 350 km/h,动应力幅值增长了 40.80%,由上至下,其他路基结构层动应力幅值分别增长了 40.61%、35.23%、33.16%。因此,列车时速对路基结构的动力响应有一定的影响,在实际高速铁路运行中要合理设定列车行驶速度。

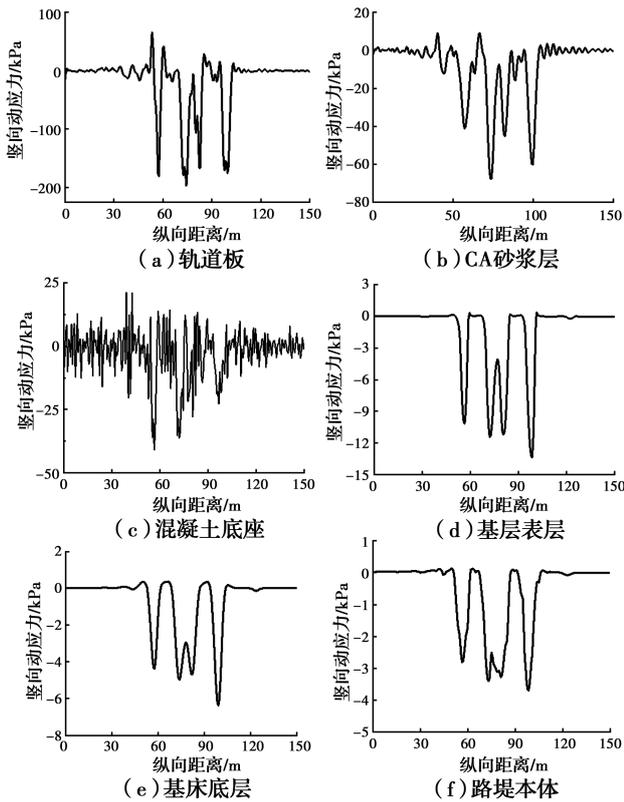


图 15 竖向动应力 σ_{22} 沿各结构层纵向分布

Fig. 15 longitudinal distribution of vertical dynamic stress σ_{22} along each structural layer

表 5 速度对路基动应力的影响

Table 5 Influence of speed on dynamic stress of subgrade

位置	深度/m	不同时速下动应力幅值/kPa			
		200 km/h	250 km/h	300 km/h	350 km/h
表层顶面	0	15.867	16.256	17.209	22.341
表层底面	0.4	7.521	7.883	8.157	10.575
底层底面	2.7	4.167	4.342	4.424	5.635
路堤底面	6.3	2.512	2.571	2.633	3.345

图 17 为不同列车移动速度下竖向动应力沿深度衰减规律,由图 17 可知,4 种时速下动应力幅值分布规律相近,均在路基基床顶面取得最大值,随着深度的增加,动应力幅值逐渐减小,在深度范围 0~2 m 内衰减较快,随后衰减逐渐趋于平缓。在不同列车移动速度下,衰减率相差很小,基本趋于一致,在路基深度为 0.4 m 处即基床表层底面,4 种时速下的动应力幅值衰减率均超过了 50%,同时,路基基床内动应力幅值衰减速度(即单位深度衰减量)随着深度的增加逐渐降低,基床表层内最快,基床底层次之,路堤本体内最慢。可见,路基基床对上部结构传递的动力响应的吸收和扩散起了重要作用。

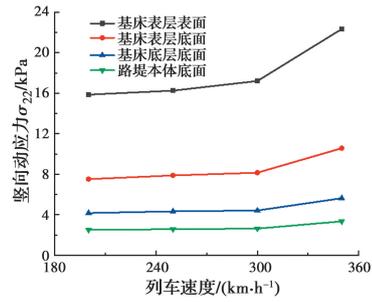


图 16 不同时速下竖向动应力幅值曲线

Fig. 16 Vertical dynamic stress amplitude curve at different speeds

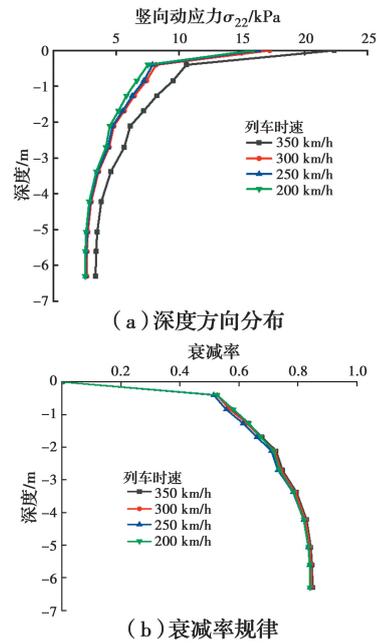


图 17 不同时速下动应力幅值沿深度衰减曲线

Fig. 17 Dynamic stress amplitude along the depth attenuation curve at different speeds

3 结论

基于多系统动力学理论建立列车-轨道垂向耦合模型,考虑轨道随机不平顺的影响计算了高速列车运行时产生的轮轨激振载荷,通过有限元软件二次开发子程序将轮轨载荷数据导入无砟轨道-路基-天然地基土非线性数值分析三维有限元模型中。同时,考虑到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,产生误差,模型路基两端及天然地基土四周采用无限元单元模拟无穷边界区域,路基土体采用 Drucker-Prager 弹塑性本构模型,同时考虑了材料的硬化等参数。通过数值分析计算得到了如下结论:

1)采用的车辆荷载处理方法与参考文献[18-19]计算结果吻合情况较好,相较于传统建立列车-轨道-路基三维耦合动力学模型或将列车荷载简化为表达式来代替列车子系统的方法,在满足计算精度的同时十分高效便捷,极大地缩短了建模及仿真的时间成本。

2)沿横向分布时,竖向动应力在轨道结构中数值较大,路基基床内远小于轨道结构中的数值,基床表层及基床底层底面出现“马鞍形”分布;沿竖向分布时,随着深度的增加,竖向动应力逐渐减小,在基床表层表面,竖向动应力数值:混凝土底座边缘下方>轨道中心线下方>钢轨正下方。竖向动应力衰减速度(即动应力单位深度衰减量):基床表层>基床底层>路堤本体;沿纵向分布时,在轨道结构层内产生了与列车轮对数目相等的应力峰值数目,在路基基床内,由于距离相近的轮对产生的动力响应进行了叠加,应力峰值数目减少。

3)列车移动速度由 200 km/h 增加到 350 km/h,路基各结构层竖向动应力幅值增长均超过 30%,列车时速对路基结构的动力响应影响较大,在实际高速铁路运行中要合理设定列车行驶速度。

4)路基基床在分散、缓冲及吸收竖向动应力中起主要作用,混凝土底座边缘与基床表层接触部分易发生破坏,在设计中应引起足够重视。

以下问题值得继续深入研究:

1)建立的三维有限元模型进行了一些简化,实际工程中高速铁路轨道结构及路基土体较为复杂,后续的研究中可以建立更精细化、更全面的模型。

2)实际的天然地基土体是多相介质且非饱和,应考虑采用更符合实际工况的本构模型。在后续的研究中,将会对上述问题进行更加深入的探讨。

参考文献:

- [1] 孙章, ZHANG Liman. 高铁智能化: 中国铁路又出发[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(2): 8, 148-149.
SUN Z, ZHANG L M. The next journey for China railway-intelligentization of high-speed train [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(2): 8, 148-149. (in Chinese)
- [2] 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. Study on the dynamic response of the track/subgrade under moving load [J]. China Railway Science, 2006, 27(2): 15-19. (in Chinese)

- [3] 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 of the track-subgrade of high-speed railways subjected to moving loads [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1105-1113. (in Chinese)
- [4] 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 stresses in embankment of high-speed railway under moving loads [J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(1): 86-91. (in Chinese)
- [5] 宋小林, 翟婉明. 高速移动荷载作用下 CRTS II 型板式无砟轨道基础结构动应力分布规律[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(4): 1-7.
SONG X L, ZHAI W M. Dynamic stress distribution of the infrastructure of CRTS II slab ballastless track under high speed moving load [J]. China Railway Science, 2012, 33(4): 1-7. (in Chinese)
- [6] SHAHU J T, KAMESWARA RAO N, YUDHBIR. Parametric study of resilient response of tracks with a sub-ballast layer [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(6): 1137-1150.
- [7] HU J, BIAN X C, JIANG J Q. Critical velocity of high-speed train running on soft soil and induced dynamic soil response [J]. Procedia Engineering, 2016, 143: 1034-1042.
- [8] 李军世, 李克钊. 高速铁路路基动力反应的有限元分析[J]. 铁道学报, 1995, 17(1): 66-75.
LI J S, LI K C. Finite element analysis for dynamic response of roadbed of high-speed railway [J]. Journal of the China Railway Society, 1995, 17(1): 66-75. (in Chinese)
- [9] 陈岳源. 铁路轨道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
Chen Y Y. Railway track [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1994.
- [10] 梁波, 蔡英. 不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J]. 铁道学报, 1999, 21(2): 84-88.
LIANG B, CAI Y. Dynamic analysis on subgrade of high-speed railways in geometric irregular condition

- [J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(2): 84-88. (in Chinese)
- [11] MATSUURA A. Simulation for analyzing direct derailment limit of running vehicle on oscillating tracks [J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 1998, 15(1): 63-72.
- [12] KUMARAN G, MENON D, NAIR K K. Evaluation of dynamic load on railtrack sleepers based on vehicle-track modeling and analysis [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2002, 2(3): 355-374.
- [13] 佐藤吉彦. 新轨道力学[M]. 徐涌, 等. 译. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- SATO J. New orbital mechanics [M]. XU Y, et al. Trans. Beijing: China Railway Publishing House, 2001. (in Chinese)
- [14] 高速铁路设计规范 TB 10621—2014 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- Code for design of high speed railway: TB 10621-2014 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015. (in Chinese)
- [15] 孔祥辉. 高速铁路红层泥岩路基动态响应及动力变形特性的综合研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- KONG X H. Research on dynamic response and dynamic deformation characteristics of red mudstone subgrade in high-speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [16] 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: 48-51.
- WANG F X. Numerical simulation and vibration characteristic analysis of high-speed railway induced environmental vibrations based on Abaqus [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014: 48-51. (in Chinese)
- [17] 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. PSD of ballastless track irregularities of high-speed railway [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2014, 44(7): 687-696. (in Chinese)
- [18] 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 dynamic response characteristics of Wuhan-Guangzhou Passenger Dedicated Line [D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- [19] 张福兴. 泡沫轻质土在高速铁路软土路基中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- ZHANG F X. Application of foamed light soil in soft soil subgrade of high-speed railway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [20] 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 Q L, HAN Z L, LU B L. Structural analysis and design method for subgrade bed of high-speed railway [J]. China Railway Science, 2005, 26(6): 53-57. (in Chinese)

(编辑 章润红)