

文章编号: 1674—8247(2021)02—0108—07  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.019

## 400 km/h 高速铁路基床结构研究

张东卿<sup>1,2</sup> 李安洪<sup>2</sup> 薛元<sup>2</sup> 罗强<sup>1</sup> 周成<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学, 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**列车运行速度提高至 400 km/h 时,列车与线路相互作用更为复杂,路基承受的列车动力荷载作用更加剧烈。本文结合车辆-轨道-路基耦合动力学仿真,基于强度、变形和应变准则,对 400 km/h 高速铁路基床结构的设计方法进行了探讨,并对传统无砟轨道基床结构、全断面沥青混凝土强化表层基床及底层改良土基床结构在速度 400 km/h 条件下的适应性和设计参数进行了研究。研究表明:(1)400 km/h 高速铁路基床结构应同时满足强度、变形及应变控制准则;(2)在轨道不平顺条件不变的条件下,随着列车运行速度的提高,路基面动力系数显著增加,且增加幅度逐渐增大;(3)速度 400 km/h 条件下,用于强度验算的路基面极限动力系数可取 2.146,用于动变形和动应变计算的常遇动力系数可取 1.491;(4)速度 400 km/h 条件下,传统无砟轨道基床底层地基系数  $K_{30}$  需要提高到 150 MPa/m;(5)沥青混凝土起到了分散荷载的作用,在速度 400 km/h 条件下,全断面沥青混凝土强化表层基床结构底层的地基系数不低于 145 MPa/m 即可满足要求;(6)压实性能达到要求时,改良土基床结构也可满足 400 km/h 速度要求。

**关键词:**400 km/h 高速铁路;基床结构;动力学仿真;动力系数;设计参数

**中图分类号:**U213.1 **文献标志码:**A

108

## Study on Subgrade Bed Structure of 400 km/h High-speed Railway

ZHANG Dongqing<sup>1,2</sup> LI Anhong<sup>2</sup> XUE Yuan<sup>2</sup> LUO Qiang<sup>1</sup> ZHOU Cheng<sup>2</sup>

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** When the train operation speed is increased to 400km/h, the track-train interaction will become more complex, and the subgrade will bear more severe dynamic load effect of the trains. In this paper, applying the vehicle-track-subgrade coupling dynamics simulation and based on the strength, deformation and strain criteria, the design method for the subgrade bed structure of 400 km/h high-speed railway is discussed, and the adaptability and design parameters under the conditions of 400 km/h are studied, regarding the subgrade bed structure of the traditional ballastless track, the subgrade bed with full-section asphalt concrete reinforced surface and the subgrade bed structure with improved soil at the bottom-layer. The study shows that: (1) The subgrade bed structure of 400 km/h high-speed railway shall meet the strength, deformation and strain control criteria. (2) Under the condition of constant track irregularity, the dynamic coefficient of subgrade surface increases significantly with the improvement of train operation speed, and the increase amplitude becomes larger gradually. (3) Under the conditions of 400 km/h, the ultimate dynamic coefficient of subgrade surface used for strength checking may be taken as 2.146, and the common dynamic

收稿日期:2021-03-01

作者简介:张东卿(1987-),男,高级工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目(KSNQ202060)

引文格式:张东卿,李安洪,薛元,等.400 km/h 高速铁路基床结构研究[J].高速铁路技术,2021,12(2):108-114.

ZHANG Dongqing, LI Anhong, XUE Yuan, et al. Study on Subgrade Bed Structure of 400 km/h High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 108-114.

coefficient used for dynamic deformation and dynamic strain calculation may be taken as 1.491. (4) Under the condition of 400 km/h, the subgrade coefficient  $K_{30}$  of the bottom layer of the subgrade bed of the traditional ballastless track needs to be increased to 150 MPa/m. (5) Asphalt concrete plays the role of load distribution. Under the conditions of 400 km/h, the subgrade coefficient of the bottom layer of the subgrade bed structure with the full-section asphalt concrete reinforced surface greater than or equal to 145 MP/m can meet the requirements. (6) When the compaction performance meets the requirements, the subgrade bed structure of improved soil can also meet the requirements at 400 km/h.

**Key words:** 400 km/h high-speed railway; subgrade bed structure; dynamics simulation; dynamic coefficient; design parameters

自1964年日本建成第一条高速铁路以来,高速化一直是铁路运输发展的重点方向,也一直是各铁路强国竞相研发的热点。随着列车运营速度的提升,车辆-轨道-路基的耦合效应愈发明显,动力作用也将进一步增大,可能会造成路基结构的劣化。路基结构劣化会进一步增大动力效应,从而循环、反复,形成持续劣化。高速铁路基床距离列车最近,直接承受上部列车动力荷载作用,其状态直接影响列车运行的平稳和安全,因此基床结构是铁路路基向高速化发展所需要的解决的首要问题。到目前为止,世界高速铁路最高运营速度为360 km/h,尚没有投入运营的400 km/h高速铁路,对于设计速度400 km/h及以上高速轮轨铁路路基的基床结构,尚缺乏系统性的研究。

本文针对上述问题,结合列车-轨道-路基动力耦合仿真计算,基于强度、变形和应变准则,分别对动应力、动强度、动变形、动变形限值、动应变及动应变限值的计算和取值方法进行探讨,并对传统无砟轨道基床、全断面沥青混凝土表层强化基床及底层改良土基床在400 km/h条件下的适应性和设计参数进行了研究。

## 1 基床结构分析方法

目前,高速铁路基床结构设计仍以经验为主,TB 10001-2016《铁路路基设计规范》等规范给出了不同轨道类型、不同时速的基床表层、底层厚度以及各层的填料要求。实际设计时,根据时速、轨道类型等按规范选用即可。但现有规范只给出了350 km/h及以下速度铁路路基基床的设计参数,400 km/h高速铁路尚无参考的标准。

现有的基床结构设计方法有强度控制法、变形控制法和应变控制法。强度控制法<sup>[1]</sup>以路基承受的列车荷载不大于动强度为控制条件,是法国等传统欧美铁路强国的早期做法。变形控制法要求路基在列车荷

载下的动变形不超过规定限值,以提高行车的平稳性,日本新干线采用的是该设计方法。应变控制法通过限制路基的动应变,持久保持路基的长期服役性能,防止路基病害。为控制列车荷载作用下的路基累积变形,张千里<sup>[2]</sup>等人基于土的临界体积应变概念,提出了基床结构设计的应变控制方法;胡一峰<sup>[3]</sup>等人根据路基土的动剪应变幅值与线性、体积动剪应变门槛值的关系,提出了列车荷载作用下的路基长期动力稳定性分析与评价方法。当前我国基床结构设计综合了强度、变形和应变控制三个方面。

### 1.1 强度控制标准

基床结构动应力应满足式(1)的要求:

$$\sigma \leq R/K \quad (1)$$

式中: $\sigma$ ——基床结构层动应力(kPa);

$R$ ——基床各层填料动强度(kPa);

$K$ ——安全系数。

(1)基床结构不同深度处的动应力

基床结构不同深度处的动应力 $\sigma$ 可根据路基面荷载分布模式,按 Boussinesq 理论计算。根据相关研究,无砟轨道具有较强的荷载扩散能力,车辆转向架的前后轴载通过轨道系统传递到路基面的应力叠加效应十分明显,表现出动应力沿横向基本均匀、纵向近似梯形分布的特征。因此,高速铁路无砟轨道路基面车辆荷载可简化为梯形荷载分布模式<sup>[4]</sup>,如图1所示。

路基面动应力 $\sigma_{s0}$ 的计算公式为:

$$\sigma_{s0} = \frac{2\phi_k P}{B(W+L)} \quad (2)$$

式中: $\phi_k$ ——动力系数;

$P$ ——车辆轴重(kN);

$B$ ——支承层或底座宽度(m);

$W$ ——路基面上单轴载纵向影响范围的一半(m);

$L$ ——转向架固定轴距(m)。

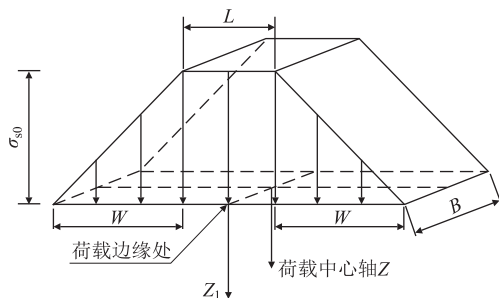


图1 路基面车辆荷载梯形分布模式图

随着列车时速的提高,轨面不平顺引起的动力作用将增大,因此,400 km/h 速度下的动应力系数应有所提高。

### (2) 基床各层填料容许动强度

基床各层填料容许动强度按式(3)和式(4)计算:

$$R = 0.45[\sigma_0] \quad (3)$$

$$[\sigma_0] = 2.4K_{30} + 15 \quad (4)$$

式中: $\sigma_0$ ——基于 $K_{30}$ 表达的静容许强度(kPa)。

### (3) 安全系数

参考《铁路路基设计规范(极限状态法)》,列车荷载作用分项系数取1.3,基床表层承载能力分项系数取2.0。400 km/h 高速铁路路基按安全等级为一级考虑,结构重要性系数取1.1。各系数综合,相当于总安全系数为2.86。因此建议安全系数 $K$ 取3.0。

## 1.2 动变形控制标准

基床结构动变形应满足:

$$\omega \leq C_\omega \quad (5)$$

式中: $\omega$ ——计算变形值(mm);

$C_\omega$ ——变形限制值(mm),取0.22 mm(轨道结构外侧边缘位置)。

根据基床各点处的应力和填料变形模量,可计算出各点处的应变,再由应变可计算出路基面的变形。填料变形模量可通过地基系数 $K_{30}$ 转换获得,如式(6)所示:

$$E_0 = 0.785(1 - \mu^2)dK_{30} \quad (6)$$

式中: $d$ ——圆形承载板直径,取30 cm;

$\mu$ ——土的泊松比,一般取0.21。

因此可得到以 $K_{30}$ 表达的土体静变形模量 $E_0$ :

$$E_0 = 0.225K_{30} \quad (7)$$

土体模量与应变之间存在着显著的非线性关系<sup>[5]</sup>,如图2所示。受 $K_{30}$ 试验承载板尺寸的影响, $K_{30}$ 试验中的填料应变水平与路基实际工作状态下的应变水平有所差异,所对应的变形模量也不同,因此需对试验所得变形模量进行修正。

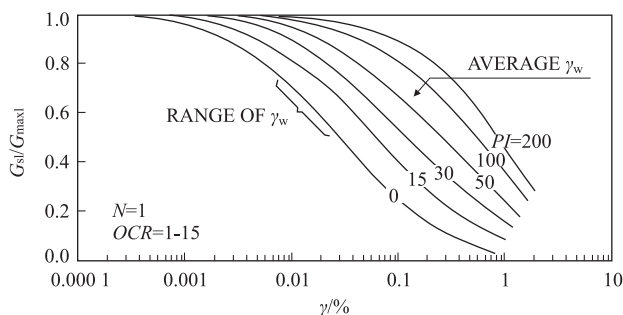


图2 模量比与应变的关系图

$K_{30}$ 试验变形要求为1.25 mm,承载板沿深度的主要影响区域约为2倍板径,因此填料平均应变约为0.1875%,相应的模量约为初始模量的0.11倍。而平均而言,在实际工作状态下,基床底层应在允许应变范围内的对应模量为初始模量的0.65倍。因此实际工作状态下的模量约为 $K_{30}$ 试验应变条件下模量的5.91倍。即:

$$E_0 = 0.225 \times 5.91 K_{30} = 1.33 K_{30} \quad (8)$$

## 1.3 基床动应变控制标准

基床底层动应变应满足:

$$\varepsilon \leq C_\varepsilon \quad (9)$$

式中: $\varepsilon$ ——基床动应变( $10^{-6}$ );

$C_\varepsilon$ ——基床动应变限值( $10^{-6}$ )。

动应变控制标准反映的是长期稳定性要求,基床结构需满足在循环荷载作用下长期累积变形达到快速稳定的状态。无砟轨道基床结构的受力和变形特点要求作为主要承受列车荷载作用的基床结构,工作服役时应处于完全弹性状态<sup>[6]</sup>。根据循环荷载作用下高速铁路路基结构典型填料的室内单元结构模型试验,各结构层填料的弹性状态应变阈值可表示为:

$$C_\varepsilon = 0.28 K_{30} + 107 \quad (10)$$

## 2 400 km/h 条件下的车辆 - 轨道 - 路基耦合动力仿真

列车在轨道结构上运行,车辆系统、轨道系统与路基系统之间的动力影响与荷载作用是一个动态耦合的过程。轨面几何不平顺与轨下结构支承刚度变化引起的轮轨接触力是整个耦合系统产生振动的激励源,并上传导至车辆系统,向下传导至轨道系统与路基系统<sup>[7]</sup>。随着列车运行速度的加快,耦合系统动力更加明显。因此需要采用车辆 - 轨道 - 路基耦合动力方法,建立大系统耦合模型,分析路基结构动力响应,明确路基荷载动力系数取值,为路基结构设计动荷载的

确定提供理论依据。

2.1 车辆-轨道-路基耦合模型

基于耦合动力学原理,建立了车辆-轨道-路基耦合动力学垂向模型。其中车辆采用 CRH380A-M2 参数,并基于多刚体动力学将其抽象为多刚体弹簧阻尼系统;钢轨考虑其周期离散支承特点,抽象为离散支承 Euler 梁,针对 CRTS-Ⅲ型轨道板结构形式特点将其抽象为连续支承条件下的单向自由板。轮轨之间的垂向激振力采用 Hertz 非线性弹性接触理论。

2.2 轨道不平顺条件

轨面几何不平顺是引起系统产生耦合振动的重要原因,因此仿真计算中需模拟轨道不平顺条件。轨道不平顺包括高低、水平、方向和轨距四种基本形式。其中,轨道高低不平顺能使轮轨间产生很大的垂向动作用力,是垂向耦合模型所要重点考虑的不平顺条件。TB/T 352-2014《高速铁路无砟轨道不平顺谱》给出了空间波长 2~200 m 的不平顺谱。在此基础上,参考基于频域功率谱等效的方法,根据功率谱分别求出频谱的幅值和随机相位,并通过傅里叶逆变换 (IFFT) 得到轨道不平顺的时域模拟样本<sup>[8]</sup>,如图 3 所示。

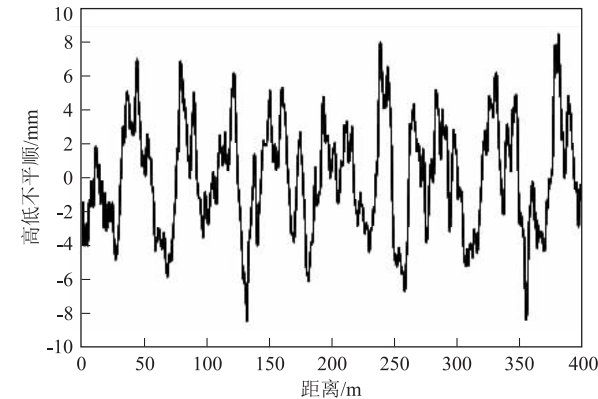


图3 轨道高低不平顺曲线图

需要说明的是,TB/T 3352-2014《高速铁路无砟轨道不平顺谱》给出的不平顺谱是平均谱(对应分位数 63.2%),同时给出了不平顺平均谱与百分位数谱的转换系数表。在实际使用时,可针对不同的线路状态条件选用不同的分位数谱,对于新建、养护条件好的线路可选用低分位数谱,对于使用时间较长的线路可采用高分位数谱。

2.3 仿真分析结果

为便于对计算结果进行统计分析,以运行速度  $v=5\text{ km/h}$  时的计算结果为静应力,动静应力之比即为动力系数,可求出不同运行速度时的动力系数  $\phi_k$ 。计

算结果显示,在同一运行速度下,不同扣件位置处路基面动应力值沿线路纵向不同,导致动力系数  $\phi_k$  沿线路纵向随机变化,经 Kolmogorov 检验,动力系数  $\phi_k$  可认为服从正态分布。

对于 70% 分位数不平顺谱,当列车运行速度  $v=400\text{ km/h}$  时,路基动力影响系数  $\phi_k$  服从正态分布,即  $\phi_k \sim N(1.353, 0.137^2)$ ,由此可得单侧置信上限分别为  $\bar{x}+s$ 、 $\bar{x}+2s$ 、 $\bar{x}+3s$  的动力影响系数的计算结果,如表 1 所示。 $\phi_k$  随列车运行速度变化关系如图 4 所示。

表1 无砟轨道路基  $\phi_k$  统计结果(70%分位数谱)表

列车速度 /(km/h)	单侧置信上限		
	$\bar{x}+s$	$\bar{x}+2s$	$\bar{x}+3s$
400	1.491	1.628	1.765

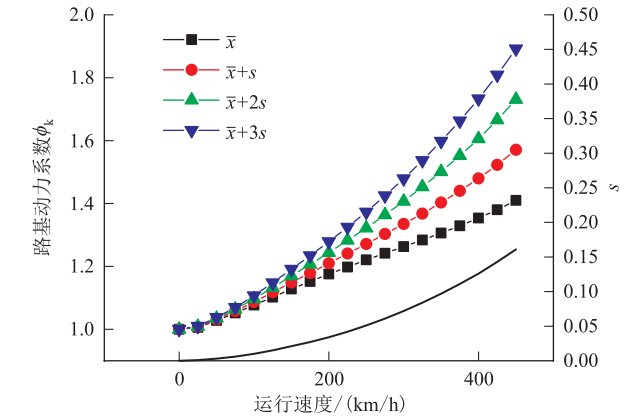


图4 动力系数  $\phi_k$  随列车速度变化关系图(70%分位数谱)

由图 4 可以看出,在 70% 分位数谱条件下,随着列车运行速度的提高,动力作用逐渐增大,列车运行速度由 0 逐渐提升至 450 km/h 时,路基动力系数  $\phi_k$  均值由 1 值逐渐增加到 1.410,标准差由 0 增加到 0.141,且增加幅度越来越大。动力系数随速度增加而增大,同时数据离散程度增大,动力作用更明显。

对于 99% 分位数不平顺谱,当列车运行速度  $v=400\text{ km/h}$  时,路基动力影响系数服从正态分布,即  $\phi_k \sim N(1.446, 0.233^2)$ ,由此可得单侧置信上限分别为  $\bar{x}+s$ 、 $\bar{x}+2s$ 、 $\bar{x}+3s$  的动力影响系数  $\phi_k$  计算结果,如表 2 所示。

表2 无砟轨道路基统计结果(99%分位数谱)表

列车速度 /(km/h)	单侧置信上限		
	$\bar{x}+s$	$\bar{x}+2s$	$\bar{x}+3s$
400	1.680	1.913	2.146

$\phi_k$  随列车运行速度变化关系如图 5 所示。

由图 5 可以看出,在 99% 分位数谱条件下,随着



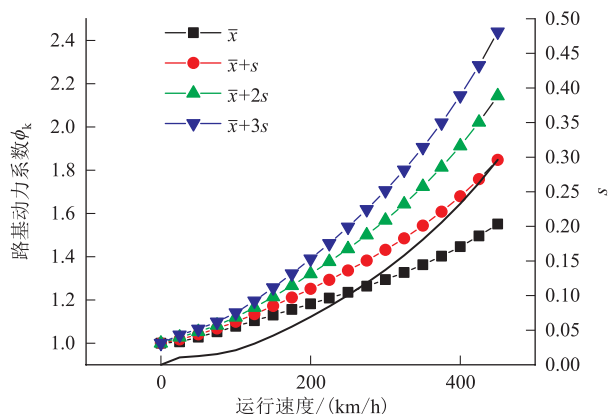


图5 动力系数随列车速度变化关系图(99%分位数谱)

列车运行速度的提高,动力作用逐渐增大,列车运行速度由0逐渐提升至450 km/h时,路基动力系数 $\phi_k$ 均值由1逐渐增加到1.551,标准差由0增加到0.296,且增加幅度越来越大。动力系数随速度增加而增大,同时数据离散程度增大。相比70%分位数谱条件,动力作用更大,路基动力系数 $\phi_k$ 的均值与标准差均更大。

综上分析可知,动力系数的取值受两方面随机性的影响。一方面是轨道不平顺谱所反映的不平顺状况的随机性,另一方面是线路纵向不同位置处动力系数分布存在随机性,设计时应当综合考虑这两方面随机性的影响。根据研究成果,可将动力系数分为极限动力系数和常遇动力系数。极限动力系数对应为出现频率低、持续时间短、绝对幅值大的动力荷载,对路基结构产生极限动力作用,适用短期性能的设计,如基床结构强度的验算。常遇动力系数对应出现频率高、持续时间相对较长、绝对幅值大于大部分动力荷载幅值的荷载,对路基结构的长期服役性能产生影响,适用于路基结构长期性能的设计,如变形和应变验算。

因此,综合考虑上述两方面的随机性,将99%分位数不平顺谱条件下单侧置信上限 $\bar{x}+3s$ 处的动力系数作为极限动力系数 $\phi_{k1}$ ,将70%分位数不平顺谱条件下单侧置信上限处的动力系数作为常遇动力系数 $\phi_{k2}$ 。400 km/h条件下,极限动力系数 $\phi_{k1}$ 取2.146,常遇动力系数 $\phi_{k2}$ 取1.491。极限动力系数的取值高于TB 10621-2014《高速铁路设计规范》350 km/h高速铁路的动力系数(取值为1.9)。

### 2.4 实测结果

中国铁道科学研究院集团有限公司组织在武广、京沪、京津、京沈及郑万等高速铁路工程修建过程中测试了线路列车不同时速下的路基面动应力幅值。测试

结果显示:随着列车速度的增加,动应力幅值并无明显变化。叶阳升等人依据实测数据和数值分析,得出无砟轨道实测路基面动应力幅值的平均值和最大值对应的动力系数分别为1.20~1.25和1.25~1.35,按照最不利工况考虑,设计时轴重动力系数取1.35<sup>[9]</sup>。

### 2.5 对比分析

动力仿真分析结果和实测结果的动力系数差异较大,实测结果小于动力仿真分析结果;实测动力系数与时速关系不明显,而仿真分析动力系数随时速增加显著增大。其可能的原因有:(1)现场实测是在新建线路上进行的,线路条件好,轨道较为平顺,因此动力作用相对较弱;(2)动力仿真分析基于现有的轮轨关系,随着时速增加,轮轨关系有可能发生变化;(3)受传感器布设位置、测试技术和测试条件的影响,实测数据和路基面实际动应力可能存在一定的差异。

虽然动力仿真分析结果和实测结果之间存在差异,但从设计角度出发,采用动力仿真分析结果更为安全,因此本文基于动力仿真分析结果进行基床结构适应性和设计参数等的研究。

## 3 400 km/h 条件下的基床结构型式及设计参数

根据动力仿真分析结果及基床结构分析方法,对传统无砟轨道基床结构、全断面沥青混凝土强化表层基床及底层改良土基床在400 km/h条件下的适应性和设计参数进行研究。

### 3.1 传统无砟轨道基床结构

根据TB 10001-2016《铁路路基设计标准规范》,高速铁路无砟轨道路基基床结构表层厚度0.4 m,底层厚度2.3 m,总厚度为2.7 m。经计算可知,传统无砟轨道基床结构各层填料设计指标达到表3的要求时,可满足速度400 km/h条件下的强度、变形及应变三准则。

表3 400 km/h 条件下传统无砟轨道基床结构设计指标表

基床厚度/m	结构层	结构层厚度/m	$K_{30}$ 建议值/(MPa/m)	压实系数	填料类型
2.7	基床表层	0.4	$\geq 190$	$\geq 0.97$	级配碎石
	基床底层	2.3	$\geq 150$	$\geq 0.95$	砾石类、砂类土中的A、B组填料

由表3可知,相较于350 km/h的基床结构设计指标,400 km/h条件下基床底层 $K_{30}$ 的要求有所提高。350 km/h条件下,砂类土及细砾土 $K_{30}$ 达到

130 MPa/m 即可,400 km/h 条件下其  $K_{30}$  需达到 150 MPa/m,才能同时满足基床结构强度、变形和应变的要求。

3.2 全断面沥青混凝土强化表层基床结构

该结构是在基床表层上部全断面设置碾压压实沥青混凝土,其主要功能包括(1)传递、扩散轨道荷载;(2)防止地表水入渗基床结构和暴雨时地表水对路基面的冲刷。其结构由 0.1 m 沥青混凝土+0.3 m 级配碎石层+2.3 m 基床底层组成。因沥青混凝土层与原有基床结构层的模量差异较大,而 Boussinesq 公式为均质半空间体计算式,因此分析时需采用当量换算的方法对各层模量进行转化。经计算可知,全断面沥青混凝土表层强化基床结构各层填料设计指标达到表 4 的要求,可满足 400 km/h 条件下的强度、变形及应变三准则。

由表 4 可知,与传统无砟轨道基床结构相比,路基面铺设的全断面沥青混凝土起到了荷载分散作用,在 400 km/h 条件下,全断面沥青混凝土强化表层基床结

构底层的地基系数不低于 145 MP/m 即可。

3.3 底层改良土基床结构

底层改良土基床结构的基床底层下部 1.2 m 范围(基床顶面以下 1.5~2.7 m 深度)采用改良土填料填筑,其结构由 0.4 m 级配碎石表层+1.1 m 上底层(A、B 组填料)+1.2 m 下底层(改良土)组成。经计算可知,400 km/h 条件下采用底层改良土基床结构时,基床各层填料设计指标应满足表 5 的要求。

表 4 速度 400 km/h 条件下全断面沥青混凝土强化表层基床结构设计指标表

基床厚度/m	结构层	结构层厚度/m	$K_{30}$ 建议值/(MPa/m)	压实系数	填料类型
2.7	沥青层	0.1	-	-	-
	级配碎石表层	0.3	$\geq 190$	$\geq 0.97$	级配碎石
	基床底层	2.3	$\geq 145$	$\geq 0.95$	砾石类、砂类土中的 A、B 组填料

表 5 速度 400 km/h 条件下底层改良土基床结构设计指标表

基床厚度/m	结构层	结构层厚度/m	$K_{30}$ 建议值/(MPa/m)	压实系数	7 d 饱和无侧限抗压强度/kPa	填料类型
2.7	基床表层	0.4	$\geq 190$	$\geq 0.97$	-	级配碎石
	基床上底层	1.1	$\geq 150$	$\geq 0.95$	-	砾石类、砂类土中的 A、B 组填料
	基床下底层	1.2	-	-	$\geq 350$	改良土

4 结论

本文结合车辆-轨道-路基耦合动力学仿真,基于强度、变形和应变准则,对 400 km/h 高速铁路基床结构的设计方法进行了探讨,并对传统无砟轨道基床结构、全断面沥青混凝土强化表层基床及底层改良土基床结构在 400 km/h 条件下的适应性和设计参数进行了研究。得出主要结论如下:

(1)400 km/h 高速铁路基床结构应同时满足强度、变形及应变控制准则。

(2)在轨道不平顺条件不变的条件下,列车速度对路基面动力系数影响明显,随着列车运行速度的提高,动力作用愈发强烈,动力系数显著增加,且增加幅度逐渐增大。

(3)综合考虑轨道不平顺谱的随机性和动力系数沿线路纵向分布的随机性,根据轨道不平顺下路基面动力响应的统计结果,在 400 km/h 条件下,用于强度验算的路基面极限动力系数可取 2.146,用于动变形和动应变计算的常遇动力系数可取 1.491。

(4)传统无砟轨道基床底层地基系数  $K_{30}$  要提高到 150 MPa/m 方能同时满足 400 km/h 条件下基床结构强度、变形和应变的要求。

(5)路基面铺设的全断面沥青混凝土起到了分散荷载的作用,在 400 km/h 条件下全断面沥青混凝土强化表层基床结构底层的地基系数  $K_{30}$  不低于 145 MPa/m 时,即可满足强度、变形和应变的要求。

(6)基床上底层采用 1.1 m 厚 A、B 组填料,地基系数  $K_{30} \geq 150$  MPa/m,基床下底层采用 1.2 m 厚改良土,7 d 饱和和无侧限抗压强度  $\geq 350$  kPa 时,底层改良土基床结构可满足强度、变形和应变的要求。

参考文献:

[1] 周镜,叶阳升. 基床结构设计的探讨[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1): 1-6.  
ZHOU Jing, YE Yangsheng. Design of Roadbed Structure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004, 1(1): 1-6.  
[2] 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 Qianli, HAN Zili, LU Binlin. Structural Analysis and

- Design Method for Subgrade Bed of High-speed Railway[J]. China Railway Science, 2005, 26(6):53-57.
- [3] 胡一峰,李怒放. 高速铁路无砟轨道路基设计原理[M]. 北京:中国铁道出版社,2010.
- HU Yifeng, LI Nufang. Theory of Ballastless Track-Subgrade for High Speed Railway [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [4] 周波,张良,付正道. 高速铁路无砟轨道软岩路堑基床换填厚度研究[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(3): 73-77.
- ZHOU Bo, ZHANG Liang, FU Zhengdao. Research on Replacement Thickness of Soft Rock Cutting Subgrade Bed of High-speed Railway with Ballastless Track[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(3): 73-77.
- [5] VUCETIC M. Cyclic Threshold Shear Strains in Soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(12): 2208-2228.
- [6] 中铁二院工程集团有限责任公司. 现有高速铁路路基结构技术标准在时速 400 km 条件下的适应性研究[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司,2020.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co.,Ltd. Research on the Adaptability of Existing Technical Standards for High-speed Railway Subgrade under the Condition of 400 km/h[R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co.,Ltd.,2020.
- [7] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学(第四版)[M]. 北京:科学出版社,2015.
- ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupled Dynamics (Fourth Edition) [M]. Beijing:China Science Publishing,2015.
- [8] 罗强,张瑞国,谢宏伟,等. 400 km·h<sup>-1</sup> 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 Qiang, ZHANG Ruiguo, XIE Hongwei, et al. Structural Analysis and Key Parameter of Ballastless Track Subgrade for 400 km·h<sup>-1</sup> High-speed Railway [J]. China Railway Science, 2020, 41(2): 34-44.
- [9] 叶阳升,蔡德钧,魏少伟,等. 高速铁路无砟轨道路基动应力分布特征及解析算法[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(6): 1-9.
- YE Yangsheng, CAI Degou, WEI Shaowei, et al. Distribution Characteristics and Analytical Method of Dynamic Stress on Subgrade of Ballastless Track for High-speed Railway [J]. China Railway Science, 2020, 41(6): 1-9.

(上接第 55 页)

114

- [5] 练松良,黄俊飞. 客货共运线路轨道不平顺不利波长的分析研究[J]. 铁道学报, 2004, 26(2): 111-115.
- LIAN Songliang, HUANG Junfei. Study of the Detrimental Wavelengths of Track Irregularities for Railways with Passenger and Freight Traffic [J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(2): 111-115.
- [6] 高建敏,翟婉明,王开云. 高速行车条件下轨道几何不平顺敏感波长研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 83-88.
- GAO Jianmin, ZHAI Wanming, WANG Kaiyun. Study on Sensitive Wavelengths of Track Irregularities in High-speed Operation [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(7): 83-88.
- [7] 杨飞,黎国清,刘金朝. 时速 300~350 km 高速铁路轨道不平顺管理波长研究[J]. 铁道建筑, 2013, 53(1): 86-90.
- YANG Fei, LI Guoqing, LIU Jinzhao. Study on the Irregularity Management Wavelength of High-speed Railway Track with the Speed of 300-350km [J]. Railway Engineering, 2013, 53(1): 86-90.
- [8] 徐金辉,王平,汪力,等. 轨道高低不平顺敏感波长的分布特征及其影响因素的研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(7): 72-78.
- XU Jinhui, WANG Ping, WANG Li, et al. Research on the Distribution Characteristics and Influence Factors of Sensitive Wavelength of Track Vertical Profile Irregularity [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(7): 72-78.
- [9] 袁玄成,王开云,閻鑫,等. 轨道不平顺波长和幅值对高速动车组动力学性能的影响分析[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(2): 1-9.
- YUAN Xuancheng, WANG Kaiyun, GE Xin, et al. Influences of Track Irregularity Wavelength and Amplitude on Dynamic Performance of High-speed EMU [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36(2): 1-9.
- [10] 芦睿泉,练松良. 轨道复合不平顺对提速列车运行影响的研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2005, 2(5): 17-22.
- LU Ruiquan, LIAN Songliang. Research of the Effect of Track Complex Irregularities on the Vehicle Dynamic Response [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2005, 2(5): 17-22.
- [11] Ling L, Zhang Q, Xiao X, et al. Integration of Car-body Flexibility into Train-track Coupling System Dynamics Analysis [J]. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 2018, 56(4-6):485-505.