

文章编号: 1674—8247(2019)03—0073—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.03.016

高速铁路无砟轨道软岩路堑基床换填厚度研究

周波¹ 张良² 付正道²

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

摘要:针对高速铁路无砟轨道在软岩地区基床承载能力不足的问题,本文通过调研无砟轨道路基荷载的分布模式,确定了无砟轨道路基面动荷载分析简化模型。提出以路基基床的结构动强度、长期稳定性及循环变形为控制条件,探讨高速铁路无砟轨道软岩路堑基床长期动力稳定状态下的合理换填厚度。通过具体的计算示例说明了该方法的应用步骤,并研究了不同的无砟轨道结构形式对换填厚度的影响,最终给出了最小换填厚度建议值表格以便工程查用。

关键词:高速铁路; 无砟轨道; 软岩路堑; 基床; 换填厚度

中图分类号: U213.1⁺2 文献标志码: A

Research on Replacement Thickness of Soft Rock Cutting Subgrade Bed of High-speed Railway with Ballastless Track

ZHOU Bo¹ ZHANG Liang² FU Zhengdao²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In view of the deficiency in the bearing capacity of subgrade bed of high-speed railway with ballastless track in soft rock area, a simplified model for dynamic load analysis of ballastless track subgrade surface is established by investigating the distribution mode of ballastless track subgrade load. Taking the dynamic structure strength, long-term stability and cyclic deformation of subgrade bed as control conditions, the reasonable replacement thickness of soft rock cutting subgrade bed of high-speed railway with ballastless track under long-term dynamic stability is discussed. The application steps of this method are illustrated by calculation examples, and the influence of different ballastless track structure forms on replacement thickness is studied. Finally, a recommended minimum replacement thickness table is given for engineering reference.

Key words: high-speed railway; ballastless track; soft rock cutting; subgrade bed; replacement thickness

1 研究背景

近年来,随着我国高速铁路的飞速发展,在建或拟建的高速铁路线路不可避免地要穿越软岩地区。为保

证高速铁路线路的平顺性、稳定性和耐久性,需对软岩地区的高速铁路路基进行换填处理。路基基床作为高速铁路线下工程的重要组成部分,必须满足结构强度、支承刚度、长期稳定性等方面的功能要求,经过合理换

收稿日期: 2019-01-12

作者简介: 周波(1978-),男,高级工程师。

引文格式: 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.

填的路基基床一般能满足高速铁路线路的安全运营。而在实际工程中,换填厚度的确定一般基于经验取值,缺少理论依据,相关研究也较少。为此,近年来铁路部门开展了系列研究。

罗强等^[1]等人以高速列车荷载引起的基床累积变形应处于弱时间效应的缓慢稳定状态为控制目标,分析了软质岩风化程度和抗软化能力对有砟轨道路堑基床换填厚度的影响规律,探讨了高速铁路软质岩路堑基床结构合理的换填厚度;刘华^[2]等人依托哈大客运专线具体工程,通过数值模拟,研究了在不同的路基高度、几何断面型式、填料选择和施工、竣工季节条件下,季冻区高速铁路换填路基的冻结特征,并对换填路基的整体热稳定性进行了评价;田海波^[3]等人以膨胀土地基的强度、刚度及变形要求为控制条件,分别采用膨胀力平衡原理和控制轨道变形两种方法,对比分析了不同换填厚度和膨胀力条件下路基膨胀变形,并结合新建合宁铁路路堑试验段进行原位动载试验,评价了换填厚度下路基强度、弹性变形等动力学特性;刘晓红^[4-5]等人基于室内和现场动力试验的测试成果,分别采用临界动应力法、动剪应变法评价了红黏土路堑基床的长期动力稳定性,给出了同时满足动强度和动变形条件的基床最小换填厚度。

换填厚度关系到换填路基在强度、变形、长期稳定性等方面的表现,且路基结构属于隐蔽工程,一旦出现问题,维修困难。因此,探讨高速铁路无砟轨道软岩路堑基床长期动力稳定状态下的合理换填厚度及其确定方法,对指导未来的工程实践有着重要的意义。

2 基床的列车荷载分布模式

刘钢等^[6]人通过分析京沪高速铁路(轨道结构型式为CRTS II型板式无砟轨道)宿州试验段实测路基面动力响应,发现一次完整的加、卸载过程中,无砟轨道路基承受的动应力由同一个转向架上的两个轴载共同作用,与有砟轨道路基动应力时程曲线中峰值和列车轴数相对应、一次加卸载过程由单个轴载作用的特征明显不同。

对于无砟轨道,现场实测和数值模拟结果均表明:动应力在线路中心、钢轨下、轨道板以及支承层(或底座)边缘处正下方的路基面处并未产生明显变化。如遂渝无砟轨道综合试验段实测线路中心和支承层边缘、钢轨正下方路基面动应力比值分别为0.85和0.93;武广客运专线实测线路中心和轨道板边缘、钢轨正下方路基面动应力比值分别为1.11和0.91,其

路基面动应力横向分布,如图1所示。可认为无砟轨道路基面动应力沿横向基本呈均匀分布,分布范围与支承层(或底座)的宽度一致。

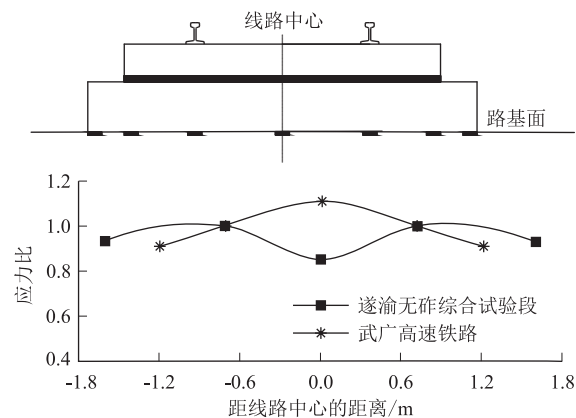


图1 无砟轨道路基面动应力横向分布图

考虑到无砟轨道列车在路基面上的荷载施加以转向架为单元,刘钢^[6]等人结合现场实测结果,指出无砟轨道路基面的纵向分布可看成由两个荷载叠加而来,并提出了无砟轨道路基面荷载分布模式,即路基面承受的车辆荷载应力可简化为纵向梯形、横向均匀的分布模式,如图2所示。

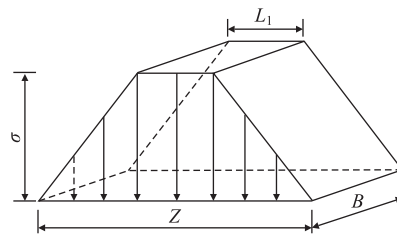


图2 无砟轨道路基面荷载分布模式

对于无砟轨道,双轴载通过轨道结构传递至路基面的应力应满足力学平衡条件,结合图2的无砟轨道路基面动应力的分布假设,可建立平衡关系:

$$\sigma = \frac{4P}{(L_1 + Z)B_1} \quad (1)$$

式中: σ ——路基面承受的车辆荷载应力;

P ——列车单轴载;

L_1 ——转向架固定轴距;

Z ——路基面承受的动应力纵向影响距离;

B_1 ——支承层或底座宽度。

实际上,路基面所承受的动应力大小还受如行车速度、轨道平顺程度、线路状态等因素的影响,国内外通常以拟静力法等分析动力学问题,无砟轨道路基面承受的动应力:

$$\sigma_d = \frac{4\phi_\omega \times P}{(L_1 + Z)B_1}$$

(2)

式中: σ_d ——无砟轨道路基面承受的动应力;
 ϕ_ω ——无砟轨道路基动力影响系数。

考虑因轨道不平顺、车辆性能等因素引起的轮轨间动力冲击作用,引入动力影响系数 ϕ 。定义常遇状态动力影响系数 $\phi_1 = 1.3$,极限荷载条件动力影响系数 $\phi_2 = 1.9$ 。针对 CRTS I 型板式、CRTS I 型双块式、CRTS II 型板式、CRTS III 型板式 4 种无砟轨道结构型式,由式(2)计算得到的路基面动应力结果,如表 1 所示。

表 1 不同无砟轨道结构形式路基面动荷载

| 动应力类型 | 路基面动应力/kPa | | | |
|-------|------------|-------------|-------------|--------------|
| | CRTS I 型板式 | CRTS I 型双块式 | CRTS II 型板式 | CRTS III 型板式 |
| 常遇动应力 | 28.89 | 25.49 | 26.66 | 27.96 |
| 极限动应力 | 42.22 | 37.25 | 38.97 | 40.86 |

在基床结构设计计算中,可参考表 1 所列值作为基床结构的路基面动应力设计值。其中,极限动应力用于强度检算,常遇动应力用于循环变形及长期稳定性检算。

3 基床换填控制条件

基床结构设计包括基床结构型式、基床结构层厚度、填料类型和基床压实标准等内容。基床结构的设计应控制基床各结构层在相应荷载状态下最不利位置处满足设计控制条件。已有的基床结构设计方法包括强度控制和支承刚度控制(弹性变形控制)等内容,主要以控制基床表层下填土的强度及基床结构弹性变形为目的。基床在承受列车循环荷载作用下,不仅要满足高速铁路建成后安全运营的强度要求,还需要满足长期稳定性及累计变形要求,这就需对已有基床结构设计方法中的检算内容给予补充。

路基基床换填厚度应能确保换填深度以下的路基足以抵抗列车荷载作用传递至换填深度处的动应力,且应保证基床的长期服役性能。同时,换填厚度应与基床结构设计相适应,换填厚度必须能够使基床结构满足其安全性和适用性。

(1) 强度控制条件

换填厚度的强度控制条件应保证在极限荷载条件下,换填厚度以下土层不会发生强度破坏,即必须满足:

$$\sigma_{dj} \leq \frac{[\sigma_d]}{F_s}$$

(3)

式中: σ_{dj} ——基床各土层承受的极限动应力;
 $[\sigma_d]$ ——填料动允许承载力;
 F_s ——安全系数,对于无砟轨道取 2.0。

(2) 长期稳定性控制条件

基床结构长期稳定验算应满足路基各结构层承受的常遇动应力小于其填土的长期稳定荷载阈值条件,即:

$$\sigma_{dc} \leq \sigma_{tl}$$

(4)

式中: σ_{dc} ——各结构层承受的常遇动应力;
 σ_{tl} ——稳定状态下的荷载容许值。

(3) 循环变形控制条件

Vucetic^[7]提出了区分填料是否产生累计变形效应的临界循环体积应变阈值,对于高速铁路基床结构,相关研究资料表明其循环应变水平可按 130 $\mu\epsilon$ 控制^[8],基床结构循环变形 S 应小于循环变形限值 $[S]$,即:

$$S \leq [S]$$

(5)

式(3)~式(5)中的计算应力与基床厚度有关,换填厚度的设计流程,如图 3 所示。

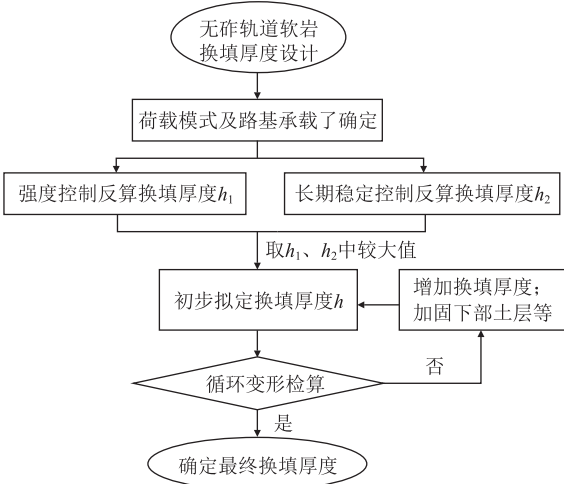


图 3 换填厚度设计流程图

4 计算示例

动车组设计轴重 20 t, 列车最高运行速度 300 km/h,路基面纵向梯形、横向均匀应力分布模式。采用 CHN60 钢轨,重 60 kg/m,高 176 mm,轨头宽度 73 mm,钢轨底宽 150 mm。采用带有铁垫板的弹性不分离的扣件系统 CRTS III 型无砟轨道结构,轨道板宽 2 500 mm,厚 210 mm,自密实混凝土层厚 100 mm。底座 C40 钢筋混凝土结构,宽度 3 100 mm,直线地段厚

度 200 m。钢轨支点间距 600 mm。路堑式路基断面,基床厚度 2.7 m,表层 0.4 m,底层 2.3 m。表层 $k_{30} = 190$ MPa/m,循环变形模量 $E_y = 247$ MPa,底层 $k_{30} = 150$ MPa/m,变形模量 $E_y = 195$ MPa。换填厚度以下地基承载力标准值 $f_{ck} = 186$ kPa,变形模量 $E_y = 89$ MPa。

假设基床结构为均质土层,采用局部荷载作用在弹性半无限体上的应力 Boussinesq 解计算列车静压应力 σ_0 ,计算深度为 6 m,不同埋深处的应力分布,如图 4 所示。

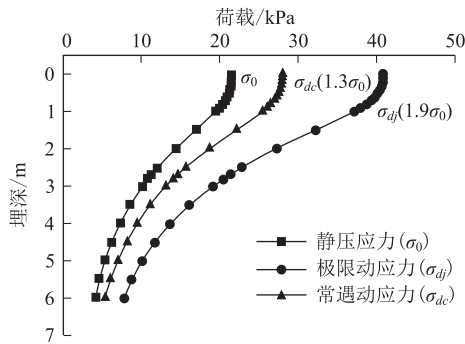


图 4 不同埋深处的应力分布

根据大秦铁路路基现场地基系数 K_{30} 数据分析,得出基于 K_{30} 表达的静允许承载力 $[\sigma_0] = 180$ kPa,其中动允许强度 $[\sigma_d]$ 约为 $[\sigma_0]$ 的 0.45 倍,动允许强度 $[\sigma_d] = 0.45f_k = 81$ kPa。由图 3 中不同埋深处的极限动应力曲线可知,基床各土层承受的极限动应力均远小于动允许强度,满足强度控制条件,可得 $h_1 = 0$ 。

Vucetic^[7]通过研究土体剪切应变循环的阈值指出,土体的临界体积剪应变集中分布在一定范围内。由于长期稳定性验算是对基床各结构层逐一进行验算,且在循环变形验算中基床结构整体按临界体积剪应变均值 $130 \mu\varepsilon$ 控制,因此,在无砟轨道中长期稳定性验算条件可适当放宽,其对应的荷载水平约为 0.09 倍静允许承载力,长期允许强度 $[\sigma_{ll}] = 0.09f_k = 16.2$ kPa。由图 3 中不同埋深处的常遇动应力曲线可知,埋深 2.4 m 以上的基床土层不满足长期稳定性控制条件,可得 $h_2 = 2.4$ m。取 h_1 与 h_2 的较大值,即 $h = 2.4$ m。

对于基床表层、基床底层所组成的多层弹性地基,其上作用矩形均布荷载时,路基面产生的下沉量可用地基沉降计算方法中的分层总和法。把基床结构分成许多薄层(本算例中设每薄层厚度为 0.3 m),若存在不同性质的土层,则单独成层。各层的平均附加压力计算,如表 2 所示。

采用分层总和法计算基床结构总变形 $S = 0.329$ mm。若变形限值为 0.351 mm(按循环应变 $130 \mu\varepsilon$ 计算),则满足循环变形限值要求,换填厚度取 $h = 2.4$ m。

表 2 分层动应力及平均动应力计算

| 层号 | 深度 z/m | 常遇动应力/kPa | 平均动应力/kPa |
|----|--------|-----------|-----------|
| 0 | 0.0 | 27.960 | — |
| 1 | 0.4 | 27.730 | 27.845 |
| 2 | 0.7 | 26.895 | 27.313 |
| 3 | 1.0 | 25.414 | 26.155 |
| 4 | 1.3 | 23.503 | 24.459 |
| 5 | 1.6 | 21.421 | 22.462 |
| 6 | 1.9 | 19.357 | 20.389 |
| 7 | 2.2 | 17.418 | 18.387 |
| 8 | 2.4 | 16.220 | 16.819 |
| 9 | 2.7 | 14.578 | 15.399 |

荷载横向分布计算宽度与无砟轨道结构型式有关,不同的无砟轨道结构型式对应的路基面荷载强度不同,进而对换填厚度产生影响。同时,换填厚度也与地基承载力密切相关。因此,考虑不同的无砟轨道结构型式、地基承载力,给出了对应的换填厚度,如表 3 所示。

表 3 不同轨道结构形式、地基承载力下的换填厚度

| 地基承载力/kPa | CRTS I 型板式 | CRTS I 型双块式 | CRTS II 型板式 | CRTS III 型板式 |
|-----------|------------|-------------|-------------|--------------|
| 180 | 2.5 | 2.1 | 2.3 | 2.4 |
| 200 | 2.2 | 1.8 | 2.0 | 2.1 |
| 220 | 1.9 | 1.6 | 1.7 | 1.8 |
| 240 | 1.7 | 1.3 | 1.4 | 1.6 |
| 260 | 1.4 | 1.0 | 1.1 | 1.3 |
| 280 | 1.2 | 0.4 | 0.8 | 1.0 |
| 300 | 0.9 | 0.0 | 0.0 | 0.7 |
| 320 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

从表 3 可以看出,不同的轨道结构型式所对应的路基面动应力大小的不同,换填厚度也有所差异。在地基承载力相同的条件下,CRTS I 型板式无砟轨道结构所需的换填厚度最大。在实际工程设计中应当按照最不利的情况进行控制。

在持续高强度降雨情况下,无砟轨道结构可能发生雨水下渗的情况,致使软质岩路堑基床强度下降,在换填厚度的设计当中应予以考虑。岩石的软化性通常用软化系数 η 来表示,岩石软化系数是指单轴饱和状态下的岩石抗压强度与单轴干燥状态下的岩石抗压强度之比,是工程岩体以及岩块质量评价的重要指标

之一。考虑岩石浸水软化后的特性,利用岩石软化系数对地基承载力特征值进行修正,即 $f_a = \eta \times f_k$ 。

考虑到无砟轨道的防排水设计与软质岩浸水软化的特点,采用软化系数修正地基基本承载力。所得高速铁路无砟轨道软岩路堑换填厚度建议值,如表4所示。

表4 高速铁路无砟轨道换填厚度建议取值

| 软化指数 | 软质岩、强风化的硬质岩 | | | | | | |
|---------------|------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | f_k/kPa | [180 ~ 220) | [220, 250) | [250,300) | [300,330) | ≥ 330 | |
| $\eta = 1.00$ | h/m | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 0.4 | |
| | f_k/kPa | [180, 220) | [220, 270) | [270, 300) | [300,330) | ≥ 330 | |
| $\eta = 0.95$ | h/m | 2.7 | 2.1 | 1.5 | 1.0 | 0.7 | |
| | f_k/kPa | [180, 220) | [220, 240) | [240, 290) | [290, 310) | [310, 330) | ≥ 330 |
| $\eta = 0.90$ | h/m | 2.8 | 2.3 | 2.0 | 1.5 | 1.2 | 1.0 |

注:表中所列换填厚度包含表层

5 结束语

本文通过调研无砟轨道路基荷载的分布模式,确定了无砟轨道路基面动荷载分析简化模型。在此基础上,提出了路基基床控制条件,探讨了高速铁路无砟轨道软岩路堑基床长期动力稳定状态下的合理换填厚度。

(1)针对高速铁路无砟轨道基床的长期服役性能要求,提出了以路基基床的结构动强度、长期稳定性及循环变形为控制条件,确保换填厚度能够满足基床结构对安全性和适用性的要求。

(2)通过具体的计算示例说明了该方法的应用步骤,研究了不同的无砟轨道结构形式对换填厚度的影响。

(3)考虑降雨条件下软质岩浸水软化的特性,给出了不同轨道结构形式、地基承载力条件下的最小换填厚度建议值,以便工程查用。

参考文献:

[1] 罗强,谢宏伟,肖朝乾,等. 高铁有砟轨道软质岩路堑基床换填厚度分析[J]. 铁道工程学报,2018,35(5):7-12.

LUO Qiang, XIE Hongwei, XIAO Chaoqian, et al. Analysis of Replacement Thickness of Soft Rock Cutting Subgrade of High-speed Railway with Ballast Track [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(5): 7-12.

[2] 刘华,牛富俊,牛永红,等. 季节性冻土区高速铁路换填路基冻结特征的有限元分析[J]. 工程地质学报,2013,21(4):516-524.

LIU Hua, NIU Fujun, NIU Yonghong, et al. Finite Element Analysis on Frozen Characteristic of Roadbed with Exchange Filling Material in High-speed Railway in Seasonal Frozen Ground [J]. Journal of

Engineering Geology, 2013, 21(4): 516-524.

[3] 田海波,王炳龙,许恺. 膨胀土区域路堑换填厚度分析[J]. 交通运输工程学报,2006,6(2):22-25.

TIAN Haibo, WANG Binglong, XU Kai. Replacement Thickness Analysis of Cutting In Expansive Soil Area[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(2): 22-25.

[4] 刘晓红,杨果林,方薇. 红黏土临界动应力与高铁无砟轨道路堑基床换填厚度[J]. 岩土工程学报,2011,33(3):348-353.

LIU Xiaohong, YANG Guolin, FANG Wei. Critical Dynamic Stress of Red Clay and Replacement Thickness of Ballastless Track Cutting Bed of High-speed Railways [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 348-353.

[5] 刘晓红,杨果林,方薇. 高铁无砟轨道路堑基床换填厚度与动力稳定[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3534-3538.

LIU Xiaohong, YANG Guolin, FANG Wei. Replacement Thickness And Dynamic Stability of Cutting Bed Under Ballastless Track of High-speed Railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S2): 3534-3538.

[6] 刘钢,罗强,张良,等. 列车荷载作用下无砟轨道路基动应力特性分析[J]. 铁道学报,2013,35(9):86-93.

LIU Gang, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Analysis on the Dynamic Stress Characteristic of the Unballsted Track Subgrade under Train Loading [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(9): 86-93.

[7] VUCETIC M. Cyclic Threshold Shear Strains In Soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(12): 2208-2228.

[8] 谢宏伟. 高速铁路路堑基床合理换填厚度分析[D]. 成都:西南交通大学,2018.

XIE Hongwei. Analysis On Reasonable Replacement Thickness of High Speed Railway Cutting Subgrade [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

(编辑:刘会娟 张红英)