

文章编号: 1674—8247(2021)02—0033—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.006

无砟轨道底座板离缝对路桥过渡段动力性能影响分析

罗强^{1,3} 谢宏伟^{1,3} 李安洪² 张良^{1,3} 王腾飞^{1,3}

(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;
3. 高速铁路线路工程教育部重点实验室, 成都 610031)

摘要:桥台背路基面工后沉落导致无砟轨道底座板出现局部离缝甚至翻浆,是既有高速铁路无砟轨道过渡段典型病害现象。针对路桥过渡段线路结构及不平顺特点,构建了支承刚度和差异变形沿纵向变化的动力学分析模型;运用车辆-轨道-路基耦合动力学理论,分析了路基与桥台交界处工后差异沉降引起的无砟轨道底座板离缝,对车体垂向加速度、轮载力及减载率、钢轨与底座板动位移及路基面动应力等关键指标的影响,讨论了在桥台背设置钢筋混凝土过渡搭板的改善效应。研究表明:(1)400 km/h设计速度条件下,过渡段动力性能指标随桥台背路基面工后沉落呈非线性劣化趋势,依据高速铁路无砟轨道与路基结构的动态验收技术标准,路桥交界处差异沉降应控制在2~3 mm以内;(2)在过渡段的台背铺设刚性搭板,可有效改善无砟轨道板底支承条件,显著降低动力响应指标幅值,克服现行设计规范容许5 mm差异沉降的不利影响。

关键词:路桥过渡段; 差异沉降; 底座板-路基离缝; 动力学性能评价; 控制限值

中图分类号:U213.1 **文献标志码:**A

33

Analysis on the Impact of Ballastless Track Base Slab Disjoint on the Dynamic Performance of Subgrade-bridge Transition Section

LUO Qiang^{1,3} XIE Hongwei^{1,3} LI Anhong² ZHANG Liang^{1,3} WANG Tengfei^{1,3}

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

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

3. Key Laboratory of High-speed Railway Engineering, Ministry of Education, Chengdu 610031, China)

Abstract: The post-construction settlement of subgrade surface of abutment back causes local disjoint and even frost boiling of ballastless track base slab, which is a typical type of defect in the transition section of existing high-speed railway ballastless track. According to the track structure and irregularity characteristics of the subgrade-bridge transition section, a dynamic analysis model for the change of bearing stiffness and differential deformation along the longitudinal direction is constructed; based on the vehicle-track-subgrade coupling dynamic theory, the impact of the base slab disjoint of the ballastless track slab caused by the post-construction differential settlement at the junction of subgrade and abutment on the key indicators such as vertical acceleration of carbody, wheel load and reduction rate of wheel load, dynamic displacement between rail and base slab, and dynamic stress on subgrade surface is analyzed, and the improvement effect of setting reinforced concrete transition slab at the abutment back is discussed. The research shows that: (1) Under the design speed of 400 km/h, the dynamic performance indicators of the transition section presents a nonlinear deterioration trend with the post-construction settlement of the subgrade surface of the abutment back, and the differential settlement at the junction of subgrade and bridge shall be controlled within 2~3 mm according to the

收稿日期:2021-03-01

作者简介:罗强(1963-),男,教授,博士。

基金项目:四川省科技计划项目(2021YJ0001),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:罗强,谢宏伟,李安洪,等. 无砟轨道底座板离缝对路桥过渡段动力性能影响分析[J]. 高速铁路技术,2021,12(2):33-38.

LUO Qiang, XIE Hongwei, LI Anhong, et al. Analysis on the Impact of Ballastless Track Base Slab Disjoint on the Dynamic Performance of Subgrade-bridge Transition Section[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 33-38.

dynamic acceptance technical standard of high-speed railway ballastless track and subgrade structure; (2) Laying a rigid transition slab at the abutment back of the transition section can effectively improve the supporting condition at the base slab of the ballastless track, significantly reduce the amplitude of dynamic response indicators, and overcome the adverse effect of 5mm differential settlement allowed in the current design code.

Key words: subgrade-bridge transition section; differential settlement; base slab-subgrade disjoint; dynamic performance evaluation; control limit

无砟轨道整体性好,维修工作量少,具有良好稳定性与耐久性,能够适应高速度、高密度铁路运输的要求,在国内外高速铁路建设中广泛应用^[1]。无砟轨道对沉降变形的适应性差且几何形位状态调整能力有限,控制沉降变形是路基上铺设无砟轨道的核心问题之一。路桥过渡段刚度差异巨大,工后差异性沉降不可避免,紧邻桥梁的路基过渡段,填筑施工时要保证桥台的稳定与安全,作业空间小,大型压实机具运用困难,局部可能存在压实密度低、支承刚度小的缺陷,在列车动荷载反复作用下,路基易产生累积沉降,导致底座板部分脱空,出现离缝甚至翻浆冒泥^[2],轨道支承条件急剧劣化,加剧车辆、轨道、路基间相互作用,影响高速列车的安全、舒适运行。

过渡段处路基工后沉降映射至轨面产生几何不平顺,致使列车高速通过路基过渡段时动力学响应显著增大^[3],为保证路基与相邻结构间具有良好过渡性能,国内外学者对列车移动荷载下的过渡段动力响应进行了大量研究。罗强^[4]运用车辆-轨道-路基耦合动力学理论,全面分析了有砟轨道条件下路桥过渡段轨面弯折变形、轨道基础刚度变化、行车速度、车辆驶向等因素对高速铁路路桥过渡段动力学特性的影响规律,并根据路桥过渡段动力学特性分析结果,结合已有的工程实践经验和研究成果,提出了针对不同速度等级的路桥过渡段结构设计与技术标准;蔡成标^[5]针对无砟轨道桥隧间短路基频繁过渡问题,分别建立了桥-路-桥、桥-路/隧、隧-路-隧3种桥隧间短路基动力学分析模型,开展了两桥(隧)之间短路基动力学仿真分析,讨论了桥隧间短路基设计参数合理取值;Wang和Markin^[6]考虑过渡段刚度差异、不均匀沉降影响,并以非线性接触单元反映不均匀沉降影响引起的有砟轨道轨枕空吊,建立了三维显式动力有限元模型,分析了刚度与不均匀沉降对路桥过渡段动力响应的影响,并对有砟道床劣化机制进行了探讨;陈虎等^[7]通过现场实测,分析了板式无砟轨道路桥过渡段振动响应沿线路纵垂向的空间变化特征及与行车速度的关系。已有研究多关注有砟轨道、无砟轨道在支承条件良好或存在轨枕空吊的情况下,刚度差异及不均匀沉降引起的轨面变形而导致的过渡段动力响应的影响。而实际工程中发现无砟轨道底座板与路基接触条

件劣化往往对系统动力学性能影响较大^[8],目前对底座板离缝对无砟轨道路基动力特性的影响讨论较少。

随着列车运行速度进一步提高,路桥过渡段的动力学问题将更加显著,尤其在无砟轨道底座板离缝情况下将更趋严重,引起的系统动力学问题愈加突出。为此,在列车运行速度达400 km/h时,针对桥台与路基交界处差异沉降引起的无砟轨道底座与路基间离缝导致的过渡段服役性能劣化问题,建立车辆-轨道-路基垂向耦合动力模型,桥梁与路基过渡段考虑刚度差异,过渡段不均匀沉降引起的轨面高低不平顺按1/1 000平折角设置,通过仿真分析获得系统动力学响应,分析离缝参数0 mm/0 m~5 mm/5 m条件下路桥过渡段系统动力学指标变化规律,基于动力性能评估标准,提出导致底座板-路基离缝的路桥差异沉降控制建议值,讨论设置刚性搭板对路桥交界处过渡性能的改善效果。

1 过渡段模型及计算方案

路桥过渡段的刚度差异、不均匀沉降、差异沉降均会产生不平顺问题,列车高速通过过渡段时动力响应显著增大。其中,路基与相邻结构物的差异沉降将导致过渡段局部范围的无砟轨道底座板与路基面间出现离缝而脱空,极大地削弱路基对轨道结构的支承作用,引起轨下刚度突降,劣化过渡段动力学性能。

1.1 过渡段动力学模型及参数

根据车辆-轨道耦合动力学原理^[3],考虑过渡段路基与桥台刚度差异、不均匀沉降引起的轨面平折角不平顺、差异沉降导致的底座与路基面离缝,建立车辆-轨道-路桥过渡段垂向耦合动力学分析模型(如图1所示),采用自桥梁朝路基方向走行的单节车辆开展动力仿真分析。

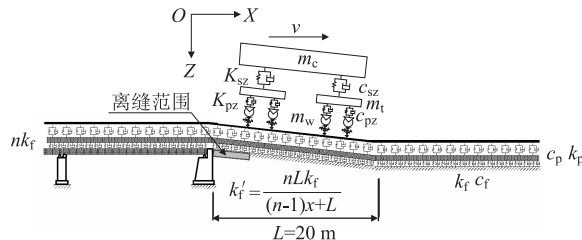


图1 过渡段动力学耦合分析模型图

车辆系统简化为多刚体弹簧阻尼体系,由车体、前后转向架及两组轮对构成,一系、二系悬挂均采用线性弹簧-线性阻尼元件,车体、前后转向架的沉浮与点头运动共 6 个自由度,4 个轮对仅考虑垂向运动,总计 10 个自由度。轮轨之间的法向接触力由 Herz 非线性接触理论确定。动力学仿真计算以 CRH380A 型车中较重的动车 M2 为计算车辆,并考虑车辆满载 8 t 的情况,具体车辆参数如表 1 所示。

表 1 CRH380A-M2 车辆参数表

参数	数值
车辆长度 L_c/m	25
车体质量 M_c/kg	34 934(+8 000)
车体点头惯量 $J_c/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$1.711\ 8 \times 10^6$
车辆前后转向架中心距 L_e/m	17.5
转向架质量 M_t/kg	3 300
转向架点头惯量 $J_t/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1 807
转向架固定轴距 L_t/m	2.5
轮对质量 M_w/kg	1 780
每轴箱一系悬挂垂向刚度 $K_{pz}/(\text{N}/\text{m})$	1.176×10^6
每轴箱一系悬挂垂向阻尼 $C_{pz}/(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m})$	1.0×10^4
每簧二系悬挂垂向刚度 $K_{sz}/(\text{N}/\text{m})$	0.24×10^6
每簧二系悬挂垂向阻尼 $C_{sz}/(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m})$	2.0×10^4

线路系统模型选用 CRTSIII 型板式无砟轨道,钢轨由等间距分布的扣件支承于无砟轨道板之上,概化为弹性点离散支承的 Bernoulli-Euler 梁,考虑垂向运动自由度;将轨道板与底座板视为一个整体并抽象为黏弹性基础(路基)上的叠合梁^[9],简化为在等间隔分布的线性弹簧-线性阻尼支承上的无限长的单向自由板,取路基离散支承间隔与扣件间距相等以便于计算。具体计算参数如表 2 所示。桥梁及墩台按底座板下的刚性基础考虑。

表 2 CRTS-Ⅲ型板式无砟轨道模型参数表

参数	数值
钢轨弹性模量 $E_r/(\text{N}/\text{m}^2)$	2.1×10^{11}
钢轨截面惯性矩 I_r/m^4	3.09×10^{-5}
钢轨质量线密度 $m_r/(\text{kg}/\text{m})$	60.8
扣件节点间距 l_s/m	0.63
扣件系统垂向刚度 $K_p/(\text{N}/\text{m})$	5.0×10^7
扣件系统垂向阻尼 $C_p/(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m})$	7.625×10^4
底座板宽度 b/m	3.1
叠合梁弹性模量 $E_b/(\text{N}/\text{m}^2)$	3.40×10^{10}
叠合梁截面惯性矩 I_b/m^4	0.1037
叠合梁线密度 $m_b/(\text{kg}/\text{m})$	10140
路基垂向线刚度 $k_f/(\text{N}/\text{m}^2)$	2.9×10^8
路基垂向线阻尼 $c_f/(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$	1.6×10^5
路基离散支承等效刚度 $K_f/(\text{N}/\text{m})$	1.827×10^8
路基离散支承等效阻尼 $C_f/(\text{N} \cdot \text{s}/\text{m})$	1.0×10^5

随着桥台背过渡段底座支承条件不断劣化,底座

板与路基面接触条件逐渐由无离缝的良好接触状态向离缝开展状态发展。在离缝条件下,底座与路基面在振动过程中相互接触时产生的作用力按式(1)计算。即无砟轨道底座板与路基面间离缝间隙 δ_g 较大时,离缝区域内基床完全丧失支承能力,列车荷载作用下,离缝未出现闭合;而当 δ_g 较小时,离缝区域内的基床仍可发挥部分承载能力。为便于模型计算,考虑在离缝区域长度范围 L_g 内,离缝的间隙 δ_g 不变,如图 2 所示。

$$f_{bf}(t) = \begin{cases} k_f(Z_b - \delta_g) + c_f\dot{Z}_b, & Z_b > \delta_g \\ 0, & Z_b \leq \delta_g \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_{bf} ——路基与底座板之间的作用力;
 k_f 、 c_f ——分别为路基支承线刚度与线阻尼;
 Z_b 、 \dot{Z}_b ——分别为底座板垂向振动位移和振动速度。底座板的振动位移和速度以叠合梁响应值来代表。

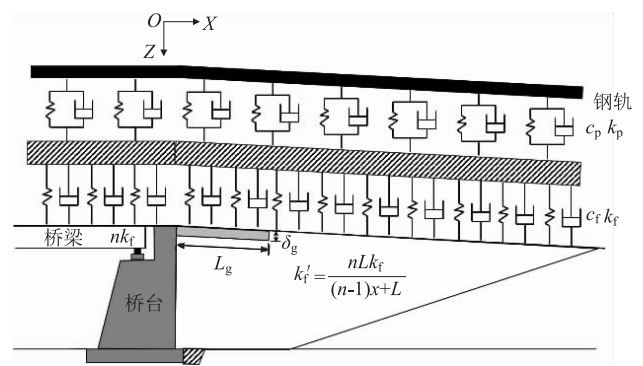


图 2 过渡段离缝区域示意图

1.2 计算方案及过渡性能评价指标

过渡段部位沿线路纵向,路基与其他结构物之间刚度差异巨大,材料性质不同,导致轨道刚度的突变。同时,在列车荷载作用下,路基将产生压密下沉,而邻近结构物几乎不发生沉降,因而易产生的不均匀沉降,映射至钢轨将产生轨面几何不平顺。此外,路基与相邻结构物交界处差异沉降将致使交界处动力作用加强,易引起无砟轨道结构与路基接触条件劣化,进而形成底座局部脱空。三者及叠加均导致列车与线路结构相互作用增大,影响线路结构的稳定,同时加剧线路服役状态劣化。

路桥过渡段差异沉降造成的轨面折角,日本新干线板式轨道线路规定不大于 1/1 000,德国高速铁路无砟轨道技术标准要求不大于 1/500^[10]。罗强^[4]通过动力学仿真分析指出,在运行速度 350 km/h 条件下,差异沉降引起的轨面折角满足动力性能要求的控

制值为 1.5/1 000。我国高铁设计规范以工后阶段不大于 1/1 000 进行控制^[10-11],如图 3 所示。

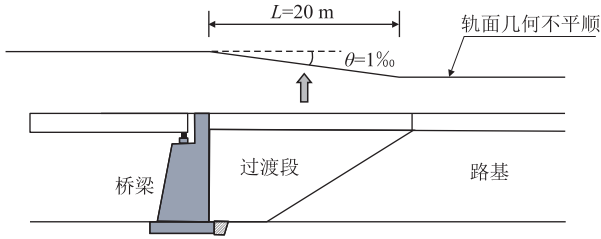


图3 过渡段工后不均匀沉降示意图

对于路桥结构的纵向刚度差异,混凝土结构桥梁视为刚性结构,而由松散岩土材料填筑而成的路基的支承刚度相较下有数量级的减少。路基结构采用地基系数 K_{30} 控制,根据 TB 10621-2014《高速铁路设计规范》及 TB 10001-2016《铁路路基设计规范》中的高速铁路无砟轨道路基压实控制指标,基床表层地基系数 $K_{30} \geq 190$ MPa/m;基床底层采用粗砾土、碎石类土时 $K_{30} \geq 150$ MPa/m,当采用砂类土(粉砂除外)、细砾土时 $K_{30} \geq 130$ MPa/m;基床以下路堤为粗砾土、碎石类土时 $K_{30} \geq 130$ MPa/m,采用砂类土、细砾土时 $K_{30} \geq 110$ MPa/m。受岩土材料非线性影响,土体工作模量与应变水平有关,文献[12]基于土体应变与模量关系曲线,分析后认为基床结构工作模量 E (MPa) 取值与地基系数 K_{30} (MPa/m) 存在映射关系,可通过应变状态对应的模量近似换算,基床结构的工作弹性模量约为 100~200 MPa。而混凝土弹性模量为 10 GPa 量级,可得土质路基与相邻混凝土结构在模量上相差约两个数量级,即支承刚度相差约 100 倍。规范要求高速铁路过渡段采用正梯形或倒梯形型式,过渡段采用级配碎石倾斜填筑,在列车荷载作用下产生弹性位移呈线性渐变,则过渡段支承刚度由桥梁端向路基端呈双曲线形式由 $100k_f$ 减小至 k_f ,如图 4 所示。

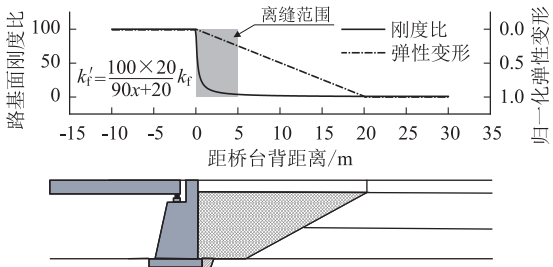


图4 过渡段支承刚度变化示意图

过渡段动力学性能与列车运行速度紧密相关,以 400 km/h 条件开展列车-轨道-过渡段耦合系统的动力响应分析评价与控制限值。无砟轨道路基与桥台

交界处差异沉降限值不超过 5 mm^[10],并按轨面折角 1/1 000 的最不利条件^[11],确定离缝间隙高度与离缝区域长度的对应关系。

过渡段长度按 20 m 取值,桥台与路基的支承刚度比值为 100 倍的条件下,以过渡段路基工后不均匀沉降引起的轨面折角 1/1 000、底座与路基良好接触(不出现离缝)的工况 I 为基准,考虑底座板离缝间隙高度分别为 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm(对应离缝范围分别为 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m),分析离缝参数对路桥过渡段动力学性能影响。此外,对离缝间隙高度 5 mm、离缝长度 5 m 的极限最不利情况,考虑在桥台后方设置长×宽×厚为 8 m×4.3 m×0.6 m 的刚性混凝土过渡搭板形式(如图 5 所示),研究过渡搭板对过渡段系统动力响应性能的改善作用。7 种计算工况如表 3 所示。

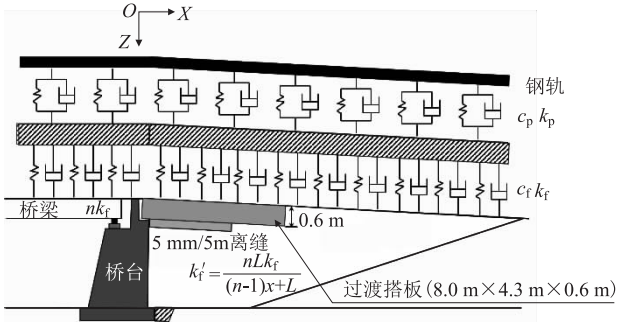


图5 过渡搭板设置示意图

表3 过渡段耦合动力学计算方案表

工况编号	离缝几何参数 δ_g (mm)/ L_g (m)	搭板设置	几何不平顺
I	0/0	无	1‰折角
II-1	1/1	无	1‰折角
II-2	2/2	无	1‰折角
II-3	3/3	无	1‰折角
II-4	4/4	无	1‰折角
II-5	5/5	无	1‰折角
III-5	5/5	8.0 m × 4.3 m × 0.6 m	1‰折角

对过渡段的动力学性能评价,既要体现对车辆系统尤其是车体振动的控制,以保证乘坐舒适性和运行平稳性,还应尽可能全面地建立反映车辆运行安全性和线路结构各部件振动特性的指标体系,确保行车安全,控制线路状态劣化,减少结构部件伤损。一般选用车体垂向振动加速度 a_c 、轮轨垂向力 P 及减载率 $\Delta P/\bar{P}$ 、钢轨垂向动位移 Z_r 、底座板垂向动位移 Z_b 及路基面动应力 σ_d 等指标作为路桥过渡段动力学性能评价指标,控制值如表 4 所示。

表 4 过渡段动力学性能评判标准表^[13]

a_c /(m/s^2)	P /kN	$\Delta P/\bar{P}$	Z_r /mm	Z_b /mm	σ_d /kPa
≤ 1.0	≤ 120	≤ 0.65	≤ 1.5	≤ 0.4	≤ 80

2 动力学响应数据及分析

采用过渡段系统耦合动力学分析模型,考虑土质路基与桥台间刚度 100 倍刚度差异与由过渡段不均匀沉降引起的平折角为 1/1 000 的轨面不平顺,针对离缝参数为 0 mm/0 m ~ 5 mm/5 m 与离缝间隙高度为 5 mm且设置过渡搭板的共计 7 种工况分别进行仿真分析。其中,典型工况 II-1 (1 mm/1 m 离缝)、工况 II-5 (5 mm/5 m 离缝)、工况 III-5 (5 mm/5 m 离缝且设置搭板)的动力学响应曲线分别如图 6 与图 7 所示。受路基不均匀沉降映射至轨面产生的几何不平顺影响,轮轨力 P 、钢轨位移 Z_r 、底座板位移 Z_b 、路基面应力 σ_d 在桥台与过渡段及过渡段与路基交界处附近均存在明显波动,动力作用增强,而车体加速度 a_c 沿纵向波动不显著。受线下基础刚度差异的影响,桥台处钢轨位移 Z_r 、底座板垂向位移 Z_b 小于路基处,且在过渡段范围内近似线性变化。同时,由于路桥交界处附近底座板部分脱空影响,离缝范围内轮轨力 P 因“卸载”效应而减小,路基面应力 σ_d 在产生离缝的交界处出现明显增大,这是底座板与路基面之间支承力缺失,继而引发紧邻路基应力集中。设置过渡搭板后,由路桥交界处的差异沉降导致的离缝引起的动力响应显著减小,离缝导致的支承刚度缺失由搭板的抗弯刚度有效补充,过渡段动力性能明显改善。

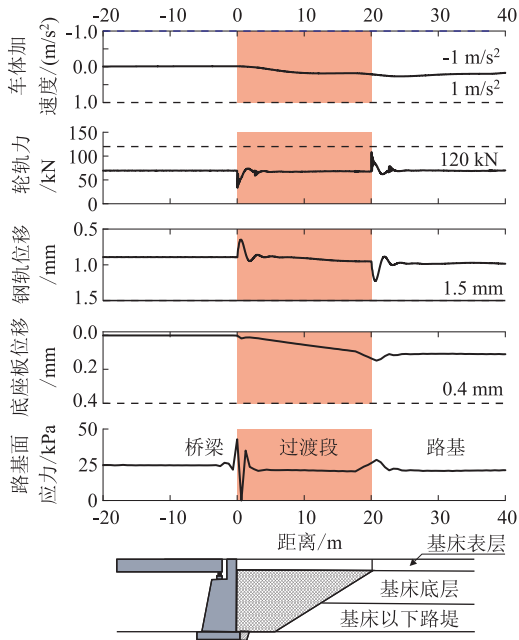


图 6 过渡段典型动力学响应曲线图(工况 II-1)

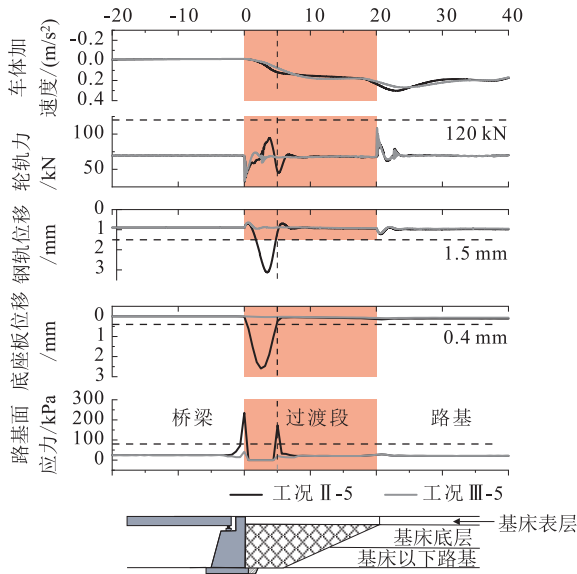


图 7 过渡段典型动力学响应曲线图(工况 II-5 与工况 III-5)

为分析底座离缝参数及是否设置搭板对动力响应的影响,统计所有工况下车体加速度 a_c 、轮轨力 P 、减载率 $\Delta P/\bar{P}$ 、钢轨位移 Z_r 、底座板位移 Z_b 、路基面动应力 σ_d 最大值,如表 7 所示。各工况下 a_c 在 0.267 ~ 0.301 m/s^2 范围内变化,整体变化较小; P 为 69.72 ~ 94.44 kN,设置搭板可显著降低轮轨力; $\Delta P/\bar{P}$ 介于 0.798 ~ 0.835 之间,变化较小; Z_r 在 0.98 ~ 3.12 mm 之间变化; Z_b 介于 0.11 ~ 2.59 mm; σ_d 在 23.26 ~ 173.24 kPa 之间变化。随着离缝的开展,各项动力响应指标均不断增大,离隙高度越大、离缝范围越长,动力响应幅值越大。设置搭板后,动力响应指标明显减小。

表 5 动力响应指标最大值表

工况	a_c /(m/s^2)	P /kN	$\Delta P/\bar{P}$	Z_r /mm	Z_b /mm	σ_d /kPa
I	0.267	73.80	0.798	1.22	0.15	24.19
II-1	0.267	73.84	0.800	1.22	0.15	34.91
II-2	0.267	79.67	0.825	1.22	0.23	71.23
II-3	0.267	80.93	0.835	1.34	0.49	94.94
II-4	0.280	89.21	0.825	2.29	1.61	149.68
II-5	0.301	94.44	0.820	3.12	2.59	173.24
III-5	0.267	73.70	0.798	1.17	0.09	14.52

定义限值比 R 为表 5 中动力响应最大值 Re_{\max} 与表 4 中控制值 Re_c 之比,如式(2)所示。限值比 R 反映各动力响应指标与对应控制值的相对值,便于不同指标相互对比。

$$R = \frac{Re_{\max}}{Re_c}$$

(2)

在底座板与路基良好接触条件下,同时考虑线下基础刚度差异与路基不均匀沉降引起的轨面几何不平

顺的工况 I,各项动力响应指标均未超过控制值(限值 $R \leq 1$)。这表明若路桥差异沉降控制良好,底座与路基间未形成离缝,即使在路桥刚度差异与不均匀沉降引起的轨面不平顺不利条件共同影响下,路桥过渡段仍具有良好的动力性能,可满足线路安全服役要求。

当底座板与路基接触条件劣化,桥台背与路基差异沉降将导致底座板产生离缝,随着离隙范围扩展,过渡段动力响应指标呈加速增大趋势,如图 8 所示。其中,钢轨位移、底座板位移、路基面应力显著升高,车体加速度与轮轨力增加幅度相对较小。当钢轨位移、底座板位移、路基面应力接近规范限值时,离缝参数整体介于 $2 \text{ mm}/2 \text{ m} \sim 3 \text{ mm}/3 \text{ m}$ 之间,即路桥交界处的工后差异沉降可按 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 控制。

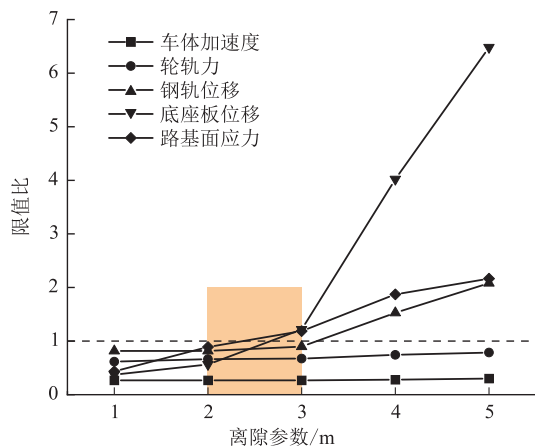


图8 离缝参数对过渡段动力响应影响图

在离缝参数均为 $5 \text{ mm}/5 \text{ m}$ 条件下,对比设置搭板的工况 III-5 与未设置搭板的工况 II-5,发现设置搭板能有效降低动力响应,钢轨最大位移由 3.12 mm 减小至 1.17 mm ,底座板最大位移由 2.59 mm 减小至 0.09 mm ,路基面最大动应力由 173.24 kPa 大幅减小至 14.52 kPa (如表 5 与图 9 所示)。过渡段设置搭板后,各项动力响应指标均降至限制值以下,在路桥过渡段设置搭板能够显著改善路基受力状态,有效提升过渡段服役性能。

3 结论

针对路基与桥台交界处产生的工后差异沉降导致轨道板底脱空形成离隙,过渡段平顺性劣化问题,开展了车辆-无砟轨道-路桥过渡段耦合动力学仿真分析,讨论了在支承刚度和不均匀沉降引起的不平顺基础上,桥台背附近无砟轨道板底局部离缝对过渡段动力学性能的影响及设置混凝土过渡搭板的改善效果,

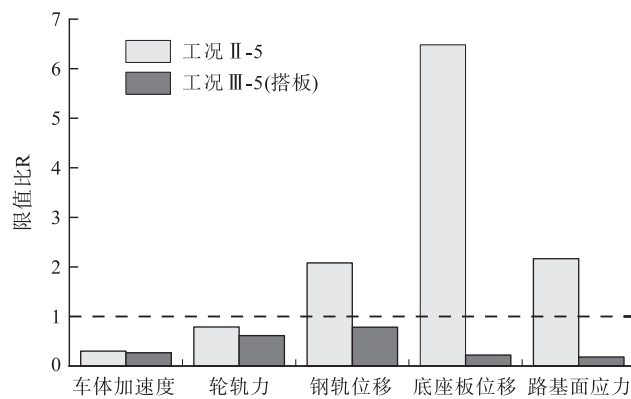


图9 设置搭板对过渡段动力响应影响图

得出以下主要结论:

(1) 受桥台背路基层部沉陷影响的无砟轨道底座板接触状态,对高速铁路路桥过渡段的动力学性能影响显著。计算表明,无砟轨道处于良好接触状态下的过渡段性能满足高速行车的要求,但随着无砟轨道板底离隙范围的扩展,过渡段线路结构的动力学响应指标呈加速劣化趋势。

(2) 以 400 km/h 运行速度下车体垂向加速度、轮载力及减载率、钢轨与底座板动位移及路基面动应力为评价指标,依据高速铁路无砟轨道与路基结构的动态验收技术标准,路桥交界处的工后差异沉降应由现行设计规范不应大于 5 mm 调整为 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 。

(3) 在过渡段的桥台背铺设钢筋混凝土搭板,是解决结构间差异沉降导致无砟轨道板底离缝、进而引发过渡段性能严重退化的有效措施。分析表明,在路桥之间设置一块长 \times 宽 \times 厚为 $8 \text{ m} \times 4.3 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 的 C35 钢筋混凝土搭板,可保证过渡段在路桥交界处发生 5 mm 差异沉降下仍具有良好性能。

参考文献:

- [1] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道结构[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
ZHAO Guotang. High Speed Railway Ballastless Track Structure [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- [2] 张文超, 苏谦, 刘亭, 等. 基床翻浆条件下无砟轨道路基振动特性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3556-3562, 3568.
ZHANG Wenchao, SU Qian, LIU Ting, et al. Research on Vibration Characteristics of Ballastless Track Subgrade under Frost Boiling at Subgrade Bed [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3556-3562.
- [3] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupling Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2007.

(下转第 49 页)

- Central South University of Technology (Natural Science), 2002, 33(6): 621–624.
- [3] 魏洋波, 梁习锋. 线间距对交会压力波的影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(12): 2525–2531.
- WEI Yangbo, LIANG Xifeng. Influence of Line Spacing on the Intersection Pressure Wave [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(12): 2525–2531.
- [4] CHU C R, CHIEN S Y, WANG C Y, et al. Numerical Simulation of Two Trains Intersecting in a Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 42: 161–174.
- [5] 梅元贵, 孙建成, 许建林, 等. 高速列车隧道交会压力波特性[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(5): 34–43.
- MEI Yuangui, SUN Jiancheng, XU Jianlin, et al. Crossing Pressure Wave Characteristics of High-speed Trains in Tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(5): 34–43.
- [6] 孙海富, 王秀丽. 城际铁路线间距标准研究[J]. 高速铁路技术, 2015, 6(5): 53–56.
- SUN Haifu, WANG Xiuli. Study on Standard for Distance between Centers of Tracks of Intercity Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2015, 6(5): 53–56.
- [7] 李红梅. 基于空气动力学的城际铁路线间距研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(10): 101–104.
- LI Hongmei. Research on Distance between Tracks for Intercity Railway Based on Aerodynamics [J]. Railway Engineering, 2016, 56(10): 101–104.
- [8] 付连著, 李红艳, 孙加林, 等. 基于动力学性能的更高速度铁路合理线间距研究[J]. 铁道建筑, 2020, 60(12): 101–104.
- FU Lianzhu, LI Hongyan, SUN Jialin, et al. Research on Reasonable Distance between Centers of Tracks for Higher Speed Railway Based on Dynamic Performance[J]. Railway Engineering, 2020, 60(12): 101–104.
- [9] FUJII K, OGAWA T. Aerodynamics of High Speed Trains Passing by Each Other[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(8): 897–908.
- [10] HWANG J, YOON T S, LEE D H, et al. Numerical Study of Unsteady Flowfield around High Speed Trains Passing by Each Other [J]. JSME International Journal Series B, 2001, 44(3): 451–464.
- [11] BS EN 14067–5 2006 Railway Applications-aerodynamics. Part 5: Requirements and Test Procedures for Aerodynamics in Tunnels [S].

(上接第38页)

- [4] 罗强. 高速铁路路桥过渡段动力学特性分析及工程试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- LUO Qiang. Dynamic Performance Analyses and Experiment Study on Bridge/Approach Embankment of High-speed Railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [5] 列车与线路研究所. 两桥(隧)之间短路基动力学仿真分析[R]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- Institute of train and line. Dynamic Simulation Analysis of Short Subgrade between Two Bridges/Tunnels [R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [6] Wang H, Markine V. Dynamic Behaviour of the Track in Transitions Zones Considering the Differential Settlement [J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 438: 114863.
- [7] 陈虎, 罗强, 张良, 等. 高速铁路 CRTS II 型板式无砟轨道路桥过渡段振动特性测试分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(1): 81–88.
- CHEN Hu, LUO Qiang, ZHANG Liang, et al. Test Analysis of Vibration Characteristics of High-speed Railway on CRTS II Slab Ballastless Track Bridge-Subgrade Transition [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(1): 81–88.
- [8] 刘亭, 苏谦, 赵文辉, 等. 板式无砟轨道路基翻浆整治效果研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(12): 88–95.
- LIU Ting, SU Qian, ZHAO Wenhui, et al. Study on Injection-repaired and Reinforcement Effects of Subgrade Frost Boiling under Ballastless Track [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(12): 88–95.
- [9] 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 Characteristics of the Unballasted Track Subgrade under Train Loading [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(9): 86–93.
- [10] TB 10621–2014 高速铁路设计规范[S].
- TB 10621–2014 Code for Design of High Speed Railway [S].
- [11] TB 10001–2016 铁路路基设计规范[S].
- TB 10001–2016 Code for Design of Railway Earth Structure [S].
- [12] 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(6): 55–59.
- ZHANG Qianli, Han Zili, LV Binlin. Structural Analysis and Design Method for Subgrade Bed of High-speed Railway [J]. China Railway Science, 2005(6): 55–59.
- [13] TB 10761–2013 高速铁路工程动态验收技术规范[S].
- TB 10761–2013 Technical Regulations for Dynamic Acceptance for High-speed Railways Construction [S].