

文章编号: 1674—8247(2021)02—0039—04  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.007

## 更高速度无砟轨道铁路线下基础刚度匹配研究

魏永幸<sup>1</sup> 刘秀波<sup>2</sup> 吴细水<sup>3</sup>

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031;  
2. 中国铁道科学研究院集团有限公司; 北京 100081; 3. 中国国家铁路集团有限公司, 北京 100844)

**摘要:**无砟轨道几何形位满足要求、轨道刚度连续均匀是列车高速平稳运行的根本保障条件,作为支承轨道的线下基础必须持久稳定、坚固。路基与桥、隧构筑物连接处是高速铁路线路相对薄弱的环节。如何做好路基与桥、隧构筑物之间差异沉降的控制与刚度匹配的协调是无砟轨道铁路建设的技术关键。本文从轨道刚度与线下基础刚度的关系入手,讨论了线下基础纵向刚度的匹配问题以及实现路基过渡段纵向刚度匹配的技术关键、技术路径。提出更高速度无砟轨道铁路需进一步强化线下基础的刚度匹配,实现过渡段纵向刚度匹配需要做好轨道结构与线下基础的协同设计,做好线下基础的纵断面设计,优先采用减小路基与桥、隧等构筑物沉降与刚度差异的结构措施。

**关键词:**无砟轨道; 线下基础; 刚度匹配; 差异沉降; 设计协同

中图分类号: U213.1 文献标志码: A

## Research on Substructure Rigidity Matching of Higher-speed Ballastless Track Railway

WEI Yongxing<sup>1</sup> LIU Xiubo<sup>2</sup> WU Xishui<sup>3</sup>

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;  
2. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;  
3. China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China)

**Abstract:** The satisfactory ballastless track geometry and the continuous and uniform track rigidity are the fundamental guarantee conditions for the smooth running of trains at a high speed. The substructure supporting the track must be enduringly stable and solid. The joints between subgrade and structures of bridge and tunnel are the relatively weak parts of high-speed railway lines. How to control the differential settlement between subgrade and structures of bridge and tunnel and coordinate the rigidity matching is the technical key for the construction of the ballastless track railways. Starting from the relationship between track rigidity and substructure rigidity, this paper discusses the longitudinal rigidity matching of substructure and the key technical issues and technical path to realizing the longitudinal rigidity matching of the subgrade transition section. It is proposed that the rigidity matching of substructure shall be further strengthened for the higher-speed ballastless track railways. In order to realize the longitudinal rigidity matching of the transition section, it is necessary to carry out the collaborative design of track structure and substructure, improve the

收稿日期: 2021-03-01

作者简介: 魏永幸(1964-), 男, 教授级高级工程师, 注册土木工程师(岩土)。

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: 魏永幸, 刘秀波, 吴细水. 更高速度无砟轨道铁路线下基础刚度匹配研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 39-42.

WEI Yongxing, LIU Xiubo, WU Xishui. Research on Substructure Rigidity Matching of Higher-speed Ballastless Track Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 39-42.

vertical section design of substructure, and preferentially take the structural measures of reducing the settlement and rigidity difference between subgrade and structures such as bridge and tunnel.

**Key words:** ballastless track; substructure; rigidity matching; differential settlement; design collaboration

无砟轨道因具有稳定性好,轨道几何尺寸保持久,维修工作量少等优点,已成为300 km/h及以上速度高速铁路轨道结构的主流和首选。与传统的有砟轨道不同,无砟轨道没有道砟结构层,其底座板或支撑层直接与路桥隧等线下基础相连接,线下基础刚度成为影响轨道刚度的重要因素。因此,对于无砟轨道铁路,其线下基础的刚度匹配问题不仅显得更加重要,而受到广泛关注和重视。魏永幸<sup>[1]</sup>指出:如何使路基与其他构筑物的刚度匹配,与如何控制路基沉降变形、如何保持路基长期稳定,是无砟轨道铁路路基的三大技术关键。我国高速铁路运营实践表明,不同线下基础连接处的过渡段是高速铁路线路的薄弱环节,个别运营高铁线路在路基与桥梁等构筑物过渡段还曾出现过沉降和轨道不平顺问题<sup>[2-3]</sup>。有鉴于此,本文结合我国无砟轨道铁路建设及运营实践,基于轨道刚度与线下基础刚度的关系,探讨线下基础纵向刚度匹配、过渡段纵向刚度匹配及实现途径,以期有益于我国高速铁路技术提升,服务于更高速度高速铁路的建设和运营。

## 1 轨道刚度与线下基础刚度

列车高速列车安全平稳运行要求线路保持高可靠性、高稳定性、高平顺性,因此轨道几何形位要满足相关标准要求,轨道刚度要保持连续、均匀,行车速度越高,对轨道的平顺性和轨道刚度的均匀、连续性要求越高。

轨道刚度是列车运行轮轨作用下,轨道弹性变形的表征参数,通常也称为线路刚度或轨道线刚度,是线路结构设计的一个重要参数。

轨道支承于线下基础之上,线下基础必须持久稳定、坚固。相关研究表明,线下基础的刚度对于轨道刚度的持久保持十分重要<sup>[4-5]</sup>。线下基础刚度是线下基础在列车及轨道结构荷载作用下产生的弹性变形大小的表征参数。对于桥梁而言,线下基础刚度通常采用列车及轨道结构荷载作用下桥梁产生的挠曲变形来表示;对于路基而言,线下基础刚度可用列车及轨道结构荷载作用下路基面产生的弹性变形来表示,魏永幸、邱延峻将其称之为路基面支承刚度<sup>[6]</sup>。

轨道刚度与线下基础刚度的关系如图1所示。

轨道刚度过大,轮轨作用力会增大;轨道刚度过小,轨道竖向变形将增大,会增大轮轨运行阻力。为从

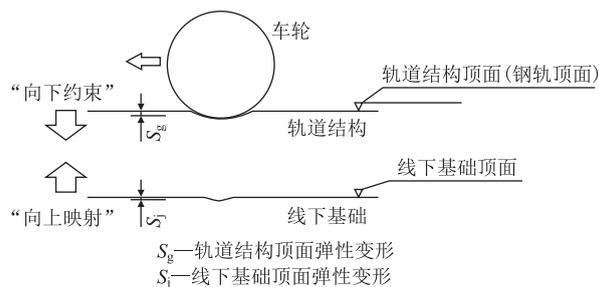


图1 轨道刚度与线下基础刚度关系图

保证列车高速平稳运行、减少轮轨作用力出发,线路纵向的轨道刚度应连续、均匀,横向不应有突变,左右两股钢轨的轨道刚度应尽量一致。

轨道刚度与轨道结构有关,也与线轨道下基础刚度有关。轨道刚度“向下约束”基础刚度。基础刚度则“向上映射”,影响轨道刚度。

## 2 线下基础纵向刚度匹配

线下基础主要包括路基、桥梁、隧道。

桥梁墩台的竖向刚度通常较大,但对于大跨桥梁,列车荷载作用下梁的挠曲以及由挠曲引起的梁端转角需加以限制,以满足列车高速运行的需要。

隧道刚度通常也较大,但对于土质隧道的进出口段以及特殊地质地段,需要对列车荷载反复作用引起的地基土累积沉降及刚度变化等问题给予重视,采取可靠的措施进行处治。

按照现行规范推荐的基床结构及填筑材料、控制参数建造的路基,路基面支承刚度一般在200 MPa/m左右,路桥过渡段采用水泥稳定级配碎石填筑,其路基面支承刚度一般为500~1 000 MPa/m。

线下基础纵向刚度匹配的核心是做好路基与桥、隧等构筑物的刚度控制,并做好相邻两种结构间的刚度衔接。

## 3 过渡段纵向刚度匹配

### 3.1 实现过渡段纵向刚度匹配的技术路径

路基与桥、隧构筑物纵向刚度匹配通常可采取两种途径来实现:

(1)设置高刚度材料(如水泥稳定级配碎石)的楔形体路基过渡段。掺入5%~8%的水泥稳定级配碎石后,填筑体的刚度可提高2~3倍,这是我国目前通

常采用的方法。

(2) 设置刚度过渡的结构。在桥台与路基之间设置过渡结构,实现桥梁与路基的刚度过渡。

### 3.2 减小路基与桥、隧构筑物沉降和刚度差异的结构措施

实际工程中,路基与桥、隧构筑物之间还存在不同程度的沉降差异,沉降差与刚度差两个问题耦合叠加,使得过渡段问题变得十分复杂。

不同线下基础之间出现沉降差,通常会引起轨道几何形位的变化,从而引起轨道静不平顺。轨道静不平顺引起晃车,轻者影响乘车舒适性,重者甚至会影响行车安全,不得不限速运行。

不同线下基础之间出现刚度差,在轮轨力作用下会产生不均匀变形,被称为轨道动不平顺,轨道动不平顺也会引起轮轨作用力的变化,影响轮轨系统使用寿命,长期以往还可能引起轨道结构及线下基础的劣化。轨道平顺性较好的路桥过渡段实测轨面动变形如图2所示。典型的轨道平顺性较差的路桥过渡段实测轨面动变形如图3所示,在路桥连接处有明显的突变点。

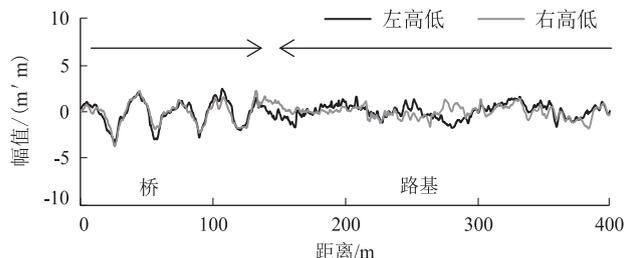


图2 轨道平顺性较好的路桥过渡段实测轨面动变形图

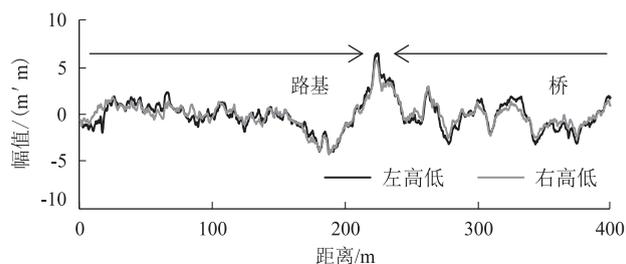


图3 轨道平顺性较差的路桥过渡段实测轨面动变形图

路基工程是由岩土材料通过施工机械,在露天环境填筑而成的。目前,路基沉降、路基刚度还不能精确计算、精准控制。因此,为有效克服路基与桥、隧构筑物之间可能存在的沉降差与刚度差,笔者认为,有必要设置减小路基与桥、隧构筑物沉降和刚度差异的结构措施,如在路桥过渡段设置钢筋混凝土搭板<sup>[7]</sup>(如图4所示);当两桥(隧)之间距离较短时,为避免频繁设置过渡段,可在两桥(隧)之间设置钢筋混凝土桩-板结构(也称为桩-板结构路基)<sup>[8-9]</sup>(如图5所示)等。

值得一提的是,在缺乏合格填料的区段,可利用路堑或隧道开挖弃方(非良质填料)填筑桩-板结构路基的路堤,其工程造价可较桥梁工程减少30%,同时还可减少弃渣量,经济效益和环境效益均十分显著。

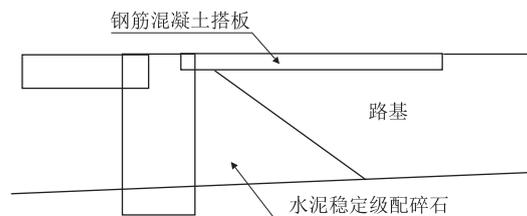


图4 路桥过渡段设置钢筋混凝土搭板示意图

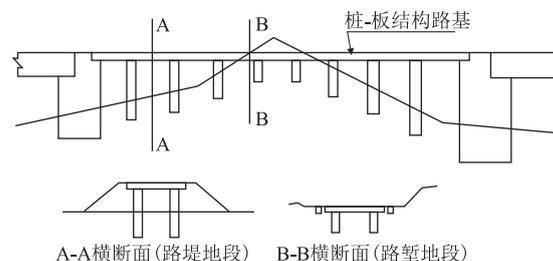


图5 两桥(隧)之间设置钢筋混凝土桩板结构示意图

## 4 做好过渡段刚度匹配的几点建议

实际工程中,如何进一步做好路基与桥、隧构筑物之间刚度匹配,笔者认为须从以下三个方面着手开展工作。

### (1) 做好轨道结构与线下基础协同设计

一方面,应根据不同的基础条件,设计合理的轨道结构,包括轨道板、钢轨、扣件系统等。另一方面,作为轨道结构的基础,基础“向上映射”影响轨道结构性能,线下基础是为轨道结构服务的,应满足轨道结构“向下约束”的条件。从这一点讲,在确定轨道结构条件后,线下基础应严格按照轨道结构的要求进行设计,并做好不同线下基础的刚度衔接,确保线路纵向轨道结构刚度的连续、均匀。但当线下基础施工完成后,轨道结构设计则应根据线下基础的施工现状和线下基础的刚度检测结果,进行针对性的优化。因此,从设计理念上,要树立轨道结构与线下基础一体化的思路,做好轨道结构与线下基础的协同设计。

### (2) 做好线下基础纵断面设计

不同的线下基础之间应进行工程性能匹配设计。具体地说,就是应进行线下基础纵断面设计<sup>[10]</sup>。线下基础纵断面设计的根本目的是做好不同线下基础之间的设计协同。线下基础纵断面设计主要包括:①不同线下基础连接处刚度差异的检查与处理。检查刚度是否匹配,刚度过渡措施是否满足要求等。②不同线下

基础连接处沉降差异的检查与处理。检查差异沉降是否满足要求,不同线下基础的沉降控制措施(包括设计参数、计算模型、工程布置、施工组织等)是否合理,是否有效衔接或存在干扰等。③不同线下基础连接处工程接口的检查与处理。检查平面与高程是否一致,排水措施是否有效衔接,“四电”管线布置是否一致等。

(3)优先采用减小路基与桥、隧构筑物沉降与刚度差异的结构措施

由于路基材料、构筑方法的特殊性,实际工程中,路基与桥、隧等构筑物之间无法完全避免沉降变形差异和刚度差异的出现,因此,建议优先设置减小沉降差异、保证刚度匹配的结构措施。针对更高速度的无砟轨道铁路,建议:①在路桥、路隧过渡段设置减小沉降差异、刚度差异的钢筋混凝土搭板。②当两桥(隧)之间距离较短时,为避免频繁过渡,在两桥(隧)之间设置等钢筋混凝土桩-板结构路基。③在缺乏合格填料的区段,优先采用桩-板结构路基(非劣质填料填筑路堤)保证路基面“零”沉降、等刚度,确保路基与桥、隧构筑物的刚度匹配。

## 5 结论与展望

本文从轨道刚度与线下基础刚度的关系入手,讨论了线下基础纵向刚度的匹配的问题以及实现路基过渡段纵向刚度匹配的技术关键、技术路径。得出以下主要结论:

(1)对于更高速度的无砟轨道铁路,应更加重视不同线下基础的刚度匹配,以保障轨道结构刚度均匀化。

(2)做好线下基础的纵向刚度匹配,要树立协同设计理念,做好轨道结构与线下基础的协同设计,做好不同线下基础的协同设计。

(3)路基与桥、隧构筑物之间设置减小沉降差异、保证刚度匹配的结构措施,可有效实现线路刚度均匀化。

建议今后应进一步开展以下研究:

(1)开展轨道结构与线下基础的协同设计研究,明确接口的界面参数。

(2)研发路基面支承刚度快速检测装备,铺设轨道结构前对路基面支承刚度进行检测,据此优化轨道结构设计,以更好地实现线路刚度的连续、均匀。

## 参考文献:

[1] 魏永幸. 无砟轨道铁路路基——技术关键、路径与措施[M]. 北京:人民交通出版社, 2016.

WEI Yongxing. Ballastless Track Railway Subgrade——Technical Key Path and Measures [M]. Beijing: China Communications Publishing, 2016.

[2] 任娟娟, 赵华卫, 李潇, 等. 减振 CRTS III 型板式无砟轨道路隧过渡段动力分析[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(6): 1047 - 1054.

REN Juanjuan, ZHAO Huawei, LI Xiao, et al. Dynamic Performances of CRTS III Prefabricated Slab Track with Anti-Vibration Structure in Subgrade-Tunnel Transition Section[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(6): 1047 - 1054.

[3] 马学宁, 梁波, 王旭. 高速铁路无砟轨道桥路过渡段路基动力特性研究[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(6): 6 - 10.

MA Xuening, LIANG Bo, WANG Xu. Study on Dynamic Property of Subgrade-Bridge Transition Section of High Speed Railway Ballastless Track[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(6): 6 - 10.

[4] 中铁二院工程集团有限责任公司. 基于层状体系的无砟轨道铁路路基结构设计理论与应用研究[R]. 成都: 中铁二院工程集团有限责任公司, 2012.

China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. A Study on Theory and Application of Structure Design of Ballastless Railway Earthworks based on Layered System [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2012.

[5] 中铁二院工程集团有限责任公司, 等. 高速铁路路基变形控制技术关键技术与应用[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. Key Technologies and Application of Deformation Control for High-speed Railway Earthworks [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2020.

[6] 魏永幸, 邱延峻. 高速铁路无砟轨道路基面支承刚度研究[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(7): 15 - 19.

WEI Yongxing, QIU Yanjun. Research on the Subgrade Surface Stiffness of Ballastless Track of High-speed Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(7): 15 - 19.

[7] 魏永幸, 孙利琴. 高速铁路路桥过渡段路基构造: CN201390925 [P]. 2010 - 01 - 27.

WEI Yongxing, SUN Liqin. Transition Section Subgrade Structure of High Speed Railway Bridges: CN201390925 [P]. 2010 - 01 - 27.

[8] 魏永幸, 孙利琴, 刘洋. 高速铁路短路基构造: CN201614534U [P]. 2010 - 10 - 27.

WEI Yongxing, SUN Liqin, LIU Yang. Short-circuit Foundation Structure of High-speed Railway: CN201614534U [P]. 2010 - 10 - 27.

[9] 魏永幸. 客运专线无砟轨道桩-板结构路基[J]. 铁道工程学报, 2008, 25(4): 19 - 22.

WEI Yongxing. Study on Pile-Slab Structure Subgrade for Ballastless Track of Passenger Dedicated Line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, 25(4): 19 - 22.

[10] 魏永幸. 客运专线无砟轨道铁路路基纵断面设计[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(12): 18 - 22.

WEI Yongxing. Longitudinal Section Design on Ballastless Track Subgrade of Passenger Dedicated Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(12): 18 - 22.