

混凝土 (UHPC) 则是一种具有高强度、低渗透性和极高耐久性的混凝土, 其优异的抗腐蚀性使其在该项目中得到了广泛应用。通过对混凝土配比的优化, 团队成功提高了材料的密实性和抗渗性, 从而为隧道衬砌的长期使用提供了可靠保障。这些高性能材料的应用, 不仅提升了衬砌结构的综合性能, 也确保了隧道在恶劣环境中的稳定性和耐用性。

4.3 施工工艺的创新与应用

在施工工艺方面, 团队采用了先进的技术, 如连续浇筑和精密振捣等工艺, 确保了混凝土的密实性、均匀性和结构的完整性。连续浇筑技术通过避免了施工接缝的产生, 保证了混凝土浇筑过程的连续性, 消除了因接缝可能导致的弱点, 从而增强了混凝土的抗渗性能和抗裂性能。同时, 采用精密振捣技术, 在浇筑过程中有效地排除了混凝土中的气泡和空隙, 提高了混凝土的密实度, 避免了因孔隙导致的水分渗透和腐蚀问题。为确保混凝土达到最佳的强度和耐久性, 团队还在养护阶段采取了长时间的湿养护措施, 保持适宜的湿度和温度, 以促进混凝土的充分固化。与此同时, 项目团队还引入了智能监控技术, 实时监测施工过程中的各项参数, 确保每一环节都符合设计要求, 并及时对施工质量进行调整。这些创新施工工艺的应用, 不仅保证了衬砌结构的质量, 也提高了施工效率, 确保了隧道衬砌结构的长期稳定运行。

5 隧道衬砌结构耐久性提升的综合措施

5.1 综合考虑环境因素的优化设计

为了提高隧道衬砌结构的耐久性, 必须综合考虑其所处的环境因素。在不同地质条件、气候及水文环境下, 衬砌结构的设计需要针对性地进行优化。例如, 在沿海地区, 氯盐腐蚀是一个严重的威胁, 因此在设计时, 衬砌的厚度、钢筋的防腐处理以及混凝土的选择必须考虑抗氯盐侵蚀的特性。对于地下水丰富的区域, 应通过设计具有良好抗水性的高密度混凝土, 同时增加防水层, 阻止地下水的渗透。除了这些基础设计, 利用现代化的监测技术, 对隧道衬砌的运行环境进行实时监控, 是确保耐久性的重要措施。通过实时监测地下水位、温湿度变化等参数, 可以及时了解衬砌结构的受力和变形情况, 及早发现可能的问题并采取有效措施进行调整, 从而最大程度地延长隧道衬砌的使用寿命。

5.2 加强后期维护与修复措施

衬砌结构的耐久性不仅依赖于设计和施工阶段的优化, 还需要在隧道投入使用后的长期维护和修复。即使采用了高性能材料和先进的施工技术, 衬砌结构在长期使用过程中仍

然会面临环境变化和物理化学作用的挑战。因此, 定期的检查和维护是确保其耐久性的关键。维护措施包括对裂缝的修复、混凝土表面防护涂层的定期检查和更新, 以及钢筋防腐层的保养等。此外, 隧道内的环境条件 (如湿度、气温和地下水位) 应得到定期监测, 及时发现可能导致衬砌结构老化或损坏的因素。针对发现的早期问题, 采取必要的修复措施, 不仅能延长衬砌的使用寿命, 还能保障隧道的安全性。通过系统的维护和管理, 可以确保衬砌结构在使用过程中的稳定性, 并避免因结构劣化导致的高昂修复费用。

5.3 多学科协同创新与发展

隧道衬砌结构耐久性的提升离不开多学科的协同创新。从材料科学到结构力学, 从施工技术到环境保护, 相关领域的不断发展和技术进步都为提升衬砌结构的耐久性提供了新的解决方案。例如, 纳米技术在混凝土材料中的应用, 可以大大提高其抗渗性和抗裂性; 智能监测系统与大数据技术结合, 可以实时分析隧道衬砌的状态并进行预测, 及时提供维修和加固的建议。此外, 结构优化设计方法, 如基于数值模拟的设计, 能够精确预测衬砌结构在长期荷载作用下的变形和破坏模式, 从而进行预防性设计。这些技术和方法的创新和应用, 能够从多个层面提高衬砌结构的耐久性, 确保高铁隧道在复杂环境条件下的长期安全运营。因此, 推动多学科技术的融合与创新, 将是未来隧道衬砌结构耐久性提升的重要方向。

6 结语

高铁隧道衬砌结构的耐久性直接关系到隧道的安全性和使用寿命。通过优化材料选择、改进结构设计和创新施工工艺, 可以显著提高衬砌结构的耐久性, 延长隧道的使用寿命, 降低维护成本。在未来的高铁隧道建设中, 应进一步加大对高性能材料和施工技术的研究与应用, 不断提升衬砌结构的耐久性, 为高铁线路的安全运营提供有力保障。

参考文献

- [1] 屈志豪. 荷载与气压共同作用下高铁隧道衬砌混凝土碳化机理研究[D]. 重庆交通大学, 2022.
- [2] 蒋镇. 高速铁路隧道脱空衬砌的动力响应研究[D]. 石家庄铁道大学, 2021.
- [3] 陈永照. 高速铁路隧道仰拱衬砌结构力学特性及快速施工技术研究[D]. 中国铁道科学研究院, 2012.
- [4] 王建强. 地铁隧道衬砌结构钢筋锈蚀及耐久性研究[D]. 长安大学, 2009.
- [5] 唐文国, 任玉鹏, 丁祥. 高铁隧道衬砌缺陷气动荷载影响研究[J]. 中国铁路, 2024, (02): 69-74+86.

Research on Settlement Control Technology of High-speed Railway Bridge and Tunnel Transition Section

Jian Hou

China Railway 12th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710024, China

Abstract

The transition sections between bridges and tunnels in high-speed railways, due to significant differences in structural forms, stress mechanisms, and foundation conditions, are highly prone to uneven settlement. This phenomenon can lead to track irregularities, increased structural additional stresses, and reduced ride comfort and safety, posing critical engineering challenges that constrain the long-term service performance of high-speed railways. Transition section settlement is characterized by strong concealment, prolonged evolution cycles, and high treatment difficulty, imposing higher requirements on design, construction, and operation maintenance. Based on practical engineering experience in high-speed railway projects, this paper systematically analyzes the settlement mechanisms of bridge-tunnel transition sections and conducts in-depth research on key settlement control technologies from aspects such as foundation treatment, structural transition design, and construction control. By exploring the synergistic mechanisms of various engineering measures, the study elucidates their effectiveness in mitigating differential settlement and enhancing overall structural stability, providing a systematic technical approach and engineering reference for settlement control in high-speed railway bridge-tunnel transition sections.

Keywords

high-speed railway; bridge-tunnel transition section; uneven settlement; foundation treatment; settlement control technology

高铁桥梁与隧道过渡段沉降控制技术研究

侯建

中铁十二局集团第四工程有限公司, 中国·陕西 西安 710024

摘要

高速铁路桥梁与隧道过渡段由于结构形式、受力机制及地基条件差异显著, 极易产生不均匀沉降, 进而引发轨道不平顺、结构附加应力增大以及行车舒适性与安全性下降等问题, 已成为制约高速铁路长期服役性能的重要工程难题。过渡段沉降具有隐蔽性强、演化周期长和治理难度大的特点, 对设计、施工及运营维护均提出了更高要求。本文结合高速铁路工程实践, 在系统分析桥梁—隧道过渡段沉降机理的基础上, 从地基处理、结构过渡设计及施工控制等方面, 对沉降控制关键技术进行深入研究。通过对多种工程措施协同作用机理的探讨, 阐明其在减缓差异沉降、提升结构整体稳定性方面的效果, 为高铁桥隧过渡段沉降控制提供较为系统的技术思路与工程参考。

关键词

高速铁路; 桥隧过渡段; 不均匀沉降; 地基处理; 沉降控制技术

1 引言

随着高速铁路建设的快速推进, 线路工程的结构组合日趋复杂, 桥梁与隧道交替布置的区段数量显著增加, 桥隧过渡段已成为线路结构设计与施工中的关键环节。由于桥梁基础多为桩基或深基础, 刚度大、沉降小, 而隧道结构依托围岩支撑, 受地质条件影响较大, 基础变形特性与桥梁存在显著差异, 两者衔接部位容易形成纵向刚度突变区。实践表明, 桥隧过渡段常发生差异沉降和不均匀变形, 成为轨道结构病害的高发区域。若沉降控制不当, 将导致轨道高低不平

顺、附加应力增大, 甚至引发结构性损伤, 影响列车运行平顺性与行车安全。因此, 针对桥隧过渡段沉降机理及控制技术开展系统研究, 优化地基处理、结构设计及施工控制措施, 对于保障高速铁路运营质量、延长结构使用寿命具有重要的理论意义和工程应用价值。

2 高铁桥梁与隧道过渡段沉降问题的工程特性

2.1 桥隧过渡段结构与受力特征

桥梁与隧道在结构形式、基础类型及受力体系上存在显著差异。桥梁多采用桩基或扩大基础, 将上部结构荷载传递至深层持力层, 具有较高整体刚度和良好的变形控制能力; 隧道结构依托围岩承载, 受地层特性及施工扰动影响较大, 刚度相对较低。桥隧过渡段作为两种结构体系的连接区

【作者简介】侯建 (1997-), 男, 中国甘肃定西人, 本科, 助理工程师, 从事高速公路路桥研究。

域,其受力状态复杂,既承受列车动荷载作用,又受不同地基变形模式的影响,形成纵向刚度突变带。该区域的受力集中与变形差异极易引发不均匀沉降与结构开裂,若设计处理不当,还可能导致轨道结构错台及附加应力积累,对长期运营安全产生不利影响。

2.2 过渡段沉降的主要表现形式

桥隧过渡段沉降通常表现为纵向不均匀沉降,即沿线路方向出现不同程度的变形梯度,形成“渐变式”或“突变式”沉降曲线。在运营初期,由于填筑压实不充分或地基固结未完成,沉降速率较快;进入稳定期后,沉降速率逐渐减缓,但在软土地基、富水地层或高荷载工况下,沉降过程仍可能持续多年。沉降差的存在会造成轨道纵向高低不平顺,诱发列车运行振动放大与动力响应增强,进而形成“沉降—动力—再沉降”的恶性循环。若不及时控制与调整,将加速轨道结构损伤和路基疲劳,影响列车运行平顺性和行车安全。

2.3 影响沉降发展的关键因素

桥隧过渡段沉降的形成与发展受多种因素耦合作用。地基土层性质是决定性因素,软弱可压缩层、含水砂层及不均匀地层均易引起差异沉降;地下水位变化会导致地基有效应力波动,进一步放大沉降幅度。结构刚度差异是另一个关键因素,桥梁与隧道或路基的纵向刚度不协调,使荷载传递路径不连续,易产生局部附加变形。此外,填筑材料性能、施工压实质量及工后固结控制水平亦显著影响沉降特征。若施工阶段未严格控制分层压实与质量检测,残余变形将在运营期逐渐显现。因此,桥隧过渡段沉降问题具有明显的多因素耦合特性,需从地基改良、结构与动态监测等多个层面进行系统化、全过程控制。

3 桥隧过渡段沉降机理分析

3.1 地基变形差异引起的沉降机理

桥隧过渡段的不均匀沉降首先源于地基变形差异。桥梁基础通常采用桩基或深基础形式,承载力高且沉降量小,而隧道明挖段或路基段多依托于浅层地基,常存在软弱土层或可压缩性填土,其变形模量较低,受荷后容易发生显著的压缩沉降。当列车动荷载与填土自重共同作用时,软弱地基的应力集中与侧向变形更加明显,导致隧道端部及相邻路基产生较大的沉降差。相比之下,桥梁部分因基础刚度高、沉降受限,形成了明显的沉降梯度。这种差异性变形会在过渡段产生附加应力,使结构连接处出现不均匀位移与纵向裂缝,影响结构整体稳定性。由此可见,地基条件的不均一性是桥隧过渡段沉降问题的根源,其控制需从地基承载与变形协调角度系统考虑。

3.2 结构刚度突变对沉降的影响

桥隧过渡段作为刚柔结构体系的衔接区域,其纵向刚度突变对沉降分布具有显著影响。桥梁结构通常采用钢筋混凝土连续梁或预应力结构,整体刚度高、变形小;而隧道及

路基结构刚度较低,受载后变形较大。两种结构在连接处刚度差异明显,荷载传递路径随之改变,导致应力重新分配与局部应力集中。此种刚度不协调现象不仅造成结构本体的不均匀沉降,还易引发桥台背墙与隧道洞门段的剪切开裂或脱空问题。随着时间推移,刚度突变引起的差异沉降会不断累积,使轨道结构出现高低不平与轨道几何形位偏差,从而影响列车运行平顺性与安全性。因此,在设计阶段应通过设置刚度过渡结构、延长衔接段长度等方式,缓解结构突变带来的不均匀沉降效应。

3.3 列车动荷载的长期作用效应

桥隧过渡段在长期运营过程中承受高速列车反复作用的动荷载,其累积效应对沉降演化具有决定性影响。列车运行时产生的动荷载使地基土颗粒发生重新排列与压密,导致地基变形加速;同时动荷载引发的振动效应会削弱土体结构强度,增加孔隙水压力,从而放大地基的附加沉降。尤其在软弱地层中,这种动态累积效应表现更为显著。长期运营下,动荷载造成的沉降量呈时间相关性,即早期沉降速率较高,后期逐渐趋于稳定,但累计沉降仍持续增长。此外,动荷载作用下结构间差异变形加剧,易诱发轨道结构附加应力和局部不均匀沉降。为减轻其影响,应在设计阶段充分考虑列车荷载频率、振动响应及地基动力特性,并在运营期加强监测与维护,以实现沉降的动态调控与长期控制。

4 桥隧过渡段沉降控制的关键技术

4.1 地基加固与处理技术

桥隧过渡段由于地质条件复杂、结构刚度突变明显,地基处理是控制沉降与差异变形的首要环节。合理的地基加固措施可显著改善地基承载力与变形模量,降低不均匀沉降风险。常用的地基处理技术包括换填法、强夯法、CFG桩复合地基、高压旋喷桩及碎石桩等。其中,换填法适用于软弱填土层,通过更换高强度低压缩性的材料增强地基承载力;强夯法通过冲击压密改善地基密实度与抗剪强度;CFG桩与高压旋喷桩则适用于高压地下水及高压压缩性黏土层,可形成复合加固体。地基处理方案的选择应依据地层特征、地下水位及施工环境综合确定,避免加固过度造成经济浪费或处理不足导致后期沉降加剧。通过科学设计与严格施工控制,可有效提升桥隧过渡段地基的整体稳定性与承载性能。

4.2 过渡段结构优化设计

在桥隧衔接区域,结构刚度突变常是引起不均匀沉降的重要诱因。通过优化过渡段结构设计,可在空间上实现刚度的平缓过渡,减少应力集中与变形差异。常见优化措施包括设置过渡板、加强隧道洞口段刚度、延长桥台基础范围及调整轨道结构组合等。过渡板通常采用钢筋混凝土结构,与桥台及路基形成连续受力体系,以分散荷载传递;在隧道端部加强衬砌厚度或增设抗剪构件,可有效改善刚度突变带的结构完整性。轨道结构方面,通过采用渐变厚度道床或弹性