

寿命。高铁桥梁在长期荷载与复杂环境作用下,混凝土表层容易出现渗水、碳化及氯离子侵蚀等劣化现象,必须从防护与评估两方面入手。表面防护方面,可采用氟硅防护涂层、渗透型密封剂与防碳化涂层,形成多层屏障以阻止水分、盐分及 CO_2 侵入,有效降低裂缝扩展速率。内部钢筋则可通过环氧涂层、阴极保护及电化学脱氯技术降低腐蚀风险,从根源上延缓结构退化过程。耐久性评估方面,应定期开展氯离子扩散试验、碳化深度检测与电位测量,结合BIM与桥梁健康监测数据建立结构“寿命档案”。通过多因素耦合的劣化模型和概率寿命预测方法,可实现结构耐久性量化分析与维修计划优化。耐久性提升与寿命评估的系统化实施,不仅能保障高铁桥梁长期服役安全,也为后期运维提供科学依据,推动高铁基础设施向长寿命、低维护方向发展。

5 高铁桥梁裂缝防控的工程实践与技术创新

5.1 典型工程案例分析

以京沪高铁XX特大桥为代表的高性能混凝土应用工程,充分展示了裂缝防控技术的系统性与科学性。该桥主墩采用C50低水化热混凝土,通过优化水胶比与掺合料比例有效降低了水化热峰值。配合外循环水冷及内部冷却管温控系统,使大体积混凝土浇筑期间的核心温差控制在 20°C 以内,避免了热胀冷缩引起的贯通裂缝。桥面连续梁区采用钢纤维增强混凝土(SFRC),提升了材料的抗拉与抗疲劳性能,其裂缝宽度控制在 0.15mm 以内,整体结构的抗裂与耐久性均显著优于传统钢筋混凝土。工程实践表明,合理的材料设计、温控措施与施工工艺协同可有效降低高铁桥梁裂缝风险。通过全过程质量监测与数据反馈,该项目形成了“材料—施工—检测—评估”一体化防控模式,为后续高铁桥梁混凝土裂缝控制提供了可复制的技术经验与范式。

5.2 智能监测与大数据应用

智能化与信息化技术的发展使高铁桥梁裂缝监测迈入精准化与预测化阶段。以京张高铁、成贵高铁为代表的智慧桥梁项目,通过在关键结构节点布设光纤应变计、裂缝宽度传感器与温湿度监测模块,构建起多维数据采集网络。系统每小时可采集上万条应力与温度数据,并通过机器学习算法进行数据清洗与特征识别,实现裂缝发展趋势预测及风险分级评估。监测数据还可与气象信息、列车荷载与桥梁振动频率等外部参数进行多源关联分析,从而为裂缝防控提供智能决策支持。该技术实现了“实时监测—智能预警—精准维护”的全生命周期管理模式,显著提升了桥梁结构健康管理水平,促进了高铁工程由经验管理向数据驱动管理的转型,

为桥梁安全监控体系的智能化升级提供了重要支撑。

5.3 新型材料与绿色施工技术发展

随着材料科学与可持续理念的融合,高铁桥梁裂缝防控正向高性能与绿色化方向发展。自愈合混凝土、纳米 SiO_2 掺合料及高延性纤维复合材料(ECC)的应用,为裂缝早期修复提供了主动性机制。其中,自愈合混凝土可在微裂缝初期通过化学反应生成碳酸钙结晶实现自封闭,纳米 SiO_2 材料可优化水化产物结构,提高致密性与抗渗性能;ECC则因其优异的延性与微裂分散特征显著延缓裂缝扩展。在施工层面,绿色施工技术的推广成为未来发展趋势。通过冷能回收与循环水冷系统,可在降低能耗的同时有效控制温度应力;智能喷养护系统结合环境传感器实现自动喷雾与湿度调控,保障早期养护质量与表面完整性。新材料与绿色施工的有机结合,不仅实现了混凝土裂缝防控的可持续化,也为高铁桥梁的长寿命与低维护目标提供了新的技术路径。

6 结语

高铁桥梁混凝土裂缝防控与耐久性提升是一项系统性工程,涉及材料科学、结构设计、施工控制与信息管理等多领域内容。研究表明,裂缝防治的关键在于全过程控制与多技术协同。通过低水化热材料应用、温控施工与结构优化,可有效降低裂缝发生概率;通过智能监测与大数据分析,可实现裂缝发展动态预测与精细化维护;通过新型材料与绿色施工技术的推广,可显著提升桥梁结构的耐久性与可持续性。未来,高铁桥梁裂缝防控应在标准体系、信息化平台与寿命管理机制方面持续完善,构建集“设计优化—施工监测—运行维护”于一体的智慧防控体系。只有实现技术创新与管理协同并进,才能确保我国高铁桥梁在高速、安全与长寿命服役的目标下稳定运行,支撑交通基础设施的现代化与可持续发展。

参考文献

- [1] 甘华北.高铁桥梁混凝土早期裂缝形成机理及控制技术[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(15):55-57.
- [2] 章进.浅析高铁桥梁中大体积混凝土施工裂缝问题及对策[J].居舍,2019,(02):17+109.
- [3] 张淞源.高铁桥梁工程大体积混凝土裂缝成因及其控制措施[J].建筑技术开发,2017,44(20):121-122.
- [4] 杨敏剑.高铁桥梁工程大体积混凝土裂缝成因及控制措施[J].价值工程,2011,30(32):101.
- [5] 任玉鹏.大体积混凝土施工裂缝控制方法探析[J].山西建筑,2017,43(07):80-81.

Research on Foundation Selection and Construction Technology of High-speed Railway Bridge under Complex Geological Conditions

Ligang Wei

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

Abstract

With the rapid advancement of China's high-speed rail construction, the foundation design and construction techniques for bridge engineering under complex geological conditions have become crucial for ensuring project quality and safety. Complex geological areas often involve adverse geological issues such as weak soil layers, fault structures, and water-rich sand layers, which directly affect foundation bearing capacity and structural stability. This paper combines typical engineering examples to conduct research from aspects including geological feature analysis, foundation form selection, and construction technology optimization. Through comparative analysis of pile foundations, bored cast-in-place piles, enlarged foundations, and composite foundations, the paper proposes selection principles tailored to different geological environments. It also explores key technologies such as hole formation control, slurry wall protection, reinforcement cage positioning, and underwater concrete pouring, while analyzing the role of geological information monitoring in construction safety. The study demonstrates that scientific foundation selection and precise construction control can effectively mitigate adverse geological impacts, enhance structural safety and durability, and provide technical support for high-speed rail bridge construction.

Keywords

high-speed railway bridge; complex geology; foundation selection; construction technology; cast-in-place pile; information-based monitoring

复杂地质条件下高铁桥梁基础选型与施工技术研究

魏立刚

中铁十二局集团第四工程有限公司, 中国·陕西 西安 710024

摘要

随着中国高铁建设的快速推进, 桥梁工程在复杂地质条件下的基础设计与施工技术成为确保工程质量与安全的关键。复杂地质区常伴随软弱土层、断裂构造、富水砂层等不良地质问题, 直接影响基础承载力与结构稳定性。本文结合典型工程实例, 从地质特征分析、基础形式选择、施工技术优化等方面展开研究。通过对桩基础、钻孔灌注桩、扩大基础和复合地基等形式的比较, 提出了针对不同地质环境的选型原则。文章还探讨了成孔控制、泥浆护壁、钢筋笼定位和水下混凝土灌注等关键技术, 并分析了地质信息化监测在施工安全中的作用。研究表明, 科学的基础选型与精准的施工控制可有效降低不良地质影响, 提升结构安全性与耐久性, 为高铁桥梁建设提供技术支撑。

关键词

高铁桥梁; 复杂地质; 基础选型; 施工技术; 灌注桩; 信息化监测

1 引言

高铁桥梁作为高速铁路的重要组成部分, 其基础设计的合理性直接关系到线路的安全与平顺。中国地域辽阔, 地质条件复杂多样, 沿线地层分布差异显著。复杂地质条件如软土、砂卵石层、溶洞、断层破碎带等, 对桥梁基础承载特性及施工安全造成显著影响。传统的基础形式在此类地质中往往难以满足沉降控制与稳定性要求, 需在设计阶段进行精

细选型与合理配置。随着勘察技术与施工装备的进步, 基础施工由经验型逐步向科学化、信息化方向发展。本文以高铁桥梁基础工程为研究对象, 探讨复杂地质环境下的基础选型原则与施工关键技术, 旨在为类似工程提供技术参考与实践指导。

2 复杂地质条件下高铁桥梁基础设计的主要影响因素

2.1 地层结构与物理力学性质的差异性

在复杂地质条件下, 地层分布呈现出高度非均质性, 岩土层的厚度变化较大, 且存在软硬不均、夹层错杂等特点。

【作者简介】魏立刚(1997-), 男, 中国河北张家口人, 本科, 助理工程师, 从事交通工程研究。

软弱土层，如淤泥质黏土和粉质土，其抗剪强度低、压缩性高，易导致基础过大沉降，影响结构稳定性。砂卵石层虽然承载力较高，但成孔困难且容易坍塌，施工难度较大；溶岩地区存在暗洞与溶蚀缝隙，可能会影响桩基的完整性，增加施工风险。针对不同的地质环境，设计时必须通过详细的勘探资料，确定岩性分布、地下水位以及地基承载特征，确保对地层性质的全面了解。此外，通过结合动力响应分析来确定合适的基础形式，能够有效提高设计的精度和施工的安全性。只有全面评估地层结构与力学性质的差异性，才能确保高铁桥梁基础在复杂地质条件下的稳定性与可靠性。

2.2 地下水及环境应力条件的影响

地下水活动频繁的地区，地层孔隙水压力的变化会对基础的稳定性产生直接影响，尤其是在富水砂层中施工时，若泥浆比重控制不当，容易引发孔壁失稳和突泥现象，进而影响桩基的质量与安全性。地下水的化学性质还会对基础的混凝土及钢筋产生腐蚀作用，长期的水化作用会削弱材料的强度。因此，在设计时应充分考虑地下水的影响，采取有效的防渗、防腐以及排水设计，以降低地下水对结构的负面影响。同时，地震区与滑坡区的环境应力变化对基础安全同样具有重要影响。地应力的重分布可能引起不均匀沉降或变形，因此，在设计阶段必须进行动力稳定性分析和抗震校核，确保桥梁基础在极端环境下的安全性与稳定性。通过这些综合措施，能够确保高铁桥梁基础在复杂环境条件下的长期稳定性。

2.3 高铁荷载与变形控制要求

高铁桥梁的荷载与变形控制要求非常严格，尤其是在高速度下，桥梁对静态与动态响应的控制要求更高。基础不仅需要承受恒载与活载，还要考虑列车荷载频繁交替所带来的动态效应。高速列车的荷载对桥梁结构的影响较大，特别是对基础的沉降差、水平位移及不均匀变形可能造成显著影响。为确保桥梁的结构稳定性和轨道的平顺性，基础的设计必须严格控制桩顶沉降差不超过 2mm，整体沉降应小于 10mm。此外，桥梁的整体刚度与变形必须保持协调，以避免由于不均匀变形而导致的上部结构线形偏离。设计时，充分考虑高铁荷载及变形控制要求，能够确保桥梁在高铁快速运行时的安全性和舒适性，满足严格的运营标准，提升桥梁的使用寿命。

3 复杂地质条件下的基础选型原则与方案比较

3.1 桩基础在不同地质环境中的适用性

桩基础因其出色的承载力与适应性，成为高铁桥梁工程中广泛采用的基础形式。对于软弱地层或深厚覆盖层区域，钻孔灌注桩能够穿透软层，将荷载传递至深部坚硬的持力层，从而大幅提高桥梁基础的稳定性。尤其在砂卵石层与强风化岩层中，采用旋挖桩或冲击钻成孔技术，能够有效降低塌孔风险，提高施工效率。对于地层不均匀的复合地基，

常采用群桩承台结构，以分散荷载，减小因土质差异导致的沉降问题。这种方式可以保证不同土层对荷载的均匀分布，有效提高基础的整体稳定性和安全性。桩基础的多样化应用，使其在复杂地质环境下成为高铁桥梁基础建设的重要选择。

3.2 扩大基础与复合地基的应用条件

在地质条件相对稳定、上部荷载较小的地区，扩大基础作为一种经济高效的选择，具有广泛的应用前景。扩大基础能够均匀分布荷载，且施工简便，尤其在软土或地下水丰富地区，能够有效提高地基承载力。然而，扩大基础在软土地区可能面临过大沉降的问题，因此在这些区域的应用需要谨慎选择。复合地基技术，特别是通过 CFG 桩、碎石桩和高压旋喷桩等手段改善地基承载力，适用于软弱土层。这类基础结合了低成本和较小变形的优点，能够有效控制地基沉降，从而为高铁桥梁的次要结构提供可靠支撑。复合地基的应用能够确保地基稳定性并减少后期沉降问题，是在特定地质条件下的优选方案。

3.3 特殊地质环境下的基础创新模式

对于溶岩、断裂带及膨胀土等特殊地质环境，常规基础形式难以满足安全性与耐久性的要求。在这些复杂的地质条件下，可以采用桩-筏复合结构、微型桩联合支撑或钢管桩复合体系等创新基础形式。桩-筏复合基础通过筏板分散不均匀应力，有效减小基础沉降差异，提高整体稳定性。钢管桩则适用于水下或高承载需求的场景，能够提供更强的支撑力。在近年来，随着 BIM（建筑信息模型）和地质建模技术的推广，基于“信息化选型”的方法逐步得到应用，通过三维地质模拟进行基础方案比选与受力优化。这一新技术为复杂地质环境下的基础设计提供了更加科学的数据支撑，进一步提高了设计的准确性与施工的安全性。

4 复杂地质条件下高铁桥梁基础施工关键技术

4.1 成孔与护壁技术

在软土和砂层地质条件下，钻孔灌注桩的施工质量在于孔壁的稳定性与护壁技术的有效性。成孔时，必须选择比重适宜、粘度适中的泥浆进行护壁，以确保孔壁稳定与滤饼完整，避免孔壁塌陷和泥浆失水等问题。对于高水位地区，可采用正循环泥浆护壁工艺或者套管跟进工艺，以防止塌孔及渗漏现象的发生。此外，针对砂卵石层及岩溶地层，结合冲击钻与旋挖钻技术形成复合成孔方式，可以有效提高成孔的质量与效率。复合成孔技术的引入能够克服复杂地质带来的不利影响，减少因地层条件复杂所导致的施工难度。施工过程中，实时监测孔深、孔径和泥浆比重，确保孔形与设计一致性。这些措施有助于提高桩基的整体质量，保证基础施工的安全性与稳定性。

4.2 钢筋笼制作与安装控制

钢筋笼是桩基承载传力的重要构件，其制作精度与安