

公路桥隧连接段混合结构施工技术研究

陈锦茂

江苏省交通工程集团有限公司 江苏 镇江 212000

摘要：公路桥隧连接段混合结构施工技术研究聚焦于钢-混凝土组合体系、梁-拱协作体系等复杂结构的施工关键技术。通过BIM技术优化施工方案、自动化监测保障质量安全、新材料提升结构性能，结合装配式建造与绿色施工理念，有效解决了桥隧过渡段差异沉降、动力响应及界面粘结等难题。研究成果为复杂地质与荷载条件下的公路桥隧工程提供高效、可靠的施工技术体系，推动基础设施建设的智能化与可持续发展。

关键词：公路桥隧连接段；混合结构；施工技术

1 公路桥隧连接段混合结构概述

1.1 混合结构定义

混合结构是指由两种或两种以上不同材料（如混凝土、钢材、复合材料等）或结构形式（如梁、拱、壳等）通过合理组合形成的结构体系。在公路桥隧连接段中，混合结构通常结合桥梁与隧道的结构特性，通过材料性能互补或结构形式协同，实现跨越与承载功能的一体化设计。其核心在于利用不同材料的力学优势（如混凝土的抗压性、钢材的抗拉性）或结构形式的适应性（如梁式结构的灵活性、拱式结构的跨越能力），优化整体结构的受力性能与经济性，同时满足桥隧连接段复杂工况下的变形协调与耐久性要求。

1.2 混合结构特点

混合结构在公路桥隧连接段中展现出以下显著特点；第一、力学性能优化：通过材料组合（如钢-混凝土组合结构）或结构形式协同（如梁-拱组合体系），充分发挥各组分优势，提升整体承载能力与抗变形能力。第二、适应复杂工况：桥隧连接段常面临不均匀沉降、温度效应、地震作用等复杂荷载，混合结构可通过柔性连接、分阶段受力等设计策略，增强结构鲁棒性^[1]。第三、施工灵活性：预制构件与现浇工艺结合，或分阶段施工（如先梁后拱），可缩短工期并降低施工风险。第四、经济性与耐久性：合理选材与结构优化可减少材料用量，同时提升结构抗腐蚀、抗疲劳性能，延长使用寿命。第五、设计挑战：需解决不同材料间的界面粘结、协同工作机制及长期性能退化问题，对设计理论与施工技术提出更高要求。

1.3 混合结构类型

根据材料组合与结构形式，公路桥隧连接段的混合结构可分为以下类型；（1）材料混合结构：钢-混凝土组合结构：如钢箱梁与混凝土桥面板通过剪力键连接，

兼具钢材的高强度与混凝土的耐久性。复合材料增强结构：采用纤维增强复合材料（FRP）加固混凝土构件，提升抗裂性与轻量化水平。（2）结构形式混合体系：梁-拱组合体系：主梁承担竖向荷载，拱结构提供水平推力，适用于大跨度桥隧过渡段。斜拉-悬索协作体系：结合斜拉桥的刚性与悬索桥的柔性，优化跨越能力与经济性。

（3）功能混合结构：减隔震混合结构：在桥隧连接处设置耗能阻尼器或隔震支座，通过结构-耗能元件协同工作降低地震响应。预制装配混合结构：工厂预制构件与现场浇筑部分结合，提升施工效率与质量控制水平。

2 混合结构在桥隧连接段的优势

混合结构在公路桥隧连接段的应用具有显著优势，能够有效应对复杂工程挑战并提升整体性能。首先，力学性能优化是其核心优势之一，通过钢-混凝土组合、梁-拱协同等设计，充分发挥钢材抗拉、混凝土抗压的材料特性，显著提升结构承载能力与抗变形能力，尤其适用于桥隧连接段因不均匀沉降或地震作用产生的复杂应力状态。其次，适应性与灵活性突出，混合结构可结合预制装配与现浇工艺，分阶段施工以缩短工期，同时通过柔性连接或分阶段受力设计，降低温度效应、地基差异沉降等对结构的影响，增强工程鲁棒性^[2]。另外，经济性与耐久性兼具，合理选材与结构优化可减少材料用量，降低全生命周期成本。最后，功能扩展性强，混合结构可集成减隔震装置、智能监测系统等，实现结构健康监测与灾害预警，进一步提升桥隧连接段的安全性可靠性。这些优势使混合结构成为应对桥隧连接段复杂工况的理想选择。

3 公路桥隧连接段混合结构施工技术分析

3.1 施工前准备

施工前准备是确保桥隧连接段混合结构施工顺利进行的环节，需从技术、材料、设备及现场管理等多

方面进行系统规划。技术准备方面,需完成地质勘察与结构设计复核,明确桥隧连接段的地质条件(如岩土层分布、地下水水位)、结构形式(如钢-混凝土组合梁、梁-拱协作体系)及荷载特性。基于勘察结果,优化施工方案,确定关键控制点(如隧道洞口浅埋段稳定性、桥隧过渡段沉降控制)。开展BIM建模与施工模拟,预判施工风险并制定应急预案。材料与设备准备需根据设计要求采购高性能材料,如高强度钢材、耐腐蚀混凝土、高性能剪力键等,并严格检验材料质量。对于特殊设备需提前调试并储备备用件。现场准备包括场地平整、临时设施搭建及交通疏导。桥隧连接段施工空间有限,需合理规划材料堆放区、机械作业区及安全通道。需与交通管理部门协调,制定分阶段交通导改方案,减少对既有公路的影响。人员培训是保障施工质量的重要措施,需对施工人员开展技术交底,明确混合结构施工要点(如钢-混凝土界面处理、预应力张拉顺序),并组织安全培训,强化高空作业、爆破作业等高风险环节的管控。

3.2 隧道洞口浅埋偏压段施工技术

隧道洞口浅埋偏压段是桥隧连接段的薄弱环节,需采取针对性技术措施确保施工安全与质量。地层加固是首要任务,可采用超前小导管注浆、管棚支护或地表注浆等方式加固围岩,提高洞口段自稳能力。对于偏压严重的地段,需设置抗滑桩或挡土墙平衡侧向土压力。开挖方法选择需结合地质条件与偏压程度,优先采用短台阶法或CD法(中隔壁法)分层开挖,减少单次开挖跨度,降低围岩扰动。开挖过程中需实时监测拱顶沉降、周边收敛及地表位移,动态调整支护参数。

初期支护强化是关键环节,需及时施作钢拱架、喷射混凝土及锚杆,形成封闭支护环。对于偏压段,可加密钢拱架间距或增设临时仰拱,增强支护体系刚度。二次衬砌施工需在围岩变形稳定后进行,采用分段跳仓浇筑或模板台车整体浇筑,确保衬砌混凝土密实度与抗渗性。需预留注浆管,对衬砌背后空洞进行回填注浆。防排水处理不可忽视,需设置多级防水层(如防水板、盲沟)与排水系统(如纵向排水管、横向引水管),防止地下水渗透对结构耐久性造成影响。

3.3 桥隧过渡段施工技术

桥隧过渡段是连接桥梁与隧道的枢纽,需解决差异沉降、动力响应及结构衔接等问题。地基处理是基础,可采用强夯法、水泥搅拌桩或桩筏基础改善地基承载力,减少工后沉降。对于软土地基,需设置砂井或塑料排水板加速固结。结构衔接设计需确保桥梁与隧道受力连续,可采用渐变截面梁、伸缩缝或铰接装置实现平滑

过渡。施工顺序控制至关重要,通常遵循“先隧道后桥梁”或“分段交替施工”原则。施工过程中需实时监测沉降与位移,必要时调整施工参数。预应力技术应用可有效控制裂缝与变形,例如在过渡段设置横向预应力束,平衡桥隧结构间的水平力。同时需加强混凝土养护,防止收缩裂缝产生。

3.4 混合结构连接技术

混合结构连接技术是桥隧连接段施工的核心,直接影响结构整体性与耐久性。钢-混凝土界面连接需确保剪力键(如PBL剪力键、栓钉剪力键)的可靠锚固。施工前需对钢构件表面进行喷砂除锈,并涂刷界面粘结剂。混凝土浇筑时需分层振捣,避免界面气泡与空洞。预应力连接技术适用于梁-拱协作体系或桥隧过渡段,通过张拉预应力筋实现结构内力重分布。施工前需精确计算预应力损失,采用智能张拉系统控制张拉力与伸长值。湿接缝与干接缝处理需根据结构形式选择。湿接缝需保证混凝土配合比与浇筑质量,干接缝需确保接触面平整并设置定位销。接缝处需设置防水层与密封胶,防止水分渗透。监测与检测贯穿施工全过程,采用应变计、位移计等监测连接部位应力与变形,并通过超声波检测、回弹法评估混凝土质量。对于关键连接节点,需进行破坏性试验验证其可靠性。防腐与耐久性设计不可忽视,需对钢构件进行热浸镀锌或环氧涂层防腐处理,并在混凝土中添加阻锈剂。同时需设置排水通道与通风口,降低腐蚀介质积聚风险^[3]。

4 公路桥隧连接段混合结构施工质量控制

4.1 施工质量影响因素分析

公路桥隧连接段混合结构的施工质量受多因素综合影响。设计因素是施工质量的源头保障,若结构设计不合理(如钢-混凝土界面剪力键布置密度不足、预应力张拉顺序不明确),易导致结构受力不均或局部应力集中。设计文件对施工工艺要求不明确(如混合结构连接节点细部构造缺失),可能引发施工偏差。材料性能直接影响结构耐久性,材料运输与储存不当,也会降低其使用性能。施工工艺是关键环节,混合结构施工需多种协同作业,若钢构件焊接质量不达标、混凝土振捣不密实或预应力张拉失控,将严重影响结构安全性。施工顺序不合理(如先浇筑混凝土后安装钢构件)可能导致界面粘结失效。环境因素不可忽视,桥隧连接段常处于复杂地质条件或恶劣气候中,地基沉降、冻融循环或雨水渗透可能引发结构开裂或腐蚀。人员管理是质量控制的薄弱环节,施工人员技能水平不足、质量意识淡薄或违规操作,以及监理单位监管不到位,均可能导致质量

隐患。

4.2 质量控制标准与检测方法

为确保混合结构施工质量,需建立明确的标准体系与科学的检测方法。质量控制标准应覆盖材料、构件及结构整体性能。例如,钢材需符合《桥梁用结构钢》(GB/T714)标准,混凝土强度等级需满足设计要求(如C50及以上),钢-混凝土界面抗剪强度需通过试验验证。对于预应力张拉,需控制张拉力偏差在 $\pm 5\%$ 以内,伸长值误差不超过 $\pm 6\%$ 。检测方法需结合现场实测与实验室分析;对钢材进行拉伸试验、化学成分分析;对混凝土进行抗压强度试验、抗渗性检测;对剪力键进行抗剪承载力试验。采用超声波检测混凝土密实度,磁粉检测焊缝质量,回弹法评估混凝土强度。通过静载试验验证结构承载力,动载试验评估动力响应,并监测桥隧连接段沉降与位移。应用红外热成像检测混凝土内部缺陷,地质雷达探测地基空洞,确保结构隐蔽部位质量。另外,需建立质量追溯体系,对关键工序,进行全过程录像记录,实现质量责任可追溯。

4.3 质量保证措施

为保障混合结构施工质量,需从技术、管理、人员及应急响应四方面制定系统性措施。技术保证措施:优化施工方案,明确关键工序控制要点(如钢-混凝土界面处理、预应力张拉顺序)。引入BIM技术进行施工模拟,预判质量风险并优化工艺。采用智能化设备,减少人为误差。管理保证措施:实行质量责任制,明确项目经理、技术负责人及施工班组的质量职责。加强过程管控,建立“三检制”(自检、互检、专检),对隐蔽工程实行举牌验收制度。定期召开质量分析会,针对问题制定整改措施并跟踪闭环。人员培训措施:对施工人员开展专项技能培训,重点培训钢构件焊接、预应力张拉等关键工艺。强化质量意识教育,通过案例警示、技术比武提升全员质量素养。要求特种作业人员持证上岗,并定期进行技能复核。应急响应措施:制定质量事故应急预案,明确裂缝、渗漏等常见问题的处理流程。储备应急物资,确保突发问题及时处置。建立质量事故追溯机制,对责任单位与个人进行问责。

5 公路桥隧连接段混合结构施工技术创新

在公路桥隧连接段混合结构施工中,技术创新是突破传统工艺瓶颈、提升工程品质的关键驱动力。当前,智能化与数字化技术融合成为核心方向。同时,自动化监测与物联网技术的应用显著提升了质量控制效率,在关键节点嵌入光纤传感器与应变计,实时监测结构应力、变形及温度场变化,数据通过云平台传输分析,实现动态预警与参数修正^[4]。新材料与工艺革新进一步增强了结构性能,如采用高延性混凝土(ECC)替代传统混凝土,其多裂缝开展特性可有效分散应力集中,降低桥隧过渡段裂缝风险;研发新型剪力键(如波纹钢腹板-混凝土组合键)提升钢-混凝土协同工作能力,减少界面滑移效应。装配式建造技术的推广大幅缩短了施工周期,通过工厂预制钢构件、混凝土节段,现场采用高精度定位拼装工艺,结合3D激光扫描技术确保构件安装精度,减少现场湿作业对环境的干扰。绿色施工理念也贯穿技术创新全链条。这些创新技术不仅提升桥隧连接段混合结构的耐久性、安全性与经济性,更为公路交通基础设施的可持续发展提供技术支撑。

结束语

公路桥隧连接段混合结构施工技术的研究与实践,标志着桥梁与隧道工程向精细化、智能化方向迈进。未来,随着新材料研发、数字孪生技术及人工智能算法的深度融合,施工技术将实现更高精度的动态调控与全生命周期管理。绿色施工与低碳建造将成为行业共识,助力交通基础设施在复杂环境中实现安全、耐久与环保的协同发展,为构建现代化综合交通体系提供坚实技术保障。

参考文献

- [1]马文丽.公路桥梁隧道工程施工技术与安全管控[J].科学与财富,2020(08):201-205.
- [2]王也.基于城市公路桥梁工程施工技术要点分析[J].价值工程,2021,40(08):194-195.
- [3]晏社刚.高速公路桥隧连接工程中隧道洞门标准施工技术研究[J].运输经理世界,2022,(22):80-82.
- [4]蒙重光.探讨高速公路桥隧连接工程中的隧道洞门施工技术[J].科技资讯,2023,21(17):132-135.