

# 高速公路桥隧连接工程关键技术

孟庆莹

山东省路桥集团有限公司 山东 济南 250000

**摘要:** 高速公路桥隧连接工程涉及多领域关键技术。本文详细阐述桥隧连接段施工关键技术,包括隧道洞门、桥台施工及桥梁架设等方面;分析结构受力与变形协调技术,涉及受力传递、变形控制及耐久性保障;探讨特殊地质条件处理技术,涵盖软弱围岩、岩溶地质及采空区处理;介绍施工监测与信息化技术,包含施工过程监测、信息化施工管理及运营期健康监测。这些技术为工程安全高效建设与运营提供支撑。

**关键词:** 高速公路;桥隧连接工程;关键技术;特殊地质处理;施工监测

**引言:** 高速公路建设不断推进,桥隧连接工程日益增多。此类工程连接桥梁与隧道,结构复杂、受力特殊,且常面临软弱围岩、岩溶地质、采空区等不良地质条件,施工难度大、风险高。同时,为确保工程在施工及运营期间的安全与稳定,需对结构受力与变形进行有效协调,并运用先进的施工监测与信息化技术。因此,深入研究高速公路桥隧连接工程关键技术,对提高工程建设质量、保障运营安全具有重要意义。

## 1 桥隧连接段施工关键技术

### 1.1 隧道洞门施工技术

在隧道洞门施工中,零开挖进洞理念的实施需严格遵循地质条件分析与精准测量定位。通过地质雷达、TSP超前地质预报等手段,探明洞口段围岩性质、破碎程度及地下水分布,为进洞方案制定提供依据<sup>[1]</sup>。实施时,采用短进尺、弱爆破开挖方式,每次进尺控制在0.5-1米,减少对周边岩体的扰动,并配合超前小导管注浆加固,形成稳定的承载拱圈。超前支护与洞门加固需协同发挥作用,其联合作用机制是,超前支护通过提前对围岩进行加固处理,有效提升洞口段的整体稳定性;而洞门加固则采用锚杆、钢筋网、喷射混凝土等措施,其中锚杆长度为2-3米,间距为0.8-1.2米,进一步增强结构的抗变形能力。二者相互配合,共同有效控制洞口塌方风险。洞门与桥台交叉作业的时空协调需科学规划施工顺序,优先完成隧道洞口段初期支护,为桥台施工创造稳定作业面;桥台基础开挖时,采用分层分段开挖方式,每层开挖深度不超过1.5米,避免大面积开挖导致围岩应力释放过快;同时,加强洞门与桥台连接部位的监测,每2-3天进行一次变形数据采集,根据变形数据动态调整施工参数,确保结构安全。

### 1.2 桥台施工控制技术

隧道内桥台浇筑的模板支撑体系设计需综合考虑空间

限制与荷载要求。采用定型钢模板与可调式支架组合,通过有限元分析优化支架布置,支架间距控制在0.6-1米,确保模板刚度与稳定性满足混凝土浇筑需求。桥台与隧道二次衬砌的连接构造处理需注重细节设计,在连接部位预埋钢筋,预埋钢筋直径为16-22毫米,间距为0.2-0.3米,采用植筋技术增强结构整体性;浇筑时,采用微膨胀混凝土填充缝隙,减少收缩裂缝产生。桥台基础开挖对隧道围岩的扰动控制需严格控制开挖尺寸与进度,采用机械开挖与人工修整结合方式,减少爆破振动影响;开挖后及时施作初期支护,封闭围岩,防止应力释放导致坍塌;同时,加强围岩变形监测,每1-2天监测一次围岩位移,根据监测数据调整支护参数,确保施工安全。

### 1.3 桥梁架设技术

隧道内架设桥梁的特殊起重设备选型需根据隧道净空、桥梁重量及施工环境综合确定。优先选用低净空、大吨位门式起重机,起重能力为50-100吨,通过优化设备结构与行走机构,满足隧道内作业需求。边梁就位与隧道明洞扩建需分阶段实施,先完成边梁架设,再根据边梁位置扩建明洞,避免结构冲突;扩建时采用分段浇筑方式,每段长度为3-5米,每段浇筑完成后及时养护,确保混凝土强度满足设计要求。桥隧连接段预应力张拉的时空效应控制需结合结构受力特点与混凝土龄期确定张拉顺序与时间,采用分批张拉方式,先张拉纵向预应力筋,再张拉横向与竖向预应力筋,纵向预应力筋张拉力为500-800千牛,确保结构受力均衡;张拉时严格控制张拉力与伸长值,避免超张拉导致结构破坏。

## 2 结构受力与变形协调技术

### 2.1 受力传递机制分析

桥隧连接段荷载传递路径的数值模拟需借助有限元软件,通过构建精细化三维模型,模拟不同工况下荷载在桥台、隧道衬砌及基础间的传递过程<sup>[2]</sup>。模型中需准确

反映材料非线性、接触非线性等特性,确保计算结果贴近实际。桥台与隧道衬砌的共同作用模型建立需考虑结构间相互作用关系,通过设置弹簧单元或接触单元模拟桥台与衬砌间的连接刚度,分析不同连接方式对结构受力的影响,为设计优化提供依据。地震作用下桥隧连接结构的动力响应特性研究需结合地震动参数与结构动力特性,采用时程分析法或反应谱分析法,评估结构在地震作用下的内力分布、变形特征及损伤程度,为抗震设计提供理论支撑。

## 2.2 变形控制技术

桥台与隧道基础沉降差的监测要采用高精度测量仪器,像静力水准仪、全站仪等,定期对基础沉降变化进行监测,并建立沉降监测数据库。依据监测数据,运用注浆加固、堆载预压等补偿技术来调整基础沉降,保证桥台与隧道间沉降差符合设计要求。桥隧连接段伸缩装置的选型,需综合考量结构变形量、温度变化范围以及车辆荷载等因素,优先选用模数式伸缩装置,这类装置变形适应能力强、密封性能好。在安装工艺方面,要严格控制伸缩装置的安装温度,确保能在设计温度范围内自由伸缩;同时,增强伸缩装置与桥台、隧道衬砌的连接强度,防止出现松动脱落的情况。针对温度效应引起的结构变形协调问题,可通过设置温度伸缩缝、采用低热膨胀系数材料等措施加以解决。温度伸缩缝的间距要根据结构类型、温度变化范围以及材料热膨胀系数计算确定,如此才能确保结构在温度变化时能够自由变形,避免产生附加应力。

## 2.3 耐久性保障技术

桥隧连接段防水体系的整体设计需遵循“防排结合、多道设防”原则,通过设置防水层、排水盲沟等措施,形成完整的防水排水系统。防水层需选用耐候性好、粘结强度高的材料,如高分子防水卷材、聚氨酯防水涂料等,防水卷材厚度为1.5-2毫米,确保防水效果持久。混凝土裂缝控制与耐久性提升需从材料选择、配合比设计、施工工艺等方面入手。选用低热水泥、优质骨料及外加剂,优化混凝土配合比,降低水化热与收缩变形;施工过程中加强振捣与养护,提高混凝土密实度与抗裂性能。异质结构交接面的防腐处理需根据材料特性选择合适的防腐材料,如环氧树脂涂料、锌基涂层等,通过涂刷、喷涂等方式形成防腐保护层,涂层厚度为0.1-0.2毫米,防止腐蚀介质侵入,延长结构使用寿命。

## 3 特殊地质条件处理技术

### 3.1 软弱围岩处理技术

桥台基础加固的注浆工艺参数优化,需结合软弱围

岩的物理力学性质开展<sup>[3]</sup>。通过开展室内试验与现场试验,确定注浆材料的类型、水灰比、注浆压力以及扩散半径等关键参数。注浆材料优先选用水泥-水玻璃双液浆,这种材料具有早期强度高、凝结时间可调的特点,能有效填充围岩孔隙,提升基础承载力。隧道洞口段超前支护的适应性设计需根据围岩分级与开挖方式确定支护形式。对于IV、V级软弱围岩,采用超前小导管注浆与钢架联合支护,小导管长度、间距及外插角需通过数值模拟与现场监测数据优化,确保支护结构与围岩共同变形,有效控制洞口塌方风险。桥隧连接段滑坡体的综合治理需遵循“治坡先治水”原则,通过地表排水、地下截水等措施降低滑坡体含水量。结合抗滑桩、预应力锚索等支挡结构,提升滑坡体整体稳定性。治理过程中需加强监测,根据变形数据动态调整治理方案,确保施工安全。

### 3.2 岩溶地质处理技术

溶洞对桥台稳定性的影响评估需通过地质调查、物探与钻探等手段,查明溶洞的规模、形态、充填情况及与桥台的空间关系。岩溶地质复杂多变,溶洞的这些特征直接关系到桥台的稳定性,准确查明是评估的基础。建立三维地质模型,分析溶洞在荷载作用下的应力分布与变形特征,评估其对桥台稳定性的影响程度。岩溶区桥隧连接段的注浆加固技术需根据溶洞发育程度选择合适的注浆方式。对于充填型溶洞,采用渗透注浆;对于空洞型溶洞,采用劈裂注浆或压密注浆。注浆材料需具备良好的流动性与胶结性能,良好的性能可保证注浆材料充分填充溶洞,形成稳固的整体,确保溶洞充填密实,提升围岩整体性。地下水位变化对结构受力的影响分析需建立地下水渗流与结构受力耦合模型,模拟不同水位条件下结构的内力分布与变形特征。根据分析结果,采取设置排水盲沟、调整结构埋深等措施,降低地下水位变化对结构受力的不利影响。

### 3.3 采空区处理技术

采空区对桥隧连接段稳定性的评价需结合采空区的分布范围、开采历史及顶板管理方式等因素,这些因素相互关联,共同影响着采空区的稳定性,全面考虑才能准确评价。采用数值模拟与经验类比相结合的方法,评估采空区在荷载作用下的变形与塌陷风险。采空区治理的充填材料与工艺选择需根据采空区的规模与地质条件确定。对于浅部采空区,采用干砌石、浆砌石等刚性充填材料;对于深部采空区,采用粉煤灰、水泥砂浆等柔性充填材料。不同深度的采空区受力情况不同,选择合适的充填材料能更好地适应其特性。充填工艺需严格控制充填速度与充填密实度,确保采空区充填效果满足设

计要求。桥隧连接段跨越采空区的结构安全储备设计需考虑采空区变形对结构的影响,通过增加结构刚度、设置变形缝等措施,提升结构的适应能力。同时,加强结构健康监测,根据监测数据及时调整安全储备系数,确保结构长期安全运营。

#### 4 施工监测与信息化技术

##### 4.1 施工过程监测技术

桥隧连接段围岩变形的实时监测系统需集成多种传感器,涵盖收敛计、多点位移计及激光测距仪等设备<sup>[4]</sup>。通过在围岩关键部位布设监测点,利用无线传输技术将数据实时传送至监控中心,实现变形数据的连续采集与动态分析。该系统能及时捕捉围岩变形异常,为施工参数调整提供依据。桥台与隧道衬砌应变的分布式光纤传感技术利用光纤对应变的敏感特性,将光纤沿结构纵向或环向布置,通过测量光纤中光信号的变化,获取结构应变分布信息。此技术具有抗电磁干扰、耐腐蚀、测量精度高等优点,可实现长距离、大范围的结构应变监测。架梁过程中结构受力状态的动态监测方法需结合应变片、压力传感器等设备,在桥梁关键截面及支座位置布设监测点,实时监测结构在架设过程中的应力、应变及位移变化。通过数据分析,评估结构受力是否满足设计要求,确保架梁施工安全。

##### 4.2 信息化施工管理技术

BIM技术在桥隧连接段施工模拟中的应用体现在三维模型构建与施工过程仿真。通过建立包含地形、地质、结构及施工设备的三维模型,模拟不同施工阶段的工序安排、资源调配及空间冲突,优化施工方案,减少施工干扰。基于物联网的施工进度与质量协同管控平台集成传感器、移动终端及云计算技术,实现施工进度数据的实时采集与质量信息的动态跟踪。管理人员通过平台可随时掌握施工进展,及时发现质量隐患,采取针对性措施,提升施工管理水平。施工风险预警系统的构建与运行机制需结合风险识别、评估与预警模型,通过采集施工监测数据、环境参数及历史风险信息,利用大数据分析技术评估风险等级。当风险指标超过阈值时,系统自动发出预警信号,指导现场人员采取应急措施,降低风

险损失。

##### 4.3 运营期健康监测技术

桥隧连接段长期性能监测指标体系建立需综合考虑结构受力、变形、耐久性 & 环境作用等因素,确定关键监测参数,如应力、应变、位移、裂缝宽度、混凝土碳化深度及氯离子含量等。通过长期监测数据的积累,分析结构性能退化规律,为养护维修提供依据<sup>[5]</sup>。大数据驱动的结构状态评估与预测模型利用机器学习算法,对海量监测数据进行挖掘与分析,建立结构状态与影响因素之间的映射关系。通过模型训练与验证,实现对结构当前状态的准确评估及未来性能的预测,为结构安全评估提供科学依据。基于机器学习的病害发展规律分析方法通过收集历史病害数据,利用聚类分析、关联规则挖掘等技术,揭示病害发生、发展的内在规律。结合结构当前状态监测数据,预测病害发展趋势,指导养护维修决策,延长结构使用寿命。

#### 结束语

高速公路桥隧连接工程关键技术涵盖施工、地质处理、监测管理等多方面。施工关键技术确保各环节有序推进,保障结构安全;特殊地质条件处理技术有效应对复杂地质问题,降低工程风险;施工监测与信息化技术为施工与运营提供实时数据支持,实现科学决策。这些关键技术的综合应用,有助于提升桥隧连接工程的建设水平与运营质量,为高速公路的安全畅通奠定坚实基础,推动行业技术不断进步。

#### 参考文献

- [1]刘云.山区高速公路桥隧连接工程关键性技术研究[J].运输经理世界,2022(27):92-94.
- [2]周建.山区高速公路桥隧连接工程关键性技术研究[J].运输经理世界,2023(14):83-85.
- [3]黄方成.探究山区高速公路桥隧连接工程关键性技术[J].建筑工程技术与设计,2025,13(12):145-147.
- [4]张保国.高速公路桥隧连接段混合结构施工技术分析[J].交通世界(下旬刊),2022(12):161-163.
- [5]张强.浅谈道路桥梁中桥隧连接工程关键技术分析[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2022(4):3841-3842.