

桥梁隧道施工常见问题与控制对策分析

何路青

杭州市富阳区交通建设服务保障中心, 浙江, 杭州 311305

DOI:10.61369/ME.2025070021

摘 要： 桥梁隧道作为交通基础设施的关键节点，其施工质量直接决定工程结构安全与使用寿命。当前桥梁隧道施工中，受地质条件复杂、工艺管控不严、技术应用不当等因素影响，常出现结构裂缝、隧道塌方、钢筋锈蚀、混凝土强度不足等问题，不仅增加返工成本，还埋下安全隐患。本文结合桥梁隧道施工实际工况，系统梳理桥梁施工（如桩基偏位、预应力损失）与隧道施工（如围岩失稳、初期支护变形）的典型问题，深入分析问题成因，并从“勘察设计优化、施工工艺管控、技术装备升级、质量监测强化”四个维度提出针对性控制对策。通过工程案例验证，该对策体系可使桥梁隧道施工质量合格率提升至98%以上，显著降低病害发生率，为交通基础设施工程质量保障提供实践参考。

关 键 词： 桥梁隧道施工；常见问题；控制对策；结构裂缝

Analysis of Common Problems and Control Countermeasures in Bridge and Tunnel Construction

He Luqing

Hangzhou Fuyang District Transportation Construction Service Guarantee Center, Hangzhou, Zhejiang 311305

Abstract： As key nodes of transportation infrastructure, the construction quality of Bridges and tunnels directly determines the safety and service life of engineering structures. At present, in the construction of Bridges and tunnels, due to factors such as complex geological conditions, lax process control, and improper application of technology, problems such as structural cracks, tunnel collapses, steel bar corrosion, and insufficient concrete strength often occur. These not only increase the cost of rework but also pose safety hazards. This article, in light of the actual working conditions of bridge and tunnel construction, systematically sorts out typical problems in bridge construction (such as pile foundation misalignment and prestress loss) and tunnel construction (such as instability of surrounding rock and deformation of initial support), deeply analyzes the causes of these problems, and proposes targeted control countermeasures from four dimensions: "optimization of survey and design, control of construction techniques, upgrading of technical equipment, and strengthening of quality monitoring". Through engineering case verification, this countermeasure system can increase the qualified rate of bridge and tunnel construction quality to over 98%, significantly reduce the incidence of diseases, and provide practical references for the quality assurance of transportation infrastructure projects.

Keywords： bridge and tunnel construction; common questions; control countermeasures; structural cracks

前言

随着我国交通网络向山区、复杂地质区域延伸，桥梁隧道工程占比逐年提升——据交通运输部数据，2024年全国新建公路桥梁超5000座、隧道超800座，其中60%以上位于岩溶、断层、高陡边坡等复杂地质区域。桥梁隧道施工环境特殊，面临“地质条件不可控、施工空间受限、技术要求高”等挑战：桥梁施工需跨越江河、峡谷，承受复杂荷载；隧道施工需穿越不同岩层，应对围岩压力、涌水等风险。

当前桥梁隧道施工中，质量与安全问题频发：某桥梁工程因桩基钢筋笼偏位，导致桩体承载力不足，需返工处理，延误工期2个月；某隧道工程因初期支护强度不够，引发围岩塌方，造成经济损失超千万元。这些问题不仅源于地质条件的复杂性，更与勘察不细致、工艺不规范、管控不到位密切相关。本文基于桥梁隧道施工实践，分类剖析典型问题及成因，构建科学的控制对策体系，旨在为提升桥梁隧道施工质量、保障工程安全提供解决方案。

一、桥梁隧道施工的典型问题及成因分析

桥梁与隧道施工场景差异显著，典型问题各有侧重。结合工程实践，桥梁施工问题集中于基础与结构施工环节，隧道施工问题聚焦于围岩控制与支护体系，具体问题及成因如下：

（一）桥梁施工常见问题及成因

桥梁作为跨越结构，其基础、墩柱、上部结构施工质量直接影响整体稳定性，常见问题包括：

1. 桩基施工问题：偏位、缩径与断桩

典型表现：桩基成孔后钢筋笼偏位超规范（ $\geq 50\text{mm}$ ），桩身混凝土出现缩径（直径偏差超 -5% ），甚至因塌孔、混凝土供应中断导致断桩。

核心成因：一是勘察不细致，未探明地下孤石、溶洞分布，钻孔时钻头偏移引发桩基偏位；二是成孔工艺不当，对砂层、卵石层未采用泥浆护壁或泥浆比重控制不合理（如砂层泥浆比重应 $1.2\sim 1.3$ ，实际仅 1.0 ），导致孔壁坍塌；三是钢筋笼安装固定不牢，下放过程中受孔壁摩擦偏移，或混凝土浇筑时导管碰撞钢筋笼致其移位。^[1]

工程案例：某跨河大桥桩基施工中，因未探明河床下 3m 处的孤石，钻孔时钻头偏移，导致5根桩基偏位达 80mm ，需重新钻孔，增加成本超百万元。

2. 混凝土结构裂缝：早期干缩与荷载裂缝

典型表现：墩柱、盖梁、箱梁等混凝土结构浇筑后7天内出现表面干缩裂缝（宽度 $\geq 0.2\text{mm}$ ），或运营前出现荷载型裂缝（如箱梁腹板斜裂缝）。

核心成因：一是配合比设计不合理，水泥用量过高（如超过 $400\text{kg}/\text{m}^3$ ）导致水化热过大，内外温差超 25°C 引发温度裂缝；二是养护不及时，浇筑后未覆盖保湿或养护时间不足（规范要求不少于7天，实际仅3天），表面水分快速蒸发形成干缩裂缝；三是模板拆除过早，混凝土强度未达设计值（如仅达70%设计强度），无法承受自身重量引发裂缝。

3. 预应力损失：张拉与锚固失效

典型表现：预应力箱梁张拉后，预应力损失超设计值（规范允许损失 $\leq 10\%$ ，实际达 15% ），导致梁体承载能力下降。

核心成因：一是张拉工艺不规范，未按“对称张拉、分级加载”原则施工，或张拉设备未校准（油压表误差超 $\pm 2\%$ ），导致张拉力不足；二是锚具质量缺陷，夹片硬度不够或锚固面不平整，张拉后出现滑丝、断丝；三是孔道压浆不密实，水泥浆泌水、离析形成空洞，预应力筋锈蚀后截面减小，引发后期损失。

（二）隧道施工常见问题及成因

隧道施工需平衡围岩稳定与支护强度，常见问题集中于围岩控制、支护体系与防排水环节：

1. 围岩失稳：塌方与涌水突泥

典型表现：隧道开挖后24小时内出现掌子面坍塌（范围超 10m^3 ），或穿越富水地层时出现涌水突泥（涌水量 $\geq 50\text{m}^3/\text{h}$ ）。

核心成因：一是超前地质预报不到位，未采用地质雷达、超前钻探等手段探明前方断层、富水层分布，盲目开挖；二是开挖

方法不当，对IV、V级围岩（稳定性差）仍采用全断面开挖，而非台阶法或CD法，开挖循环进尺超规范（V级围岩应 $\leq 1.5\text{m}$ ，实际达 3m ），导致围岩暴露时间过长；三是初期支护不及时，开挖后未在12小时内喷射混凝土（厚度应 10cm ，实际仅 5cm ），围岩失去支撑引发坍塌。^[2]

工程案例：某山区隧道穿越V级富水围岩时，因未做超前钻探，开挖后遭遇断层涌水，涌水量达 $80\text{m}^3/\text{h}$ ，掌子面坍塌范围 20m^3 ，停工修复1个月。

2. 初期支护变形：钢支撑扭曲与喷射混凝土脱落

典型表现：钢支撑安装后出现横向位移（ $\geq 100\text{mm}$ ）或扭曲，喷射混凝土与围岩贴合不紧密，出现空鼓、脱落。

核心成因：一是钢支撑选型不当，对V级围岩未采用I20b型钢（实际用I16型钢），承载力不足；二是钢支撑安装不牢，拱脚未落在坚实基础上（如置于虚渣上），或未与锚杆焊接固定，受围岩压力推移；三是喷射混凝土工艺差，骨料级配不合理（粗骨料粒径超 15mm ）或喷射压力不足（应 $0.2\sim 0.4\text{MPa}$ ，实际仅 0.1MPa ），导致混凝土密实度低、附着力差。

3. 防排水失效：衬砌渗漏水

典型表现：隧道二次衬砌施工后，拱顶、边墙出现渗漏水（湿润面积 $\geq 0.5\text{m}^2$ ）或滴水，运营后形成冻胀破坏（严寒地区）。

核心成因：一是防水板铺设不当，焊接质量差（焊缝未做充气检测，气压保持时间不足5分钟）或铺设时被尖锐岩石划破；二是止水带安装偏移，中埋式止水带未居中放置，或接头未焊接，形成渗水通道；三是衬砌混凝土浇筑不密实，拱顶未采用注浆补密，存在蜂窝、麻面，水沿缝隙渗入。

二、桥梁隧道施工问题的针对性控制对策

针对桥梁隧道施工的典型问题，需从“源头勘察、过程管控、技术升级、质量监测”四个维度构建对策体系，实现“事前预防、事中控制、事后补救”的全流程管理。

（一）勘察设计优化：筑牢施工质量基础

勘察设计是规避施工问题的前提，需结合工程地质条件细化方案：

1. 桥梁勘察设计对策

精细化地质勘察：采用“钻探+物探”结合方式，探明桩基施工区域的孤石、溶洞、地下水位分布，对复杂地层（如卵石层）增加钻孔数量（每 50m 至少1个勘察孔），出具详细地质柱状图；对跨河、跨谷桥梁，补充水文勘察，明确水流速度、冲刷深度，优化基础埋深设计（如冲刷深度 3m ，基础埋深应超 5m ）。

优化结构与配合比设计：混凝土配合比采用“低水泥用量、高掺合料”方案（如水泥用量 $\leq 350\text{kg}/\text{m}^3$ ，掺加20%–30%粉煤灰），降低水化热；对预应力箱梁，优化孔道布置，采用真空辅助压浆设计，减少预应力损失；对高墩柱，设计渐变截面，增强抗裂性能。^[3]

2. 隧道勘察设计对策

超前地质预报体系：采用“长距离预报（地质雷达，探测距

离30–50m)+短距离验证(超前钻探,深度5–10m)”组合方式,每循环开挖前完成预报,明确前方围岩级别、富水情况;对断层、岩溶区域,出具专项处理方案(如超前小导管注浆加固)。

支护与防排水设计优化:根据围岩级别确定开挖方法与支护参数(Ⅳ级围岩用台阶法,初期支护含I18型钢+10cm喷射混凝土;Ⅴ级围岩用CD法,支护含I20b型钢+12cm喷射混凝土);防水板采用EVA材质(厚度 $\geq 1.5\text{mm}$),设计双焊缝焊接工艺,止水带采用中埋式+背贴式组合,增强防排水效果。

(二) 施工工艺管控: 规范操作流程

施工过程管控是控制问题的核心,需针对关键工序制定标准化作业方案:

1. 桥梁施工工艺管控

桩基施工标准化:成孔前校准钻孔设备(钻头垂直度误差 $\leq 0.5\%$),砂层、卵石层采用优质泥浆(砂层比重1.2–1.3,黏度18–22s),钢筋笼安装采用“双点固定+导向架”,下放速度控制在0.5m/min以内;混凝土浇筑采用导管法,导管埋深控制在2–6m,避免断桩。

混凝土施工管控:浇筑前检测模板平整度(误差 $\leq 3\text{mm/m}$)与支撑牢固性,浇筑时分层厚度 $\leq 30\text{cm}$,振捣密实(振捣棒插入间距 $\leq 50\text{cm}$,每个点位振捣20–30s);浇筑后覆盖土工布保湿,养护时间不少于7天(大体积混凝土不少于14天),采用测温仪监测内外温差,超25℃时覆盖保温被。

预应力施工管控:张拉设备(千斤顶、油压表)每6个月校准1次,张拉按“0→10%→20%→100%设计拉力”分级加载,持荷时间 ≥ 5 分钟;孔道压浆采用真空压浆工艺(真空度 $\geq -0.08\text{MPa}$),水泥浆水灰比0.26–0.28,压浆后24小时内禁止碰撞梁体。^[4]

2. 隧道施工工艺管控

围岩开挖与支护:严格按“短进尺、弱爆破、强支护、快封闭”原则施工,Ⅳ级围岩开挖循环进尺 $\leq 2\text{m}$,Ⅴ级围岩 $\leq 1.5\text{m}$;爆破采用光面爆破,周边眼间距 $\leq 40\text{cm}$,减少对围岩扰动;开挖后12小时内完成初期支护,钢支撑拱脚置于C20混凝土基础上,喷射混凝土采用湿喷工艺(压力0.3–0.5MPa),确保密实度。

防排水施工管控:防水板铺设前清理围岩表面尖锐凸起,焊接采用双焊缝(宽度 $\geq 10\text{mm}$),每100m做1处充气检测(气压0.2MPa,保持15分钟压降 $\leq 0.02\text{MPa}$);止水带安装采用“钢筋卡固定+居中布置”,接头采用热硫化焊接;二次衬砌浇筑时,拱顶预留注浆孔,浇筑后7天内进行回填注浆(压力0.2–0.3MPa)。^[5]

(三) 技术装备升级: 提升施工精度

引入先进技术与装备可减少人为误差,提升施工质量稳定性:

1. 桥梁施工装备升级:采用桩基钻孔定位系统(GPS定位精度 $\pm 10\text{mm}$),实时监测钻头垂直度;使用混凝土智能养护系统(自动喷水、测温,温差超阈值时报警);预应力张拉采用智能张拉设备(自动控制张拉力与持荷时间,数据实时上传),避免人为操作误差。

2. 隧道施工装备升级:配置隧道挖掘机机器人(TBM)或三臂凿岩台车,实现开挖、支护自动化,减少开挖偏差;采用喷射混凝土智能配比系统(自动控制骨料、水泥、外加剂比例),保证混凝土质量均匀;使用隧道超前地质预报系统(多频地质雷达+超前钻机),精准探明前方地质风险。

(四) 质量监测强化: 及时发现与补救

建立全流程质量监测体系,确保问题早发现、早处理:

1. 桥梁施工监测:桩基施工后采用低应变法或超声波检测(检测比例100%),判定桩身完整性;混凝土结构采用回弹法+钻芯法检测强度(每500m³混凝土取1组芯样),用裂缝宽度仪监测裂缝发展;预应力施工后采用应力传感器监测预应力损失(每跨梁布置3个传感器),超限时补张拉。

2. 隧道施工监测:采用隧道监控量测系统,监测围岩收敛(每5m布置1个监测断面,初期1次/天)、拱顶下沉(精度 $\pm 1\text{mm}$),位移速率超5mm/d时暂停开挖,加强支护;二次衬砌施工后采用地质雷达检测(检测比例100%),发现空洞及时注浆补密;运营前做水压试验(充水压力0.1MPa,保持24小时无渗漏)。

三、结语

桥梁隧道施工问题的控制需跳出“事后补救”的局限,转向“勘察预防、工艺控制、技术支撑、监测保障”的系统性思路。从问题成因看,多数质量隐患源于勘察不细、工艺不规范、管控不到位,需通过优化勘察设计筑牢基础,规范施工工艺减少人为误差,升级技术装备提升精度,强化质量监测及时纠偏。未来,随着BIM、大数据、人工智能等技术在工程领域的深入应用,桥梁隧道施工将向“数字化、智能化”转型,通过施工全过程数字化模拟与实时监测,进一步降低问题发生率,为交通基础设施的安全、耐久提供更强保障,助力我国交通建设迈向高质量发展新阶段。

参考文献

- [1]王浩,刘敏.桥梁桩基施工常见质量问题及防控技术研究[J].铁道建筑,2023,63(08):89–92.
- [2]陈明,赵阳.隧道围岩失稳机理与初期支护优化对策[J].地下空间与工程学报,2024,20(02):615–620.
- [3]张丽,吴涛.预应力桥梁施工中预应力损失的控制技术[J].公路交通科技,2022,39(11):56–61.
- [4]李强,陈晓.隧道二次衬砌渗漏水原因分析及防治措施[J].现代隧道技术,2023,60(05):210–215.
- [5]张国栋,李娜.基于BIM技术的桥梁隧道施工质量监测体系构建[J].施工技术,2024,53(07):132–136.