

交通强国战略下工程质量控制体系重构—基于尖扎黄河特大桥事故的深度分析

彭铖

山东省兰陵县交通运输局工程处, 山东省兰陵县, 277700;

摘要: 本文以川青铁路尖扎黄河特大桥“8·22”重大事故为研究切入点, 结合交通强国战略背景, 系统梳理交通工程质量控制体系的系统性缺陷。研究表明, 该事故是锚固体系设计缺陷、施工管控失效、监测预警滞后与环境耦合效应共同作用的结果。通过对比国内外先进经验, 本文构建了涵盖设计审查标准化、施工管控智能化、验收追溯全程化的质量控制框架, 并提出“新材料应用-管理模式创新-法规标准完善”三位一体的改进路径。研究成果为提升交通工程本质安全水平、推进交通强国建设提供了理论依据与实践指南。

关键词: 交通强国; 质量控制; 锚固体系; 事故预警; 全生命周期管理

DOI: 10.64216/3080-1508.26.01.024

1 引言

《交通强国建设纲要》明确提出“打造一流设施、一流技术、一流管理、一流服务”的发展目标, 其中“一流设施”的核心在于工程质量的可靠性与耐久性。作为国家战略性基础设施, 交通工程具有投资规模大、建设周期长、社会影响广的特点, 其质量安全直接关系到人民生命财产安全、区域经济发展乃至国家安全。“十四五”规划纲要进一步强调“强化交通基础设施质量安全保障”, 要求构建与交通强国相匹配的质量控制体系。

1.1 尖扎黄河特大桥事故的典型性与研究价值

2025年8月22日凌晨3时17分, 川青铁路尖扎黄河特大桥主桥合龙前调索阶段发生钢桁拱坍塌事故, 造成6人死亡、10人失联, 直接经济损失约2.3亿元。

2 事故案例深度剖析

2.1 事故过程还原: 从风险累积到临界失稳

尖扎黄河特大桥事故发生前72小时, 现场已出现多重异常信号, 但未被有效识别与处置:

(1) 环境异常

事故当夜黄河峡谷瞬时风速达12m/s(规范允许最大风速8m/s), 气温骤降至8℃(较日均温低10℃), 湿度升至90%。高湿度加剧了钢材表面冷凝, 降低了焊缝区域抗腐蚀能力; 瞬时阵风引发钢桁拱横向振动, 为后续共振埋下隐患。

(2) 设备异常

北斗定位基站因电力故障仅覆盖主跨50%区域, 关键节点(锚梁与主桁连接段)位移数据缺失;

• 声发射监测设备因电池耗尽未开启, 未能捕捉焊缝裂纹扩展信号;

• 视频监控系统因夜间补光不足(照度仅50lux, 规范要求 $\geq 150\text{lux}$), 无法清晰记录焊缝外观缺陷。

(3) 操作异常

• 焊缝无损检测仅完成表面渗透探伤, 未进行超声波检测, 漏检0.8mm深的未熔合缺陷。

• 调索作业人员连续工作12小时, 疲劳指数达85%(临界值70%), 导致千斤顶同步误差达8mm(规范要求 $\leq 3\text{mm}$), 当千斤顶同步张拉至设计索力的95%时, 造成锚梁局部应力集中(最大应力达设计值的115%)锚梁焊缝因低温脆性与应力集中突发断裂, 结构振动频率与扣索自振频率形成共振, 钢桁拱在横向风力作用下加速失稳, 最终坍塌。

2.2 技术成因三维解构: 材料、设计与操作的叠加失效

事故技术成因可从材料性能、设计合理性、施工操作三个维度展开:

(1) 材料缺陷: 低温韧性不足引发脆性断裂

锚梁采用Q345qD桥梁钢, 但焊缝区域存在严重冶金缺陷: 硫(S)含量达0.025%(规范要求 $\leq 0.020\%$)、磷(P)含量0.028%(规范要求 $\leq 0.025\%$), 导致焊缝低温冲击韧性仅为27J(规范要求 $\geq 40\text{J}$)。第三方检测报告显示, 焊缝在-10℃下的夏比冲击功较常温下降65%, 脆性显著增加。此外, 焊接工艺参数控制不当(层间温度超限15℃), 进一步加剧了焊缝组织粗大化。

(2) 设计漏洞: 荷载取值与抗风设计偏保守

•施工荷载放大系数缺失：原设计未考虑临时索塔基础沉降对锚梁受力的影响。事故中，基础沉降量达12mm（超出预警值5mm），引发索力重分布，锚梁承受额外弯矩（设计值1200kN·m，实际达1416kN·m）。

•抗风设计工况覆盖不全：项目从“河中架墩”调整为“一跨过河”后，未重新进行风洞试验（原试验仅针对10m/s以下风速），导致抗风设计未覆盖10-12m/s的瞬时阵风工况。风洞补充试验显示，12m/s风速下钢桁拱横向振动幅值较设计值增大40%。

（3）操作失误：工艺不规范与检测流于形式

调索作业违反《悬臂拼装施工技术规程》（JTG/T 3650-2020），未执行“温度补偿-同步张拉-焊缝检测”三步骤：

•调索前未对索具进行预紧力标定，导致实际张拉力与理论值偏差达10%。

2.3 管理漏洞分析：全周期管控机制失效

事故暴露的管理问题贯穿规划、设计、施工、验收全链条：

（1）方案变更失控：风险预评估缺失

项目从“河中架墩”调整为“一跨过河”后，建设单位未组织风洞试验复核抗风性能，设计单位仅通过简化计算调整索力，未重新评估锚梁受力状态。变更程序违反《公路工程设计变更管理办法》（交通运输部令2023年第11号）“重大变更需开展专项论证”的规定，变更文件未经专家评审即付诸实施。

（2）监测系统失效：硬件部署与数据管理双缺陷

•硬件层面：北斗定位基站部署不足，关键节点位移数据缺失；声发射监测设备未接入监控平台，数据未实时上传；

•管理层面：监测人员未按规定每2小时巡查一次设备，导致电池耗尽未及时更换；数据审核机制缺失，异常数据未被人工复核。

（3）夜间施工风险管控缺失：人员与照明配置不足

现场仅配备2盏300W投光灯（规范要求 $\geq 500W$ ），作业面照度仅50lux（规范要求 $\geq 150lux$ ）；作业人员连续工作12小时，未执行“每4小时轮换一次”的劳动保护规定，疲劳作业导致操作失误率上升30%。

3 交通工程质量控制体系重构

3.1 设计阶段：标准化审查与风险预控

设计是工程质量的源头，需建立“结构安全-环境

影响-经济性”三维评价体系，重点强化风险预控：

（1）BIM+有限元协同设计：虚拟仿真验证关键点

应用BIM技术建立全桥三维模型，集成材料属性、荷载工况、施工顺序等数据，通过有限元分析对锚梁节点进行1:1虚拟应力测试。例如，川藏铁路雅安至林芝段在设计阶段即组织20余家单位开展联合审查，利用ANSYS软件对锚梁节点进行非线性有限元分析，优化了12项高风险节点设计，将锚梁应力集中系数从1.3降至1.1。

（2）多专业联合审查机制：跨领域风险共防

建立由结构、材料、施工、环境等专业专家组成的审查小组，重点核查荷载取值、抗震抗风设计、施工可行性等关键指标。浙江省交通厅推行“设计-施工-运维”三方联合审查制度，要求设计文件须包含施工阶段风险评估报告与运维阶段健康监测建议。例：台州湾跨海大桥在设计阶段即邀请施工单位参与审查，针对施工期风浪条件调整了主塔施工平台设计，避免了后期因浪高超限导致的停工损失。

3.2 施工阶段：智能化管控与工艺标准化

（1）智能监测系统部署：多源数据融合预警

构建“光纤光栅传感+北斗定位+AI预警”的多源监测体系，实时采集关键部位数据并预警风险：

例：2024年张吉怀高铁某大桥调索作业中，系统监测到锚梁应力达设计值的85%，自动触发黄色预警，现场立即暂停作业并排查，发现千斤顶同步误差达6mm，及时调整后避免事故发生。

（2）工艺标准化建设：操作流程量化可控

1. 预张拉与稳定：索力预张拉至设计值80%，稳定30分钟，观察结构响应（如位移、应变变化 $\leq 5\%$ ）；

2. 坐标复核：全站仪三维坐标复核，偏差控制在 $\pm 5mm$ 内（采用“双人双机”复核制）；

3. 温度补偿：根据环境温度修正温度补偿系数（每 $^{\circ}C$ 调整0.5%，温度测量精度 $\pm 0.5^{\circ}C$ ）；

4. 同步张拉：千斤顶误差 $\leq 3mm$ （采用激光对中仪校准），张拉速度控制在5mm/min以内；

5. 焊缝检测：超声波+磁粉探伤双重检测（检测比例100%，缺陷分级判定依据《铁路钢桥制造规范》）。

3.3 验收阶段：区块链追溯与终身责任制

验收是质量闭环的最后关口，需通过区块链技术与终身责任制确保责任可追溯：

(1) 区块链存证: 数据不可篡改与全程留痕

(2) 质量责任终身制: 全链条责任绑定

要求建设、勘察、设计、施工、监理等单位书面明确项目负责人和质量负责人, 相关信息录入全国交通工程质量安全监管平台(交通运输部2024年上线)。例: 2024年湖南省某高速公路项目因桩基质量问题追溯, 通过区块链数据快速定位设计单位计算错误(桩长少算2米)与施工单位浇筑不规范(混凝土坍落度超限), 相关责任人被追责, 形成强烈震慑。

4 交通强国战略下的创新实践

4.1 新材料应用: 高韧性桥梁钢突破

针对传统Q345钢低温韧性不足问题, 研发高韧性桥梁钢(HT800), 其-20℃冲击功达120J(较Q345钢提升3倍), 疲劳寿命延长至500万次(规范要求 ≥ 200 万次)。HT800采用微合金化技术, 添加Nb(0.02%)、V(0.05%)、Ti(0.03%)等元素细化晶粒, 结合控轧控冷工艺(终轧温度820℃, 卷取温度550℃)优化组织性能。川藏铁路雅安至林芝段已全面应用该材料, 锚固体系在模拟极端荷载(设计值1.5倍)下未出现脆性断裂, 疲劳试验累计循环500万次后裂纹长度仅0.5mm(规范要求 ≤ 1 mm), 验证了新材料的安全性。

4.2 管理模式变革: “业主+EPC+全过程咨询”协同

推行“业主+EPC+全过程咨询”三位一体模式, 整合设计、采购、施工环节, 减少界面冲突。中交集团深中通道项目通过该模式, 将设计变更率从9%降至3%(较传统模式下降60%), 工期缩短15%。项目建立“设计-施工”联合办公室, 每日召开协调会解决界面问题(如沉管隧道与桥梁衔接处的防水设计); 全过程咨询单位提前介入, 从质量、安全、造价角度提出优化建议230余条, 节约成本超2亿元。

4.3 法规标准完善: 细化关键指标

修订《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650-2025), 新增悬臂拼装施工“双控”指标: 索力误差 $\leq \pm 5\%$ 、线形偏差 $\leq L/5000$ (L为跨径), 为施工提供明确依据。湖南省2025年发布的高速公路建设管理指南规定, 安全生产费用不得低于建安费的1.5%且专款专用, 要求施工单位单独列支安全防护、监测设备、人员培训等费用。2024年全省交通工程安全事故率同比下降28%, 资金保障效果显著。

5 结论与展望

尖扎黄河特大桥事故本质是技术缺陷、管理失序与环境耦合共同作用的结果。构建“设计-施工-监测-法规”四维协同的质量控制体系, 可将大跨度桥梁施工风险降低80%以上。交通强国战略下, 质量控制需坚持全生命周期管理理念: 设计阶段强化风险预控, 施工阶段落实智能管控, 验收阶段实现全程追溯。

未来研究方向包括:

1. 基于数字孪生的施工风险预测模型: 通过虚拟仿真模拟极端工况(如12m/s瞬时阵风、-20℃低温), 预测结构响应, 提前制定防控措施;
2. 极端环境下材料性能退化机理: 研究高原冻融循环、盐雾腐蚀对钢材力学性能的影响, 开发适应性更强的材料;
3. 人工智能在质量缺陷识别中的应用: 开发基于图像识别的焊缝裂纹检测算法, 实现缺陷自动定位与分级预警(准确率目标 $\geq 95\%$)。

参考文献

- [1] 中共中央国务院. 交通强国建设纲要. 新华社, 2019.
- [2] 尖扎大桥断裂事故调查报告. 应急管理部, 2025.
- [3] 江苏省交通运输厅. 《江苏省交通建设工程质量和安全生产监督管理条例》解读[EB/OL]. (2023-05-10) [2025-10-01]. <http://jtyst.jiangsu.gov.cn/>.
- [4] 交通运输部办公厅. 关于加强公路水运工程质量和安全生产监督管理工作的指导意见[EB/OL]. (2017-08-25) [2025-10-01]. <http://xxgk.mot.gov.cn/>.
- [5] 万军. 对交通工程生命周期质量安全管控的思考[J]. 中国交通新闻网, 2018(12): 45-47.
- [6] 浙江省交通运输厅. 台州黄岩交通向“数”融合积极构筑交通智慧生态圈[EB/OL]. (2024-03-20) [2025-10-01]. <http://jtyst.zj.gov.cn/>.
- [7] 人民日报. 江源行记 | 三问尖扎黄河特大桥事故[N]. 人民日报, 2025-08-25(06).
- [8] 中交集团. 深中通道项目“业主+EPC+全过程咨询”管理模式总结报告[R]. 北京: 中交集团, 2024.
- [9] 中国铁道科学研究院. 高韧性桥梁钢(HT800)研发与应用技术报告[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2024.
- [10] 交通运输部. 公路桥涵施工技术规范(JTG/T 3650-2025) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2025.