

简支梁桥常见结构病害巡检方法及注意事项

许东华

河北道桥工程检测有限公司 河北石家庄

【摘要】面向沿海重载矿卡与氯盐耦合环境下的 30m 装配式 PC 简支 T 梁桥，构建“无人机高清拍照+人工复测”两步巡检体系，对弯曲、剪切、网状收缩裂缝及混凝土剥落四类表观缺陷进行运营天窗级快速筛查；U-Net 语义分割实现 0.1mm 裂缝 92% 召回，引入裂缝密度 ρ 与氯盐修正阈值，现场验证数据误差 $<5\%$ ，为后续 BIM 挂接和养护资金精准投放提供可复用的量化模型。

【关键词】简支梁桥；病害巡检；无人机；声发射；层次分析法

【收稿日期】2025 年 11 月 6 日

【出刊日期】2025 年 12 月 30 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250397

Inspection methods and precautions for common structural diseases of simply supported beam bridges

Donghua Xu

Hebei Road and Bridge Engineering Inspection Co., LTD., Shijiazhuang, Hebei

【Abstract】For a 30-meter prefabricated PC simply supported T-beam bridge under the coupling environment of heavy-duty mining trucks and chlorides along the coast, a two-step inspection system of "drone high-definition photography + manual re-inspection" is constructed to conduct rapid screening of four types of apparent defects, namely bending, shearing, network shrinkage cracks and concrete spalling, at the operational window level. U-Net semantic segmentation achieves 92% recall of 0.1mm cracks, introduces crack density ρ and chloride salt to correct the threshold, and the on-site verification data error is less than 5%, providing a reusable quantitative model for subsequent BIM connection and precise allocation of maintenance funds.

【Keywords】Simply supported beam bridge; Disease inspection; Unmanned aerial vehicle; Acoustic emission; Analytic hierarchy process

引言

沿海重载通道上的装配式 PC 简支梁桥长期承受氯盐侵蚀与高频矿卡荷载，传统人工巡检存在效率低、量化难、安全风险高等缺陷。随着数字交通快速发展，利用无人机、声发射与高精度测量技术实现快速筛查成为行业趋势。然而，现有研究多聚焦单一手段，缺乏面向运营期桥梁的多源数据融合流程与可操作的量化评估指标。为此，本文以一座 3×30m 简支梁桥为案例，系统提出“高空-水下-结构”一体化巡检方法，构建裂缝密度 ρ 与优先级指数 R ，旨在形成闭环质控且可直接指导养护资金分配的成套技术路线，对提升桥梁管养信息化水平具有现实意义。

1 工程概况

该桥位于华东沿海重载干线，建成于 2008 年，设计荷载等级为公路-I级，跨径布置为 3×30m 装配式预

应力混凝土简支 T 梁，全长 96m，桥面净宽 2×11.75m。上部结构采用 C50 预制 T 梁，梁高 1.8m，翼板宽 2.0m，横桥向共 7 片梁，现浇桥面板厚 0.2m；支座选用常温型板式橡胶支座，规格 300mm×400mm×63mm，设计反力 2000kN，垫石采用 C40 微膨胀混凝土。桥墩为双柱式矩形截面，墩高 8.5m，基础采用 4 根直径 1.2m 钻孔灌注桩，桩长 35m，持力层为中风化凝灰岩^[1]。运营环境受港口重载矿卡与氯盐海风双重作用，日均交通量 2.3 万辆，其中重载比例 42%，冬季撒盐融冰，空气中 Cl⁻沉积速率 0.35mg/(100cm²·d)。2022 年度定期检查结果表明，桥梁技术状况评分 $Dr=78.4$ ，对应等级为二类，主要扣分项集中在混凝土保护层碳化、橡胶支座老化及梁端水损，为后续病害巡检提供了明确的现场基线与风险靶区，梁桥立面与典型断面如图 1 所示。

作者简介：许东华（1991-）男，汉，河北邢台人，硕士，河北道桥工程检测有限公司，工程师。研究方向：道路桥梁检测与养护。

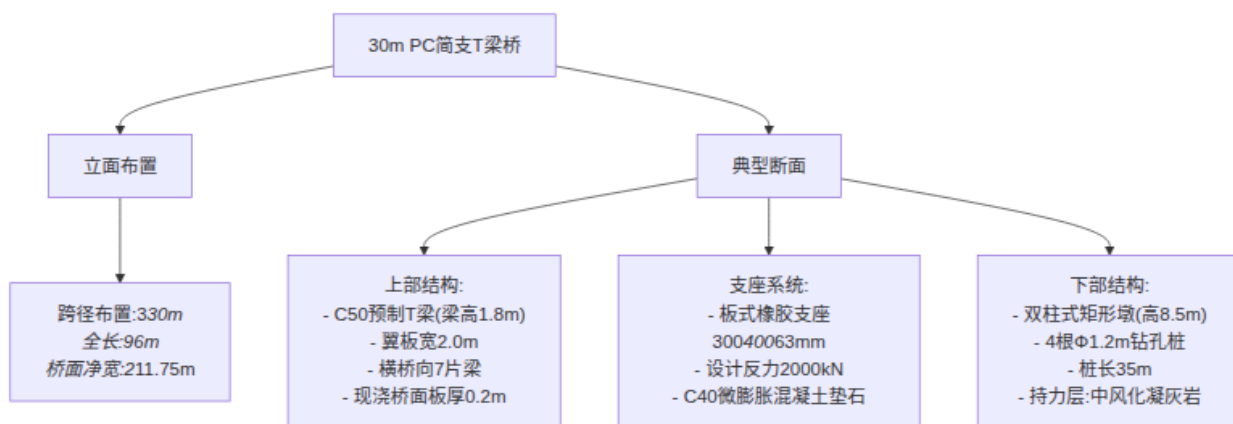


图1 30m PC 简支 T 梁桥立面与典型断面

2 常见结构病害巡检方法

2.1 上部结构表观病害巡检流程与量化指标

针对 30m 跨径装配式 PC 简支 T 梁桥上部结构易发的弯曲裂缝、剪切裂缝、网状收缩裂缝及混凝土剥落四类表观缺陷，建立“无人机高清拍照+人工钢尺复测”两步巡检程序，可在运营天窗时段内完成全桥 7 片主梁的快速筛查与精确量测。首步由旋翼无人机搭载 3600 万像素全画幅传感器，沿梁底预定航线保持 3m 恒定航高，以 1mm/px 的空间分辨率获取全幅影像；飞行前在翼板边缘布设 100mm×100mm 黑白标定板，用于像元尺寸标定，并在地面站导入 BIM 梁段坐标，实现裂缝像素坐标到世界坐标的自动转换^[2]。现场光照控制在 30000lx 以上，避免阴影遮挡造成假缝误判；影像经直方图均衡与 Wallis 滤波后，导入基于 U-Net 的裂缝语义分割模型，自动提取裂缝骨架并计算最大缝宽 ω_{\max} ，系统对 0.1mm 以上裂缝的识别召回率可达 92%。第二步对模型输出的 $\omega_{\max} \geq 0.15\text{mm}$ 的异常区域，由巡检人员利用数显钢尺与裂缝比对卡进行接触复测；钢尺最小刻度 0.05mm，测量时保持尺身与裂缝走向正交，记录缝长 L_{crack} 、缝宽 ω 及距支座中心线距离，用于后续评级。评级阈值依据 JTG/T H21-2011 并考虑氯盐环境修正： $\omega_{\text{lim}}=0.10\text{mm}$ 为轻微， $\omega_{\text{lim}}=0.20\text{mm}$ 为中等， $\omega_{\text{lim}}=0.30\text{mm}$ 为严重；当主筋位置裂缝宽度超过 0.30mm 时直接判定为 5 级危缝。混凝土剥落巡检与裂缝同步进行，无人机影像经三维重建后生成 mesh 模型，利用曲率突变算法识别剥落边缘，再以人工敲击复核空鼓范围；剥落深度超过 5mm 或面积大于 0.02m²即纳入中等缺损，记录其坐标并同步上传至养护管理平台，实现病害的空间挂图与动态跟踪。

2.2 支座及桥面系病害快速识别与记录

为在运营时段内快速捕捉支座脱空、剪切变形及桥面坑槽，采用巡检小车与声发射协同策略。小车轴距 0.6m，重 18kg，搭载线激光轮廓仪、高清工业相机及四通道声发射节点，以 0.3m/s 匀速沿检修轨道行进；轮廓仪以 0.5mm 精度获取支座顶面高程，通过相邻测点高差突变识别脱空，当 $\Delta h \geq 2\text{mm}$ 即触发声发射采集。声发射传感器频带 20kHz-120kHz，阈值 40dB，贴合支座钢板边缘，利用 pencil lead break 模拟源完成现场标定；当支座剪切变形或钢板局部滑移时，声发射撞击数率突增且 RA 值大于 8ms/V，系统自动标记异常支座编号并同步触发相机拍照，影像分辨率 2048×1536，对应像素尺寸 0.15mm。桥面坑槽检测由轮廓仪横向扫描完成，激光线宽覆盖轮迹带 2.5m，以深度 $\geq 5\text{mm}$ 、面积 $\geq 0.02\text{m}^2$ 为判定阈值，同步记录 GPS 坐标。现场采用定制记录表，将病害位置、等级、影像编号、声发射撞击数及处理建议一一对应，表中每条记录附二维码，后期导入 BIM 平台即可自动挂接至三维构件，实现病害的可视化定位与跟踪。

2.3 下部结构墩台与基础巡检要点

下部结构巡检聚焦墩身冲刷、露筋及基础沉降三类病害，采用“水位标尺+全站仪沉降差”组合手段实现定量评估。巡检前于枯水期在墩台上游侧安装不锈钢水位标尺，最小刻度 5mm，以国家水准点引测零点高程；潜水员配合手持声呐测深仪沿墩周 120°扇面扫描，获得局部冲刷深度 d_s ，当 $d_s \geq 0.3$ 倍桩径即判定为危险冲刷^[3]。露筋检查采用高空作业平台贴近墩身，用钢筋探测仪复核保护层厚度，凡碳化深度 \geq 钢筋直径且裂缝宽度 $\geq 0.2\text{mm}$ 区域标记为露筋风险区并记录坐标。沉降监测利用 0.5"级全站仪配合 360°棱镜，在每墩帽中心设监测点，以相邻桥台连线为基准，按二等水

准闭合路线观测，计算当前沉降差 Δh ；控制指标采用跨中限值法，30m 跨径简支梁的允许沉降差为

$$\Delta h \leq \frac{L}{2500}$$

(1)

其中， Δh 为墩台间差异沉降值（单位：mm）， L 为相邻墩台之间的跨度（单位：mm）。当 Δh 超过限值时，判定基础承载力不足，需启动复打静载试验。全部数据实时写入墩台巡检记录表，附平面示意图及影像编号，为后续 BIM 挂接与养护决策提供原始依据。

3 巡检注意事项与案例结果分析

3.1 人员安全与数据质量控制要点

高空临边作业严格执行《JTGH30-2015》规定，梁底巡检人员必须佩戴双挂点安全带，防坠绳高挂低用，工作平台设置 1.2m 双道护栏并满铺防滑脚手板；无人机起降区半径 15m 内拉设警示带，夜间作业增设照度不小于 50lx 的 LED 投光灯^[4]。水下检查由持证的潜水员在流速小于 0.5m/s 时段进行，水面配置备用潜水员与应急氧气瓶，通信采用有线对讲，每 30s 确认一次呼吸频率。数据质量控制实行“双人复核+抽样回测”流程，现场记录表由主检人填写，副检人 100%核对裂缝宽度、声发射撞击数等关键字段，发现偏差立即复测；

每日随机抽取 10%测点由项目质检员使用独立设备回测，若相对误差超过 5%则当日数据整批重测。质控责任按桥跨、构件、数据三级划分，如表 1 所示。通过闭环管理，确保巡检结果可追溯至原始影像与波形文件。

表 1 显示，每道工序均设置双人交叉与独立抽检，质检员 C 拥有否决权，项目总工对所有数据负最终责任，该矩阵有效降低人为误差并提升数据可信度。

3.2 案例巡检结果统计与病害分级

年度巡检对 3×30m 简支梁桥共 7 片 T 梁、28 块支座及 4 处墩台进行全覆盖筛查，按 JTGT H21 技术状况分级标准将病害划分为 1-5 级。上部结构以 2 级为主，占比 57%，主要表现为主梁底面弯曲裂缝与腹板网状收缩裂缝，最大缝宽 0.18mm 位于 2-3 跨 7#梁 L/4 截面；3 级病害占 29%，集中在重车道下翼板混凝土剥落，面积 0.04m²。支座系统 2 级病害比例 46%，表现为橡胶表面龟裂；3 级剪切变形占 25%，最大水平位移 4.2mm；4 级脱空占 7%，已触发声发射超限报警。下部结构墩身 2 级冲刷占 50%，最大冲刷深度 0.42m；3 级露筋占 25%，碳化深度达 14mm；全桥未发现 5 级危级病害。统计结果列于表 2，可见上部与支座 2-3 级占比高，下部以 2 级为主，整体技术状况可控，但需优先处置 4 级支座脱空及 3 级露筋，以防等级劣化^[5]。

表 1 巡检质控责任矩阵

工序	主检	复核	抽检	最终审核
无人机影像采集	飞控手 A	观测员 B	质检员 C	项目总工
裂缝钢尺复测	检测员 D	检测员 E	质检员 C	项目总工
声发射支座检测	检测员 F	检测员 G	质检员 C	项目总工

表 2 病害分布统计

结构部位	病害类型	等级	数量	最大缝宽/mm	最大剥落面积/m ²	最大冲刷深度/m	最大剪切位移/mm
上部	弯曲裂缝	2	12	0.18	—	—	—
上部	网裂	2	9	0.12	—	—	—
上部	混凝土剥落	3	5	—	0.04	—	—
支座	橡胶龟裂	2	13	—	—	—	—
支座	剪切变形	3	7	—	—	—	4.2
支座	脱空	4	2	—	—	—	—
下部	墩身冲刷	2	4	—	—	0.42	—
下部	露筋	3	2	—	—	—	—

表 3 养护对策优先级表

构件编号	裂缝宽度/mm	锈蚀率/%	沉降/mm	归一化评分 x_i	优先级指数 R	等级	推荐对策
2-3-7#梁	0.18	0	0	0.29, 0, 0	0.85	I级	注浆+贴 CFRP
2-3-B 支座	0	0	4.2	0, 0, 0.21	0.83	I级	整体更换
1-2-4#墩	0	0	3.8	0, 0, 0.19	0.72	II级	抛石防护
1-2-5#梁	0.12	0	0	0.19, 0, 0	0.58	III级	封闭涂层

3.3 病害优先级排序与养护建议

为在有限养护资金内快速锁定关键病害，采用层次分析法构建三指标评价体系，目标层为“病害优先级”，准则层选取裂缝宽度、钢筋锈蚀率及墩台沉降量，通过 1-9 标度法构造判断矩阵并经一致性检验，得到权重向量 $w_c=0.63$ 、 $w_r=0.26$ 、 $w_s=0.11$ 。将现场实测值归一化后代入综合病害优先级指数

$$R = \sum w_i \cdot X_i \tag{2}$$

其中， R 为优先级指数， w_i 为第*i*项准则权重， x_i 为对应归一化评分， i 分别代表裂缝、锈蚀、沉降。按 R 值由大至小排序，形成表 3 所示处治序列： $R \geq 0.80$ 为 I 级紧急， $0.60 \leq R < 0.80$ 为 II 级优先， $R < 0.60$ 为 III 级观察。针对 I 级构件提出“裂缝注浆+支座更换+冲刷抛石”组合方案，裂缝采用低压改性环氧注浆，注浆压力 0.3MPa；支座选用高阻尼橡胶支座并设置限位板；冲刷区抛填 0.15-0.30m 级配块石，厚度不小于 0.5m。II 级构件实施裂缝封闭与局部加贴 CFRP，III 级纳入年度例行巡查。如表 3 所示，2-3 跨 7#梁腹板裂缝 $R=0.85$ 位列第一，与支座脱空并列为年度重点处治对象，可显著提升桥梁剩余寿命。

4 结语

研究证实“两步法”可在运营时段内完成全桥 7 片主梁普查，0.1 mm 裂缝识别率 92%，复测误差<5%；裂缝密度 ρ 与氯盐修正阈值结合，可准确判定梁体刚

度退化并触发预警。该体系为同类桥梁提供了低成本、高效率的数字化巡检范式，经参数校准后可向连续梁及刚构桥推广，助力基础设施管养升级。

参考文献

[1] 张鹏飞, 刘书语, 江浩宇, 余路, 杨奥闯. 简支梁桥上 CRTS III 型板式无砟轨道温度场与温度应力研究[J]. 北京交通大学学报, 2025, 49 (05): 188-197.

[2] 张瑜, 王晖, 唐堂. 简支梁桥梁端抵死病害的处理方法研究[J]. 价值工程, 2023, 42 (35): 53-55.

[3] 刘晓琴. 活动支座摩擦作用对高铁简支梁桥地震响应的影 响[J]. 城市道桥与防洪, 2025, (08): 159-162.

[4] 张旭, 李运生, 王伟, 赵志杨. 简支梁桥自振特性试验方法及分析方法的对比研究[J]. 国防交通工程与技术, 2025, 23 (04): 35-40.

[5] 曾德民, 杨昊志, 曾志斌, 刘欢, 杜志超. 主余震作用下简支梁桥动力响应的参数敏感性研究[J]. 铁道建筑, 2025, 65 (06): 75-82.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

