

# 非设计因素对桥梁结构的影响分析及精细化检测研究

陈会能

云南云路工程检测有限公司 云南 昆明 650217

**【摘要】**：桥梁作为交通基础设施的核心枢纽，其结构安全与耐久性直接关系到区域交通畅通和公众出行安全。在长期服役过程中，桥梁不仅承受设计预设的荷载作用，还面临复杂非设计因素的持续影响。这些因素涵盖环境侵蚀、车辆超载、地质环境变异、意外撞击等，易引发结构损伤累积，甚至诱发安全隐患。而精细化检测技术是精准识别非设计因素致损规律、评估桥梁健康状况的关键手段。基于此，本文聚焦非设计因素对桥梁结构的影响，结合工程实践案例，探究精细化检测的有效策略，以期桥梁结构的养护维修、安全保障提供技术支撑，助力交通基础设施的长效稳定运行。

**【关键词】**：非设计因素；桥梁结构；影响分析；精细化检测

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.026

## 引言

在当前社会经济快速发展的新形势下，桥梁作为经济运输的重要载体，近年来桥梁建设规模不断扩大，桥梁建设项目也越来越多。但随着大批桥梁服役时间不断增加，安全性能问题日益突出。在桥梁长期运营过程中，非设计因素直接作用于结构本身，对其整体质量与安全形成显著影响，相关问题需重点关注。因此，需要重视非设计因素对桥梁结构的影响分析，开展桥梁结构非设计因素的精细化检测，从而全面提高桥梁结构质量，确保桥梁使用的安全。

## 1 非设计因素对桥梁结构的影响分析

### 1.1 地质环境变异，导致结构承载的隐性扰动

地质条件是桥梁建设的基础前提，而地质环境的后期变异则成为影响结构稳定性的重要非设计因素。桥梁基础设计通常基于建设期的地质勘察数据，但区域地质活动、地下水动态变化及周边工程扰动，均可能导致地质条件偏离初始状态。同时，地下水的过度开采或水位周期性升降，会改变地基土的物理力学性质，降低地基承载力，导致基础沉降量超出设计允许范围。此外，周边基坑开挖、隧道施工等工程活动产生的应力扩散，可能使桥梁地基产生附加变形，进一步加剧结构内部应力集中，对桩基、承台等关键承重构件造成潜在损伤。地质环境变异的渐进性与隐蔽性特点，使其易被忽视，却可能对桥梁结构形成长期且难以逆转的影响。

### 1.2 自然气候侵蚀，出现材料性能的持续衰减

自然气候因素以长期、循环的作用方式，对桥梁结构材料性能进行持续侵蚀，是引发结构老化的主要诱因之一。不同气候区域的桥梁面临着差异化的气候挑战，高温高湿环境会加速混凝土碳化进程，破坏混凝土内部的碱性环境，导致钢筋失去钝化保护而发生锈蚀，锈蚀产物的体积膨胀会引发混凝土开裂剥落，形成“锈蚀-开裂-更严重锈蚀”的恶性循环。严寒地区的冻融循环作用，会使混凝土内部孔隙水反复冻结膨胀与融化收缩，破坏混凝土的微观结构，降低其强度与密实度。强风、

暴雨等极端天气则会对桥梁结构产生附加荷载，高速气流可能引发桥梁颤振、涡振等气动失稳现象，而暴雨形成的地表径流可能冲刷桥梁基础边坡，导致基础外露。气候因素的作用具有累积性，随着时间推移，会逐步削弱桥梁结构的整体性能。

### 1.3 运营荷载超限，直接突破结构受力

桥梁设计均明确了额定荷载标准，但运营过程中的荷载超限问题，成为突破结构受力极限的主要非设计风险源。荷载超限主要表现为两个方面：一是单车荷载超出设计轴重，如重载货车擅自改装、超载运输，会使桥梁主梁、支座等构件承受的瞬时应力远超设计值，导致构件产生塑性变形；二是交通量长期超出设计预期，随着区域经济发展，部分桥梁的日均通行量已数倍于设计值，持续的超负荷运营会加速结构疲劳损伤，使桥梁进入疲劳失效的临界状态。荷载超限对桥梁结构的影响具有直接性与破坏性，不仅会缩短桥梁的设计使用寿命，更可能在短时间内引发结构性破坏。

### 1.4 养护管理缺失，结构隐患不断累积

养护管理作为桥梁运营全生命周期的重要环节，其缺失或不到位会使各类微小损伤逐步发展为重大安全隐患，成为影响结构安全的关键非设计因素。桥梁结构在长期使用中难免出现裂缝、渗漏、支座老化等轻微损伤，若养护巡查不及时，这些损伤无法被早期发现，会在环境与荷载作用下持续扩展。养护技术措施不当同样会加剧结构问题，如对混凝土裂缝采用不合适的修补材料，无法有效阻断水分与有害物质侵入，反而可能导致裂缝进一步发展；支座润滑不及时则会增大摩擦阻力，影响梁体的自由伸缩，引发梁体应力集中。另外，养护资金投入不足、专业养护人员短缺等问题，会导致养护工作流于形式，无法实现对桥梁结构的系统性维护，使结构隐患不断累积，最终威胁桥梁运营安全。

### 1.5 材料性能劣化，结构基础的本质弱化

建筑材料的性能劣化是超出设计预期的内在非设计因素，直接导致桥梁结构承载基础弱化。桥梁建设中使用的混凝土、

钢材、支座橡胶等材料，均存在一定的性能衰减周期，而生产过程中的材料质量波动、施工环节的工艺缺陷，会进一步缩短材料的有效使用寿命。混凝土的碱骨料反应是典型的材料内在劣化问题，骨料中的活性成分与混凝土中的碱性物质发生化学反应，产生膨胀性产物，导致混凝土内部出现大量微裂缝，降低其强度与耐久性。钢材在潮湿、腐蚀性环境中，即使经过防腐处理，也可能因涂层破损而发生锈蚀，削弱钢材的截面面积与力学性能。支座橡胶材料会因老化、氧化而失去弹性，无法有效传递荷载与缓冲振动，影响桥梁结构的整体受力协调性。材料性能劣化具有内在性与渐进性，是导致桥梁结构性能下降的根本原因之一。

## 2 桥梁结构非设计因素的精细化检测策略

### 2.1 构建全周期闭环体系，筑牢预防检测根基

构建全周期非设计因素检测体系是实现桥梁精细化防护的基础前提。以某某高速公路及路基变形观测项目为例，相关就对该工程运营现状，构建了全周期非设计因素检测体系。该桥为12×20m钢筋混凝土简支T梁桥，2007年通车至今已运营18年，临近城市且周边有施工开挖，2025年曾出现桥台错台、墩柱裂缝及横向位移等问题，亟需打破“事后补救”模式，建立“预防-监测-评估-反馈”闭环机制。

结合运营环境，需明确非设计因素核心范畴：人为扰动、车辆超载、环境侵蚀及材料老化四大类。针对周边施工这一突出因素，将施工振动、基坑开挖影响纳入专项监测，联动施工方建立每日数据共享机制。

同时，依托已布设的变形观测网，将8个桥梁观测点、20个路基观测点的平面及高程数据纳入标准化管理平台（观测点立面布置示意图详见图1，平面布置示意图详见图2），实现零期至十五期观测数据的连贯分析。通过平台动态追踪DQ6、DQ7等关键测点位移变化，结合墩柱裂缝发展情况优化检测周期，从体系层面将风险控制在萌芽状态，为II级养护等级桥梁提供精准技术支撑。

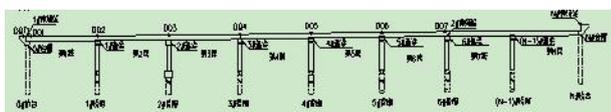


图1 观测点立面布置示意图

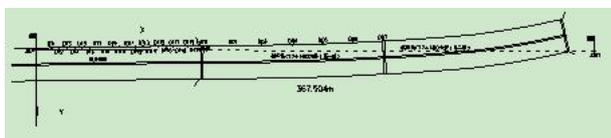


图2 观测点平面布置示意图

### 2.2 依托无人机技术，突破预防检测空间限制

无人机技术赋能是提升非设计因素检测效率与精度的关

键手段，其核心优势在于突破传统检测的空间限制，实现对桥梁隐蔽部位的无接触式预防性监测。以某某高速上跨桥非设计因素检测难题为例，该桥为1×14+1×30+1×14m钢筋混凝土连续刚构桥，2024年因超重车辆冲击导致2#箱梁顶板塌陷，箱内腹板出现多道贯穿性裂缝，传统人工检测难以深入箱梁内部及梁底隐蔽区域，无人机的无接触优势可精准覆盖这些检测盲区。

针对桥梁连续刚构特性，需配置搭载高清摄像与红外热成像的专业无人机，构建“低空巡航+定点详查”模式。日常检测中按预设航线扫描梁底、腹板及墩柱，利用红外热成像识别混凝土内部空洞；2024年9月应急检测时，无人机可快速定位8.3m×3.3m的顶板塌陷范围，比人工检测效率提升3倍。



箱梁梁底裂缝照片

箱梁梁底裂缝照片

同时，建立无人机数据与地面数据库同步机制，通过图像识别算法自动提取裂缝参数——如2#箱梁4.65m长贯穿裂缝的宽度、倾斜角度等，减少人工测量误差。结合2025年3月箱内排查数据，对比无人机历史检测结果，能精准捕捉超载等非设计因素引发的病害发展，为桥梁修复及预防性养护提供高效数据支撑。

### 2.3 部署智慧监控系统，实现预防检测全天候感知

智慧监控系统的构建与应用为非设计因素检测提供了全天候、自动化的技术支撑。2025年贵州猴子河、四川红旗两座特大桥的垮塌事件，均指向山体滑坡这一核心诱因，而非桥梁结构本身失效。这警示我们，桥梁养护不能局限于结构本体，周边环境调查与常态化养护检查的结合，才是防范非设计风险的关键。

山体滑坡对桥梁的破坏机理清晰：持续强降雨引发的滑坡

体,或直接冲击桥墩产生超设计荷载,或掏空桩基周边土体导致基础悬空,使桥墩承受额外弯矩而断裂。红旗特大桥因提前监测预警实现零伤亡,而猴子河特大桥的教训则凸显了养护检查与环境调查脱节的危害。

精细化养护需建立“本体+环境”双维度体系。日常养护中,除检查桥面、墩柱裂缝等结构问题,更要将桥梁上下游500米范围内的边坡纳入必查项,记录坡体裂缝、植被变化等细节。针对山区桥梁,应每季度开展专项环境调查,结合降雨量数据,预判滑坡风险等级。

智慧系统可强化养护效能。在坡体关键部位布设位移计、倾角计,与桥梁应力传感器联动,当坡体日位移超3mm或降雨量达临界值时,自动触发预警。养护人员据此精准开展现场核查,避免传统巡查的盲区,真正实现“防患于未然”。

桥梁安全依赖结构与环境的双重稳定。唯有将周边环境调查融入日常养护流程,以智能监测辅助人工检查,才能构建起应对山体滑坡的立体防线,守护桥梁通行安全。

#### 2.4 推进多数据融合,提升预防检测诊断精度

多维度检测数据融合分析是提升非设计因素识别准确性的重要保障,可打破单一检测手段的局限性,通过数据互补实现病害的全面诊断与精准预判。2025年11月11日国道317线双江口红旗特大桥引桥倒塌事故,便凸显了养护检查缺位、周边环境监测不足与数据割裂带来的风险。事故前水库两期蓄水累计水位涨幅超160米,这种创纪录的水文变化对桥位地质的影响未通过系统检测形成预警,最终因右岸山体滑坡引发灾难。

多数据融合的核心价值,在于将养护检查的微观信息与周边环境的宏观变化纳入统一分析框架。相关部门需重点整合三类数据,一是日常养护获取的结构表观信息,如桥墩混凝土裂缝发展、支座位移等;二是专业监测设备数据,包括全站仪测得的墩台沉降(如事故后排查发现部分残留墩体横向位移达23mm)、应力传感器记录的结构受力变化;三是周边环境调查数据,涵盖双江口水库蓄水时序(4月一期蓄水、10月二期蓄水)、水位涨幅及区域地质勘察资料。通过深度学习技术挖掘数据关联,可精准区分结构自身病害与外部环境诱发的变

形,避免误判。同时,数字孪生技术为数据融合提供了可视化载体。构建红旗特大桥全生命周期虚拟模型,可将融合数据实时映射,模拟不同水位条件下岸坡稳定性变化及对桥梁的传导影响,为“加密监测频次”“划定危险预警阈值”等建议提供科学依据。结合事故后复盘发现的规律,当库水位单日涨幅超5米时,需启动一级监测响应,通过模型动态优化参数,确保检测结论与结构实际状态同步。

#### 2.5 建立联动响应机制,强化预防检测落地成效

建立联动响应机制是实现非设计因素精细化管控的最终落脚点,能将检测结果快速转化为维护行动,形成“检测-评估-维护-反馈”的高效闭环,在国道317线双江口红旗特大桥的事故处置过程中,直观印证了这一机制的核心价值。此次事故中,大桥右岸桥头山体滑坡引发引桥倒塌,虽因险情发现及时未造成人员伤亡,但背后暴露的风险管控漏洞值得深思。事故前双江口水库7个月内累计水位涨幅超160米,这种创纪录的蓄水速率与幅度,叠加桥位处青藏高原东缘断裂带的先天地质脆弱性、施工切坡形成的高陡临空面,以及地下高压气体的隐蔽侵蚀,共同构成了滑坡隐患。实施联动响应需依托检测数据平台构建动态风险分级体系,针对水库蓄水这类缓变风险,应结合水位监测、地质勘察数据提前生成边坡加固、桥墩防护等预防性方案;若监测到山体裂缝、岩体位移等苗头,需立即启动专项评估,结合结构力学分析与数字孪生模拟制定处置方案。同时,要建立维护效果验证机制,通过无人机复检与传感器持续监测加固成效,并将数据反馈至系统优化指标。更需强化跨部门协作,打通检测机构与水利、交通、应急部门的数据壁垒,联动水库蓄水调度、超载管控、违规作业记录等信息,从源头防控水文地质及人为类非设计因素,结合《公路养护安全作业规程》(JTGH30-2015)规范应急流程,确保突发险情时能快速启动管制与检测,实现桥梁安全的全链条保障。

总而言之,非设计因素的潜伏性与破坏性,是桥梁运维不可忽视的痛点。无人机巡航、智慧监控等技术的赋能,让精细化检测从理念落地现实。未来,还需以全周期视角整合数据、以技术创新突破瓶颈,将检测精度转化为防护力度,从而精准化解风险,为桥梁结构筑起坚实屏障,保障交通动脉长久通畅。

#### 参考文献:

- [1] 李艾迪.高速公路项目桥梁结构监控量测技术分析[J].汽车周刊,2025,(12):229-231.
- [2] 郝柏.道路桥梁检测中的无损检测技术运用[J].价值工程,2025,44(32):28-30.
- [3] 黄国栋.基于物联网的某转体桥梁变形监测研究[J].交通工程,2025,25(10):62-66.
- [4] 郑川,周勇,黄福武.桥梁健康监测与养护决策系统的研究与应用[J].西部交通科技,2025,(10):188-190.
- [5] 史辉辉.构建智能化公路大型桥梁健康监测系统[J].智慧中国,2025,(10):116-117.