

关于市政路桥设计中的安全性及耐久性问题的系统解析

徐小涵

湖南中大设计院有限公司广东分公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ADA.2026010075

摘 要 : 市政路桥的安全性指结构承受荷载不发生破坏的能力, 耐久性指结构在环境作用下长期保持性能的能力。两者相互影响, 不可分割。通过分析重庆綦江彩虹桥垮塌事故这一国内典型案例, 发现设计计算错误、施工质量失控、材料性能不足是主要致灾因素。区分不同桥型、不同环境区域的差异化要求, 提出完善设计验算、严控施工质量、建立预防性养护制度等提升措施, 以延长桥梁实际使用寿命。

关 键 词 : 市政路桥; 安全性设计; 耐久性设计

Systematic Analysis of Safety and Durability Issues in Municipal Road and Bridge Design

Xu Xiaohan

Guangdong Branch of Hunan Zhongda Design Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The safety of municipal roads and bridges refers to the ability of the structure to withstand loads without failure, while durability refers to the ability of the structure to maintain its performance over time under environmental influences. These two aspects are interrelated and inseparable. By analyzing the collapse of the Chongqing Qijiang Rainbow Bridge, a typical domestic case, it was found that design calculation errors, uncontrolled construction quality, and inadequate material performance were the main contributing factors to the disaster. By distinguishing the differentiated requirements for different bridge types and environmental regions, improvement measures such as refining design calculations, strictly controlling construction quality, and establishing preventive maintenance systems are proposed to extend the actual service life of bridges.

Keywords : municipal roads and bridges; safety design; durability design

引言

市政路桥作为城市交通的关键基础设施, 其安全性与耐久性直接关系到公共安全与工程寿命。安全性确保结构在各类荷载下不发生破坏, 耐久性保障结构在环境作用下长期维持性能。二者相互耦合, 设计计算错误、施工质量失控、材料性能不足等问题常同时损害安全与耐久, 重庆綦江彩虹桥垮塌事故即为深刻教训。通过完善设计验算、严控施工质量、建立预防性养护制度, 可有效延长桥梁实际使用寿命。

一、市政路桥安全性的内涵与设计要点

(一) 安全性设计的基本要求

市政路桥安全性设计遵循《城市桥梁设计规范》(CJJ 11) 与《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60) 等标准。安全性要求结构在施工阶段和使用阶段承受永久荷载、可变荷载、偶然荷载及地震作用时, 不发生强度破坏、失稳或过大变形。设计采用极限状态法, 按照承载能力极限状态和正常使用极限状态分别验算。对于6度及以上地震区的梁式桥及跨度不超过150米的拱桥, 需按《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166) 进行抗震验算。安全性设计的核心是保证结构具有足够的承载能力和抗灾冗余度。

(二) 安全性失效的常见类型

安全性失效主要分为三类。第一类是强度破坏。结构某一截面或构件的材料应力超过极限强度, 导致断裂或压碎。常见于主梁跨中抗弯不足、支点附近抗剪不足、预应力锚固区局部承压破坏。第二类是失稳破坏。整体失稳如独柱墩桥梁的横向倾覆, 局部失稳如钢箱梁腹板的屈曲。第三类是疲劳断裂。循环荷载作用下焊接节点、吊索锚头等应力集中部位产生微小裂纹, 裂纹逐渐扩展至临界尺寸后发生脆性断裂^[1]。

(三) 典型案例分析: 重庆綦江彩虹桥垮塌事故

1999年1月4日, 重庆市綦江县一座名为彩虹桥的人行桥突然整体垮塌。该桥为中承式钢管混凝土拱桥, 全长140米, 主拱跨

度120米。当时桥上聚集了大量赶集群众，垮塌造成40人死亡、14人受伤。这是新中国成立以来最严重的桥梁垮塌事故之一。

事故调查揭示该桥存在多重严重问题。设计方面，拱肋钢管壁厚计算错误。设计图纸要求钢管壁厚12毫米，但实际计算时采用的荷载取值偏低，安全储备不足。吊杆锚固构造设计不合理，锚固强度严重低于规范要求。施工方面，钢管拱肋焊接质量低劣，多处焊缝未熔透，存在明显夹渣和气孔。钢管内混凝土灌注不密实，拱肋内部存在大面积空洞，这既降低了承载能力，也为后续锈蚀埋下隐患。吊杆锚头未按图施工，实际尺寸与设计图纸偏差较大。此外，工程管理存在严重缺陷。该桥由一家无桥梁设计资质的单位设计，施工队伍也无相应资质，工程监理形同虚设。该桥1996年建成，1999年即垮塌，服役时间不足三年。

从安全性角度看，彩虹桥垮塌的直接原因是强度破坏。拱肋钢管壁厚不足且混凝土不密实，导致钢管混凝土组合截面实际承载力远低于设计预期。当桥上人群荷载达到一定规模时，拱肋某截面应力超过材料极限强度，发生失稳并迅速扩展至全桥垮塌。从耐久性角度看，钢管内混凝土空洞和焊缝缺陷使钢管内壁暴露于潮湿空气中，加之钢管外壁防腐涂层质量差，钢管在三年内已发生明显锈蚀，进一步削弱了截面承载力。这一案例清楚表明：设计计算错误和施工质量失控会同时损害安全性和耐久性，两者相互叠加导致灾难性后果。

彩虹桥事故之后，中国全面加强了对桥梁设计施工的监管。国务院颁布《建设工程质量管理条例》，明确要求所有桥梁工程必须由具有相应资质的单位承担设计和施工。交通运输部和建设部随后出台多项技术规范，强化了对钢管混凝土拱桥的设计验算要求和施工质量验收标准。

（四）影响安全性的主要因素

从上述案例可以归纳出影响安全性的四个因素。第一，设计理论不完善。彩虹桥设计计算错误，部分桥梁对极端工况考虑不足，如超载偏载、罕遇地震等动力效应被简化为静力等效。第二，施工质量缺陷。彩虹桥焊接和混凝土灌注质量极差。保护层厚度偏差、预应力孔道压浆不密实等缺陷也常见于其他桥梁。这些缺陷虽短期内不影响安全，但会加速钢材腐蚀，导致截面承载力逐年下降。第三，材料性能不足。钢管壁厚不达标、混凝土强度不满足要求、钢筋锈蚀等直接降低结构承载能力。第四，超载运营严重。许多桥梁实际通行车辆重量远超设计荷载，长期超载不仅增大弯矩和剪力，还显著缩短疲劳寿命^[2]。

二、市政路桥耐久性的内涵与退化机理

（一）耐久性设计的基本要求

耐久性是指结构在自然环境和正常使用条件下，在规定使用年限内不需大修而保持安全适用的能力。按照《公路工程混凝土结构耐久性设计规范》（JTG/T 3310），城市桥梁设计使用年限一般为100年。耐久性设计需考虑环境作用，包括碳化、冻融

循环、氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、磨蚀等。设计措施包括选用合适的水胶比和混凝土强度等级、设置足够的保护层厚度、配置构造钢筋控制裂缝宽度、采取附加防护措施。耐久性设计的目标是延缓材料劣化进程，保证结构在全寿命周期内性能退化不超过容许范围。

（二）主要劣化机理

1. 混凝土碳化

空气中二氧化碳与水泥水化产物氢氧化钙反应生成碳酸钙，使混凝土碱性降低。当碳化深度达到钢筋表面时，钢筋钝化膜被破坏，开始锈蚀。碳化深度与时间的平方根成正比。一般C30混凝土在普通环境下的碳化系数约3至5毫米每平方根年。保护层厚度为40毫米时，碳化到达钢筋的时间约为8至18年。因此必须通过低水胶比和充分养护来降低碳化系数。

2. 氯离子侵蚀

氯离子来自沿海环境或冬季除冰盐。氯离子穿过保护层到达钢筋表面，局部破坏钝化膜，引发点蚀。碳化造成均匀锈蚀，氯盐则造成局部锈坑，危害更大。沿海地区桥梁通常要求混凝土水胶比不超过0.40，保护层厚度不小于50毫米，并采用环氧涂层钢筋。

3. 冻融破坏

在寒冷地区，混凝土毛细孔中的水反复冻融，产生内应力超过抗拉强度时导致表面剥落。东北、西北地区冬季气温低，冻融问题突出。掺入引气剂可显著提高抗冻性。

4. 碱骨料反应

活性骨料与水泥中的碱发生膨胀反应，产生网状裂缝，一旦发生难以控制。规范要求使用非活性骨料或限制总碱量。

（三）耐久性问题的典型表现

耐久性退化通常经历较长时间。早期表现包括混凝土表面碳化层变色、细小裂缝出现、桥面铺装局部剥落。中期表现包括保护层锈胀裂缝、支座橡胶老化变形、伸缩缝堵塞失效。晚期表现包括混凝土大面积剥落、钢筋露头锈断、预应力孔道压浆裂缝。这些现象本身不会立即导致桥梁倒塌，但若持续发展会显著降低截面承载力，最终转化为安全性事故^[3]。

与安全性不同，耐久性失效是一个渐进过程，可以通过定期检测和预防性养护加以延缓。例如每5年对混凝土表面涂刷硅烷防护剂，可延长碳化到达钢筋的时间2至3倍。每10年更换橡胶支座，可避免支座脱空导致的受力异常。

（四）安全性与耐久性的联系

安全性与耐久性在实际工程中高度耦合。钢筋锈蚀既是耐久性问题，也是安全性问题。锈蚀导致钢筋有效截面减小、屈服强度下降，同时锈胀裂缝破坏混凝土与钢筋的粘结力，使构件承载力大幅降低。根据试验数据，钢筋截面损失百分之十，梁的抗弯承载力下降约百分之十五至二十。另一个耦合点是裂缝。荷载裂缝或温度裂缝宽度超过限值，会加速氯离子和水分渗透，缩短耐久性。反过来耐久性退化如碱骨料反应引起的膨胀裂缝又会导致

结构刚度下降，影响安全性。因此不能将两者割裂设计^[4]。

（五）不同桥型与不同环境的侧重点

表 1：不同桥型与不同环境的侧重点

桥型或环境	安全性侧重点	耐久性侧重点
梁桥	抗弯强度、抗剪强度、独柱墩抗倾覆	主梁裂缝控制、支座更换便利性
拱桥	拱肋稳定性、吊杆抗疲劳	吊杆防腐、拱座基础防冲刷
斜拉桥	拉索疲劳、抗风稳定性	索体防腐、锚固区防水、可更换设计
沿海环境	抗风、抗震	氯盐防护、环氧涂层钢筋
寒冷环境	抗冻融承载力	引气混凝土、除冰盐控制

三、提升安全性与耐久性的措施

（一）设计阶段的改进

完善计算与验算。设计人员应严格按照规范进行强度、稳定和疲劳验算。对于钢管混凝土拱桥，需准确计算钢管壁厚和混凝土灌注质量对组合截面的影响。对于独柱墩桥梁，强制进行抗倾覆验算，计算倾覆稳定系数。可采取增大支座间距、设置抗拔支座、增加配重梁或增设墩柱等措施。

强化耐久性专项设计。按照环境作用等级选用不同的材料参数和防护措施。沿海桥梁必须采用环氧涂层钢筋或不锈钢钢筋，保护层厚度不小于 50 毫米。寒冷地区桥梁应掺加引气剂，并禁止使用氯盐除冰剂。

明确可更换设计。对斜拉索、吊杆、支座、伸缩缝等易损构件，在设计阶段预留更换空间、预埋吊装孔、设置检修通道。设计使用年限内至少应考虑一次更换方案。

（二）施工阶段的质量控制

严格控制保护层厚度。采用高强度塑料定位垫块，间距不大于 0.5 米，与主筋绑扎牢固。混凝土浇筑前逐一检查垫块位置。允许偏差为规范规定值。实际施工中偏差超限比例较高，应引入无损检测进行抽查验收。

保证钢管混凝土灌注密实。对于钢管混凝土拱桥，应采用自

密实混凝土或压力灌注工艺，灌注后采用敲击法或超声波检测内部密实度。发现空洞必须钻孔补灌。彩虹桥事故的一个重要原因就是管内混凝土存在大面积空洞。

强化养护条件。混凝土浇筑后覆盖保湿养护，时间不少于 14 天。大体积混凝土应控制内外温差不超过 25 摄氏度，防止温度裂缝。环境温度低于 5 摄氏度时应采取保温措施。

严把材料检验关。水泥、骨料、钢筋、钢管等原材料进场必须复检，不合格材料不得使用。彩虹桥事故中钢管壁厚不达标，反映出材料检验环节的缺失。

（三）运营阶段的养护管理

建立预防性养护制度。根据《城市桥梁养护技术标准》（CJJ 99），将桥梁技术状况分为五类。一类桥梁正常保养，二类桥梁进行小修，三类桥梁中修，四类桥梁大修或改造，五类桥梁重建。研究表明每投入 1 元预防性养护资金，可节约 3 至 10 元矫正性养护资金。预防性养护包括每年清理排水系统、每 3 年涂刷混凝土防护涂料、每 5 年更换老化支座、每 2 年检测吊杆索力^[5]。

应用桥梁信息管理系统。将设计图纸、施工记录、历年检测数据整合在同一平台，实现病害发展轨迹的可追溯分析。系统可自动生成技术状况评定报告，提出养护建议。

制定应急预案。针对超载车辆、极端洪水、强风等突发事件，设置动态称重系统和限载标志。编制分级响应措施，定期组织应急演练。

四、结束语

市政路桥的安全性及耐久性相互关联。安全性保证桥梁不倒塌，耐久性保证不提前退化。重庆綦江彩虹桥垮塌表明，设计计算错误、施工质量失控、材料性能不足是提前失效的主因。二者通过材料劣化、施工缺陷等机制相互耦合，不可割裂设计。区分不同桥型、环境区域和使用年限，采取差异化设计指标与防护措施，方能有效延长桥梁使用寿命。设计、施工、养护各环节应协同配合，将安全性验算与耐久性设计统一于全寿命周期框架。

参考文献

[1] 陈惠水. 市政路桥设计中的安全性和耐久性分析 [J]. 四川建材, 2022, 48(11): 225-227.
[2] 尹常青. 探究市政路桥设计中的安全性和耐久性 [J]. 工程建设与设计, 2021(6): 74-76.
[3] 吕志江. 探究市政路桥设计中的安全性和耐久性 [J]. 现代物业, 2022(35): 67-69.
[4] 罗康娟. 市政路桥设计中的安全性和耐久性分析 [J]. 建筑工程技术与设计, 2020(18): 2312.
[5] 邱丽莎. 市政路桥设计安全性以及耐久性的价值分析及优化策略 [J]. 现代装饰, 2025(3): 19-21.