

基于改进可靠度方法的预应力混凝土T梁桥加固效果评估

代力¹, 朱泽文², 钟声亮¹, 黄新赞², 宋浩博³, 彭建新³

¹江西省交通投资集团有限责任公司, 江西 南昌

²江西省交投养护科技集团有限公司, 江西 南昌

³长沙理工大学土木与环境工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年6月24日; 录用日期: 2026年7月16日; 发布日期: 2026年7月28日

摘要

以一座预应力混凝土T梁桥为研究对象, 针对其开裂、锈蚀及局部构造损伤引起的安全储备衰减问题, 开展加固后可靠度评估研究。针对传统可靠度计算中控制对象容易泛化、病害折算路径较为单一、横向分布变化考虑不足等问题, 本文以单幅外侧边梁跨中正截面受弯极限状态为评估对象, 提出一种考虑损伤退化、横向分布不利化及CFRP加固恢复效应的改进可靠度分析框架。该框架将既有病害影响分别映射至抗力退化、荷载效应放大和参数不确定性变化中, 并对预应力筋破坏时平均应力、恒活载效应、横向分布系数及随机变量统计参数进行一致化校核。结果表明: 健康状态下桥梁可靠指标为3.85; 损伤状态下, 传统方法与改进方法计算值分别为3.17和2.79; CFRP加固后分别提高至3.47和3.39, 说明加固措施能够有效恢复结构安全储备。研究表明, 改进方法能够更合理地反映老旧T梁桥损伤退化、横向受力重分配和加固恢复效应之间的耦合关系, 可为同类既有T梁桥加固效果评估提供参考。

关键词

桥梁工程, 损伤退化, 横向分布系数, 碳纤维加固, 可靠度评估

Evaluation of the Reinforcement Effect of Prestressed Concrete T-Beam Bridges Based on the Improved Reliability Method

Li Dai¹, Zewen Zhu², Shengliang Zhong¹, Xinzan Huang², Haobo Song³, Jianxin Peng³

¹Jiangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanchang Jiangxi

²Jiangxi Communications Investment Maintenance Technology Group Co., Ltd., Nanchang Jiangxi

³School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

文章引用: 代力, 朱泽文, 钟声亮, 黄新赞, 宋浩博, 彭建新. 基于改进可靠度方法的预应力混凝土T梁桥加固效果评估[J]. 土木工程, 2026, 15(7): 112-122. DOI: 10.12677/hjce.2026.157184

Received: June 24, 2026; accepted: July 16, 2026; published: July 28, 2026

Abstract

Taking a prestressed concrete T-beam bridge as the research object, a study was conducted on the attenuation of safety reserve caused by cracking, corrosion and local structural damage before and after reinforcement. Addressing the problems in traditional reliability calculation, such as the tendency for control objects to be generalized, the relatively simple disease conversion paths, and insufficient consideration of lateral distribution changes, this paper takes the mid-span flexural limit state of a single side beam of the bridge as the evaluation object and proposes an improved reliability analysis framework that takes into account damage degradation, lateral distribution deterioration and the reinforcement recovery effect of CFRP. This framework maps the influence of existing diseases to the degradation of resistance, the amplification of load effects and the changes in parameter uncertainties, and conducts consistent verification of the average stress of prestressed steel bars, the constant and live load effects, the lateral distribution coefficient and the statistical parameters of random variables. The results show that the reliability index of the bridge in a healthy state is 3.85; in the damaged state, the calculated values by the traditional method and the improved method are 3.17 and 2.79, respectively; after CFRP reinforcement, they increase to 3.47 and 3.39, respectively, indicating that the reinforcement measures can effectively restore the structural safety reserve. The study shows that the improved method can more reasonably reflect the coupling relationship between damage degradation, lateral force redistribution and reinforcement recovery effect of old T-beam bridges, and can provide a reference for the evaluation of the reinforcement effect of similar existing T-beam bridges.

Keywords

Bridge Engineering, Damage and Degradation, Transverse Distribution Coefficient, Carbon Fiber Reinforcement, Reliability Assessment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

桥梁可靠度是指结构在规定服役期内、既定作用条件与目标极限状态下完成预定功能的概率性能力表征,其核心在于将荷载效应、材料强度、几何参数、施工偏差、环境侵蚀及性能退化等不确定因素统一纳入概率分析框架,并以失效概率或可靠指标 β 加以量化。相较于传统确定性验算方法,可靠度理论不仅能够判断桥梁是否满足安全要求,还能够进一步揭示其安全储备水平、性能衰减规律及维修加固的合理时机[1]-[4]。对于长期服役的预应力混凝土 T 梁桥而言,裂缝发展、预应力损失、钢筋锈蚀与交通荷载增长往往共同作用,使结构抗力与荷载效应均表现出显著的时变特征,因此有必要采用面向损伤状态的可靠度分析方法。

现有研究已围绕既有桥梁检测评估、承载能力验算、结构可靠度更新以及加固后性能评价等方面形成了较为系统的研究基础。近年来,国内学者针对在役桥梁技术状态评定、承载能力检测评估和结构安全状态识别开展了大量研究,逐步推动桥梁评估由单纯经验判定向基于检测数据、结构分析和可靠度指标的综合评价转变。在混凝土桥梁耐久性与退化评估方面,相关研究进一步考虑了钢筋锈蚀、混凝土劣

化、裂缝扩展和服役环境对结构抗力衰减的影响,为老旧桥梁的时变可靠度分析与寿命预测提供了依据[5]-[7]。同时,碳纤维布等外贴复合材料加固技术在既有混凝土桥梁维修加固中得到广泛应用,相关研究从受弯性能提升、裂缝约束、加固效率和承载能力恢复等方面验证了其工程适用性[8] [9]。Ni 和 Chen [10] 基于监测应变信息开展了桥梁可靠度评估, Xie 和 Wang [11] 研究了 CFRP 加固桥梁可靠度及尺寸效应, Dardar 等[12]进一步分析了 CFRP 加固桥梁梁式构件的受弯可靠度。总体来看,已有研究为既有桥时变可靠度分析和加固效果评价提供了重要基础,但面向具体 T 型预应力混凝土桥的“病害识别-加固前评估-加固后重评”的一体化研究仍需进一步加强。

基于此,本文以袁水大桥 T 型预应力混凝土桥为对象,围绕病害检测、加固前可靠度评估、CFRP 加固后可靠度重估展开研究。不同于笼统意义上的整桥可靠度,本文将控制对象明确为单幅外侧边梁跨中正截面受弯可靠度,并在传统可靠度计算基础上,引入横向分布系数修正和损伤后刚度退化影响,从而使计算对象、极限状态和参数取值保持一致。

2. 桥梁可靠度评估方法与改进

2.1. 适用于 T 梁桥的经典可靠度评估方法

对于装配式预应力混凝土 T 梁桥,主梁跨中正截面受弯承载能力通常是上部结构可靠度评估的重要控制状态之一。本文以桥梁单幅外侧边梁跨中正截面为基本可靠度单元,采用抗力-荷载效应型极限状态函数[13]-[15]:

$$g(X) = M_R(X) - M_S(X) \quad (1)$$

式中, M_R 为主梁跨中正截面抗弯承载效应; M_S 为同一控制截面的弯矩荷载效应; X 为基本随机变量向量。

对于预应力混凝土 T 梁,本文采用如下抗力模型:

$$M_R = \theta_R \left[A_p f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left(d_s - \frac{a}{2} \right) \right] \quad (2)$$

$$a = \frac{A_p f_{ps} + A_s f_y}{f_c b_f} \quad (3)$$

式中: θ_R 为抗力模型修正系数; A_p 为预应力筋面积; f_{ps} 为正截面破坏时预应力筋平均应力; d_p 为预应力筋合力点至受压缘距离; A_s 为普通受拉钢筋面积; f_y 为普通钢筋屈服强度; d_s 为普通受拉钢筋合力点至受压缘距离; a 为等效受压区高度; f_c 为混凝土抗压强度; b_f 为 T 梁受压翼缘计算宽度。

荷载效应 M_S 由恒载弯矩 M_G 和车辆活载弯矩 M_Q 组成:

$$M_S = M_G + M_Q \quad (4)$$

$$M_G = \frac{W_G L^2}{8}, \quad M_Q = \eta \left(\frac{q_k L^2}{8} + \frac{P_k L}{4} \right) (1 + \mu) \quad (5)$$

式中: W_G 为分配到控制主梁上的恒载线荷载; L 为计算跨径; q_k 和 P_k 分别为车道荷载中的均布荷载和集中荷载代表值; μ 为冲击系数; η 为活载横向分布系数,应根据桥宽、梁数、梁距、横隔板作用及车辆横向布置确定。

当抗力和荷载效应可近似按二阶矩处理时,可靠指标可表示为:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \quad p_f = \Phi(-\beta) \quad (6)$$

式中： μ_R 和 μ_S 分别为抗力与作用效应均值； σ_R 和 σ_S 分别为相应标准差； β 为可靠指标； p_f 为失效概率； $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

2.2. 改进可靠度评估方法

传统模型的主要不足在于：一是难以刻画裂缝扩展、预应力损失、钢筋锈蚀等损伤对抗力的持续影响；二是常将车辆活载横向分布系数视为常数，忽略损伤后梁体刚度变化对横向传力的影响；三是将盖梁、桥台等局部病害直接折算到主梁跨中抗力中，容易造成计算对象错位[16]-[18]。本文对传统方法作如下的修正：

$$g(X, t) = M_R(t) - M_S(t) \quad (7)$$

$$\eta(t) = \eta_0 \left[1 + \alpha \left(1 - \frac{EI(t)}{EI_0} \right) \right] \quad (8)$$

式中： η_0 为健康状态下按影响线或杠杆法得到的外侧边梁横向分布系数； EI_0 和 $EI(t)$ 分别为健康状态和损伤状态下的等效抗弯刚度； α 为横向分布放大系数。该式反映了裂缝和锈蚀引起刚度降低后，车辆荷载向不利主梁重分配的趋势。

同时，对加固后构件引入碳纤维布附加抗力项：

$$M_{R,f} = M_{R,d} + \eta_c A_f E_f \varepsilon_{fe} \left(h_f - \frac{a}{2} \right) \quad (9)$$

式中： $M_{R,d}$ 为损伤状态下剩余抗力； η_c 为碳纤维布参与系数； A_f 、 E_f 、 ε_{fe} 分别为碳纤维布截面面积、弹性模量及有效应变； E_f 为碳纤维布合力点至受压缘距离。该表达式体现了 CFRP 主要提高局部抗拉能力和裂缝约束能力，但不能完全恢复已发生的钢筋锈蚀和预应力长期损失。

本文提出的改进可靠度方法并非已充分验证的通用计算模型，而是在有限检测资料条件下，面向老旧预应力混凝土 T 梁桥加固评估构建的探索性分析框架。其核心价值在于：明确以单幅外侧边梁跨中正截面受弯极限状态为评估对象，避免不同构件病害与主梁承载力混同；将病害影响分解为抗力退化、刚度降低和横向分布不利化等路径；并在 CFRP 加固后同时考虑附加抗力与梁间协同恢复作用。该方法提出了“损伤识别 - 参数折算 - 横向分布修正 - 加固效果重评”的统一思路，但相关参数仍具有经验性，后续需结合静载试验、长期监测、有限元反演及更多实桥样本进一步校准。

3. 桥梁加固前可靠度评估

3.1. 工程概况

袁水大桥为一座 6×30 m 预应力混凝土简支 T 梁桥，全桥总长 188 m。上部结构采用预制 T 梁，主梁及现浇接缝采用 C40 混凝土，预应力体系采用直径 15.24 mm、标准强度 1860 MPa 的高强低松弛钢绞线，配套波纹管孔道与群锚体系。桥面铺装由沥青混凝土面层、防水层及钢筋网混凝土层组成。根据竣工图资料，单幅桥横向由 6 片 T 梁组成，主梁中心距约 2.10 m，单片主梁梁高 2.0 m，预制梁顶宽 1.6 m，跨中腹板厚 16 cm，支点附近腹板厚 40 cm，横向通过横隔板和湿接缝形成整体受力体系。桥梁布置立面图见图 1。

该桥已出现较为明显的耐久性劣化与局部损伤现象，全桥共检出病害 17 处，病害部位主要集中于墩盖梁及桥台，病害类型以横向开裂、竖向开裂、锈胀开裂及露筋为主。其中，L-2#墩盖梁和 R-4#墩盖梁病害分布相对集中，裂缝长度最大可达 8.9 m，裂缝宽度最大约 2.30 mm，病害标度以 2 类和 3 类为主。表 1 为桥梁病害统计表，主要破坏形式见图 2。上述病害并不完全等同于主梁跨中正截面损伤，本文仅将

其作为全桥服役退化状态的表征，并通过等效折算影响主梁抗力和横向协同，不直接把盖梁或桥台裂缝作为主梁跨中破坏指标。

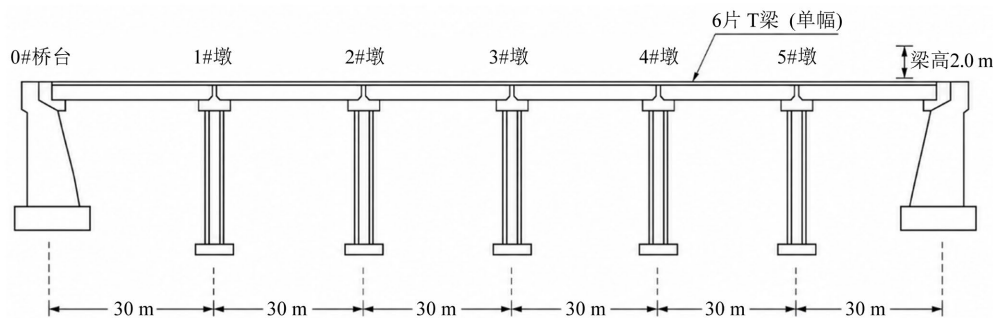


Figure 1. Bridge layout elevation drawing
图 1. 桥梁布置立面图

Table 1. Bridge defect statistics
表 1. 桥梁病害统计

序号	部件名称	位置描述	病害种类	定性描述	定量描述
1	L-1#墩盖梁	盖梁底部距中位置	横向开裂	长度 8.0 m, 宽度 0.52 mm	缝长 ≤ 截面尺寸的 1/3
2	L-2#墩盖梁	盖梁底部距右边缘 1.3 m, 距前端 0.5~0.8 m	锈胀开裂	面积 0.06 m ²	单处面积 ≤ 1.0 m ²
3	L-2#墩盖梁	盖梁右侧面距前 0.8 m	竖向开裂	长度 1.0 m, 宽度 1.00 mm	缝长 ≤ 截面尺寸的 1/3
4	L2-2#墩	墩柱后侧面距底 0.7 m	锈胀露筋	2 处, 总面积 0.03 m ²	单处面积 ≤ 1.0 m ²
5	L-2#墩盖梁	盖梁后侧面距左边缘 1.9 m	竖向裂缝	长度 1.3 m, 宽度 0.42 mm	缝长 ≤ 截面尺寸的 1/3
6	L-2#墩盖梁	盖梁左侧面	竖向开裂	长度 4.0 m, 宽度 1.00 mm	缝长 ≤ 截面尺寸的 1/3
7	L-2#墩盖梁	盖梁底面中部	横向开裂	长度 8.9 m, 宽度 0.60 mm	缝长 ≤ 截面尺寸的 1/3
8	L-4#墩盖梁	盖梁底部左侧面距前 0.5 m	锈胀露筋	面积 0.02 m ²	单处面积 ≤ 1.0 m ²
9	R-2#墩盖梁	盖梁底部距中位置	横向开裂	长度 8.0 m, 宽度 2.30 mm	缝长 ≤ 截面尺寸的 1/3
10	R-4#墩盖梁	盖梁底部距 2#墩柱右边缘 1.0~2.0 m	横向裂缝	长度 1.6 m, 宽度 0.52 mm	缝长 ≤ 截面尺寸的 1/3
11	R-4#墩盖梁	盖梁底部距 1#墩柱左侧 0.0~0.8 m	横向裂缝	长度 0.8 m, 宽度 0.32 mm	缝长 ≤ 截面尺寸的 1/3
12	R-4#墩盖梁	盖梁左侧面底部距后端 0.6 m	锈胀露筋	2 处, 总面积 0.02 m ²	单处面积 ≤ 1.0 m ²
13	R-4#墩盖梁	盖梁底部距 2#墩柱右侧 0.0~1.0 m	横向裂缝	长度 1.0 m, 宽度 0.42 mm	缝长 ≤ 截面尺寸的 1/3
14	L-0#桥台	台帽距内侧边缘 1.1 m、1.9 m、2.3 m	竖向开裂	长度 2.6 m, 宽度 1.60 mm	缝长 > 截面尺寸的 1/3 且 ≤ 截面尺寸的 1/2
15	L-0#桥台	台背距外侧边缘 1.8 m	竖向开裂	长度 2.2 m, 宽度 0.90 mm	缝长 > 截面尺寸的 1/3 且 ≤ 截面尺寸的 1/2
16	L-6#桥台	外侧面距后端 0.6 m	竖向裂缝	长度 1.2 m, 宽度 0.74 mm	缝长 > 截面尺寸的 1/3 且 ≤ 截面尺寸的 1/2
17	R-0#桥台	台帽距外侧边缘 1.8~8.5 m	竖向裂缝	6 条, 最长 0.9 m, 最宽 0.22 mm	缝长 > 截面尺寸的 1/3 且 ≤ 截面尺寸的 1/2

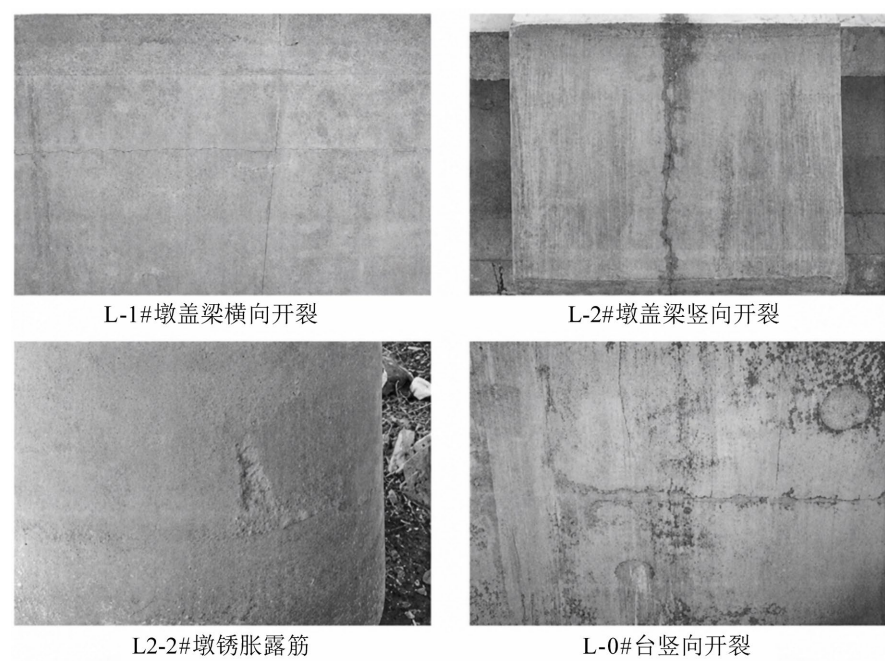


Figure 2. Typical failure forms of bridges
图 2. 桥梁典型破坏形式

3.2. 计算目标基本参数

本文计算目标为单幅外侧边梁跨中正截面受弯可靠度，其既能反映 T 梁桥上部结构主要承载构件的安全储备，也便于与 CFRP 加固后抗弯和横向协同改善效果进行对比。本文暂不考虑将桥面板局部开裂、桥墩盖梁承载能力和桥台竖向裂缝混同为同一极限状态[19]-[23]。桥梁的主要计算参数与变异系数取值表分别见表 2 和表 3。

Table 2. The main calculation parameters of the bridge
表 2. 桥梁的主要计算参数

参数	取值
计算跨径 L	30 m
预应力筋面积 A_p	3780 mm ²
普通受拉钢筋面积 A_s	1200 mm ²
预应力筋平均应力 f_{ps}	1250 MPa
普通钢筋屈服强度 f_y	360 MPa
d_p, d_s	1650 mm, 1800 mm
混凝土强度 f_c	42 MPa
受压翼缘宽度 b_f	1600 mm
恒载弯矩 M_G	3499.0 kN·m
健康状态活载弯矩 M_{Q0}	1886.7 kN·m
变异系数	见表 3

Table 3. Coefficient of variation value
表 3. 变异系数取值

状态	V_R	V_G	V_Q	说明
健康状态	0.080	0.050	0.213	基准状态
损伤状态 - 传统方法	0.090	0.050	0.213	损伤导致抗力不确定性增加
损伤状态 - 改进方法	0.095	0.050	0.225	同时考虑横向分布和活载效应不确定性增加
加固后 - 传统方法	0.090	0.050	0.213	仍按传统荷载效应处理
加固后 - 改进方法	0.088	0.050	0.220	加固后不确定性较损伤状态有所降低

表中： V_R 表示抗力变异系数； V_G 表示恒载效应变异系数； V_Q 表示活载效应变异系数。

3.3. 桥梁健康状态可靠度计算

根据式(2)和式(3)，健康状态等效受压区高度为：

$$a_0 = \frac{3780 \times 1250 + 1200 \times 360}{42 \times 1600} = 76.74 \text{ mm}$$

抗弯承载力均值为：

$$M_{R0} = 1.015 \left[3780 \times 1250 \left(1650 - \frac{76.74}{2} \right) + 1200 \times 360 \left(1800 - \frac{76.74}{2} \right) \right] \times 10^{-6} = 8501.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

健康状态荷载效应为：

$$M_{S0} = M_G + M_{Q0} = 3499.0 + 1886.7 = 5385.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

抗力标准差和荷载效应标准差分别为：

$$\sigma_{R0} = 0.080 \times 8501.6 = 680.1 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_{S0} = \sqrt{(0.050 \times 3499.0)^2 + (0.213 \times 1886.7)^2} = 438.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

因此，健康状态可靠指标为：

$$\beta_0 = \frac{8501.6 - 5385.7}{\sqrt{680.1^2 + 438.3^2}} = 3.85, p_f = 5.88 \times 10^{-5}$$

3.4. 桥梁开裂与锈蚀病害的等效折算

为将检测病害引入主梁可靠度计算，本文采用等效折算思路。裂缝损伤主要反映整体刚度与耐久性退化，锈胀和露筋主要反映钢筋截面损失及黏结性能下降。裂缝等效损伤指数定义为：

$$I_c = \frac{\sum \gamma_i l_i w_i}{L_b w_0}$$

式中， l_i 和 w_i 分别为第 i 处裂缝长度与宽度； γ_i 为病害等级权重，2 类病害取 1.0，3 类病害取 1.2； L_b 为桥梁总跨长； w_0 为归一化宽度。依据病害统计结果，得到 $I_c = 0.274$ 。

对锈胀和露筋病害，定义等效锈蚀面积为：

$$A_\Sigma = \sum \gamma_j A_j$$

计算得 $A_\Sigma = 0.134 \text{ m}^2$ 。在缺乏钢筋失重率实测数据的情况下，按中等锈蚀影响条件进行折算，普通钢筋等效截面损失率取 $\rho_s = 5.36\%$ ，预应力筋等效截面损失率取 $\rho_p = 2.14\%$ 。考虑裂缝和长期服役引起

的预应力筋平均应力与混凝土有效强度折减,取 $\xi_p = 3.0\%$ 、 $\xi_c = 2.0\%$ 。这些参数为算例层面的折算取值。

损伤状态材料参数为:

$$A_{p,d} = 3780(1 - 0.0214) = 3699.1 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,d} = 1200(1 - 0.0536) = 1135.7 \text{ mm}^2$$

$$f_{ps,d} = 1250(1 - 0.030) = 1212.5 \text{ MPa}, f_{c,d} = 42(1 - 0.020) = 41.16 \text{ MPa}$$

由式(2)和式(3)重新计算, 损伤状态下 $a_d = 74.31 \text{ mm}$, 抗弯承载力均值为:

$$M_{R,d} = 8073.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

3.5. 桥梁加固前可靠度计算结果

传统方法仅考虑损伤对抗力的折减, 不显式考虑横向分布不利化。此时荷载效应仍取 $M_s = 5385.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。由式(6)计算:

$$\beta_d^{(i)} = \frac{8073.9 - 5385.7}{\sqrt{(0.090 \times 8073.9)^2 + 438.3^2}} = 3.17, p_f = 7.68 \times 10^{-4}$$

改进方法则同时考虑材料退化和刚度损伤引起的横向分布不利化。损伤后外侧边梁活载横向分布系数由 $\eta_0 = 0.50$ 提高至 $\eta_d = 0.54$, 活载弯矩修正为:

$$M_{Q,d} = 1886.7 \times \frac{0.54}{0.50} = 2037.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

因此, 损伤状态荷载效应为:

$$M_{S,d} = 3499.0 + 2037.6 = 5536.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

计算得:

$$\beta_d^{(i)} = \frac{8073.9 - 5536.6}{\sqrt{(0.095 \times 8073.9)^2 + \left(\sqrt{(0.050 \times 3499.0)^2 + (0.225 \times 2037.6)^2} \right)^2}} = 2.79, p_f = 2.66 \times 10^{-3}$$

Table 4. The calculation results of reliability under different conditions before bridge reinforcement

表 4. 桥梁加固前不同状态下可靠度计算结果

状态	计算方法	$M_R / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_s / (\text{kN} \cdot \text{m})$	β	p_f
健康状态	基准计算	8501.6	5385.7	3.85	5.88×10^{-5}
损伤状态	传统方法	8073.9	5385.7	3.17	7.68×10^{-4}
损伤状态	改进方法	8073.9	5536.6	2.79	2.66×10^{-3}

由表 4 可知, 桥梁在健康状态下的可靠指标达到 3.85; 损伤后可靠指标明显下降, 说明病害已削弱桥梁安全储备。改进方法得到的可靠指标低于传统方法, 原因在于其不仅考虑到抗力退化, 还考虑到外侧边梁横向分布系数增大引起的活载效应放大。

4. 桥梁加固后可靠度评估

4.1. 碳纤维布加固方式及等效参数

袁水大桥采用碳纤维布对横隔板及局部损伤区域进行加固, 碳纤维布采用 PAN 基 12K 碳纤维布,

其抗拉强度标准值不低于 3400 MPa，受拉弹性模量不低于 2.4×10^5 MPa，单位面积质量为 300 g/m²。加固碳纤维布按 2 层计，单层等效厚度取 0.167 mm，有效粘贴宽度取 1700 mm，有效应变取 0.004，参与主梁跨中正截面受弯承载力的系数取 $\eta_c = 0.35$ ，CFRP 合力点至受压缘距离取 $h_f = 1.900$ m。

碳纤维布面积为：

$$A_f = n_f t_f b_f = 2 \times 0.167 \times 1700 = 567.8 \text{ mm}^2$$

其等效拉力为：

$$T_f = A_f E_f \varepsilon_{fe} = \frac{567.8 \times 2.4 \times 10^5 \times 0.004}{1000} = 545.1 \text{ kN}$$

CFRP 折算附加弯矩为：

$$\Delta M_f = 0.35 \times 545.1 \times \left(1.900 - \frac{0.07431}{2} \right) = 355.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

故加固后抗弯承载力均值为：

$$M_{R,f} = 8073.9 + 355.4 = 8429.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

4.2. 传统方法与改进方法计算

传统方法将 CFRP 加固效应等效为抗力提升，而不改变荷载横向分布系数。荷载效应仍取 $M_s = 5385.7$ kN·m，可靠指标为：

$$\beta_f^{(i)} = \frac{8429.3 - 5385.7}{\sqrt{(0.090 \times 8429.3)^2 + 438.3^2}} = 3.47, p_f = 2.57 \times 10^{-4}$$

改进方法可认为 CFRP 不仅提高局部抗力，还可通过抑制裂缝发展、增强横隔板约束和改善梁间协同降低横向分布不利化程度。因此，加固后外侧边梁横向分布系数由损伤状态 $\eta_d = 0.54$ 恢复至 $\eta_f = 0.52$ ，活载弯矩为：

$$M_{Q,f} = 1886.7 \times \frac{0.52}{0.50} = 1962.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

荷载效应为：

$$M_{S,f} = 3499.0 + 1962.2 = 5461.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

经计算，改进方法下加固后可靠指标为：

$$\beta_f^{(i)} = \frac{8429.3 - 5461.2}{\sqrt{(0.088 \times 8429.3)^2 + \left(\sqrt{(0.050 \times 3499.0)^2 + (0.220 \times 1962.2)^2} \right)^2}} = 3.39, p_f = 3.51 \times 10^{-4}$$

Table 5. Reliability calculation results under different states and different methods

表 5. 不同状态与不同方法下可靠度计算结果

状态	计算方法	$M_R / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$M_s / (\text{kN} \cdot \text{m})$	β	p_f
健康状态	基准计算	8501.6	5385.7	3.85	5.88×10^{-5}
损伤状态	传统方法	8073.9	5385.7	3.17	7.68×10^{-4}
损伤状态	改进方法	8073.9	5536.6	2.79	2.66×10^{-3}
加固后	传统方法	8429.3	5385.7	3.47	2.57×10^{-4}
加固后	改进方法	8429.3	5461.2	3.39	3.51×10^{-4}

由表 5 可知,修正后的计算结果符合工程规律:健康状态可靠度最高,损伤后可靠度明显下降,CFRP 加固后可靠度明显回升但仍低于健康状态。改进方法在加固后仍略低于传统方法,反映出残余损伤、横向协同恢复不完全和参数不确定性仍然存在。

5. 结论

以一座预应力混凝土简支 T 梁桥为工程背景,围绕其损伤状态及 CFRP 加固后的可靠度变化开展分析,得到以下结论:

1) 本文将评估对象明确为单幅外侧边梁跨中正截面受弯极限状态,并在抗力-荷载效应型极限状态函数基础上,引入损伤折算、横向分布修正和 CFRP 附加抗力项,形成了面向既有 T 梁桥加固效果评估的改进可靠度分析框架。该框架的主要价值在于将病害影响从单一抗力折减扩展为材料退化、横向分布不利化和加固后协同恢复的综合表征,使计算对象、极限状态和参数取值之间更加一致。

2) 计算结果表明,桥梁健康状态下可靠指标为 3.85;损伤状态下,传统方法仅考虑抗力退化,可靠指标降至 3.17;改进方法进一步考虑横向分布不利化及活载效应放大,可靠指标降至 2.79。两种方法均表明开裂、锈蚀及局部构造损伤会削弱桥梁安全储备,而改进方法对损伤后受力重分配和不确定性增加的反映更为充分。

3) CFRP 加固后,传统方法下可靠指标由 3.17 提高至 3.47,改进方法下由 2.79 提高至 3.39,说明碳纤维布加固能够有效改善结构安全储备。加固后可靠指标仍低于健康状态,表明 CFRP 能够发挥补强、裂缝约束和梁间协同改善作用,但不能完全消除既有锈蚀、预应力长期损失和材料老化等不可逆影响。

本文提出的改进方法仍属于创新型探索性模型,相关损伤折算系数、横向分布修正系数、CFRP 参与系数及随机变量变异系数主要依据工程资料和合理假定确定,尚未通过大量实桥样本和荷载试验进行系统校准,具有一定局限性。后续研究可从以下三个方面进一步深化:1) 结合静载试验、有限元模型修正和监测数据反演横向分布系数及构件刚度退化规律;2) 建立裂缝、锈蚀、预应力损失和 CFRP 界面退化之间的时变耦合模型;3) 将单片主梁截面可靠度拓展至多梁协同、支承体系及桥梁系统可靠度层面,以提高模型在实际养护决策中的适用性。

基金项目

江西省交通运输厅科技项目(2025ZG021, 2025ZG023)。

参考文献

- [1] 李爱群,丁幼亮,王浩,等. 桥梁健康监测海量数据分析与评估——“结构健康监测”研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(8): 972-984.
- [2] 黄侨,任远,许翔,等. 大跨径缆索承重桥梁状态评估的研究现状与发展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(9): 1-9.
- [3] 胡俊亮,钟继卫,黄仕平,颜全胜. 基于可靠度指标的桥梁安全评估分级方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(4): 550-555.
- [4] 李文杰,侯天宇,赵君黎,等. 基于可靠度理论的混凝土桥梁安全性评估方法研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(4): 87-92.
- [5] 毛江鸿,金伟良,李志远,等. 氯盐侵蚀钢筋混凝土桥梁耐久性提升及寿命预测[J]. 中国公路学报, 2016, 29(1): 61-66.
- [6] 袁阳光,陈笑,韩万水,等. 在役混凝土桥梁非平稳抗力劣化模型建立与更新[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 145-155.
- [7] 袁阳光,韩万水,谢青,等. 非平稳车载及抗力劣化进程下混凝土桥梁时变可靠性评估[J]. 中国公路学报, 2020, 33(3): 85-96.

- [8] 王海涛, 朱长玉, 熊浩, 等. 锚固方法和预应力水平对 CFRP 板加固钢筋混凝土梁抗弯性能的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 104-110.
- [9] 梅葵花, 王凤轩, 孙胜江. 纤维增强复合材料加固混凝土桥梁结构研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(1): 31-51.
- [10] Ni, Y.Q. and Chen, R. (2021) Strain Monitoring Based Bridge Reliability Assessment Using Parametric Bayesian Mixture Model. *Engineering Structures*, **226**, Article ID: 111406. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111406>
- [11] Xie, H. and Wang, Y. (2019) Reliability Analysis of CFRP-Strengthened RC Bridges Considering Size Effect of CFRP. *Materials*, **12**, Article 2247. <https://doi.org/10.3390/ma12142247>
- [12] Dardar, S., Eamon, C.D. and Parra-Montesinos, G. (2024) Flexural Reliability of CFRP-Strengthened Bridge Girders. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **38**, Article ID: 04023065. <https://doi.org/10.1061/jpcfev.cfeng-4587>
- [13] Hasofer, A.M. and Lind, N.C. (1974) Exact and Invariant Second-Moment Code Format. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **100**, 111-121. <https://doi.org/10.1061/jmcea3.0001848>
- [14] Rackwitz, R. and Flessler, B. (1978) Structural Reliability under Combined Random Load Sequences. *Computers & Structures*, **9**, 489-494. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(78\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0045-7949(78)90046-9)
- [15] Nowak, A.S. and Hong, Y. (1991) Bridge Live-Load Models. *Journal of Structural Engineering*, **117**, 2757-2767. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1991\)117:9\(2757\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1991)117:9(2757))
- [16] Guo, T., Sause, R., Frangopol, D.M. and Li, A. (2011) Time-Dependent Reliability of PSC Box-Girder Bridge Considering Creep, Shrinkage, and Corrosion. *Journal of Bridge Engineering*, **16**, 29-43. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000135](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000135)
- [17] Kim, J. and Song, J. (2021) Time-Dependent Reliability Assessment and Updating of Post-Tensioned Concrete Box Girder Bridges Considering Traffic Environment and Corrosion. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, **7**, Article ID: 04021062. <https://doi.org/10.1061/ajrua6.0001188>
- [18] He, X., Tan, G., Chu, W., Wang, W. and Kong, Q. (2022) Time-Dependent Reliability Assessment Method for RC Simply Supported T-Beam Bridges Based on Lateral Load Distribution Influenced by Reinforcement Corrosion. *Applied Sciences*, **12**, Article 7028. <https://doi.org/10.3390/app12147028>
- [19] Vu, K.A.T. and Stewart, M.G. (2000) Structural Reliability of Concrete Bridges Including Improved Chloride-Induced Corrosion Models. *Structural Safety*, **22**, 313-333. [https://doi.org/10.1016/s0167-4730\(00\)00018-7](https://doi.org/10.1016/s0167-4730(00)00018-7)
- [20] Capozucca, R. (1995) Damage to Reinforced Concrete Due to Reinforcement Corrosion. *Construction and Building Materials*, **9**, 295-303. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00033-c](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00033-c)
- [21] Stewart, M.G. and Al-Harthy, A. (2008) Pitting Corrosion and Structural Reliability of Corroding RC Structures: Experimental Data and Probabilistic Analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, **93**, 373-382. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.12.013>
- [22] Zhu, W. and François, R. (2014) Corrosion of the Reinforcement and Its Influence on the Residual Structural Performance of a 26-Year-Old Corroded RC Beam. *Construction and Building Materials*, **51**, 461-472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.015>
- [23] 中华人民共和国交通运输部. JTG 2120-2020 公路工程结构可靠性设计统一标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.