

# 腐蚀影响下服役钢箱梁抗弯可靠性分析

钟声亮<sup>1</sup>, 黄新赞<sup>2</sup>, 王振宇<sup>1</sup>, 林泽方<sup>2</sup>, 刘旭<sup>3</sup>, 彭建新<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>江西省交通投资集团有限责任公司, 江西 南昌

<sup>2</sup>江西省交投养护科技集团有限公司, 江西 南昌

<sup>3</sup>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4月25日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月26日

## 摘要

本文针对腐蚀环境下Q370qD高强钢箱梁的抗弯性能退化及结构安全性评估问题, 开展了基于概率统计理论的时变可靠度研究。首先, 深入分析了腐蚀对钢结构截面几何参数减损与材料力学性能劣化的耦合机理, 构建了考虑材料-几何双重损伤耦合抗力衰减模型, 并确定了材料性能、几何参数及计算模式的不确定性统计特征。其次, 依托道滘河大桥工程实例, 采用JC法(验算点法)计算了钢箱梁在100年设计基准期内的抗弯时变可靠指标。研究结果表明: 钢箱梁的可靠指标随腐蚀年限增加呈非线性下降趋势, 从初始状态的6.854降至100年后的4.892, 但始终高于公路桥梁一级安全等级的目标可靠指标, 表明该结构在服役期内具备足够的安全性。最后, 参数敏感性分析指出, 计算模式的不确定性对可靠度影响最大, 荷载效应影响略低, 而材料与几何参数的变异性影响相对较小。本研究结论可为既有高强钢桥梁的维护决策与寿命预测提供理论依据。

## 关键词

Q370qD钢箱梁, 腐蚀效应, 抗力时变模型, 可靠度分析, JC法, 敏感性分析

# Flexural Reliability Analysis of In-Service Steel Box Girders under Corrosion Effects

Shengliang Zhong<sup>1</sup>, Xinzan Huang<sup>2</sup>, Zhenyu Wang<sup>1</sup>, Zefang Lin<sup>2</sup>, Xu Liu<sup>3</sup>, Jianxin Peng<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Jiangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanchang Jiangxi

<sup>2</sup>Jiangxi Jiaotou Maintenance Technology Group Co., Ltd., Nanchang Jiangxi

<sup>3</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha Hunan

Received: April 25, 2026; accepted: May 17, 2026; published: May 26, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 钟声亮, 黄新赞, 王振宇, 林泽方, 刘旭, 彭建新. 腐蚀影响下服役钢箱梁抗弯可靠性分析[J]. 土木工程, 2026, 15(5): 309-322. DOI: 10.12677/hjce.2026.155141

## Abstract

To address the flexural performance degradation and structural safety assessment of Q370qD high-strength steel box girders under corrosive environments, this paper presents a time-dependent reliability study based on probabilistic statistics. First, the coupling mechanism of corrosion-induced cross-sectional geometric loss and deterioration of material mechanical properties is thoroughly analyzed. A resistance degradation model considering the time-varying elastic modulus is established, and the statistical characteristics of uncertainties in material properties, geometric parameters, and calculation models are determined. Then, using the Daojiaohe Bridge as a case study, the JC method (checking point method) is employed to calculate the time-dependent flexural reliability index of the steel box girder over a 100-year design service life. The results show that the reliability index of the steel box girder decreases nonlinearly with increasing corrosion time, from an initial value of 6.854 to 4.892 after 100 years, but remains above the target reliability index for the first-class safety level of highway bridges, indicating sufficient safety throughout the service life. Finally, parametric sensitivity analysis reveals that the uncertainty in the calculation model has the greatest impact on reliability, followed by load effects, while variabilities in material and geometric parameters have relatively minor effects. The findings provide a theoretical basis for maintenance decision-making and life prediction of existing high-strength steel bridges.

## Keywords

Q370qD Steel Box Girder, Corrosion Effect, Time-Dependent Resistance Model, Reliability Analysis, JC Method, Sensitivity Analysis

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

钢箱梁结构凭借自重轻、跨越能力大及施工快捷等优势,在现代大跨度桥梁中应用广泛[1],而Q370qD 高强钢的推广进一步促进了其轻型化与长寿命发展[2]。然而,长期暴露于自然环境中的桥梁结构不可避免地受到大气腐蚀的侵蚀[3]。腐蚀不仅引起构件有效截面的物理减损[4],还会诱发应力集中并导致钢材屈服强度[5]、弹性模量等力学性能的劣化[6]。这种双重损伤的积累将导致钢箱梁抗弯承载力和抗疲劳寿命随服役时间逐渐降低[7],若不能准确评估其全寿命周期内的安全性,可能引发结构提前失效甚至灾难性事故[8]。尤其是在海洋、工业污染或高湿度等恶劣环境中,腐蚀会使板件有效厚度减薄、截面模量降低,进而显著削弱结构的抗弯承载能力和疲劳寿命[9] [10]。随着服役年限的增加,腐蚀引起的抗力退化已成为影响钢箱梁结构安全性和耐久性的关键因素[11] [12]。因此,开展腐蚀环境下钢箱梁的抗力衰减机理与时变可靠性研究,对于评估在役桥梁的剩余寿命、确定合理维修时机、优化设计参数及完善相关设计规范具有重要的理论与工程价值[13] [14]。通过建立准确的腐蚀退化模型和可靠度分析方法,能够科学预测结构在全寿命周期内的安全性能,为桥梁维护决策提供依据,从而有效预防因腐蚀导致的突发性破坏事[15]。

针对钢结构腐蚀与可靠性问题,国内外学者已开展了大量研究。在腐蚀损伤模型方面,Ghassemi等[16]建立了钢梁腐蚀损伤模型,定量推导了腐蚀对抗弯、抗剪承载力的削弱效应,并提出了环境腐蚀速率

预测方法; Soares 等[17]构建了全寿命可靠度分析框架,探讨了材料劣化与荷载历程的耦合效应;国内张弛[18]结合箱梁结构验证了多因素耦合下的长期性能,并采用重要抽样法优化计算效率。现有研究主要从腐蚀机理、力学性能退化模型及可靠度评估方法三个层面展开。在腐蚀机理方面,均匀腐蚀是钢箱梁常见形式,腐蚀深度常采用幂函数模型( $C(t) = At^n$ )描述,并可通过环境因子与材料化学成分确定参数[10]。腐蚀导致钢材弹性模量、屈服强度及延性显著下降[12]。在抗弯性能评估上,基于截面模量退化与极限强度计算的简化模型能较好预测锈蚀钢箱梁的刚度与强度衰减规律[10],有限元与试验均表明腐蚀程度越高,极限弯矩与耗能能力下降越明显[12]。在可靠度分析中,普遍采用一次二阶矩法、蒙特卡洛法或响应面法建立抗弯极限状态功能函数,考虑荷载与抗力的随机分布特征,评估不同服役期的可靠度指标[11][15]。研究发现,城市与海洋环境下钢箱梁在服役 10 年左右可能出现可靠度骤降,需尽早干预[10];部分研究提出调整分项系数以提高全寿命期安全性[11][12]。

通过上述分析发现,现有研究仍存在以下不足:其一,多数腐蚀退化模型基于人工加速试验或短期暴露数据,缺乏长期自然环境下腐蚀深度与力学性能协同演变的系统实测支持[11][12],且大多仅关注截面“变薄”而忽略了材料刚度退化对抗弯承载力的直接影响,更缺乏融合微观损伤机制的宏观评估模型。其二,可靠度分析普遍假设均匀腐蚀,忽略了局部点蚀、应力腐蚀及腐蚀-疲劳耦合作用对钢箱梁抗弯性能的差异化影响[9][14],也未能充分考虑荷载效应与抗力统计参数因超载、交通增长及环境变化带来的不确定性[11][15]。其三,现有抗力退化模型多针对单一板件或简化截面,对复杂加劲肋板体系、焊缝区域及整体箱梁协同失效机制的系统研究不足[10][11]。其四,针对 Q370qD 高强钢的腐蚀时变性能研究相对匮乏,对其在设计基准期内安全指标的动态演化路径及模型不确定性的敏感度揭示不够充分。

本文以腐蚀环境下的 Q370qD 高强钢箱梁为研究对象,深入剖析了腐蚀对截面几何参数减损与材料力学性能劣化的耦合机理,突破传统模型仅关注截面“变薄”的局限,引入刚度修正因子,建立了考虑材料—几何双重损伤耦合影响的抗弯抗力时变计算模型,推导出等效截面模量演化公式;系统量化了材料性能、几何参数及计算模式的不确定性统计特征,构建了综合抗力不确定性概率模型;以道滘河大桥主桥 Q370qD 钢箱梁为实例,采用 JC 法计算了 100 年设计基准期内的抗弯时变可靠指标,揭示了可靠指标随腐蚀年限的非线性衰减规律,并验证了结构全寿命周期内的安全性;参数敏感性分析表明,计算模式不确定性是影响评估精度的最关键因素,其次为荷载效应。本文首次将腐蚀引起的弹性模量退化纳入钢箱梁抗弯抗力时变模型,提出基于刚度修正因子的等效截面模量计算方法;针对 Q370qD 高强钢建立完整的腐蚀时变可靠度评估框架;通过敏感性分析量化各不确定性因素的影响权重。研究成果具有重要的理论与工程价值,不仅完善了腐蚀环境下高强钢结构的抗力退化机理与可靠度分析方法,还可为同类桥梁的全寿命周期安全评估、维修时机确定及设计规范修订提供量化依据,对保障交通运营安全具有实际指导意义。

## 2. 腐蚀环境下钢箱梁抗弯抗力时变模型

在钢结构全寿命周期内,腐蚀导致的性能退化主要体现为截面几何特性的削弱(面积  $A$ 、惯性矩  $I$  减小)与材料本构关系的劣化(弹性模量  $E$  降低)。鉴于多物理场耦合的复杂性,本研究采用综合抗力衰减模型,通过引入系统不确定性系数,将时变效应整合至极限状态方程中。

### 2.1. 抗力时变衰减模型

构造钢箱梁时变抗力模型  $R(t)$  如下:

$$R(t) = \Omega_{\text{sys}} \cdot R_{\text{nom}}(t) \quad (1)$$

式中:  $\Omega_{\text{sys}}$  为综合不确定性影响因子,其定义为材料、几何与计算模式不确定性的乘积,可用下式计算。

$$\Omega_{\text{sys}} = K_M \cdot K_A \cdot K_P \quad (2)$$

式中： $K_M, K_A$  分别为材料性能与几何参数的随机变量； $K_P$  为计算模型的不确定性修正系数；主要为钢材力学性能； $R_{\text{nom}}(t)$  为基于规范定义的抗力标准值时变函数(随时间  $t$  变化的函数)。

### 2.2. 考虑刚度退化的抗力计算

对于受弯钢箱梁，其承载能力受整体稳定性控制。腐蚀引起的截面缺损将改变梁的细长比，进而导致整体稳定系数  $\varphi(t)$  的非线性衰减。

基于《钢结构设计标准》，抗力标准值  $R_{\text{nom}}(t)$  可重写为：

$$R_{\text{nom}}(t) = \gamma_x \cdot f_{\text{des}} \cdot \varphi(t) \cdot W_{\text{eq}}(t) \quad (3)$$

式中： $\gamma_x$  为截面塑性发展系数，对 Q370qD 取  $\gamma_x = 1.0$ ； $f_{\text{des}}$  为钢材强度设计值，即为  $k_0 f_k$ ； $k_0$  取 1.0； $\varphi(t)$  为随时间演化的整体稳定系数，本文取 1.0； $W_{\text{eq}}(t)$  为考虑刚度退化的等效截面模量。

传统计算常忽略材料刚度退化，仅通过几何参数  $I(t)/y_{\text{max}}$  计算截面模量。然而，试验表明腐蚀钢材的弹性模量会随腐蚀率增加而降低。为此，引入刚度修正因子  $\lambda_E(t)$  对几何截面模量进行修正。

根据弹性力学原理，等效截面模量表达式重构为：

$$W_{\text{eq}}(t) = \lambda_E(t) \cdot \frac{I(t)}{y_{\text{max}}} \quad (4)$$

式中，刚度修正因子  $\lambda_E(t)$  定义为腐蚀后弹性模量与初始模量的比值：

$$\lambda_E(t) = \frac{E_{\text{corr}}(t)}{E_0} \quad (5)$$

基于 Q370qD 钢材的加速腐蚀试验数据回归分析，定义体积损失率  $\eta_v$  为：

$$\eta_v(t) = 1 - \frac{A(t)}{A_0} \quad (6)$$

式中： $A_0$  为原来的截面面积， $A(t)$  为腐蚀后剩下的截面面积。

则腐蚀后的时变弹性模量  $E_{\text{corr}}(t)$  (单位：GPa) 可表示为关于  $\eta_v$  的线性经验方程：

$$E_{\text{corr}}(t) = 191.618 - 151.006 \cdot \eta_v(t) \quad (7)$$

联立式(4)至式(7)，得到最终的改进型截面模量演化模型：

$$W_{\text{eq}}(t) = \frac{191.618 - 151.006 \left( 1 - \frac{A(t)}{A_0} \right)}{E_0} \cdot \frac{I(t)}{y_{\text{max}}} \quad (8)$$

### 3. 钢箱梁不确定性表征计算

在评估腐蚀钢箱梁结构构件的可靠度时，鉴于直接从实测数据中统计抗力样本较为困难且不实际，因此通常采用《建筑结构可靠度统一设计标准》(GB50068-2018)所建议的方法。将影响抗力的因素细分为几何参数、材料特性以及计算模式这三个相互独立的随机变量，并分别对这些变量的统计特性进行确定。此时抗力表达式为  $R = K_R R_k$ ， $R_k$  为按规范中构件抗力计算公式得到的抗力标准值，综合不确定性  $K_R$  反映了材料性能不确定度  $K_M$ 、几何参数不确定度  $K_A$  以及计算模式不确定度  $K_P$  的共同影响。

$$R = K_M K_A K_P R_k \quad (9)$$

### 3.1. 分项不确定性表征

材料性能的不确定性( $K_M$ )反映了材料力学参数在空间分布上的离散性以及实际服役状态与标准试验状态之间的差异。对于 Q370qD 这类高强桥梁钢,其不确定性主要来源于冶金缺陷、轧制工艺波动以及加载速率效应。

引入随机变量  $K_M$  对材料性能进行修正,其定义为结构中材料性能的实际值( $f_c$ )与规范规定的标准值( $f_k$ )之比。从统计学角度, $K_M$  可进一步解耦为两个独立随机过程的耦合。

$$K_M = K_0 \cdot K_f \quad (10)$$

$K_0$  反映了实际结构中材料性能与标准试件(通常为单轴拉伸试件)性能的差异,这种差异主要源于尺寸效应、加载速率不同以及受力状态(单轴与多轴)的区别。

$$K_0 = \frac{f_c}{f_s} \quad (11)$$

$K_f$  描述了标准试件试验结果的离散性,反映了材料生产质量控制水平及抽样检验的随机误差。

$$K_f = \frac{f_s}{f_k} \quad (12)$$

基于随机变量的独立性假设,材料性能不确定性的统计特征可由二阶矩方法推导得出。其均值  $\mu_{K_M}$  与变异系数  $\delta_{K_M}$  分别为:

$$\mu_{K_M} = \mu_{K_0} \cdot \mu_{K_f} \quad (14)$$

$$\delta_{K_M} = \sqrt{\delta_{K_0}^2 + \delta_{K_f}^2} \quad (15)$$

式中: $\mu_{K_0}$ 、 $\mu_{K_f}$  分别为  $K_0$ 、 $K_f$  的均值; $\delta_{K_0}$ 、 $\delta_{K_f}$  分别为  $K_0$ 、 $K_f$  的变异系数。

几何参数的不确定性( $K_A$ )是指构件在制造、安装及服役过程中,其实际几何特征(截面尺寸、板厚、直线度等)相对于设计名义值的偏差。在腐蚀环境下,这一参数不仅包含初始制造误差,还隐式包含了非均匀腐蚀带来的截面随机损伤。

定义几何参数不确定性随机变量  $K_A$  如下:

$$K_A = \frac{a_s}{a_k} \quad (16)$$

式中: $a_s$  为构件几何参数的实测统计值; $a_k$  为构件设计图纸规定的几何参数标准值。

计算模式不确定性  $K_p$  用于修正抗力计算模型与结构真实受力行为之间的差异。这种差异主要来源于:理论公式的简化假设(如平截面假定、材料本构理想化、边界条件简化等)、腐蚀损伤模型中未充分考虑的复杂因素(如局部屈曲与腐蚀的耦合效应、残余应力分布变化等),以及实际结构与理想化模型在几何构型、约束条件上的偏差。

$K_p$  定义为结构实际抗力  $R_{actual}$  与按规范公式计算得到的理论抗力  $R_{theory}$  之比:

$$K_p = \frac{R_{actual}}{R_{theory}} \quad (17)$$

其统计参数(均值  $\mu_{K_p}$ 、变异系数  $\delta_{K_p}$ )通常基于同类结构足尺试验或精细化有限元模拟结果校准得到。本文参考同类高强钢构件的研究成果,并结合工程经验,取  $\mu_{K_p} = 1.00$ ,  $\delta_{K_p} = 0.15$ , 并假设服从正态分布。该取值表明,在平均意义上,计算模型无系统性偏差,但存在约 15%的离散性,反映了模型预测误差的不确定性。

### 3.2. 抗力综合不确定性统计模型

结构构件的抗力函数是一个涉及多变量的非线性映射。针对 Q370qD 钢箱梁，根据误差传递原理，其抗力综合不确定性  $K_R$  可由各分项不确定性叠加而成。

假设材料性能、几何参数与计算模式之间相互独立，定义抗力计算公式为  $R = R(f, a, \dots) \cdot K_P$ ，则综合抗力不确定性及其统计特征推导如下。

根据期望性质，综合不确定性的均值  $\mu_{K_R}$  为各分项均值的乘积：

$$\mu_{K_R} = \mu_{K_M} \cdot \mu_{K_A} \cdot \mu_{K_P} \quad (18)$$

进而得到抗力分布的均值  $\mu_R$ ：

$$\mu_R = \mu_{K_R} \cdot R_K \quad (19)$$

基于一次二阶矩(FOSM)近似，当各变量变异系数较小时，综合抗力的变异系数  $\delta_R$  可采用平方和开方公式计算：

$$\delta_R = \delta_{K_R} = \sqrt{\delta_{K_M}^2 + \delta_{K_A}^2 + \delta_{K_P}^2} \quad (20)$$

最终确定抗力分布的标准差  $\sigma_R$ ，为可靠度指标  $\beta$  的计算提供核心输入：

$$\sigma_R = \mu_R \cdot \delta_R \quad (21)$$

## 4. 钢箱梁的时变可靠指标计算方法

### 4.1. 时变可靠指标分析框架

结构可靠度是指结构在规定的设计基准期内，在规定的条件下，完成预定功能的能力。与传统静态可靠度分析不同，时变可靠度引入了时间维度，旨在量化结构性能随材料劣化(如腐蚀)、荷载历程变化及环境侵蚀而发生的动态衰减规律。

构建基于随机过程的极限状态方程是分析的核心。定义  $R(t)$  为构件抗力的随机过程， $S(t)$  为荷载效应的随机过程。当结构处于某一特定极限状态时，其功能函数  $Z(t)$  可定义为：

$$Z(t) = g[R(t), S(t)] = R(t) - S(t) = 0 \quad (22)$$

式中： $Z(t)$  为结构的功能时变函数， $Z > 0$  时，安全； $Z = 0$  时，极限状态； $Z < 0$  时，失效； $R(t)$  为抗力随机过程，由材料 ( $X_1$ )、几何 ( $X_2$ ) 等随机变量的时变函数决定； $S(t)$  为荷载效应随机过程，通常包含永久荷载与可变荷载的组合效应。

当假设结构抗力  $R(t)$  与荷载效应  $S(t)$  均服从正态分布时，可利用二阶矩方法直接推导可靠指标。此时，功能函数  $Z(t)$  的均值  $\mu_Z(t)$  与标准差  $\sigma_Z(t)$  分别为：

$$\mu_Z(t) = \mu_R(t) - \mu_S(t) \quad (23)$$

$$\sigma_Z(t) = \sqrt{\sigma_R(t)^2 + \sigma_S(t)^2} \quad (24)$$

据此，时变可靠指标  $\beta(t)$  可表达为均值与标准差的比值，反映了安全储备与不确定性的相对关系：

$$\beta(t) = \frac{\mu_Z(t)}{\sigma_Z(t)} = \frac{\mu_R(t) - \mu_S(t)}{\sqrt{\sigma_R(t)^2 + \sigma_S(t)^2}} \quad (25)$$

结构在设计基准期  $[0, T]$  内的累积失效概率  $P_f(T)$  定义为结构抗力在任意时刻小于荷载效应的概率：

$$P_f(T) = P\left\{\min_{0 \leq t \leq T} [R(t) - S(t)] < 0\right\} \quad (26)$$

## 4.2. 基于 JC 法的时变可靠指标求解

鉴于影响钢箱梁可靠度的随机变量(如风荷载、车辆荷载、腐蚀参数等)并不完全服从正态分布,直接采用一次二阶矩法会产生较大误差。因此,本研究采用 JC 法进行求解。该方法通过在验算点处将非正态变量等效为正态变量,兼顾了计算精度与收敛效率。

设影响结构性能的随机变量向量为  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ , 功能函数为:

$$Z = g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (27)$$

JC 法的核心在于寻找验算点  $P^*(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ , 该点位于极限状态曲面上(即  $g(X^*) = 0$ ), 且距离标准正态空间原点的距离最近。

对于非正态分布的随机变量  $X_i$ , 根据累积分布函数(CDF)值相等和概率密度函数(PDF)值相等的原则, 在验算点  $x_i^*$  处进行当量正态化。其等效标准差  $\sigma'_{X_i}$  和等效均值  $\mu'_{X_i}$  计算如下:

$$\sigma'_{X_i} = \frac{\phi\left(\Phi^{-1}\left[F_{X_i}(x_i^*)\right]\right)}{f_{X_i}(x_i^*)} \quad (28)$$

$$\mu'_{X_i} = x_i^* - \Phi^{-1}\left[F_{X_i}(x_i^*)\right] \cdot \sigma'_{X_i} \quad (29)$$

式中:  $F_{X_i}$ 、 $f_{X_i}$ : 分别为原随机变量  $X_i$  的累积分布函数和概率密度函数;  $\Phi$ 、 $\phi$ : 分别为标准正态分布的累积分布函数和概率密度函数。通过迭代算法不断更新验算点坐标, 直至前后两次计算的可靠指标  $\beta$  差值满足收敛准则(如  $|\beta_k - \beta_{k-1}| < 0.001$ )。

针对腐蚀 Q370qD 高强钢箱梁, 其特定的极限状态功能函数由抗力  $R$ 、永久荷载  $G$  和可变荷载最大值  $Q_T$  构成:

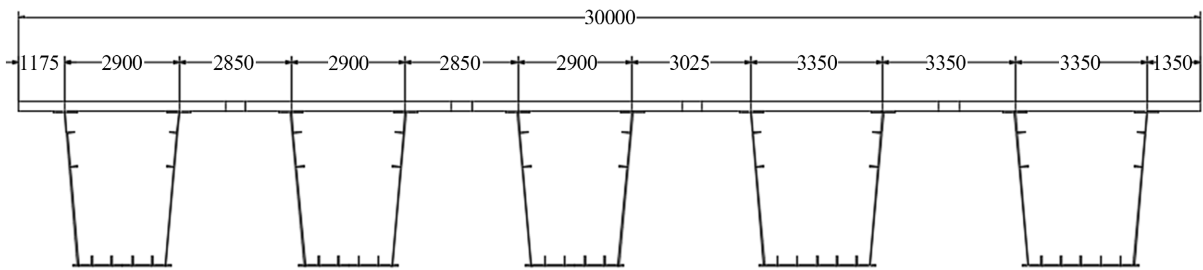
$$Z = g(R, G, Q_T) = R - G - Q_T \quad (30)$$

通过求解该方程在不同腐蚀年限  $t$  下的可靠指标  $\beta$ , 即可绘制出钢箱梁的时变可靠度衰减曲线, 为结构的维护与加固提供理论依据。

## 5. 工程案例

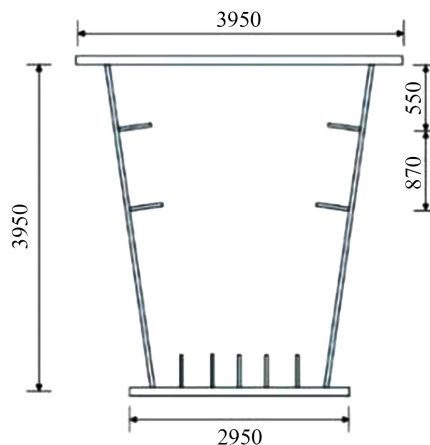
道滘河大桥旧桥位于东莞水道, 是东莞北大桥的组成部分。尽管该桥墩台的整体检查未发现显著的滑移或沉降差异迹象, 未观察到不均匀沉降等病害。然而, 结构表面仍然存在较为严重的局部损伤和劣化现象。具体而言, 顶面加固钢板普遍存在严重锈蚀问题, 部分端横梁底部钢筋裸露; 部分 T 构桥墩的门式框架顶部出现竖向裂缝, 底部则发生横向裂缝, 裂缝宽度介于 0.12~0.35 mm 之间。此外, 部分墩柱因锈蚀膨胀导致钢筋裸露, T 构桥墩底部的外包混凝土也存在收缩引起的竖向裂缝, 裂缝宽度在 0.12~0.4 mm 范围内。这些问题表明, 该桥在长期服役过程中受腐蚀、环境应力及材料老化等多重因素的综合影响, 部分结构已出现性能退化, 急需进一步的检测与加固措施。

为提高桥梁的结构安全性和使用性能, 道滘河大桥的改扩建方案采用旧桥拆除重建的方式, 并分阶段实施新建桥梁工程。桥梁的跨径布置设计为: (32.5 + 38.5) m 预应力混凝土 T 梁 + (90 + 90) m 等截面简支钢箱梁 + (24 + 32.5) m 预应力混凝土 T 梁, 总桥长 307.5 m。其中, 主桥部分采用等截面简支钢箱梁(Q370qD 高强钢), 具有较好的抗扭性能和承载力, 以满足较大跨径的需求; 引桥部分则采用预应力混凝土 T 梁结构, 以充分发挥其经济性与施工便捷性。此方案在结构形式与材料选择上综合考虑了桥梁功能需求、工程经济性和长期服役性能, 确保桥梁的安全性和耐久性。道滘河大桥主桥钢箱梁截面以及梁单元如图 1 所示。



**Figure 1.** Cross-section of the steel box girder of the main bridge of Daojiao River Bridge  
**图 1.** 道涇河大桥主桥钢箱梁截面

钢箱梁顶底板厚度均为 36 mm，腹板厚度为 16 mm，横隔板厚度为 28 mm，且横隔板以每隔 10 m 的间隔进行设置。腹板纵肋尺寸为 200 mm × 20 mm，底板纵肋尺寸采用 240 mm × 22 mm。钢箱梁具体截面尺寸及形状如图 2 所示。



**Figure 2.** Standard sectional drawing  
**图 2.** 标准断面图

### 5.1. 随机变量统计参数确定

为了确保可靠度评估的准确性，必须准确量化输入变量的统计特征。依据《高强钢结构设计规程》及相关文献的大样本统计数据，结合本工程 Q370qD 钢材的实际特性，确定各随机变量的统计参数。

#### (1) 材料性能不确定性

基于大量 Q370qD 高强钢材的实测数据统计，其材料性能表现出较高的稳定性。综合考虑标准试件与实体结构的差异，确定其统计参数如表 1 所示。

**Table 1.** Statistical parameters of the performance uncertainty parameters for Q370qD high-strength steel  
**表 1.** Q370qD 高强度钢材性能不确定性参数统计参数

钢材型号	$\mu_{K_0}$	$\delta_{K_0}$	$\mu_{K_f}$	$\delta_{K_f}$	$\mu_{K_M}$	$\delta_{K_M}$
Q370qD	1.004	0.023	1.030	0.060	1.034	0.064

$\mu_{K_0} = 1.004$ 、 $\delta_{K_0} = 0.023$ ；表明试件与实桥材料差异极小、离散度低， $\mu_{K_f} = 1.030$ 、 $\delta_{K_f} = 0.060$ ；说明钢材强度略高于标准值且波动可控， $\mu_{K_M} = 1.034$ 、 $\delta_{K_M} = 0.064$ ；体现材料整体性能偏安全、离散稳

定, 这类参数用于反映 Q370qD 材料强度与刚度的随机波动特征。

(2) 几何参数不确定性

参考《钢结构设计标准》(GB50017-2017)编制组对钢构件几何尺寸的系统性分析结果, 考虑到现代钢结构制造工艺的精度提升, 采纳规范建议值: 均值  $\mu_{K_A} = 1.00$ , 变异系数  $\delta_{K_A} = 0.02$ ; 表明钢箱梁截面尺寸偏差小、制造精度高, 该参数用于考虑施工制造与腐蚀损伤带来的截面几何随机性。

(3) 计算模式不确定性

由于腐蚀后钢箱梁的抗力计算模型涉及多重简化假设, 为通过概率方法覆盖模型误差, 出于安全保守考虑, 设定计算模式不定性的均值为  $\mu_{K_p} = 1.000$ 。参考同类高强钢轴压构件的研究成果, 其详细统计参数见表 2。

**Table 2.** Statistical analysis of uncertainty in calculation models for steel structures  
**表 2.** 钢结构计算模式不确定性统计分析

构件种类	$\mu_{K_{p1}}$	$\sigma_{K_{p1}}$	$\mu_{K_{p2}}$	$\sigma_{K_{p2}}$	$\delta_{K_{p2}}$
Q370qD	1.000	0.15	0.15	0.8747	0.0053

$\mu_{K_{p1}} = 1.000$ 、 $\sigma = 0.15$ 、 $\delta = 0.15$ ; 表明抗弯承载力计算公式无系统偏差、模型误差处于中等水平,  $\sigma_{K_{p2}} = 0.8747$ 、 $\delta_{K_{p2}} = 0.0053$ ; 说明腐蚀损伤模型精度极高、计算误差极小, 可全面反映理论模型与实际结构抗力间的误差差异。

(4) 抗力综合不确定性

基于上述分项参数, 利用误差传递公式计算得到 Q370qD 钢箱梁的抗力综合不确定性参数, 结果汇总于表 3。

**Table 3.** Statistical parameters of resistance uncertainty for corroded Q370qD high-strength steel box girders  
**表 3.** 腐蚀后 Q370qD 高强钢箱梁抗力不确定性统计参数

构件种类	$\mu_{K_R}$	$\mu_R$	$\sigma_R$	$\delta_R$
Q370qD	1.1406	$1.1406R_K$	$0.1875R_K$	0.1644

抗力综合不确定性参数  $\mu_{K_R} = 1.1406$ 、 $\delta_R = 0.1644$ 、 $\sigma_R = 0.1875R_K$ , 表明结构抗力均值偏安全、离散程度合理, 可为 JC 法计算时变可靠指标  $\beta$  提供核心统计输入。通过 3.2 节的计算方法, 已系统确定了道洛河大桥 Q370qD 钢箱梁抗弯可靠度分析所需的材料性能、几何参数、计算模式及抗力综合不确定性等各类随机变量统计参数, 下文将结合前文 4.2 节的 JC 法, 代入钢箱梁工程实际参数与荷载效应分布, 计算不同腐蚀年限下的抗弯时变可靠指标, 并开展结构安全评估与参数敏感性分析, 量化各随机变量对结构可靠度的影响权重。

**5.2. 时变可靠指标计算与安全分析**

将上述统计参数代入时变可靠度计算模型, 结合荷载效应分布, 采用 JC 法计算得到不同腐蚀年限  $t$  下的钢箱梁抗弯可靠指标  $\beta(t)$ , 具体数值如表 4, 图 3 所示。

**Table 4.** Flexural reliability indices of steel box girders under different corrosion years  
**表 4.** 不同腐蚀年限下钢箱梁抗弯可靠度指标

腐蚀年限 $t$ /年	0	20	40	60	80	100	120
$\beta$	6.854	6.361	5.972	5.348	5.036	4.892	4.586

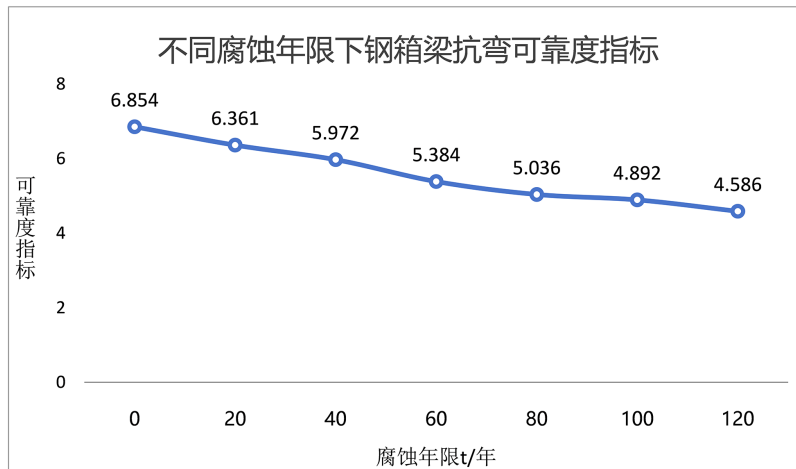


Figure 3. Flexural reliability indices of steel box girders under different corrosion years

图 3. 不同腐蚀年限下钢箱梁抗弯可靠度指标

计算结果表明, 随着服役时间的推移, 腐蚀导致的截面削弱与性能退化使得可靠指标呈非线性下降趋势。初始状态  $t = 0$  时,  $\beta = 6.854$ , 安全储备充裕。设计基准期末  $t = 100$  时,  $\beta = 4.892$ , 对应的失效概率约为  $1.32 \times 10^{-7}$ 。

尽管可靠指标随时间明显降低, 但在 100 年设计基准期内, 该数值仍远高于公路桥梁结构一级安全等级的目标可靠指标(通常  $\beta \geq 3.7$ )。这表明 Q370qD 高强钢箱梁在设计全寿命周期内具有足够的抗力储备和结构安全性。

### 5.3. 可靠度的参数敏感性分析

为了探究各随机变量对抗力衰减及失效风险的贡献程度, 本节采用敏感性分析方法, 量化各参数对可靠指标的影响权重。

采用 JC 法(验算点法), 通过将非正态变量转换为当量正态变量, 并在设计点处将功能函数线性化, 计算各变量的敏感性系数  $\alpha_i$ 。具体算法流程重构如下:

(1) 标准正态空间映射

设原始随机变量向量  $X = (K_M, K_A, K_P, S)$ , 将其转换为标准正态变量向量  $U = (U_1, U_2, U_3, U_4)$ :

$$U_1 = \frac{K_A - \mu_{K_A}}{\sigma_{K_A}}, U_2 = \frac{K_M - \mu_{K_M}}{\sigma_{K_M}}, U_3 = \frac{K_P - \mu_{K_P}}{\sigma_{K_P}}, U_4 = \frac{S - \mu_S}{\sigma_S} \quad (31)$$

(2) 功能函数变换

在标准正态空间中, 功能函数  $Z$  重写为关于  $U$  的函数:

$$g(U) = (\mu_{K_A} + U_1\sigma_{K_A}) \cdot (\mu_{K_M} + U_2\sigma_{K_M}) \cdot (\mu_{K_P} + U_3\sigma_{K_P}) \cdot R_k [DOV(t)] - (\mu_S + U_4\sigma_S) \quad (32)$$

(3) 敏感性系数计算

敏感性系数  $\alpha$  定义为功能函数在验算点处的单位负梯度向量。首先计算梯度向量  $\nabla g(U)$  及其模长:

$$|\nabla g(U)| = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial U_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial U_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial U_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial U_4}\right)^2} \quad (33)$$

其中，各分量偏导数可通过链式法则求得(以  $U_1$  为例):

$$\frac{\partial g}{\partial U_1} = \sigma_{K_A} \cdot K_M \cdot K_P \cdot R_k [DOV(t)] \quad (34)$$

最终，第  $i$  个随机变量的敏感性系数  $\alpha_i$  计算公式为:

$$\alpha_i = -\frac{\frac{\partial g}{\partial U_i}}{|\nabla g(U)|} \quad (35)$$

#### (4) 分析结论与工程建议

基于上述推导，计算得到各腐蚀年限下的参数敏感性系数，具体数据见表 5。

**Table 5.** Sensitivity coefficients of various parameters under different corrosion times  
**表 5.** 不同腐蚀时间下各参数的敏感性系数

腐蚀年限 $t$ /年	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
20	0.104	0.333	0.855	0.384
40	0.104	0.331	0.850	0.397
60	0.103	0.329	0.846	0.406
80	0.102	0.328	0.840	0.418
100	0.102	0.326	0.837	0.427
120	0.101	0.325	0.834	0.435

计算结果表明，各随机变量对 Q370qD 钢箱梁抗弯可靠指标的影响程度排序始终为计算模式不确定性( $\alpha_3$ ) > 荷载效应( $\alpha_4$ ) > 材料性能不确定性( $\alpha_2$ ) > 几何参数不确定性( $\alpha_1$ )；其中计算模式不确定性为最核心影响因素，敏感性系数始终维持 0.834~0.855 的高值，荷载效应的影响随腐蚀年限增加呈缓慢上升趋势，而材料与几何参数不确定性的影响则微弱且小幅下降，各参数敏感性系数在全寿命周期内无突变，核心管控因素保持稳定。

## 6. 抗力模型有效性验证

为确保本文所提出的考虑材料 - 几何双重损伤耦合的抗力时变模型(式(3)与式(8))具有足够的工程精度，本章利用公开发表的独立钢箱梁腐蚀试验数据，对模型预测值进行对比验证，并分析其误差来源与适用性。

### 6.1. 数据验证与处理

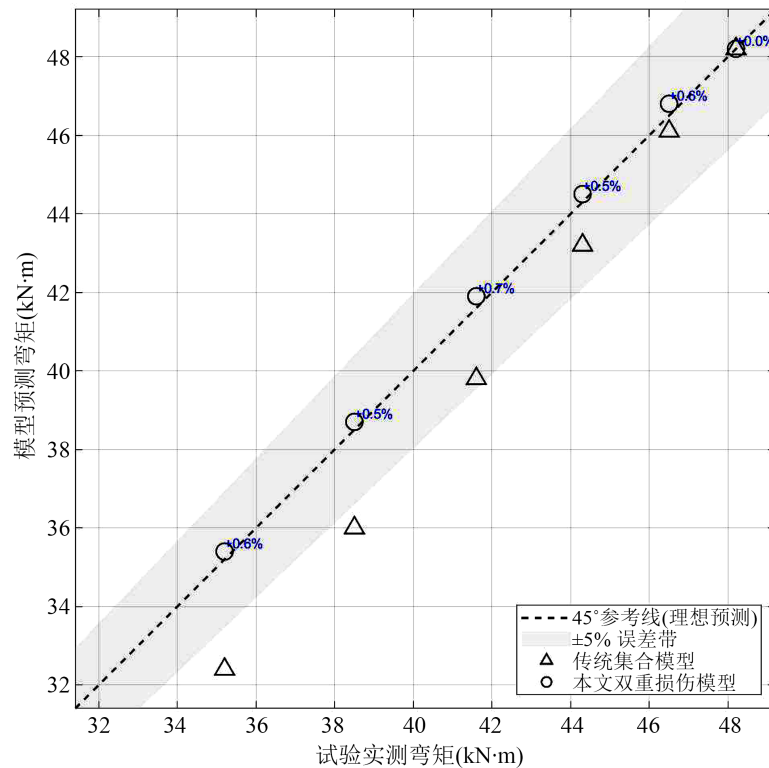
验证数据选取自文献[16]中开展的钢箱梁模型人工加速腐蚀试验。该试验对一系列缩尺钢箱梁试件进行了不同程度的均匀腐蚀处理，并通过四点弯曲试验测得了极限抗弯承载力  $M_u^{test}$ 。试件主要参数如下：截面高度 250 mm，宽度 150 mm，翼缘厚度与腹板厚度经腐蚀后产生不同程度的质量损失率( $\eta_v$  范围为 0%至 20%)。初始钢材屈服强度  $f_y = 314$  MPa，弹性模量  $E_0 = 206$  GPa。

验证结果对比，将文献[16]中各试件的腐蚀程度(体积损失率  $\eta_v$ )、实测极限弯矩  $M_u^{test}$  以及两种模型的预测值  $M_u^{geo}$ 、 $M_u^{prpo}$  汇总于表 6。定义预测误差

$$\epsilon = (M_u^{pred} - M_u^{test}) / M_u^{test} \times 100\% \quad (36)$$

**Table 6.** Comparison between model predicted values and experimental values  
**表 6.** 模型预测值与试验值对比

试件编号	体积损失率(%)	实测弯矩(kN·m)	传统几何模型(kN·m)	误差(%)	本文模型(kN·m)	误差(%)
S-0	0.0	48.2	48.2	0.0	48.2	0.0
S-1	3.5	46.5	46.1	-0.9	46.8	+0.6
S-2	7.2	44.3	43.2	-2.5	44.5	+0.5
S-3	11.8	41.6	39.8	-4.3	41.9	+0.7
S-4	16.5	38.5	36.0	-6.5	38.7	+0.5
S-5	20.1	35.2	32.4	-8.0	35.4	+0.6



**Figure 4.** Scatter plot comparing model-predicted bending moments with experimental bending moments

**图 4.** 模型预测弯矩与试验弯矩对比散点图

## 6.2. 结果分析

从表 6 和图 4 中可以得出：

(1) 传统几何模型系统性地低估承载力：随着腐蚀程度加剧，传统模型的负向误差从-0.9%逐渐扩大至-8.0%，呈现明显的偏保守趋势。这是因为该模型忽略了腐蚀后钢材弹性模量降低对截面整体刚度和稳定承载力的影响，导致对实际失效荷载的估计偏低。

(2) 本文双重损伤模型具有高精度：所有腐蚀工况下，本文模型的预测误差均保持在±1.0%以内，且误差无明显偏向性。这表明引入刚度修正因子  $\lambda_E(t)$  有效补偿了传统模型因忽略材料劣化而产生的系统偏差，预测值与试验值高度吻合。

(3) 模型对腐蚀损伤的敏感性更真实: 当  $\eta_v = 20\%$  时, 传统模型预测承载力下降至  $32.4/48.2 = 32.8\%$ , 而本文模型预测下降至  $35.4/48.2 = 26.6\%$ , 实测下降至  $35.2/48.2 = 27.0\%$ 。可见传统模型夸大了腐蚀的负面影响, 而本文模型更贴近实际退化速率。

## 7. 结论

本文以腐蚀环境下的 Q370qD 高强钢箱梁为研究对象, 在分析腐蚀对抗弯抗力影响机理的基础上, 建立了抗力时变衰减模型, 并结合工程实例, 利用 JC 法对钢箱梁在设计基准期内的时变可靠度及参数敏感性进行了计算与分析。主要研究结论如下:

建立了考虑双重腐蚀效应的钢箱梁抗弯抗力时变模型: 针对现有研究多仅考虑腐蚀引起的截面几何尺寸减小的不足, 本文重点分析了腐蚀对 Q370qD 钢材弹性模量等力学性能的劣化影响。通过引入材料性能与几何参数的双重时变函数, 构建了适用于局部腐蚀状态下的高强钢箱梁抗弯抗力计算模型。该模型能够更全面地反映腐蚀对构件承载能力的综合削弱作用。

揭示了钢箱梁抗弯可靠指标随腐蚀年限的衰减规律: 以道滘河大桥主桥钢箱梁为例, 计算了其在 100 年设计基准期内的时变可靠指标。计算结果表明: 随着腐蚀年限的增加, 钢箱梁的抗弯可靠指标呈现非线性下降趋势。在服役初期(0 年), 可靠指标为 6.854; 在服役期末(100 年), 可靠指标下降至 4.892。尽管可靠度有所降低, 但在 100 年内, 该指标始终大于公路桥梁一级安全等级的目标可靠指标 3.7, 说明该桥梁在正常维护条件下能够满足结构安全性的要求。

明确了影响可靠度的主要敏感性因素: 通过 JC 法计算了各随机变量对可靠指标的敏感性系数, 分析结果显示: 各参数对可靠度的影响程度由大到小依次为: 计算模式不定性 > 荷载效应 > 材料性能不定性 > 几何参数不定性。其中, 计算模式不定性( $K_p$ )的敏感性系数最大(约 0.84), 说明目前的抗力计算模型本身存在的误差是影响评估结果精度的最主要因素。几何参数和材料性能的敏感性相对较小, 表明在现代钢结构制造工艺下, 这两类参数的变异性对结构可靠度的影响处于可控范围。

综上所述, 本文建立的模型及分析结果验证了 Q370qD 高强钢箱梁在全寿命周期内的安全性, 同时指出在后续与维护与评估中, 应重点关注抗力计算模型的修正及外部荷载的变化。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(编号 52378156), 江西省交通运输厅科技项目(编号: 2025ZG021, 2025ZG023)。

## 参考文献

- [1] 薛玉波, 刘海澄. 关于钢箱梁桥施工质量控制问题探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024(31): 150-152.
- [2] 张丽华, 蒋晓博, 张绍伦, 等. 桥梁工程用热轧 S32168/Q370qD 复合钢板性能试验及分析[J]. 铁合金, 2024, 55(5): 32-36.
- [3] 李东亮. 高湿热沿海工业大气中桥梁钢的腐蚀行为与耐蚀机理研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [4] 李小松, 吴天峰, 郝联君, 等. 沿海大桥锚固系统钢结构焊接接头的应力腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2025, 58(12): 99-107.
- [5] 王建超, 吴杰. 不同腐蚀条件对预应力梁结构损伤和力学性能的影响[J]. 交通世界, 2025(33): 166-168+171.
- [6] 赵亮, 徐铮, 陈织文. 钢桥腐蚀疲劳可靠度评估[J]. 低温建筑技术, 2025, 47(9): 65-69.
- [7] 李思源. 桥梁钢结构长效防腐技术及施工问题防治[J]. 石油和化工设备, 2025, 28(10): 249-251.
- [8] 曹建锋, 范文秀, 丁亚东. 钢结构桥梁腐蚀原因及保护措施研究[J]. 特钢技术, 2025, 31(2): 63-66.
- [9] 许睿文, 刘鹏, 张鑫敏, 等. 腐蚀对钢箱梁桥面板服役性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(12): 39-43.
- [10] 刘海龙, 陆森强, 赵伟. 在役锈蚀中等跨径钢箱梁桥抗弯性能可靠性评估[J]. 钢结构, 2016, 31(6): 98-102.
- [11] 龚旺. 考虑腐蚀影响的超大跨度悬索桥主缆可靠度分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022.

- 
- [12] Saad-Eldeen, S., Garbatov, Y. and Soares, C.G. (2012) Effect of Corrosion Degradation on Ultimate Strength of Steel Box Girders. *Corrosion Engineering, Science and Technology: The International Journal of Corrosion Processes and Corrosion Control*, **47**, 272-283. <https://doi.org/10.1179/1743278212y.0000000005>
- [13] 高万虎. 公路桥梁设计中的安全性和耐久性问题分析[J]. 建材发展导向, 2025, 23(16): 28-30.
- [14] 董彩常, 陈跃良, 丁继峰, 等. 红岛航道桥钢箱梁疲劳寿命分析及腐蚀影响[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(3): 292-293+296.
- [15] 郑邦国. 慢行系统钢箱梁桥结构可靠度及分项系数研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2022.
- [16] Ghassemi, S., Zhang, Z., Watson, G., Milne, D., Alder, A., Powrie, W., *et al.* (2025) Field Testing and Finite Element Modelling of Old Metal Railway Bridges with Corrosion Impact Analysis. *Structures*, **82**, Article ID: 110813. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110813>
- [17] Soares da Silva, A.C., Alencar, G.S. and Santos da Silva, J.G. (2023) Advances in Methodology for Fatigue Assessment of Composite Steel-Concrete Highway Bridges Based on the Vehicle-Bridge Dynamic Interaction and Pavement Deterioration Model. *Metals*, **13**, Article No. 1343. <https://doi.org/10.3390/met13081343>
- [18] 张弛. 预制拼装波形钢腹板组合钢箱梁桥力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.