

预应力混凝土桥梁长期变形预测与控制

杨 波

中国建筑第六工程局有限公司 天津

【摘要】 预应力混凝土桥梁在长期服役过程中，受温度变化、湿度影响及结构自身应力释放等因素影响，产生不可忽视的长期变形。准确预测和有效控制这些变形对保证桥梁结构安全性和使用性能至关重要。本文围绕预应力混凝土桥梁的长期变形机理，结合数值模拟与现场监测数据，提出了一种基于多因素耦合的变形预测模型。同时，探讨了针对不同变形特征的控制策略，旨在实现结构变形的科学管理和寿命延长。研究结果为桥梁设计、维护和管理提供了理论依据和技术支持。

【关键词】 预应力混凝土；长期变形；预测模型；变形控制；结构安全

【收稿日期】 2025 年 4 月 15 日

【出刊日期】 2025 年 5 月 24 日

【DOI】 10.12208/j.jer.20250239

Long-term deformation prediction and control of prestressed concrete bridge

Bo Yang

China Construction Sixth Engineering Bureau Co., Ltd., Tianjin

【Abstract】 Prestressed concrete bridges experience significant long-term deformation over their service life due to factors such as temperature changes, humidity, and stress release within the structure. Accurately predicting and effectively controlling these deformations is crucial for ensuring the safety and performance of bridge structures. This paper focuses on the long-term deformation mechanisms of prestressed concrete bridges, combining numerical simulations with field monitoring data to propose a multi-factor coupled deformation prediction model. Additionally, it explores control strategies tailored to different deformation characteristics, aiming to achieve scientific management and extended service life of the structure. The research findings provide theoretical basis and technical support for bridge design, maintenance, and management.

【Keywords】 Prestressed concrete; Long-term deformation; Prediction model; Deformation control; Structural safety

引言

预应力混凝土桥梁作为现代交通基础设施的重要组成部分，其结构性能的稳定性直接关系到交通安全和经济效益。随着桥梁服役时间的延长，长期变形现象逐渐显现，成为影响桥梁性能的重要因素^[1]。长期变形不仅影响结构的承载能力和耐久性，还可能引发一系列安全隐患。因此，科学准确地预测桥梁长期变形趋势，并制定有效的控制措施，成为桥梁工程领域亟需解决的关键问题。通过深入解析变形机理和综合应用先进的预测技术，可为桥梁的设计优化与维护管理提供坚实支撑，确保桥梁运行的安全与可靠。

1 预应力混凝土桥梁长期变形现状与影响因素分析

预应力混凝土桥梁作为现代桥梁结构的重要形式，因其优越的承载能力和结构稳定性，在交通工程中得

到广泛应用。然而，长期服役过程中，这类桥梁不可避免地出现不同程度的长期变形问题。长期变形表现为结构的徐变、收缩以及温度引起的变形累积，影响桥梁的使用性能和安全寿命。对预应力混凝土桥梁长期变形现状的深入分析，有助于识别关键影响因素，为后续预测与控制提供理论基础。

长期变形的产生受多种内外因素共同作用。混凝土自身的徐变和干燥收缩是导致变形的主要内部因素。徐变是混凝土在长期荷载作用下产生的应变累积现象，尤其在预应力梁结构中，预应力钢筋的持续拉力加剧了混凝土徐变程度。干燥收缩则源于混凝土内部水分的蒸发，导致体积缩小，进而引起结构变形。温度变化同样是桥梁长期变形的重要外部因素^[2]。日夜温差和季节变化导致的温度应力作用，诱发桥梁结构膨胀和收缩，影响整体变形趋势。此外，桥梁所处环境的湿度波

动对混凝土水分含量变化有显著影响,进而影响干燥收缩和徐变过程。

结构与施工工艺的差异也在长期变形表现中起到关键作用。不同的预应力筋布置方式、锚固技术以及混凝土配比,都会影响变形的产生和分布。施工质量控制不严或养护不到位,导致混凝土早期裂缝产生,进一步加剧长期变形。桥梁跨径、截面形状等结构参数亦对变形机制产生影响,大跨度结构更易表现出显著的徐变和温度变形。此外,车辆荷载的反复作用在长期使用过程中也对桥梁变形产生累积效应,这种变形的动态特征为预测和控制带来更大挑战^[3]。综合考虑上述多维因素,有助于全面把握预应力混凝土桥梁长期变形的现状与影响机制,为精确预测模型的构建和科学控制措施的制定奠定坚实基础。

2 预应力混凝土桥梁长期变形机理及预测方法综述

预应力混凝土桥梁的长期变形主要源于多种物理和化学过程的综合作用,这些过程包括混凝土的徐变、收缩以及预应力损失等。徐变作为混凝土在持续荷载作用下产生的时变应变,是长期变形的核心因素之一。随着时间推移,混凝土内部微观结构逐渐发生调整,导致应变不断累积,从而引起结构的持续变形。收缩变形则主要源自混凝土硬化过程中水分的蒸发和水泥水化反应,表现为体积收缩,进一步加剧了桥梁的变形^[4]。除此之外,预应力筋的松弛和锚固区的应力释放也会造成预应力损失,进而影响结构整体的受力状态,推动长期变形的发生。多因素的相互作用使得预应力混凝土桥梁的长期变形具有复杂的时空特征和非线性表现,增加了预测的难度。

目前,对预应力混凝土桥梁长期变形的预测方法主要集中在理论模型和数值模拟技术的结合。经典的徐变和收缩模型在一定程度上能够描述混凝土材料的时间依赖性行为,但其单一模型难以全面反映结构多因素耦合作用下的变形过程。现代研究则更多地采用有限元法结合本构模型,通过对材料非线性本构关系的精确刻画,实现对结构变形演化的模拟。同时,考虑环境因素如温度和湿度变化对混凝土物理性能的影响,增强模型的实际适用性。传感器技术的发展促进了现场变形监测数据的实时获取,使得预测模型能够基于实际运行数据进行校正和优化,提高了预测的精度和可靠性。多源数据融合技术的应用,为长期变形的动态预测和风险评估提供了新的思路。

综合现有的研究成果,构建基于多因素耦合的长

期变形预测模型成为当前的研究重点。此类模型不仅涵盖混凝土徐变、收缩及预应力损失,还将温湿环境、结构荷载变化及材料性能退化等因素纳入考虑,形成多维耦合系统。通过对各因素间复杂相互关系的数学表达和数值计算,能够较为准确地预测桥梁在服役期间的变形趋势^[5]。进一步地,结合结构健康监测系统,模型实现在线更新和自适应调整,从而有效指导桥梁维护与加固方案的制定。该方法突破了传统单一参数预测的局限,为保障预应力混凝土桥梁的结构安全和延长使用寿命提供了坚实的理论基础和技术支撑。

3 基于多因素耦合的长期变形预测模型构建与应用

预应力混凝土桥梁的长期变形受多种因素的综合作用影响,单一因素难以准确反映其变形规律。基于这一认识,构建多因素耦合的预测模型显得尤为重要。该模型将温度变化、湿度影响、预应力松弛、混凝土徐变以及结构荷载等关键因素进行系统集成,形成多维度的变形预测框架^[6]。通过将这些因素的相互作用纳入数学模型,可以更真实地模拟桥梁结构在实际服役环境中的变形演变过程。模型的构建依赖于材料力学本构关系与结构力学原理,结合非线性时变特性,利用有限元方法实现对桥梁整体和局部变形的精确计算。

在模型应用过程中,现场监测数据提供了关键的验证与校正手段。通过布设应变计、位移传感器和温湿度传感装置,收集桥梁结构的实时变形数据和环境参数,为模型输入参数的确定提供科学依据。同时,监测数据反映了桥梁实际运行状态中的复杂非线性行为,有助于动态调整模型参数,提升预测的准确性和可靠性。采用数据同化技术,将实时监测结果与预测模型耦合,实现对长期变形的动态跟踪和修正。这种方法不仅提高了模型对复杂工况的适应能力,也增强了预测结果的实用性,为桥梁管理部门提供科学决策依据。

多因素耦合模型的实际应用展示了其在结构健康监测和维护中的巨大潜力。通过精确预测长期变形趋势,能够提前识别结构潜在风险,指导预防性维修和加固措施的实施。同时,该模型支持对不同设计方案和施工工艺的性能评估,优化结构设计参数,提升桥梁整体耐久性。结合现代信息技术与智能算法,未来该模型可实现自动化运行和智能预警,显著增强桥梁运行的安全保障能力。综上,基于多因素耦合的长期变形预测模型不仅丰富了桥梁变形理论体系,也为工程实践提供了重要的技术支撑。

4 预应力混凝土桥梁变形控制策略设计与实施

效果分析

预应力混凝土桥梁在长期服役过程中,由于温度变化、湿度波动以及结构自重和预应力损失等因素的影响,桥梁结构会产生不同程度的长期变形。有效的变形控制策略不仅能够保障桥梁的结构安全性,还能延长其使用寿命,降低维护成本。针对预应力混凝土桥梁长期变形的特点,设计合理的控制方案成为桥梁工程的重要环节。变形控制策略的设计需要综合考虑材料性能、结构构造及环境影响因素,通过科学手段进行动态监测与调节,实现变形的预防和减缓^[7]。对桥梁预应力筋张拉力的合理调整和及时补充预应力,是减缓变形发展的关键措施。利用监测数据反馈调整张拉力大小,有助于有效控制结构的挠度和裂缝发展。此外,采用高性能混凝土和优化配筋方案能够提高桥梁的刚度和抗变形能力,从源头上减少变形幅度。

结合现场监测技术,建立实时数据采集和分析系统成为实施变形控制的重要手段。基于应变计、位移传感器和温湿度传感器等设备的布设,能够实现对桥梁关键部位的变形状态进行持续跟踪。通过对采集数据的多因素耦合分析,及时发现异常变形趋势,指导控制策略的调整和优化^[8]。智能监测系统的应用不仅提高了桥梁变形控制的科学性和精度,也使得预警和维护决策更加及时和有效。与此同时,结合数值模拟技术开展变形演化过程的预测,可以为控制方案提供理论支持和技术依据。模型通过反映材料蠕变、收缩以及温度效应等多重因素,模拟桥梁结构长期变形的趋势和幅度,为变形控制的精准施策提供数据支撑。

控制策略的实施效果在实际工程中得到了验证。通过优化预应力筋布置和动态调整张拉力,显著抑制了桥梁挠度的增加和裂缝的扩展,提升了结构整体稳定性。在多个预应力混凝土桥梁项目中,结合智能监测系统的变形控制策略,桥梁的长期变形得到了有效管理,结构安全性明显增强。该策略不仅降低了因变形引发的维修频率,还提升了桥梁的使用性能和服务水平。持续的数据反馈机制和科学的控制措施共同作用,确保桥梁在复杂环境条件下保持良好的变形状态,为桥梁结构的安全运营提供了坚实保障。

5 结语

预应力混凝土桥梁的长期变形控制是保障结构安

全与延长使用寿命的关键环节。通过科学设计变形控制策略,合理调整预应力筋张拉力,结合高性能材料和智能监测技术,实现了对桥梁变形的有效管理。实际工程应用表明,该策略不仅显著抑制了结构变形和裂缝发展,还提升了桥梁的整体稳定性和使用性能。未来,持续优化控制方案与监测系统的结合,将为预应力混凝土桥梁的安全运营提供更加坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 夏鹏,元博,鲁刚,等.火电行业年度碳排放高精度预测模型构建方法[J/OL].中国环境监测,1-16[2025-05-19].
- [2] 孙峰,茹江丽,常青,等.机械通气治疗呼吸窘迫综合征老年人预后不良的列线图预测模型构建[J/OL].广东医学,1-7[2025-05-19].
- [3] 康玲,李川,李晨博,等.高原山区钢管混凝土桁梁桥快速建造核心技术[J/OL].公路,2025,(05):143-146[2025-05-19].
- [4] 杨世杰.大跨度预应力混凝土变截面梁施工技术探析[J].砖瓦,2025,(05):167-170.
- [5] 吕卫东,曹亚西.大跨径预应力混凝土连续梁桥上部结构施工关键技术及受力性能分析[J].建筑机械,2025,(05):238-244+249.
- [6] 王菁菁.环境因素对预应力钢管混凝土管长期质量性能的影响及控制措施[J].中国品牌与防伪,2025,(05):197-199.
- [7] 孙玉浩,金鑫.基于 ABAQUS 的混凝土梁桥长期变形研究[J].浙江建筑,2025,42(02):11-15.
- [8] 毛小卫.韩家峡混凝土面板堆石坝长期变形分析[J].水科学与工程技术,2025,(02):93-96.

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/>

