

公路桥梁抗风设计及稳定性分析

杜晶^{1,2}

1. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100089
2. 中咨华科交通建设技术有限公司, 北京 100195

[摘要] 公路桥梁的抗风设计是确保桥梁安全性和耐久性的重要环节。随着大跨度桥梁的普及, 风荷载对桥梁的影响日益突出, 导致传统设计方法无法完全满足现代工程需求。文中从风荷载的作用机理、抗风设计的基本原则及关键技术等方面进行探讨, 提出了适用于大跨度桥梁的抗风设计策略和优化措施, 为提升桥梁的抗风能力提供理论依据和实践指导。

[关键词] 公路桥梁; 抗风设计; 风荷载; 稳定性分析; 结构优化

DOI: 10.33142/ec.v8i2.15380

中图分类号: U441

文献标识码: A

Wind Resistant Design and Stability Analysis of Highway Bridges

DU Jing^{1,2}

1. China Highway Engineering Consulting Corporation, Beijing, 100089, China
2. Zhongzi Huake Transportation Construction Technology Co., Ltd., Beijing, 100195, China

Abstract: Wind resistant design of highway bridges is an important part of ensuring bridge safety and durability. With the popularity of large-span bridges, the impact of wind loads on bridges is becoming increasingly prominent, leading to traditional design methods being unable to fully meet modern engineering requirements. The article explores the mechanism of wind load, basic principles and key technologies of wind resistant design, and proposes wind resistant design strategies and optimization measures suitable for large-span bridges, providing theoretical basis and practical guidance for improving the wind resistance capacity of bridges.

Keywords: highway bridges; wind resistant design; wind load; stability analysis; structural optimization

引言

公路桥梁在交通网络中占有重要地位, 风荷载被认为是影响桥梁结构安全性的重要因素, 其作用机制复杂多样。尤其是在大跨度桥梁中, 风的影响尤为明显, 常常引发多种复杂的风振现象。这不仅影响材料的性能, 还可能危及桥梁整体稳定性。在遭遇台风或强风等极端天气条件时, 抗风设计的必要性愈发凸显。在现代桥梁设计过程中, 风洞实验与数值模拟等先进技术的运用越来越普遍, 设计阶段对风荷载的有效评估为抗风设计提供了科学依据。深入分析公路桥梁抗风设计的基本理论、关键技术及结构优化措施, 将为提升桥梁的安全性与耐久性提供重要参考。

1 公路桥梁抗风设计的基本理论

1.1 风荷载对桥梁结构的作用机理

风荷载是桥梁设计中的重点, 风荷载会对桥梁产生多种形式的风振响应, 如抖振、涡激振动、扭转振动及颤振, 这些响应可能对桥梁的安全性与耐久性构成潜在威胁。当风通过桥梁时, 复杂的压力分布会在结构周围形成, 导致局部应力集中以及整体变形。在大跨度桥梁中, 风荷载对主梁与桥塔等关键部位的影响显得尤为显著。风洞实验或数值模拟的应用, 有助于有效评估风荷载的作用, 为设计提供数据支持。

1.2 抗风设计的基本原则

桥梁在强风下保持稳定是抗风设计的前提条件, 设计方案要经济高效, 选用的材料要合适并可以适当的简化施工过程, 控制工程造价。在保障安全的前提下, 最大可能的优化结构和细节设计, 提升桥梁的抗风能力, 避免因过度设计导致的成本浪费。表 1 展示了不同风荷载条件下的桥梁结构参数, 包括风速、风压和攻角等。

表 1 桥梁结构风荷载分析的基本参数

参数	取值范围	描述
风速 (m/s)	10~25	依据环境条件和气候变化进行设置
风压 (Pa)	150~350	风速对应的动压力
风攻角 (度)	0° ~45°	风向与桥梁主梁轴线的夹角
桥梁跨度 (m)	100~500	不同跨度桥梁的风荷载影响程度

1.3 桥梁风振响应的主要类型

在风荷载作用下, 桥梁结构常会表现出多种风振现象, 了解这些风振现象的机理是有效进行抗风设计的基础。常见的风振响应包括抖振、涡激振动、扭转振动与颤振。抖振是一种由风速变化引发的随机振动, 主要发生在中低风速条件下。尽管抖振的幅度较小, 持续的振动却可能导致疲劳问题, 尤其是对局部构件产生损伤。通过优化结构设计及加固措施, 有效减轻抖振对桥梁的长期影响是必要的。

涡激振动的产生,是由于风绕流过桥梁结构时形成的周期性涡流。涡流对于悬索桥等细长结构型桥型的影响最为显著,比如引发疲劳损伤与结构磨损。优化截面设计或设置导流装置,可以减少涡激振动的影响,从而延长结构的使用寿命。扭转振动在大跨度桥梁中可能会导致结构整体变形甚至局部失稳。提高桥梁的扭转刚度或采用其他抗扭设计,有助于减少扭转振动对桥梁安全的影响。颤振作为风振现象中最具破坏性的一种,在风速达到临界值时便会发生,随之而来的自激振动可能出现的结构失稳,甚至坍塌。在设计中加入阻尼器或其他抗风措施,可以预防颤振的发生,确保桥梁在极端风力条件下保持稳定。图1~4展示抖振、涡激振动、扭转振动和颤振的现象。表2总结了风振响应的主要类型及其特征、产生条件和预防措施。



图1 抖振现象



图2 涡激振动现象



图3 扭转振动现象



图4 颤振现象

表2 风振响应的主要类型及其特点(1.3节)

风振类型	产生原因	频率范围	主要影响因素	防治措施
抖振	风速波动产生的非定常压力场	低频振动	风速、桥梁结构	改进结构设计,设置减振器
涡激振动	涡街频率与桥梁固有频率相近	中频振动	风速、桥梁形状	调整桥梁形状,改变频率
扭转振动	扭转刚度不足导致的风荷载耦合作用	高频振动	桥梁截面形状、风速	增强结构刚度,减少受风面积
颤振	气动力与结构自振频率的共振效应	中高频振动	风速、结构自振频率	增加桥梁的抗风索、采用抗风优化措施

2 公路桥梁抗风设计的关键技术

2.1 风洞实验技术

风洞实验技术通过模拟风场环境,桥梁结构在特定风速及风向下的气动力特性,评估其抗风性能。通常情况下,采用缩尺模型以确保实验结果遵循相似原理,确保其有效性。在实验过程中,系统调整风速、风向及湍流强度等参

数以模拟不同气候条件,用高精度传感器实时测量模型表面的气动压力及其振动响应数据,从而为设计的改进与优化提供了重要参考。风洞实验的优势在于能够直观展示桥梁的风振特性,并且可以为设计人员提供大量的实测数据。但是由于实验条件的局限性,必须与其他分析方法结合,以此确保实验结果的准确。

2.2 数值模拟技术

计算机模型可以灵活高效地对不同风荷载下的响应进行详细分析,数值模拟多数情况下都采用计算流体力学(CFD)方法,以模拟风场对桥梁的作用。输入桥梁模型的几何形状、材料特性及边界条件等数据,经过数值计算可以得出风场与桥梁相互作用的结果。结构分析常和有限元分析方法结合应用,可以全面评估桥梁在风荷载下的应力、位移及振动等。数值模拟技术的优点在于能够在虚拟环境中对多种情景进行测试,从而节省了大量的实验成本与时间,但模拟结果的准确性高度依赖于模型的精确度及边界条件的设定,因此在模型建立时必须充分考虑实际情况,以确保模拟结果的可靠性。

2.3 桥梁抗风稳定性分析的主要方法

2.3.1 有限元分析

有限元分析(FEA)主要用于工程结构的力学性能评估,一种强大的数值技术,在桥梁抗风设计中,可以帮助设计人员更直观地理解结构在风荷载作用下的应力分布、位移及稳定性。桥梁被分解为多个有限小单元,使得关键弱点的识别得以实现,从而评估整体结构的安全性。在有限元分析的应用中,建立桥梁的有限元模型,并输入材料特质、荷载条件及边界约束等数据,根据分析结果找出桥梁在各种风荷载作用下的关键弱点,为后期优化打好基础。特别是对于大跨度桥梁,有限元分析对预测可能出现的局部失稳问题非常实用。可以把有限元分析的结果可与风振实验数据进行了对比,增强结果的可靠性,有效地处理复杂材料模型及大变形问题,推动其在实际工程中的广泛应用^[1]。

2.3.2 时程分析方法

时程分析方法不同于静态分析主要用于研究桥梁在动态荷载下的响应,主要考虑风荷载随时间的变化,准确捕捉桥梁在强风条件下的动态特性,建立风荷载的时程模型。设计者可分析桥梁的加速度、位移及反应频率等动态响应。在实施时程分析时,建立风速的变化模型,并结合桥梁的动态特性,采用合适的数值积分方法进行计算。动态响应的评估使设计师能够判断桥梁是否存在因动态效应导致的失稳风险,从而对设计进行必要的调整。在极端气象条件下,时程分析方法能够提供更准确的动态性能评估。

2.3.3 模态分析方法

模态分析是一种研究桥梁固有振动特性的分析方法能够揭示结构对风荷载的敏感性。在桥梁抗风设计中,模态分析通常与其他分析方法相结合,有助于理解桥梁在风

荷载作用下的响应特性,可能引发共振的频率也得以识别,为设计优化提供参考。对于大跨度桥梁而言,共振现象可能导致结构失稳,此时模态分析就显得尤为重要。模态分析的结果可与风洞实验或数值模拟数据进行对比,以验证分析的准确性,不仅提升了对桥梁在风荷载作用下的理解,也为设计师提供了详实依据,从而确保桥梁的安全性与可靠性。

3 桥梁抗风设计中的结构优化措施

3.1 主梁断面形式的优化

选择合理的主梁断面形状,能够有效降低风荷载对桥梁结构的影响。在大跨度桥梁设计中,箱型梁或T型梁不仅具备优良的抗弯能力,还能减少风对桥梁的作用力。利用计算流体动力学(CFD)分析,设计师模拟不同断面形式在风荷载下的气动特性,从而选定最为合适的断面。在实际设计中,主梁的高度与宽度应根据桥梁的具体用途与环境条件调整,适中的细长比梁型有助于减小风荷载引起的振动,合理布置梁腹板及纵向加劲肋,进一步提升主梁的稳定性与抗扭能力。优化后的断面形式经过风洞实验与有限元分析等验证,确保在极端气候条件下,桥梁依然能够安全运营。

3.2 桥塔设计中的抗风考虑

桥塔作为桥梁结构中承受风荷载的重要组成部分,桥塔的形状、材质以及稳定性直接影响桥梁整体的抗风能力。全面的风力分析是桥塔设计的必要步骤,可以有效抵御各种风荷载。在桥塔的形状设计上,流畅简洁的轮廓可以降低风阻,使风流顺畅地沿塔身流动,减少涡流的形成。经过精确计算,桥塔的高度与宽度需具备足够的刚度与强度,桥塔的材料选用高强度钢材或混凝土,以增强结构的强度及抗风特性。在桥塔连接设计中,合理的节点设计及连接方式能够提高整体的稳定性与抗风能力^[2]。此外,适当的斜撑与支撑结构可有效分散风荷载,降低对塔身的直接冲击,从而减少风引起的振动。经过系统分析与设计优化后,桥塔应在强风条件下保持稳定,确保桥梁的安全性与使用寿命。

3.3 抗风缆索系统的应用

在大跨度斜拉桥与悬索桥中,缆索不仅承受竖向荷载,还受到风荷载的影响,因此在设计过程中必须充分考虑其抗风性能。缆索的布置应依据桥梁的结构特性及风荷载分布进行优化设计。适当的角度与间距布置缆索,有助于在风荷载作用下实现均匀受力,从而降低局部应力集中现象的发生。风引起的振动会导致缆索发生共振,此时可以用模态分析确定缆索的固有频率,避免在风荷载作用下出现共振现象。同时,适当的阻尼系统可用于减缓缆索的振动,进一步增强抗风性能。图5 缆索系统的布置图展示了缆索在风荷载作用下的应力分布,以及如何通过布置和阻尼系统来减少共振。



图5 缆索系统的布置图

3.4 风障与导流装置的设置

在桥梁抗风设计中,通过阻挡风流,风障等,可以降低作用于桥梁结构的风速,从而减小风荷载的影响。导流装置则通过改变风流方向,引导气流沿着结构表面流动,降低涡流的形成。在导流装置的设计过程中,要考虑其对桥梁整体外形的影响,确保不影响桥梁的美观与基本功能。导流装置的材料应具备良好的抗腐蚀性能,以应对复杂的气候条件。风障的形式多样,通常可以依据桥梁的实际情况选择合适的类型。例如,在高墩桥塔周围设置的风障可以有效阻挡风流对桥梁的直接冲击,降低风荷载。此外,风障的高度与宽度需经过仔细设计,以确保在实际使用中能够达到预期效果。风障与导流装置的设置应与桥梁整体设计相结合,通过风洞实验与数值模拟分析,可以优化风障与导流装置的设计,确保其有效降低风荷载,提升桥梁的安全性。

4 公路桥梁的稳定性分析

4.1 桥梁稳定性的定义与评估标准

静态稳定性与动态稳定性是该领域的两个主要方面,其中静态稳定性侧重于桥梁在静态荷载下的平衡状态,而动态稳定性则关注动态荷载对结构的影响。在实际评估中,风荷载、活荷载及温度效应等都需要考虑到,通过静力学与动态分析,能够明确桥梁在不同工况下的稳定性表现,从而为后续维护与加固提供科学依据。

4.2 风荷载下桥梁的屈曲稳定性分析

风荷载是影响桥梁稳定性的关键因素,尤其是在高架桥与大跨度桥梁中,风速的变化会导致结构屈曲,从而影响整体稳定性。在风荷载的影响下,屈曲现象由纵向、横向及扭转荷载共同引发。常见的屈曲模式包括局部屈曲与整体屈曲。设计过程中,确保桥梁具备足够的屈曲承载能力成为一项重要任务,以防止在极端风荷载下失稳。依据相关规范,设计师需充分了解桥梁的实际受力情况,并考虑风速、风向及桥梁形状对屈曲荷载的影响,通过合理设置加劲肋、优化截面设计与材料选择,屈曲稳定性将显著

提高, 确保桥梁在风荷载作用下保持安全与稳定^[3]。

4.3 动态稳定性与静态稳定性

在桥梁设计与评估中, 静态稳定性主要关注静态荷载下的变形与位移情况, 而动态稳定性则涉及动态荷载对结构的响应特征。针对高架桥、斜拉桥等大跨度桥梁, 动态稳定性受到外部荷载变化与环境影响的显著作用。模态分析的实施可帮助确定桥梁的固有频率, 从而评估其在动态荷载下的振动特性。根据不同荷载情况, 需评估桥梁的振动模态, 判断其在多种工况下的稳定性表现。面对强风与地震等极端条件, 桥梁的动态稳定性对安全性至关重要, 在最大静态荷载作用下, 合理设置支座与抗倾覆措施, 确保桥梁可正常通行。综合分析动态与静态稳定性, 能够全面评估桥梁在不同环境条件下的表现, 从而为设计优化提供有力支持。

4.4 桥梁在强风下的振动与稳定性评估

4.4.1 桥梁刚性与柔性稳定性分析

刚性结构在承受风荷载时能够有效减少变形与振动, 而柔性结构虽能适应较大的变形, 但在强风作用下容易产生过度振动, 进而导致潜在的安全隐患。对于大跨度桥梁, 设计师应在确保结构刚度的基础上, 适度引入柔性设计, 以增强其在动态荷载下的抗风能力。模态分析有助于识别桥梁的固有频率与振动模态, 从而确定其在风荷载作用下的性能。

4.4.2 关键部位的局部稳定性分析

在整体稳定性分析中, 关键部位的局部稳定性不容忽视。通常, 桥梁的连接节点、支座及加劲肋等部位承受较

大的局部荷载, 其局部稳定性直接关系到整体安全。通过对这些关键部位的局部稳定性进行评估, 有助于识别潜在的薄弱环节, 从而提前制定加固与维护方案。局部稳定性分析通常依赖有限元分析与现场检测。监测关键部位的应力分布, 有助于判断其在荷载作用下的实际表现。针对承受弯矩与剪力的关键节点, 需对其承载能力进行专项评估, 以确保在极端荷载下不会失效。

5 结语

公路桥梁的抗风设计与稳定性分析对于确保桥梁的安全性与耐久性而言, 具有重要意义。随着大跨度桥梁的不断发展, 传统设计方法在应对复杂风荷载方面面临着显著挑战。现代技术的应用, 例如风洞实验与数值模拟的结合, 使得风荷载的作用机制及桥梁的风振响应特征得以深入探讨, 从而制定出科学有效的抗风设计策略。未来的研究应当更加关注新材料与新技术的应用, 进一步完善公路桥梁的抗风设计理论与方法, 确保公路桥梁在各种环境条件下的安全与稳定, 为交通网络的畅通运行奠定坚实基础。

[参考文献]

- [1] 陈曦, 李乾坤. 既有跨航道双幅桥梁抗船舶碰撞设计研究[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(9): 145-148.
- [2] 李琛, 陈绪栋. 独柱墩桥梁抗倾覆性分析与加固设计[J]. 中国水运, 2023(11): 143-145.
- [3] 龙柏全, 张晓旭. 独柱墩桥梁抗倾覆验算及加固设计[J]. 江西建材, 2024(6): 151-153.

作者简介: 杜晶(1994—), 男, 汉族, 四川南充人, 研究生, 桥梁工程师, 从事桥梁设计工作。