

钢构桥空心高墩局部与整体稳定性研究

陈昭澎 陈晓梅 廖 斌
长春工程学院 吉林 长春 130012

摘要: 随着现代桥梁工程技术的飞速发展,钢构桥因其卓越的承载能力和跨越能力,在复杂地形和长跨度桥梁建设中得到了广泛应用。空心高墩作为钢构桥的关键结构元素,其局部与整体稳定性成为设计、施工和维护过程中的重要考量。本文旨在深入分析钢构桥空心高墩的局部与整体稳定性,详细探讨其受力机制、稳定性影响因素及计算方法,为工程实践提供理论支持。

关键词: 钢构桥;空心高墩;局部;整体;稳定性

引言

钢构桥空心高墩因其轻质、高强度和优良的抗风、抗震性能,成为现代桥梁工程中的重要组成部分。然而,随着墩高的增加,其稳定性和动力响应问题变得愈发复杂。本文将从空心高墩的构造特点、局部稳定性、整体稳定性以及计算方法等多个方面,全面探讨其稳定性问题。

1 钢构桥空心高墩的构造形式与特点

1.1 构造形式

空心高墩的构造形式主要包括薄壁空心墩、双肢薄壁空心墩和双薄壁实心墩等。每种形式都有其独特的优点和适用场景。例如,薄壁空心墩因其轻质和较好的抗风性能,常用于高风速地区;双肢薄壁空心墩则因其较好的整体稳定性和抗扭能力,适用于需要承受较大扭矩的桥梁。

1.2 特点分析

空心高墩具有以下显著优势:一是轻质高强度:空心设计减轻自重,降低地基压力,同时保持高强度,减少材料消耗和施工难度。二是抗风抗震:柔性结构有效吸收和分散风力和地震能量,降低破坏风险,特别适用于高烈度地震区和强风区。三是施工便捷:空心结构简化混凝土浇筑和养护过程,缩短施工周期,降低成本,内部空间可再利用提高施工效率。四是环境适应性强:构造形式可灵活调整,适应不同地质条件和桥梁设计要求,如调整壁厚、增设横隔板等,应对河流冲刷、软土地基等挑战^[1]。

2 钢构桥空心高墩的局部稳定性分析

作者简介: 陈昭澎(2004-),男(满),吉林长春,在读本科,主要研究土木工程方向。

基金项目: 吉林省大学生创新创业项目,项目编号为S202311437137。

2.1 局部稳定问题的表现与机理

空心高墩的局部稳定问题主要表现为壁板的屈曲。屈曲可能表现为以下几种形式:一是局部屈曲:发生在壁板的某个小区域,通常是由于该区域的应力集中或材料缺陷导致的。二是整体屈曲:屈曲沿壁板的长度方向扩展,形成大范围的失稳,这种屈曲通常是由于整体压应力过大或结构刚度不足引起的。三是弹塑性屈曲:在压应力作用下,壁板材料发生弹塑性变形,当变形达到一定程度时,壁板无法恢复原有形状,导致屈曲。

2.2 影响因素

壁厚: 一般来说,壁板越厚,其刚度越大,抗屈曲能力越强。在设计时,应根据实际受力情况和材料性能,选择合适的壁厚,以确保局部稳定性。

横隔板厚度与布置: 横隔板作为连接墩身各部分的横向构件,其厚度和布置方式对于提高空心高墩的整体刚度和局部稳定性至关重要。合理的横隔板设计能够有效约束壁板的变形,防止屈曲的发生。设计时,应综合考虑横隔板的间距、厚度以及连接方式等因素。

混凝土强度等级: 混凝土强度等级越高,其抗压和抗剪能力越强,越能抵抗壁板屈曲时产生的应力集中现象^[2]。然而,高强度混凝土也可能带来脆性增加的问题。

温差变化: 温度变化会引起材料的热胀冷缩,对于空心高墩这样的薄壁结构而言,温差变化可能导致壁板内外侧的温度应力差异,进而诱发屈曲。

施工工艺: 施工质量的好坏直接影响到空心高墩的局部稳定性。例如,混凝土浇筑过程中的振捣不密实、养护不到位等都可能造成壁板内部存在缺陷,降低其抗屈曲能力。

2.3 分析方法

局部稳定性的分析主要依赖于有限元法(FEM),该方法能够精确模拟空心高墩在复杂荷载条件下的应力

分布和变形情况。以下是分析方法的步骤：

模型建立：根据空心高墩的实际尺寸和构造特点，建立精细的有限元模型。模型中应包含壁板、横隔板、墩身等所有关键构件，并考虑材料的非线性特性，如弹塑性、徐变等。同时，还应考虑边界条件和荷载传递方式等因素，以确保模型的准确性。

荷载工况模拟：根据桥梁设计规范，模拟空心高墩可能承受的各种荷载工况，包括恒载、活载、风载、温度荷载等。通过组合这些荷载工况，可以得到最不利的受力状态，为后续的分析提供基础数据。

应力与变形分析：利用有限元软件对模型进行求解，得到空心高墩在各荷载工况下的应力分布和变形情况。通过对比不同参数下的分析结果，可以评估这些因素对局部稳定性的影响程度。例如，可以分析壁厚增加对壁板应力和变形的影响，以及横隔板厚度和布置方式对整体刚度的影响等。

屈曲分析：在有限元分析中，还可以进行特征值屈曲分析或非线性屈曲分析，以预测壁板屈曲的发生条件和模式。特征值屈曲分析可以得到结构的屈曲模态和临界荷载，而非线性屈曲分析则可以考虑材料的弹塑性变形和几何非线性等因素，更加真实地模拟屈曲的发生过程。

3 钢构桥空心高墩的整体稳定性分析

3.1 影响因素

墩高：作为影响整体稳定性的主导因素，墩高的增加会显著增大结构的柔性和二阶效应（即P- Δ 效应），降低整体稳定性。因此，在设计高墩桥梁时，需特别关注其整体稳定性的验算。

墩身截面尺寸：截面尺寸的大小直接影响结构的刚度和抗倾覆能力。合理的截面设计可以提高结构的整体稳定性，同时需兼顾材料的经济性和施工的可行性。

材料性能：材料的强度、弹性模量、韧性等力学性能对整体稳定性有重要影响。高强、高弹模的材料能够提高结构的刚度和承载能力，但需注意避免材料脆性断裂的风险。

外部荷载：包括恒载、活载、风载、地震载等。外部荷载的大小、方向和分布都会对整体稳定性产生影响。在设计时，需准确评估各种荷载对结构的作用，并合理组合以得到最不利的荷载工况。

地基条件：地基的承载力、刚度、均匀性以及地基处理措施等都会影响空心高墩的整体稳定性。地基软弱或处理不当可能导致结构发生整体滑移或倾斜。

3.2 失稳模式的分类与机理

一是整体倾覆：当结构承受的水平荷载（如风载、

地震载）超过其抗倾覆力矩时，可能发生整体倾覆。这种失稳模式通常伴随着结构的大幅度侧移和旋转。二是整体滑移：当地基承载力不足或地基处理不当，且结构承受的水平荷载较大时，可能发生整体滑移^[3]。滑移可能沿地基的软弱面或处理不当的界面发生。三是弯曲失稳：当结构承受的弯矩过大，超过其抗弯承载能力时，可能发生弯曲失稳。这种失稳模式通常表现为结构的局部或整体弯曲变形，严重时可能导致结构断裂。

3.3 分析方法

整体稳定性分析主要采用特征值屈曲分析和非线性屈曲分析两种方法。特征值屈曲分析基于线性弹性理论，通过求解结构的特征值问题，预测结构在理想弹性状态下的屈曲模态和屈曲荷载。特征值屈曲分析计算简便，能够快速给出结构的屈曲模态和临界荷载，为设计提供初步的稳定性评估。然而，该方法忽略了材料的非线性和几何非线性效应，因此其结果偏于保守。非线性屈曲分析则是考虑材料的非线性特性（如弹塑性、徐变等）和几何非线性效应（如大变形、P- Δ 效应等），对结构在接近极限状态时的行为进行模拟。

4 案例分析：吉林某预应力连续钢构大桥双肢薄壁空心高墩的稳定性分析

4.1 项目背景与概况

吉林某预应力连续钢构大桥是横跨某沟的一座重要交通枢纽，桥全长254.60m，设计采用双肢薄壁空心高墩结构，最高墩身达到72m。该桥为高速公路桥梁，设计标准为双向四车道，设计行车速度为85km/h，设计使用年限为100年，且需考虑VII度地震烈度的影响，按VIII度设防。桥墩结构复杂，施工难度大，对稳定性要求极高^[4]。

4.2 Midas软件模型建立

4.2.1 稳定性分析

采用Midas软件，建立桥梁三维计算模型，分析72m高墩在以下五种工况下的稳定性：工况一：开始浇筑时，仅考虑自重作用。工况二：0号块初凝，考虑自重+风荷载（横向+纵向）。工况三：挂篮安装，考虑自重+挂篮重力+风荷载（横向+纵向）。工况四：最大悬臂处施工，考虑自重+挂篮重力+风荷载（横向+纵向）。工况五：合龙阶段，考虑自重+风荷载（横向+纵向）。各工况均考虑高墩的自重、挂篮重力（含坠落情况）、以及横向和纵向风荷载的影响。

4.2.2 模型建立

选取右幅72m高墩为计算对象，桩基深72m。模型含229个节点、218个单元，材料依图定义，截面由图纸确定。主梁自重按钢筋混凝土容重25.5kN/m³计。挂篮荷载

为80吨（含机具、模板），坠落时动力放大系数为2.0。风荷载计算依据《JTG/T 3360-01-2018公路桥梁抗风设计规范》，基本风速取24.5m/s。计算过程如下表1所示：

表1 风荷载计算

计算项目	符号	数值/公式	结果
主梁横向风荷载计算			
基本风速	U	24.5m/s	-
抗风风险系数	kf	1	-
地形条件系数	kt	1.5	-
地表转换及风速高度修正系数	kh	1.62	-
基准高度Z处的设计风速	Ud	$U \times kf \times kt \times kh$	59.54m/s
等效静阵风系数	Gv	1.25	-
等效静阵风风速	Ug	$Ud \times Gv$	74.43m/s
主梁特征宽度	B	12m	-
主梁梁体投影高度	D	8m	-
主梁横向力系数	CH	$2.1 - 0.1 \times B/D$	1.95
空气密度	ρ	1.25kg/m ³	-
等效静阵风荷载	Fg	$0.5 \times \rho \times Ug^2 \times CH \times D / 1000$	54kN/m
桥墩风荷载计算			
等效静阵风系数	Gv	1.14	-
基准高度Z处的设计风速	Ug	$Ud \times Gv$	67.87m/s
顺风向(或横风向)投影宽度	w	6m	-
构件的阻力系数	CD	2.1	-
等效静阵风荷载	Fg	$0.5 \times \rho \times Ug^2 \times CD \times w / 1000$	36.27kN/m

4.3 结果分析

4.3.1 横隔梁的影响：

通过对比分析设置一道和两道横隔梁的情况，发现横隔梁的数量对空心薄壁高墩的稳定性影响较小，不是主要控制因素。



图1 两道横隔梁影响图（左）及一道横隔梁影响图（右）

4.3.2 壁厚的影响：

当壁厚从30cm增加到45cm时，桥墩的稳定性明显改善。壁厚45cm时既能保证稳定性，又能减少自重和材料用量。

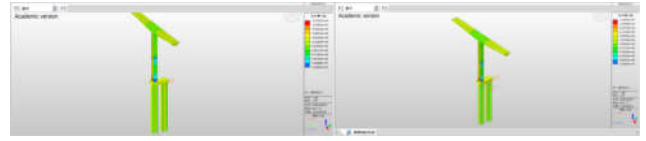


图2 壁厚30cm影响图（左）及壁厚45cm影响图（右）

4.3.3 不同工况下的稳定性：

表2 在风荷载作用下不同工况稳定性影响程度

	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五
应力影响 (N/m ²)	24.72	24.72	26.67	54.65	50.34
变形影响(m)	0.32	0.32	0.35	1.01	0.78

从表2中可看出，工况一：裸墩状态下，风荷载对结构影响很小，主要由自重控制。工况二：初凝时承受风荷载，变形和应力增大，但影响有限。工况三：挂篮荷载对墩柱变形影响较小，但对应力有一定影响。工况四：最大悬臂处为最不利荷载组合，自重、风荷载和挂篮荷载共同作用，产生最大变形和应力。工况五：合龙阶段稳定性受自重和风荷载控制，但较工况四有利。风荷载的影响：有风荷载时变形显著增大，施工过程中必须考虑风荷载的影响。

结语

空心高墩作为钢构桥的关键结构元素，其局部与整体稳定性是桥梁工程安全性的重要保障。本文通过对空心高墩的构造形式、特点、局部与整体稳定性分析以及研究方法等方面的深入探讨，为工程实践提供了有益的理论支持。在未来的桥梁建设中，应继续加强对空心高墩稳定性的研究和实践，以确保桥梁的安全可靠运行。

参考文献

- [1]毛远文,任科.某高墩大跨连续刚构桥主墩优化设计研究[J].城市道桥与防洪,2024,(04):103-106+16-17.
- [2]薛江,许琼方,周燕,等.考虑风荷载的几何缺陷对矩形薄壁蜂窝结构高桥墩稳定的影响[C]//中冶建筑研究总院有限公司.2022年工业建筑学术交流会议论文集(下册).天津城建大学土木工程学院;天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室;中国建筑第六工程局有限公司;,2022:6.
- [3]吴俊勇.桥梁空心墩技术实施要点分析[J].黑龙江交通科技,2021,44(04):136+138.
- [4]陈晨海.大高差桥墩连续刚构桥结构力学行为研究[D].重庆交通大学,2020.