

# 曲线公路桥梁中小箱梁的受力特性与优化设计

张启明

**摘要:** 本文聚焦曲线公路桥梁中小箱梁的受力特性与优化设计展开深入研究。首先阐述了曲线公路桥梁中小箱梁在实际工程中的重要性与应用现状。通过理论分析与数值模拟,详细探究了小箱梁在曲线桥梁中的受力特点,包括弯扭耦合作用下的应力分布、变形特征等。针对这些受力特性,提出了一系列优化设计方法,如合理调整箱梁截面尺寸、优化配筋方案等。研究结果表明,深入了解小箱梁的受力特性并进行优化设计,能够有效提高曲线公路桥梁的安全性、耐久性和经济性,为曲线公路桥梁的建设提供了重要的理论依据和实践指导。

**关键词:** 曲线公路桥梁;小箱梁;受力特性;优化设计;弯扭耦合

## 引言

在现代交通基础设施建设中,曲线公路桥梁的应用日益广泛。曲线公路桥梁能够更好地适应地形地貌和交通线路的需求,提高线路的灵活性和安全性。小箱梁作为曲线公路桥梁中常用的结构形式,具有自重轻、施工方便、经济性好等优点。然而,由于曲线桥梁的几何形状特点,小箱梁在受力过程中会产生复杂的弯扭耦合作用,其受力特性与直线桥梁中的小箱梁有很大差异。深入研究曲线公路桥梁中小箱梁的受力特性,并进行优化设计,对于提高曲线公路桥梁的性能和质量具有重要的现实意义。

## 一、曲线公路桥梁中小箱梁的受力特性分析

### 1. 弯扭耦合作用原理

曲线公路桥梁中的小箱梁在车辆荷载、自重等作用下,不仅会产生弯曲变形,还会产生扭转变形,形成显著的弯扭耦合作用。这种耦合作用源于曲线桥梁固有的曲率半径以及箱梁在空间中的偏心布置<sup>[1]</sup>。当车辆沿曲线行驶时,产生的离心力通过桥面系传递至箱梁,形成附加扭矩;同时,车辆的垂直轮载引起横向弯矩和竖向弯曲应力。由于小箱梁截面抗扭刚度相对较小,扭矩易引发剪力滞效应和畸变变形,导致顶底板应力不均。弯扭耦合使结构受力状态复杂化,局部应力集中明显,增

加了设计与验算难度,对结构整体稳定性和耐久性提出更高要求。

### 2. 应力分布特点

在弯扭耦合作用下,曲线公路桥梁中小箱梁的应力分布呈现出显著不均匀性。由于曲率影响,离心力与竖向荷载共同作用,导致箱梁外侧承受更大的纵向拉应力和横向剪应力,尤其在曲线外侧边缘易形成应力集中。顶板在正弯矩区主要承受弯曲引起的拉应力及扭转产生的剪应力,底板则以压应力为主,同时两者均受翘曲剪应力影响。腹板区域也因扭转产生附加剪力流,加剧结构受力复杂性。这种多向应力叠加不仅降低构件抗裂性能,还可能引发疲劳损伤,对结构的耐久性、稳定性和行车安全性构成潜在威胁,需在设计中采取加厚翼缘、设置横隔板等构造措施予以强化<sup>[2]</sup>。

### 3. 变形特征

曲线公路桥梁中小箱梁的变形特征与直线桥梁存在显著差异。在弯扭耦合作用下,箱梁不仅产生横向位移和扭转角,还伴随明显的截面畸变,表现为顶板翘曲、腹板倾斜等局部变形。横向位移受曲线半径、车辆偏心荷载、截面刚度及支承条件共同影响,曲线半径越小,离心力效应越强,横向位移与扭转耦合越剧烈。扭转角使内外腹板受力不均,内侧受压、外侧受拉,易引发顶板横向开裂和腹板剪切应力集中,尤其在跨中和支点附近更为突出。畸变还将重分布支座反力,导致边墩支座超载、中墩支座脱空,降低支座有效约束能力,削弱结构整体稳定性。此外,多支座布置不当时,更易加剧扭转失稳风险,对设计中的抗扭刚度配置、支承体系优化及施工精度提出更高要求<sup>[3]</sup>。

**作者简介:** 张启明(1999.04——),女,汉族,本科学历,初级工程师,主要从事公路桥梁设计方面的研究工作。

## 二、影响曲线公路桥梁中小箱梁受力特性的因素

### 1. 曲线半径

曲线半径是影响曲线公路桥梁中小箱梁受力特性的重要因素之一。较小的曲线半径会显著增大弯扭耦合作用，使箱梁在竖向荷载与横向扭矩共同作用下产生复杂的应力分布，导致正应力、剪应力及扭转剪应力叠加增加。当曲线半径较小时，车辆行驶时产生的离心力较大，作用点偏移形成附加扭矩，进一步加剧箱梁的扭转效应和横向位移，甚至引发畸变和翘曲变形。此外，小半径曲线还可能引起支座受力不均、局部应力集中等问题，影响结构耐久性与行车舒适性。

### 2. 箱梁截面尺寸

箱梁的截面尺寸对其受力特性有显著影响。合理的截面设计不仅能提升抗弯和抗扭性能，还能优化结构整体稳定性<sup>[4]</sup>。增大梁高和宽度可显著提高截面惯性矩，有效增强抗弯刚度，减小跨中挠度；适当增加腹板厚度可防止剪切屈曲，提升抗剪能力，而合理配置顶板与底板厚度则有助于抵抗扭转剪应力，增强箱梁的整体扭转刚度。此外，箱形截面因其封闭结构具有优异的空间受力性能，能有效分配荷载、减少应力集中，显著提升结构的抗扭能力和整体性，在大跨度桥梁中应用广泛。

### 3. 车辆荷载

车辆荷载是曲线公路桥梁中小箱梁承受的主要外部荷载之一，其动态作用对结构安全具有显著影响。车辆的类型、行驶速度、横向分布位置及轴重分布等因素均会显著改变箱梁的受力状态。重型车辆不仅带来较大的竖向荷载，导致跨中区域产生显著的弯矩和挠度，还会因偏心加载引发扭转效应。在曲线路段，车辆行驶速度越快，产生的离心力越大，加剧了箱梁的横向倾覆趋势和扭转响应；当车辆偏行于曲线外侧车道时，将进一步增大外腹板的压应力与变形，可能导致局部开裂或疲劳损伤。此外，多车并行或车队随机分布也增加了荷载组合的不确定性。

## 三、曲线公路桥梁中小箱梁的优化设计方法

### 1. 截面尺寸优化

根据曲线公路桥梁的实际情况和受力要求，对箱梁的截面尺寸进行优化设计。由于曲线桥存在较大的扭矩作用，箱梁需具备良好的抗弯与抗扭性能<sup>[5]</sup>。通过建立空间有限元力学模型，模拟车辆荷载、温度效应及离心力等复杂工况，分析不同截面参数下箱梁的应力分布与变形特性。在保证结构安全的前提下，综合考虑材料用

量与施工成本，采用遗传算法对梁高、顶底板宽度、腹板厚度等关键参数进行多目标优化，寻求结构性能与经济性的最佳平衡点，提升箱梁的性能价格比，为曲线桥设计提供科学依据。

### 2. 配筋方案优化

合理的配筋方案能够有效提高箱梁的承载能力和耐久性。在曲线公路桥梁中，小箱梁受弯扭耦合作用显著，导致应力分布不均，尤其在跨中和支座附近扭矩效应明显，易引发扭转开裂和剪切破坏。设计时应结合空间有限元分析，准确识别高应力区域，并在这些部位适当增加纵向钢筋和箍筋的数量与直径，提升抗扭与抗剪能力。同时，钢筋布置需兼顾构造要求与受力需求，确保协同工作。例如，在箱梁外侧边缘及顶板、底板的受拉区加强配筋，设置抗扭纵筋和封闭箍筋，形成有效的抗扭骨架，可显著提升抗裂性能与整体刚度<sup>[6]</sup>。此外，应注重锚固长度与搭接位置的合理设计，避免应力集中，保障结构在复杂荷载下的安全性和长期耐久性。

### 3. 支座布置优化

支座是曲线公路桥梁中小箱梁与桥墩之间的关键连接部件，其布置方式直接影响结构的受力性能。合理的支座布局不仅能有效传递竖向与水平荷载，还能显著减小箱梁的应力集中和挠度变形。在曲线桥梁中，由于存在离心力和扭矩作用，支座布置需综合考虑曲线半径、横坡、箱梁扭转刚度及偏载效应等因素。通常采用板式橡胶支座、盆式橡胶支座或球形支座，根据受力需求优化支座布置间距与位置，设置合理的约束形式，以协调变形、释放扭矩并提高整体稳定性，确保桥梁在运营过程中的安全性与耐久性。

## 四、优化设计实例分析

### 1. 工程概况

以某曲线公路桥梁为例，该桥梁采用预制小箱梁结构，曲线半径为200m，桥梁全长100m，共5跨，每跨20m，平面呈圆弧形布置。箱梁横桥向倾斜设置，通过调整支座高度实现超高过渡，有效适应路线线形要求。主梁采用C50混凝土，抗压强度高、耐久性好，满足长期运营需求<sup>[7]</sup>。设计荷载为公路-I级，充分考虑车辆偏载及离心力影响，对梁体横向位移和扭转效应进行了专项验算。结构整体稳定性良好，支座布置合理，满足抗震与变形要求。桥面铺装与伸缩缝协调配合，确保行车平顺性与安全性，体现了曲线梁桥在复杂地形条件下的适用性与经济性。

## 2. 优化设计过程

对原设计方案进行受力分析,建立精细化有限元模型,模拟恒载、活载及温度荷载作用下箱梁的应力分布与变形特征。分析表明,原设计中箱梁外腹板区域主拉应力接近规范限值,尤其在跨中和支点附近存在应力集中现象,存在耐久性与安全性隐患。为此,采用综合优化策略:将箱梁高度提升10%,增强整体抗弯刚度;腹板厚度增加5%,改善剪切性能;在外侧边缘及顶、底板受拉区增设纵向钢筋与箍筋,提高抗裂能力<sup>[8]</sup>。同时优化支座布置,适当调整跨间支座间距,结合使用橡胶支座与球形支座,兼顾变形适应性与水平力传递效率,显著降低局部应力峰值,提升结构整体安全储备与受力合理性。

## 3. 优化效果评估

对优化后的设计方案进行再次受力分析,结果表明,优化后的箱梁应力和变形明显减小。外侧最大拉应力降低了20%,横向位移减小了15%,有效缓解了结构在偏载作用下的不利影响。桥梁的整体稳定性显著增强,支座反力分布更加均匀,避免了局部受力集中现象。通过优化截面尺寸与预应力布置,不仅提升了结构刚度和抗扭性能,还减少了材料用量,节约了约8%的建造成本。该曲线公路桥梁的安全性、耐久性与经济性实现协同提升,施工难度降低,工期缩短,综合效益显著,为类似工程提供了可借鉴的设计范例。

## 结语

曲线公路桥梁中小箱梁的受力特性复杂,受到多种因素的影响。深入研究其受力特性,并进行优化设计,对于提高曲线公路桥梁的性能和质量具有重要意义。本文通过对曲线公路桥梁中小箱梁的受力特性分析,明确了弯扭耦合作用原理、应力分布特点和变形特征。探讨了影响其受力特性的因素,包括曲线半径、箱梁截面尺寸和车辆荷载等。在此基础上,提出了截面尺寸优化、配筋方案优化和支座布置优化等一系列优化设计方法,

并通过实例分析验证了优化设计的有效性。

在实际工程中,应充分考虑曲线公路桥梁的特点和小箱梁的受力特性,采用科学合理的优化设计方法,确保桥梁的安全性、耐久性和经济性。未来的研究可以进一步深入探讨曲线公路桥梁中小箱梁的受力机理,开发更加高效、精确的优化设计方法,为曲线公路桥梁的建设提供更加坚实的理论支持和技术保障。随着新材料、新技术的不断发展,应积极探索将其应用于曲线公路桥梁中小箱梁的设计和施工中,推动曲线公路桥梁建设的不断发展和进步。

## 参考文献

- [1] 黄慧. 曲线连续钢箱梁桥顶推施工问题分析[J]. 交通世界, 2024, (26): 143-145.
- [2] 李军, 陈海明, 卢林华. 公路桥梁工程建设中的钢箱梁曲线顶推施工技术分析[J]. 交通世界, 2021, (27): 79-80.
- [3] 杨功勤. 直线小箱梁在小半径曲线上的应用[J]. 工程建设与设计, 2020, (3): 104-106.
- [4] 张科龙, 周胜利, 刘洋. 双层钢桁梁步履式顶推反力点偏距值分析与确定[J]. 公路与汽运. 2023, (4). DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2023.04.022.
- [5] 李爽. 曲线钢箱梁桥优化设计研究[J]. 工程建设与设计. 2023, (7). DOI: 10.13616/j.cnki.gcsysj.2023.04.028.
- [6] 邢东东. 145m长小半径曲线钢箱梁顶推施工关键技术[J]. 价值工程. 2023, 42(8). DOI: 10.3969/j.issn.1006-4311.2023.08.027.
- [7] 余满, 吴大俊, 唐益军, 等. 步履式顶推曲线钢箱梁桥倾覆稳定性研究[J]. 现代交通技术. 2022, 19(1). DOI: 10.3969/j.issn.1672-9889.2022.01.010.
- [8] 姚亮. 跨高速公路曲线钢箱梁顶推施工技术[J]. 铁道建筑技术. 2022, (9). DOI: 10.3969/j.issn.1009-4539.2022.09.030.