

# 薄壁箱梁剪力滞效应理论与试验综述

文 / 胡旭冉 安徽粮食工程职业学院

梁巧真 安徽粮食工程职业学院

李正焜 安徽粮食工程职业学院

**摘要：**薄壁箱梁可以有效融合悬臂浇筑与悬臂拼装的优势，在桥梁工程领域应用广泛，因此深入剖析其内部剪力滞效应具有重要的工程实践意义与理论价值。本文首先梳理了影响剪力滞效应的关键因素，进而系统阐述了薄壁箱梁剪力滞效应的多种分析理论，涵盖数值分析、能量变分、比拟杆、弹性理论等。同时，通过开展针对性试验，明确了薄壁箱梁在剪力滞效应下的剪力变化特征，为薄壁箱梁的拼装与浇筑施工提供了理论与实践依据。

**关键词：**剪力滞效应；薄壁箱梁；分析理论；剪力滞试验

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.08.053

## 引言

薄壁箱梁以其刚度大、自重轻的显著特性，在桥梁结构中占据重要地位。沿桥向配置预应力筋的便利性，进一步拓展了其应用场景。当薄壁箱梁受到对称荷载作用时，翼缘板的剪切变形会导致弯曲应力状态偏离常规梁理论所预测的线性分布，这一现象被称为剪力滞现象。若在设计与实际操作中忽视剪力滞效应，箱梁结构的应力变化将难以精准把控，可能引发结构的局部应力集中、过大变形甚至破坏，严重威胁桥梁的安全性与耐久性。因此，需要对薄壁箱梁剪力滞效应展开全面深入的研究，借助科学合理的试验手段，明晰剪力滞效应的影响机制与变化规律，对于保障桥梁工程的质量与安全意义深远。

### 一、影响剪力滞效应主要因素

#### (一) 荷载形式

众多研究表明，不同边界条件与荷载形式对薄壁箱梁剪力滞效应影响显著。以连续梁为例，当承受均匀荷载时，正弯矩区与支座截面所受剪力滞效应程度不同。在正弯矩区，由于荷载分布相对均匀，剪力滞效应的影响相对较小，翼缘板的应力分布相对较为接近初等梁理论的预测值。然而，在支座截面，由于支座对梁体的约束作用以及剪力传递的复杂性，该位置极易遭受剪力滞效应的影响，翼缘板的应力分布呈现出明显的非线性特征。这种差异要求在连续梁结构设计时，必须合理调整支座的设置与构造细节，充分考虑剪力滞效应对支座截面应力的放大作用，以确保结构的安全性<sup>[1]</sup>。在薄壁箱梁的横向结构中，不同位置荷载引发的剪力滞效应差异较大。受荷载作用，板体中心位置常出现剪力滞效应，甚至产生负剪力滞问题。此外，箱梁内部出现剪力滞效应时会产生附加弯矩，导致梁体挠度增大且超出理论计算值，且随着剪力滞效应范围扩大，挠度增加更为显著。因此，在设计与施工中，需全面考虑荷载形式对剪力滞效应的影响，采取诸如优化荷载分布、调整结构尺寸等相应措施进行有效控制。

## (二) 宽跨比

在探究剪力滞效应的影响要素时，可发现宽跨比也会对剪力滞系数造成较大影响。如图1所示（其中横轴代表宽跨比、纵轴代表剪力滞系数，实线为变分法、虚线为有限元法），可以清晰地看出，在连续梁结构中，随着宽跨比的增加，剪力滞系数呈逐渐减小的趋势。这是因为随着宽跨比的增大，箱梁的横向联系相对增强，翼缘板的协同工作能力提高，使得剪力能够更均匀地在翼缘板内传递，从而减小了剪力滞效应的程度。

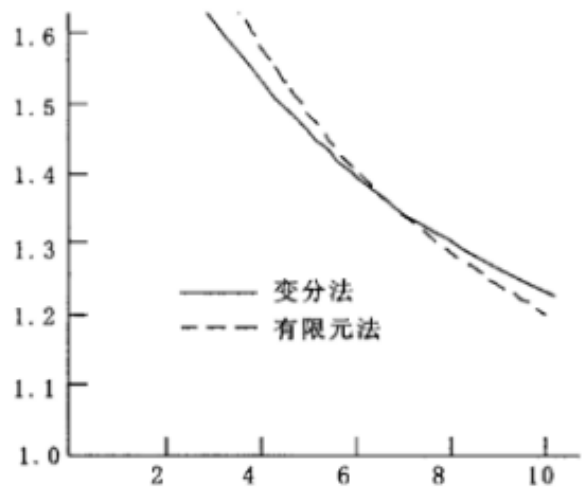


图1 不同试验方法下宽跨比与剪力滞系数的关系图

当宽跨比较小时，翼缘板的宽度相对跨度较小，其横向约束较弱，在荷载作用下，翼缘板更容易发生剪切变形，导致剪力滞效应较为明显，剪力滞系数较大。随着宽跨比的逐渐增大，翼缘板的横向刚度相对提高，对剪力的传递更为有效，剪力滞系数随之减小。然而，当宽跨比超过一定范围时，其他因素（如结构的扭转效应、边界条件的影响等）可能会逐渐凸显，对剪力滞系数的影响变得更为复杂。

## 二、薄壁箱梁剪力滞效应分析方法理论

### (一) 数值分析

数值分析理论在薄壁箱梁剪力滞效应分析中具有重

要地位,该理论包含线段法、有限差分法、有限条法、有限单元法等多种方法,能够有效解决各类力学问题。其中,有限元法在探究剪力滞效应与薄壁箱梁内部结构关系方面应用广泛。在薄壁箱梁剪力滞效应的研究中,运用有限元法能够精确地模拟箱梁复杂的几何形状、材料特性以及边界条件。通过合理地划分单元,选择适宜的单元类型和材料本构模型,可以准确地反映薄壁箱梁在荷载作用下的应力、应变分布情况,进而深入分析剪力滞效应的产生机制与变化规律。通过探寻这些影响因素的变化规律,可以确定剪力滞效应的具体位置,进而对薄壁箱梁结构进行优化调整,保证结构质量。运用有限元法进行模拟时,需要确保试验环境与实际工程环境一致,以提高数值分析的准确性。

## (二) 能量变分

将能量变分理论应用于薄壁箱梁剪力滞效应研究时,需对薄壁箱梁结构应力变化范围进行适当调整。依据段燕娥、陈超、王方旭等在文献[2]中的研究,能量变分理论以箱梁翼缘板的纵向位移作为能量变化控制的基础,通过描述梁体竖向位移的变化率得出剪力滞效应函数。基于“最小势能”原理推导梁体挠度曲线方程式,能够观察到剪力滞效应的变化过程<sup>[2]</sup>。在进行能量变分计算时,需明确翼缘板梁体竖向挠度、纵向位置,求出板体纵向位移差函数。能量变分理论所得数据具有较强的闭合性,可用于绘制不同截面位置的剪力滞效应图像,以及判断各类系数对剪力滞效应的影响。然而,由于人为操作和外部环境因素,翼缘板自由侧在试验中可能产生误差,影响计算结果的准确性。因此,在应用该理论时,需科学选择位移模式,并结合薄壁箱梁的实际工况进行分析。

## (三) 比拟杆

比拟杆理论将弯曲状态下的薄壁箱梁结构划分成两部分,即剪力作用下的薄板和轴向力作用下的杆件,且薄板与杆件互不干涉。在完成薄板、杆件等结构的初步设计后,需要探究板体、杆件变形协调条件、平衡条件等,再依照上述条件合理设置微分方程,使翼缘板内部均产生剪力滞效应。在完成剪力滞效应的初始设计后,可利用标准加劲杆内力来划定滞效应的变化范围,对该项数值进行合理规范。正如蒋春海、张旭在文献[3]中所述,标准加劲杆面积为薄板面积与加劲杆面积的总和。运用比拟杆理论分析方式后,能够适时创建力学模型,并对该模型的内部系数进行合理简化,该方法可应用于等截面薄壁箱梁结构的分析。然而,若要利用该力学模型分析复杂结构、复杂力系状态下的剪力滞效应,则需对薄壁箱梁结构进行适当调整,将其划分为多个部分,并通过各个部分的有效规范来设置比拟杆,从而精准运用该基础理论,保障剪力滞效应的分析效果。

## (四) 弹性理论

弹性理论分析方式是薄壁箱梁剪力滞效应中的重要

分析方法,它能充分使用板壳理论、折板理论、正交异性板理论等。例如,在使用板壳理论时,可将圆形壳、梯形壳、矩形壳等截面的薄壁箱梁划分成多个部分,将其内部的管壳单元与板单元充分结合,并对上述单元单独开展试验操作,将管壳理论、板理论运用到试验模拟中,极大提升剪力滞效应分析效率,明确影响该类数值的具体指标。在探究弹性板折基础理论时,将薄壁箱梁中的平面外性能、平面内性能适当独立,对板端中的平面内横向位移、平面外的转角位移进行合理约束,且翘曲存在极大自由度,通过对上述数值的合理设计,有效规范剪力滞效应弹性,明确该项数值变化范围与标准。在探究正交异性板理论的过程中,可发现该理论将薄壁箱梁结构中的板结构当成正交异性板体,将肋部面积投放到该板体表面中,再借助弹性力学详细分析其边界条件,对肋部结构应力进行全面规范处理,提升弹性理论分析方法应用效率。在明确薄壁箱梁剪力滞效应基础理论后,要根据当前项目薄壁箱梁结构实际情况,合理选择理论分析方式,对剪力滞效应变化范围开展合适试验,对箱梁剪力滞效应进行全面规范。

## 三、薄壁箱梁剪力滞效应试验综述

### (一) 查找剪力系数

在开展薄壁箱梁剪力滞效应试验前,需根据剪力滞效应操作标准,合理查询剪力系数,再将该类数值运用到薄壁箱梁剪力滞效应试验中。具体来看,在探究剪力系数变化范围时,可依照初等梁体力学基础理论,明确剪力包含正剪力滞效应、负剪力滞效应,不同剪力状态会对薄壁箱梁结构质量产生对应影响,需对不同剪力滞效应进行合理探究。在探究剪力滞系数时,可通过公式: $\lambda = \sigma / \bar{\sigma}$ ,在该项公式中, $\bar{\sigma}$ 代表着初等梁体理论中的翼板正应力、 $\sigma$ 代表着剪力滞效应下翼缘板正应力值、 $\lambda$ 多为变量,其处在腹板、翼板交界位置。在探究 $\lambda$ 数值时,若该项数值在1以上,则将其看成正剪力滞效应;若该项数值在1以下,则其达标着负剪力滞效应,需对上述数值变化范围进行严格规范,保障剪力系数应用效果。在开展剪力系数计算规范时,需明确该类系数影响标准与操作环境。日常试验操作中严格检测薄壁箱梁剪力滞效应中的环境变化,对当前环境温湿度与此前温湿度标准进行合理比对,找出当前试验操作的具体问题,再找寻出问题解决方法,保障对剪力滞效应控制效果。

### (二) 有限段试验

在开展有限段试验时,根据张玉元、马啸、张元海等在文献[4]中的基础操作理论,可合理分析传统有限段法与当前有限段法的区别,并对有限段试验进行针对性调整<sup>[4]</sup>。传统有限段法通常将桥梁沿跨体方向进行拆分,在划分成多个部分后进行试验操作。而应用全新有限段试验期间,除包含传统拆分形式外,还要增加薄壁箱梁剪力滞效应下的翼缘板,并对竖向位移函数与位移差值数进行科学设计。在搭建使用有限段技术模型时,

要借助竖向位移函数与位移差值数精准反映不同位置自由度,并对梁体位移参数进行合理设计,对位移差值数、转动角、竖向角度进行合理规范,再依照剪力滞效应的影响范围,将梁体位移参数设置成列阵,对阵中数据信息进行科学设计。从有限段法操作情况上看,要根据翼缘板中的纵向位移函数调整搭建梁体总能量函数,再利用自变分变数操作条件,明确方程式内部数值变化范围,对标准数值进行合理调整,满足梁体单元函数建设使用需求。当前梁体单元函数中包含积分常数、剪切模量、顶板到腹板中心间的距离、材料参数等。要在日常操作中严格控制不同材料的性质系数、截面尺寸等,通过对上述数据的合理规范,为有限段试验操作提供精准数据。在探究薄壁箱梁梁体内部位移情况时,要根据实际操作环境获取梁段边界条件,对该类条件进行全面规范,再将相关数值导入到势能方程中,再利用极小化形式来得到梁体单元刚度,保障对位移控制的准确性。在应用梁体单元刚度方程时,要全面探究梁体单元荷载矩阵、刚度矩阵,对矩阵内部数值变化范围进行合理运算,将该项数值保持在稳定范围中。利用刚度方程可精准获取梁体单元两侧位移参数,合理划定参数变化范围,再借助虎克定律,精准求取梁体横向分布下不同位置的正应力值,明确正应力变化范畴,满足薄壁箱梁剪力滞效应试验操作需求。

### (三) 变分试验

将变分试验运用在薄壁箱梁剪力滞效应探究中,需根据胥雅韧、周黎博、孙远等在文献[5]中的基础理论进行合理假设,确保该项试验操作的准确性。在试验前的假定设计中,要适当考量一般形态,将薄壁箱梁截面当成主要研究对象,并根据实际情况设计翼板位移函数。在该函数中需充分考量外侧翼缘板宽度、内侧翼缘板宽度,并明确各位置边界条件,对影响该条件的修正系数进行合理设计,保障位移函数设计精准性。在计算应变能的过程中,薄壁箱梁中的腹板受弯曲荷载中的对称作用影响,进行实践操作时与初等梁体理论中的截面假定相符,并精准计算纵向弯曲应变能<sup>[5]</sup>。在探究板体平面下的剪切变形力时,可详细观察该变形力变化情况,对横向应变、横向弯曲等进行科学控制。在完成基本假定后,要依照最小势能操作原理,合理探究弹性体,引导该弹性体在运动过程中始终保持平衡状态,并在位移中达到各项边界条件。在调整位移变化范围时,可适时查看薄壁箱梁结构中的外力势能、应变能。比如,若箱梁结构出现弯曲状态,则外力荷载势能发生较大改变,并对梁体不同位置的变形势能进行全面研究,根据上下翼缘板应变能、腹板应变能变化范围,适当规范出该能量变化范围,计算出上下位置翼缘板中的翼板厚度,将该项数值调整在标准范围中。在完成变分试验操作后,要及时总结薄壁箱梁剪力滞效应变化范围,精准调整不同位置所出现的基础性失误,保障薄壁箱梁始终处在合适位置中。

### (四) 试验结论

在完成薄壁箱梁剪力滞效应操作试验后,可发现随着宽跨比的增加,剪力滞系数正逐渐缩小,要依照初等梁体理论开展计算工作。薄壁箱梁在实践运用中,在剪力滞效应持续影响下会出现附加弯矩,而在该项数值增加后,实际挠度要超出此前理论设计,即剪力滞效应与弯矩挠度的变化呈现正比关系,需通过对弯矩挠度控制来调整剪力滞效应。为精准了解把控剪力滞效应在薄壁箱梁中的实际影响,本文根据薄壁箱梁结构应用情况合理开展有限段试验、变分试验等,对梁体承受荷载量进行全面分析,可发现随着剪力滞系数的逐渐改变,梁体结构质量可发生较大变化。为保障薄壁箱梁应用稳定性,需在实际操作中合理规范剪力变化情况,控制剪力滞效应数值变化范围,明确薄壁箱梁结构应用标准。

### 结语

综上所述,利用有限段试验、变分试验等可有效分析薄壁箱梁剪力滞效应影响范围,明确剪力滞效应对薄壁箱梁结构的影响程度。通过对多种基础理论的研究,如数值分析、能量变分、比拟杆、弹性理论等,利用对理论指标的合理控制,能够划定剪力滞效应影响范围,为薄壁箱梁在桥梁项目结构中的应用提供理论支持。在今后的研究中,还需要进一步深入探讨剪力滞效应的影响因素,优化分析方法,开展更多的试验研究,以不断完善对薄壁箱梁剪力滞效应的认识,为桥梁工程的设计与施工提供更加可靠的依据。

### 参考文献

- [1] 王洪国,徐传昶,王明,等.组合梁悬索桥主梁剪力滞效应研究进展[J].中国水运,2024,(21):145-147.
  - [2] 段燕娥,陈超,王方旭.基于不同广义位移的薄壁箱梁剪力滞效应分析[J].科技和产业,2024,24(19):324-329.
  - [3] 蒋春海,张旭.基于比拟杆法的多室箱梁竖弯段剪力滞效应计算及分析[J].城市道桥与防洪,2024,(06):123-127+19.
  - [4] 张玉元,马啸,张元海,等.基于翼板横向位移模式的箱梁剪力滞效应分析[J].铁道学报,2024,46(05):171-178.
  - [5] 胥雅韧,周黎博,孙远,等.考虑剪力滞效应的箱梁桥结构系统识别[J].土木工程与管理学报,2023,40(04):38-47.
- 作者简介:胡旭冉,1988年8月,女,汉族,安徽蚌埠人,硕士,讲师,研究方向:土木工程、工程造价、BIM应用方向。梁巧真,1990年11月,女,汉族,安徽淮北人,硕士研究生,讲师,研究方向:土木工程、建筑施工组织。李正焜,1989年5月,河南息县人,汉族,副教授,硕士,研究方向:工程管理、工程造价。
- 基金项目:2022年安徽省教育厅科学研究项目“非线性下的混凝土箱形截面剪力滞研究”(2022AH053110);2023年安徽省高等学校省级质量工程项目(2023cxt243)。