

李艳凤 于 玲 孙宝芸 贾宝新 著

DANSUOMIAN  
YUYINGLI  
HUNNINGTU  
XIELAQIAO  
XIANGXINGLIANG  
JIANLIZHI YANJIU

# 单索面预应力混凝土 斜拉桥箱形梁剪力滞研究



東北大學出版社  
Northeastern University Press

# 单索面预应力混凝土 斜拉桥箱形梁剪力滞研究

李艳凤 于 玲 孙宝芸 贾宝新 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 李艳凤 于 玲 孙宝芸 贾宝新 2018

图书在版编目 (CIP) 数据

单索面预应力混凝土斜拉桥箱形梁剪力滞研究 / 李艳凤等著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2018. 6  
ISBN 978-7-5517-1898-1

I. ①单… II. ①李… III. ①预应力混凝土桥—箱梁桥—剪力—滞后效应—研究 IV. ①U448.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 137400 号

---

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83683655(总编室) 83687331(营销部)

传真: 024-83687332(总编室) 83680180(营销部)

网址: <http://www.neupress.com>

E-mail: [neuph@neupress.com](mailto:neuph@neupress.com)

印 刷 者: 沈阳航空发动机研究所印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 170mm × 240mm

印 张: 10.25

字 数: 190 千字

出版时间: 2018 年 6 月第 1 版

印刷时间: 2018 年 6 月第 1 次印刷

组稿编辑: 孟 颖

责任编辑: 孙德海

责任校对: 子 敏

封面设计: 潘正一

责任出版: 唐敏志

---

ISBN 978-7-5517-1898-1

定 价: 59.00 元

# 前言

在桥梁结构设计中,由于箱形梁腹板的剪力流向翼缘板传递滞后,从而翼缘板存在着剪力滞效应。剪力滞效应引起的应力不均匀性会给箱形梁的设计工作带来不利影响,若不考虑剪力滞效应,就可能出现一些不可挽回的后果。特别是对于斜拉桥这种复杂的结构体系,在施工过程中随着施工阶段的推进,结构体系不断发生变化,在结构合龙和斜拉索全部张拉完成后,斜拉桥成桥状态的几何线形和内力状况均发生了变化。在成桥阶段,斜拉桥在活载作用下的结构内力是一个复杂的空间问题,在不均匀加载的情况下,存在扭转、畸变等效应,使得受力分析更加复杂,用一般的箱形梁计算理论进行分析存在一定的困难。目前工程中采用以有效宽度代替翼缘实际宽度的方法考虑剪力滞对箱形梁的影响。我国桥梁规范规定了简支梁、连续梁和悬臂梁等特定结构有效宽度的计算方法,但没有对斜拉桥设计的明确规定。国外规范虽然对翼缘有效分布宽度有详细的规定,但也没有适用于斜拉桥箱形梁的条文,说明对于这种复杂结构的剪力滞有待进一步的研究。本书以沈阳富民桥为工程背景,对单索面预应力混凝土斜拉桥箱形梁剪力滞效应进行了系统研究,在数值分析和模型试验的基础上,进行对比。

本书通过能量变分法和比拟杆法对箱形梁剪力滞效应进行了分析,提出在压弯荷载作用下,单索面斜拉桥箱形梁截面受力复杂、箱形梁截面剪力滞系数与弯矩和轴力的比值有关。依据相似理论,对单索面预应力混凝土斜拉桥箱形梁剪力滞效应进行全桥施工阶段受力情况全过程模拟及成桥后模型试验研究。在模型试验的基础上,用大型有限元软件对富民桥进行全桥三维有限元分析,研究施工过程中结构自重、斜拉索索力、施加挂篮等荷载作用下的箱形梁截面应力特性及剪力滞效应。对比模型试验结果及数值计算结果,提出在单索面斜拉桥成桥阶段分析中,采用规范规定的有效翼缘宽度的取值来考虑箱形梁剪力滞效应的平面杆系分析方法是合理的,数值分析结果是可靠的;确定了施工阶

段张拉索力时，拉索张拉区域剪力滞效应明显、远离拉索作用点过渡为普通弯曲箱形梁腹板与翼缘交界处剪力滞突出的特点。施加挂篮荷载时，箱形梁截面产生负剪力滞效应。通过数值分析，确认了单索面斜拉桥施工阶段平面分析中，采用以现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》（JTG D62—2004）有效翼缘宽度取值来考虑箱形梁剪力滞效应的方法存在一定问题，提出了应对不同位置的梁段采用不同的剪力滞系数进行结构分析。

在本书写作的过程中，笔者得到了沈阳市市政工程设计研究院总工王福春和东北大学资源与土木工程学院梁力教授的指导和帮助，两位老师坚实的理论基础和丰富的工程经验让笔者十分敬佩，在此向两位老师表示衷心的感谢。

最后，感谢各位专家在百忙之中对本书的评阅和指正。由于作者水平有限，文中难免存在疏漏和不足之处，希望各位读者不吝指正。

作 者

2018 年 3 月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....              | 1  |
| 1.1 概述 .....                | 1  |
| 1.1.1 混凝土斜拉桥的发展 .....       | 1  |
| 1.1.2 斜拉桥主梁的发展 .....        | 2  |
| 1.2 箱形梁的剪力滞效应 .....         | 3  |
| 1.3 剪力滞效应的研究 .....          | 4  |
| 1.3.1 剪力滞效应问题的提出 .....      | 4  |
| 1.3.2 剪力滞效应问题的国外研究 .....    | 5  |
| 1.3.3 剪力滞效应问题的国内研究 .....    | 7  |
| 1.3.4 剪力滞效应分析方法综述 .....     | 10 |
| 1.4 国内外规范对剪力滞效应的考虑 .....    | 11 |
| 1.4.1 翼缘板有效分布宽度的定义 .....    | 11 |
| 1.4.2 德国规范关于有效翼缘宽度的规定 ..... | 12 |
| 1.4.3 美国规范关于有效翼缘宽度的规定 ..... | 15 |
| 1.4.4 英国规范关于有效翼缘宽度的规定 ..... | 15 |
| 1.4.5 日本规范关于有效翼缘宽度的规定 ..... | 20 |
| 1.4.6 中国规范关于有效翼缘宽度的规定 ..... | 20 |
| 1.5 工程背景 .....              | 23 |
| 1.6 主要研究内容 .....            | 25 |
| 第 2 章 箱形梁剪力滞效应的理论分析方法 ..... | 26 |
| 2.1 能量变分法求解箱形梁剪力滞效应 .....   | 26 |
| 2.1.1 剪力滞控制微分方程与解析解 .....   | 26 |

|            |                                    |           |
|------------|------------------------------------|-----------|
| 2.1.2      | 静定梁的剪力滞效应分析                        | 32        |
| 2.2        | 多杆比拟法求解剪力滞效应                       | 36        |
| 2.2.1      | 比拟杆法的基本思想                          | 36        |
| 2.2.2      | 微分方程的建立与求解                         | 38        |
| 2.2.3      | 静定梁的剪力滞效应分析                        | 41        |
| 2.3        | 斜拉桥箱形梁的剪力滞分析方法                     | 42        |
| 2.3.1      | 压弯荷载作用下的剪力滞分析方法                    | 42        |
| 2.3.2      | 斜拉桥箱形梁的剪力滞效应分析方法                   | 43        |
| 2.3.3      | 斜拉桥恒载作用下剪力滞计算示例                    | 45        |
| 2.4        | 本章小结                               | 47        |
| <b>第3章</b> | <b>单索面 P C 斜拉桥箱形梁剪力滞效应试验研究</b>     | <b>49</b> |
| 3.1        | 模型设计及制作                            | 49        |
| 3.1.1      | 模型的设计                              | 49        |
| 3.1.2      | 模型制作及安装                            | 52        |
| 3.1.3      | 加载系统及恒载补偿                          | 53        |
| 3.2        | 模型试验的内容                            | 54        |
| 3.2.1      | 试验荷载工况及测试内容                        | 54        |
| 3.2.2      | 测试系统及测点布置                          | 54        |
| 3.2.3      | 测试仪器                               | 55        |
| 3.3        | 模型试验结果                             | 56        |
| 3.3.1      | 模型试验施工阶段的结果                        | 57        |
| 3.3.2      | 模型试验成桥阶段的结果                        | 68        |
| 3.4        | 本章小结                               | 72        |
| <b>第4章</b> | <b>单索面 P C 斜拉桥施工阶段箱形梁剪力滞效应数值分析</b> | <b>74</b> |
| 4.1        | 有限元基本理论                            | 74        |
| 4.2        | 单索面 P C 斜拉桥有限元分析模型                 | 76        |
| 4.2.1      | 箱形梁的模拟                             | 76        |
| 4.2.2      | 拉索的模拟                              | 79        |
| 4.2.3      | 主塔的模拟                              | 80        |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 4.3   | 单索面 P C 斜拉桥有限元分析模型的建立 ..... | 80  |
| 4.3.1 | 主要材料及力学指标 .....             | 80  |
| 4.3.2 | 有限元模型的假定 .....              | 81  |
| 4.3.3 | 施工阶段空间有限元计算模型 .....         | 81  |
| 4.4   | 施工阶段空间有限元计算结果与分析 .....      | 84  |
| 4.4.1 | 工况 1 有限元计算结果及分析 .....       | 84  |
| 4.4.2 | 工况 2 有限元计算结果及分析 .....       | 90  |
| 4.4.3 | 工况 3 有限元计算结果及分析 .....       | 93  |
| 4.4.4 | 工况 4 有限元计算结果及分析 .....       | 97  |
| 4.4.5 | 工况 5 有限元计算结果及分析 .....       | 97  |
| 4.5   | 施工阶段结果对比 .....              | 102 |
| 4.5.1 | 施工阶段截面剪力滞系数结果对比 .....       | 102 |
| 4.5.2 | 施工阶段截面应力数值结果对比 .....        | 105 |
| 4.6   | 本章小结 .....                  | 110 |

## 第 5 章 单索面 P C 斜拉桥成桥阶段箱形梁剪力滞效应数值分析

|       |                                 |     |
|-------|---------------------------------|-----|
|       | .....                           | 112 |
| 5.1   | 汽车荷载效应计算理论 .....                | 112 |
| 5.2   | 单索面 P C 斜拉桥成桥阶段有限元分析模型的建立 ..... | 114 |
| 5.3   | 成桥阶段空间有限元计算结果与分析 .....          | 117 |
| 5.3.1 | 成桥阶段均布活载作用下有限元计算结果 .....        | 117 |
| 5.3.2 | 成桥阶段偏载作用下有限元计算结果 .....          | 121 |
| 5.3.3 | 成桥阶段有限元计算结果分析 .....             | 122 |
| 5.4   | 成桥阶段结果对比 .....                  | 124 |
| 5.4.1 | 成桥阶段截面剪力滞系数结果对比 .....           | 124 |
| 5.4.2 | 成桥阶段截面应力数值结果对比 .....            | 125 |
| 5.5   | 模型试验结果与有限元结果误差分析 .....          | 127 |
| 5.6   | 本章小结 .....                      | 128 |

## 第 6 章 单索面 P C 斜拉桥箱形梁剪力滞效应分布规律及规范建议

|     |                             |     |
|-----|-----------------------------|-----|
|     | .....                       | 130 |
| 6.1 | 单索面 P C 斜拉桥箱形梁剪力滞系数讨论 ..... | 130 |



|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 6.2 单索面 P C 斜拉桥箱形梁剪力滞效应沿纵桥向有限元分析 ..... | 133 |
| 6.2.1 工况 1 剪力滞效应沿纵桥向有限元结果及分析 .....     | 134 |
| 6.2.2 工况 2 剪力滞效应沿纵桥向有限元结果及分析 .....     | 136 |
| 6.2.3 工况 3 剪力滞效应沿纵桥向有限元结果及分析 .....     | 136 |
| 6.2.4 工况 4 剪力滞效应沿纵桥向有限元结果及分析 .....     | 139 |
| 6.2.5 工况 5 剪力滞效应沿纵桥向有限元结果及分析 .....     | 141 |
| 6.3 单索面 P C 斜拉桥箱形梁剪力滞效应沿纵桥向变化规律 .....  | 142 |
| 6.3.1 理论结果与有限元结果对比 .....               | 142 |
| 6.3.2 箱形梁剪力滞效应沿纵桥向的变化规律 .....          | 144 |
| 6.4 本章小结 .....                         | 146 |
| 第 7 章 结论与展望 .....                      | 147 |
| 参考文献 .....                             | 149 |

# 第1章 绪论

## 1.1 概述

### 1.1.1 混凝土斜拉桥的发展

现代的斜拉桥是由桥塔、斜拉索和主梁构成的组合结构体系，它是一种支承体系以斜拉索受拉、桥塔受压，桥面体系以主梁受压、受弯为主的桥梁。斜拉桥以跨越能力强、结构新颖而成为现代桥梁工程中发展最快、最有竞争力的桥型之一。

1962年建成的委内瑞拉 Maracaibo 桥被认为是世界上第一座混凝土斜拉桥。之后修造的斜拉桥特征是拉索为稀索体系，混凝土梁以受弯为主，结果发现稀索体系的索距太大，主梁必须很高、强度很大才能满足结构的设计要求，于是便从稀索体系转向密索体系，从而发展到第二代的密索体系斜拉桥，主梁以轻型化为主。

1978年在美国建成了主跨 299m 的帕斯卡 - 肯尼斯克桥，为密索、双索面斜拉桥的开端。1991年建成的挪威 Skarnsundet 桥主跨 530m，主梁截面为三角形双室，它是目前世界上跨径最大的双塔 PC 斜拉桥。

我国第一座斜拉桥是四川云阳桥，建于 1975 年，是一座跨径 76m 的双塔双索面混凝土斜拉桥。自此我国在吸收国外先进技术和经验的基础上，斜拉桥的建设和技术有了长足发展。铜陵长江斜拉大桥在竣工时成为世界上最大的肋板式混凝土斜拉桥。之后建成的岳阳洞庭湖大桥、宜昌夷陵长江大桥则先后摘取了世界三塔混凝土斜拉桥第一的桂冠。2002 年世界上最大的肋板式混凝土斜拉桥荆州长江大桥建成，同年世界上最大的独塔混凝土斜拉桥广东金马大桥建成通车。目前国内主跨 300m 以上的混凝土双塔斜拉桥有 25 座，主跨 150m 以上的混凝土独塔斜拉桥有 18 座，可见我国在世界混凝土斜拉桥的建设领域，

预应力混凝土斜拉桥之所以取得如此大的发展,是因为与叠合梁斜拉桥、钢斜拉桥相比,具有以下优点:

② 在混凝土斜拉桥中,混凝土主要承受压力和弯矩,而索承受拉力,两种材料都最大限度地发挥了各自的优势,从而使整个结构最为合理而经济。

④ 混凝土可以根据需要做成任何的流线型截面,同时它的抗湿性能好,后期的养护工作比钢材便宜和简单。

### 1.1.2 斜拉桥主梁的发展

双主肋截面是由边主梁与桥面板结合而成的，每隔一定间距加设横隔梁增加结构的刚度，两个主肋用于拉索锚固及承重，如图 1.1 所示。双主肋截面主梁构造简单，施工较方便，可节省工期，但是只适用于双索面漂浮体系斜拉桥。



**Fig. 1.1 Bilateral rib section ( Unit: m)**

此2为试读,需要完整PDF请访问: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

能,适用于风载较大的双索面斜拉桥体系。

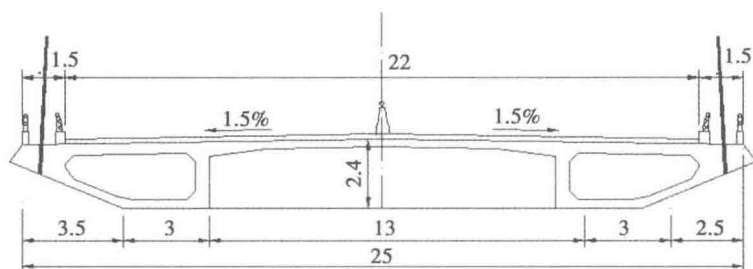


图 1.2 双边箱截面(单位: m)

Fig. 1.2 Bilateral box section( Unit: m)

闭合箱形截面是现代斜拉桥中经常采用的截面形式,如图 1.3 所示。它的抗扭和抗弯刚度大,能适应单索面、双索面不同斜索的布置。箱形梁中的斜腹板虽然施工略为困难,但美观和抗风方面均优于垂直腹板,此外能减少桥墩、桥台宽度,降低材料用量。

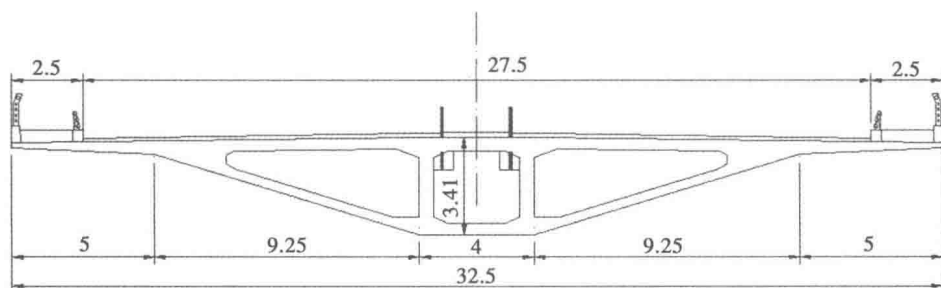


图 1.3 箱形截面(单位: m)

Fig. 1.3 Box section( Unit: m)

随着斜拉桥的发展,其主梁也不断发展。随着密索斜拉桥的出现,梁高不断降低,主梁越来越纤细,主梁的高度几乎不受跨度影响,但它必须有足够的刚度,能抵抗由于拉索的巨大压力而发生的压屈及限制集中荷载作用下的局部变形<sup>[1]</sup>。

## 1.2 箱形梁的剪力滞效应

在纵向弯曲的作用下,箱形梁弯曲法向正应力在上、下缘间的传递是通过

腹板的剪切变形来实现的。剪力流在腹板与上、下缘的交界处达到最大。向翼缘板传递的过程中,由于上、下缘的剪切变形,所以向板内传递的剪力流会逐渐减小。因此剪切变形在上、下缘的分布是不均匀的,从而使弯曲的法向正应力在横向分布呈曲线,如图 1.4 所示。这种腹板的剪力流向翼缘板传递滞后而引起翼缘板的法向正应力不均匀分布的现象,称为剪力滞后效应。对腹板与翼缘板交界处的纵向正应力大于按照初等梁理论计算的正应力时,为正剪力滞后效应,如图 1.4(a)所示,否则为负剪力滞后效应,如图 1.4(b)所示<sup>[2-3]</sup>。

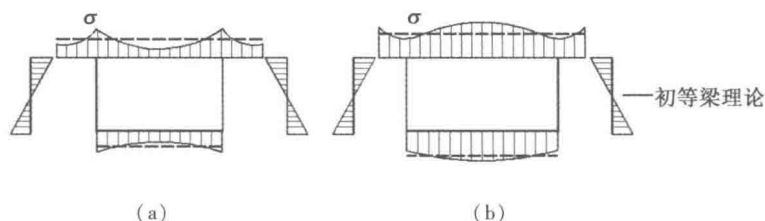


图 1.4 箱形梁截面的正应力分布

Fig. 1.4 The stress distribution of the box beam section

为了方便了解箱形梁剪力滞的影响程度,工程上引入了剪力滞系数  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{\text{考虑剪切变形求得的法向应力}}{\text{按照初等梁理论求得的法向应力}} \quad (1.1)$$

式中,  $\lambda$  是反应剪力滞效应大小的指标,用  $\lambda_e$  表示翼板与腹板交界处的剪力滞系数,用  $\lambda_c$  表示翼板中点处的剪力滞系数。当  $\lambda_e > 1$  (或  $\lambda_c < 1$ ) 时,称之为正剪力滞效应,反之,称之为负剪力滞效应。

对于复杂的结构,可根据上缘和下缘的应力值积分除以上缘和下缘的宽度,得到一个近似于初等梁理论求得的正应力,再运用这个平均值去除各点的实际应力值,即得各点的剪力滞系数。剪力滞系数既可以描述梁纵向正应力分布的不均匀情况,也可以反映出工程中所关心的某点应力情况。

## 1.3 剪力滞效应的研究

### 1.3.1 剪力滞效应问题的提出

在恒载和活载作用下,斜拉桥主梁处于一种压弯荷载共同作用的受力状态。箱形主梁宽而薄的翼缘在压弯荷载共同作用下,其正应力分布越复杂,剪

力滞效应越严重。考虑剪力滞效应后的梁应力峰值通常大于按照初等梁理论计算的梁应力值。在实际计算过程中如未考虑剪力滞影响,则会低估箱形梁结构产生的应力状态,高估主梁的承载能力,造成结构的不安全性。

目前工程中采用有效宽度代替翼缘实际宽度的方法考虑剪力滞对箱形梁的影响。我国新的桥梁规范中补充了对简支梁、连续梁和伸臂梁结构有效宽度的计算方法,但没有对斜拉桥设计做出规定。斜拉桥主梁的剪力滞效应与受弯为主的梁桥有很大不同,不仅要考虑轴力作用下的应力不均匀分布,还须考虑斜拉索的布置方式和刚度、施工方案、荷载布置等因素的影响。特别是对于单索面PC斜拉桥索力产生的轴向力较大,且较集中在桥面中心区域,主梁正应力的分布很复杂。因此,开展单索面PC斜拉桥主梁剪力滞效应的研究,将有重要的现实意义。

### 1.3.2 剪力滞效应问题的国外研究

剪力滞效应问题是桥梁工程的经典问题。根据可以查阅的文献,剪力滞问题最早由Karman提出。1924年,Karman以翼板宽度无限大为假定,应用最小势能原理推出余弦荷载作用下连续梁的有效分布宽度<sup>[4]</sup>。箱形梁的剪力滞理论于1946年最早由Reissner提出。在研究单箱室箱形梁时,Reissner应用最小势能原理推出便于手算的剪力滞控制微分方程和边界条件公式,求得在简支、悬臂及固结条件下均布荷载作用时剪力滞系数的理论解<sup>[5]</sup>。

在土木工程中,早期主要是对单根I形、T形钢梁以及钢混组合截面剪力滞效应的研究<sup>[6]</sup>。20世纪60年代以来,箱形主梁在桥梁中得到广泛的应用,而且箱形主梁的腹板间距越来越大,这样箱形主梁的剪力滞影响也越来越显著,不少学者应用不同的方法研究箱形主梁的剪力滞效应<sup>[7]</sup>。起初是对钢箱形梁或较宽矩形钢箱形梁的研究<sup>[8]</sup>,分析时主要采用折板理论<sup>[9]</sup>。Malcolm和Redwood于1970年对钢箱形梁进行了一系列理论分析和模型试验,结果发现剪力滞效应对主梁的影响与截面纵向的位置有关<sup>[10]</sup>。Dalen和Narasimham于1976年利用折板理论分析了均布荷载作用下箱形截面纵向正应力的分布情况,其结论适用于不同跨径不同横截面的主梁在均布荷载作用下的剪力滞分析<sup>[11]</sup>。Evans和Taherian于1977年提出了比拟杆法,该方法将箱形梁各翼缘板看成主杆和薄膜的协调变形组合体系<sup>[12]</sup>。Evans和Kristek于1984年还提出了用比拟杆法对主梁翼缘板进行分析时手算的方法<sup>[13]</sup>。正因为比拟杆法可以手算的特点,它在其后几十年里成为分析剪力滞常用的方法。Alexander和Song于1990

年利用弹性理论对箱形梁、I 形和 T 形梁的剪力滞进行分析,利用数值分析法得到了实用的计算公式<sup>[14-15]</sup>。Hani 和 Julio 于 2005 年通过协调变形法对闭口和开口组合截面梁的剪力滞分别进行了分析,并通过实验进一步验证了结果<sup>[16]</sup>。在箱形梁剪力滞效应的分析中,以 Reissner 理论为基本原理的能量变分法应用最为广泛。在它之后,各国学者对这种方法不断改进,并进行实验加以验证,扩展了能量变分法的适用范围。日本的小松、近藤等于 1962 年在 Reissner 理论的基础上,分别研究了矩形、II 形和 T 形截面钢梁的负剪力滞和剪力滞现象,得到了钢箱形梁桥有效分布宽度计算方法及其实用的图表。Dezi 和 Mentrasti 于 1985 年以三个不同的位移函数表示翼板不同位置的剪力滞变形,进一步求得了箱形梁纵向正应力的解析解,并依据弹性平衡方程得到翼板的剪切应力和横向应力的近似解<sup>[17]</sup>。随着计算机技术的发展,有限元法和有限差分法等数值方法已经成为复杂力学问题研究的重要方法,并且已被广泛地应用于剪力滞的计算分析中。Razaqpur 和 Li 研究了有限梁单元法,与一般梁单元不同的是计算时考虑了单室或多室截面的畸变翘曲、畸变、扭转翘曲以及剪力滞效应,用有限梁单元计算分析的结果与板壳单元计算分析的结果十分吻合<sup>[18]</sup>。Alghamdi 和 Ali 于 1999 年研究了双箱室钢梁的应力分布,并进行了有限元分析,对边界条件、结构尺寸、作用位置和荷载类型等参数变量进行了详细的分析<sup>[19]</sup>。Lee 和 Wu 于 2000 年利用有限元分析法对箱形梁一些关键几何参数对剪力滞的影响进行了全面的分析<sup>[20]</sup>。Dezi 等于 2001 年采用有限差分法对混凝土徐变给组合梁的剪力滞带来的影响进行了分析<sup>[21]</sup>。Lertsima 等于 2004—2006 年对连续梁、简支梁的剪力滞效应进行了有限元分析,通过与实验结果的对比,得到不同的荷载作用下挠度和剪力滞系数的实用计算公式<sup>[22-24]</sup>。

最近 20~30 年,剪力滞的研究不断扩展。Kristek 等于 1987 年对混凝土梁的徐变进行了分析,结果表明在考虑剪力滞效应的情况下,施工过程的主梁剪力滞对于结构的长期变形有很大的影响<sup>[25]</sup>。Tesar 于 1996 年将剪力滞效应对主梁弯曲和扭转的影响进行了分析<sup>[26]</sup>。最近对钢-混组合形式梁研究较多,Chiewanichakorn 等于 2004 年分析了当混凝土板厚度发生变化时剪力滞效应的影响,提出了钢-混组合截面梁的有效分布宽度的定义和计算公式,并利用有限元分析和模型实验进行了验证<sup>[27]</sup>;2005 年又对简支梁和三跨连续梁的有限元模型进行了参数分析,对比实验结果,提出了有效分布宽度的经验公式<sup>[28]</sup>。Dezi 等于 2006 年将剪力滞效应、剪力键滑动以及混凝土徐变效应计入计算模型中,把结果与板壳有限元的计算结果进行了对比和验证<sup>[29]</sup>。

在剪力滞效应的研究中,负剪力滞效应也引起了许多学者的兴趣。关于负剪力滞效应的研究可追溯到1982年。Foutch 和 Chang 在研究薄壁箱形梁剪力滞效应和剪切变形的静力、动力反应时发现了与以往剪力滞效应相反的应力分布,他们用能量变分法和有限单元法分析了不同剪力作用下的矩形箱形梁,结果表明当沿纵向剪力不均匀作用时截面存在负剪力滞,并指出负剪力滞与荷载作用方式有密切的联系<sup>[30]</sup>。Chang 和 Zheng 于1987年对产生负剪力滞的原因进行了分析,提出了在不同荷载和不同边界条件情况下,剪力滞对主梁的影响是不同的<sup>[31]</sup>。Kristek 和 Studnicka 于1991年应用了协调分析法对类似悬臂梁和悬臂梁的高层建筑物负剪力滞进行了分析,对轴向力作用下构件内部不出现剪力滞的原因做了分析<sup>[32]</sup>。Lee, Yoo 和 Yoon 于2002年对不同类型荷载作用下的悬臂梁做了数值分析计算,对负剪力滞产生的机理和本质进行了研究<sup>[33]</sup>。

### 1.3.3 剪力滞效应问题的国内研究

20世纪80年代初,我国许多学者结合数值分析法从能量变分法的角度开展了对剪力滞的研究。郭金琼等于1983年以翼板的纵向位移函数沿着横向3次或4次抛物线为假定,应用了 Reissner 能量变分法分析了带伸臂的单室箱形梁,与有限元分析的计算结果做了对比,结果表明3次抛物线的假定是较符合实际情况的<sup>[34]</sup>。钱寅泉等于1989年将单箱室箱形梁的翘曲位移函数用余弦函数表示,计入轴力平衡,得到上下缘不对称时箱形梁结构的剪力滞系数和正应力的计算公式<sup>[35]</sup>。Zhang 等于1988年研究了采用折线的预应力布置形式对箱形梁剪力滞的影响<sup>[36]</sup>,而后 Zhang 于2004年进一步分析了预应力钢束采用二次抛物线的布置形式及重力荷载对简支梁剪力滞的影响<sup>[37]</sup>。罗旗帜多年来致力于研究剪力滞效应,他与程翔云于1991年对压弯荷载作用下斜拉桥的剪力滞进行了分析,得到了关于斜拉桥剪力滞系数的计算公式<sup>[38]</sup>。同年,罗旗帜把有限元法和能量变分法相结合,提出了有限段法,此法可分析不同跨度的变截面连续箱形梁剪力滞效应<sup>[39]</sup>。2000年, Luo 等将 Reissner 理论引入弯桥,对薄壁弯桥的剪力滞进行了分析<sup>[40]</sup>。2001年, Luo 等利用有限段法对负剪力滞进行了分析,提出了负剪力滞不仅在连续梁和悬臂梁中存在,在变截面简支梁中也有可能存在<sup>[41]</sup>。2002年, Luo 等对不同荷载、不同约束条件的箱形梁进行分析,与实验结果对比,表明有限段法的计算结果可靠<sup>[42]</sup>。同时学者韦成龙等于2000年假定箱形梁上下缘及伸臂板为不同的翘曲位移函数,计入轴力平衡,建立了薄壁曲线箱形梁的一维有限元方程,将剪力滞效应的影响拓展到曲线形箱



形梁的计算中<sup>[43]</sup>。吴亚平等以能量变分法为基础,对箱形梁的剪力滞进行了比较系统的分析,得到了多室箱形梁剪力滞效应的计算公式,同时得到了有效宽度的计算公式;在能量变分法中考虑了材料的弹塑性关系,对弯曲状态下的钢箱形梁弹塑性极限强度进行了研究;在能量变分法中考虑剪切变形,推导出变截面连续梁、简支梁的有限元公式;结合了哈密顿原理,分析剪力滞对简支箱形梁的自振特性影响;在复合材料箱形梁和曲线梁分析中,计入翼板剪力滞的翘曲位移,得到了各自模型梁单元的矩阵方程<sup>[44-49]</sup>。

国内学者在研究中也应用了其他理论。程翔云等于1984年利用比拟杆法理论,对等效翼板面积、板厚和各比拟杆面积的计算公式作了改进,使之适用于带双伸臂翼缘截面梁的分析<sup>[50]</sup>。程翔云和项贻强于1987年制作了两个梯形截面箱形梁的有机玻璃模型,实验结果表明比拟杆法分析剪力滞效应是可行的<sup>[51]</sup>。唐怀平等于2001年利用荷载等效分解法和三杆比拟法分析了在垂直荷载作用下大跨度连续刚构产生剪力滞效应的机理<sup>[52]</sup>。Luo等在2004年根据薄板理论分别建立上下缘、伸臂翼缘板和腹板的平衡方程,用该方法得到所有板块的剪应力、纵向和横向应力<sup>[53]</sup>。

在数值分析方面,有限单元法在理论研究中的应用已经越来越广。曹国辉和方志等于2003年利用此法对影响箱形梁剪力滞的一些几何参数进行了分析对比<sup>[54]</sup>。刘永健和周绪红等将三维实体单元、梁及板壳相结合,对长沙市洪山庙大桥的塔梁根部区域进行了空间有限元计算分析,结果表明徐变对主梁的应力分布影响明显,行车道板的剪力滞效应显著<sup>[55]</sup>。汪劲丰、项贻强对独塔单索面斜拉桥的主梁进行了研究,提出斜拉桥主梁的剪力滞效应是十分复杂的,荷载横向作用位置和荷载作用类型对其都有影响<sup>[56]</sup>。

在理论研究的同时,国内学者还进行了各种模型试验。同济大学通过变截面悬臂梁的模型试验进一步验证了能量变分法的正确性。湖南大学的模型试验研究了横向和轴向荷载共同作用下的剪力滞效应,此后开始了对大跨径桥梁的试验研究。钱塘江铜陵长江公路大桥、二桥和三桥分别由同济大学、湖南大学进行了1:70, 1:40, 1:50有机玻璃的模型试验<sup>[2,57]</sup>。对钢筋混凝土连续梁桥,湖南大学制作了1:6混凝土的模型进行试验。对宜宾中坝金沙江斜拉桥的主梁剪力滞效应,西南交通大学制作了1:5混凝土的模型进行试验研究<sup>[58]</sup>。模型试验的结果去除了应用理论分析时各种假定带来的误差,对理论分析的结果验证起到了一定的作用。

随着我国修建斜拉桥的数量越来越多,更多的学者开始关注斜拉桥主梁剪