



交通运输行业博士文库

*Research on Analysis Theory & Application of
Shear Lag Effect for Concrete Box Girders*

混凝土箱梁剪力滞效应的 分析理论与应用研究

蔺鹏臻◎著



人民交通出版社
China Communications Press

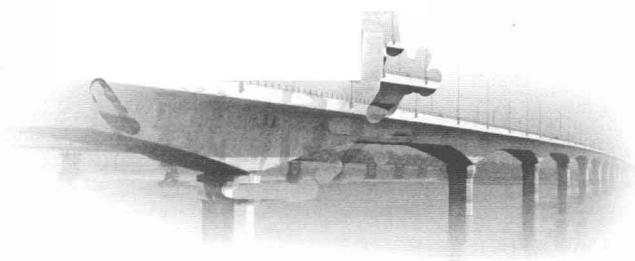


交通运输行业博士文库

*Research on Analysis Theory & Application of
Shear Lag Effect for Concrete Box Girders*

混凝土箱梁剪力滞效应的 分析理论与应用研究

蔺鹏臻◎著



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

混凝土箱梁是目前桥梁最常用的主梁结构形式之一。本书针对常规构造特征的混凝土箱梁,从箱梁剪力滞效应分析的通用变分解、翼板翘曲位移函数的定义方法、翼板厚度变化对剪力滞效应的影响规律、预应力等效荷载引起的剪力滞效应和考虑剪力滞效应的弯曲变形计算方法等几个方面,对箱梁剪力滞效应分析计算中的核心问题提出了理论和实用的解答方法。

本书适合于桥梁工程领域的科研、设计人员和高校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土箱梁剪力滞效应的分析理论与应用研究 / 蔺鹏臻著. — 北京:人民交通出版社, 2012.1
ISBN 978-7-114-09501-6

I. ①混… II. ①蔺… 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(2011)第 232916 号

书 名:混凝土箱梁剪力滞效应的分析理论与应用研究

著 作 者:蔺鹏臻

责任编辑:张征宇 郭红蕊

出版发行:人民交通出版社

地 址:(100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址:<http://www.ccpress.com.cn>

销售电话:(010)59757969,59757973

总 经 销:人民交通出版社发行部

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市密东印刷有限公司

开 本:880×1230 1/32

印 张:4.25

字 数:111 千

版 次:2012 年 1 月 第 1 版

印 次:2012 年 1 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-09501-6

定 价:35.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

箱梁是目前大跨度桥梁常见的主梁截面形式。箱梁在竖向弯曲时,由于翼板(顶、底板和悬臂板)在其平面内的剪切变形引起翼板纵向应力沿横向分布不均匀的现象,称为剪力滞后效应(简称剪力滞效应),它是箱梁薄壁受力的最典型特征之一。由于材料强度的提高和大交通流量桥梁建设的需要,长悬臂板、大肋间距的宽体箱梁(特别是混凝土箱梁)越来越多,剪力滞效应将尤为突出。剪力滞效应对箱梁受力既有应力上的影响,也有对挠曲变形的影响。如果忽略剪力滞效应,将可能导致结构的安全性和耐久性问题。20世纪70年代欧洲发生的4起箱梁失稳或破坏事故,以及我国发生的个别桥梁翼板开裂问题等,都是剪力滞效应考虑不周的典型表现。

兰州交通大学(原兰州铁道学院)在箱梁理论研究领域具有悠久的历史。早在20世纪70年代,英国剑桥大学博士毕业的胡春农教授就开始了箱梁理论的研究。原兰州交通大学黄剑源、唐家祥等教授均开展了箱梁结构理论的深入研究,出版了国内第一部专门研究箱梁的专著——《箱梁的扭转分析》。此后,周世军、杨子江、吴亚平、刘世忠和张元海等教授长期持续性开展箱梁结构理论研究,取得了丰硕的研究成果。

作为涉足箱梁研究的晚辈,本人在从事研究工作之初备感压力,顾虑最多的是仅凭自己的能力可能连本校前辈们研究的领域都无法超越,更别说赶超更大范围内的研究同行,只要能在该领域有些许的突破就备感欣慰了。所以,最终选定箱梁的剪力滞效应作为自己的研究重点。研究的出发点主要围绕从力学的本质上揭

示剪力滞问题、从工程实际的角度反映剪力滞规律和从实践应用的角度计算剪力滞效应。鉴于剪力滞效应的研究历史已久,因此想取得大范围的突破并非易事。但本书在研究的出发点、研究的思路和研究的结果等方面对相关科学研究和工程实践都具有一定借鉴意义。

在本书出版之际,感谢兰州交通大学领导和同事们的关心与帮助,感谢人民交通出版社“交通运输行业博士文库”的支持,同时还要感谢以下项目的资助:

国家自然科学基金(51168030)

甘肃省青年科技基金(1007RJYA008)

教育部长江学者和创新团队发展计划——“西北干旱地区材料与结构耐久性研究”

兰州交通大学“青蓝”人才工程基金计划

作者

2011.12.1

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 本书的主要研究工作	15
第 2 章 翼板厚度沿横向变化箱梁的剪力滞效应通用解研究	17
2.1 基于广义截面特性的箱梁剪力滞效应通用解	18
2.2 简支梁竖向荷载作用下的剪力滞效应	23
2.3 简支梁集中弯矩作用下的剪力滞效应	30
2.4 悬臂箱梁竖向荷载和集中弯矩作用下的剪力滞效应	35
2.5 结论	40
第 3 章 基于剪切变形规律的剪力滞翘曲位移函数定义研究	42
3.1 单室箱梁竖向弯曲下的剪力流分布规律	43
3.2 基于剪力流分布规律的剪力滞翘曲位移函数	45
3.3 剪力滞翘曲位移函数应用算例	47
3.4 剪力滞翘曲位移函数对一般箱梁的适用性研究	49
3.5 结论	51
第 4 章 由截面中性轴与形心轴重合假定引起的附加轴力研究	52
4.1 截面的附加轴力和附加轴向应力	52
4.2 典型结构的附加轴力表达	55
4.3 典型结构附加轴向应力比研究	56
4.4 混凝土箱梁附加轴向应力比的统计研究	59

4.5	结论	61
第5章	翼板厚度变化对箱梁剪力滞效应的影响研究	63
5.1	翼板厚度变化对截面特性的影响研究	63
5.2	考虑翼板厚度变化的箱梁算例验证	67
5.3	翼板厚度变化对正剪力滞效应的影响研究	70
5.4	翼板厚度变化对负剪力滞效应的影响研究	79
5.5	翼板厚度变化对剪力滞附加挠度的影响研究	83
5.6	结论	84
第6章	混凝土箱梁预应力引起的剪力滞效应研究	86
6.1	静定箱梁预应力引起的剪力滞效应	86
6.2	超静定箱梁预应力引起的剪力滞效应	95
6.3	复杂配束预应力剪力滞效应计算的叠加法	101
6.4	结论	104
第7章	考虑剪力滞效应的混凝土箱梁挠度计算方法研究	105
7.1	剪力滞效应对箱梁曲率的影响	105
7.2	箱梁变形计算的修正方法	107
7.3	典型箱梁结构的挠度分析	112
7.4	结论	117
第8章	结论与展望	118
8.1	主要研究结果	118
8.2	研究展望	120
	参考文献	122

第1章 绪论

1.1 研究背景

箱梁由于具有抗弯和抗扭刚度大、截面整体性好和施工适应性强等优点,因而被广泛应用于简支梁、连续梁、连续刚构和斜拉桥等桥梁结构中。随着大流量交通工程的快速发展,长悬臂板、大肋间距的单箱单室宽体箱梁被越来越多地采用。由于箱梁是由梁肋(腹板)、桥面板(顶板)和下翼板(底板)构成的空心薄壁截面,因此在竖向弯曲时,箱梁上、下翼板由于自身面内剪切变形的影响,会使翼板的纵向正应力沿翼板宽度分布不均匀,这种现象就称为剪力滞效应。剪力滞效应由于改变了纵向应力的横向分布规律,横截面同一高度的纵向应力不再如初等梁理论计算的那样相等,而箱梁实际纵向应力与该点按照初等梁理论计算应力的比值被定义为剪力滞系数,以此反映剪力滞效应的大小。目前,高速公路、高速铁路、城市立交和高架桥中宽体箱梁应用得越来越多,剪力滞效应尤为突出,对混凝土箱梁进行考虑剪力滞效应的强度和刚度分析,是设计时需特别考虑的问题之一。

自20世纪20年代以来,国内外学者通过解析、数值分析和试验等方法对剪力滞效应进行了大量的研究,其中研究方法以能量变分法最为常用。然而,既有的以能量变分法为基础的剪力滞效应研究中,均以翼板等厚度(或将变厚度近似为等厚度)为研究对象,研究方法和结论尚不能完全应用于翼板厚度沿横向变化的混凝土箱梁。

对于混凝土箱梁,考虑到配筋及截面应力过渡的需要,箱梁顶、底板和悬臂板均为沿截面宽度方向变厚度,通常越靠近腹板越厚,而顶、底板中部和悬臂端部越薄。目前,能量变分解法和有限梁段法由于在剪力滞效应基础微分方程建立时均采用等厚度翼板的近似截面特性,研究方法不适用于翼板变厚度的混凝土箱梁。因此,针对常见的翼板沿横向变厚度的混凝土箱梁,通过定义合理的反映翼板厚度变化的截面参数,建立可以考虑翼板变厚度的剪力滞效应通用分析方法是必要的。同时,既有研究在建立剪力滞效应基础微分方程时,剪力滞翘曲位移函数的定义也主要沿用 Reissner 针对无悬臂板矩形箱梁的抛物线或余弦函数,剪力滞翘曲位移函数并不能很好地反映剪力滞效应的力学本质。

由于大跨度混凝土箱梁均要配置预应力钢束以抵抗外荷载弯矩,根据预应力等效荷载理论,偏心锚固和偏心布置的预应力钢束必然引起箱梁的弯曲变形,进而产生剪力滞效应。目前,既有混凝土箱梁的理论研究和设计规范中,仍然主要研究预应力等效荷载产生的初等梁理论应力和变形。对于偏心布置的预应力引起的箱梁剪力滞效应研究较少,尤其是针对偏心锚固的预应力引起的剪力滞效应研究尚属空白。因此,针对混凝土箱梁常见的预应力效应,建立剪力滞效应的理论分析方法,对完善箱梁剪力滞效应的研究理论有重要意义。

在混凝土箱梁设计实践中,国内外规范主要通过承载力设计中引入有效翼缘分布宽度对翼板进行折减,考虑剪力滞效应引起的局部应力较大问题。对于剪力滞效应对结构刚度的影响尚没有计入。将箱梁剪力滞效应对变形的影响计入结构刚度设计公式不仅能够全面考虑剪力滞效应,同时也可完善箱梁的设计理论体系。

本书将针对混凝土箱梁剪力滞效应研究的突出问题,对混凝土箱梁剪力滞效应的分析理论进行系统研究,为混凝土箱梁的研究和设计提供理论借鉴。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 箱梁剪力滞效应的研究方法

箱梁剪力滞效应的理论研究方法主要分为两类:解析法和数值分析法。解析法主要有调谐函数法、正交异性板法、折板法、比拟杆法和能量变分法;数值分析法主要有有限单元法、有限条法、有限差分法和有限梁段法等。

1) 调谐函数法

调谐函数法是以肋板结构为基础,取肋板和翼板为隔离体,肋板采用初等梁理论分析,而翼板采用平面应力分析,用逆解法求解应力函数,然后根据肋板和翼板之间的静力学条件和变形条件,建立方程组,求出未知数,从而求得翼板的应力和挠度解。该方法最早在 1924 年由 Karman^[1]在解决无限宽翼缘板的应力分布时提出,并同时提出了“有效分布宽度”的概念。由于其分析过程比较繁复,在实际中应用较少。

2) 正交异性板法

正交异性板法是把肋板结构比拟成正交异性板,其肋的面积假定均摊在整个板上,然后应用弹性薄板理论,从边界条件出发,导出肋板结构的应力和挠度公式,获得剪力滞问题的解。该方法早在 1938 年由 Reissner^[2]在分析上、下板为波纹状的悬臂矩形箱梁的剪力滞效应时提出。该方法在分析箱梁时考虑的是整个箱梁而非单个板条,并且所施加的荷载为傅里叶级数,因此计算比较繁琐而使用受到限制。

3) 折板理论法

折板理论法是将箱梁离散为若干矩形板,以弹性平面应力理论和板的弯曲理论为基础,利用各板结合处的变形和静力学条件建立方程组,以矩阵形式进行计算。弹性折板理论首先是由 Goldberg 和 Leve 等^[3]提出,并由 Defries - skene 和 Scordelis^[4]写成矩阵

形式,并拓展为计算机分析。Van Dalen 和 Narasimham^[5]用折板理论对宽矮箱梁的剪力滞问题进行了研究,并指出翼板的宽跨比和梁的边界条件是影响剪力滞效应的主要因素。

4) 比拟杆法

比拟杆法是将处于受弯状态的箱梁结构比拟为只承受轴向力的杆件与只承受剪力的等效薄板的组合体,根据杆与板之间的平衡条件和变形协调条件建立微分方程组;通过加劲杆的内力确定每块翼板的剪力流,并进一步由每块翼板的轴向力得到翼板的纵向应力。比拟杆法最早是 Younger 在航空工程中飞机薄板的构造设计中提出的。此后, Hadji-Argyris^[6]、Evans 和 Taherian^[7,8] 和程翔云等^[9-11] 进行发展后,形成适用于矩形箱梁和 T 梁的完善比拟杆法。

5) 能量变分法

能量变分法是从假定箱梁翼板的纵向位移模式出发,以梁的竖向位移沿梁长的变化率和描述翼板剪力滞的纵向位移差的广义位移函数为未知数,应用最小势能原理建立控制微分方程,从而获得应力和挠度的解析解。能量变分法最早由 Reissner^[12] 于 1946 年提出,他针对无悬臂板的矩形箱梁,引入剪力滞效应的放大系数 U ,构造出了翼板纵向位移沿横向按二次抛物线变化的位移模式(也称为剪力滞翘曲位移函数),应用最小能量原理建立了考虑剪力滞效应的微分方程组;并对承受余弦函数分布荷载的简支梁、承受均布荷载的悬臂梁和承受均布荷载的两端固结梁,获得了梁端位移和应力的表达式。Kuzmanovic 等^[13] 采用 Reissner 方法分析了带对称伸臂的矩形箱梁的剪力滞。郭金琼等^[14,15] 将 Reissner 二次抛物线剪力滞翘曲位移函数改造为三次曲线,分析了带悬臂的矩形箱梁,通过模型试验证明其具有较好分析精度。Dezi^[16]、韦成龙^[17-19]、罗旗帜等^[20-22] 在分析箱梁剪力滞效应时,分别引入顶板、悬臂板和底板的剪切变形最大差函数以定义各翼板的剪力滞翘曲位移函数,通过变分原理建立剪力滞求解的微分方程组,并结合梁段有限元进行梯形箱梁、变高度箱梁和曲线箱梁的剪力滞效应分

析。王继兵^[23]和秦荣等^[24]把样条有限点法与能量变分法相结合,对箱梁底板、顶板及悬臂板分设不同的二次抛物线剪力滞翘曲位移函数,对箱梁沿纵向进行样条离散化,并由三次 B 样条函数构造箱梁位移函数,用变分原理导出箱梁剪力滞效应计算的样条有限点法格式,分析了不同荷载条件下的剪力滞效应。

能量变分法通过建立梁体的微分方程和边界条件获得应力和位移的闭合解,其力学原理和推演过程明晰,是目前广受欢迎的解析求解方法。但不同位移模式的假定对计算结果具有一定的影响,如何合理地选择位移模式还有待进一步研究。

6) 有限单元法

有限单元法计算剪力滞效应主要基于三维板壳和块体理论,建立箱梁结构精细的三维有限元数值分析模型,施加桥梁边界和荷载条件,由后处理获得结构应力和位移结果,并由纵向应力的分布获得评价结构的剪力滞效应。Yamaguchi^[25]、Sa-nguanmanasak^[26]、Lertsima^[27,28]等对简支梁和连续梁结构,通过建立板壳有限元数值分析模型,研究了荷载作用方式、有限元网格大小、荷载类型、箱梁宽跨比、宽高比和板厚比等参数对翼板应力和梁体变形的影响,通过参数拟合获得了应力和变形的多参数计算公式。牛斌等^[28]针对客运专线预应力混凝土箱梁,应用空间 8 节点块体单元建立数值模型,研究二期恒载和活载、不同宽跨比、不同支撑条件、不同翼板和腹板厚度以及不同荷载类型下梁体应力和变形,研究了有效翼缘分布宽度和竖向刚度折减系数。蔺鹏臻等^[30]针对混凝土箱梁,建立了 8 节点块体单元模型,研究了翼板厚度沿横截面变化、翼板加腋等因素对箱梁剪力滞效应的影响;并对鱼腹式钢箱梁建立了板壳有限元模型,研究不同设计荷载下的剪力滞效应^[31,32]。

由于板壳和块体有限元分析结果数据量大、且主要以单元或结点的应力和应求解为结果,不能与现有以梁理论为基础的设计规范有机结合,故分析结果也主要用于宏观掌握结构的受力规律。

7) 有限条法

有限条法是从有限单元法发展出来的一种半解析法,该法由 Cheung^[33]首先提出,它可以看做是有限元法在用最小总势能原理导出未知节点位移参数与外荷载关系的一种特殊形式。与有限单元法相比,有限条法具有简单、计算量小的优点。Cheung 等^[34]用有限条法分析了分离式箱梁和多室箱梁的剪力滞效应并提出了确定其受压翼缘有效宽度的方法。杨允表等^[35]用广义有限条法分析了多室箱梁的剪力滞效应。Amoushahi 等^[36]则应用有限条法预测 I 形、箱形和槽形梁在弯矩和均布荷载下的屈曲荷载。程翔云等^[37]针对变高度的连续梁和悬臂梁桥,提出了应用初等梁弯曲理论公式与平面杆系有限元法以及有限条程序相结合的方法,建立箱形梁剪力滞效应的计算模型,通过与空间有限元的对比验证其有效性,从而拓展了有线条在变高度箱梁中的应用。

8) 有限差分法

有限差分法是一种传统的方法,此法是在能量变分法所求得的剪力滞微分方程组基础上,给出相应的有限差分格式,进行变截面箱梁桥的剪力滞分析。与有限元方法相比,有限差分法在取相同单元数时的计算精度比有限单元法高。张士铎^[38]用此法对直线变截面悬臂梁的剪力滞进行了分析,并探讨了负剪力滞规律。王修信等^[39]用差分法计算了变截面多跨梯形箱梁的剪力滞,并与模型试验作了比较。Luigino 等^[40]在能量变分法的基础上推导了钢—混凝土组合梁考虑剪力滞效应的微分方程组及相应的边界条件,然后用差分法解该方程组,得到了组合梁剪力滞效应分布规律。

9) 有限段法

在普通梁单元基础上增加剪力滞位移自由度,用一维有限段法分析箱梁的剪力滞效应,是许多学者关注的研究课题。罗旗帜^[41,42]提出了一种分析剪力滞效应的有限段法,该法以剪力滞微分方程的齐次解为位移模式,建立了平面梁单元的半解析有限段模型,将三维空间问题简化为一维空间,实现了在结构分析中自动计入剪力滞效应的功能。谢旭等^[43]推导了薄壁箱梁考虑剪力滞效

应的空间梁段单元刚度矩阵。韦成龙等^[18,19]选取三个不同的剪力滞位移以考虑不同翼缘板翘曲幅度的影响,并对三个剪力滞位移函数采用了线性变化的位移模式,用一维有限段法分析了直线及曲线箱梁的剪力滞效应。罗旗帜和吴幼明等^[20-22,45]又进一步构造了截面含有三个剪力滞位移函数的梁段单元,分析了变截面箱梁的剪力滞效应。刘世忠和吴亚平等^[46,48]综合考虑剪力滞剪切变形效应的基础上,利用最小势能原理建立了薄壁箱梁的控制微分方程和解析解后,导出了适用于变截面梁、连续梁剪力滞和剪切变形效应分析的有限元列式。周世军等^[49-51]在变分法薄壁箱梁剪力滞基本微分方程的基础上,提出了每个节点具有两个剪力滞未知变量的梁段单元,导出了剪力滞单元系数矩阵和广义荷载列阵计算公式,研究了简支梁、悬臂梁和连续梁在集中力、均布荷载和集中弯矩下的剪力滞效应。张元海等^[52,53]在定义相应于剪力滞位移的广义力矩和有关几何特性的基础上,以控制微分方程的齐次解作为单元位移函数,以各积分常数为中间转换变量,提出一种梁段有限元数值分析方法,并将该方法应用于研究变截面箱梁及特殊支承连续箱梁等复杂结构的剪力滞效应。

综上所述,以能量变分法为基础的有限段法是一种深受研究人员欢迎的实用方法,其未知数少,内力形式的输出结果更符合工程师的使用习惯。这种方法直接以梁段为单元,先假设剪力滞翘曲位移沿横向的变化规律,然后沿纵向对位移进行插值,利用最小势能原理建立刚度矩阵。影响有限段法分析精度的核心问题是剪力滞翘曲位移函数的定义和位移差值函数的选取,不同位移模式的假定对计算结果具有一定的影响,因此如何合理地选择位移模式还有待进一步研究。

1.2.2 剪力滞翘曲位移函数的定义研究

能量变分法和梁段单元法求解剪力滞问题的核心是剪力滞翘曲位移函数的定义。目前,国内外对剪力滞翘曲位移函数的定义基本为两类:抛物线函数和余弦函数。

1) 抛物线型剪力滞翘曲位移函数

1941年 Reissner^[2,54] 假设翼板剪力滞翘曲位移函数为二次抛物线,通过在横截面上引入一个翼板剪切变形最大差 U ,建立了矩形双轴对称箱梁剪力滞效应分析的变分解,从而开创了抛物线型剪力滞翘曲位移函数的应用先例。由于矩形无悬臂板箱梁截面为双向对称截面,尤其在理论研究中大量采用的顶、底板厚度相同的情况下,引起剪力滞效应的翼板横向剪切变形也具有双对称性。因此 Reissner 抛物线型剪力滞翘曲位移函数无论从求解的方便性还是结果的准确性方面均堪称完美。而对带悬臂的箱梁,由于截面上下不对称,顶底板剪力滞翘曲的幅度差异使得截面中性轴与形心不重合。针对带悬臂板箱梁的翘曲位移函数的定义,大致有以下3种研究方法。

(1) 郭金琼^[14] 和张士铎^[1] 等针对带悬臂的矩形箱梁,通过引入考虑剪力滞效应后,截面中性轴仍通过截面形心的假设,将三次抛物线型翘曲位移函数扩展于带悬臂的单室箱梁分析中。同时张士铎^[1] 等还按四次抛物线位移函数分析悬臂箱梁剪力滞效应。魏丽娜等^[55] 分别用三次抛物线和四次抛物线位移函数计算了变截面箱梁的剪力滞效应。

(2) 张元海等^[53] 针对带悬臂板的箱梁,以顶板的翘曲位移函数为基准函数,考虑箱梁弯曲时轴向应力在截面上的平衡条件、顶板和悬臂板宽度差异以及底板与顶板不同翘曲程度差异,构造出了悬臂板、顶板和底板的剪力滞翘曲位移函数,并引入附加轴向位移来考虑中性轴和形心偏离带来的影响。

(3) 罗旗帜^[20] 和韦成龙等^[18] 则针对带悬臂单室箱梁,对顶板、悬臂板和底板分别引入剪切变形最大差 U_1 、 U_2 和 U_3 ,定义了各自的抛物线型剪力滞翘曲函数,建立了每个节点具有5个自由度的平面梁单元分析方法。甘亚南等^[56] 针对矩形箱梁,分别对下翼板和上翼板悬臂部分各设置1个剪力滞纵向位移差函数,建立了基于能量变分法的解析解。

上述三种方法中,前两种方法截面仅有一个剪力滞未知变

量——剪切变形最大差 U , 选定的抛物线型剪力滞翘曲位移函数仍然与 Reissner 选定二次抛物线的出发点基本相同, 都是着眼于应力分布的曲线与抛物线相近。同时方法(2)中不同翼板翘曲差异的修正系数以倪元增等^[57]提出的简支梁竖向荷载下的近似三角函数型挠曲函数为基础, 缺乏严密的理论基础。方法(3)全截面具有 3 个未知剪切变形最大差, 理论上, 该方法具有较严密的逻辑性和广泛的适用性, 但截面较多的未知位移变量无疑增大了求解的规模和难度。

2) 余弦型剪力滞翘曲位移函数

倪元增等^[57]在研究带悬臂箱梁剪力滞效应时定义了余弦函数型的剪力滞翘曲位移函数, 并引入了不同翼板间翘曲位移函数修正系数和附加轴向位移。由于余弦函数的近似幂级数即为抛物线, 因此以余弦函数作为翘曲位移函数的精度与抛物线型的相当, 但是抛物线型的计算较为简便。马兆云等^[58]针对抛物线型和余弦函数型的剪力滞翘曲位移函数进行了对比分析, 也验证了两类翘曲位移函数具有同等的分析精度。

综上所述, 剪力滞翘曲位移函数的定义存在 3 个核心问题: (1) 以抛物线和余弦函数沿横截面的变化规律近似反映薄壁箱梁由于翼板剪切变形引起的纵向应力不均匀性, 即剪力滞的相对大小; (2) 剪力滞的绝对大小通过翼板剪切变形最大差这一基本变量确定; (3) 对于截面上下不对称引起的不同翼板之间的剪力滞规律差异通过引入修正系数解决。对于问题(1), 考虑到抛物线函数在积分和微分运算中的简便性而大量采用, 尤其是 3 次抛物线由于精度整体较好而广泛应用。对于问题(2), 考虑到变量少求解简便, 可采用全截面仅一个剪切变形最大差的分析方法, 但此时问题(3)将较为突出。当不同翼板采用各自不同的剪切变形最大差时, 可基本解决问题(3), 但此时全截面未知变量较多求解烦琐, 同时该方法不便于拓展到多室箱梁。综合比较可以认为, 如果箱梁截面不同翼板之间的剪切变形差异能够科学合理地计入时, 采用全截面仅有一个翼板剪切变形差的抛物线型剪力滞翘曲位移函数具

有求解简便、适用性和拓展性好等优点。因此,剪力滞翘曲位移函数定义的核心问题归结为不同翼板间剪切变形差异的合理定义[前述问题(3)]。而目前既有研究针对带悬臂薄壁箱梁截面上下不对称的问题,提出的翘曲位移函数修正方法是以简支梁在竖向荷载下的近似三角函数型挠曲函数为基础,缺乏严密的理论基础,结果并不理想。如何定义求解变量少、能全面反映剪力滞效应的基本规律的剪力滞翘曲位移函数,需进一步研究。

1.2.3 混凝土箱梁的剪力滞效应研究

混凝土箱梁截面典型特点是考虑到配筋及截面应力过渡的需要,箱梁顶、底板和悬臂板均为沿截面宽度方向变厚度,通常越靠近腹板越厚而顶、底板中部和悬臂端部越薄。目前,可以反映翼板沿横向厚度变化的剪力滞分析方法主要有比拟杆法和有限元法,而以有限元法配合模型试验研究最为常用。

比拟杆法由于将翼板分解为多个比拟杆,可以通过不同杆的面积反映翼板厚度,因此进行翼板厚度变化的分析具有较好的方便性。张士铎等^[59]应用三杆比拟法曾对钱塘江三桥在恒载作用下的箱梁剪力滞效应进行过分析,分析中不仅未能考虑翼板横向厚度变化,同时对连续梁也利用反弯点将其简化为简支梁进行分析。蔡素军等^[60]采用三杆比拟法分析了大跨度混凝土连续梁桥在施工阶段最大悬臂状态下的剪力滞效应,并与有限元解和现场实测应力进行了对比。唐怀平等^[61]采用三杆比拟法分析了大跨径连续刚构箱梁的剪力滞,并与实桥静载试验结果进行了比较。郭健等^[62]应用三杆比拟法,分析了斜拉桥箱形截面混凝土主塔在施工过程中的剪力滞效应,并与有限元计算结果及现场测试结果进行了对比。从而可以看出,目前采用比拟杆法求解剪力滞效应时,均采用Evans等^[7,8,63]提出的三杆比拟法,因此只可得到最大的剪力滞系数,对翼板纵向应力沿横截面的分布规律不能较好反映,也无法完全计入翼板沿横截面的厚度变化。

有限元分析混凝土箱梁剪力滞效应是最常用的方法。宁贵霞