

箱形薄壁梁 剪力滞效应

• 张士铎
• 邓小华 著
• 王文州

人民交通出版社

U 561
9900481

Xiangxing Bobiliang Jianlizhi Xiaoying

箱形薄壁梁剪力滞效应

张士铎 邓小华 王文州 著

人民交通出版社

图书在版编目(CIP)数据

箱形薄壁梁剪力滞效应/张士铎等著. —北京:人民交通出版社, 1997. 8

ISBN 7-114-02785-0

I. 箱… II. 张… III. 桥-箱形梁-薄壁结构-剪力-滞后效应 IV. U441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 20517 号

箱形薄壁梁剪力滞效应

张士铎、邓小华、王文州 著

责任印制:孙树田 版式设计:刘晓方 责任校对:梁秀青

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

北京通州区京华印刷制版厂印刷

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张:5.75 字数:145 千

1998 年 3 月 第 1 版

1998 年 3 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—3500 册 定价:12.00 元

ISBN 7-114-02785-0

U · 01983

内 容 提 要

箱形薄壁梁在对称荷载作用下,法向应力沿横截面的分布是不均匀的,对于闭口截面,称之为“剪力滞效应”。

本书介绍剪力滞效应中的深层次问题。主要包括:一维问题、变分法、叠加原理、负剪力滞效应、比拟杆法、弹性分析法与参数影响、横向位置影响和单索面斜拉桥及钱塘江三桥塔根截面剪力滞系数计算示例等。

前 言

近二十年来,由于箱形薄壁梁具有结构轻、抗弯抗扭刚度大等特征,适合在沿桥方向配置正负预应力筋且与悬臂拼装和悬臂浇筑的现代化施工特点相适应,因此,在国内外桥梁工程上得到广泛的应用与推广。

在对称荷载作用下法向应力沿横截面的分布是不均匀的。在开口截面,称之为“翼缘板有效分布宽度”;在闭口截面,则称之为“剪力滞效应”。研究剪力滞效应,主要是满足桥梁设计的要求,保证结构的安全。

作者在研究生讲课中多次讲授该课题,并且结合生产实践,对东明黄河大桥、黄石长江大桥、钱塘江二桥及钱塘江三桥进行了分析计算并做了大量模型试验与量测工作,特编著本书介绍剪力滞效应中的深层次问题。本书共十章,包括一维问题、变分法、叠加原理、负剪力滞效应、比拟杆法、弹性分析法与参数影响、横向位置影响和单索面斜拉桥及钱塘江三桥塔根截面剪力滞系数计算示例等。在著作中引用了本人研究生邓小华、王文州硕士论文中一些成果及内容,特此致谢。

由于本人学术水平所限,书中难免有遗漏及错误之处,尚请国内外学者提出批评与指正。

这里还应该感谢福州大学房贞政、谢琪。同济大学张启伟及桥梁教研组有关同志提出的宝贵意见,也使本书进一步完善。国外学者有捷克研究生院副院长克里斯杰克(Krizfik)及司徒梯尼卡(Studnicka)及美国、印度学者舒适克维特(Shushkewick)、辛格教授(Singh)及丁芸同志,他们在美国结构工程学报上与本人讨论并交换意见与看法,相互取长补短,共同提高,在此向他们

表示谢意并致以诚挚的问候。

张士铎识于上海同济大学校园

1997 年 4 月

目 录

第一章 概论	(1)
1.1 剪力滞效应的定义	(1)
1.2 箱形梁受力分析	(3)
1.3 国内外理论与试验概况	(4)
1.3.1 卡曼理论	(4)
1.3.2 弹性理论解法	(5)
1.3.3 比拟杆法	(6)
1.3.4 能量变分法	(7)
1.3.5 数值分析法	(9)
1.4 本书讨论的内容.....	(10)
主要参考文献	(11)
第二章 一维剪力滞效应	(12)
2.1 一维应力状态基本微分方程的推导.....	(12)
2.2 用变形 $u=f(x,y)$ 表示一维平衡方程式	(14)
2.3 求解偏微分方程并确定积分常数.....	(15)
2.4 翼缘板承受荷载的有效性“ e ”	(17)
主要参考文献	(18)
第三章 变分法求解剪力滞问题	(19)
3.1 基本假定.....	(19)
3.2 基本微分方程的推导.....	(20)
3.3 位移函数对控制微分方程式 $u(x)$ 的影响	(27)
3.4 简支、悬臂梁的剪力滞效应	(29)
3.4.1 承受集中荷载的简支梁.....	(29)
3.4.2 承受均布荷载的简支梁.....	(32)

3.4.3 承受集中荷载的悬臂梁·····	(34)
3.4.4 承受均布荷载的悬臂梁·····	(35)
主要参考文献·····	(36)
第四章 叠加原理求解连续梁剪力滞效应·····	(38)
4.1 几何参数对梁式体系剪力滞效应的影响·····	(38)
4.1.1 各种荷载作用下,“ λ ”沿跨径的变化情况·····	(38)
4.1.2 $L/2b$ 与 λ 的关系·····	(39)
4.1.3 $\frac{I_s}{I}$ 与 λ 的关系曲线·····	(41)
4.2 常截面连续梁变分解法·····	(42)
4.3 叠加原理求解连续梁剪力滞效应·····	(43)
4.4 折线布置预应力力筋与自重组合后的剪力滞效应·····	(45)
主要参考文献·····	(50)
第五章 模型试验及负剪力滞的分析与解释·····	(52)
5.1 模型试验及相似理论·····	(52)
5.1.1 模型材料机械性能试验·····	(52)
5.1.2 量纲分析·····	(54)
5.2 悬臂箱形梁的负剪力滞效应·····	(57)
5.3 有限差分法求解悬臂箱梁的剪力滞效应·····	(61)
5.3.1 纵向位移及基本微分方程·····	(61)
5.3.2 剪力滞系数的差分解法·····	(63)
5.3.3 抛物线变截面悬臂箱梁模型尺寸及计算·····	(64)
5.3.4 四种荷载作用下, λ_s 与 λ 沿桥跨方向变化规律·····	(73)
5.4 有限差分法求解直线变截面悬臂梁的剪力滞效应·····	(75)
5.5 负剪力滞效应的另一种解释·····	(80)
主要参考文献·····	(83)
第六章 比拟杆法求解变高度连续箱梁剪力滞效应·····	(84)

6.1	基本思路·····	(84)
6.2	微分方程组的建立及求解·····	(89)
6.3	利用反弯点分割连续梁为若干简支体系·····	(94)
6.4	利用三杆比拟法建立微分方程并求解·····	(95)
6.5	钱塘江二桥剪力滞计算·····	(103)
	主要参考文献·····	(110)
第七章 弹性分析法程序及箱形梁剪力滞系数的影响参数		
	分析·····	(111)
7.1	弹性分析的力法解析·····	(111)
7.1.1	考虑剪力滞效应的梁段单元刚度矩阵的 形成·····	(111)
7.1.2	梁段单元的平衡·····	(116)
7.1.3	总体刚度矩阵的形成方法·····	(117)
7.1.4	荷载矩阵的形成方法·····	(117)
7.2	程序的编制及检验·····	(120)
7.2.1	编制程序的总框图·····	(120)
7.2.2	等截面简支箱梁计算结果及其对比·····	(121)
7.2.3	变截面悬臂箱形梁计算结果及其对比·····	(122)
7.3	影响剪力滞效应的参数分析·····	(123)
7.3.1	静定结构参数的分析·····	(123)
7.3.2	横截面形式(矩形或梯形)对剪力滞的影响·····	(127)
7.3.3	悬臂长度(横截面)对剪力滞效应的影响·····	(128)
7.3.4	不同类型的荷载作用对剪力滞效应的影响·····	(129)
	主要参考文献·····	(132)
第八章 荷载横向作用位置对箱形梁剪力		
	滞效应的影响·····	(133)
8.1	过去研究存在的问题·····	(133)
8.2	修正后的基本假定及微分方程的推导·····	(134)
8.3	荷载横向作用位置对剪力滞效应影响·····	(136)
8.4	对简支箱梁的挠度分析·····	(139)

主要参考文献·····	(142)
第九章 单索面斜拉桥剪力滞效应·····	(143)
9.1 基本假定、截面形状、尺寸及坐标的规定 ·····	(143)
9.2 基本微分方程的推导 ·····	(145)
9.3 微分方程求解及边界条件的探讨 ·····	(153)
主要参考文献·····	(162)
第十章 钱塘江三桥恒载作用下的剪力滞效应·····	(163)
10.1 概述·····	(163)
10.2 理论分析·····	(166)
10.2.1 比拟杆法分析·····	(166)
10.2.2 三杆比拟法的等效面积·····	(167)
10.2.3 考虑轴力影响的剪力滞系数·····	(167)
10.3 剪力滞系数的计算·····	(168)
10.4 模型的理论分析与测试结果对比·····	(172)
10.5 小结·····	(172)
主要参考文献·····	(173)

第一章 概 论

本章介绍剪力滞效应的基本概念,包括箱梁的受力分析,理论研究的概况,以及本书讨论的主要内容。

1.1 剪力滞效应的定义

为了说明剪力滞效应的基本概念,先取一悬臂箱形薄壁梁为例,在悬臂端的梁肋处施加一对集中力 P ,如图 1.1 所示。

在平行于 AD 截面处,应用初等梁的弯曲理论,顶板上得到均匀分布的弯曲拉应力。愈离固端处近,拉应力的强度也愈高。但是实际上,腹板传递的剪力流在腹板与翼缘板的交界处要大,而向板内传递的过程,由于翼缘板(上、下翼板)存在剪切变形,故向板内传递的剪力流要逐渐的变小。以顶板为例,其拉应力在顶板宽范围之内其分布是不均匀的,呈现板的中间小而两边大的分布状态。很明显,肋处的剪力流向板中传递过程,有滞后现象,所以工程界称之为“剪力滞效应”。

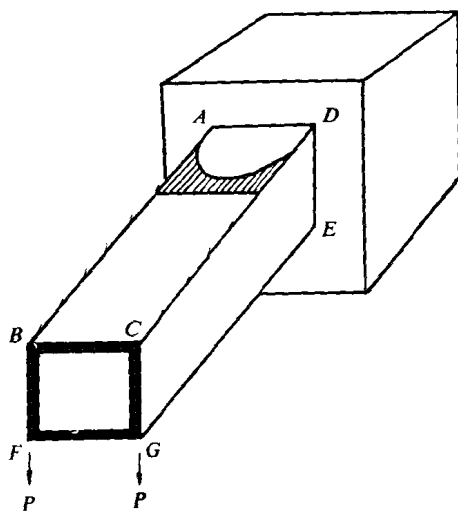


图 1.1 悬臂箱形薄壁梁在自由端作用一对集中力

在对称荷载作用下,箱梁的上下翼缘板,考虑剪切变形后,它

的弯曲应力是不均匀的。它与初等梁弯曲理论所算出的应力的比值称之为“剪力滞系数”，它的大小是衡量剪力滞影响程度的主要指标。在开口截面中，如 T 形梁、 π 形梁，我们用实际应力 σ_x 沿主梁间距积分，即 $\int_0^c \sigma_x dy$ ， c 为主梁净间距，然后除以 $\sigma_{\max}$ （肋与板交

界处的最大应力值），得到 $2\lambda = \frac{\int_0^c \sigma_x dy}{\sigma_{\max}}$ ， $2\lambda + b_0$ 为翼缘板有效分布宽度，这里 b_0 为主梁肋宽。在封闭截面中，如箱形梁或梯形梁，我们用剪力滞系数(Coefficient of shear lag)来预测剪力滞效应。很明显，上下翼板愈宽，梁高愈低，剪力滞效应就愈突出，当然它与跨径大小也有内在联系。

最早涉及剪力滞问题的理论推导是弗·卡曼(T. V. Karman)，见本章参考文献[1]。他曾取一跨径为 $2l$ 且承受余弦形荷载的连续梁为解析对象，利用最小势能原理，推导出连续梁有效分布宽度，称之为“卡曼理论”。在航空工程中，由于在轻金属飞机机身的盖板下布置了许多小型 I 字梁，受力之后，剪力滞效应要比桥梁结构严重得多。它不仅有应力分布不均现象，还存在薄板翘曲失稳问题。这种不均匀的应力状态在美国工程界通称“剪力滞效应”，在英国称之为“弯曲应力的离散现象”，两者虽然取名各异，但实质上是一回事。

从 1969 年 11 月到 1971 年 11 月，在奥地利、英国、澳大利亚、德国相继发生了四起钢箱梁失稳或破坏事故。事故发生后，许多桥梁专家对四座桥的设计及计算方法进行了研究与分析，揭示出这四座桥的计算方法存在严重的缺陷，其中一项就是设计中没认真对待“剪力滞效应”，因此导致应力过分集中，造成结构的失稳或局部破坏。

目前，国内外均建造了大量的箱形薄壁梁桥、T 构、刚构、斜拉桥。特别是跨宽比较大，宽高比也较为突出，其中剪力滞效应较为严重。如果忽略它的影响，势必导致结构的失利。因此，在预应力配筋与布置上要特别小心，避免应力过分集中造成混凝土的开裂。

另外,在高层建筑中,均属于悬臂的筒中筒结构,在风力作用下出现负剪力滞特殊情况,更应得到结构工程师特殊关注.应对其受力有精辟分析与认识,见本章参考文献〔2〕,尽量避免发生考虑不周或意外事故,保证在结构基准期内的安全、适用及可靠性。

1.2 箱形梁受力分析

箱形截面具有结构轻、抗弯抗扭刚度大等特点,适合在纵向配置正负预应力筋且与悬臂拼装和悬臂浇注的现代施工特点相适应,因此,在国内外大跨径的桥梁工程上得到广泛的应用与推广。

箱形薄壁梁的空间受力分析颇为复杂。目前采用荷载等效分解方法,即作用在箱梁横向任意位置的垂直荷载 ΣP ,可分解成下列三种等效荷载图式。

- (1)对称纵向弯曲荷载——产生剪力滞效应,见图 1.2a)
- (2)刚性扭转荷载——产生翘曲法向应力及剪应力,图 1.2c)
- (3)畸变荷载——产生畸变翘曲法向应力及横向框架应力,图 1.2d)

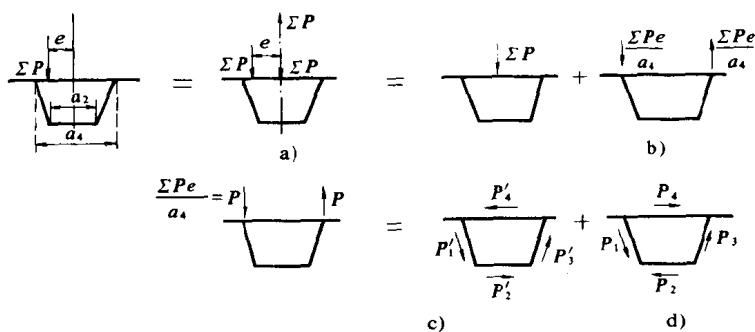
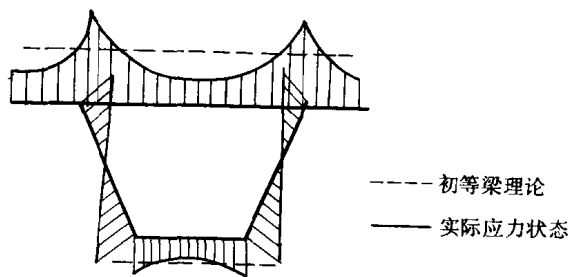


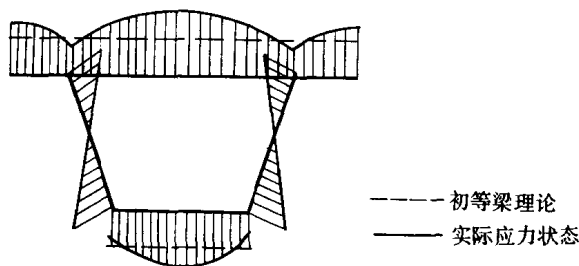
图 1.2 荷载等效分解

如果翼缘板与腹板交界处的法向应力大于初等梁理论的计算值,称为“正剪力滞”,如图 1.3a),那么反之,则称为“负剪力滞”,如图 1.3b)所示。至于为什么出现“负剪力滞”现象,其原因及影响

因素也是本书讨论内容之一。



a) 正剪力滞效应



b) 负剪力滞效应

图 1.3 考虑剪力滞效应, 弯曲法向应力的非均匀分布

1.3 国内外理论与试验概况

近二十年来, 国内外许多学者对剪力滞问题提出了许多新设想和不少新理论, 并辅以试验研究的数据与成果, 可以部分地解决实际桥梁结构中的问题, 综合起来有下列几种方法。

1.3.1 卡曼理论(T. V. Karman's theory)

在 1924 年, 弗·卡曼用解析的方法解决了无限宽翼缘板的应力分布及其有效分布宽度的问题, 第一个给“有效分布宽度”这一概念下了明确的定义。在他的论文中选取了 $2l$ 为连续梁的跨径,

具有无限个等间距支承的连梁作为分析与研究的对象。假定荷载对称地作用在各跨,翼缘板的厚度与梁的高度相比相当小,因而可以忽略板的挠曲刚度(即:板在其自身中和轴的情况下,不承受弯矩,仅承受轴向力),然后用逆解法求解应力函数,用最小势能原理确定各待定常数,从而导出了翼缘板的应力分布图象及其有效分布宽度的表达式。尽管他所考虑的是无限宽度的翼缘板,但是实际上其解答也适用于有限宽度的翼缘板上。由于在其分析过程中比较繁复,使其在工程实际问题中的应用受到了一定的限制。

1.3.2 弹性理论解法

弹性理论的解法是建立在经典弹性理论的基础上的,这里包括正交异性板法、折板理论、板壳理论等。

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,然后从弹性力学的边界条件出发,导出肋结构的法向应力,这就是剪力滞效应。瑞斯纳(E. Reissner)早在1938年把上下板为波纹状的悬臂矩形箱梁截面的剪力滞问题比拟成一正交异性板进行了分析与研究,并作了一些近似简化处理。爱伯德、赛德(Abdel-Sayed)曾在1969年把正交异性板法应用于钢箱梁的桥道板的剪力滞分析,称之为“赛德微分方程”,后来马尔可(Malcolm)等人进一步用它来分析加劲箱梁的剪力滞效应。正交异性板法所考虑的是整个箱梁,而并非单个板条,所施加的荷载要用富里叶级数表达,因而比较繁琐,在应用上也受到一定程度上的限制。

弹性折板理论(Theory of Folded Plates)由戈尔德贝格(Goldberg)和李维(Leve)等首先提出,并由狄弗里,史肯(Defries-Skene)和史考特里斯(Scordelis)写成矩阵形式而适应于计算机的分析。在折板理论中,假定板平面内与平面外的性能是完全独立的;板端在平面外位移和转角以及平面内横向位移都是受到约束的,但对翘曲则为自由的。这些支承约束保证了上部结构的简支状态。

朱光汉和爱露特·杜里克(Elliott Dudnik)将箱梁看作成一种复式折板结构进行分析。虽然该方法结果精确,但它失之于过分复杂。卡尔温达芝(Karl Van Dalen)等运用上述方法对宽低箱梁的剪力滞效应进行研究,分析了箱梁截面尺寸的多种比值对剪力滞系数的影响,并指出:翼缘板的宽跨比、梁的边界条件是影响剪力滞的主要因素,而翼缘板宽厚比、箱宽与悬挑长度之比及材料的弹性模量的大小对剪力滞效应的影响不是很大,约占 2%左右。

J. E. 吉普逊(J. E. Gibson)和 M. H. 米特瓦利(M. H. Mitwal-ly)在 1976 年提出了用板壳理论(Chosed Multi-shell Theory)分析箱形梁及其剪力滞效应。他们认为各种截面形状的箱梁(包括矩形、梯形、圆壳形等)都可以看作是板单元和筒壳单元的组合体,因而可以分别利用板的理论和筒壳理论加以处理。

1.3.3 比拟杆法

比拟杆法首先用于航空工程中飞机薄板的构造设计上。最早探讨该问题的是杨格(Younger),他提出了“加劲薄板理论”(Stiffener Sheet Theory)。他用等效的连续等厚薄板来代替离散的纵向加劲肋,并假定由它承受所有的轴向荷载。从泊桑比为零,可以导出用级数来表示的纵向应力和剪应力。这个理论尽管保证了原来的板和等效加劲薄板的位移的相容性,但认为这两种板仍有所不同。海杰-阿格瑞斯(Hadji-Argyris)采用了与杨格完全不同的结构设想,提出了“有限加劲肋理论”(The Finite Stringer Theory)。在这个理论中,他把加劲肋视为离散的仅承受轴向荷载的杆件,杆件之间用仅承受剪力的系板连接,原来的板的承载能力可以等效地折算为一块附加在这些离散加劲肋上的面积。上述这两种方法的共同点都是假定轴向荷载主要是由纵向加劲肋承受,而板本身是承受剪力的系板。

库恩(Kuhn)和威廉姆(Williams)又分别在 1956 年和 1960 年对这两种方法作了详细的论述。早在 1938 年前后,库恩就在前人的有限加劲肋板理论的基础上,提出了简化的求解方法,即简单

加劲肋代换法(Substitute Single Stringer Method),解决了在轴向力作用下具有三根加劲肋的板的剪力滞计算问题和悬臂箱形梁受弯时的剪力滞效应的分析。后者与前者不同点就是考虑腹板剪力流 q_0 的影响。1970年马尔康(D. J. Malcolm)和瑞德乌特(R. G. Redwood)第一次把加劲薄板理论应用于土木工程的箱梁研究中。加劲薄板理论的应用虽然局限于一端嵌固的梁,且梁所承受的荷载可以用数学式来表达其变化,但它的精度确毫不逊色,可与有限元的结果相媲美。1977年,英国学者H. R. 伊文斯(Evans)及A. R. 塔海伦(Taherian)又对“有限加劲肋理论”和“简单加劲肋代换法”作了进一步的讨论和改进,提出了“比拟杆法”和“三杆比拟法”,使之适用于箱形梁的剪力滞分析。比拟杆法是把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系板的组合体,然后根据杆与板之间的平衡条件和变形协调条件建立一组微分方程,比拟杆的数目视精度要求来确定。在一般情况下,不带悬臂翼板的单室矩形箱梁取5根杆来计算,其精度就足够了。于是又提出简化的近似求解方法,即所谓三杆比拟法(3-Bar stimulation method),只需求解一个微分方程,也能达到一定精度。该法中伊文斯(Evans)提出的对比拟杆间距 b_0 问题确值得再探讨。

国内学者湖南大学教授程翔云及汤康恩在上述研究的基础上,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,在求解高阶微分方程组时,提出了用样条函数逼近法,解决了带悬臂翼板的等截面矩形箱形结构以及T形梁剪力滞的计算问题。

1990年在天津召开的第五届中国土木工程年会上,同济大学张士铎等人又将三杆比拟法用到求解变截面连续箱梁中去。

1.3.4 能量变分法

能量变分法首先由瑞斯纳(E. Reissner)提出,详见本章主要参考文献[3]。对于腹板高度为 $2h$,盖板宽度为 $2W$ 的薄壁矩形箱梁的剪力滞问题,他选取两个广义位移函数 $w(x)$,并假设盖板纵向位移沿横向成二次抛物线分布,即: