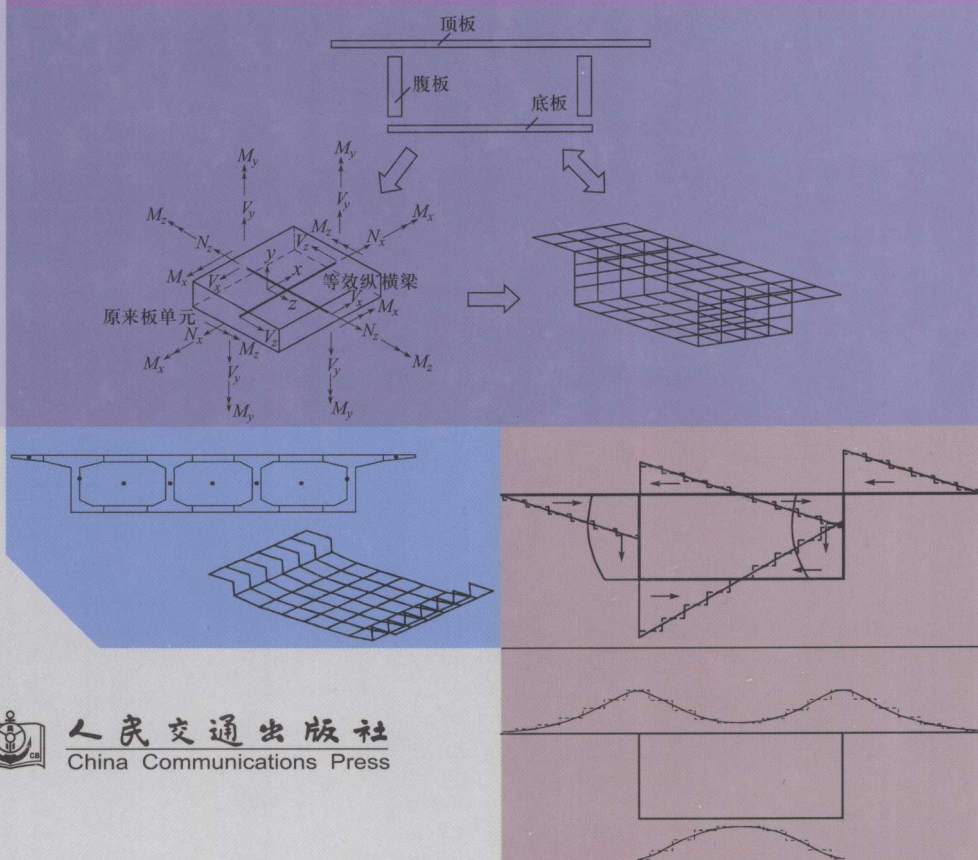


PRACTICAL PRECISE MODELLING
AND REINFORCEMENT DESIGN FOR
CONCRETE BRIDGE STRUCTURES

混凝土桥梁结构 实用精细化分析与配筋设计

徐 栋 赵 瑜 刘 超 / 著



人民交通出版社
China Communications Press

014013189

U448.332.5
02

混凝土桥梁结构实用精细化分析与配筋设计

Practical Precise Modelling and Reinforcement Design for Concrete Bridge Structures

徐 栋 赵 瑜 刘 超 著



U448.332.5
02

人民交通出版社



北航

C1700558

281310510

内 容 提 要

本书在对混凝土桥梁结构过去常用的分析理论和设计思想进行反思和重新梳理的同时,提出了“完整验算应力”的新概念,介绍了多种可交付配筋的实用精细化计算模型,阐述了针对剪切配筋的“拉应力域”配筋新理论,并在最后一章给出了实用精细化模型和“拉应力域”配筋设计方法的扩展应用。本书内容对桥梁结构分析和设计及旧桥维修加固具有重要的参考价值和指导意义。

本书可供桥梁科研、设计及施工人员使用,也可供高等院校高年级本科生及研究生教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土桥梁结构实用精细化分析与配筋设计 / 徐栋等著. —

北京:人民交通出版社,2013.12

ISBN 978-7-114-10903-4

I. ①混… II. ①徐… III. ①钢筋混凝土桥—桥梁设计 IV. ①U448.332.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 224208 号

书 名:混凝土桥梁结构实用精细化分析与配筋设计

著 作 者:徐 栋 赵 瑜 刘 超

责任编辑:曲 乐 卢俊丽

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.ccpres.com.cn>

销售电话:(010)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:787×1092 1/16

印 张:26.25

字 数:621 千

版 次:2013 年 12 月 第 1 版

印 次:2013 年 12 月 第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-114-10903-4

定 价:88.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

同济大学徐栋教授的新书《混凝土桥梁结构实用精细化分析与配筋设计》已经成稿,其核心思想近年来极大地影响着国内桥梁结构分析的理论和实践,尤其是常见的比较复杂的箱形断面上部结构。该书中的部分思想、理论和方法已经纳入 2011 年开始修编的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中。随着规范编制、颁布和书籍出版,这种建立在新技术、新理论基础上的桥梁结构实用精细化分析方法,将给桥梁结构计算分析领域带来新的变革,将给桥梁上部结构的设计、验算和长久安全带来深远影响。

徐栋教授和我都是同济大学桥梁 84 级一班的学生,并交替担任过班长,杜国华教授时任我们的班主任。在 20 世纪 80 年代的三好坞畔,我们学习的结构设计原理、桥梁工程和薄壁闭口断面、开口断面的计算理论还缺少很强大、适用、实用的计算程序支持。4 年时间很快,复杂桥梁结构的计算分析才刚刚接触,毕业期就匆匆来临了。

毕业后,徐栋教授师从范立础院士、项海帆院士继续深造桥梁基本理论,坚持学术研究、教书育人,而我则从涵洞、大桥设计做起,从事具体的桥涵勘察设计工作。直到 2006 年我调任,从事桥梁设计规范编制和管理的工作,我们开始了第二次真正的合作。我 2006 年始参加《工程结构可靠性设计统一标准》、《公路工程结构可靠性设计统一标准》等基础规范编制工作,研究基于统计数据和概率的桥梁非确定性设计基础理论和标准规范;徐栋教授则致力于桥梁结构精细化分析和确定性结构分析研究;我们一直在全国调研汽车荷载现状、研究荷载标准设置的基本理论;一起研讨确定性的桥梁结构和非确定性的桥梁荷载、时变抗力;至 2011 年修编《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》工作开始时,我们又一起工作,积极努力将桥梁结构实用精细化分析理论、方法等引入新一轮的桥梁设计规范中,改变使用了多年的桥梁结构平面杆系程序分析带来的先天缺陷和近年来其他二维、三维程序带来的复杂结构计算分析不足状况,也努力推进我国的桥梁计算分析程序能领世界之先。

桥梁上部结构一般由预应力混凝土、钢结构和组合结构组成,是桥梁结构各主要部件中比较复杂、比较精细的部件。如单箱单室、多箱多室混凝土箱梁的顶板、腹板、底板在复杂的空间和时间可变汽车荷载作用下,受力状况很不相同。即使同样是顶板,其横向跨中、根部和悬臂的顶底板和中间板受力和响应也不一样。不同位置的腹板、底板和连接构造同样存在复杂且差异较大的受力状态和结构响应。徐栋教授在本书中就着重提出并努力探讨解决这些问题的理论和模型,并编制规范条文和公式、计算程序等方便实际工程应用。

本书的意义和先进性主要体现在以下几个方面:

(1) 提出了“完整验算应力”的新概念,对桥梁结构分析和设计的精细化很有影响,对新桥设计和旧桥维修加固均具有重要的价值。

(2) 提出并阐述混凝土桥梁结构实用精细化的分析和设计方法,建立可交付配筋的计算模型,如空间网格模型、折面梁格模型和七自由度模型。

(3)建立了针对剪切配筋的“拉应力域”配筋新理论。目前剪切配筋是国内外所有规范的薄弱环节,此理论的提出意义重大,可以延伸出承受包括剪力在内的,如弯剪、剪扭等构件的配筋方法,并可以拓展解决钢—混凝土组合梁桥的分析和配筋、深梁剪切配筋、薄板面内剪切配筋等问题。

该书中的理论是在中国大规模基础设施建设、大量复杂桥梁的修建以及出现较多缺陷和病害的背景下建立的,具有较明显的中国特色。在此基础上建立的计算模型和软件同样走出了一条新路,为从桥梁大国迈向桥梁强国作出了贡献。

于此,再次祝贺徐栋教授和本书的编写团队,希望书中的理论和研究成果、公式和软件等能进一步推广应用,并在实践中不断改进。

中交公路规划设计院有限公司副总工程师

赵君黎(教授级高工)

2013年9月

前 言

经过近三十年的大规模建设,复杂桥梁或复杂截面的桥梁在我国得到了非常普遍的运用,我国的桥梁工程师已经具备丰富的设计经验和较高的技术水平。但从工程实践中发生的一些问题来看,常用的分析方法和针对简单桥梁的现行规范体系并不能完全解决问题。同时,我国对过去修建桥梁的维修加固也在日益增多,而指导维修加固的思想仍然停留在现行桥梁常用计算方法和相应规程上,导致对一些病害桥梁的维修加固可能是在并没有完全弄清楚问题实质的基础上进行的,也就是说病害可能仍未根除。本书在对过去常用的分析理论和设计思想进行反思和重新梳理的同时,提出并阐述混凝土桥梁结构实用精细化的分析和设计方法。该方法特点如下:一是在杆系模型基础上的整体分析可以做到板壳,甚至有些情况下实体有限元分析的精细化程度,且保留了杆系模型在桥梁结构分析中的优势;二是以剪切配筋为突破口,建立精细化配筋设计方法,弥补针对简单构件的现行规范配筋体系的不足。本书内容对桥梁结构分析和设计及旧桥维修加固具有重要的参考价值和指导意义。

对于桥梁结构的分析方法,发达国家由于受到来自于国家强力发展方向的推动,如航空航天、新材料、机械等领域的迅猛发展,发展出一批水平很高的通用大型有限元分析软件,被积极引进到桥梁结构分析领域,这些大型通用软件有些甚至已经有几十年的历史。这些软件的普及应用对于桥梁结构的影响是深远的,使桥梁工程师对于桥梁结构的局部和微观受力情况的认知达到了前所未有的高度和水平。但是,桥梁结构,特别是混凝土桥梁结构具有的几个重要特征,如桥梁施工、收缩徐变效应、预应力、活载加载计算等,这些大型软件可能无法或者很难完全满足要求。同时,这些软件及相关应用研究均集中在精细化分析方面,而对于配筋设计的精细化鲜有触及,也不匹配。

混凝土结构配筋设计方法的内容非常丰富,也是很早(甚至将近 100 年之前)就发展起来的经典学科。国内外相关规范虽然经过几轮发展,其基本思想仍然停留在“浅窄梁”范畴。同时,由于各时期的发展和内容补充,里面留存有大量各时期的,有些甚至已经早已过时的内容。所以虽然规范有时显得越来越厚,但实际上并不代表越来越符合实际。作者近年来通过参与我国桥梁规范的最新修订,深刻体会到目前飞速发展的结构分析方法与发展缓慢的桥梁构件设计规范之间的矛盾,就像一个人拥有一条长的腿和一条短的腿,其前行速度必然受短板的制约。具体的表现便是结构分析的方法越来越精细,而配筋配束设计理论却仍停留在简单结构范畴,造成了虽然能对复杂桥梁结构进行非常精细的分析,却无法建立与配筋设计方法紧密联系的尴尬情况。

桥梁结构理论发展的动力来源于工程实践中出现的问题,桥梁结构出现的问题呼唤理论与实践结合更为紧密的实用、精细的分析和设计方法。梁系分析(梁格、网格、七自由度或更多自由度单梁)虽然看上去没有实体有限元精细,但简单、实用。简单是指建模简单、理论基础简单;实用是指能够反映混凝土桥梁中的收缩徐变、桥梁的施工过程、活荷载的空间分析等问题,

且非常关键的是其计算模型和结果与现行配筋规范结合紧密,适用性强,是更精细化地面向配筋设计的分析方法,所以将这些梁系模型统称为“实用精细化模型”。混凝土结构实用精细化分析的本质,就是可以紧密联系精细化分析与精细化配筋设计,达到两者同步发展的目标,共同构建“精细化设计”的两根重要支柱。

本书第一章“桥梁结构的空间效应及实用精细化计算模型”首先厘清桥梁结构的空间效应,介绍实用精细化模型。桥梁结构的空间效应实质上是相对于我们熟悉的满足全截面平截面假定、采用开口截面、仅考虑竖向剪应力的浅窄梁而言的。当桥梁结构的宽跨比较大时,则全截面的应变并非按同一个曲率满足平截面假定,即全截面的平截面假定不再适用,横截面不同位置的受力是不均匀的,各道肋(腹)板分配到的荷载也不相同。目前,常用的处理方法是借用“横向分布系数”概念,以寻找一个最大曲率,并将该曲率作为全断面的曲率进行偏于安全的设计。“横向分布系数”是一种将空间计算简化为平面计算的方法,在空间计算尚不普及的时期被普遍使用甚至延续至今,仍然没有实用的替代方法。但采用“横向分布系数”是有条件的,特别是对支承方式有严格要求,多肋梁式结构“横向分布”的概念来源于简支结构,且要求每道肋板下均有支承,其显然与连续结构且不可能每道腹板下均设支座的多室宽箱梁结构相差甚远。当翼缘板宽度较大时,板中的剪应力主要是水平的而非竖直的,且正应力分布有差异。常用的处理方法是采用“有效分布宽度”计入该影响,将复杂截面简化为简单截面,以一个包络值来考虑正应力的不同,但问题是只留下了竖向剪应力,而剔除了水平剪应力。“有效分布宽度”概念实际上仅适合承受竖向荷载的某种结构状态,对于有施工过程且体系有转换的预应力混凝土箱梁桥,成桥时的“有效分布宽度”与施工阶段是不相同的。同时,预应力作用实际上是轴向力的扩散,与受弯的剪力滞效应概念也不相同。如前所述,采用“有效分布宽度”意味着丢掉了桥面板面内的水平剪应力,它直接导致了现行规范对混凝土桥面板面内针对水平剪力配筋方法的缺失,也造成了箱梁的顶板或底板在面内出现斜裂缝时发生无法判断、无从着手的情况。当采用闭口箱形截面时,截面剪应力是超静定的,同时存在截面的弯扭变形导致的薄壁结构中的附加应力。常用的处理方法是直接采用一个“放大系数”考虑该影响,但对于承受不同荷载、采用不同桥面宽度的结构,不可能估计一个统一的“放大系数”。

上述“横向分布系数”、“有效分布宽度”和“放大系数”都是对于空间效应的近似处理方法,其目的都是相同的,即把复杂断面的桥梁简化为窄梁,方便工程师使用,从而可以采用现行规范的配筋和验算体系。本章将介绍能够完全反映箱梁受力特点的面内效应和面外效应的概念,并从混凝土箱梁桥调研的裂缝形式出发,分析目前常用的计算模型与这些裂缝的对应关系,指出现在常用的计算方法对应的验算应力实际上并没有完整反映空间效应,会遗漏混凝土箱梁结构可能产生裂缝的应力。本章在介绍箱形截面各板件三层应力的基础上,总结并提出设计计算中需要得到的完整验算应力,并进一步介绍实用精细化计算模型与完整验算应力的关系。重点介绍空间网格模型、折面梁格模型和七自由度模型各自的特点及适用范围,以及对相应的各验算应力的解析和表达方式。最后介绍了混凝土桥梁结构实用精细化模型的应用,包括对比了空间网格模型与三维壳单元模型针对一个箱形截面简支梁桥的剪力滞、翘曲、剪力流等荷载效应的分析结果;对于一座单箱六室的连续箱梁桥的各道腹板,对比了采用折面梁格模型和常用的比拟正交异性板法的弯矩和剪力横向分布系数的计算结果;采用七自由度模型计算了直箱梁桥和弯箱梁桥的薄壁效应,并建议了三车道直箱梁桥的剪应力放大系数,以及如

何进行箱梁体内体外配束的合理设计。

本书第二章全面介绍空间网格模型。空间网格模型是实用精细化计算模型中计算规模最大、也是最为全面的模型。由于来源于杆系模型,故可以方便地考虑混凝土桥梁复杂施工过程的收缩徐变效应、纵横向预应力效应、温度效应以及成桥活载加载等使用阶段荷载。空间网格模型也同时包含了各施工阶段以及成桥阶段的剪力滞效应,不仅能计算结构的正应力,还能计算所有板件的面内主应力。该章将从模型建立、截面特性、应力计算及效应表达等几个方面详细阐述网格模型,并与实体模型对比验证。在此基础上,给出几个算例,以方便读者理解剪力滞效应等各项荷载效应在网格模型中的表达。最后,采用空间网格模型对大跨径预应力混凝土梁桥的开裂下挠病害进行跟踪分析。

本书第三章全面介绍折面梁格模型。梁格模型主要优势在于反映宽箱梁截面上应力分布的不均匀性、横梁计算以及索或吊杆支撑结构的整体计算。该章仍然从模型建立、截面特性、应力计算及效应表达等几个方面详细阐述梁格模型,并与实体模型对比验证,在此基础上进行参数研究和专项研究。参数研究包括网格划分形式和抗扭刚度影响等几个方面;专项研究包括基于梁格模型计算的宽箱梁桥横向分布系数的适用性研究,以及剪力滞效应、预应力传递路径、支座布置形式等一系列研究成果。最后,给出几个算例,以方便读者理解和参考。

本书第四章介绍薄壁箱梁的七自由度模型。多自由度单梁模型中,七自由度单梁模型可以分离约束扭转,在薄壁效应计算中最为重要。七自由度模型的第七个自由度是双力矩,是专门用来计算薄壁箱梁翘曲效应的。同时由于是单梁模型,计算规模相对较小,所以是最有效“经济”的薄壁箱梁计算模型。该章首先介绍薄壁箱梁结构的七自由度应力分析方法,同样在验证计算基础上给出具体示例及样本桥梁,得到直线箱梁桥和曲线箱梁桥的薄壁效应系数。最后采用七自由度模型研究分析大跨径预应力混凝土梁桥的开裂下挠病害。

本书第五章阐述混凝土桥梁结构实用精细化模型的强度计算和配筋,以及与现行设计体系的关系,重点介绍提出的“拉应力域”配筋新概念。“拉应力域”配筋设计方法是本书作者近年来深入研究的基础理论,该方法结合结构分析将能够填补一系列目前配筋设计体系中难点和盲点,并能拓展混凝土有限元分析等发展受到现行规范体系约束的研究领域。本章主要介绍作者采用“拉应力域”配筋设计理论在梁桥剪切配筋方面的最新研究成果。

本书第六章为实用精细化模型和“拉应力域”配筋设计方法的扩展应用,包括目前一般设计计算方法仍存在较大困难的混凝土深梁、钢—混凝土组合梁以及体外预应力锚固横梁的配筋设计方法。由于实用精细化模型和“拉应力域”配筋设计方法涵盖领域广泛,研究内容丰富,但目前尚没有与本书相类似的书籍。同时本章中的部分内容是非常新的,甚至作者仍然也在研究之中,故将这些研究思路尽早提出是为了抛砖引玉,希望有兴趣的业界同仁一起共同研究并促进技术进步。

感谢导师项海帆院士对作者研究的支持和鼓励,并在他最新出版的研究生教学用书《高等桥梁结构理论(第二版)》的第七章全面介绍“混凝土桥梁空间效应的实用精细化分析”,本书可看作更为详细和全面的展开;感谢中交公路规划设计院有限公司董事长张喜刚教授级高工的关注,在他主编的《大跨径预应力混凝土梁式桥设计施工技术指南》中应用了作者的相关研究成果;感谢赵君黎教授级高工在百忙中为本书作序,并在一起参与交通运输部西部交通建设项目“桥梁设计荷载与安全鉴定荷载的研究”、《大跨径预应力混凝土梁式桥设计施工技术指南》

项目和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》修编项目中给予的支持和鼓励;感谢规范修编项目负责人袁洪教授级高工、沈永林教授级高工及各单位专家在规范修编过程中的学术讨论;感谢作为本书内容重要学术思想和技术积累基础的苏通大桥、交通运输部西部交通建设项目、崇启大桥、椒江二桥等科研课题的各相关单位;感谢慧加软件(WisePlus)提供的计算平台,否则书中部分内容是无法实现和深入研究的。

特别感谢同济大学桥梁工程系杜国华教授、郑信光教授的无私帮助,他们深厚的力学功底和勤勉严谨的研究风格是我的榜样。作者的历届研究生为本书完成做了大量艰辛的准备工作,有些内容直接来自于他们的学位论文,在此向他们表示由衷的感谢,并祝福他们工作、事业顺利,家庭幸福。

最后还要感谢我的妻子陈焱,在我坚持学术道路上给予我温暖的家庭支持,使我能潜心钻研,终成书稿。

由于作者水平所限,书中疏漏甚至不当之处在所难免,恳请读者不吝批评指正。

徐 栋

2013年9月

目 录

第一章 桥梁结构的空间效应及实用精细化计算模型	1
第一节 箱梁桥的薄壁效应	1
第二节 宽箱梁桥各道腹板的荷载分配(偏载下的横向分布系数)	6
第三节 宽翼缘桥梁的剪力滞效应及有效分布宽度	9
第四节 现行常用结构分析方法及其评述	13
第五节 混凝土桥梁结构常见病害	18
第六节 混凝土桥梁结构的完整验算应力	24
第七节 混凝土桥梁结构实用精细化模型与验算应力	30
本章参考文献	38
第二章 空间网格模型	40
第一节 空间网格模型概述	40
第二节 模型验证分析	53
第三节 空间效应在网格模型中的体现	58
第四节 空间网格模型计算示例	83
第五节 空间网格模型跟踪分析开裂下挠病害桥梁	97
本章参考文献	112
第三章 折面梁格模型	113
第一节 折面梁格模型概述	114
第二节 模型验证分析	118
第三节 梁格模型参数研究	127
第四节 空间效应在折面梁格模型中的反映	152
第五节 折面梁格模型计算示例	179
本章参考文献	191
第四章 薄壁箱梁的七自由度单梁模型	192
第一节 七自由度单梁模型概述	192
第二节 模型验证分析	212
第三节 七自由度模型分析实例	223
第四节 七自由度模型用于开裂下挠分析	248
第五节 采用七自由度模型分析病害桥梁	256
本章参考文献	263
第五章 混凝土桥梁剪切配筋新方法——“拉应力域”方法	264
第一节 混凝土桥梁的实用精细化模型与配筋设计的关系	264

第二节 混凝土结构“拉应力域”配筋理论.....	268
第三节 现有抗剪配筋理论发展动态分析.....	281
第四节 混凝土结构“拉应力域”配筋试验研究.....	296
本章参考文献.....	325
第六章 混凝土桥梁实用精细化分析与设计方法的扩展应用.....	327
第一节 梁格模型应用之深梁.....	327
第二节 网格模型应用之叠合梁.....	359
第三节 网格模型应用之体外预应力转向块.....	381
第四节 “拉应力域”应用之体外预应力锚固横梁配筋设计.....	396
本章参考文献.....	405

第一章 桥梁结构的空

间效应及实用精细化计算模型

桥梁结构的空

间效应,实质上是相对于我们熟悉的满足全截面平截面假定、采用开口截面、仅考虑竖向剪应力的浅窄梁而言的。当桥梁结构的宽跨比较大时,则全截面变形并非按同一个曲率满足平截面假定;当翼缘板宽度较大时,板中的剪应力主要是水平的而非竖直的;当截面为闭口箱形截面时,截面剪应力是超静定的,同时有截面的弯扭变形,导致附加应力。

虽然现代计算方法可以综合考虑这些空间效应,但从受力分析的角度来说,将这些空间效应分离,对于理解其物理意义和受力特性仍然具有重要的意义。可以让工程师明确知道是什么原因导致的计算结果,并在设计过程中做到有的放矢。

桥梁结构的空

间效应,主要有三种:箱梁桥的薄壁效应、宽箱梁桥各道腹板的荷载分配、宽翼缘桥梁的剪力滞效应。

在本章中有两个新概念:面外效应和面内效应;各板件的三层应力。

第一节 箱梁桥的薄壁效应

一、箱梁的薄壁效应

箱梁具有整体性能好、结构刚度大、变形小、抗震性能好等优点,在桥梁建设中已经成为最流行的上部结构形式,在各种公路桥梁、铁路桥梁及城市桥梁中得到广泛应用。而箱梁截面的超静定特性也决定了它受力的复杂性。由于箱梁截面具有典型的薄壁截面特点,故薄壁效应是箱梁桥最重要的空间效应之一^[1-3]。薄壁效应主要是指箱梁截面的扭转和畸变。

对一个单箱双室的箱梁截面来说,考虑箱梁薄壁效应的截面整体变形如图 1-1 所示。它包括如图 1-2 所示的各部分变形之和,即在偏心荷载作用下,箱梁的整体变形将包括纵向弯曲、扭转、畸变及横向挠曲四种基本变形形态。

纵向弯曲产生竖向位移,在横截面上引起纵向正应力 σ_M 及剪应力 τ_M (图 1-3)。纵向正应力 σ_M 将受到剪力滞的影响,在截面上分布不均匀,其分布如图 1-3a)所示;而闭口薄壁箱梁截面的剪应力 τ_M 是内部超静定的,其分布如图 1-3b)所示。可以看出,一个左右对称的单

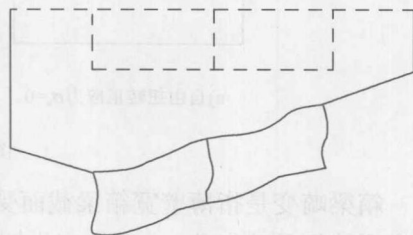


图 1-1 偏心荷载下箱梁截面变形图(整体)

箱单室箱梁截面的剪应力零点刚好在顶底板的中点,所以腹板的弯曲剪应力的计算值与开口截面的相同。值得关注的是顶板和底板的剪力流,往往被常用的开口截面计算方法所忽视。

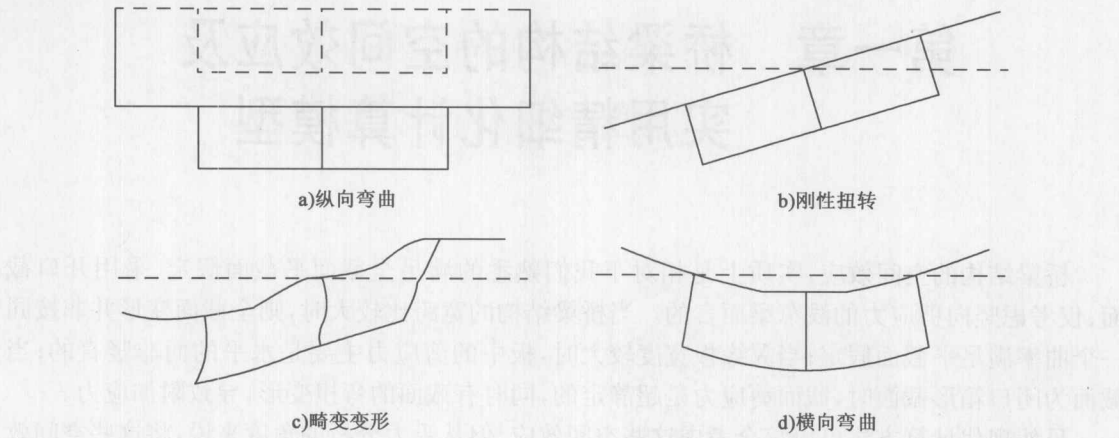


图 1-2 偏心荷载下箱梁截面受力变形图(分项)

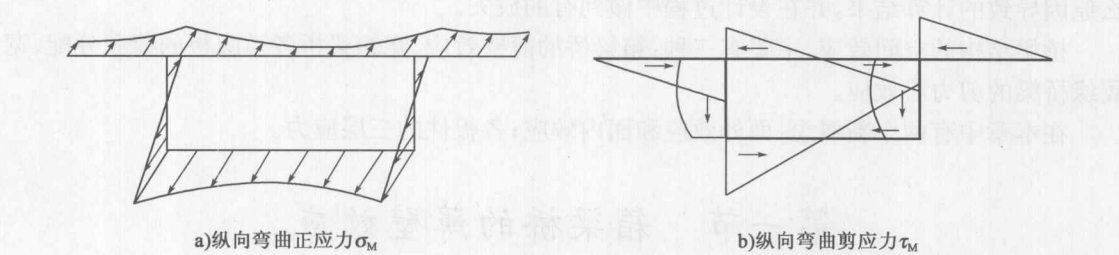


图 1-3 箱梁纵向变形应力图

箱梁的刚性扭转效应,可以分为自由扭转和约束扭转,扭转变形的主要特征是扭转角 θ 。自由扭转,截面纵向变形是自由的,纵向纤维无伸长或缩短,截面自由翘曲,因而不产生纵向正应力($\sigma_k=0$),只产生自由扭转剪应力 τ_k (图 1-4)。约束扭转,纵向变形受到约束,在箱梁桥中的横隔板起到了这样的约束作用,从而产生约束扭转剪应力 τ_w 和约束扭转翘曲正应力 σ_w (图 1-5)。

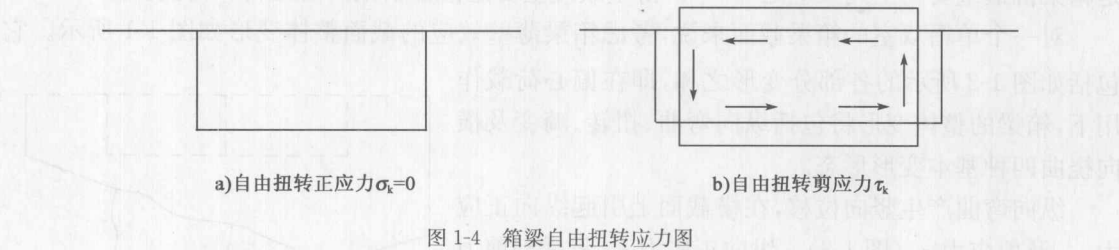


图 1-4 箱梁自由扭转应力图

箱梁畸变是指薄壁宽箱梁截面受扭后,截面周边产生变形,无法保持原来的形状,它的主要变形特征是畸变角 γ 。畸变产生翘曲正应力 σ_{dw} 和畸变剪应力 τ_{dw} (图 1-6),同时由于畸变而引起截面各板的横向弯曲,在板内产生横向弯曲应力 σ_{dt} 。

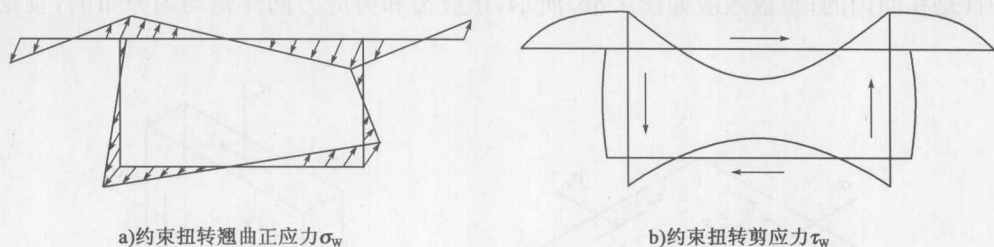


图 1-5 箱梁约束扭转应力图

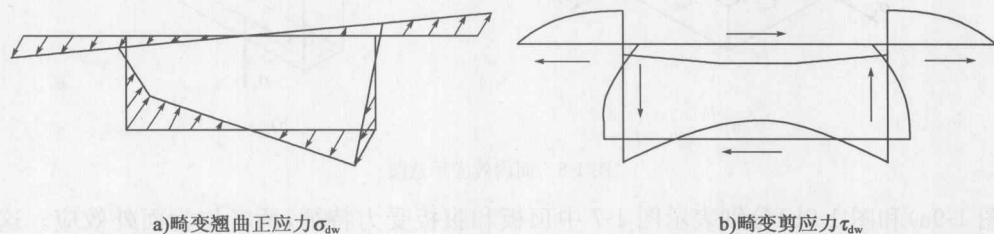


图 1-6 箱梁畸变变形应力图

当车辆荷载作用在顶板时,除直接承受荷载的顶板产生横向弯曲外(图 1-7),由于横向框架的约束作用,也会引起截面其他板件的横向弯曲正应力 σ_c 和剪应力。

由前述对偏心荷载作用下箱梁截面的变形分析可以得出,混凝土箱梁桥的空间效应可以用箱梁截面纵、横两个方向上的应力来表示,即在箱梁的横截面上存在沿着桥梁纵向的正应力和剪应力。

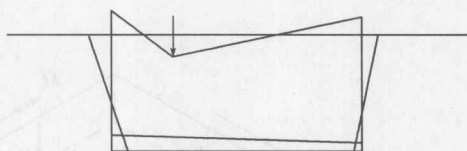


图 1-7 箱梁横向弯矩图

纵向正应力:

$$\sigma_z = \sigma_M + \sigma_w + \sigma_{dw} \quad (1-1)$$

纵向剪应力:

$$\tau = \tau_k + \tau_M + \tau_w + \tau_{dw} \quad (1-2)$$

同样,在箱梁的纵截面上存在沿着桥梁横向的正应力。

横向正应力:

$$\sigma_e = \sigma_{dt} + \sigma_c \quad (1-3)$$

二、面内效应与面外效应

“薄壁”是指壁厚方向的应力分布是均匀的,即可认为是无厚度的,箱梁的薄壁效应反映的是箱梁的纵向效应。前述式(1-1)和式(1-2)反映的是薄壁效应,而式(1-3)则不是薄壁效应。

可以用“面内效应”和“面外效应”来区分箱梁截面的薄壁效应。图 1-3~图 1-6 中箱梁截面的顶板和底板效应可以用图 1-8a)表示,其特点是正应力和剪应力在厚度方向上是均匀分布

Diagram (a) shows a rectangular element in a 3D coordinate system with axes x , y , and z . The element is subjected to normal stresses σ_x , σ_y , and σ_z acting on its faces. Shear stresses τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{xz} , τ_{zx} , τ_{yz} , and τ_{zy} are also shown acting on the faces.

Diagram (b) shows a rectangular element in a 3D coordinate system with axes x , y , and z . The element is subjected to normal stresses σ_x , σ_y , and σ_z acting on its faces. Shear stresses τ_{xy} , τ_{yx} , τ_{xz} , τ_{zx} , τ_{yz} , and τ_{zy} are also shown acting on the faces.

Figure 10-1 illustrates the internal forces acting on a rectangular element. (a) Top view: A rectangular element with dimensions Δx and Δy . The coordinate system (x, y, z) is shown. The top surface is subjected to normal stress σ_x (tension) and shear stress τ_{xy} . The bottom surface is subjected to normal stress σ_x (compression) and shear stress τ_{xy} . The left and right vertical faces are subjected to shear stress τ_{yx} . (b) Side view: A rectangular element with dimensions Δx and Δz . The coordinate system (x, y, z) is shown. The front and back horizontal faces are subjected to normal stress σ_y (tension) and shear stress τ_{yx} . The left and right vertical faces are subjected to shear stress τ_{xy} .

.....

三、薄壁效应系数

实际工程中,作用在箱梁上的主要荷载是恒载和活载,在这两种荷载作用下,不同线形箱梁(直线箱梁桥及曲线箱梁桥)的受力又从不同角度体现了箱梁的薄壁效应。

对于直线箱梁桥而言,箱梁截面基本上是对称的,这样恒载也是对称作用的,所以恒载不会产生偏心作用;而活载可以是对称的,也可以是不对称偏心作用,必须分别加以讨论。直线箱梁在偏心荷载的作用下,将产生如前所述的纵向弯曲、扭转、畸变及横向挠曲四种变形状态。

对于直线箱梁桥而言,箱梁截面基本上是对称的,这样恒载也是对称作用的,所以恒载不会产生偏心作用;而活载可以是对称的,也可以是不对称偏心作用,必须分别加以讨论。直线箱梁在偏心荷载的作用下,将产生如前所述的纵向弯曲、扭转、畸变及横向挠曲四种变形状态。

相对于直线箱梁桥,曲线箱梁桥在受力特性上存在着很大的不同。曲线箱梁桥的主要力学特性就是“弯扭耦合”效应,即在外荷载作用下,曲梁截面内产生弯矩的同时,必然有耦合扭矩产生;同理,曲梁截面产生扭矩的同时,肯定有耦合弯矩产生。直线箱梁桥中,只有偏心荷载才能使梁体产生扭矩,而曲线箱梁桥的内外弧长差别较大,重心位置与截面形心不重合,外侧恒载比内侧恒载大,即使是对称截面,恒载作用下也会使曲线梁桥产生向外侧翻转的均布扭矩;同时由于曲梁的“弯扭耦合”效应,偏心作用在桥面上的活载对曲线梁桥内力也有较大的影响。这样,对于曲线箱梁桥而言,无论荷载是否偏心均会导致梁体承受较大的扭矩。在这一扭矩的作用下,使得曲线梁桥的外梁所受荷载加大,内梁所受荷载减小,使得内外梁应力产生明显的差别,并且这种情况随着桥宽的增大与弯曲半径的减小愈加明显。曲线梁桥中的横隔梁有助于抵抗扭转,是保证全桥稳定的重要构件,尤其对于薄壁箱梁截面,横隔板是减小截面畸变的最优选择。因此与直线梁桥相比,要求曲线箱梁桥的横隔梁有更大的刚度。

对于直线箱梁或者曲线箱梁,根据计算效应进行设计时,传统方法通过考虑不同的内力提高系数进行设计计算,需要对不同的桥梁形式分别考虑不同的提高系数,一般认为,预应力混凝土对称箱形截面,由于偏载引起的约束扭转正应力,约为相应的弯曲正应力的 15% 左右;偏载引起的剪应力(包括自由扭转剪应力、约束扭转剪应力以及畸变剪应力),约为相应弯曲剪应力的 5% 左右。基于以上的论述,在平面杆系法计算程序中,计算活载正应力考虑 15% 的放大系数,活载剪应力则考虑 5% 的放大系数。这是由于平面杆系有限元程序无法计算箱梁扭转效应,而采用的一般近似处理方法。目前的路桥建设中,薄壁箱形截面被广泛运用于城市快速路和城乡高速公路的桥梁部分,以及大中型跨越江河湖海的桥梁工程中。此类工程中的车辆荷载等级一般较高,而且随着桥宽的增加,横向偏载相对较大。因此,上述箱梁活载计算所采用的近似处理方法已经明显不能反映结构的实际受力情况。

我们这里引入薄壁效应系数(应力放大系数)的概念来考虑箱梁截面的薄壁效应。这样的放大系数,既适用于直线箱梁桥,也适用于曲线箱梁桥。对于箱梁截面上的关注点,应力放大系数^[4-5]的定义为:

$$\text{正应力放大系数} = \frac{\text{弯曲正应力} + \text{约束扭转翘曲正应力} + \text{畸变正应力}}{\text{弯曲正应力}} \quad (1-4)$$

$$\text{剪应力放大系数} = \frac{\text{弯曲剪应力} + \text{扭转剪应力} + \text{畸变剪应力}}{\text{弯曲剪应力}} \quad (1-5)$$

将式(1-1)~式(1-3)中所述各应力符号代入即可将上式转化为:

$$\lambda_{\sigma} = \frac{\sigma_M + \sigma_w + \sigma_{dw}}{\sigma_M} \quad (1-6)$$

$$\lambda_{\tau} = \frac{\tau_M + \tau_k + \tau_w + \tau_{dw}}{\tau_M} \quad (1-7)$$

对于曲线梁桥,总是存在“弯扭耦合”,但随着有限元技术的发展,用折线模型代替曲线是常用的处理方法,这种方法通过直线梁单元中心线在平面上的差异反映出曲线桥在内力上的“弯扭耦合”。于是,这个问题就简单了:“弯扭耦合”就成了对于应力的耦合——直线梁单元弯矩和扭矩并存,而其中的约束扭转会产生翘曲正应力(与弯曲正应力“耦合”)。实际上,直线桥承受活载偏载时同样也会产生这种应力层面上的“弯扭耦合”效应,只是以往用一个模糊的“放

大系数”将扭矩效应考虑到了弯矩里面。所以,无论对于曲线箱梁桥和直线箱梁桥,对于薄壁效应,关键是要分离自由扭转和产生翘曲正应力的约束扭转。

这样,只要把荷载效应算清楚(弯矩、扭矩各自产生的正应力和剪应力),就不需要考虑“弯扭耦合”作用的存在,即直线梁桥和曲线梁桥在计算模型上实际上是没有区别的,同样都是薄壁箱梁的空间效应问题,在设计实践中的代表参数即为正应力放大系数和剪应力放大系数。将得到的放大系数分别应用到荷载效应中的弯矩和剪力项中,即可运用现有规范公式进行结构的弯剪配筋设计。对于如何算清楚各种荷载效应,将在后续章节中对现有分析方法以及最新提出的实用精细化分析方法分别进行评述。

第二节 宽箱梁桥各道腹板的荷载分配 (偏载下的横向分布系数)

一、横向分布系数的概念

桥梁是一个跨度大、受力复杂的空间结构,对其计算、分析有一定的难度。自 20 世纪 30 年代开始,国内外学者对桥梁空间结构的计算理论做了试验研究,提出应用“荷载横向分布”的概念,把空间计算问题合理地简化成平面问题来分析桥梁结构的空间受力。早期工程师们采用将空间问题转化为平面问题的横向分布理论来对桥梁结构进行分析验算,横向分布理论的研究,加深了对桥梁各种上部结构形式的力学性能(纵、横向分配荷载的性能)的理解。如图

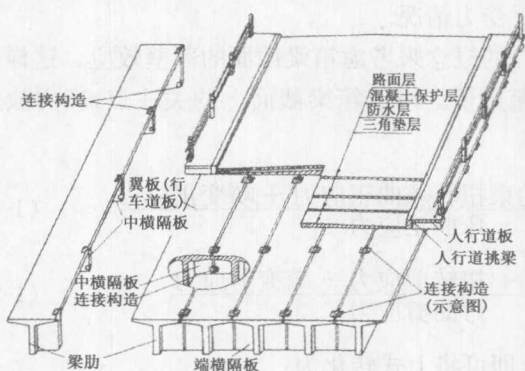


图 1-10 多梁式简支梁桥

1-10 所示为一座常见的多梁式简支梁桥。

桥梁结构的近似空间计算方法,可以归纳为荷载横向分布的计算,用一个近似的内力影响面去代替精确的内力影响面,而近似内力影响面可用变量分离的方法得到,即把影响面函数 $\eta(x, y)$ 近似分解成两个单值函数的乘积 $\eta(x, y) = \eta_1(x) \cdot \eta_2(y)$ 。“荷载横向分布”仅是借用的一个概念,其实质应该是“内力”横向分布,而不是“荷载”横向分布,只是在变量分离后在计算式的表现形式上成了“荷载”的横向分布。

荷载横向分布系数 m 就是结构在外荷载作用下某片主梁所分配到的最大荷载比例,表示了荷载在横向对各片主梁分配的概念。有了荷载横向分布系数 m ,主梁就可以按承受外荷载为 mP 的单梁进行设计计算,即把荷载在内力影响线上按纵向最不利位置进行加载,计算最大的设计内力值。但是以主梁挠度横向分布规律来确定荷载横向分布的理论依据是沿桥跨分布半波正弦曲线荷载,即从严格意义上来说,只有在等截面的简支梁桥承受沿桥跨分布的正弦曲线荷载时,才能从理论上证明主梁的内力分配与荷载的分配是等值关系,即主梁挠度分布、内力分布和荷载分布才可能是一致的,才存在确切的荷载横向分布。