

陈记豪 著

装配式梁桥上部结构 加宽设计与加固研究



科学出版社

装配式梁桥上部结构 加宽设计与加固研究

陈记豪 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了装配式梁桥上部结构加宽改造中荷载横向分布计算、铰缝剪力分析、新旧梁拼接形式和整体性评价等理论与工程应用,阐述了荷载横向分布和铰缝剪力分析方法,与传统方法相比,该方法适用性更为广泛,可用于新旧梁刚度和间距不一致的非规整梁桥,同时给出了详细的推导过程与编程思路,并提供了简化计算表格;对比了常用新旧板拼接形式,建立了加宽梁桥上部结构整体性评价方法和旧桥加宽加固设计方法,给出了工程实例,为中小跨径预制装配式梁桥尤其是空心板加宽改造工程提供了参考。

本书可供道路与桥梁工程及相关专业的科技人员参考,也可作为高等院校土木工程专业本科高年级学生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

装配式梁桥上部结构加宽设计与加固研究 / 陈记豪著. —北京:科学出版社, 2016. 8

ISBN 978-7-03-049543-3

I. ①装… II. ①陈… III. ①装配式梁桥-上部结构-桥梁设计-研究②装配式梁桥-上部结构-加固-研究 IV. ①U448. 212. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 187920 号

责任编辑:陈 婕 王 苏 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 8 月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:220 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着经济的高速发展,我国主要高速公路的交通量日益增长,改扩建工程已成为高速公路建设的一个热点,其中过去普遍采用的装配式梁桥也成为改扩建的重点。但是,相对于工程应用,我国对该类桥梁改扩建的理论研究尚不成熟,许多基本理论问题尚未得到很好解决,特别是有关上部结构荷载横向分布和整体性评价的问题。本书针对既有装配式梁桥上部结构的加宽改造设计理论与加固技术进行重点研究,以期为该桥梁的加宽改造与加固设计起到借鉴和推动作用。

第1章主要阐述空心板桥加宽改造中上部结构荷载横向分布、铰缝剪力计算及整体性评价等方面在国内外的研究进展。

第2章针对既有装配式加宽梁桥的特点,依据力法原理,提出该类桥梁荷载横向分布的铰接梁和刚接梁通用分析方法。与有限单元法的对比分析结果表明,所提方法精度较高,应用简便,从根本上克服了目前经典铰接梁和刚接梁法难以直接用于该类桥荷载横向分布分析的难题。同时,编制横向分布影响线、荷载横向最不利位置及横向分布系数的求解程序,据此对实例进行分析,并探讨荷载横向分布的具体应用方法。最后,提出常用的非规整加宽梁桥(横向由截面特性、间距不完全一致的板组成)荷载横向分布实用分析方法及可供直接查取的相关表格。

第3章在将集中荷载、铰缝剪力表示为正弦级数的同时,直接根据力法方程,建立铰缝剪力的解析表达式,并进一步提出实用的简化分析方法。相对于目前的正交异性板法,该方法具有更广的适用范围,可用于非规整装配式梁桥铰缝剪力的分析。

第4章基于荷载横向分布和有限元分析,并结合实际工程,从横向分布系数、位移、应力和动力响应等方面对工程中常用的8种空心板桥上部结构横向连接形式进行综合分析,给出建议的横向连接形式,为同类桥梁加宽设计和施工提供参考。

第5章根据荷载横向分布影响线,提出上部结构整体性的评价指标,并明确加载方案和检验截面,进而形成一套装配式梁桥上部结构整体性评价方法。基于此,对横向粘钢加固进行分析与评价,提出我国高速公路加宽改造中典型装配式简支空心板桥横向粘钢加固的最优方案。同时,根据几座装配式简支板桥的实验资料,验证该方法应用于既有装配式简支板桥整体性评价的可行性。有限元和实验分析结果均表明:该方法适用范围广、灵敏度高、评价结果与实际吻合度高,可用于既有装配式梁桥上部结构整体性的评价和增强横向连系加固的评价与择优。

第 6 章在旧桥加宽设计理论成果研究的基础,对旧桥加宽加固设计进行系统的研究,分析确定旧桥加宽加固设计原则与加固方法,并据此对一个实际空心板桥加宽工程进行加固设计,编制横向粘钢加固施工工艺,供该类工程参考。

第 7 章对本书的研究内容进行了总结,并阐述了本书研究中的不足之处及今后的研究方向。附录提供了非规整装配式空心板桥新旧接缝剪力值表格,可用于该类桥荷载横向分布简化计算,同时提供了非规整装配式空心板桥铰缝剪力横向分布系数图,可用于该类桥铰缝剪力简化计算。

本书的理论推导与计算分析均以装配式空心板桥为主,但第 2、5 章的理论可直接用于装配式 T 梁桥或小箱梁桥荷载横向分布与整体性评定,其余各章也可为装配式 T 梁桥或小箱梁加宽改造与加固提供参考。

与本书相关的研究工作得到了郑州市普通科技攻关计划(编号:141PPTGG373 和 131PPTGG410-7)、华北水利水电大学高层次人才科研启动项目(编号:201250)、华北水利水电大学 2015 年度青年科技创新人才支持计划和土木工程学科建设项目等支持,研究中得到了西安建筑科技大学博士生导师姚继涛教授和华北水利水电大学博士生导师赵顺波教授的诸多指导,同时研究生于胸怀、陈成也为研究实验和调研工作付出了辛勤的劳动,在一并对他们此致以衷心的感谢。

由于著者水平有限,本书难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

陈记豪

2015 年 10 月于华北水利水电大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	5
1.2.1 荷载横向分布	8
1.2.2 铰缝形式与承载力校核	12
1.2.3 上部结构整体性的评价与增强措施	14
1.3 本书主要内容	15
第 2 章 荷载横向分布分析方法	18
2.1 铰接(板)梁法荷载横向分布通用求解方法	18
2.1.1 一般力法方程	18
2.1.2 程序实现及算例	21
2.1.3 影响因素分析	32
2.1.4 实用分析方法	34
2.2 刚接梁法荷载横向分布通用求解方法	37
2.2.1 通用计算方程	38
2.2.2 实例计算与分析	42
2.3 小结	46
第 3 章 铰缝剪力分析与校核	48
3.1 铰缝剪力分析	48
3.1.1 铰缝剪力分析方法	48
3.1.2 程序实现	49
3.2 铰缝剪力校核	50
3.3 实例验证与分析	57
3.3.1 普通装配式简支空心板桥	57
3.3.2 非规整装配式加宽简支空心板桥	58
3.4 影响因素分析	62
3.5 实用分析方法	64

3.5.1	参数敏感性分析	64
3.5.2	铰缝剪力最大值计算图表	68
3.5.3	算例	68
3.6	小结	68
第4章	上部新旧结构横向连接形式	70
4.1	工程概况	70
4.2	拼接形式	71
4.2.1	湿接缝连接	71
4.2.2	铰缝连接	71
4.2.3	组合连接	72
4.2.4	横隔板连接	73
4.2.5	混凝土铰连接	74
4.2.6	直接拼接法	74
4.3	效果评价	74
4.3.1	荷载横向分布	74
4.3.2	汽车荷载作用下位移和应力	75
4.4	小结	79
第5章	上部结构整体性评价	80
5.1	上部结构整体性评价的基本方法	80
5.1.1	荷载横向分布均匀性系数	81
5.1.2	控制截面	81
5.1.3	加载方案	82
5.2	横向粘钢加固的评价与择优	82
5.2.1	影响因素分析与评价	84
5.2.2	横向粘贴型钢加固建议方案	103
5.3	既有装配式简支板桥整体性评价	105
5.3.1	未受损空心板桥静载实验及整体性评定	105
5.3.2	受损空心板桥静载实验及整体性评定	106
5.3.3	加固前后空心板桥静载实验及整体性评定	108
5.4	小结	111
第6章	上部结构加宽改造与加固设计	112
6.1	既有空心板桥复核	112
6.2	加固准则	113

6.2.1 新旧板间具有可靠的横向连接	113
6.2.2 承受的活荷载水平不提高准则	114
6.2.3 铰缝具有较大安全度准则	114
6.3 加固方法	115
6.3.1 新旧板间连接加固	115
6.3.2 边板加固	122
6.3.3 铰缝加固	132
6.4 设计与加固建议	132
6.5 横向粘钢施工工艺	133
6.5.1 施工流程	133
6.5.2 操作要点	134
6.5.3 劳动力组织	136
6.5.4 材料与设备	137
6.5.5 质量控制	137
6.6 小结	138
第7章 总结与展望	139
7.1 研究成果	139
7.2 需要进一步研究的问题	141
参考文献	142
附录	148

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

随着经济的高速发展,近 20 年来我国公路建设取得了较大发展,截至 2014 年年底,我国公路网总里程达到 446.39 万公里,其中高速公路为 11.19 万公里^[1];但总体而言,我国公路网的通行能力仍难以满足交通运输事业的迅速发展。20 世纪八九十年代建成的高速公路基本是双向四车道。随着沿线经济的高速发展,这些高速公路的通行能力已难以满足实际通行量的要求,经常出现拥堵现象,且事故频发。

交通量激增与通行能力不足之间的矛盾可以采用两种途径解决:新建复线,旧线改造扩建。新建复线是指在原路附近(5~15km)新建一条高速公路。新建高速公路通道的选取受众多因素的制约,一般需要考虑线形条件和路网布置是否合理,社会效益是否显著,环境保护是否达标等^[2]。通道建设中需要重新征地,投资大,建设期较长。旧线改造扩建是在原有高速公路的基础上,通过改造扩建工程提高既有道路等级和抵抗荷载的强度^[3],进而提高原有高速公路的通行能力。与新建复线相比,旧线改造扩建具有节约土地、缩短工期、减少对环境的不利影响和节约投资等诸多优点;而且在道路总宽相同的条件下,旧线改造扩建的通行能力大于新建复线,因此高速公路改造扩建成为扩大运输能力的首选^[4]。20 世纪末,我国开始了高速公路改造扩建工程,先后对广佛(广州—佛山)、沈大(沈阳—大连)、沪宁(上海—南京)和京珠(北京—珠海)等高速公路实施了改造扩建,部分改造扩建工程见表 1.1。

表 1.1 部分改造扩建工程一览表

改造扩建公路名称	里程/km	改造后车道数	开工时间	竣工时间
哈尔滨—大庆高速公路	133	4	1996 年 5 月	1998 年 8 月
广州—佛山高速公路	15	8	1998 年 7 月	1999 年 8 月
石家庄—黄骅高速公路	35	4	1999 年 5 月	2001 年 7 月
大庆—齐齐哈尔高速公路	103	4	2000 年 9 月	2002 年 11 月
上海—杭州高速公路	180	6	2001 年 7 月	2004 年 9 月
沈阳—大连高速公路	348	8	2002 年 5 月	2004 年 9 月
哈尔滨—方正高速公路	167	4	2002 年 6 月	2004 年 1 月

续表

改造扩建公路名称	里程/km	改造后车道数	开工时间	竣工时间
尚志—亚布力高速公路	77	4	2002 年 5 月	2004 年 1 月
上海—南京高速公路	230	8	2003 年 6 月	2005 年 9 月
叶集—信阳高速公路	136	4	2003 年 6 月	2005 年 1 月
G30 高速公路郑州段	40.5	8	2006 年 7 月	2008 年 12 月
G30 高速公路郑州至洛阳段	106.4	8	2008 年 11 月	2011 年 12 月
G4 高速公路安阳至新乡段	113.17	8	2008 年 4 月	2010 年 11 月
G30 高速公路西安至宝鸡段	143.1	8	2008 年 12 月	2011 年 11 月
泉州—厦门高速公路	81	8	2007 年	2010 年 12 月
G4 高速公路郑州至漯河段	119.6	8	2008 年 3 月	2010 年 11 月
京津塘高速公路	143	8(6)	2008 年	2010 年
西安—铜川高速公路	60	8	2008 年 5 月	2010 年
厦门—漳州高速公路	45	8(6)	2008 年 12 月	2010 年 12 月
大庆—广州高速公路 (深圳—大名段)	220	8	2008 年 12 月	2010 年 12 月
津滨高速公路	28	6(8)	2009 年 1 月	2011 年 6 月
广州—清远高速公路	58	8	2009 年 11 月	2016 年 12 月(预)
丽江机场高速公路	28	4(高速) +4(一级)	2010 年 3 月	2012 年 7 月
柳州—南宁高速公路	224	8	2010 年 2 月	2011 年 8 月

注:本表竣工日期后标注“预”的,表示该日期为计划竣工日期,以上资料来自网页新闻报道。

桥梁是公路的咽喉,且在高速公路上的桥梁数量较多,因而高速公路改造扩建工程大多涉及桥梁加宽改造、拆除重建等问题。桥梁加宽改造是高速公路改造扩建中的关键环节,其对高速公路改造扩建的工期、总投资和施工期间保通等均具有重要的影响。装配式空心板桥是高速公路上的常用桥型之一,而且它在高速公路桥梁中一般占有较大比例。例如,西安至潼关和西安至宝鸡高速公路改造扩建中,共有大中小桥 59 座,其中空心板桥就有 41 座^[5],占总数的 69.5%;沈大高速公路改造扩建中,空心板旧桥约占桥梁总数的 80%^[6,7]。在预应力混凝土桥梁的加宽改造中,若能合理地再利用既有预应力混凝土空心板、护栏等既有构件,可以节约大量的建设资金,并降低对环境的不利影响;同时旧桥还能够为桥梁施工提供支撑体系、场地等,能够为改造扩建工程施工期间的保通提供便利。经过市场调研,某市场高速公路改造过程中,共有旧空心板梁 1600 多片,经评估后可利用的约有 500 片,实际利用了 380 片,比全部采用新预制空心板梁节约成本几百万,大大节

约了建设成本和工期^[8]。所以,对既有装配式空心板桥进行加宽改造是高速公路改造扩建中处理该类桥梁的首选方案^[9]。但是,目前我国在装配式空心板桥加宽改造方面缺乏可借鉴的成熟经验,更缺乏系统的设计方法、计算理论和规范指南,因而对装配式简支空心板桥加宽改造理论和技术进行研究,具有重要的理论意义和实用价值。

拓宽结构采用什么结构类型是一个比较复杂的问题。一般来说,桥梁加宽遵循“同结构、同跨径”的设计原则,即采用与原桥一致的结构形式拓宽,这样,改造后桥梁新旧部分的结构形式一致,互相协调^[10]。另一个关键问题就是新旧结构如何连接。目前,在国内外桥梁拓宽方案中,新旧结构横向连接形式主要有以下几种。

1. 上部和下部结构均不连接

上部新旧空心板和下部新旧盖梁均不连接。旧桥已经服役若干年,其混凝土收缩、徐变绝大部分均已完成,桥梁基础的沉降也大部分完成或处于稳定状态。而新桥混凝土收缩、徐变以及基础沉降都处于发展期。采用上部和下部结构均不连接加宽时,加宽桥与原桥各自受力明确且互不影响,易于施工,基本不影响原高速公路的交通^[11],且新拓宽桥梁的设计、施工均可独立进行,比较简单^[12]。但是该方案上部新旧结构间的横向连接较难处理,且易出现问题。在汽车荷载作用下,新旧桥因刚度不一致,会产生较大的挠度差,且新桥的后期变形大于原桥,进而会导致新旧板横向连接部位铺装层的纵向裂缝、横桥错台和铰缝渗漏等病害发生。这不但影响了行车的舒适、安全和路容的美观,而且增加了后期的养护维修工作和维修费用。目前对该问题常采用两种解决措施。

1) 留置一条纵缝,并采用钢板包边

广佛高速公路早期加宽改造时,多数桥梁采用了留置纵缝的连接方式。运营结果表明,这些桥的桥面铺装极易损坏,沥青铺装层纵向裂缝和啃边现象均较严重,因此对这些桥梁均实施了桥面连续工程,以解决这一问题^[13,14]。同时,在留置纵缝的基础上,通过钢板包边来解决沥青铺装层啃边现象,但该连接形式需要刚性桥面,而钢板易打滑,严重影响行车安全,易造成事故。广州北环高速公路便采用了该方案,但其效果不佳。因此,留置纵缝的处理方案尚存在改进的空间。

2) 上部新旧结构采用伸缩缝连接

该方法在欧洲和香港的应用均较为成功,但它要求桥面必须是刚性的。在广佛高速改造扩建工程中,对一座柔性桥面采用该方法连接了新旧结构,其效果较差,尝试失败。另外,伸缩缝造价偏高,例如,国外常用的英国 BRITFLEX 系列伸缩缝造价约为 2400 元/m,因此其在国内不宜大范围推广。

2. 上部和下部结构均连接

新桥与原桥形成一体,减小了各种荷载(包括基础不均匀沉降、汽车活载、温度

荷载等)作用下新老桥连接处的不平衡变形。俄罗斯、日本等国在部分桥梁加宽改造中采用了此方法^[15],其下部结构一般在设计时便考虑了日后加宽的需求,按照加宽后宽度一次建成,该方法的一个核心问题是在不封闭交通情况下,保证混凝土的浇筑质量。日本规定,在施工时车辆通行相对挠度差在 0.2mm 以下时,允许在通车状态下浇筑混凝土。俄罗斯规定,使用期限不超过 10 年时,可以采用该连接方式。因国情所限,我国很少在设计之初即考虑日后加宽需求,应用较为困难。在我国,沈大高速公路桥梁采用此方式连接,但是沈大高速公路改造扩建项目是在全封闭的情况下进行的,不存在对原高速公路的交通产生干扰问题。而对于大多数高速公路,基本上不可能对原高速公路完全封闭,且其运营效果也有待检验。目前减少车辆干扰的措施基本上采用组织交通一侧通行,进而使得另一侧新旧梁拼接时混凝土不受扰动,但这对交通影响较大。

新桥与原桥上部结构的变形(如混凝土收缩、徐变等)一般不一致,且新桥基础沉降量大于原桥,进而会在新旧结构交接处产生较大的附加内力,易导致盖梁、墩台连接处产生裂缝;同时,上部新旧结构连接处也可能出现裂缝,这会严重影响行车安全和桥面美观,增加了后期维护的工作量;而且下部结构通过植筋连接的成本较高,且需要拆除既有主梁,施工复杂且施工期间的保通较为困难。值得注意的是,该方式不宜用于软土地区。

3. 上部结构连接、下部结构不连接

新桥与原桥上部连接形成整体,有利于上部结构受力,其行车舒适及路容美观;下部结构不连接,下部各自受力内力相互不影响,可以减少由于新桥与原桥上部结构的变形不一致、新旧桥基础不均匀沉降而产生的附加内力,且便于下部结构的维护。

该连接形式并不能完全解决新旧结构间变形不一致的问题。新旧桥上部结构的变形并不完全一致,且新旧桥基础沉降量也不相同,这均会产生一定的附加内力。该连接方式对施工工艺、施工组织的要求较高,且对通车也有一定的影响。目前,一般适当增加新桥桩长,并堆载存放一段时间后再拼接,以最大限度地减少新旧结构的不均匀变形,并降低新旧桥间的沉降差。实践证明,该处理方案能够有效地减小新旧结构间的附加内力。

该连接方式已在沪杭高速公路、南京浦珠路、沪宁高速公路、G4 和 G30 高速公路河南段等多个加宽改建工程中取得了广泛应用,它是我国高速公路改造扩建中新旧空心板桥拼接的主流形式。目前沪杭高速公路、南京浦珠路已经通车几年,采用该种连接形式加宽改造的桥梁使用情况较好,未出现桥面纵向裂缝、铰缝渗漏等病害。G4 高速公路郑漯段和安新段也已通车,效果均比较理想。所以本书将这种连接形式的加宽桥梁作为研究对象展开研究,以期能够为我国高速公路改扩建工程实施

提供参考。

装配式梁桥上部结构主要由纵梁、横向接缝和混凝土铺装组成。纵梁依靠横向接缝而协调工作。但是在实际运营中,横向接缝极易损伤而破坏该类桥上部结构的整体性,因而十分有必要开展该类桥梁加宽设计与加固研究,探讨荷载横向分布、接缝剪力计算和横向连接形式选择等设计方法,加固处理方法及整体性评价方法。

1.2 国内外研究现状

目前,关于空心板桥及其加宽改造研究的外文文献相对较少。在美国工程信息公司(Engineering Information Inc.,EI)数据库中,以“bridge widening”在题目、关键词和摘要中进行检索,截至2015年11月1日(以下检索日期与之相同,不再赘述),检索到关于桥梁加宽文献共675篇,其中绝大部分是针对箱梁桥、钢-混凝土组合梁桥等桥型加宽改造的研究,仅有4篇文献是关于空心板桥加宽改造的研究:一篇是东南大学叶见曙关于空心板桥拓宽时混凝土收缩、徐变效应引起的新、旧梁上的纵向应力情况及相关影响因素的研究^[16];另外三篇是著者对空心板桥改造扩建时,关于荷载横向分布计算、既有旧板承载力评定和新旧空心板横向拼接形式对荷载横向分布的影响的研究^[17]。以“hollow slab bridge”为题目、关键词和摘要在EI数据库中可检索到184篇文献,这些论文发表时间及作者国别分布情况见图1.1。研究成果主要集中在近10年,其中关于空心板桥加固的文献有21篇。从国别来看,中国有102篇,占总数的55.4%。从文献调研来看,关于空心板桥研究的外文文献数量偏少,且主要集中在空心板桥加固方面,关于空心板桥加宽方面的研究文献非常有限。

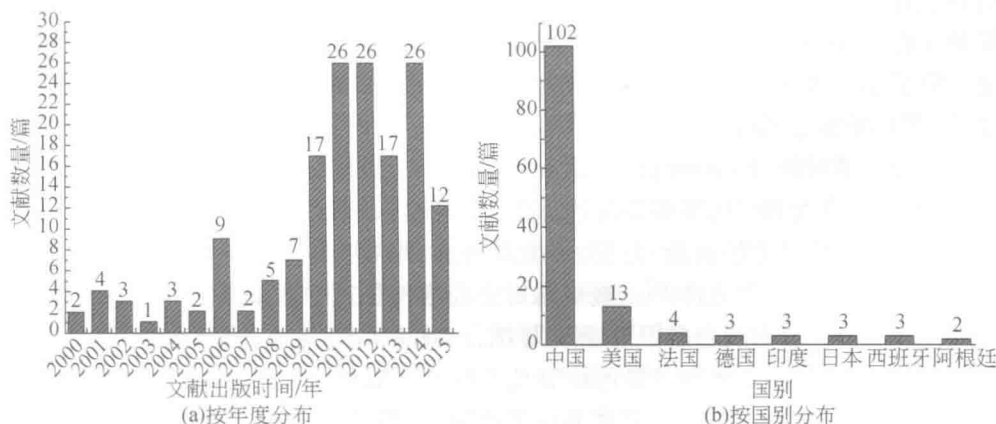


图 1.1 EI 数据库中有关空心板桥文献按年度和国别分布情况

在全球最大的中文文献检索平台——中国知网总库平台上,以“空心板桥”为主题词进行检索,共检索出文献 761 篇。2005~2015 年发表文献数量分布见图 1.2,其中硕士学位论文 95 篇,博士论文 5 篇,文献涵盖了空心板桥设计、施工和加固等相关问题的研究,其中关于空心板桥加宽改造方面的主要文献有 17 篇。

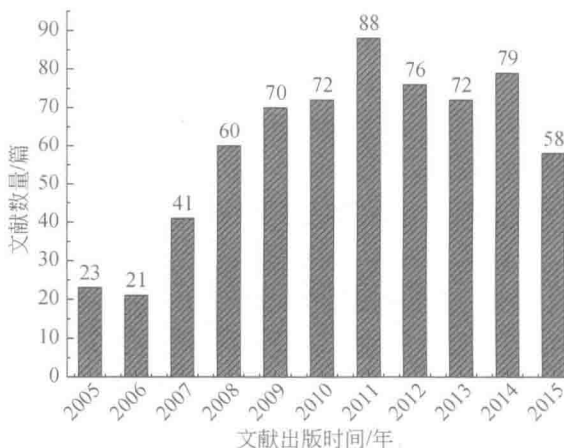


图 1.2 知网数据库中有关空心板桥文献按年度分布情况

这 17 篇空心板桥加宽改造文献中,绝大部分是空心板桥加宽改造工程实践的设计体会或施工总结。侯革等首先比较了惠农桥整体加宽方案,然后对上部结构和下部结构加固改造方法进行了研究,最后提出了惠农桥加宽改造设计最优化方案,该方案节约投资 19.6 万元,减少了施工工期,综合效益良好^[18]。陈重简要介绍了空心板桥加宽和加固的常用方法^[19]。张保民等对高速公路桥梁加固施工要点进行了介绍^[20]。吴大军对小潢河桥加宽中新旧桥通过桥面铺装钢筋网片连接进行了介绍,并说明其效果良好^[21]。李宁等结合 G4 高速公路郑州至漯河段改造扩建工程,介绍了新旧空心板拼接设计和施工以及旧桥病害的处理方法^[22]。李洪业介绍了辽宁省内某装配式预应力空心板桥加宽中旧桥加固,新旧板、盖梁和铺装连接,空心板加宽预压施工工艺^[23]。

部分文献对新旧空心板桥拼接形式进行了对比研究。王宗华对我国已经实施加宽的沪宁、沈大和广佛等多条高速公路桥梁加宽资料进行了调研和总结,进而系统地提出了桥梁加宽的概念、方法、分类及特点,并对各种加宽形式进行了对比分析,提出了各自的适用条件^[13]。杨海峰对空心板桥加宽中新旧桥常用的三种拼接方案进行了介绍并对比分析^[24]。郭琦等结合 G4 和 G30 高速公路河南段改造扩建工程设计,对新老空心板和盖梁连接形式进行了介绍和比较^[25]。何荣裕对旧桥加宽中新旧桥上、下部结构连接形式进行了比较,最后结合一座实际桥梁设计,提出了一种旧桥加宽方案,即新老板通过植筋连接,新老板间铰缝设置后浇带,桥面铺

装采用钢纤维混凝土^[26]。邱晓华采用有限元法对泾头简支空心板桥在不同加宽方式下其结构的受力性能进行了分析计算,结果表明,加宽对旧桥性能有一定改善,结构整体承载力提高,且结构的受力性能受横向联系刚度影响较大^[27]。宋宝奇简要介绍了既有空心板桥加宽时,新旧空心板和盖梁的各种连接方式及其异同点^[28]。贺再兴等以西安至宝鸡高速公路上一座空心板桥为例,研究了新旧板不同拼接方式下,加宽空心板桥各块板的荷载横向分布情况,结果表明,不同拼接方式均能降低旧桥横向分布系数值,整桥荷载横向分布得到了改善^[29]。

另外一些文献对加宽空心板桥的一些技术性问题进行了探讨,主要成果如下。

邓苗毅等^[30,31]研究了加宽新桥的预压处理方法。他们结合杜河拓宽改造工程,提出了施工中对加宽桥实施预压的方法,其目的是减少新旧桥梁结构地基基础不均匀沉降,减小新旧板连接处的拉应力,以保证上、下均连接的装配式空心板桥的加宽效果^[30];针对旧桥加宽中新旧桥沉降差较大的问题,提出了预压施工工艺的原理、计算方法和实现步骤,并在某桥加宽改造中进行了应用,其效果良好^[31]。

崔聚印对加宽效果评价进行了研究,在分析现有桥梁加宽改造安全性和适用性评价方法的基础上,提出了对装配式预应力空心板桥加宽效果的评价方法,并根据此方法对杜河桥加宽改造效果进行了评价^[32]。该方法采用结构静载实验检测评价新旧结构的连接性能,进而评判加宽改造效果。

李亚龙针对装配式预应力空心板桥加宽后的新旧板刚度递变问题进行了研究,提出了通过在新旧交接区域板间横向粘贴槽钢改变新旧板刚度,使得新旧板刚度实现递变,降低二者位移差,进而减小新旧交接处铺装的拉应力,预防纵缝的出现^[33]。

从文献调研来看,空心板桥年度出版数量和研究文献总量均较少。相对国外而言,我国对空心板桥的研究工作较为重视,研究成果相对较多,这是由我国国情决定的。我国交通基础设施薄弱,而交通需求量大,由于空心板桥结构简单,预制、架设方便,设计、建造均较简单,施工工期短,能够满足快速修建桥梁的要求,因而在我国中、小跨径桥梁中被大量采用。与之相应的设计、施工和维护方面的研究也比较多。但是在桥梁加宽方面,美国等发达国家的设计、施工水平明显高于我国。美国等发达国家的公路桥梁标准化程度高,常见跨径桥梁的加宽改造已经实现了标准化设计和施工,在荷载等级相同的情况下,旧桥加宽时,仅需对上、下部均按整米宽度加宽,设计与施工均为简单;而我国发展较晚,尚未形成标准化体系^[18]。

近年来,随着高速公路改造扩建的发展,我国陆续开展了空心板桥加宽改造研究工作,并初步取得了一些成果,但是这些成果以应用技术和方法为主,基本上未涉及上部结构加宽改造设计与加固。为表述方便,首先将本书用到的两个概念进行定义。将由截面特性、梁间距等均相同的梁组成的梁桥称为普通梁桥。同时,将由截面特性、梁间距等不完全一致的梁组成的梁桥称为非规整梁桥。通过文献调

研和工程实践可以看出,目前装配式梁桥加宽改造研究中尚存在以下不足。

(1)非规整装配式简支梁桥荷载横向分布分析方法研究较少。装配式梁桥设计校核,常采用基于荷载横向分布的实用空间计算方法。现有荷载横向分布简化分析方法,一般适用于普通梁桥。若用于非规整加宽梁桥会产生较大误差,迫切需要在现有分析方法的基础上,研究适用于非规整加宽梁桥的荷载横向分布分析方法,为该类桥梁加宽改造中上部结构的加宽设计与整体性分析提供理论支持。

(2)非规整板桥铰缝剪力分析与校核的研究较少。根据铰接板的基本假定,铰缝剪力是空心板协同工作的基础,因而获得铰缝剪力对于空心板桥加宽改造具有重要意义。非规整加宽板桥不能采用正交异性板模型计算分析,因而原先基于正交异形板法的,普通空心板桥铰缝剪力计算方法,不是很适用于非规整加宽空心板桥。所以需要研究适用于非规整加宽空心板桥的铰缝剪力分析方法,为空心板桥加宽改造中上部结构的整体性分析提供理论支持。

(3)上部结构整体性的评价方法研究不足。装配式简支梁桥上部结构整体性分析与评价,是既有装配式梁桥评价和增强横向连系加固措施加固效果和方案择优的基础。但是现阶段,基于单一实际工程的上部结构增强横向连系技术的研究较多,对如何评价加固效果的研究较少,因而需要系统地研究上部结构整体性的分析与评价方法,为装配式梁桥加宽改造提供技术支持。

(4)装配式梁桥加宽改造加固系统研究偏少。装配式梁桥加宽后需要加固处理,目前的研究主要针对单个工程加宽改造与加固,对旧梁和接缝如何加固仍然缺乏系统的研究。

1.2.1 荷载横向分布

装配式空心板桥空心板设计一般采用两种方法:基于荷载横向分布的实用空间计算方法和基于有限元软件的空间计算方法。前者是传统的设计方法,它借助荷载横向分布,将空间结构转化为平面结构,然后根据现行设计规范,进行空心板截面设计和校核。后者借助 MIDAS/Civil、桥梁博士和 ANSYS 等商用有限元分析软件,对空心板桥进行精确计算和校核。

采用有限元法设计装配式空心板桥是一种较为精确的空间计算方法。空心板桥上部结构可采用梁格法或者实体单元法分析计算。采用梁格法进行有限元分析时,一般采用虚拟横梁法模拟空心板间的横向连接,同时释放虚拟横梁的梁端约束来模拟板间铰接。目前关于虚拟横梁刚度的取值及截面形式的选取尚未有统一的标准可遵循,实际应用中设计人员常根据个人经验选取,因而计算主观性较大。将梁格法、实体单元法分析结果与现场实验对比,结果显示,实体单元法与实验结果基本一致,而梁格法则相差较大^[34]。虽然实体单元法的计算结果与实际较为吻

合,但实体单元法计算得到的是应力,可直接用于设计校核分析,但难以直接得到弯矩和剪力值,指导截面配筋设计。

实用空间计算采用荷载横向分布分析将空间问题转化为平面问题,然后可依据规范对空心板进行相关设计,该方法具有较高的设计精度,而且是设计人员最熟悉的方法,因而应用较为广泛。所以在装配式空心板桥上部结构加宽改造时,宜采用基于荷载横向分布理论的传统方法进行分析设计,必要时可采用有限元法进行复核。

1. 荷载横向分布的分析方法

装配式空心板桥由承重结构(空心板)及传力结构(桥面铺装、铰缝)组成。多片空心板通过铰缝和铺装连成空间整体结构。当桥上作用荷载 P 时,各片空心板将协同工作,形成了各片空心板间的内力分布^[35]。桥梁这种受力特性实际上已属于空间结构的力学分析问题。20 世纪 50 年代以来,国内外对该问题进行了诸多理论和实验研究,但因实际结构的复杂性,对内力分布进行精确计算仍难以实现,每种理论均存在一定的假设和适用条件。总体来说,空间计算理论的共同点是借助于理论分析得到的影响面直接求解结构上任意一点的内力或者挠度,这与单梁计算中应用影响线求解内力和挠度的思想基本一致。

如果用双指函数 $\eta(x, y)$ 来表示结构上某点截面的内力影响面,那么该截面的内力值可表示为 $s = P\eta(x, y)$ 。但车辆可以在桥梁的纵横向任意移动,因而加载位置较多,用影响面来求解最不利内力值仍然需要进行大量计算,所以空间计算方法很难在实际设计中应用。

实际设计中常采用实用空间计算方法。这种方法实质上是在一定的误差范围内寻找近似的影响面来代替精确的影响面,即把内力影响面 $\eta(x, y)$ 分解成两个单值函数的乘积,即 $\eta(x, y) = \eta_1(x)\eta_2(y)$,使桥梁空间结构的受力分析可以用荷载横向分布影响线 $\eta_2(y)$ 结合主梁平面内力影响线 $\eta_1(x)$ 来近似替换^[35,36]。通过这样一个转换,可将复杂的空间问题合理地转化为平面问题来解决。 $\eta_2(y)$ 表示当 $P=1$ 时在空间结构上沿 (a, y) 移动时, $x=a$ 处截面内力在 y 方向的分配比例关系,其中 a 是常量。所以荷载横向分布其实是内力横向分布,只不过变量分离后在计算形式上表现为荷载横向分布,一般习惯称为荷载横向分布。同时,荷载横向分布是针对纵向受力构件某一特定截面位置而言的。

根据实用空间计算,某板的荷载横向分布影响线可以定义为: $P=1$ 在空间结构上沿 $x=a$ 截面在不同板间纵向移动时,某板分配到的内力随 P 的纵向位置变化而变化的曲线。一组荷载在横向分布影响线上移动时,各荷载对应的影响线坐标值和最大的位置即为横向最不利布置位置,该值即为荷载横向分布系数。荷载横向分布影响线、荷载横向最不利布置位置及横向分布系数是荷载横向分布分析