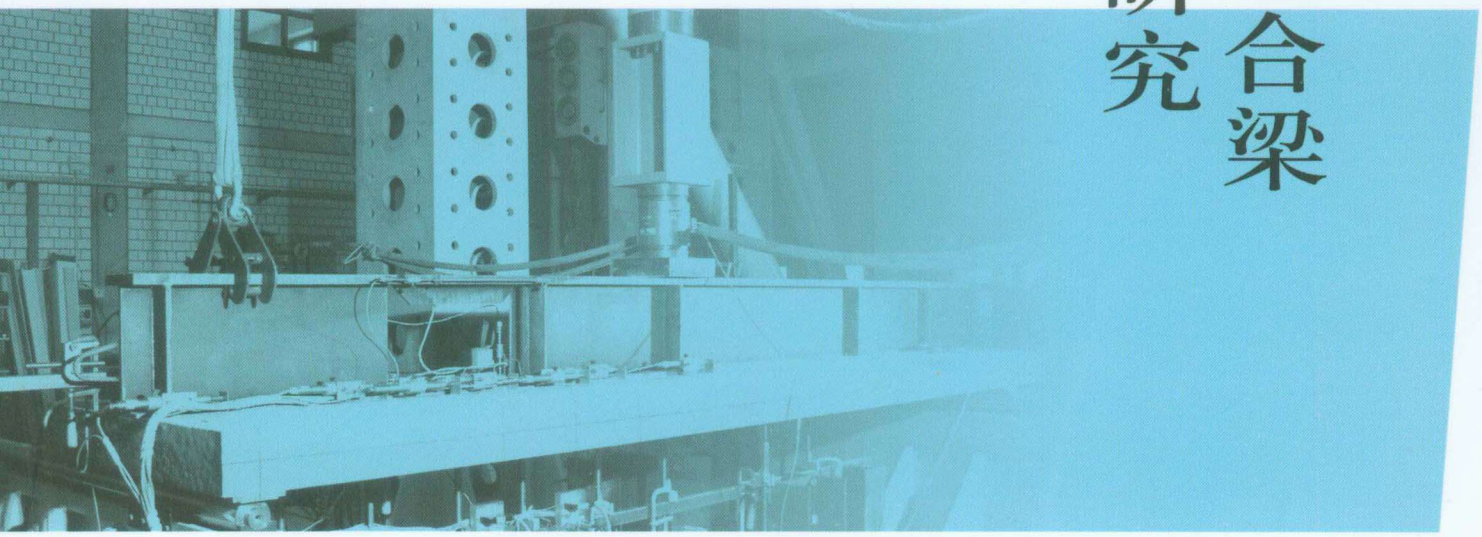
建筑与土木工程博士文库

Doctoral Thesis Collection in Architectural and Civil Engineering

负弯矩区钢-混凝土组合梁腹板开洞试验及理论研究

FUWANJU QU GANG-HUNNINGTU ZUHELIANG FUBAN KAIDONG SHIYAN JI LILUN YANJU

廖文远 周东华 著



重庆大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内容提要

本书以负弯矩区腹板开洞组合梁为研究对象，并通过试验、有限元数值模拟和理论计算等方法对其受力性能进行了系统研究，具体探讨了腹板开洞组合梁的技术优势，对一系列试验构件进行了试验研究，并对试件进行了非线性有限元分析，重点分析了不同影响参数对负弯矩区腹板开洞组合梁受力性能的影响；通过推导次弯矩函数，建立了负弯矩作用下腹板开洞组合梁的极限承载力计算方法；结合工程实际，探讨了几种针对负弯矩区腹板开洞组合梁的补强措施。

本书可供从事组合结构研究和设计领域的工程技术人员参考，也可作为高等院校土木工程学科硕士研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

负弯矩区钢-混凝土组合梁腹板开洞试验及理论研究/廖文远，周东华著. --重庆：重庆大学出版社，2019.6
(建筑与土木工程博士文库)
ISBN 978-7-5689-1649-3

Ⅰ.①负… Ⅱ.①廖… ②周… Ⅲ.①钢筋混凝土结构—组合梁—孔加工—实验研究 Ⅳ.①TU323.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 132352 号

负弯矩区钢-混凝土组合梁腹板开洞试验及理论研究

廖文远 周东华 著

策划编辑：范春青

责任编辑：陈 力 版式设计：范春青

责任校对：王 倩 责任印制：张 策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人：饶帮华

社址：重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编：401331

电话：(023) 88617190 88617185(中小学)

传真：(023) 88617186 88617166

网址：http://www.cqup.com.cn

邮箱：fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

POD：重庆新生代彩印技术有限公司

*

开本：787mm×1092mm 1/16 印张：10.75 字数：270 千

2019 年 6 月第 1 版 2019 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5689-1649-3 定价：48.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题，本社负责调换

版权所有，请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书，违者必究

前 言

钢-混凝土组合梁作为一种受力合理的结构形式，在大量工程实践中发挥了较好的技术和经济优势。与钢筋混凝土结构相比，组合梁具有截面尺寸小、自重轻、抗震性好以及施工周期短等优点；与钢结构相比，组合梁具有节省钢材、刚度以及稳定性好等优点。近年来，钢-混凝土组合梁不仅大量应用于桥梁结构，在高层建筑、大跨度公共建筑中也得到了广泛应用。

随着社会生活水平的日益提高，房屋建筑中需要铺设的管道设备（给排水、电气、暖通等）也越来越多，为了减少这些管道设备对空间的占用，工程人员想到了在组合梁腹板上开洞让管道设备穿过，从而降低楼层高度，节约建设资金，以进一步获得较好的经济效益。腹板开洞造成了组合梁受力性能的改变，只有在充分了解其受力特性的基础上，才能最大限度地降低开洞带来的不利影响，就可以更好地实现其使用功能。目前的研究主要针对正弯矩区的腹板开洞组合梁，对负弯矩作用下腹板开洞组合梁的研究并不多，缺乏对应的理论分析方法，也没有可以遵循的设计规范和技术规程，不利于腹板开洞组合梁的应用和推广。如果能够全面深入地了解负弯矩区腹板开洞组合梁的力学特性，找出影响其受力性能的主要因素，就可以最大限度地减少开洞带来的不利影响，提出更有针对性的构造措施和补强措施，从而更好地实现腹板开洞组合梁的使用价值，达到降低层高和节约建设资金的目的。本书的研究价值正是为这一经济价值的实现而服务的。本书通过试验研究、有限元数值模拟和理论计算等方法对负弯矩作用下的腹板开洞组合梁的受力性能进行了系统研究，为负弯矩区腹板开洞组合梁在实际工程中的设计与应用提供了参考。从科学意义上看，若能解决塑性理论用于分析和计算负弯矩区腹板开洞组合梁问题，将是对组合梁计算理论的扩展和完善。另外，本书完成的研究内容也有助于后续研究工作的开展。

本书系统地介绍了腹板开洞组合梁的发展和研究进展，重点研究了负弯矩区腹板开洞组合梁的受力性能，全书共分为 8 章。第 1 章为绪论，介绍了钢-混凝土组合梁的发展和应用以及腹板开洞组合梁的研究进展，阐述了腹板开洞组合梁在实际工程中的使用价值和研究意义。第 2 章为试验内容，研究了负弯矩区腹板开洞组合梁的破坏模式和受力性能，通过试验发现，负弯矩作用下的组合梁腹板开洞后，洞口区域截面不再符合平截面假定，混凝土翼板对负弯矩区腹板开洞组合梁的抗剪承载力有极大的贡献，远高于对正弯矩区抗剪承载力的贡献。第 3 章内容为有限元分析，对试验所使用的组合梁试件进行了非线性有限元分析，得到了能够很好地模拟负弯矩区腹板开洞组合梁受力特性的有限元模型。第 4 章内容为参数分析，分析了不同影响参数对负弯矩区腹板开洞组合梁受力性能的影响，并从分析结果中找出了各种参数变化所带来的不利影响和有利因素，为工程实际应用提供了一些参考。第 5 章内容为理论计算，以空腹桁架为力学模型，根据极限状态下洞口 4 个角截面上的塑性应力分布推导了次弯矩函数，建立了负弯矩作用下腹板开洞组合梁的极限承载力计算方法，该方法考

虑了洞口上方混凝土板的抗剪作用,更接近实际情况。第6章内容为补强方法,结合工程实际,提出了几种针对负弯矩区腹板开洞组合梁的补强措施。第7章推导了带补强措施的负弯矩区腹板开洞组合梁极限承载力计算公式,推导过程中考虑了补强板对洞口区域受力性能的有利影响,并对设置了不同补强板的负弯矩区腹板开洞组合梁进行了计算分析。

本书由廖文远与周东华教授合作完成。本书的研究工作得到了国家自然科学基金面上项目(项目批准号:50778086)、国家自然科学基金地区科学基金项目(项目批准号:51668027、51468026、51268022)、国家自然科学基金青年基金项目(项目批准号:51308269、51708486)以及昆明理工大学的资助,在此表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

编　者

2018年12月

目 录

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　钢-混凝土组合结构的发展与应用简介 …… 1

1.2　钢-混凝土组合梁的发展与研究概述 …… 2

1.3　腹板开洞组合梁的研究概况 …… 8

1.4　研究的背景及意义 …… 11

1.5　研究方法与主要内容 …… 12

第 2 章　负弯矩区组合梁腹板开洞试验研究 …… 14

2.1　引言 …… 14

2.2　试验目的和内容 …… 14

2.3　试验概况 …… 15

2.4　数据计算处理 …… 22

2.5　试验结果与分析 …… 25

2.6　小结 …… 46

第 3 章　负弯矩区腹板开洞组合梁有限元分析 …… 48

3.1　引言 …… 48

3.2　有限元理论基本思路 …… 49

3.3　有限元模型的建立 …… 49

3.4　非线性求解方法 …… 55

3.5　收敛准则及收敛控制 …… 56

需要全本请访问 www.ertongbook.com

3.6 有限元模型 …… 57
3.7 负弯矩区组合梁弹性分析 …… 58
3.8 负弯矩区腹板开洞组合梁非线性有限元分析 …… 65
3.9 小结 …… 73

第 4 章 负弯矩区腹板开洞组合梁受力性能参数分析 …… 75

4.1 引言 …… 75
4.2 常见的腹板开洞组合梁破坏形式 …… 75
4.3 负弯矩区腹板开洞组合梁的洞口受力特征 …… 76
4.4 影响参数选择 …… 77
4.5 小结 …… 101

第 5 章 负弯矩区腹板开洞组合梁极限承载力实用计算方法 …… 102

5.1 引言 …… 102
5.2 理论基础 …… 103
5.3 计算方法 …… 104
5.4 负弯矩区腹板开洞组合梁次弯矩函数推导 …… 105
5.5 理论计算结果分析 …… 116
5.6 小结 …… 120

第 6 章 负弯矩区腹板开洞组合梁补强措施研究 …… 122

6.1 引言 …… 122
6.2 腹板开洞钢梁的构造及补强措施 …… 122
6.3 负弯矩区组合梁腹板洞口补强方法 …… 124
6.4 其他有效的补强措施 …… 129
6.5 补强措施的选择 …… 131
6.6 小结 …… 132

第 7 章 带补强措施的负弯矩区腹板开洞组合梁极限承载力实用计算 …… 133

7.1 引言 …… 133

7.2 理论基础 …… 134

7.3 带补强措施的负弯矩区腹板开洞组合梁次弯矩函数推导 …… 134

7.4 理论计算结果 …… 148

7.5 小结 …… 151

第 8 章 结论与展望 …… 152

8.1 结论 …… 152

8.2 展望 …… 154

参考文献 …… 155

第1章
绪　论

1.1　钢-混凝土组合结构的发展与应用简介

1.1.1　钢-混凝土组合结构的概念与特征

组合结构是由组合构件组成的结构，组合构件由两种或者两种以上性质不同的材料组成，而且在荷载作用下可以整体共同工作。钢-混凝土组合结构就是由钢与混凝土组合而成的结构，通常简称组合结构。组合结构中常见的构件形式主要包括钢-混凝土组合梁、压型钢板-混凝土组合板、钢管混凝土结构、钢骨混凝土结构和外包混凝土结构等。钢-混凝土组合结构是在钢筋混凝土结构和钢结构基础上发展而来的一种新型结构，充分利用了混凝土与钢材的受力特性。同钢筋混凝土结构相比，组合结构具有截面尺寸小、自重轻、空间利用率高和施工周期短等优点；同钢结构相比，组合结构具有刚度大、稳定性好、耐火及耐久性好等优点。

经过了半个世纪的发展与研究，钢-混凝土组合结构已经成为既有别于钢筋混凝土结构和钢结构，又与之密不可分的结构学科。其适用范围也较为广泛，包括了多层及高层建筑、大跨度桥梁、地下工程及矿山工程等多种结构领域。随着钢-混凝土组合结构的迅速发展，组合结构已经成为与传统四大结构（木结构、砌体结构、钢筋混凝土结构和钢结构）并列的第五大结构。

1.1.2　钢-混凝土组合结构的发展

钢-混凝土组合结构出现的时间最早可以追溯到19世纪末，美、英等国的工程人员为了达到防腐蚀和耐火的目的，使用混凝土将钢梁、钢柱包裹起来或者向钢柱内灌注混凝土，这就开创了组合结构的应用历史，但当时人们并没有意识到钢与混凝土之间的组合作用。随着组合结构在实践工程中的应用，人们开始注意到钢与混凝土组合之后构件的刚度和承载力会有所提高。组合结构的发展历程大致可以分为下述几个阶段。

发展阶段1：19世纪末20世纪初，这一阶段是组合结构出现的初期，工程人员并未意识到组合作用的存在，只考虑了防腐蚀和耐火的效果。1879年英国的赛文铁路桥率先使用了钢管混凝土桥墩，为了防止内部锈蚀在钢管内灌注了混凝土。1897年，美国人John Lally通过在

圆管中填充混凝土作为房屋承重柱。从20世纪20年代开始,人们开始注意到了组合作用的有利影响,开始在混凝土板与钢梁之间设置各种形式的构造连接,组合结构开始进入发展阶段。

发展阶段2:20世纪中期,在这一阶段具有先进技术的西方国家,如日本等国对组合结构进行了较为深入的研究和应用,一些国家也开始制订相关的技术规范和规程,其中对组合梁的设计和构造较多一些。美国州际公路协会于1944年制订的《公路桥涵设计规范》包含了有关组合梁的规定,德国于1954年和1956年分别制订了《桥梁组合梁标准》和《房屋建筑组合梁标准》,英国于1967年制订了《钢-混凝土组合结构梁》设计标准。经过大量研究分析,人们对组合梁的设计与施工有了更多的认识,组合梁的应用范围开始从桥梁结构向民用建筑延伸,组合梁的设计理论也逐渐完善。

发展阶段3:20世纪70年代至今,在此阶段组合结构的应用范围已经非常广泛,组合结构的发展速度逐渐接近钢结构,由于组合结构可以在一定领域内代替钢筋混凝土结构和钢结构的作用,这一有利的发展趋势引起了很多结构专家的注意,从而促进了组合结构的研究与发展。随着研究的深入以及技术的进步,组合结构的发展也逐渐多样化,以组合梁为例,出现了预制装配式钢-混凝土组合梁、钢-混凝土叠合板组合梁、预应力钢-混凝土组合梁以及钢桁架-混凝土组合梁等新的结构形式[11-15]。近年来,国内外出现了大量使用钢-混凝土组合结构的高层及超高层建筑,如1999年建成的总高420.5 m的中国上海金茂大厦,2004年建成的总高508 m的中国台北101大厦以及2010年建成的高达828 m的阿联酋哈利法塔,如图1.1所示。



(a)中国上海金茂大厦



(b)中国台北101大厦



(c)阿联酋哈利法塔

图1.1 组合结构在超高层建筑中的应用

1.2 钢-混凝土组合梁的发展与研究概述

1.2.1 钢-混凝土组合梁的特点

钢-混凝土组合梁是通过抗剪连接件将混凝土翼板与钢梁连接起来共同工作的横向承重

结构构件。抗剪连接件起到了抵抗界面掀起和相对滑移的作用,确保了混凝土板与钢梁能够共同工作,栓钉是目前使用较多的一种抗剪连接件。组合梁在荷载作用下能够充分发挥钢材和混凝土的材料特性,工程实践表明,组合梁在满足结构功能要求的同时还具有较好的技术经济优势。概括起来,钢-混凝土组合梁具有以下特点:

①节省钢材。组合梁截面受力较为合理,混凝土代替了部分钢梁的作用,大幅减少了钢材用量,可以降低工程造价,工程实践表明,组合梁设计方案的用钢量比钢结构节省了20% ~40%。

②刚度大、延性好。混凝土与钢梁在组合作用下共同工作,整体性好,截面的竖向和侧向刚度都有所提高,挠度明显减小;组合梁有很好的耗能效果,表现了良好的抗震性能。

③减小截面高度,增加楼层净高。同等截面下组合梁的惯性矩比钢梁要大很多,起到了减小梁高、增加楼层净高的作用,可以使房屋总高度降低,从而降低了工程造价。

④稳定性好、跨度大。混凝土板的存在使组合梁的上翼缘有很大的侧向刚度,同时截面相对较小,使组合梁具有很好的整体稳定性和局部稳定;一般情况下,钢-混凝土简支组合梁的高跨比可以达到1/16 ~1/20,连续组合梁的高跨比则可以达到1/25 ~1/35。

⑤有较高自振频率。工程实践表明,对于一些承受低频竖向振动的大跨度结构,如大跨度人行天桥,当采用钢结构设计时,很容易发生共振,大大影响了天桥的正常使用和舒适程度;如果采用组合梁设计方案,可以在不增加截面高度和用钢量的情况下提高自振频率,大幅降低振动。

⑥施工中的优势。对于使用了压型钢板的组合梁,施工中可以节省模板和支模工具,应用于市区桥梁施工时,可以减少对桥下交通的影响;在组合梁的钢梁上可以较为方便地固定和焊接各种管线装置,省去了大量的预埋件;组合梁可以用于房屋建筑的加固与改建,可以改善施工条件,提高施工速度。

⑦组合梁的抗剪连接件在焊接时需要使用专门的大功率焊接设备,而焊接好的抗剪连接件会给钢梁的吊装带来一定的困难;组合梁耐火性能较差,需要考虑防火和防腐蚀等措施。

综上所述,组合梁的大部分特点都展现了其经济技术优势,组合梁在实际工程中的应用将越来越广泛。

1.2.2 钢-混凝土组合梁的研究概况

1)钢-混凝土组合梁在国外的研究进展

(1)20世纪初期

针对钢-混凝土组合梁的研究开始出现,Andrews[1]提出了基于弹性理论的换算截面法,该方法假定混凝土和钢梁为理想的弹性体,二者之间连接可靠,变形一致,根据弹性模量比将两种材料换算为一种材料进行计算。这一方法被许多国家的设计规范采用,一直作为弹性分析和设计的基本方法。但由于混凝土并非理想的弹性体,而且混凝土和钢梁也不会完全共同工作,界面存在滑移和掀起,所以该方法的计算结果将偏于不安全。1922年,Maning等学者对外包混凝土钢梁进行了研究,发现在混凝土与钢梁的界面上存在黏结力,其可以产生一定

的组合作用。

(2)20 世纪 30 至 50 年代

组合梁开始逐步使用抗剪连接件,瑞士学者对钢-混凝土组合梁中的机械连接件进行了研究[2]。西方国家开始制订有关组合梁的技术规程,并大部分用于桥梁的设计。1944 年,美国高速公路和交通运输协会首次将组合梁有关条文列入有关规范,1945 年,德国也制订了与组合梁相关的规程。1951 年,Newmark 等[3]对不完全剪切连接的组合梁进行了试验研究和理论分析,提出了混凝土和钢梁交界面的纵向剪力微分方程求解方法。Viest[4]、Thurlimann[5]等通过推出试验方法对栓钉受力性能进行了较为全面的研究,提出了抗剪连接件临界承载力经验公式。Davies[6]进行了改变栓钉布置形式、数量和间距的推出试验研究,发现了栓钉布置形式与其抗剪承载力密切相关。

(3)20 世纪 60 年代

塑性理论分析方法开始应用于组合梁。1960 年,Viest[7]对已有试验结果进行了总结,并对不同的组合梁计算方法进行了分析对比,还概述了预应力组合梁的研究前景。Chapman[8]于 1964 年对 17 根简支组合梁进行了试验研究,试验中使用了不同的抗剪连接件及间距,还改变了梁的跨度和加载方式,得到了混凝土板压溃和栓钉破坏两种破坏模式,试验表明纵筋对组合梁的极限承载力计算影响不大,可以按极限平衡法设计栓钉连接件。1965 年,Barnard[9]通过研究发现:抗剪连接件在荷载作用下发生变形,交界面一定会存在滑移,混凝土板与钢梁的弯曲刚度不同,必然会发生竖向掀起作用,因此组合梁按完全剪切连接计算得到的极限承载力比实测极限承载力要大。1968 年,Adekola[10]对简支组合梁的混凝土翼板有效宽度进行了研究,得到了考虑剪力滞后效应以及截面尺寸和材料特性变化时的有效宽度计算法。1969 年,Davies[11]对参数不同的简支组合梁进行了试验研究,在试验基础上得到了简支组合梁的纵向抗剪计算公式。

(4)20 世纪 70 年代

1971 年,Ollgaard 等[12]根据推出试验结果,得到了栓钉承载力计算公式,该公式形式简单,适用性强,被各国规范广泛采用。1972 年,Colville[13]对用于桥梁中的曲线组合梁进行了纯扭及弯扭试验;Johnson、Willmington 对部分抗剪连接组合梁进行了试验研究;Yam、Chapman 等[14]对两跨连续组合梁进行了试验研究。1977 年,Singh、Mallick 等[15]对工字型钢-混凝土组合梁进行了抗扭试验,结果表明钢梁对组合梁极限抗扭承载力的贡献较小。1978 年,Ansourian 等[16]对 6 根简支组合梁进行了试验,同时进行了弹性和弹塑性数值分析,分析中考虑了滑移和残余应力的影响。随着有限元理论的发展,数值分析方法也开始用于组合梁的研究领域。

(5)20 世纪 80 年代

1980 年 Baus 等[17]对弯扭作用下的组合梁进行了试验研究。1982 年,Akao 等[18]进行了栓钉推出疲劳试验,试验发现栓钉高度不会影响疲劳强度,在试验基础上进行了可靠性分析,并提出了重复荷载作用下栓钉的疲劳承载力计算公式;Ansourian 等[19]分别对 6 根连续组合梁和 4 根正弯矩区组合梁的转动能力进行了试验研究,给出了计算钢梁破坏时最小非弹性转

需要全本请访问 www.ertongbook.com

动及变形的计算公式,试验发现,当组合梁采用密实截面钢梁并具有足够的抗剪连接件时,即使对塑性铰转动能力有较高的要求,按塑性整体分析方法和塑性抗弯承载力进行设计也有足够的可靠性。1984 年,Hawkins、Mitchell[20]对 13 个试件进行了单调加载试验,对 10 个试件进行了循环加载推出试验,试验变化参数为是否使用压型钢板以及压型钢板的形状和方向等,试验观察到了 4 种破坏类型:连接件剪切破坏、混凝土受拉破坏、板肋剪切破坏和板肋冲切破坏。1986 年,Oehlers 等[21]研究了受单向循环和反向循环加载的大量推出试验结果,得到了每次疲劳循环加载引起的残余滑移变形量。1987 年,Basu 等[22]对两跨部分预应力连续梁进行了试验研究,在组合梁的负弯矩区施加了预应力,对负弯矩区组合梁的力学性能进行了分析。

(6)20 世纪 90 年代

1990 年,Wright[23]对 8 根部分抗剪连接的简支钢-压型钢板混凝土组合梁进行了试验,结果表明:组合梁中抗剪连接件的刚度要大于推出试件中抗剪连接件的刚度,在抗剪连接程度较低的情况下,需要考虑抗剪连接件的非线性特性,并提出了一种考虑组合梁非线性滑移特征的分析模型。Crisinel[24]对 3 根采用栓接角钢抗剪连接件的钢-压型钢板混凝土简支组合梁进行了试验研究,结果表明:栓接角钢抗剪连接件是有效的抗剪连接形式,同时提出了一种对截面进行折减的方法以考虑部分抗剪连接对组合梁承载力的影响。Hiragi 等[25]在总结了 179 个静力和 145 个疲劳试验数据的基础上,使用回归分析的方法得到了栓钉疲劳强度计算公式。1991 年,Bradford 等[26]对 4 根简支组合梁进行了试验研究,对其中两根试件施加均布荷载,另两根则在自重下持荷 200 天以观察混凝土板的收缩和徐变,得到了一致性较好的结果。1992 年,Bradford 等[27]对钢-混凝土简支组合梁的长期性能进行了研究分析,发现滑移应变随混凝土的收缩徐变而逐渐增大,并提出了一种计算钢-混凝土组合梁长期效应的简化方法。1994 年,Porco 等[28]使用有限元方法对钢-混凝土组合梁进行了参数分析,在有限元模型中考虑了混凝土裂缝的影响。1995 年,Kemp 等[29]对 7 根连续组合梁的非弹性性能进行了试验研究,研究发现组合梁的转动能力与钢梁的截面受压高度和负弯矩区的横向长细比有很大关系。1996 年,Gattesco 等[30]对栓钉连接件在双向循环荷载作用下的性能进行了研究,发现在双循环荷载作用下栓钉可能超过弹性范围而进入屈服状态。1997 年,Taplin 等[31]对对称循环加载和单向循环加载作用下的栓钉累计滑移进行了研究,提出了循环加载水平与每个加载循环滑移增长率的关系式;同年,Yen 等[32]对 44 根钢-混凝土简支组合梁在静力和疲劳荷载下的试验结果进行汇总并得出结论:组合梁在疲劳荷载作用下混凝土翼板首先开裂并出现裂缝,裂缝开展最终导致了试件破坏,疲劳试验中组合梁的抗弯刚度会逐渐下降。1998 年,Wang 等[33]对部分抗剪连接的组合梁挠度进行了分析研究,提出了通过抗剪连接件的刚度来计算部分抗剪连接组合梁最大挠度的计算方法。1999 年,Fabbrocino 等[34]通过对钢-混凝土组合梁进行非线性分析,分析发现抗剪连接件对组合梁的整体工作性能有很大影响,模拟过程中剪切连接件的选择非常关键,并且给出了抗剪连接件的受力和相对滑移曲线关系式;同年,Thevendran 等[35]使用有限元软件 ABAQUS 建立了简支曲线型组合梁的三维有限元计算模型,分析发现曲线型组合梁的抗弯承载力随着梁跨度与曲线半径比的增加而减小;同年,Manfredi 等[36]通过试验发现组合梁的负弯矩区在很低的应力下就会表现出较强的非线性性能。

(7)21 世纪至今

2000 年,Thevendran 等[37]对 5 根简支曲线组合梁进行了试验研究,试验结果与有限元结果吻合良好。2001 年,Salari 等[38]对钢-混凝土组合梁的非线性混合有限元模型进行了分析研究,研究发现,对单调和循环荷载作用下的部分剪切连接组合梁,使用内力和滑移相对独立的混合模型可以准确地反映混凝土板和钢梁之间的相对滑移。2002 年,Baskar 等[39]使用三维有限元模型对负弯矩作用下的钢-混凝土组合梁进行了非线性分析,其可以较好地反映组合梁在极限荷载下的受力特性;同年,Amadio 等[40]使用 ABAQUS 软件对钢-混凝土组合梁的混凝土翼板有效宽度进行了弹性分析和弹塑性分析。分析表明,弹性分析时翼板有效宽度受抗剪连接件刚度的影响较大,弹塑性分析时,翼板有效宽度受塑性重分布的影响会有所增加。2003 年,Faella 等[41]使用参数分析方法对简支组合梁的挠度进行了非线性分析,找出了多个对组合梁挠度影响较大的非线性参数。2004 年,Loh 等[42]对负弯矩作用下的部分抗剪连接组合梁的受力性能进行了研究,研究表明,组合梁的极限承载力并没有随着抗剪连接程度的降低而明显下降,其延性却有了一定的提高,同时针对实际应用提出了修正的刚-塑性方法;同年,Fragiacomo 等[43]使用改进后的切线刚度法对混凝土板和钢梁的非线性性能进行了分析,研究了材料的非线性特性对组合梁的影响程度。2011 年,Zona 等[44]通过对比分析建立了较为精确的模型,并在此基础上分析了部分交互力作用下的钢-混凝土组合梁在弯曲及剪力共同作用下的力学性能。2013 年,Lin 等[45]对 8 根组合梁进行了试验,研究了组合梁在疲劳及负弯矩作用下的力学性能,同时分析了不同加载方式、剪切连接件、橡胶涂层及钢纤维混凝土等多种因素对组合梁力学性能的影响。

2)钢-混凝土组合梁在国内的研究进展

组合梁在我国的应用与研究起步相对较晚。20 世纪 50 年代,国内开始将组合梁用于桥梁工程,在 1957 年建成的武汉长江大桥,其上层公路桥的纵梁就使用了组合梁,但是当时仅仅将其作为强度储备以及施工方便,并没有考虑混凝土与钢梁之间的组合作用。此后,组合梁还在电力、冶金、煤矿、交通等工程中有所应用,如唐山陡河电厂、太原第一热电厂工程中的组合楼层采用了叠合板组合梁;承德钢厂使用了 18 m 跨度的钢-混凝土组合吊车梁,比纯钢吊车梁节省了 20% 的钢材;沈阳煤矿设计院在 1963 年将组合梁结构用于煤矿井塔结构;我国铁道部还编制了公路及铁路组合梁桥梁的标准图集。近 20 年来,随着我国经济的迅猛发展,组合梁的应用越来越广泛,应用领域和规模都有较大变化。很多超高层建筑都使用了组合结构,如上海环球金融中心(492 m)、深圳赛格广场(355.8 m)等。此外,组合梁在桥梁工程方面的应用也较为广泛,如 1993 年建成的北京国贸桥,其主跨采用了钢-混凝土叠合板连续组合梁;跨度 423 m 的上海南浦大桥和跨度 602 m 的杨浦大桥均为采用了钢-混凝土组合梁的斜拉桥;2001 年在北京机场高速苇沟桥的加固改造中使用了钢-混凝土叠合板;2013 年建成的跨兰西高速公路特大桥是国内首次采用的 1 联(80 m + 168 m + 80 m)的连续梁-钢桁组合结构。大量的工程实践证明,钢-混凝土组合梁具有很好的经济效益和社会效益,符合我国国情,具有广阔的应用前景。

我国对组合梁的系统研究开始于 20 世纪 80 年代,原郑州工学院、哈尔滨建筑工程学院、山西省电力勘测设计院、华北电力设计院以及清华大学等单位研究者先后对钢-混凝土组合

梁进行了研究,取得了大量有理论意义和实用价值的研究成果[46]。这一时期国内对组合梁的研究以试验及理论分析为主,内容包括:组合梁的破坏形态和极限承载力、剪切连接件的工作性能、刚度和滑移对组合梁受力性能的影响、组合梁的抗弯承载力;对于连续组合梁性能的研究也开始出现,如连续组合梁的内力重分布、负弯矩区承载力及裂缝问题等。

在20世纪90年代组合梁研究在我国进入了关键的发展阶段。从1991年开始,聂建国等对组合梁进行了大量的研究工作[47-50]:1991年,通过试验研究了剪力连接件的工作性能,提出了计算剪力连接件实际承载力的计算方法;1995年,提出用折减刚度法来分析滑移效应对组合梁变形的影响,得到了实用计算公式;1997年,对混凝土翼板的纵向抗剪性能进行了试验研究,建立了纵向抗剪计算模型和公式,分析了影响纵向开裂的因素。1998年,对叠合板组合梁进行了抗震研究,并提出了组合梁的延性指标和刚度折减系数。1999年,对组合梁的恢复力模型进行了分析研究,同年对高强混凝土组合梁的栓钉连接件的设计计算进行了研究。

1995年,王连广等[51]对钢-轻骨料混凝土组合梁和火山渣混凝土组合梁进行了研究,得到了不同类型的抗剪连接件的荷载-滑移方程。

进入21世纪以来,我国在钢-混凝土组合梁方面的研究范围更广,获得的成果也比较多。目前,大部分研究人员对组合梁的研究内容主要包括钢-混凝土组合梁负弯矩区受力性能的研究、预应力组合梁工作性能的研究、高强混凝土组合梁工作性能研究以及与组合梁理论研究有关的新方法等,简要阐述如下。

(1)负弯矩区钢-混凝土组合梁的研究

聂建国、樊健生等[52,53]对负弯矩区组合梁的刚度及承载力进行了研究,分析了负弯矩作用下组合梁的钢梁与混凝土板之间的滑移效应以及混凝土与纵向钢筋间的黏结滑移对刚度的影响,提出了对应的计算模型和计算方法;薛建阳[54]、付果[55]等对组合梁抗剪性能进行了试验研究,结果表明:组合梁负弯矩区的界面滑移规律与正弯矩区的不同,同时发现,无论组合梁翼板处于受压区还是受拉区,其对抗剪承载力都有明显的贡献,目前规程中仅考虑钢梁抗剪是偏于保守的;张彦玲,李运生等[56]计算了组合梁负弯矩区的有效翼缘宽度,将计算结果与试验结果进行了对比,并分析了组合梁负弯矩区混凝土开裂对剪力滞效应和有效翼缘宽度的影响。

(2)预应力组合梁工作性能的研究

郑则群等[57]通过编制非线性有限元程序对预应力钢-混凝土组合梁受力全过程的力学性能进行了研究分析,能较精确地预见和分析加载受力过程中预应力增量、界面相对滑移、组合梁极限承载力等受力性能;余志武、郭风琪等[58]对负弯矩作用下部分预应力钢-混凝土组合梁进行了试验研究,分析了裂缝的产生及发展规律;聂建国、陶慕轩等[59]对预应力钢-混凝土连续组合梁的变形计算进行了分析,提出混凝土支座开裂区长度以及预应力筋内力增量的计算公式,为工程设计提供了参考。

(3)高强混凝土组合梁工作性能研究

许伟、王连广等[60]通过对钢与高强混凝土组合梁进行试验,对其变形性能进行了分析,推导了不同荷载作用下的钢与高强混凝土组合梁的变形计算公式;聂建国等[61]通过试验研究了钢-高强混凝土组合梁在静载作用下的抗弯性能,并对现行规范中关于组合梁正截面受

弯承载力计算公式进行了修正。

(4)理论研究有关的新方法

聂建国等[62]研究了横向荷载作用下单向简支组合梁-板体系在翼缘板中存的剪力滞后现象,通过拟合得到了有效宽度的简化计算公式。周东华等[63]提出了钢-混凝土组合梁挠度计算的新方法,即有效刚度法,该方法力学概念清晰、形式简单,计算精度较高。

1.3 腹板开洞组合梁的研究概况

近年来,随着建筑技术的不断发展,多层及高层建筑逐渐成为大中城市的建设主流,由于钢-混凝土组合梁自身具有优良特性,组合梁的使用日益广泛。为了满足不断提高的使用要求,需要在房屋建筑中设置更多的管道设备(给排水、电气、通信等),这会占用较多的建筑空间,于是工程人员通过在组合梁的钢梁腹板上开洞让这些管道设备穿过,可以减少其对空间的占用,降低层高,从而降低工程造价,获得较好的经济效益。因此,国内外研究者开始对腹板开洞组合梁进行一系列研究。

1.3.1 腹板开洞组合梁在国外的研究进展

早期对腹板开洞的研究主要针对钢梁,从20世纪60年代开始,国外研究者以试验为基础对腹板开洞钢梁进行了大量研究,例如:Redwood等[64,65]对没有补强措施的腹板开洞钢梁进行了试验研究,并为腹板开洞钢梁的实际设计提出了建议;Cooper等[66]对洞口设置补强板的腹板开洞钢梁进行了试验研究,结果表明,无论是双面还是单面设置,补强板都可以提供足够的刚度。

从20世纪80年代开始,国外开始出现较多关于腹板开洞组合梁的研究,研究对象以正弯矩区的腹板开洞组合梁为主。

1980年,Todd和Cooper等[67]提出了一种简化的针对矩形洞口内力的计算方法,该方法假定腹板开洞组合梁的剪力全部由钢梁承担,由于忽略了混凝土板的抗剪作用,计算结果偏于保守。

1982年,Clawson、Darwin等[68,69]对腹板开洞组合梁进行了试验研究,结果表明,弯矩比对腹板开洞组合梁的破坏模式有很大影响。同时,他们还提出了考虑混凝土抗弯及抗剪作用的承载力计算模型,得到的计算结果比较准确,但计算过程较为复杂。

1983到1984年,Redwood等[70]对腹板开洞简支组合梁进行了试验研究,研究重点包括抗剪连接件的数量和布置方式以及组合作用形成前施工荷载对钢梁的影响等;Clawson、Darwin等提出的M-V相关曲线虽然考虑了混凝土的作用,但是计算不便,在此基础上,Rewood等[71]提出只需确定3个未知量M_m、V_m和M'_m就可以确定洞口处的M-V相关曲线,对应曲线如图1.2所示。图中的二次曲线通过(V_m,M'_m)和(0,M_m)两点,直线段通过(V_m,M'_m)和(V_m,0)两点,M'_m为不完全组合作用下组合梁洞口中心截面处的纯弯承载力,M_m为完全组合作用下组合梁洞口中心截面处的纯弯承载力;V_m代表洞口中心截面处的纯剪承载力。

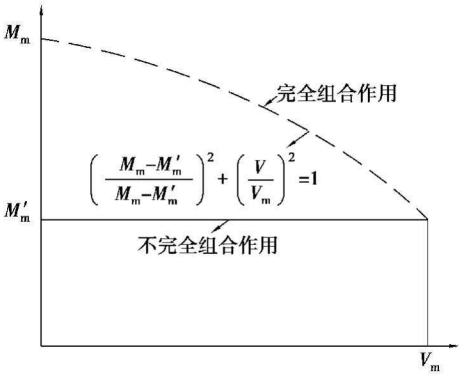
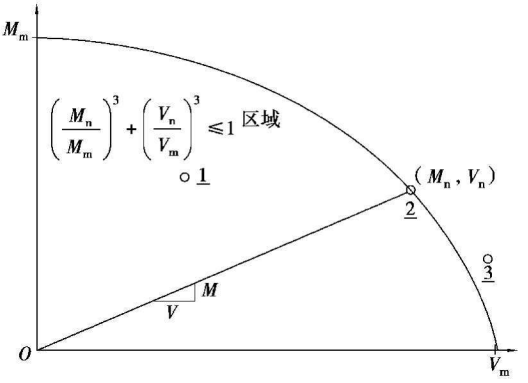


图 1.2 洞口剪力-弯矩相关曲线

1988 年,Donahey、Darwin 等[72]对 15 根腹板开洞压型钢板组合梁进行了试验研究,研究了栓钉数量及布置、弯矩比、压型钢板厚度等因素对组合梁受力性能的影响,试验表明腹板开洞组合梁的极限承载力与混凝土翼板的破坏形式有关系;同年,Darwin 等[73]在 Redwood 提出的模型基础上完善了弯矩-剪力相关关系,提出了使用三次曲线代替二次曲线,弯剪相关方程如式(1.1)所示,曲线如图 1.3 所示,点 1、点 2 表示满足设计要求的区域,点 3 表示不满足设计要求的区域,该曲线计算更为简便,精度也较好。



1 2 满足设计要求区域　　3 不满足设计要求区域

图 1.3 洞口剪力-弯矩相关曲线

$$\left(\frac{M_n}{M_m}\right)^3+\left(\frac{V_n}{V_m}\right)^3\leqslant 1 \tag{1.1}$$

式中 M_m——洞口中心截面处的纯弯承载力;

V_m——洞口中心截面处的纯剪承载力;

M_n——洞口中心截面处的设计弯矩值;

V_n——洞口中心截面处的设计剪力值。

Darwin 等[74,75]还推荐在具体计算 M_m 和 V_m 时乘以一个系数 φ 进行折减,推荐的折减系数 φ 取值为 0.85,M_m 和 V_m 乘以折减系数 φ 后弯矩-剪力相关关系表达式变为:

$$\left(\frac{M_n}{\varphi M_m}\right)^3+\left(\frac{V_n}{\varphi V_m}\right)^3\leqslant 1 \tag{1.2}$$

根据洞口位置确定洞口中心处的弯剪比 $\lambda=M_n/V_n$ 后,将弯剪比的表达式代入式(1.2)可得:

$$M_n \leqslant \varphi M_m \left[1 + \left(\frac{M_n}{\lambda M_m}\right)^3\right]^{-\frac{1}{3}} \tag{1.3}$$

$$V_n \leqslant \varphi V_m \left[1 + \left(\frac{V_m}{\lambda M_m}\right)^3\right]^{-\frac{1}{3}} \tag{1.4}$$

1989 年，Narayanan、Roberts 等[76,77]对腹板开洞组合梁的受剪性能进行了试验研究，试验中发现组合梁的混凝土板对抗剪承载力有很大贡献，同时在试验基础上给出了腹板开洞组合梁纯剪承载力的计算方法。

1992 年，Cho、Redwood 等[78,79]采用理想化的桁架模型对组合梁洞口处的传力机制进行了分析，通过试验发现栓钉除了抗剪外还发挥着抗拔的作用，保证了混凝土翼板可有效参与抗剪作用，可以将栓钉作为桁架模型中的受拉构件，从钢梁上翼缘到栓钉顶部之间的斜向混凝土可作为斜向受压构件，通过该桁架模型可以计算出腹板开大洞口时的组合梁极限承载力。

1996 年，Fahmy 等[80]对腹板开洞组合梁进行了试验研究，对洞口高度、宽度、偏心等参数与承载力的关系进行了分析。

2000 年，Darwin[81]对已有的腹板开洞组合梁的研究成果进行了较为全面的总结，包括腹板开洞组合梁的承载力计算、挠度计算及构造要求等，为实际工程设计提供了参考。Chung 等[82]结合了 EC4 的相关规定，提出了腹板开洞组合梁的简化设计方法，内容较为全面，包括强度、稳定、挠度、构造要求等。Lawson[83]于 2011 年对其方法和内容进行了完善，推出了腹板开大洞口时的组合梁设计方法。

2003 年，Park 等[84]通过试验研究了混凝土翼板宽度和弯剪比对腹板开洞组合梁破坏模式及承载力的影响程度，结果表明，混凝土板宽度对其破坏模式有较大影响，板宽较小时容易发生斜拉破坏，板宽较大时容易发生栓钉的拔脱破坏，在试验基础建立了强度模型，取混凝土板抗剪承载力和栓钉抗拔力的较小值作为混凝土板对抗剪的贡献。

从 2004 年开始，以德国凯泽斯劳滕大学为代表的研究机构对腹板开洞组合梁进行了较多的试验研究[85]，研究不仅包括简支组合梁，还涉及腹板开洞连续组合梁以及腹板开大洞的情况，有些洞口高度甚至接近了腹板的高度，如图 1.4 所示。



图 1.4　腹板开洞组合梁大洞口试验图

2012 年，Chung[86]对近年来与腹板开洞组合梁相关的研究成果进行了总结，不仅对用于

需要全本请访问 www.ertongbook.com