

学者书屋系列

新型预应力钢梁 外包抗弯性能 组合研究

张道明◎著

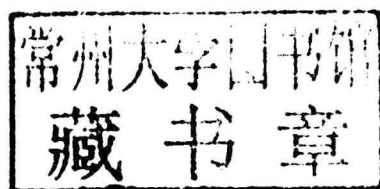


Harbin Engineering University Press
哈尔滨工程大学出版社

学者书屋系列

新型预应力外包钢组合梁抗弯性能研究

张道明 著



哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书通过试验、有限元数值仿真及理论分析,系统地研究和探讨了预应力外包钢钢筋混凝土组合梁的抗弯性能。全书共分8章,主要包括:新型预应力外包钢组合梁抗弯性能试验研究;直接内载法计算预应力内荷载;新型预应力外包钢组合梁材料本构关系;利用软件 ANSYS,建立有限元数值仿真分析模型;外包钢梁与混凝土梁之间的黏结滑移模型和新型预应力外包钢组合梁抗弯性能理论计算模型。

本书可为高校教师、研究生科研教学辅助用书,也可供土木工程科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

新型预应力外包钢组合梁抗弯性能研究/张道明著.

—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2011.6

ISBN 978-7-81133-919-2

I. ①新… II. ①张… III. ①预应力混凝土结构-组合梁-抗弯强度-研究 IV. ①TU323.302

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 109311 号

出版发行	哈尔滨工程大学出版社
社 址	哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码	150001
发行电话	0451-82519328
传 真	0451-82519699
经 销	新华书店
印 刷	黑龙江省教育厅印刷厂
开 本	787mm×960mm 1/16
印 张	12
字 数	250 千字
版 次	2011 年 6 月第 1 版
印 次	2011 年 6 月第 1 次印刷
定 价	24.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

预应力外包钢组合梁是在外包钢组合梁的基础上发展起来的一种新型的组合梁,具有用钢量省、整体和局部稳定性好、刚度大、承载力高、截面抗开裂弯矩高、弹性工作范围大和能充分利用组合材料力学性能等优点。因此对其进行研究具有重要的理论意义和工程应用价值。本书将通过模型试验和理论研究,分析预应力外包钢组合简支梁和连续梁的抗弯力学性能。

在各类新型组合结构中,国内外学者对外包钢组合结构都有研究,但普通的外包钢组合梁具有截面刚度小,抗弯性能差等缺陷,限制了这种组合梁的推广和应用。鉴于此,著者从2002年开始,在国家经贸委资助和辽宁省自然科学基金资助下进行了相关研究。本书结合了外包钢组合梁和预应力组合梁的优点,提出了新型的预应力外包钢组合梁,目的是利用高效预应力技术,解决外包钢组合梁在外荷载作用下构件截面受拉区混凝土易于开裂、刚度低、结构自重较大等不适合作为大跨度构件的诸多缺陷问题,达到充分利用各组合材料力学性能,提高组合梁抗弯承载性能的目的。总之,新型预应力外包钢组合梁综合了外包钢组合梁和预应力组合梁力学性能的优点,改善了组合梁力学性能,扩大了组合梁的适用范围。从2005年开始,著者在东北大学开始系统地研究该类型的组合梁承载性能,通过合理地设计和实施试验,获得了预应力外包钢组合梁的承载特性,进一步揭示其抗弯承载机理,为最终建立预应力外包钢组合梁有限元数值仿真模拟模型和建立完善的结构理论分析模型奠定了物质基础。

该书主要突出的成果是:①通过对预应力筋与梁耦合相互作用机理的研究,提出了直接内载法计算预应力内荷载,修正并补充了美国人 Moorman R B B 于20世纪50年代初提出的用等效荷载计算预应力内荷载的方法,同时证明了预应力内荷载的自平衡性,说明了等效荷载法是直接内载法的特例,确定结构在预应力作用下的主内力解析表达式,并根据曲线预应力筋线型特点,提出应用三次样条插值函数为预应力筋线型函数,这一研究成果将为所有预应力结构设计和理论分析奠定计算预应力荷载的理论基础;②基于预应力外包钢组合梁的工作特性,建立了预应力外包钢钢筋混凝土组合梁有限元数值仿真分析模型,提出了用层状界面单元模拟

外包钢板与钢筋混凝土梁之间的黏结滑移力学行为,实现了利用 ANSYS 有限元程序数值模拟预应力外包钢组合梁承载的力学行为;③根据外包钢组合梁微单元截面内力平衡原理,建立了分离式外包钢板和钢筋混凝土梁黏结滑移理论分析模型,采用变形协调原理和试算法,给出了其抗弯承载各阶段截面的抗弯模型,为其进一步研究和工程应用奠定了理论基础。

在本课题研究中,得到了著者的导师东北大学梁力教授的指导;在试验、数值和理论分析中,得到了王伟博士、李明博士、贾志杰硕士和戴云买硕士等朋友的帮助,王常剑硕士为本书绘制了部分插图;此外,本课题的研究得到了吉林建筑工程学院勘测公司在试验方面的资助,以及辽宁省自然科学基金,(03023685)、吉林教育厅科学技术研究项目(2009-473)、内蒙古自治区高校科学研究项目(NJ10003)的资助,并得到吉林大学郭学东教授在出版等方面的帮助,在此一并表示感谢。

在此书即将出版之际,我特别感谢我的爱人陈秀洁女士,是她无私的爱和帮助,使我完成了学业,取得了硕士和博士学位,在此感谢她多年来的支持和帮助。

鉴于著者的水平有限,不妥之处欢迎广大读者批评指正。

著 者
2011 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景及意义	1
1.2 组合梁新技术的发展和国内外研究现状	3
1.3 新型外包钢组合梁结构和预应力组合梁的研究方法	9
1.4 课题的提出及其研究的意义	9
1.5 主要研究内容	12
第 2 章 新型预应力外包钢组合梁抗弯性能试验研究	13
2.1 试验研究的目 的及内容	13
2.2 试件的设计和制作	14
2.3 预应力外包钢简支梁试验研究	22
2.4 预应力外包钢连续组合梁试验研究	33
2.5 外包钢板黏结滑移试验研究	40
2.6 本章小结	45
第 3 章 预应力内荷载的直接内载法研究	47
3.1 预应力筋与结构相互作用研究的状况	47
3.2 预应力内荷载的直接内载法的建立	49
3.4 预应力筋与混凝土接触的摩擦应力损失方程建立	54
3.5 预应力内荷载自平衡性证明	56
3.6 预应力筋线型的选择	61
3.7 预应力作用下截面内力计算	66
3.8 试件预应力筋线型函数的确定和预应力内荷载计算	68
3.9 本章小结	72
第 4 章 新型预应力外包钢组合梁材料本构关系	74
4.1 概述	74
4.2 混凝土材料的本构关系和破坏准则	76
4.3 钢材的力学性质	84

4.4	钢材与混凝土黏结与滑移本构关系	85
4.5	本章小结	88
第5章	有限元数值仿真模型建立及数值分析	89
5.1	概述	89
5.2	预应力外包钢组合梁单元离散	91
5.3	外包钢板与混凝土界面黏结滑移单元的建立	96
5.4	预应力外包钢组合梁单元材料力学性能的确定	102
5.5	预应力荷载的处理及非线性分析	108
5.6	数值与试验对比	112
5.7	本章小节	125
第6章	外包钢与钢筋混凝土梁黏结滑移机理分析	127
6.1	外包钢与钢筋混凝土梁黏结滑移理论研究现状	127
6.2	黏结滑移理论分析的基本假定	128
6.3	外包钢钢梁与钢筋混凝土梁黏结滑移平衡方程的建立	129
6.4	外包钢钢梁与钢筋混凝土梁黏结滑移解析方程的建立	132
6.5	理论计算结果与实测及数值结果对比分析	135
6.6	本章小结	136
第7章	新型预应力外包钢组合梁抗弯性能理论分析	138
7.1	概述	138
7.2	组合梁截面抵抗内力的组成及结构分析方法	139
7.3	组合梁弹性工作阶段截面抗弯性能	149
7.4	组合梁截面正弯矩作用下的抗弯性能	152
7.5	组合梁截面负弯矩作用下的抗弯性能	162
7.6	对比分析	168
7.7	本章小结	170
第8章	总结与展望	172
8.1	本文研究的主要结论	172
8.2	研究的前景与展望	173
参考文献		175

第 1 章 绪 论

1.1 课题背景及意义

1.1.1 组合结构的特点

钢-混凝土组合结构是在钢结构和钢筋混凝土结构基础上发展起来的一种新型结构。目前主要形式有:钢与混凝土组合梁、钢骨混凝土结构、型钢混凝土组合楼板、外包钢混凝土结构、钢管混凝土结构和预应力组合梁结构^[1-3]。总之,组合结构是由两种或两种以上材料组成的结构,并能够在外荷载作用下变形协调、共同受力。组合结构的受力特点是能充分利用每种材料的力学特性,形成强度高、刚度大、延性好、构件截面尺寸小、质量轻等优点的结构形式,兼有钢结构和钢筋混凝土结构的优点^[4]。组合结构主要用于柱和梁结构,其截面形式如图 1.1 所示。组合梁结构充分发挥了混凝土受压性能较好和钢材受拉性能、延性较好的优点,目前广泛地用于各种结构体系中。它不但结构力学性能优异,而且具有显著的经济效益和社会效益,适合我国基本建设的国情,已经成为结构体系的重要发展方向之一^[5-6]。

组合梁结构的具体特点如下:

(1) 组合结构能充分利用混凝土抗压和钢材抗拉及延性好的优异力学性能,使结构受力合理,提高了构件承载能力。

(2) 组合结构构件截面受力合理,节省材料,降低了结构造价。工程实践表明,与钢结构相比,组合结构每平方米可降低造价20%~40%^[1]。

(3) 研究表明,组合结构与钢筋混凝土相比具有良好的延性和塑性,提高了结构变形能力和抗震能力^[8]。

(4) 组合结构是钢筋混凝土与钢组成整体结构,和钢结构相比提高了结构整

体稳定性和局部稳定性^[9-10]。

(5) 一些特殊截面形式的组合结构能够改善混凝土力学性能和钢结构的受力状态^[7],提高结构承载能力。

(6) 组合结构中钢结构的刚度和强度及其结构形式可改善组合结构施工条件、节约施工成本和加快施工进度^[1-6]。

(7) 对于组合结构中外露于空气的钢结构,其耐久性和耐火性不如钢筋混凝土结构,但好于钢结构^[4]。

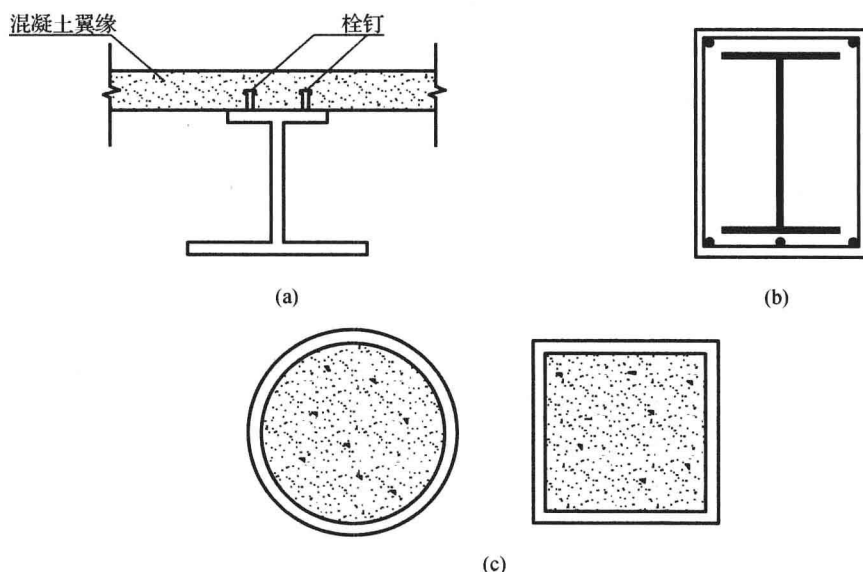


图 1.1 常见组合结构形式

Fig 1.1 The familiar forms of composite structure

(a) 型钢混凝土组合结构; (b) 钢骨混凝土组合结构; (c) 钢管混凝土组合结构

1.1.2 组合结构在工程中的应用

由于组合结构具有承载力高、延性好、综合经济指标较高等一系列优点,研究人员根据工程的需要对组合梁进行了大量的理论和试验研究^[1,2,11-18],使组合梁结构在国内外工业和民用的建筑工程、桥梁工程、地下建筑和海洋工程等领域,得到

了较为广泛的应用,如全长 2 141.25 m 的法国诺曼底桥的双塔双索面大跨度复合斜拉桥,全长 7 654 m 的上海杨浦大桥的复合桥面和东莞建升大厦屋面的 29.9 m 的主梁等结构都采用了组合结构。

组合梁结构在力学性能上的特性,激发工程技术和研究人员开发研究更新型的组合结构来满足不同类型工程的需要。其中,高效预应力技术和新组合结构形式的引入很大程度地改善了结构承载的力学性能,扩大了组合梁结构的应用范围。目前,很多大跨度桥梁和建筑结构及其他复杂的结构都采用了这种新技术^[1,2],为组合结构的发展提供了更广阔的前景。

1.2 组合梁新技术的发展和国内外研究现状

1.2.1 新结构形式的提出和新技术的应用

虽然钢-混凝土组合梁和钢筋混凝土梁相比具有很多优点,但由于其自身的特征,钢-混凝土组合梁还存在很多问题。如连续梁负弯矩区开裂问题;结构刚度相对低,使大跨度钢-混凝土组合梁结构中各种组合材料力学性能不能充分利用的问题;翼缘板因抗滑移的栓钉引起的纵向劈裂问题;钢-混凝土组合梁结构的防火及耐久性问题;钢-混凝土组合梁中钢结构的整体和局部稳定、应力重分布和蠕变断裂等问题^[1,2,15-23]。这些问题的存在促使国内外工程技术人员探索研究更新型的组合梁结构形式,达到改善组合梁的受力性能的目的。为了改善钢-混凝土组合梁翼缘板因抗滑移的栓钉引起的纵向劈裂问题,钢-混凝土组合梁结构的防火及耐久性问题及钢-混凝土组合梁中钢结构的整体和局部稳定等问题,工程技术人员提出了 U 形外包钢组合梁^[24-27]和劲性钢筋混凝土组合梁^[2,28,29]。为了改善翼缘混凝土受拉开裂,缩小结构弹性工作范围和增加结构刚度,工程技术人员采用了高效预应力技术^[1,2,30-33],改善了组合梁的受力状态,使组合梁的材料都得到充分的利用。这些不同结构形式的组合梁的理论和试验研究,扩大了组合梁结构在工程中的应用范围。

1.2.2 新型外包钢组合结构研究

在各类新型组合结构中,外包钢组合结构是在结构构件外部配置钢结构包裹

钢筋混凝土。外包钢的钢结构和钢筋混凝土的共同工作是通过钢板与混凝土之间的黏结力和开口隔板外包钢板与混凝土之间的机械联结,使钢结构和钢筋混凝土结构共同受力,协调变形,达到协同工作的目的。根据用途,目前外包钢组合结构可分为外包钢柱(见图 1.1)和外包钢梁(见图 1.2)。外包钢混凝土特殊的结构形式,使它具有构造简单、连接方便、使用灵活、承载力高、延性好和节省材料等独特的力学特性^[34]。国内外对外包钢组合结构的研究和应用相对较晚,20 世纪 70 年代,前苏联莫斯科建筑工程学院研究了外包角钢与混凝土共同作用及构件抗弯承载力等力学性能^[2]。我国 70 年代从国外引进外包钢应用技术,结合工程进行了一系列试验研究,如东北大学王连广的 5 根 2 m 长外包钢组合梁抗弯试验。这些研究为外包钢组合结构在我国的早期发展奠定了理论基础。

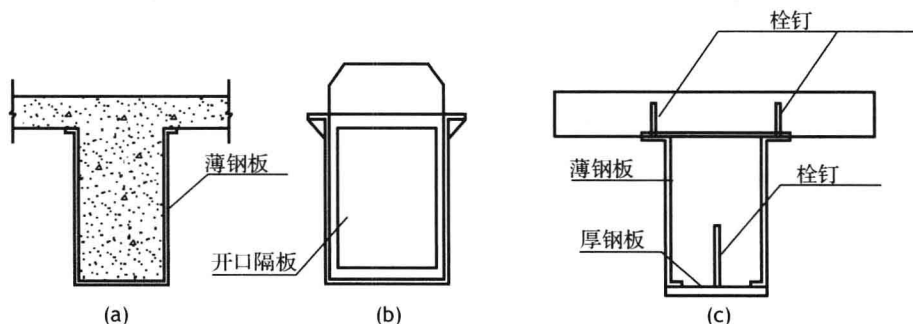


图 1.2 外包钢组合梁截面

Fig 1.2 The section of outer-plated steel-concrete composite beams

U 形薄壁外包钢混凝土组合梁在早期是用薄钢板轧制或焊接成 U 形钢槽,把钢槽作为模板在内填充混凝土,形成外包钢的钢筋混凝土梁。这时期外包钢在设计中不考虑参与受力^[25,35]。从 90 年代开始,国内外开始了对外包钢组合梁参与受力的研究。国外学者在 90 年代后期研究了外黏钢板部分剪力连接的外包钢组合梁的承载机理,如澳大利亚 Adelaide 大学的 Oehlers, New South Wales 大学的 Bradford,香港理工大学的 Smith 以及 Wright 对部分剪力连接的外包钢板单向屈曲和外包钢混凝土梁进行了力学特性的研究^[36-39];欧盟经过理论和试验的研究在欧洲规范 4 中给出了外包钢组合梁承载力解析方程,为外包钢结构设计奠定了基础^[4]; Ryerson 大学的 Anwar Hossain K M^[40-42]对钢槽内填充混凝土的组合梁进行了试验研究,建立了混凝土与钢板截面黏结滑移力学模型,并进行了有限元数值分

析。我国工程技术人员根据以往的外包钢组合梁结构的研究成果,1995年原冶金工业部建筑研究总院钢结构工程研究所在国内最早提出了新型的外包钢组合梁结构^[25],并在近几年进行了U形薄壁外包钢混凝土组合梁弯曲性能的研究。经过理论试验的研究,上海现代房地产实业有限公司推出了M-B2钢包混凝土轻钢组合体系(如图1.2所示),它是把薄钢板轧制成帽型钢槽,在钢槽内浇筑钢筋混凝土的结构。这种结构在上海浦东杨南18层住宅楼、上海闸北12层住宅楼和成都12层住宅楼等工程中得到了应用^[25]。研究和工程实践表明,这种帽型外包钢组合梁具有刚度大和整体性能好的优点。十几年来,我国工程技术和研究人员对外包钢组合梁从试验到理论进行了一系列研究,并给出了外包钢组合梁不同截面形式、不同抗滑移构造措施以及构件结构计算理论。以下为目前国内U形截面外包钢组合梁的研究现状。

(1) 河北建筑工程学院的赵风华于1999年提出了一种以早强混凝土外包U形薄钢板的新型组合梁,其底板与侧板厚度相同,并以9根2天龄期的试验为基础。同时对外包钢组合梁的工作性能进行了分析研究,将外包钢组合梁与普通钢筋混凝土梁力学性能进行对比,得出在含钢率相同的条件下,外包钢组合梁的承载力和变形能力都得到了不同程度的提高^[35]。

(2) 福州大学的林于东和宗周红教授于2002年进行了8根U形薄钢板的新型组合梁受正弯矩作用、4根受负弯矩作用的试验研究,并提出了相应的强度式的计算,但是所提出的极限承载力式中没有全面考虑组合梁中和轴位置的变化,并且没有将完全剪切连接和部分剪切连接组合梁区分开来。试验研究表明,梁内混凝土有效抵御钢腹板侧移而产生局部失稳破坏^[27,44]。

(3) 肖辉,李爱群,杜德润三人根据11根外包钢混凝土组合梁试件,进行了外包钢组合梁正截面弯曲承载力的试验研究,分析了外包钢组合梁弯曲承载力特性,给出了外包钢组合梁极限抗弯承载解析方程^[43]。

(4) 西安建筑科技大学的周天华教授于2003年完成了2根简支梁、1根连续梁的试验研究,分析了外包钢组合梁跨中截面抗弯性能和连续梁跨中支座的负弯矩区的抗弯能力,表明外包钢组合梁的力学性能优于普通钢筋混凝土梁^[45]。

(5) 哈尔滨工业大学的张耀春教授于2003年进行了6根外包钢组合梁的试验研究,并进行了有限元的非线性数值分析和抗火能力分析,说明了外包钢组合梁力学性能的复杂性和良好的防火性能^[27,46]。

(6) 长沙理工大学的郭红梅和徐利明于2003年从考虑滑移效应的角度出发,

对帽型截面外包钢组合梁的变形进行了研究,建立了帽型截面钢-混凝土组合梁跨中挠度计算式,所建立的变形计算式有其实用性,但是却没有考虑到不同的连接件对组合梁的滑移和变形的影响^[47]。

(7) 东南大学的李爱群和江苏大学的石启印等人于 2005 年提出了用不同厚度的钢板作为侧板和底板焊接形成外包钢组合钢梁。其制作了三根外包钢-混凝土组合梁进行试验研究,经过试验和理论分析给出了梁的正截面极限抗弯强度式,分析了外荷载和构件截面曲率的关系,说明了外包钢组合梁抗弯刚度的变化。同时东南大学的杜德润等人在外包钢组合梁结构设计方面进行了初步探讨,说明了外包钢组合梁结构工程应用的可行性^[48,49]。

(8) 江苏大学的石启印,浙江的吴元祥,东南大学的杜德润等人于 2005 年对外包钢组合梁的设计进行了技术探讨,分析了外包钢组合梁纵向抗滑移、抗剪问题和正截面抗弯问题。研究表明外包钢有着良好的抗滑移、抗弯的力学性能^[49,50]。

(9) 吴元祥、杜德润、石启印等人,2006 年在东南大学结构试验室,制作一榀两跨的单层新型外包钢混凝土组合梁和普通钢混凝土柱组成的新型组合框架,进行了新型外包钢混凝土组合框架抗震性能试验,试验表明新型组合框架结构具有良好的抗震能力^[51]。

(10) 江苏大学的石启印等人于 2006 年进行了 4 根外包钢组合梁的黏结滑移试验研究,分析了外包钢板与混凝土之间黏结滑移的形态^[52]。

研究表明:此类新型的钢与混凝土组合梁的承载力性能有了很大的提高,具有抗滑移性能良好、施工工序简化、防火性能改善、综合经济指标提高等优点,在工程应用上具有可行性^[53-55]。外包钢组合结构作为一种新型的组合结构体系,目前并未形成一套完整的结构计算理论和设计方法,使它的应用受到了限制,有待于进行深入的试验和理论研究以及工程应用的技术研究。

1.2.3 预应力钢-混凝土组合研究与发展

预应力钢-混凝土组合结构是在普通组合梁、预应力钢结构和预应力混凝土结构的基础上发展起来的组合结构。对钢-混凝土组合结构施加初始应力,使其在外荷载作用下的应力分布更合理,从而改善结构的使用性能,充分利用各组成部分的材料力学特性。它不但继承了钢-混凝土组合结构的优点,而且具有通过不同布筋形式改善结构受力性能,减少构件开裂,降低构件截面应力峰值,提高结构

刚度,增大组合梁的弹性范围,提高结构的极限承载力,充分利用组合材料的力学性能,降低构件截面高度,减轻结构自重,减小地震作用,改善结构疲劳和断裂性能以及结构强度储备,提高梁的结构使用寿命等优点。因此预应力钢-混凝土组合梁结构在建筑结构及桥梁结构等工程领域得到了广泛的应用^[56,57]。

预应力技术从20世纪20年代进入土木工程领域,经过90年来的研究和应用,预应力结构理论逐步走向成熟,特别是高效预应力技术在组合结构中的应用,改善了组合结构的承载力学性能,加大了组合结构的跨度,扩大了组合结构的应用范围。在组合梁中,预应力主要通过预弯组合钢梁的方法使组合梁产生预应力,对钢绞线或钢筋施加预应力使组合梁产生预应力,张拉组合钢梁某一板件使组合梁形成预应力和通过调整支座等组合梁部位使组合梁产生预应力。其中最常用的方法是通过张拉预应力筋或钢绞线使组合梁产生预应力。施加预应力组合梁在国外的研究比较早,早期的研究主要集中在预应力组合梁承载能力方面^[1]。20世纪90年代以后,在前人研究的基础上人们开始了预应力组合梁非线性力学性能的研究^[14]。在钢梁或组合梁上,施加预应力的最早思想是由德国学者 Dischinger 于1949年提出的^[1,56,57]。在他的研究中,建议应用高强钢丝束对组合梁施加预应力,并考虑了高强预应力钢丝预应力损失的影响。从此,预应力技术在组合梁结构中开始了大量的理论和试验研究。从20世纪50年代到20世纪90年代,国内外学者进行了早期的预应力组合梁承载力力学性能试验研究。在这些研究中,在预应力组合梁弹性和塑性工作阶段力学性能研究方面,Hoadley R G,Regan R S,krahl N W 和 Saadatmanesh H 等学者^[30-31],通过试验和理论的研究,分析了预应力组合简支梁的力学性能,推导预应力组合梁正截面混凝土和钢梁应力解析表达式,并应用能量法计算组合梁在外荷载作用下预应力筋的应力增量,建立了预应力组合梁弹性和非弹性阶段的理论计算及分析模型;在 Saadatmanesh 后期的研究中,给出了预应力组合梁的设计指导方针^[31];在预应力组合梁极限承载力方面,法国人 Bota V 在理论和试验基础上,考虑了材料的塑性,给出了预应力组合梁四种破坏形态^[30];在预应力组合梁的预应力损失和滑移效应方面,Sailard R,Klaiber F W 等学者进行了一系列试验和理论研究^[1],分析了混凝土收缩、徐变和预应力钢筋的应力松弛引起的预应力损失对预应力组合梁承载特性的影响和混凝土与钢梁之间的黏结滑移对预应力组合梁力学性能的影响。这几方面研究为预应力组合梁在工程中的应用提供了理论基础。

20世纪90年代以后,国内外学者在预应力组合梁的承载机理方面进行了深入

的研究。Thomas J^[58]、福州大学的郑则群和房贞政^[32,59]、里昂大学的 Hamelin P^[60]、清华大学的陆新征和东北大学的王连广^[2,61]等学者,应用非线性有限元数值分析方法分析了预应力组合梁的力学性能^[62];Sharif Alfarabi^[63],同济大学的薛伟辰^[64],意大利安科纳大学的 Dezi 和 Luigino^[65],美国马里兰大学的 Albrecht^[66]等人进行了抗疲劳试验;其中英格兰利第大学的 Bennett E W^[67]对 14 根预应力组合梁在不同荷载条件下,进行了 10 000 次疲劳试验,分析在不同荷载水平条件下,预应力组合梁的承载特性试验研究;加拿大 Calgary 大学的 Ei Metwally^[68]通过试验和理论分析,研究了组合梁中的钢筋混凝土板掀起;意大利的 Dezi 等学者^[69-73]对预应力组合梁混凝土进行研究,分析了组合梁收缩徐变、滑移效应和疲劳对组合梁承载力学性能的影响;聂建国等学者在组合梁非线性分析的刚度和高强混凝土预应力组合梁的研究中,得出在预应力作用下组合梁抗弯刚度得到很大提高和组合梁在外荷载作用下刚度的非线性变化,并给出了解析计算方法;在预应力组合梁中应用高强混凝土方面,王连广、刘莉研究了高强混凝土对预应力组合梁承载力的贡献^[74,75],说明了在组合梁中应用高强混凝土的可行性;同济大学的薛伟辰^[76,77],新南威尔士大学的 Zou^[78]等学者^[33]对碳纤维 FRP 预应力筋等新材料的应用进行了一系列的研究,为预应力组合梁的发展开拓了新思路;印度学者 Lopes Sergio^[79,80]和聂建国^[81]等学者^[82],进行了在预应力连续组合梁负弯矩作用下,组合梁因受拉区混凝土开裂使结构产生内力重分布的试验及理论研究,分析了预应力组合梁跨中支座处组合梁内力重分布过程,确定了预应力组合梁跨中支座弯矩调幅系数;新南威尔士大学的 Bradford M A^[83]和福州大学的房贞政等研究人员^[32]研究了预应力组合梁在外荷载作用下的整体稳定和局部稳定,说明整体稳定和局部稳定是控制预应力组合梁承载力的决定因素;Windsor 大学的 Kennedy 和 John B^[84],中南大学的罗小勇、周凌宇、余志武等人^[85]对预应力组合梁进行了一系列动荷载试验研究,说明预应力组合梁具有良好的动力响应性能;同济大学的薛伟辰,清华大学的聂建国等人通过对预应力组合梁的预应力布筋形式和预应力筋应力增量等方面的研究^[1,77],分析了布筋方式和预应力筋应力增量对预应力组合梁承载性能的影响,并给出了预应力增量的计算方法。总之,人们在预应力组合梁承载力的各个方面进行了深入细致的研究,完善了预应力组合梁承载力设计理论,使预应力组合梁结构在大跨度结构工程中得到了广泛的应用^[56,57,86,87]。

1.3 新型外包钢组合梁结构和预应力组合梁的研究方法

在新型外包钢组合结构的应用和研究中,研究人员根据外包钢组合梁建立了各种分析方法,大致可以分为解析法和有限元法。在解析计算方法方面,陈云波^[25]、李爱群、石启印和杜德润等人在试验和理论研究的基础上,根据结构塑性极限分析理论,通过外包钢组合梁在极限状态下的内力平衡,确定外包钢组合梁极限抗弯承载力解析表达式。郭红梅、徐利明参考了在长期荷载作用下的滑移效应对普通钢-混凝土组合梁的挠度的影响,给出了外包钢组合梁考虑滑移效应影响的挠度计算解析表达式。Oehlers, Bradford 和 Smith 根据能量原理,给出了部分剪力连接的外包钢板在外荷载作用下,不考虑黏结滑移影响的弹性局部屈曲的极限稳定临界荷载解析表达式。在新型外包钢组合结构有限元数值分析方面,张耀春、毛小勇、王伟、梁力和张道明在考虑钢板与混凝土之间的黏结滑移基础上,建立了新型外包钢组合梁分离式有限元数值分析模型。在预应力组合梁研究方法方面, Hoadley R G、Bota V、聂建国、王连广、余志武、吕志涛和薛伟辰等人在大量试验和理论研究基础上,进行了预应力组合梁承载特性的研究,给出了预应力组合梁极限承载力计算方法,结构非线性对预应力组合梁截面刚度的影响的挠度计算方法,考虑连续梁负弯矩区开裂后内力重分布调幅方法,预应力筋应力增量的计算等理论。这些研究为本书预应力外包钢组合梁承载力的力学性能研究奠定了理论基础。

1.4 课题的提出及其研究的意义

1.4.1 组合梁新结构形式的提出

以目前的研究来看,新型外包钢组合梁在承载特性方面具有很多优点,但是该类型的组合梁也具有普通钢筋混凝土梁的一些明显特征^[88,89]:

(1) 外包钢组合梁正截面的受拉区混凝土开裂和组合材料力学性能的非线

性,使外包钢组合梁在外荷载作用下具有明显的非线性力学特征,特别是支座处负弯矩区梁顶面混凝土开裂问题;

(2) 在外包钢组合梁弯曲破坏时,合适的外包钢板配置使受拉区外包钢板首先屈服,随着中和轴的上移,受压区高度减小,因混凝土被压碎达到弯曲极限强度;

(3) 研究表明,外包钢组合梁和钢筋混凝土适筋梁十分相近,破坏过程具有明显的弹性、弹塑性和塑性特征。

目前外包钢组合梁主要存在的问题有以下两个:

(1) 虽然外包钢板构件抗弯刚度有了一定的提高,但是由于外包钢组合梁的截面几何特征,刚度提高有限,外包钢-混凝土梁自重大,以及不适合作为大跨度空间构件等不利因素,影响了外包钢组合梁在工程中的应用;

(2) 外包钢组合梁正截面在正负弯矩作用下,受拉区混凝土开裂,使结构具有明显的非线性特征,其弹性工作范围小,影响其正常的使用和组合材料力学性能的充分利用。

传统的预应力组合梁在受力特性方面明显具有钢结构承载的力学特征,其缺点如下:

(1) 虽然钢梁顶部混凝土板的存在改善了预应力组合梁整体稳定和局部钢板的稳定,但是预应力组合梁整体稳定和局部钢板的稳定仍然是决定组合梁承载的关键因素^[15],影响了组合材料力学特性的充分发挥,降低了结构的经济效益;

(2) 一般预应力组合梁的预应力钢筋布筋方式采用无黏结预应力钢绞线折线或直线方式布筋,降低了预应力钢绞线的利用率和组合结构的安全可靠性;

(3) 预应力组合梁中的钢梁和混凝土黏结滑移效应、混凝土板掀起问题以及纵向开裂等问题,影响着预应力组合梁的推广和发展。

综上所述,新型外包钢组合梁和预应力组合梁存在的结构问题将会影响这两种组合梁在工程中的应用和发展。

本书结合了外包钢组合梁和预应力组合梁的优点,提出了预应力外包钢组合梁新型结构,如图 1.3 和图 1.4 所示。该类型组合梁提出的目的是应用高效预应力技术,解决新型外包钢组合梁在外荷载作用下,截面混凝土开裂、刚度低(不适合大跨度空间梁结构)和自重大等缺点;应用外包钢结构,能改善预应力组合结构布筋方式,有黏结钢筋的作用,能改善黏结滑移效应的影响,减小防火耐久性较差和混凝土板纵向开裂等缺陷的影响,改善结构的稳定性。总之,新型预应力能够综合利用外包钢组合梁和预应力组合梁力学性能的优点,扩大组合梁的适用范围。