

外包U型钢混凝土组合梁 理论研究与设计应用

周学军 林彦 著



科学出版社

外包 U 型钢混凝土组合梁 理论研究与设计应用

周学军 林 彦 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

外包 U 型钢混凝土组合梁是采用薄钢板直接冷弯或用薄壁钢板焊接成 U 形截面,然后在 U 形截面内填充素混凝土作为 T 形梁的肋部,翼缘为现浇钢筋混凝土板。这种构造形式的组合梁其承载能力和防火性能优于普通钢筋混凝土梁和普通工字钢梁,利用其 U 型钢的外翻边作为钢筋桁架楼承板的支座,具有施工便捷、装配化程度高等优点,受到工程界和学术界的普遍关注。

本书是著者课题组对外包 U 型钢混凝土组合梁受力机理研究的最新研究成果的阶段性总结。系统地阐述了简支外包 U 型钢混凝土组合梁的受力机理,提出了其抗弯承载力、抗剪承载力和挠度的计算公式;研究了主次梁连接节点抗剪工作机理,提出了梁-梁铰接的计算方法和构造做法;重点对外包 U 型钢混凝土组合梁与方钢管混凝土柱连接节点的构造、破坏模态和动力性能进行了深入研究。在此基础上,给出了设计建议,以供工程实践中参考。

本书可供从事钢结构或组合结构研究与应用的科研人员和工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业的教师和研究生的教学和学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

外包 U 型钢混凝土组合梁理论与设计应用/周学军,林彦著. —北京:科学出版社,2016.11

ISBN 978-7-03-050827-0

I. ①外… II. ①周… ②林… III. ①外包混凝土-U型钢-钢筋混凝土梁-组合梁-研究 IV. ①TU375.102

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 289242 号

责任编辑:邓 静 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 伟 / 封面设计:迷底书装

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

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2016 年 11 月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:320 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序

2016年9月国务院办公厅在《大力发展装配式建筑的指导意见》中指出，要按照适用、经济、安全、绿色、美观的要求，推动建造方式创新，大力发展装配式混凝土建筑和钢结构建筑。目前装配式钢结构建筑已成为我国各级政府积极鼓励并给予政策支持的建筑建造形式，各地出现了很多钢结构的新材料、新工艺、新体系，为钢结构工业化建造奠定了良好的技术基础。其中，外包U型钢混凝土组合梁就是一种创新的组合结构形式，它是采用薄钢板直接冷弯或用薄壁钢板焊接成U形截面，然后在U形截面内填充素混凝土作为T形梁的肋部，翼缘为现浇钢筋混凝土板。这种构造形式的组合梁其承载能力和防火性能优于普通混凝土梁和普通工字型钢梁，利用其U型钢的外翻边作为钢筋桁架楼承板的支座，具有施工便捷、装配化程度高等优点，符合工业化建造的理念。

周学军教授和他的课题组历经8年多的时间，对外包U型钢混凝土组合梁的受力性能和设计方法进行了系统研究，将取得的丰硕成果凝练成这本著作。该书系统地阐述了简支外包U型钢混凝土组合梁的受力机理，提出了其抗弯承载力、抗剪承载力和挠度的计算公式；论述了主次梁连接节点抗剪工作机理，提出了梁-梁铰接的计算方法和构造做法；深入介绍了外包U型钢混凝土组合梁与方钢管混凝土柱连接节点的构造、破坏模态和动力性能；最后给出了外包U型钢混凝土组合梁的设计建议。该书既有深入的理论分析和试验研究内容，又有便于工程应用的工程案例，是一本不可多得的外包U型钢混凝土组合梁的研究专著。

我自2012年在山东建筑大学担任泰山学者特聘教授，与周学军教授也有一些科研合作，知晓周教授长期致力于钢结构基本理论以及空间钢结构、装配式钢结构的教学和研究工作，其科研成果获省部级一等奖在内的科技奖励15项，是国家新世纪百千万人才工程国家级人选和享受国务院政府特殊津贴专家，他治学严谨，求真务实，相信他的这本著作能够为从事钢结构或组合结构研究与应用的科研人员和工程技术人员提供借鉴和参考，因此愿为之序。



李国强

同济大学教授

2016年11月

前 言

钢-混凝土组合结构是在钢结构和钢筋混凝土结构的基础上发展起来的一种结构形式。这种结构将钢构件与混凝土或钢筋混凝土构件组合在一起共同工作，具有承载力高、刚度大、稳定性好、施工便捷、综合效益高等优点，已广泛应用于多高层建筑、桥梁、地下和加固修复等各类工程实践中。外包 U 型钢-混凝土组合梁则是在钢-混凝土组合梁的基础上研制而成的一种新型组合结构构件，它是采用薄钢板直接冷弯或用冷弯薄壁型钢焊接成 U 形截面，然后在 U 形截面内填充素混凝土作为 T 形梁的肋部，翼缘为现浇钢筋混凝土板。这种构造形式的组合梁其承载能力和防火性能优于普通钢筋混凝土梁和普通工字钢梁，利用其 U 型钢的外翻边作为钢筋桁架楼承板的支座，又具有施工便捷、装配化程度高等优点，因此受到工程界和学术界的普遍关注，许多研究工作也已相继展开，但比较系统的研究还十分缺乏。

2009 年年初，上海现代房地产实业有限公司董事长李鑫全先生找到我，希望我能够进行外包 U 型钢-混凝土组合梁的相关理论和试验研究工作，至今已有近 8 年的时间，我和我的团队完成了李先生的试验研究工作，同时研究工作还得到了如下山东省相关科技计划的支持。

2010 年山东省科技计划重点项目：外包冷弯薄壁 U 型钢与混凝土组合梁的工作机理与应用研究(No.2010GZX20418)；

2013 年山东省自然科学基金项目：新型 U 型外包钢混凝土组合梁柱节点破坏机理及抗震性能研究(No.ZR2013EEM003)；

2014 年山东省墙材革新与建筑节能科研开发项目：基于绿色建筑理念下的新型外包钢混凝土组合结构体系的关键技术研究。

期间，指导了 7 位硕士研究生和 1 位博士研究生的学位论文，发表相关研究论文 20 余篇。这些学生的学位论文如下。

王晓晔(2010 届硕士)：外包 U 型钢-混凝土组合梁与方钢管混凝土柱节点静动力性能的试验研究与理论分析；

张婷(2011 届硕士)：简支外包 U 型钢与混凝土组合梁承载力理论分析与试验研究；

赵倩倩(2011 届硕士)：外包 U 型钢与混凝土组合梁主次梁节点抗剪机理分析与试验研究；

张元植(2011 届硕士)：外包 U 型钢-混凝土组合梁与方钢管混凝土柱节点力学性能分析；

韩雪野(2014 届硕士)：基于梁端塑性铰破坏的外包 U 型钢混凝土组合梁与方钢管混凝土柱组合节点力学性能理论分析；

杨强胜(2014 届硕士):基于节点域剪切破坏的外包 U 型钢混凝土组合梁与方钢管混凝土柱组合节点承载能力的理论分析;

孔文清(2015 届硕士):外包 U 型钢混凝土组合梁与方钢管混凝土柱连接节点破坏模态研究;

林彦(2016 届博士):方钢管混凝土柱-外包 U 型钢混凝土组合梁连接节点抗震性能研究。

本专著就是在以上研究的基础上总结而成的。在此特别感谢我的研究生付出的辛勤劳动和所做的卓有成效的研究工作,他们每个人的研究工作都使对该问题的认识向前推进了一步。特别是林彦博士的研究,对外包 U 型钢混凝土组合梁与方钢管混凝土柱连接节点的构造、破坏模态和其动力性能的研究更加深入。

本专著主要涉及:简支外包 U 型钢混凝土组合梁受力机理的研究;主次梁连接节点抗剪工作机理研究;外包 U 型钢混凝土组合梁与方钢管混凝土柱连接节点的构造、破坏模态和动力性能的研究。在此基础上,给出了设计建议,以供工程实践中参考。

本专著只是研究工作的一个阶段性总结,还不完善,限于水平,可能还存在疏漏和不足之处,恳请广大读者和专家不吝赐教。在著作编写过程中,参考了许多专家学者的研究成果,研究生王振、冯帅克、翟雪萌、冀晓璇等做了很多编辑辅助工作,在此一并表示感谢。

周学军

2016 年 9 月于济南

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 钢-混凝土组合梁的类型及特点	1
1.2 钢-混凝土组合梁的研究进展	2
1.2.1 钢-混凝土组合梁的发展	2
1.2.2 钢-混凝土组合梁的研究进展	5
1.3 外包 U 型钢混凝土组合梁柱连接节点的研究进展	12
1.3.1 方钢管混凝土柱的应用	12
1.3.2 方钢管混凝土柱梁连接节点研究现状	12
1.3.3 外包 U 型钢混凝土组合梁柱连接节点研究现状	25
1.4 外包 U 型钢混凝土组合梁的研究方法和内容	28
第 2 章 外包 U 型钢混凝土组合梁承载机理研究	30
2.1 外包 U 型钢混凝土组合梁试验研究	30
2.1.1 试验概况	30
2.1.2 试验现象	36
2.1.3 试验测试结果及分析	40
2.1.4 本节小结	44
2.2 外包 U 型钢混凝土组合梁非线性有限元分析	45
2.2.1 外包 U 型钢混凝土组合梁有限元模型的建立	45
2.2.2 外包 U 型钢混凝土组合梁有限元模型的验证	52
2.2.3 外包 U 型钢混凝土组合梁有限元结果分析	54
2.2.4 外包 U 型钢混凝土组合梁抗弯承载力影响参数分析	57
2.2.5 本节小结	58
2.3 外包 U 型钢混凝土组合梁混凝土翼板的有效宽度	58
2.4 外包 U 型钢混凝土组合梁的承载力理论分析	62
2.4.1 组合梁正弯矩作用下的极限受弯承载力	62
2.4.2 组合梁负弯矩作用下的极限受弯承载力	65
2.4.3 组合梁的竖向受剪承载力	68
2.4.4 组合梁的纵向受剪和纵向抗滑移承载力	69
2.4.5 外包钢混凝土组合梁的刚度	72

2.4.6	本节小结	75
第 3 章	外包 U 型钢混凝土组合梁主次梁连接节点抗剪机理研究	77
3.1	概述	77
3.2	外包 U 型钢混凝土组合梁主次梁连接节点抗剪机理试验研究	77
3.2.1	试验概况	77
3.2.2	试验现象	82
3.2.3	试验测试结果及分析	84
3.2.4	本节小结	89
3.3	外包 U 型钢混凝土组合梁主次梁连接节点抗剪性能有限元分析	89
3.3.1	节点有限元模型	89
3.3.2	外包 U 型钢混凝土组合梁主次梁连接节点有限元结果分析	92
3.3.3	本节小结	97
3.4	外包 U 型钢混凝土组合梁主次梁连接节点抗剪机理理论分析	98
3.4.1	基本假定	98
3.4.2	主次梁连接节点的抗剪承载力	98
第 4 章	外包 U 型钢混凝土组合梁-方钢管混凝土柱连接节点承载机理及抗震性能研究	100
4.1	概述	100
4.2	梁柱连接节点抗震设计的基本要求	101
4.2.1	强柱弱梁的定义及相关规定	101
4.2.2	强连接弱构件的定义及相关规定	102
4.3	新型节点的构造	103
4.3.1	钢筋贯通环板式节点	103
4.3.2	扁担钢环板式节点	103
4.3.3	外环板部分钢筋贯穿式节点	103
4.3.4	隔板贯通钢筋截断式节点	105
4.3.5	内隔板钢筋截断式节点	107
4.4	外包 U 型钢混凝土组合梁-方钢管混凝土柱连接节点试验研究 1	108
4.4.1	试验概况	108
4.4.2	试验现象	116
4.4.3	试验测试结果及分析	117
4.4.4	本节小结	124
4.5	外包 U 型钢混凝土组合梁-方钢管混凝土柱连接节点试验研究 2	125
4.5.1	试验概况	125
4.5.2	试验全过程分析和试件破坏特征	140
4.5.3	试验结果与分析	152

4.5.4	本节小结	172
4.6	外包 U 型钢混凝土组合梁-方钢管混凝土柱连接节点有限元分析	173
4.6.1	节点有限元模型的建立	173
4.6.2	节点有限元模型的验证	180
4.6.3	节点应力分析	188
4.6.4	节点滞回性能影响参数分析	201
4.6.5	本节小结	207
第 5 章	外包 U 型钢混凝土组合梁设计原理	210
5.1	组合梁截面设计的一般规定及构造要求	210
5.1.1	材料和设计指标	210
5.1.2	组合梁的荷载	210
5.1.3	组合梁设计的一般规定	211
5.1.4	组合梁的构造	212
5.1.5	钢与混凝土组合梁设计的工况、方法、荷载及要求	213
5.2	组合梁的弹性设计	214
5.2.1	施工阶段 U 型钢梁截面的计算	214
5.2.2	使用阶段 U 型钢混凝土组合梁的挠度计算	216
5.2.3	关于温差应力和混凝土的收缩应力	218
5.3	组合梁的塑性设计	218
5.3.1	设计准则及基本假定	218
5.3.2	组合梁正弯矩作用下的抗弯承载力计算	219
5.3.3	组合梁负弯矩作用下的抗弯承载力计算	221
5.3.4	组合梁的竖向抗剪承载力计算	223
5.3.5	组合梁的纵向抗剪和纵向抗滑移承载力计算	224
5.4	设计实例	227
	参考文献	233

第 1 章 概 述

1.1 钢-混凝土组合梁的类型及特点

钢-混凝土组合梁是指将钢梁与混凝土组合在一起形成的水平承重构件。这种梁充分发挥了钢与混凝土两种材料的优良特性。同钢梁相比，①钢-混凝土组合梁的用钢量大幅度下降，降低了工程造价；②混凝土的存在增大了刚度，提高了构件的整体稳定性和局部稳定性，从而使组合梁具有较高的承载力；③抗疲劳及抗冲击性能得到改善，使用期延长。同钢筋混凝土梁相比，①截面高度降低，增加结构净空高度和使用面积，使得有效使用空间增加，从而降低整个房屋的建造成本；②节省梁身混凝土用量，减轻自重；③构件耗能能力增强，延性增加，抗震性能良好；④可以节省支模工序及模板，缩短施工工期，降低造价。随着对其研究的不断深入，钢-混凝土组合梁已广泛应用于多高层建筑、桥梁、地下结构和加固修复等各类工程实践中。

钢-混凝土组合梁根据钢与混凝土组合形式的不同可分为外包混凝土组合梁和钢梁外露组合梁。外包混凝土组合梁是指将钢部件埋入混凝土或者钢筋混凝土中形成的一种组合梁，又称为钢骨混凝土组合梁或型钢混凝土组合梁(图 1.1(a))。钢梁外露组合梁也称为钢混凝土组合梁，通常意义上的钢混凝土组合梁即普通工字钢混凝土组合梁(图 1.1(b))是指将混凝土翼板通过抗剪连接件与下部钢梁相连，形成共同受力的一种结构形式，具有承载力高、刚度大、抗震性能好等优点，特别是在正弯矩作用下，混凝土翼板受压，下部钢梁受拉，可充分发挥钢与混凝土两种材料的优点。但是这种普通钢混凝土组合梁在负弯矩作用下，钢梁下部受压，处于受压区的钢梁可能发生局部失稳和整体失稳。为了提高组合梁的稳定承载力，近几年来，另一种组合梁——外包钢混凝土组合梁得到了发展，这种梁是指在型钢中填充混凝土形成的一种组合梁，其中最受专家学者关注的为外包 U 型钢混凝土组合梁(图 1.1(c))，该组合梁是指将混凝土灌入由钢板焊成或直接冷弯成上翼缘外翻的 U 型钢内，形成 T 形梁的肋部，混凝土楼板通过焊接在 U 型钢外翻边上的抗剪连接件与 U 型钢共同工作，外包 U 型钢与 T 形混凝土通过设置在 U 型钢上翼缘及底板处的抗剪连接件连接在一起共同受力和变形。相对于钢筋混凝土梁，外包 U 型钢混凝土组合梁的优点是：外包钢板可作为组合梁的受力钢筋，所以梁内无需再设置钢筋，这样不仅省去了钢筋绑扎等相关工艺，而且便于梁内混凝土的浇捣；外包

钢内填充的混凝土有效增加了梁的截面刚度，防止外包钢梁发生局部失稳，提高了梁的稳定承载力，降低了梁的高度，增加了房屋的使用空间，另外，梁内混凝土可吸收热量，降低钢结构的升温速度，提高梁的耐火极限；外包 U 型钢的存在有效地改善了梁的延性，提高了梁的抗震性能；U 型钢部件还可作为组合梁内及翼板混凝土的浇筑模板，避免了浇筑混凝土时的模板搭设，使施工速度加快、施工周期缩短，工厂化程度高，连接方便。由此可见，外包 U 型钢混凝土组合梁具有优越的力学和施工性能，具有良好的发展前景。



图 1.1 钢-混凝土组合梁示意图

1.2 钢-混凝土组合梁的研究进展

1.2.1 钢-混凝土组合梁的发展

钢-混凝土组合梁是在钢梁与钢筋混凝土梁基础上发展起来的。钢-混凝土组合梁最早出现在 20 世纪初。1923 年 Mackay H M 在加拿大 Domion 桥梁公司进行了 2 根外包混凝土钢梁试验。同时，英国国家物理实验室也进行了外包混凝土梁的试验。在这两个试验中，试件在钢与混凝土交界面上均没有机械连接件。1925 年 Scott 对钢骨混凝土组合梁的强度进行了试验研究，推导并试验验证了其承载力计算公式。1939 年 Batho、Lash 和 Kirkbam 深入全面地研究了此种组合梁。研究表明，没有连接件的钢与混凝土接触面在滑移出现时组合梁就开始破坏。1923~1939 年，美国、英国和欧洲一些国家研究发现通过设置剪力连接件可以明显提高构件的极限承载力。

20 世纪 40~50 年代，各国学者进一步开展了关于钢-混凝土组合梁抗剪连接件的研究工作并开始制定相应规程。1956 年 L.M.Viest 对栓钉连接进行研究，并提出以残余滑移为 0.07mm 时的剪力作为允许抗剪临界值，1964 年 Chapman 和 Balakrishnan 首次进行了带头栓钉的研究，充分考虑了栓钉在钢与混凝土组合梁的滑移和掀起作用下的实际受力情况。研究和应用表明，栓钉在提高组合梁极限承载力的同时，也加快了组合梁的施工速度，并使组合梁以后在压型钢板组合梁楼盖中应用成为可能。在此阶段，各国行业规范、规程开始有了钢与混凝土组合梁的相关

规定：1944年美国州际公路协会(ASSHO)制定的《公路桥涵设计规范》，1946年美国《房屋钢结构设计、制造安装规范》把组合梁的相关规定列入其中章节。德国在第二次世界大战以后，大量采用组合结构。在实践基础上，1955年德国制定了《桥梁组合梁》(DINO78)，1956年制定了《房屋建筑组合梁》(DIN4239)。日本建设省土木研究所于1952年开始进行组合梁的研究，1953年建成了第一座组合梁桥(大阪市神户桥)，1959年制定了《道路钢桥组合梁设计施工指南》，此后日本修建了大量的钢-混凝土组合梁桥。

20世纪60~70年代，钢-混凝土组合梁的研究工作进一步得到深化。研究重点由简支梁转向连续梁，由完全剪切连接组合梁转向部分剪切连接组合梁，由考虑允许应力设计方法转向考虑极限状态设计方法。代表性理论研究成果有1965年R.G.Slutter和R.P.Johnson提出的极限抗弯强度计算方法、1971年R.P.Johnson关于纵向抗剪的计算及1975年R.P.Johnson的部分剪力连接组合梁的强度和变形计算。在该阶段，各国关于钢与混凝土组合梁的规范、规程有了新的发展：1960年美国钢结构协会及钢筋混凝土协会联合组成AISC-ACI组合联合委员会开展钢-混凝土组合梁规范的编制工作。苏联于1962年颁布的《苏联铁路、公路、城市道路桥涵设计技术规范》(CH200—62)中，系统地介绍了“钢-混凝土结合的结构”(习惯上称组合梁)的设计和有关构造。英国分别于1965年和1967年制定《钢与混凝土组合结构·房屋建筑中的简支梁》(cpl17: pt.1)和《钢与混凝土组合结构·桥梁》(cpl17: pt.2)设计标准。1966年，印度标准协会制定了《组合结构设计规范》(IS:3955—1966)。日本于1975年制定了《组合结构设计施工指南及说明》。1979年英国标准协会制定的《钢、混凝土与组合梁桥》的第5章为组合梁桥设计标准。

20世纪80年代至今，研究工作从线性、平面构件开始向非线性、空间体系扩展。同时也开始出现新的截面组合形式，钢-混凝土组合梁广泛应用于大量实际工程中。该阶段，最值得注意的是1971年在国际土木工程师协会联合委员会主持下，成立了由欧洲国际混凝土协会(CEB)、欧洲钢结构协会(ECSS)、国际预应力协会(FIP)、国际桥梁与结构工程协会(AIBSE)共同组成组合结构委员会，并于1981年发表了《组合结构》规范。在此规范的基础上，通过修改与补充，1985年欧洲共同体首次颁布了欧洲规范4(Eurocode4)，它是迄今世界上最完整的一部组合结构规范，全面总结了组合结构的应用与发展。

我国于20世纪50年代初期开始研究钢-混凝土组合梁，早期主要应用在公路、铁路、桥梁方面。1957年建成的武汉长江大桥，其上层公路桥就采用了组合梁。房屋建筑组合梁研究始于50年代北京钢铁设计研究总院。起初钢-混凝土组合梁的研究，并未考虑组合效应，仅仅把混凝土作为强度储备提高安全度而已。1978年后我国开始深入研究组合结构，北京钢铁设计研究总院、哈尔滨建筑工程学院(现合并为哈尔滨工业大学)、清华大学和华北电力设计院等院校和科研设计单位对普通钢混凝土

土组合梁的组合效应进行了研究和应用，取得了一系列具有重要理论意义和实用价值的成果。1983 年，郑州工学院（现郑州大学）对组合梁的槽钢抗剪连接件进行了较为系统的试验研究，得到了槽钢剪力连接件的破坏形态、极限承载力计算公式和极限承载力上限值等。1984 年哈尔滨建筑工程学院（现合并为哈尔滨工业大学）对组合梁抗剪弯筋进行了系统的试验研究。1984 年开始，郑州工学院、冶金部建筑科学研究院等先后研制出国产栓钉设备。从 20 世纪 80 年代中期开始，郑州工学院、清华大学等单位对采用栓钉连接的普通钢混凝土组合梁开展了系统的试验研究和理论分析，包括抗弯承载力、刚度、滑移效应、纵向抗剪和栓钉连接件的实际抗剪承载力、混凝土板纵向抗剪计算方法、疲劳等，提出了考虑滑移效应的变形计算的折减刚度法，并建立了考虑滑移效应的组合梁截面刚度和抗弯强度的简化实用计算公式。清华大学对普通钢混凝土组合梁在负弯矩下的抗弯承载力、裂缝、滑移、连续组合梁调幅系数进行了深入的试验研究和理论分析。清华大学、福州大学对预应力钢-混凝土组合梁的承载力计算方法、刚度、变形计算、内力重分布、预应力效应等进行了系统的试验研究与理论分析。东北大学对火山渣混凝土组合梁进行了试验研究与理论分析，对其极限抗弯承载力、挠度、抗裂性能、剪力连接件形式和交界面的滑移进行了研究，之后又对钢与高强混凝土组合梁截面高度的取值、变形性能及抗裂性能进行了深入的研究。郑州工学院等从 80 年代后期对钢-混凝土叠合板组合梁进行了研究（图 1.2），并将其成功用于多层工业厂房和一些大跨公路桥梁结构中。例如，1993 年设计的北京国贸桥，是国内首次使用钢-混凝土叠合板组合梁的城市立交桥；2000 年建成的深圳北站大桥采用了下承式钢管混凝土钢架系杆拱和预应力钢-混凝土空心叠合板组合梁桥面，是世界上第一座全钢-混凝土组合结构拱桥；上海杨浦大桥和南浦大桥的桥面结构也采用了钢-混凝土叠合板组合梁等。从 1985 年开始，组合楼盖在高层建筑结构中广泛应用，我国陆续建成的超高层建筑如金茂大厦、浦东国际金融大厦、国际航运大厦等也都采用了钢-混凝土组合梁。

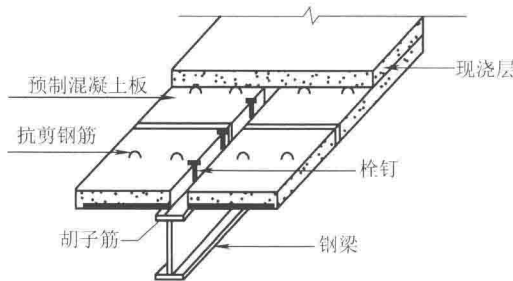


图 1.2 钢-混凝土叠合板组合梁示意

我国研究者已在钢-混凝土组合梁研究方面取得一系列成果，并编入相关规程，如 1974 年我国交通部颁发的《公路桥涵设计规范》、1986 年颁布的《公路桥涵钢结

构及木结构设计规范》(JTJ 025—1986)、1991年颁布的《火力发电厂主厂房钢-混凝土组合结构设计暂行规定》(DLGJ 99—1991)、1997年原冶金工业部颁发的《钢骨混凝土结构设计规程》、我国现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)、《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138—2001)、《钢-混凝土组合结构设计规程》(DL/T 5085—1999)都包括钢-混凝土组合梁的相关内容。

为了便于读者较全面地了解钢-混凝土组合梁,特别是外包钢混凝土组合梁的研究现状,下面对国内外学者取得的一些主要成果进行简要的归纳和总结。

1.2.2 钢-混凝土组合梁的研究进展

1. 普通钢混凝土组合梁

普通钢混凝土组合梁是将钢梁与混凝土楼板用抗剪连接件连接,使混凝土板作为梁的翼缘与钢梁组合在一起,整体共同工作形成组合T形梁。这种结构构造简单,施工方便,与传统非组合结构相比,由于组合梁的强度与刚度的提高,节省钢材约25%~30%,并且降低了梁的高度,从而降低建筑物的层高与总高。普通钢混凝土组合梁最早应用于公路、铁路、桥梁,随后应用到房屋建筑,尤其是钢结构建筑及工业厂房中的工作平台。图1.3为常见的普通钢混凝土组合梁,图1.4为普通钢混凝土组合梁不同形式的抗剪连接件。

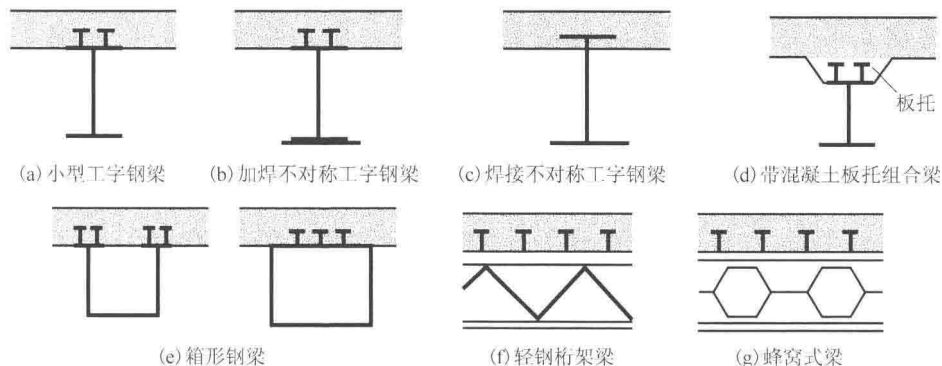


图 1.3 几种常见的普通钢混凝土组合梁

1) 受弯极限承载力

聂建国等(2000, 2001)基于塑性理论,按照一般叠加法根据钢梁和混凝土剪切连接程度的不同分别建立了钢-混凝土组合梁的极限承载力公式。现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)采纳了聂建国等提出的公式,并对部分抗剪连接组合梁承载力公式进行了简化。

2) 变形和刚度

聂建国等(1995)按照折减刚度法提出了普通钢混凝土组合梁弹性范围内的刚度和变形公式。试验研究证明,在钢梁和混凝土翼缘均为弹性材料的假设下,提出的刚度和变形计算公式具有良好的精度。

余志武等(2003)对不同荷载作用下普通钢混凝土组合梁的滑移及变形进行研究,将钢-混凝土组合梁间的剪力连接拟符合 Goodman 假设的弹性夹层,建立简支梁挠度和滑移的微分方程,推导了滑移与挠度的理论公式。该公式较好地描述了变形和滑移之间的相互关系,但计算复杂,不便于工程应用。

目前,有关塑性状态下普通钢混凝土组合梁刚度和变形的研究较少,研究工作还有待进一步开展。

3) 栓钉实际承载力、纵向抗剪以及混凝土翼缘的纵向劈裂验算

聂建国等(1996)基于普通钢混凝土组合梁剪力连接件的试验研究,对规范中规定的栓钉连接件极限承载力公式进行了修正,并提出了较为实用的普通钢混凝土组合梁纵向抗剪的验算公式。欧洲规范规定了组合梁混凝土翼缘的纵向劈裂验算。

2. 型钢混凝土组合梁

型钢混凝土组合梁是指在混凝土中配置轧制或焊接型钢,型钢可分为实腹式型钢和角钢骨架的桁架式配钢两类。在配置实腹型钢的构件中还配少量钢筋与钢箍。这种结构形式在英国、美国等西方国家称为 Concrete-Encased Steelwork,简称 Encased Beams, Encased Columns 等;苏联称为劲性钢筋混凝土结构,混凝土中的型钢称为劲性钢,配置的钢筋称为柔性钢;日本称为钢骨混凝土结构(铁骨铁筋,コンクリート, Steel Reinforced Concrete, 简称 SRC)。

由于截面中配置了型钢,构件承载能力、刚度提高明显,因而极大地减小了构件的截面尺寸,增加了房间的使用面积,节省了大量钢材,降低了造价,防锈、防腐蚀、防火性能提高。型钢混凝土梁因其构造配筋复杂,设计中必须细致考虑。

型钢混凝土组合梁中型钢与混凝土的黏结力远小于钢筋与混凝土的黏结力,试验表明型钢与混凝土的黏结力约为光面钢筋黏结力的 45%。故在型钢混凝土结构中,构件的破坏形态、计算假定、构件承载能力及刚度裂缝要考虑型钢与混凝土的黏结

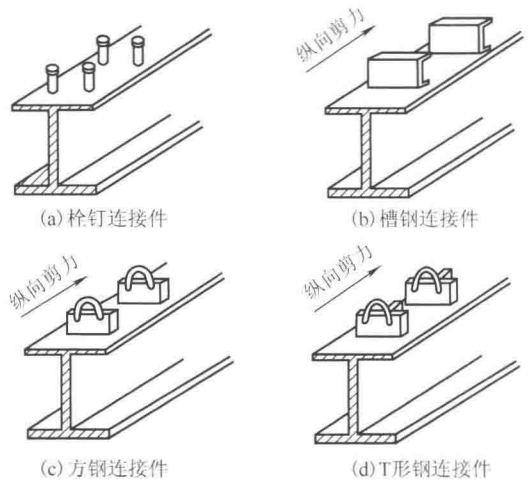


图 1.4 几种常见的钢混凝土组合梁抗剪连接件

滑移。通常有两种方法处理，一种是布置剪力连接件，设成完全剪力连接，另一种是不设或仅在梁端设置剪力连接件。

型钢混凝土组合梁的受弯极限承载力计算主要有简单叠加法，即将型钢和钢筋混凝土作为两个独立部分，将其承载力进行简单叠加。试验证明此方法偏于安全，日本规范主要采用这种方法。赵鸿铁(2001)考虑了型钢与混凝土的共同作用，采用一般叠加法建立了型钢混凝土组合梁的受弯极限承载力计算公式。另外，赵鸿铁还提出了型钢混凝土梁短期刚度的计算公式，认为型钢混凝土梁短期刚度 B_S 为荷载短期效应下梁中钢筋混凝土部分的刚度 B_{RC} 、型钢部分的刚度 B_{SS} 、被约束混凝土“刚心”部分的刚度 B_C 三者之和，即 $B_S = B_C + B_{SS} + B_{RC}$ ，该公式考虑了混凝土和型钢的组合作用。

3. 外包钢-混凝土组合梁

1) 国外研究现状

自 20 世纪 20 年代开始，国外学者对钢混凝土组合梁进行了大量的试验研究和理论分析，但研究的重点主要集中在普通钢混凝土组合梁上。随着组合结构的发展，研究者开始对外包薄壁型钢-混凝土组合梁进行研究，探讨了不同截面形式的外包钢组合梁的抗弯承载力、抗剪承载力、外包钢板的屈曲承载力以及外包钢板与混凝土之间的滑移效应，并取得了阶段性的研究成果。

Wright(1990)和 Bradford 等(1995a)对薄壁型钢-混凝土组合梁中的薄壁型钢局部屈曲性能随时间的变化进行了理论研究。研究表明：在钢板内侧设置加劲肋可有效提高钢板与混凝土共同工作的性能；在长期荷载作用下，混凝土的收缩和徐变将会引起钢板压应力随时间的持续而增加。

Oehlers 等(1993)对外包压型钢板-混凝土组合梁(图 1.5)进行了抗弯和抗剪性能试验研究，比较了外包压型钢板-混凝土组合梁与钢筋混凝土梁的受力性能；分析了不同纵筋配筋率下的组合梁的承载力，进而研究了压型钢板的组合作用。研究表明：外

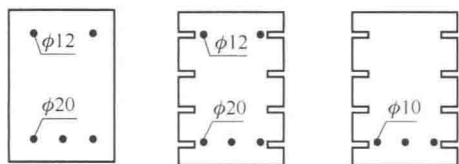


图 1.5 外包压型钢板-混凝土组合梁

包的压型钢板可有效提高组合梁的抗弯承载力、抗剪承载力以及梁的延性；梁内混凝土不仅可显著增大组合梁的截面刚度，减少梁的变形；而且可提高压型钢板的屈曲承载力，使钢板宽厚比增大 70%。Oehlers 等还分析了不同截面形式的压型钢板形成的组合梁的应力传递机制，运用能量法探讨了该组合梁的抗弯承载力计算公式。

Uy 等(1995b)对外包压型钢板-混凝土组合梁进行了有限元分析，研究了如图 1.6 所示三种不同截面形式的组合梁中压型钢板的局部屈曲性能。研究表明：压型钢板的凹凸部分可有效提高压型钢板与混凝土之间的黏结力，保证压型钢板与混凝土的

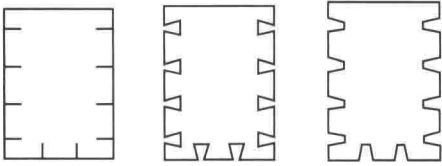


图 1.6 外包压型钢板-混凝土组合梁

荷载-滑移曲线。

Hossain 等(1998)对如图 1.7 所示的冷弯薄壁型钢-混凝土组合梁进行了试验研究,分析了薄壁型钢开口处的连接方式以及混凝土特性对组合梁受力性能的影响。研究表明:内填混凝土可有效提高外包钢板的屈曲承载力;组合梁的承载力与开口处的连接方式有关,图 1.7 中带有焊接钢筋梁的受力性能最好;与普通混凝土相比,内填轻骨料混凝土的组合梁受力性能较好。

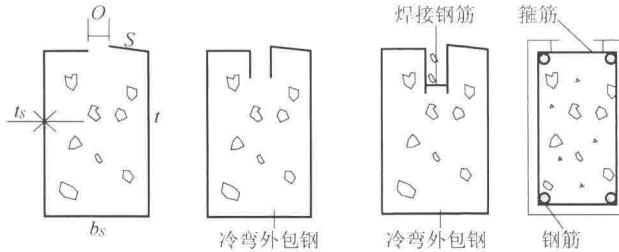


图 1.7 冷弯薄壁型钢-混凝土组合梁

Nakamura(2002)结合实际工程,对三种不同截面形式的外包冷弯 U 型钢-混凝土组合梁进行了试验研究,第一种是 U 型钢梁与混凝土翼板组成的组合梁(图 1.8(a));第二种是在 U 型钢内填充混凝土,并与配有预应力筋的混凝土翼板形成的组合梁(图 1.8(b));第三种是不考虑混凝土翼板的作用,由 U 型钢及其内部混凝土组成的组合梁(图 1.8(c))。研究表明:由 U 型钢与混凝土翼板组成的组合梁在正弯矩作用下,U 型钢受拉,混凝土板受压,可充分发挥钢材和混凝土的优点;在负弯矩作用下,U 型钢内混凝土的存在可避免 U 型钢的局部屈曲,显著提高组合梁的承载力和变形能力。

Vo 等(2007)对箱型薄壁型钢-混凝土组合梁的受力性能进行研究。研究表明:内填混凝土可减少外包型钢局部屈曲的半波;相对于开口的外包薄壁型钢,封闭的箱型薄壁型钢可提高组合梁的抗弯承载力。

2) 国内研究现状

近些年来,国内学者开始对外包钢混凝土组合梁进行试验研究和理论分析,研究的截面形式主要包括箱型冷弯薄壁型钢-混凝土组合梁、上翼缘外翻的帽形冷弯薄壁型钢-混凝土组合梁和上翼缘内翻的外包 U 型钢-混凝土组合梁,探讨了各种组合梁的工作机理、破坏模态、承载能力及设计方法,并取得一些研究成果。