

Experiment and Analysis of Steel and Lightweight
Aggregate Concrete Composite Beam

钢-轻骨料混凝土组合梁 试验与分析

刘殿忠 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

钢-轻骨料混凝土组合梁试验与分析

刘殿忠 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

钢-轻骨料混凝土组合梁试验与分析 / 刘殿忠著. —北京: 知识产权出版社, 2016.10

ISBN 978 - 7 - 5130 - 4504 - 9

I. ①钢… II. ①刘… III. ①轻集料混凝土-钢筋混凝土梁-组合梁-研究

IV. ①TU375.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第233718号

内容提要

本书通过钢-轻骨料混凝土组合梁试验介绍了钢-轻骨料混凝土组合梁的抗弯性能和组合梁中栓钉的抗剪性能, 提出了钢-轻骨料混凝土组合梁的承载能力和变形计算方法、栓钉的承载力计算方法, 分析了钢-轻骨料混凝土组合梁的承载能力和挠度因素, 阐述了钢-轻骨料混凝土连续组合梁的变形性能等。

本书可供土木工程技术人员、科研人员及有关专业师生参考。

责任编辑: 祝元志

封面设计: 刘 伟

责任校对: 潘凤越

责任出版: 卢运霞

钢-轻骨料混凝土组合梁试验与分析

刘殿忠 著

出版发行: 知识产权出版社有限责任公司

社 址: 北京市海淀区西外太平庄55号

责任编辑: 010 - 82000860 转 8513

发行电话: 010 - 82000860 转 8101

印 刷: 北京中献拓方科技发展有限公司

开 本: 720mm × 960mm 1/16

版 次: 2016年10月第1版

字 数: 175千字

ISBN 978 - 7 - 5130 - 4504 - 9

网 址: <http://www.ipph.cn>

邮 箱: 100081

责编邮箱: 13381270293@163.com

发行传真: 010 - 82000893/82005070/82000270

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

印 张: 12.5

印 次: 2016年10月第1次印刷

定 价: 48.00元

出版版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

前 言

钢-轻骨料混凝土组合结构是在钢-混凝土组合结构和轻骨料混凝土结构的基础上发展起来的一种新型组合结构。钢-轻骨料混凝土组合梁具有节约钢材、截面受力合理、结构自重小、构件整体稳定性好、延性好等优点,可增加结构跨度或层高,降低基础处理费用,获得较好的经济效益和社会效益。同时,使用轻骨料代替天然骨料配制混凝土,可以减少对天然骨料资源的消耗,保护环境,有利于可持续发展。钢-轻骨料混凝土组合结构更适应建筑物向高度更高、跨度更大的方向发展的需求。因此,钢-轻骨料混凝土组合结构是一种理想的结构体系,具有很好的发展前景。

试验研究和理论分析表明,钢-轻骨料混凝土组合梁是一种安全、高效、经济及施工方便的结构形式,适用于多高层建筑结构及大跨度桥梁结构,在大中跨度桥梁建设中具有很强的竞争力,市场前景广阔。我国北方寒冷地区,施工工期较短,钢-轻骨料混凝土组合梁具有施工速度快、对施工机械要求低的优点,推广这种结构对于加快公路、铁路建设及房屋建设具有重要意义。

作者对钢-轻骨料混凝土组合梁的力学性能做了试验和理论研究,主要研究工作和成果包括:①对钢-轻骨料混凝土组合梁中抗剪连接件做了试验研究,分析了抗剪连接件受力过程中界面的滑移特性,给出了抗剪连接件极限承载力的计算方法;②开展钢-轻骨料混凝土组合梁的模型试验,探讨了组合梁的界面滑移性能、挠度曲线和延性等参数的变化规律;③对钢-轻骨料混凝土组合梁的变形性能做了研究,提出了组合梁极限承载力和变形的实用计算方法;④开展体外预应力钢-轻骨料混凝土组合连续梁的试验研

究,探讨了体外预应力连续组合梁的变形计算方法。

本书共分10章,分别介绍了钢-轻骨料混凝土组合梁连接件的抗剪性能、梁的抗弯性能及体外预应力组合连续梁的变形性能,详细阐述了相关的试验工作、力学行为分析和计算方法等。

研究生刘东辉、赵庆明、闻玉辉和夏法磊等在本书相关试验研究和模拟分析中做了大量的工作,在此表示诚挚感谢。

本书是作者在多年的研究工作基础上完成的,由于作者水平所限,书中难免存在缺点和不足之处,欢迎读者提出宝贵意见。

目 录

1 绪 论.....	1
1.1 引言	1
1.2 钢-混凝土组合梁在国内外的的发展及应用	2
1.3 轻骨料混凝土结构	9
1.4 钢-轻骨料混凝土组合梁国内外研究现状	13
2 钢-轻骨料混凝土组合梁的有效宽度分析.....	19
2.1 计算方法简介	19
2.2 影响有效宽度的因素	21
2.3 各国规范对组合梁翼板有效宽度的规定	22
2.4 翼缘板有效宽度分析	23
2.5 钢-轻骨料混凝土组合梁有效宽度分析	24
2.6 钢-轻骨料混凝土组合梁考虑滑移的有效宽度分析	32
2.7 小结	40
3 钢-轻骨料混凝土连接件推出试验.....	43
3.1 推出试件的设计与制作	43
3.2 材料性能	45
3.3 推出试验	48
3.4 小结	50
4 推出试验结果分析.....	51
4.1 试验测量结果	51

4.2	推出试件受力模型及破坏形态	54
4.3	栓钉连接件荷载-滑移分析	56
4.4	轻骨料混凝土板的掀起分析	58
4.5	界面滑移分析	59
4.6	小结	62
5	钢-轻骨料混凝土栓钉连接件承载力分析	63
5.1	栓钉连接件的工作机理	63
5.2	钢材本构关系	64
5.3	栓钉连接件施加反力计算	65
5.4	计算结果分析	68
5.5	计算结果与试验结果的对比分析	73
5.6	栓钉连接件承载能力分析	73
5.7	小结	75
6	钢-轻骨料混凝土组合梁模型试验	77
6.1	试件的设计与制作	77
6.2	轻骨料混凝土组合试验梁材料性能	80
6.3	轻骨料混凝土组合梁试验测试	81
6.4	小结	84
7	钢-轻骨料混凝土组合梁试验结果分析	85
7.1	试件破坏形式	85
7.2	荷载-位移曲线	87
7.3	轻骨料混凝土荷载-应变曲线	87
7.4	钢梁荷载-应变曲线	89
7.5	钢梁和轻骨料混凝土板跨中截面的应变分布	90
7.6	轻骨料混凝土板跨中宽度方向应变分布	91
7.7	轻骨料混凝土组合梁滑移曲线	92
7.8	轻骨料混凝土组合梁挠度分布曲线	93

7.9 轻骨料混凝土组合梁与普通混凝土组合梁延性对比分析	94
7.10 小结	95
8 钢-轻骨料混凝土组合梁抗弯承载力分析	97
8.1 组合梁材料本构关系	97
8.2 滑移效应对组合梁承载力的影响分析	99
8.3 轻骨料混凝土组合梁弹性抗弯承载力分析	101
8.4 轻骨料混凝土组合梁塑性抗弯承载力分析	103
8.5 有效宽度对极限抗弯承载力的影响	105
8.6 钢-轻骨料混凝土简支组合梁的 $M-\phi$ 关系	107
8.7 轻骨料混凝土组合梁抗弯承载力实用计算方法	110
8.8 小结	111
9 钢-轻骨料混凝土组合梁变形计算	113
9.1 有效宽度对钢-轻骨料混凝土组合梁挠度的影响	113
9.2 抗剪连接件对钢-轻骨料混凝土组合梁挠度的影响	114
9.3 滑移效应对钢-轻骨料混凝土组合梁挠度的影响	116
9.4 轻骨料混凝土组合梁实用变形计算方法	131
9.5 小结	134
10 体外预应力钢-轻骨料混凝土组合连续梁变形性能	135
10.1 影响体外预应力钢-轻骨料混凝土组合梁变形性能的因素 ..	135
10.2 体外预应力钢-轻骨料混凝土组合连续梁变形性能	139
10.3 体外预应力钢-轻骨料混凝土组合连续梁试验分析	151
10.4 体外预应力钢-轻骨料混凝土组合连续梁有限元模拟分析 ..	168
10.5 计算结果分析	171
10.6 小结	178
参考文献	179

1 绪 论

1.1 引言

钢-轻骨料混凝土组合梁是在钢-混凝土组合梁和轻骨料混凝土结构的基础上发展起来的一种新型组合梁。采用钢-轻骨料混凝土组合梁可明显减小结构自重、节省结构材料用量、提高结构的抗震性能、降低基础处理费用,可获得较好的经济效益和社会效益。同时,使用轻骨料代替天然骨料配制混凝土,可以减少对天然骨料资源的消耗,有利于保护环境,实现可持续发展。因此,钢-轻骨料混凝土组合梁更适应于高层建筑、大跨度结构,是一种理想的结构构件,具有很好的发展前景。

钢-轻骨料混凝土组合梁是一种安全、高效、经济及施工方便的结构形式,适用于多高层建筑结构及大跨度桥梁结构。与钢梁比较,这种组合梁可节省投资10%~40%。与钢筋混凝土梁相比,组合梁自重轻,截面高度小,抗震性能好,施工周期短。钢-轻骨料混凝土组合梁在大中跨度的桥梁及多高层房屋建设中有很强的竞争力,市场前景广阔,对于加快公路、铁路及房屋建设具有重要意义。

关于钢-轻骨料混凝土组合梁桥的研究在我国仅处于初始阶段,目前尚无一套完整的计算理论与设计方法,因此,深入开展钢-轻骨料混凝土组合梁桥的研究是非常必要的。由于钢-轻骨料混凝土组合梁继承了普通钢-混凝土组合梁和轻骨料混凝土结构的优点,同时也弥补了普通钢-混凝土组合梁自重过大的不足。为深入研究钢-轻骨料混凝土组合梁桥的工作性能和力学行为,有必要借鉴钢-混凝土组合梁及轻骨料混凝土结构的研究和分析方法。

1.2 钢-混凝土组合梁在国内外的的发展及应用

钢-混凝土组合梁是通过剪力连接件将上部的钢筋混凝土板与下部钢梁组合成整体共同工作的组合受弯构件。钢-混凝土组合梁可充分发挥钢材抗拉性能及混凝土抗压性能好的优点。与钢梁相比,组合梁可以节省钢材20%~40%,每平方米造价可降低10%~40%,梁的挠度可减少 $1/3 \sim 1/2$,结构稳定性好,具有较强的防锈和耐火能力。与钢筋混凝土梁相比,组合梁自重轻,截面高度小,抗震性能好,施工速度快。组合梁以其能够充分利用材料的特性、抗震性好、造价低等优点受到业界的广泛关注,被广泛地应用到工业、民用建筑和桥梁结构等各个领域^[1,2]。

1.2.1 钢-混凝土组合梁在国外的的发展现状

20世纪20年代出现钢-混凝土组合梁,最初用作高层建筑的楼层梁,之后在公路桥梁和铁路桥梁中开始使用。1944年美国国家公路运输协会(AASHTO)规范中增加了组合梁部分,适用于公路桥梁。1952年AISC规范开始用于楼层梁,英国在1959年和1967年增加了BS449规范组合梁设计章节。1955年,德国在DIN1078规范中增加了公路桥梁组合梁,1956年在DIN4239规范中增加了建筑组合梁,1974年增加钢-混凝土组合梁设计与施工规范的补充条文。1974年,西欧10国在国际土木工程学会发动下由CEB、FIP、ECCS和IABSE共同组成的组合结构委员会(ECCS)^[3],1979年发表组合结构典型规程草案,1981年出版正式文本(ECCS1,即欧1)。经历了一段使用后,积累了一定的经验,西方各国开始制定相应的设计规范(考虑两种材料的组合作用),后由欧洲标准委员会(CEN)修订和完善。1992年,欧洲规范4(EC.4)出版。欧洲规范4(EC.4)是当今较为完整的一部钢-混凝土组合结构设计规范,新的EC.4由两部分组成:第一部分于1992年颁布,分别涉及了组合结构设计的一般规则和建筑工程中组合结构的设计方法与防火规定;第二部分于1997年颁布,是关于桥梁组合结构

设计的内容,包括受动载作用组合梁的设计。由于设计规范已完善,加之组合梁结构工作性能良好,钢-混凝土组合结构(建筑结构及桥梁结构)在欧洲得到了广泛应用^[4-6]。

在钢-混凝土组合梁的计算理论方面,1912年,Andrews首次提出基于弹性理论的换算截面法,即把混凝土或钢的截面换算成钢或混凝土的面积,然后根据初等弯曲理论进行截面设计和计算。它的物理意义明确,计算简便,适用于组合梁弹性工作阶段的应力及变形分析。换算截面法是假定钢与混凝土两种材料均为理想的弹性体,两者连接可靠,完全共同变形,通过弹性模量比将两种材料换算成一种材料进行计算。这种方法一直作为弹性分析和设计的基本方法而被各种设计规范采用。但是用换算截面法分析组合梁存在两点不足:一是材料并非理想弹性体;二是由于组合梁是通过抗剪连接件将混凝土翼缘板和钢梁连接在一起,在受力过程中,组合梁的梁板交界面上产生相对滑移,由于栓钉本身变形,两种材料无法完全共同变形,理论分析与实际情况有一定的差距,其承载力及变形计算结果将偏于不安全。

1951年,N.M.Newmark提出了组合梁交界面纵向剪力微分方程^[7]。他最先考虑了钢梁与混凝土板交界面上相对滑移对组合梁承载能力和变形的影响,建立了比较完善的不完全交互作用理论,其基本假定是:①抗剪连接是连续的;②滑移的大小与所传递的荷载成比例;③两种材料在交界面上的挠度相等。在他推导的微分方程中,未知量是抗剪连接件在交界面上产生的轴向力。对于承受集中荷载作用的简支组合梁,可用其微分方程求解出交界面上的轴向力、交界面上的剪力分布、滑移应变和挠度的大小。该理论公式较为复杂,不便于实际应用,但由于它考虑了组合梁交界面上的相对滑移的影响,具有重大的理论意义。

1959~1965年,Lehigh大学的Thurlimann对极限强度理论在组合梁中应用的可行性做了一系列的试验研究。研究表明,对于一般钢-混凝土组

合梁, 当其承受极限弯矩时, 组合截面的中和轴通常在混凝土板内。在组合梁极限承载力的计算中, 可以认为钢梁全截面均已达到抗拉屈服强度。应用内力平衡条件(混凝土截面上的总压力等于钢梁截面上的总拉力), 就可以确定塑性中和轴的位置, 进而求出极限弯矩。研究结果还表明, 若抗剪连接件的总强度足以抵抗钢梁中的极限拉力, 梁板交界面上的滑移就不会对极限抵抗矩的形成产生显著的影响, 由于柔性连接件具有剪力重分布的能力, 构件破坏前, 所有连接件都将承受大小相等的水平剪力。无论组合梁承受集中荷载还是均布荷载, 抗剪连接件都可以等间距布置。

极限强度理论简便实用。由于该理论假定钢梁全截面均达到塑性屈服, 并在计算简图中采用了经过简化的塑性矩形应力块, 因此在欧洲钢结构协会(ECCS)的组合结构规程及我国重新修订的《钢结构设计规范》中, 极限强度理论又被称为简化塑性理论。

1960年, Viest对185根钢-混凝土组合梁和249个推出试件的试验结果进行了汇总, 并对不同学者提出的简支组合梁弹性承载力、极限承载力及挠度的计算方法进行了对比分析^[8]。

1964年, Chapman对17根简支钢-混凝土组合梁进行了试验研究, 变化的参数包括梁的跨度、抗剪连接件类型和间距及加载方式等。试件的破坏模式主要有两种: 混凝土翼缘板压溃模式和栓钉破坏模式。试验表明, 在计算组合梁极限承载力时, 可以不考虑纵向钢筋的影响, 按极限平衡方法设计栓钉连接件是合理有效的。

1965年, Barnard研究了影响组合梁极限抗弯能力的因素。由于抗剪连接件受到剪力作用后会发生变形, 无论是完全抗剪连接还是部分抗剪连接, 钢梁与混凝土翼缘板之间都存在滑移效应。且由于混凝土翼缘板与钢梁弯曲刚度的不同, 导致在荷载作用下二者之间必然发生被掀起的趋势。所以, 组合梁完全共同工作状况下的理论极限承载力总要大于实测极限承载力。

1972年, Illinois大学、Missouri大学、Sydney大学和Imperial学院分别对简支组合梁的弹塑性承载力进行了系统分析和研究。结果表明, 在非弹性分析中, 假定钢梁和混凝土板的应变沿截面高度呈线性分布, 仅在钢梁与混凝土翼缘板的界面处不连续; 同时假定混凝土抗拉强度为零, 受压时则为梯形的应力-应变关系, 钢梁则为理想弹塑性模型或者是弹性-应变硬化的本构模型。

1972年, Johnson和Willmington研究了部分抗剪连接组合梁。试验研究表明, 当采用完全抗剪连接时, 只要钢梁尚处于弹性范围以内, 混凝土板与钢梁之间的滑移和掀起效应较小。而实际使用时钢梁中的最大应力通常不到其屈服应力的 $1/2$, 故采用部分抗剪连接设计也可以满足使用要求。

1975年, Johnson等根据已有的研究成果提出了部分抗剪连接组合梁的简化计算方法。部分抗剪连接组合梁极限抗弯承载力可以根据完全抗剪连接组合梁和纯钢梁的极限抗弯承载力, 按抗剪连接程度进行线性插值而得到。研究还提出了部分抗剪连接组合梁的挠度可按抗剪连接程度进行线性插值得到。分析表明, Johnson按抗剪连接程度进行线性插值而提出的部分抗剪连接组合梁极限抗弯承载力和变形的简化计算公式与试验结果不尽相符, 计算结果偏于保守。

1990年, Crisinel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。研究表明, 栓接角钢抗剪连接件是一种有效的抗剪连接件形式, 可以替代栓钉连接件。在此基础上, Crisinel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, 根据这一方法所得到的极限承载力计算结果与试验结果吻合。

1997年, Richard等对44根钢-混凝土简支组合梁在静力及疲劳荷载作用下的试验结果进行了汇总。这44根组合梁试件变化的参数主要包括抗剪连接程度、混凝土板的横向配筋、应力幅及应力比。试验表明, 疲劳荷载作用下一般混凝土翼缘板首先开始出现裂缝, 裂缝逐步扩展, 最终导致试

件发生破坏。部分疲劳试验中抗剪连接件附近的混凝土出现压溃现象,疲劳试验中组合梁的抗弯刚度逐渐减小,完全抗剪连接组合梁与80%抗剪连接程度的组合梁在疲劳试验中的受力性能相差不大。

国外的研究表明,钢-混凝土组合梁桥当跨度超过某一值时均比非组合钢桥节省钢材^[9]。对于跨度超过18m的桥梁,组合梁桥在综合效益上具有一定优势^[10]。法国统计指出,当跨度为30~110m,特别是60~80m,钢-混凝土组合梁桥的单位面积造价要低于混凝土桥18%。在这一跨度范围内,法国近年建造的桥梁中85%都采用了组合技术^[11,12]。

体外预应力可减小构件截面尺寸,为减轻大跨度桥梁的自重,可以用钢板代替箱形截面混凝土桥梁的腹板,同时还能够减少体外预应力所引起的腹板剪力。为了减少混凝土收缩徐变所造成的混凝土翼缘板有效预应力显著减小的问题,又进一步发展了波纹钢腹板组合梁桥。波纹钢腹板具有较强的抗剪和抗屈曲能力,而纵向抗压能力较低,作为混凝土箱梁腹板时几乎不对纵向预应力产生抵抗,从而大大提高了预应力导入的效果,使得上、下混凝土翼缘板在恒载作用下均处于体外预应力所引起的受压状态。1986年,法国首次设计和建造了采用波纹钢腹板的Cognac组合桥。此后,法国、日本等国建成了多座波纹钢腹板组合桥。目前,我国正在对这种桥梁形式开展研究,但在实际应用中仍存在很多问题尚待解决^[13]。

钢-混凝土组合梁桥是继钢桥和钢筋混凝土桥梁之后又一种被工程界所接受并迅速发展的桥梁结构形式。组合梁桥充分发挥了钢材和混凝土的力学特性,施工方便、快捷,综合效益显著,是桥梁工程的重要发展方向之一,应用前景广阔^[14]。

1.2.2 钢-混凝土组合梁的国内发展及应用现状

我国在20世纪50年代就开始在桥梁结构中应用组合结构,已有多年的应用历史。从20世纪60年代开始,国内设计、科研单位以及大专院校为

推广和应用钢-混凝土组合结构做了大量的工作,如中国三冶集团、鞍钢设计院、原哈尔滨建筑工程学院、原郑州工程学院、清华大学、同济大学等科研单位先后开展了组合梁试验及连接件推出试验的研究工作,针对抗剪连接件进行了系统研究。随着组合梁的设计理论由弹性设计理论转为塑性设计理论,组合梁的设计理论也日臻完善,为组合梁的推广和应用提供了理论依据。在工程应用及试验研究的基础上,我国也制定了相应的组合结构设计规范和标准图集。1956年出版的铁路桥梁标准图中列入了五种不同跨度的组合梁,并在乌山桥和衡阳湘江桥中采用了组合梁进行了实例应用;1973年,《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》列入了组合梁部分;1986年,《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ 025—86)对公路组合梁桥做出了具体规定^[15];1989年,《铁路组合桥设计规定》(TBJ 24—89)对铁路组合梁桥也做了相应的规定^[16];1988年,《钢结构设计规范》(GBJ 17—88)第一次将钢-混凝土组合梁作为单独一章列入^[17],不过上述规范或规定仅适用于承受静载作用的普通简支组合梁;2003年颁布的《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)扩大了应用范围,适用于不直接承受动力荷载作用的简支及连续组合梁^[18]。

1997年,聂建国等通过对组合梁抗弯承载力影响因素研究,建立了考虑滑移效应的组合梁弹性和极限抗弯承载力计算公式。研究表明,考虑滑移效应的弹性抗弯承载力计算值与实测值吻合较好。考虑承载力极限状态时钢梁部分截面进入强化阶段的有利影响,滑移对极限抗弯承载力的影响可以忽略不计。通过对8根钢-混凝土简支组合梁的试验研究,分析了影响组合梁纵向开裂的主要因素,建立了组合梁纵向抗剪的计算模型和计算公式,对组合梁的纵向抗剪计算和横向钢筋设计具有实用参考价值。对其中4根部分抗剪连接组合梁进行分析,建立了考虑抗剪连接程度影响的组合梁极限抗弯承载力计算公式,将计算结果与国内外12根部分抗剪连接组合梁的试验结果进行了比较。计算表明,按照这一公式得到的计算值与实测值

吻合。对于完全抗剪连接和横向配筋率不小于0.6%的组合梁,按照简化塑性理论得到的极限抗弯承载力计算值与实测值吻合良好。

钢-混凝土组合梁桥由于其跨越能力强、结构高度小、抗震性能好及施工速度快等优点,受到建设单位广泛认可。自从1959年建成的武汉长江大桥上层公路桥采用了组合梁($L=18\text{m}$)后,近年来,在我国公路和城市立交桥建设中组合梁的应用取得了举世公认的进步。1993年,北京国贸桥,在三个主跨采用了钢-混凝土叠合板连续组合梁结构,缩短工期近一半,未中断下部交通,而且比钢筋混凝土梁桥自重减轻约50%,比钢桥节省钢材30%左右。继国贸桥之后,北京市又有多座大跨立交桥的主跨采用了这种结构形式,如北京航天桥(主跨73m)和朝阳桥(主跨64m)钢-混凝土组合梁结构,取得了显著的技术经济效益和社会效益^[19]。上海、深圳、长沙、岳阳、海口、鞍山、石家庄、济南、西安等城市也正在建造大跨钢-混凝土叠合组合桥梁结构,最大跨度已达到95m。1994年建成的上海南浦大桥为跨径425m的斜拉桥,其加劲梁采用了钢-混凝土组合梁^[20]。2001年,沈阳市东西快速干道工程为减少满堂支架施工对路口交通的影响,也为了保证整个高架桥梁高度一致,采用了钢-混凝土组合结构^[21]。

除在桥梁结构工程中应用外,组合结构在建筑结构方面的应用也不断增多。20世纪60年代初由北京工业设计院和中国建筑科学研究院设计,在广州塑料厂建设中采用组合梁,节省钢材35%,挠度为 $f=L/1000$,属于弹性工作,安全度达到3.0。1976年,承德钢厂工程中采用了 $L=18\text{m}$ 组合吊车梁及组合平台梁。20世纪70年代以来组合结构开始用于工作平台,如大庆新华电厂平台,以及1981年建造的荆门电站平台等。天津交通局设计的总调度大楼采用了槽钢连接件的组合梁。1988年开始建设的国家重点建设项目——太原第一热电厂五期工程,在 $7\text{m}\times 9\text{m}$ 的柱网中采用叠合板组合梁结构,同现浇组合楼层相比,不仅缩短工期1/3,而且由于节省了支模工序和模板等,降低造价18%。北京国际技术培训中心的两幢18层塔楼,楼盖结

构采用冷弯薄壁型钢-混凝土简支组合梁,与钢筋混凝土叠合楼板相比较,结构自重降低29%,水泥消耗节约34%,钢材消耗节约22%,木材的消耗节约7%,造价降低5%,施工周期缩短25%,并且使建筑标准提高了一大步。1996年建设的大连新世纪大厦,因施工期限等原因,将原设计改为钢-混凝土组合结构^[22]。20世纪80年代后,随着改革开放的深入,中外合资建设的高层及超高层建筑物其楼层结构均采用组合梁结构,代表建筑物有上海世贸中心大厦(高425m)、深圳赛德广场大厦(高300m)等。

在钢-混凝土组合梁的基础上,近年来又相继出现钢-高强混凝土组合梁、预制装配式钢-混凝土组合梁、叠合板组合梁、钢-轻骨料混凝土组合梁、预应力钢-混凝土组合梁、钢板夹心组合梁及外包钢-混凝土组合梁等多种新的结构形式。预应力钢-混凝土组合梁,采用体外预应力索改善了组合梁的受力性能,也是钢-混凝土组合结构一种新的结构形式,但预应力索需要定期维护和更换^[23-25]。钢-轻骨料混凝土组合梁是一种性能优良的新型组合构件,其自重轻,可以跨越更大的跨度,且具有优良的抗震性能,因此具有良好的发展前景。

1.3 轻骨料混凝土结构

轻骨料混凝土(Lightweight Aggregate Concrete, LWAC),也称为轻集料混凝土,指用轻骨料、普通砂(或轻砂)、水泥和水配制而成,干表观密度不大于 1950 kg/m^3 的混凝土^[26]。

1.3.1 轻骨料

轻骨料混凝土中的骨料可利用工业废渣,如废弃锅炉煤渣、煤矿的煤矸石、火力发电站的粉煤灰等作为轻骨料,可降低混凝土的生产成本。利用废弃物,减少城市或厂区的污染,减少堆积废料占用的土地,有利于保护环境。实际工程中轻骨料又分为结构级轻骨料和隔热级轻骨料,结构