

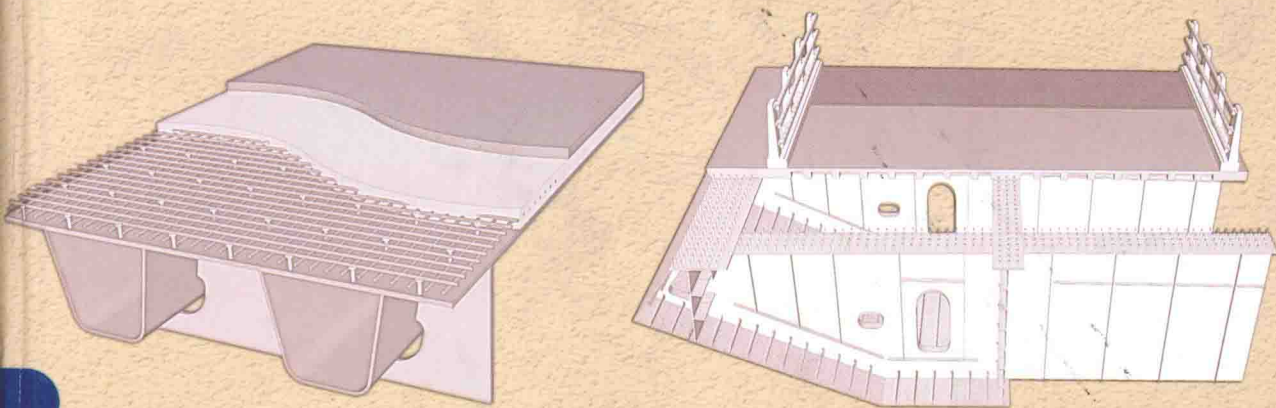
多灾害作用下特大跨径桥梁适宜结构体系、关键结构与原型设计
研究著作书系

国家自然科学基金项目 (51178177, 51378194)
交通运输部重大科技专项 (2011318494160) 资助

钢-超高性能混凝土 轻型组合桥梁结构

The Steel-UHPC Lightweight Composite Bridge Structures

邵旭东 胡建华 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

多灾害作用下特大跨径桥梁适宜结构体系、关键结构与原型设计研究著作书系

国家自然科学基金项目(51178177,51378194)

交通运输部重大科技专项(2011318494160)资助

The Steel-UHPC Lightweight Composite Bridge Structures

钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构

邵旭东 胡建华 著



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

国际上将抗压强度在 150MPa 以上、使用寿命超 200 年的一类新型混凝土称为超高性能混凝土 UHPC (Ultra High Performance Concrete)。

钢-超高性能混凝土轻型组合梁是一种新的桥梁结构,由钢梁和超高性能混凝土薄桥面板组合而成,具有自重轻、强度高、收缩徐变小、开裂风险低、超长耐久等突出优势,应用于大跨径桥梁结构时,既解决了传统钢桥的正交异性钢桥面易疲劳开裂及铺装层常破损的难题,同时也避免了传统钢-混凝土组合梁自重大、负弯矩区易开裂的弱点,应用前景广阔。本书系统介绍了作者研究团队 5 年来在此领域所做的原创性成果以及在大型桥梁工程中的应用。

本书可供桥梁工程专业的高年级本科生、研究生、教师,以及从事桥梁工程科研、设计和施工的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构 / 邵旭东, 胡建华著

· 一北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015. 10

ISBN 978-7-114-12280-4

I. ①钢… II. ①邵…②胡 III. ①钢筋混凝土桥-桥梁结构 IV. ①U448.34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 115863 号

书 名: 钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构

著 作 者: 邵旭东 胡建华

责任编辑: 张征宇 赵瑞琴

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京盛通印刷股份有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 26

字 数: 632 千

版 次: 2015 年 10 月 第 1 版

印 次: 2015 年 10 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12280-4

定 价: 95.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

作者简介

邵旭东 工学博士,1961年生于浙江富阳(今杭州市富阳区),国务院特殊津贴专家,湖南大学二级教授,现任湖南大学桥梁工程系主任、桥梁研究所所长,桥梁工程“国家重点学科”带头人、校学术委员会委员、“高校985工程”创新团队负责人。兼任中国公路学会桥梁与结构工程分会常务理事、茅以升桥梁基金会委员、国家自然科学基金项目评审专家、国际桥梁与结构工程协会(IABSE)会员、湖南省桥梁学会副理事长、农工民主党中央委员等职。主要研究方向为大跨与新型桥梁结构。长期致力于研究消减桥梁病害的科学问题与关键技术,研发了治理箱梁腹板开裂的高效短索预应力体系,得到广泛应用。已主持国家自然科学基金、教育部博士点基金、交通运输部科技项目、大型桥梁专题研究等70余个项目的研究工作。在美国ASCE刊物、土木工程学报等高级别杂志上发表学术论文100余篇,发明专利授权12项,主持编著并由人民交通出版社出版了《桥梁工程》、《桥梁设计百问》、《桥梁设计与计算》、《半整体式无缝桥梁新体系》等四部教材和专著,其中《桥梁工程》教材已印刷18次8万余册,被国内30余所主要高校采用,受到广泛好评。获国家科技进步二等奖一次,省科技进步一等奖三次。

胡建华 工学博士,研究员级高工,全国工程设计大师,湖南省人民政府院士专家咨询委员会委员。现任湖南省交通规划勘察设计院副院长,湖南大学教授、博士生导师,兼任中国公路勘察设计协会副理事长、湖南省土木与建筑学会副理事长等。荣获湖南省最高综合性科技奖—光召科技奖、湖南省优秀专家、首批新世纪“百千万人才工程”国家级人选、全国优秀科技工作者、享受国务院政府特殊津贴专家、湖南省劳动模范等荣誉称号。主持设计了岳阳洞庭湖一桥、益阳茅草街大桥、佛山平胜大桥、湘西矮寨大桥、汝郴赤石大桥和岳阳洞庭湖二桥等特大型桥梁工程20多项,以及湖南吉首至茶洞、汝城至郴州和四川雅安至泸沽等高速公路300多公里。获国家科技进步二等奖3项、省技术发明一等奖1项、省科技进步一等奖4项,全国优秀工程设计金奖2项,詹天佑土木工程奖3项,发明专利5项。出版《现代自锚式悬索桥理论与应用》等专著2部,发表论文67篇,其中被SCI、EI收录17篇。

序

大跨径桥梁通常采用钢梁或钢-混凝土组合梁,在我国已大量修建,为桥梁事业做出了重要的贡献。但从长期使用效果看,钢桥面易出现正交异性板疲劳开裂、沥青铺装层早期破坏等病害,钢-混凝土组合梁则因自重较大,用于特大跨径桥梁时经济性欠佳,且负弯矩区域混凝土开裂的难题也未能有效解决。

桥梁技术的革命性进步无疑需依赖材料的突破及结构创新。邵旭东教授的科研团队经过长期努力,引入了超高性能混凝土(UHPC)材料,深入研究 UHPC 材料的性能及在组合结构中应用的要求,提出了与 UHPC 材料性能相适应的多种轻型组合桥梁结构,为解决长期困扰桥梁工程师的难题找到了一条好出路。

经过 5 年的攻关,邵旭东教授的科研团队研发了:

(1)传统正交异性钢桥面 + 薄层 UHPC(书中称为轻型组合梁 I),主要用于旧钢桥面的加固改造。其特点是在不增加原桥面重量的前提下,大幅度降低正交异性板在汽车荷载下的应力水平,提高钢桥面板的局部刚度,从而大大降低了正交异性板疲劳开裂的风险,延长了铺装层的使用寿命。

(2)简化的正交异性钢桥面 + 薄层 UHPC(书中称为轻型组合梁 I_a),用于新建桥梁。受力特点及优势与轻型组合梁 I 基本相同,只是正交异性板轻型化后,经济性更好。

(3)钢梁 + UHPC 薄板(书中称为轻型组合梁 II),其受力性能与传统钢-混凝土组合梁相近,只是用 UHPC 薄板代替了较厚的混凝土板,自重仅为后者的 60% ~ 70%,用在特大跨径桥梁上有一定竞争力。

《钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构》一书对上述 3 种轻型组合梁做了详细的介绍,包括钢桥及钢-混凝土组合桥梁的发展现状、轻型组合梁的类型、UHPC 材料性能与应用、钢-UHPC 界面抗剪、轻型组合梁的静力和疲劳性能、UHPC 接缝强化技术、次内力的影响、设计施工方法、典型工程研究与应用等,共 10 章,内容较为全面,有理论分析、试验研究,也有工程实践,全书体现了作者团队的研究成果结晶,部分成果应用于马房大桥、佛陈大桥等实桥后,效果显著。

超高性能混凝土在我国桥梁上的应用,目前尚处于起步阶段。我参观了采用正交异性钢桥面 + 薄层 UHPC 结构的马房大桥、佛陈大桥,通读了书稿,相信《钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构》一书的出版,将会引起桥梁同仁的极大兴趣,为钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构的推广应用,推动桥梁技术的进步,建设更安全耐久的桥梁做出重要的贡献。

郑皆连

2015.5.9

前 言

大跨径桥梁通常由钢桥和钢-混凝土组合桥梁构成,钢桥发展已有百余年历史,而钢-混凝土组合桥梁也有 60 余年历史。改革开放以来,我国修建了众多的大跨径钢桥和钢-混凝土组合桥梁,为国民经济和社会发展做出了重要的贡献。

然而,长期工程实践表明,上述两类桥梁存在以下若干难题未能有效解决:

对于钢桥,一是钢桥面铺装极易损坏,二是正交异性钢桥面板各种连接处易出现疲劳裂缝。对于钢-混凝土组合梁,应用于大跨径桥梁时,负弯矩区混凝土易出现受拉开裂,另一方面,由于自重较大,应用于跨径超过 600m 的大跨柔性桥梁时并不经济。

上述有关大跨桥梁的疑难问题长期得不到解决,根本性原因或是结构自重大,或是材料及连接易出现静力和疲劳开裂。如要解决这些难题,就必须引入新的高性能材料,研发新的结构。得益于作者同事黄政宇教授长期以来对超高性能混凝土 UHPC (Ultra-High Performance Concrete) 材料的深入研究,自 2010 年以来,作者与黄教授密切合作,研发了与 UHPC 材料性能相适应的多种钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构,力求材料与结构相得益彰,以期综合诊治钢桥及钢-混凝土组合桥所面临的难题,之所以称为“轻型组合”,主因是 UHPC 桥面板较薄,与钢形成组合结构后自重较轻。

本书较为系统地介绍了三种钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构的构造形式、力学性能及工程实例,全书共 10 章,各章主要内容如下:

第 1 章 传统钢桥及钢-混凝土组合桥梁概述,简要阐述了钢桥及钢-混凝土组合桥的发展历程、结构类型、存在的问题;第 2 章 钢-UHPC 轻型组合桥梁结构的主要类型,介绍了三种钢-超高性能混凝土轻型组合梁的基本构成、技术经济比较;第 3 章 UHPC 材料的基本性能及应用,介绍了 UHPC 材料的力学性能、耐久性及在桥梁工程中的应用情况;第 4 章 钢-UHPC 结合面抗剪设计,介绍了栓钉和局部焊接钢筋网两种界面连接方式,包括抗剪承载力、抗剪刚度、抗剪疲劳性能等;第 5 章 钢-UHPC 轻型组合梁的静力性能,介绍了轻型组合梁在不同 UHPC 板厚下的纵、横向弯拉性能;第 6 章 钢-UHPC 轻型组合梁疲劳性能,介绍了轻型组合梁的 UHPC 板抗弯拉疲劳性能,以及正交异性钢板各构造细节的疲劳应力验算方法;第 7 章 分次浇筑的 UHPC 接缝强化技术,介绍了多种 UHPC 接缝强化构造措施的效果,以及 UHPC 一旦破损后,相关拆除和修补技术;第 8 章 日照及收缩效应的影响,介绍了以热传导分析为基础的轻型组合梁温差效应计算原理;不同养护条件、不同约束条件下,轻

型组合梁中 UHPC 收缩内应力的特点;第 9 章 设计、施工与验收方法,介绍了两种轻型组合梁的材料构成、极限状态设计方法、疲劳验算方法,构造要求及施工、检验和验收方法;第 10 章 典型工程的研究与应用,共介绍了应用于 12 个不同结构体系桥梁情况。

本书是作者团队的共同研究成果,全书由邵旭东撰写、修改、定稿,胡建华提供了洞庭湖二大桥等多个大型桥梁的设计实例,博士生曹君辉、张哲、潘仁胜、陈斌、熊满华、张龙威,硕士生刘梦麟、刘鹏、王文前、周环宇、丁楠、张策、龙波、李文光、刘瑜、欧阳泽卉、张松涛、方恒、杨波、吴佳佳、孔令方、黄细军、张士红、李召辉、郑晗、彭勃、管亚萍等在相关的研究中出色完成了工作,从而为本书做出了重要的贡献,朱平和易笃韬参与编写了部分书稿,廖子南、李玉祺、曲宛桐、姚又琳、郭程、甘屹东、乔秋衡、申鼎宇、朱忠、汪尔颖、谭健、邬玉标参与了校订工作,在此一并向他们深表感谢。

钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构在我国的应用处于初始阶段,其优越的性能被人知晓与接受尚需要有个过程。万事开头难,为此,由衷感谢第一个“敢吃螃蟹的人”——广东省交通运输厅原副厅长陈冠雄先生,为新技术于 2011 年在马房桥钢桥面上应用,并让其他多种铺装方案同台竞技比较提供了绝佳的机会。目前轻型组合桥梁结构新技术在全国的顺利推广,离不开尊敬的郑皆连、聂建国、凤懋润、史永吉、郑明珠、廖朝华、包琦玮、王昌将、梁立农、宁平华、周爱国等学者和专家的相助;项海帆、周绪红老师的鼓励;以及广东省公路勘察规划设计院、湖南省交通规划勘察设计院、北京市市政工程设计研究总院、浙江省交通规划设计研究院、广州市市政工程设计研究院、天津市交通科学研究院、长沙市规划设计院等单位桥梁同仁的支持,在此一并致以特别的感谢。

钢-超高性能混凝土轻型组合桥梁结构的抗超载能力强,并具有长耐久性,希望本书的出版能为这种新颖结构在我国的应用起推动作用。

书中若有差错和不当之处,敬请读者指正。

邵旭东 胡建华
2015 年 6 月于岳麓山下

术 语

超高性能混凝土 ultra-high performance concrete, UHPC

抗压强度在 150 MPa 以上的水泥混凝土材料。

超高韧性混凝土 super toughness concrete, STC

经组分优化并密配钢筋后,具有高抗拉强度和高抗拉韧性的一类超高性能混凝土,是正交异性钢桥面上专用的混凝土材料。

轻型组合梁 I lightweight composite bridge I

由传统正交异性钢桥面板和 STC 薄层通过栓钉等剪力键连接形成的一种组合桥梁结构。

轻型组合梁 I_a lightweight composite bridge I_a

由经过优化的正交异性钢桥面板和 STC 薄层通过栓钉等剪力键连接形成的一种组合桥梁结构。

轻型组合梁 II lightweight composite bridge II

由钢主梁与 UHPC 薄桥面板通过栓钉等剪力键连接形成的一种组合桥梁结构。

正交异性钢桥面 orthotropic steel bridge deck, OSD

一种由钢面板和相互正交的纵、横向加劲肋组成的钢桥面板结构。

华夫板 waffle deck panel

一种外形类似于华夫饼的带纵横肋桥面板。

最大密实度理论 maximum compactness theory

通过组分设计优化使水泥基混凝土在细观上各组分材料堆积密度最大的复合材料理论。

干燥收缩 dry shrinkage

水泥基混凝土硬化后由毛细孔水损失引起的体积收缩。

自收缩 autogenous shrinkage

水泥基复合材料在饱水状态下水化反应所产生的化学收缩。

塑性收缩 plastic shrinkage

混凝土材料在浇筑后硬化前处于塑性状态时发生的体积收缩。

蒸汽养护 steam treatment

水泥基混凝土材料在较高的蒸汽温度(60~95℃)和湿度条件下的养护过程称为蒸汽养护,而 UHPC 材料在温度为 90℃、相对湿度为 95% 的蒸汽条件下养生 48 小时的过程称为标准蒸汽养护。

纤维取向系数 fiber orientation coefficient

纤维混凝土结构中纤维实际沿某一特定方向分布的取值系数,即实际纤维分布与假定

空间随机分布的力学特征值之比。

应变硬化 strain hardening

纤维增强复合材料的轴拉应力-应变曲线中,峰值应力不低于其初裂应力,这一现象称为应变硬化。

应变软化 strain softening

纤维增强复合材料的轴拉应力-应变曲线中,应力达到初裂应力曲线后即开始下降,这一现象称为应变软化。

抗剪刚度 shear stiffness

在钢-混凝土组合结构中,衡量剪力键中所承受的剪力与钢-混凝土界面相对滑移的力学量,单位通常为 kN/mm 。

受拉刚化效应 tension stiffening

配筋混凝土构件受拉时,裂缝间混凝土的受力效应。在开裂断面,所有拉力均由钢筋承担,而在裂缝间的区域,由于混凝土与钢筋的黏结作用,混凝土也能承担部分的拉力。

开裂强度 cracking strength

超高性能混凝土出现可视裂缝时的拉应力。

局部刚度 local stiffness

衡量桥面系对局部车轮荷载弹性抵抗效果的力学量。

焊接钢筋网 shear connectors with welded horizontal steel meshes

将纵向钢筋间断焊接在钢桥面板顶面、并将横向钢筋点焊在横筋顶面,形成的一种建筑高度小的分布剪力键,尤其适用于采用超薄 STC 层的轻型组合梁。

疲劳寿命 S-N 曲线 S-N curve for fatigue life prediction

体现疲劳寿命 N 与所施加的应力幅 S 关系的图,也称沃勒曲线(Wöhler curve)。

疲劳等级 fatigue category

在 200 万次疲劳寿命下,对细节的疲劳强度(单位为 MPa)进行归类并等级划分,该等级称为“疲劳等级”。

疲劳损伤细节 fatigue-prone details

钢结构中具有典型连接形式和焊缝表面处理方式的构造细节,也是易出现疲劳损伤的细节。

热点 hot spot

由于波动应力、焊缝几何构造或类似缺口的联合作用,结构中可能萌生疲劳裂缝的点。

热点应力 hot spot stress

也称“结构应力(structural stress)”或“几何应力(geometric stress)”,指构件中考虑了结构不连续效应的应力,由膜应力和弯曲应力组成。

名义应力 nominal stress

构件中可通过基本力学理论(如初等梁理论)求解得到的应力。

强化接缝 strengthened joint

在各类轻型组合梁中,由于 STC 或 UHPC 在接缝处纤维不连续,抗拉强度较低,通过强化接缝构造以提高其抗拉强度。

符 号

材料性能有关符号

STC25——抗弯拉强度标准值为 25 MPa 的超高韧性混凝土；

E_c ——超高韧性混凝土的抗压/抗拉弹性模量；

E_s ——钢材的弹性模量；

E_r ——钢筋的弹性模量；

G_c ——超高韧性混凝土的剪切性模量；

G_s ——钢材的抗剪弹性模量；

f_{ck} 、 f_{cd} ——不配筋的超高韧性混凝土的轴心抗压强度标准值、设计值；

$f_{cu,k}$ ——边长 100mm 的超高韧性混凝土立方体抗压强度标准值；

f_{fk} 、 f_{fd} ——超高韧性混凝土抗弯拉强度标准值、设计值；

f_{td} ——不配筋的超高韧性混凝土的轴心抗拉强度设计值；

$\varepsilon_{crack,d}$ ——不配筋的超高韧性混凝土的轴心受拉初裂应变设计值；

ε_{td} ——不配筋的超高韧性混凝土的轴心受拉极限应变设计值；

f_t^r ——配筋的超高韧性混凝土的名义弯拉应力容许值；

$f_{t,joint}^r$ ——接缝处配筋的超高韧性混凝土的名义弯拉应力容许值；

f_y ——钢材的屈服强度；

f_d ——钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值；

f_{vd} ——钢材抗剪强度设计值；

f_{cd} ——钢材断面承压强度设计值；

f_{stud}^y 、 f_{stud} ——栓钉的屈服强度和抗拉强度；

f_{sk} 、 f_{sd} ——普通钢筋抗拉强度标准值、设计值；

f'_{sk} 、 f'_{sd} ——普通钢筋抗压强度标准值、设计值；

$[\Delta\sigma_c]$ ——疲劳验算中，超高韧性混凝土的容许应力幅；

$[\Delta\sigma_s]$ ——疲劳验算中，钢结构构件或构造细节的容许应力幅。

作用和效应有关符号

M ——弯矩设计值；

N_s ——计算荷载下单个剪力连接件所承受的剪力；

N_v^c ——剪力连接件的抗剪承载力设计值；

V ——剪力设计值；

σ_c ——STC 层的应力；

σ_s ——钢主梁应力;

$\Delta\sigma_c$ ——标准疲劳车作用下,超高韧性混凝土层的应力幅;

$\Delta\sigma_s$ ——标准疲劳车作用下,钢主梁构件或构造细节处的应力幅。

几何参数有关符号

A_c ——超高韧性混凝土层的截面面积;

A_s ——钢主梁的截面面积;

A_{sc} ——钢主梁受压区的截面面积;

A_{st} ——钢主梁受拉区的截面面积;

A_r ——正弯矩区超高韧性混凝土层有效宽度范围内的纵向钢筋截面积;

A_{rt} ——负弯矩区超高韧性混凝土层有效宽度范围内的纵向钢筋截面积;

A_{stud} ——栓钉的钉杆截面面积;

H ——组合梁截面高度;

L ——组合梁计算跨度;

I_0 ——组合梁截面的换算截面惯性矩;

b_c ——超高韧性混凝土层的有效宽度;

h_c ——超高韧性混凝土层的厚度;

$l_{d,l}$ ——栓钉纵向间距;

$l_{d,t}$ ——栓钉横向间距。

计算系数及其他有关符号

γ_F ——疲劳荷载分项系数;

γ_M ——疲劳抗力分项系数;

μ ——荷载冲击系数。

目 录

第 1 章 传统钢桥及钢-混凝土组合桥梁概述	1
1.1 钢桥概述	1
1.1.1 钢桥的特点及发展历程	1
1.1.2 钢桥的主要结构类型	3
1.2 钢桥中存在的主要问题	10
1.2.1 涂装劣化及钢材腐蚀	10
1.2.2 钢桥面铺装损坏	11
1.2.3 正交异性桥面板疲劳开裂	13
1.3 钢-混凝土组合桥梁概述	14
1.3.1 钢-混凝土组合桥梁的发展历史	14
1.3.2 钢-混凝土组合桥梁的主要类型	16
1.4 钢-混凝土组合桥梁存在的主要问题	20
1.4.1 连续组合梁桥	20
1.4.2 组合梁斜拉桥	20
1.5 本章小结	21
参考文献	21
第 2 章 钢-UHPC 轻型组合桥梁结构的主要类型	23
2.1 钢-UHPC 轻型组合桥梁结构概述	23
2.1.1 轻型组合梁 I——传统正交异性钢桥面 + 薄层 UHPC	23
2.1.2 轻型组合梁 I _a ——简化的正交异性钢桥面 + 薄层 UHPC	24
2.1.3 轻型组合梁 II——钢梁 + UHPC 薄板	24
2.2 传统正交异性钢桥面 + 薄层 UHPC(轻型组合梁 I)	24
2.3 简化的正交异性钢桥面 + 薄层 UHPC(轻型组合梁 I _a)	25
2.4 钢梁 + UHPC 薄板(轻型组合梁 II)	25
2.5 轻型组合梁与传统钢梁或组合梁的技术经济对比	26
2.5.1 力学及施工性能对比	26
2.5.2 经济性能对比	29
2.6 本章小结	31
参考文献	32
第 3 章 UHPC 材料的基本性能及应用	33
3.1 UHPC 材料的力学性能	33
3.1.1 抗压性能	33

3.1.2	抗拉性能	37
3.1.3	弹性模量	43
3.1.4	徐变	45
3.1.5	收缩	46
3.1.6	泊松比	47
3.1.7	热膨胀系数	47
3.1.8	抗冲击性能	47
3.1.9	疲劳性能	48
3.1.10	钢筋锚固长度	49
3.2	UHPC 材料的耐久性	50
3.2.1	抗渗性	50
3.2.2	抗冻性	51
3.2.3	碳化	51
3.2.4	耐磨性	52
3.2.5	钢纤维腐蚀	52
3.2.6	耐火性	53
3.3	耐久性设计	53
3.3.1	设计原则	53
3.3.2	环境条件和暴露等级划分	54
3.3.3	保护层厚度设计	56
3.3.4	裂缝宽度控制	58
3.4	UHPC 材料在桥梁工程中的应用	64
3.5	本章小结	70
	参考文献	71
第4章	钢-UHPC 结合面抗剪设计	80
4.1	引言	80
4.2	栓钉连接件的抗剪性能	80
4.2.1	规范中栓钉连接件计算公式	80
4.2.2	短栓钉抗剪承载力试验和参数分析	82
4.2.3	短栓钉的抗剪刚度	87
4.2.4	短栓钉疲劳试验 1(推出试件模型)	89
4.2.5	短栓钉疲劳试验 2(钢-UHPC 组合梁模型)	93
4.3	焊接钢筋网连接件的抗剪性能	95
4.3.1	概述	95
4.3.2	焊接钢筋网抗剪承载力试验和参数分析	95
4.3.3	焊接钢筋网抗剪刚度	101

4.3.4 焊接钢筋网的疲劳特性	102
4.4 两种抗剪方式的比较	102
4.5 结合面抗剪设计要点	103
4.5.1 轻型组合梁 I 和 I _a 的抗剪设计	103
4.5.2 轻型组合梁 II 抗剪设计	104
4.6 钢-UHPC 结合面抗剪设计实例	106
4.6.1 栓钉连接件设计实例	106
4.6.2 焊接钢筋网连接件设计实例	109
4.7 本章小结	113
参考文献	113
第 5 章 钢-UHPC 轻型组合梁的静力性能	115
5.1 钢-UHPC 轻型组合梁的受力特点	115
5.1.1 轻型组合梁 I 和 I _a	115
5.1.2 轻型组合梁 II	115
5.2 轻型组合梁 I 和 I _a 纵向弯拉性能	116
5.2.1 轻型组合梁 I	116
5.2.2 轻型组合梁 I _a	126
5.3 轻型组合梁 I 和 I _a 横桥向受力模型试验	130
5.3.1 50mm UHPC 板厚模型试验	130
5.3.2 35mm UHPC 板厚模型试验	137
5.3.3 两种 UHPC 板厚的组合板试验对比分析	140
5.4 轻型组合梁 II	140
5.4.1 基本受力性能	140
5.4.2 纵桥向受力模型试验	141
5.4.3 裂缝宽度试验结果	142
5.5 本章小结	143
参考文献	143
第 6 章 钢-UHPC 轻型组合梁疲劳性能	145
6.1 引言	145
6.2 轻型组合梁 I 的理论分析	145
6.2.1 热点应力法建模原则	145
6.2.2 疲劳验算细节与细节疲劳强度	146
6.2.3 计算实例简介	149
6.2.4 有限元建模	149
6.2.5 UHPC 层厚度对钢桥面板疲劳应力幅的影响	151
6.2.6 钢-UHPC 轻型组合梁疲劳寿命估算	166

6.3 轻型组合梁 I 的疲劳试验	171
6.3.1 虎门大桥 UHPC 层应力计算	171
6.3.2 疲劳试验装置	172
6.3.3 疲劳试验荷载上下限的确定	173
6.3.4 疲劳试验过程	175
6.3.5 疲劳试验结果	175
6.3.6 疲劳试验结果讨论	177
6.4 轻型组合梁 I ₀ 的疲劳试验	178
6.4.1 试验模型	178
6.4.2 疲劳试验	179
6.4.3 疲劳后的剩余强度试验	180
6.4.4 实桥 UHPC 疲劳开裂寿命计算	183
6.5 轻型组合梁 II 的疲劳性能分析	184
6.6 本章小结	184
参考文献	185
第 7 章 分次浇筑的 UHPC 接缝强化技术	188
7.1 引言	188
7.2 企口接缝方案	188
7.2.1 方案构成	188
7.2.2 模型试验	188
7.2.3 试验结果与理论结果对比	193
7.3 加密钢筋接缝方案	198
7.3.1 方案构成	198
7.3.2 模型试验	199
7.3.3 主要试验结果	201
7.4 异形钢板强化接缝方案	201
7.4.1 方案构成	201
7.4.2 模型试验	202
7.4.3 主要试验结果	203
7.5 UHPC 层破损修补处的接缝方案	204
7.5.1 方案构成	204
7.5.2 破损区域 UHPC 拆除技术	205
7.5.3 UHPC 修补技术	206
7.5.4 主要试验结果	207
7.6 UHPC 接缝位置的合理布置	209
7.7 轻型组合梁 II 接缝方案	210

7.7.1 消除主要负弯矩接缝的方案	210
7.7.2 正弯矩接缝方案	211
7.8 本章小结	212
参考文献	213
第8章 日照及收缩效应的影响	215
8.1 轻型组合梁 I 及 I _a 的温度梯度效应	215
8.1.1 热传导分析	215
8.1.2 温度梯度计算	216
8.1.3 温度梯度产生的应力算例	221
8.2 UHPC 收缩对轻型组合梁受力的影响	223
8.2.1 常温养护的超高性能混凝土的塑性收缩和干燥收缩特性	223
8.2.2 热养护条件下超高性能混凝土(UHPC)的干燥收缩特性	236
8.2.3 不同约束条件下超高性能混凝土的收缩引起的内应力发展特点	238
8.2.4 轻型组合梁节段模型中 STC 的收缩变形	245
8.3 本章小结	247
参考文献	248
第9章 设计、施工与验收方法	249
9.1 引言	249
9.2 材料	249
9.2.1 STC	249
9.2.2 钢材	252
9.2.3 普通钢筋	254
9.3 基本规定	255
9.3.1 一般规定	255
9.3.2 承载能力极限状态计算	256
9.3.3 正常使用极限状态验算	257
9.3.4 持久状况及短暂状况应力验算	257
9.3.5 疲劳验算	258
9.3.6 设计流程和设计内容	258
9.4 承载能力极限状态设计	259
9.4.1 抗弯承载力计算	259
9.4.2 抗剪承载力计算	260
9.4.3 整体稳定计算	261
9.4.4 疲劳验算	262
9.5 正常使用极限状态设计	270
9.5.1 一般规定	270

9.5.2	应力验算	271
9.5.3	栓钉内力验算	274
9.5.4	STC 抗裂验算	274
9.5.5	挠度验算	274
9.6	剪力连接件	274
9.6.1	一般规定	274
9.6.2	抗剪承载力设计值	275
9.6.3	剪力连接件疲劳验算	276
9.6.4	剪力连接件的数量计算	276
9.7	构造要求	276
9.8	施工、检验与验收方法简介	277
9.8.1	施工方法	277
9.8.2	检验与验收方法	278
9.9	计算实例	278
9.10	本章小结	281
	参考文献	281
第10章	典型工程的研究与应用	283
10.1	引言	283
10.2	简支钢箱梁桥项目——广东肇庆马房大桥(旧钢桥面改造项目)	283
10.2.1	马房大桥简介	283
10.2.2	轻型组合梁 I 方案设计	285
10.2.3	结构计算	286
10.2.4	室外足尺模型试验	291
10.2.5	实桥施工	293
10.2.6	第三方检测	293
10.3	连续梁桥项目——广东佛山佛陈大桥	299
10.3.1	佛陈大桥简介	299
10.3.2	轻型组合桥面结构方案设计	301
10.3.3	结构计算	301
10.3.4	足尺模型试验	310
10.3.5	实桥施工	324
10.3.6	第三方检测	328
10.4	悬索桥项目——杭瑞高速岳阳洞庭湖二大桥	328
10.4.1	洞庭湖二大桥简介	328
10.4.2	轻型组合梁方案设计	328
10.4.3	结构计算	331