



同济大学 1907-2017
Tongji University



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

薛东焱 刘玉擎 著

双层公路斜拉桥复合桁架梁 关键构造研究

Study on Key Structures of Composite Truss
for Double-Deck Cable-Stayed Bridge



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

薛东焱 刘玉擎 著

双层公路斜拉桥复合桁架梁 关键构造研究

Study on Key Structures of Composite Truss
for Double-Deck Cable-Stayed Bridge



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书以双层复合桁架斜拉桥为研究对象,运用有限元分析和试验研究的方法,对混合梁结合段的受力性能、复合桁架节点的静力及疲劳性能以及多钉剪力连接件的力学性能进行了研究,并得出了一系列有价值的结论。

本书可作为土木工程、桥梁与隧道工程师生的学习用书,也可作为桥梁工程相关专业的科研工作者的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

双层公路斜拉桥复合桁架梁关键构造研究 / 薛东焱,
刘玉擎著. —上海: 同济大学出版社, 2017. 8

(同济博士论丛/伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-6872-1

I. ①双… II. ①薛…②刘… III. ①公路桥—斜拉
桥—桁架—构造—研究 IV. ①U448.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 076102 号

双层公路斜拉桥复合桁架梁关键构造研究

薛东焱 刘玉擎 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 胡晗欣 熊磊丽

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjiipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 10.75

字 数 215 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6872-1

定 价 53.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关佶红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何品晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姍 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际,喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行,倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时,我曾以《百年同济,大学对社会的承诺》为题作了演讲,如今看到付梓的“同济博士论丛”,我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果,也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色,向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学,历经 110 年历史风云,承古续今、汇聚东西,秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,发扬自强不息、追求卓越的精神,在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行,谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今,同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才,包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生,薪火相传,将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任,她的社会责任就是融入国家的创新体系之中,成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新,对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首,强调创新是引领发展的第一动力,要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略,以科技创新为核心带动全面创新,以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今,汇聚东西,百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念,注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流,自强不息,追求卓越。特别是近20年来,同济大学坚持把论文写在祖国的大地上,各学科都培养了一大批博士优秀人才,发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平,而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来,我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理,分类出版,让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际,在学校的支持下,“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月,计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中,聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇,经各院系征询,导师和博士积极响应并同意,遴选出近170篇,涵盖了同济的大部分学科:土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端,在校庆之际首批集中出版110余部,其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务,把培养高素质人才摆在首位,认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此,“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前 言

双层公路桥梁能使城市交通向着立体化、空间化的方向发展,是解决城市交通拥堵问题的有效手段,具有较好的发展前景。上海闵浦大桥为主跨 708 m 双塔双索面双层桥面斜拉桥,上、下层分别为双向 8 车道高速公路和双向 6 车道地方道路。其中跨为钢桁架结构,边跨是由外包混凝土的型钢弦杆、钢竖腹杆、钢斜腹杆、钢斜撑杆、预应力混凝土横梁和混凝土桥面板构成的复合桁架结构。为此,通过模型试验和有限元计算,对钢桁架与复合桁架的混合梁结合段、弦杆与腹杆的连接节点以及钢与混凝土结合面连接件等进行了系统研究。

(1) 以闵浦大桥混合梁结合段为研究对象,进行了结合段局部模型受力性能加载试验,并考虑钢与混凝土间的焊钉连接件作用,对主梁结合段进行了有限元计算分析。依据试验结果和计算结果,探讨了结合段主要板件的应力分布、传力途径、弦杆承载比例和承压板焊钉连接件受力特点等内容。

(2) 针对闵浦大桥边跨复合桁架节点的构造特点,应用有限元子模型的方法,建立了全桥整体模型、节段梁模型、节点模型,对复合桁架节点受力性能的影响因素进行了分析,并开展了复合桁架节点模型的承载

性能试验。依据试验结果和计算结果,研究了主要构件的应力分布、传力路径、承载比例、钢与混凝土相对滑移和节点板焊钉连接件受力特点等内容。

(3) 比较分析复合桁架桥梁的节点形式及其构造特点,研发了节点板开孔式节点和开孔肋板式节点两种新型的节点构造形式。并设计不同节点的模型试件,进行了疲劳承载性能试验,揭示了节点的抗疲劳性能。

(4) 通过焊钉连接件推出试验,分别针对多钉与单钉的不同布置情况进行了对比试验研究。分析了焊钉间距对焊钉的刚度、极限剪切强度、极限滑移和破坏模式的影响,提出了适用于单钉和多钉的焊钉连接件的荷载-滑移关系表达式,并把试验结果与相关规范进行了比较分析。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与目的	1
1.1.1 复合桁架桥梁建设概况	2
1.1.2 上海闵浦大桥简介	9
1.2 研究现状及问题	11
1.2.1 钢混结合段研究现状及存在问题	11
1.2.2 复合桁架节点研究现状及存在问题	13
1.2.3 焊钉剪力连接件研究现状及存在问题	16
1.3 主要研究内容和研究方法	19
第 2 章 复合桁架混合梁结合段局部模型试验研究	23
2.1 概述	23
2.2 上海闵浦大桥混合梁结合段构造特点	26

2.3	混合梁结合段有限元计算结果及分析	28
2.3.1	有限元模型建立	28
2.3.2	钢梁段计算结果分析	30
2.3.3	混凝土梁段计算结果分析	32
2.3.4	焊钉计算结果分析	34
2.4	结合段模型试验及结果分析	35
2.4.1	模型试验方案	35
2.4.2	试验模型有限元计算	40
2.4.3	试验结果与有限元计算分析	41
2.5	本章小结	47
第3章	复合桁架节点静力性能模型试验研究	49
3.1	概述	49
3.2	闵浦大桥复合桁架节点构造特点	50
3.3	复合桁架节点有限元计算结果及分析	51
3.3.1	有限元模型建立	51
3.3.2	节点力学性能计算分析	56
3.3.3	节点受力性能影响因素分析	60
3.4	复合桁架节点模型试验及结果分析	64
3.4.1	节点静力试验方案	65
3.4.2	试验结果及分析	71
3.4.3	节点有限元计算与试验结果对比分析	79
3.5	本章小结	83
第4章	复合桁架节点构造形式及疲劳性能试验研究	85
4.1	概述	85

4.2	复合桁架节点构造形式研发	85
4.2.1	复合桁架节点构造形式	85
4.2.2	复合桁架节点构造形式的研发	91
4.3	复合桁架节点疲劳性能试验方案	95
4.3.1	试验目的	95
4.3.2	模型试件设计与制作	95
4.3.3	试验加载及测试	97
4.4	复合桁架节点疲劳性能试验结果及分析	99
4.4.1	焊钉式节点试验结果及分析	99
4.4.2	节点板开孔式节点试验结果及分析	106
4.4.3	开孔肋板式节点试验结果及分析	112
4.4.4	节点疲劳试验结果比较分析	118
4.5	本章小结	120
第5章	多钉剪力连接件静力性能试验研究	122
5.1	概述	122
5.2	多钉剪力连接件静力性能试验	123
5.2.1	试验内容及目的	123
5.2.2	模型试件设计与制作	123
5.2.3	试验加载及测试	125
5.3	试验结果及分析	126
5.3.1	试件破坏状态	126
5.3.2	荷载-滑移曲线	128
5.3.3	焊钉抗剪刚度的变化	131
5.3.4	极限抗剪强度和相对滑移	131
5.3.5	剪力滑移关系表达式	132

5.3.6 焊钉承载力规范比较	136
5.4 本章小结	138
第 6 章 结论与展望	140
6.1 结论	140
6.2 进一步工作的方向	143
参考文献	145
后记	155

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景与目的

随着经济的发展、城市化进程的加快和居民生活水平的不断提高,汽车保有量迅速攀升,交通拥堵问题日益严重,单纯依靠增加平面交通很难从根本上解决这一难题。此外,城市现有空间被极大压缩,土地使用情况紧张,无法提供大量土地用于交通基础设施建设。双层桥梁在这一背景下应运而生,它能够满足现代交通发展的需求,使城市交通向着立体化、空间化的方向发展,是解决城市交通拥堵问题的有效手段,具有很好的发展前景。

双层桥梁,具有节省建设用地、交通通行量大、经济性好的优点。

桁架桥梁,具有自重轻、节省材料、受力合理、传力明确的优点。

组合结构桥梁,能够较好地利用混凝土抗压强度高、钢材抗拉强度高的特点,充分发挥两种材料的性能,达到节省用材、经济性最佳的目的^[1]。

将这三种桥梁结构的特点有机地结合在一起,就形成了一种新型桥梁结构型式——双层复合桁架桥梁,它是一种上、下桥面板均采用混凝土结构,腹杆采用钢结构的双层桁架桥梁。双层复合桁架桥梁兼具上述三种桥