



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

王彦博 李国强 著

Q460高强钢焊接截面柱 极限承载力试验与理论研究

Experimental and Theoretical Study on the
Ultimate Strength of Welded Q460 High
Strength Steel Columns



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



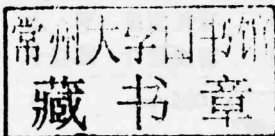
同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

王彦博 李国强 著

Q460高强钢焊接截面柱 极限承载力试验与理论研究

Experimental and Theoretical Study on the
Ultimate Strength of Welded Q460 High
Strength Steel Columns



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书主要对 Q460 高强度焊接箱形截面与 H 形截面柱的极限承载力进行了试验和理论研究,提出了适合 Q460 高强度轴压柱的设计方法。分别采用分割法和盲孔法测试了 Q460 高强度焊接箱形截面与焊接焰割边 H 形截面的残余应力大小与分布情况,基于试验结果提出了简化的残余应力分布模型。然后对 Q460 高强度焊接箱形柱和焊接 H 形柱轴压试验进行了研究,并将试验得到的焊接箱形柱和焊接 H 形柱的极限承载力分别与现有规范预测值进行了初步对比,并给出了相应的参数分析与设计建议。最后讨论了高强度钢在结构中的应用及研究方向。

本书适用于土木工程、钢结构等相关专业和领域的读者。

图书在版编目(CIP)数据

Q460 高强度焊接截面柱极限承载力试验与理论研究 /
王彦博,李国强著. —上海:同济大学出版社,2017.8
(同济博士论丛 / 伍江总主编)
ISBN 978-7-5608-6971-1

I. ①Q… II. ①王… ②李… III. ①高强度钢—焊
接—断面—承载力—试验—研究 IV. ①TG457.11-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 090957 号

Q460 高强度焊接截面柱极限承载力试验与理论研究

李国强 审 王彦博 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 李 杰 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.tongjipress.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、建筑书店、网络书店
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 12
字 数 240 000
版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6971-1

定 价 58.00 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	关侗红
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

高强钢具有比一般钢材更高的屈服强度、抗拉强度,因此在相同的受力条件下使用高强钢构件往往可以采用比普通钢构件更小的截面尺寸。高强钢构件的使用不仅能减少结构空间的占用,同时还能减少运输、焊接等工作量,并可缩短工期,从而带来可观的经济效益。高强度钢材的推广使用能减少对钢材、能源的消耗,减少污染,对建设节约能源型经济与产业升级具有重大意义。

现有《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)所涵盖的承重结构钢材最高牌号为 Q420、Q460 及更高屈服强度的构件设计是否适用现有规范,如何进行分析设计,成为亟待解决的问题。这一问题主要涉及高强钢的材料力学性能、残余应力对高强钢构件影响程度的变化与高强钢基本构件的受力性能等方面。本书针对这些问题进行了系统的试验与理论研究。

高强钢具有不同于普通钢材的残余应力-屈服强度比(残余应力比),残余应力比对试件极限承载力的影响是本书的主要研究内容之一。试验研究中,采用与轴压试件相同的制作工艺加工了 6 根相应的箱形和 H 形截面残余应力试件,分别采用分割法和盲孔法测试了 Q460 高强钢焊接箱形截面与焊接焰割边 H 形截面的残余应力大小与分布。两种方法的试验结果吻合较好,试验结果准确可靠。然后,基于试验结果提出

了简化的残余应力分布模型。最后建立有限元模型,对 Q460 高强钢中厚板焊接箱形截面的残余应力进行了数值模拟。

为了研究高强钢中厚板焊接箱形柱的极限承载力,以 11 mm 和 21 mm 厚国产 Q460 高强钢中厚板制作了 7 个焊接箱形柱和 6 个焊接 H 形柱进行轴心受压试验。箱形试件包含宽厚比 8,12,18 三种截面,长细比分别为 35,50,70;H 形试件共包含三种截面尺寸,外伸翼缘宽厚比分为 3,5,7,长细比分别为 40,55,80。

同时,以数值积分法和有限单元法对已有焊接箱形柱和 H 形柱轴心受压试验进行了数值分析。数值积分法采用笔者编制的电算程序,有限元法采用通用有限元程序 ANSYS。数值模型中考虑了实测的初始挠度、初始偏心及简化的残余应力分布模型,分析预测了 Q460 高强钢焊接箱形柱与 H 形柱轴心受压状态下的力学行为。数值积分法分析结果与有限元分析结果吻合。为了验证数值分析的准确性,将预测结果与已有试验结果进行了对比,发现考虑了残余应力、初始偏心、初始挠度的数值积分法与有限元分析可以准确地预测 Q460 钢焊接箱形柱的受压力学行为。通过对比采用简化残余应力分布模型与采用实测残余应力分布模型的有限元分析结果,验证了简化残余应力分布模型的准确性。

作为有限的试验结果的有力扩充,采用已验证的数值模型对 Q460 钢轴心受压柱的极限承载力进行了参数分析。数值模型考虑了 1/1 000 柱长的初始弯曲及由相应截面尺寸残余应力试验提出的残余应力分布简化模型。试件的主要参数为截面宽厚比与柱长细比。参数分析结果与现有规范的比较结果表明,中厚板 Q460 高强钢焊接箱形柱可采用《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)中高于普通强度钢柱的 b 类柱子曲线;中厚板 Q460 高强钢火焰切割边焊接 H 形柱绕弱轴与绕强轴稳定系数,可沿用《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)中 b 类截面柱子曲线。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景	1
1.1.1 高强钢应用的经济性	2
1.1.2 高强钢的优势	4
1.1.3 高强钢的应用现状	4
1.2 高强钢在结构中的应用的问题	9
1.3 课题研究的意义	11
1.4 本书主要内容	12
第 2 章 文献综述	15
2.1 概述	15
2.2 材料力学性能	15

2.3	高强钢基本构件的极限承载力与变形能力	17
2.3.1	受压构件	17
2.3.2	受弯构件	19
2.4	高强钢构件的连接	22
2.4.1	螺栓连接	22
2.4.2	焊接连接	24
2.4.3	连接节点	24
2.5	高强钢结构的抗震性能	25
2.6	冷轧薄壁高强钢结构研究现状	26
第3章	残余应力测试与数值模拟	29
3.1	概述	29
3.2	残余应力试验方案	30
3.2.1	残余应力测试技术	30
3.2.2	残余应力试件设计与制造	32
3.3	残余应力测试——分割法	34
3.3.1	准备工作	34
3.3.2	分割法试验步骤	36
3.3.3	分割法测量结果	37
3.4	残余应力测试——盲孔法	42
3.4.1	准备工作	42
3.4.2	盲孔法试验步骤	44
3.4.3	盲孔法与分割法测量结果对比	45
3.5	简化残余应力模型	49
3.6	残余应力数值模拟	51

3.6.1 有限元模型的建立	51
3.6.2 边界条件与加载	52
3.6.3 参数设定	53
3.6.4 温度场分析结果	54
3.6.5 应力场分析结果	56
3.7 本章小结	58
第4章 焊接箱形柱轴压试验研究	59
4.1 概述	59
4.2 试验概况	60
4.2.1 试件设计与制造	60
4.2.2 Q460 钢力学性能试验	62
4.2.3 加载制度及测点布置	63
4.2.4 几何初始缺陷	67
4.3 试验结果及分析	67
4.3.1 试验现象与荷载-位移曲线	67
4.3.2 荷载-应变曲线	73
4.4 试验结果与现有规范对比	75
4.4.1 规范简介	75
4.4.2 试验与《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)预测 结果的比较	76
4.4.3 试验与欧洲规范(Eurocode3)预测结果的比较	77
4.5 本章小结	78
第5章 焊接箱形柱的参数分析与设计建议	79
5.1 概述	79

5.2	数值模型的建立	80
5.2.1	数值积分法	80
5.2.2	有限单元法	85
5.3	数值模型的验证	86
5.3.1	极限承载力结果的比较	86
5.3.2	荷载-挠度曲线的比较	87
5.3.3	简化残余应力分布模型的验证	89
5.4	参数分析	91
5.4.1	主要参数	91
5.4.2	计算结果	92
5.4.3	弯曲方向的影响	94
5.4.4	对初始几何缺陷的敏感性	95
5.4.5	宽厚比与长细比	96
5.5	设计建议	100
5.6	本章小结	101
第 6 章	焊接 H 形柱轴压试验研究	102
6.1	概述	102
6.2	试验概况	103
6.2.1	试件设计与制造	103
6.2.2	Q460 钢力学性能试验	106
6.2.3	加载制度及测点布置	108
6.2.4	几何初始缺陷	111
6.3	试验结果及分析	111
6.3.1	试验现象与荷载-位移曲线	111

6.3.2	荷载-应变曲线	116
6.4	试验结果与现有规范对比	118
6.4.1	试验与《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)预测 结果的比较	118
6.4.2	试验与欧洲规范(Eurocode3)预测结果的比较	120
6.5	本章小结	122
第7章	焊接 H 形柱的参数分析与设计建议	123
7.1	概述	123
7.2	数值模型的建立	124
7.2.1	数值积分法	124
7.2.2	有限单元法	127
7.3	数值模型的验证	128
7.3.1	极限承载力结果的比较	128
7.3.2	荷载-挠度曲线的比较	129
7.3.3	简化残余应力分布模型的验证	131
7.4	参数分析	132
7.4.1	主要参数	132
7.4.2	计算结果	133
7.4.3	对初始几何缺陷的敏感性	135
7.4.4	残余应力的影响	136
7.5	设计建议	139
7.5.1	我国《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)	139
7.5.2	欧洲规范(Eurocode3)	142
7.6	本章小结	144