



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

王伟 著 陈以一 审

圆钢管相贯节点非刚性性能 及对结构整体行为的影响效应

Non-rigid Behavior of Unstiffened Circular Tubular Joints
and Their Effects on Global Performance of Steel
Tubular Structures



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

王伟 著 陈以一 审

圆钢管相贯节点非刚性性能 及对结构整体行为的影响效应

Non-rigid Behavior of Unstiffened Circular Tubular Joints
and Their Effects on Global Performance of Steel
Tubular Structures



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书提出了基于结构整体行为的钢管节点性能化设计思想,设定了圆钢管相贯节点非刚性静、动力性能及其对钢管结构整体行为的影响效应这两大研究主题。在评述国内外相关领域研究现状的基础上,从理论和试验两个方面对这两大主题进行了多角度的深入研究与探讨。

本书适合相关专业高校师生和研究人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

圆钢管相贯节点非刚性性能及对结构整体行为的影响
效应/王伟著. —上海:同济大学出版社, 2019. 2

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-7047-2

I. ①圆… II. ①王… III. ①钢管—节点—性能—研究②钢管结构—研究 IV. ①TG142②TU392.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 093380 号

圆钢管相贯节点非刚性性能及对结构整体行为的影响效应

王 伟 著 陈以一 审

出 品 人 华春荣 责任编辑 葛永霞 蒋卓文

责任校对 谢卫奋 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

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 17

字 数 340 000

版 次 2019 年 2 月第 1 版 2019 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-7047-2

定 价 78.00 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	何晶晶
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	阎耀保	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

钢管是大跨度公共建筑、中高层建筑和高耸结构中广泛应用的构件型式。目前我国正在兴建的国家体育场(“鸟巢”)、广州电视塔(世界第一高塔)等重大工程均采用钢管结构。钢管结构与其他钢结构的重要不同在于管与管连接的设计。空间结构钢管构件之间的连接通常采用相贯节点型式,即将一构件直接焊于另一构件的表面,不设任何加劲单元。当相贯节点受荷载作用后,其相邻杆件的连接面发生局部变形,不仅引起相对转动,也产生相对杆轴的位移。这种由几何构造导致节点所具有的独特非刚性性质将对钢管结构的内力、变形以及整体稳定承载力等产生重要影响。尽管近年来钢管结构在我国的应用取得了迅猛发展,但对钢管节点非刚性性能的认识和研究还远远滞后于工程建设的需求,一方面,给工程设计的安全性和经济性造成了不利影响;另一方面,也制约了与基于性能的结构设计思想相适应的钢管结构高等分析理论的发展。

基于上述背景,本书提出了基于结构整体行为的钢管节点性能化设计思想,设定了圆钢管相贯节点非刚性静、动力性能及其对钢管结构整体行为的影响效应这两大研究主题。在评述国内外相关领域研究现状的基础上,从理论和试验两个方面对这两大主题进行了多角度的深入研究与探讨。

首先进行的是圆钢管相贯节点非刚性性能静力试验研究。研制了适用于多种几何形式和多种受力组合的节点性能试验装置,设计了可有效降低扰动影响的节点刚度间接测试方法,分别对2个X形和2个KK形节点在多种

荷载工况组合下的刚度和承载力进行试验,并利用板壳有限单元对节点试件进行非线性有限元分析,最后对节点非刚性静力性能作出评价。结果表明,在一定的几何参数条件下,相贯节点在直至相连腹杆达到屈服强度之前,可以作为全刚接抗弯节点看待。特定钢管结构中全刚接节点和半刚接节点的几何参数分界值的确定,尚有待于更多试验数据和理论分析数据的归纳。此书为今后研究提供了试验基础和比较依据,并校验了有限元分析的适用性。

随后,本书对相贯节点非刚性性能影响参数的识别与计算进行了系统的分析研究。从对相贯节点变形机理的描述入手,阐述了局部刚度的定义。然后运用正交试验设计方法建立计算模型,分别对9个T形和Y形节点、25个K形节点进行数值模拟分析,通过多元回归技术,建立它们的刚度系数或柔度系数的计算公式。计算结果表明,腹杆与弦杆的直径比、弦杆的径厚比这两个因素对圆管相贯节点的刚度有比较显著的影响,而腹杆与弦杆的壁厚比影响较小。通过对现有国内外计算公式的比较和基于国际钢管节点试验数据库的统计分析,本书建立了具有较高精度和可靠性的相贯节点抗弯承载力计算公式。在此基础上,通过采用同时考虑几何非线性与材料非线性的有限元分析技术,进一步建立了T形相贯节点 $M-\theta$ 关系的全过程非线性模型,以便在空间钢管结构的整体分析中考虑节点的非线性全过程变形行为。

在从试验研究和理论计算两个方面分析了相贯节点的非刚性特征之后,本书将梁柱框架半刚性节点分析理论拓展至空间钢管结构体系,选取空腹格构梁为研究对象,建立了可有效反映钢管节点非刚性性能的子结构模型,从结构整体变形层面上建立了钢管非刚性节点刚度判定准则。Warren型钢管格构梁和单层肋环型球面网壳也是对节点刚度具有较大敏感性的钢管结构,本书根据其不同的特性建立了不同的非刚性节点单元模型组配策略,并编制了集成多个自由度特性及多支管耦联效应的数值计算模块,引入结构整体线弹性数值分析和非线性数值分析中,考察了节点性能对结构整体行为的影响效应。计算结果表明,对于Warren型钢管格构梁,采用铰接节点假定确定

杆件轴力具有足够的精确度;相贯节点的刚度尤其是轴向刚度对杆件的弯矩大小及分布影响较大;采用铰接节点假定计算得到的该类结构整体挠度可能小于实际结构的挠度;次应力的影响与杆件轴力的分布有关。对于单层肋环型球面网壳,节点弯曲刚度对结构整体稳定性的影响很大,而节点轴向刚度对结构整体稳定性几乎无影响;节点弯曲刚度比和径向杆件跨高比是影响结构稳定承载力的关键因素。

本书还从构件设计的角度对节点半刚性钢管桁架受压腹杆计算长度进行了分析探讨。在经典的刚架弹性稳定理论上推导了考虑节点刚度的四弯矩方程和构件群稳定方程,并将其应用于钢管桁架结构。结果表明,影响半刚性钢管桁架腹杆计算长度的主要因素是腹杆与弦杆线刚度比和腹杆线刚度与节点局部刚度比。通过编制计算程序求取了计算长度数值解,制成了可供设计使用的计算用表和简化计算公式。以等节间 Warren 型钢管桁架为例证明了在腹杆计算长度分析中考虑相贯节点刚度的意义。

本书试验研究的另一重要部分为圆钢管相贯节点滞回性能拟静力试验。本书设计与空间结构钢管节点不同受力状态相适应的滞回试验装置与加载制度,分别进行了节点在轴力、弯矩及其复合荷载作用下滞回性能的测试和分析。从试验现象出发,分别根据节点承载力、刚度、延性和能量耗散等抗震性能指标对荷载-位移滞回曲线进行了综合分析和对比,探求了节点在反复荷载下的破坏机理。试验结果表明,节点在轴力作用下的破坏模式表现为腹杆拉力作用下的弦杆塑性软化、弦杆焊趾或热影响区开裂以及腹杆压力荷载作用下的弦杆塑性软化等 3 种类型;节点在弯矩作用下的破坏模式表现为焊缝开裂、冲剪破坏以及腹杆根部弹塑性断裂等 3 种类型。节点在轴力和弯曲荷载作用下的滞回曲线均表现出良好的稳定性,无捏拢现象,变形能力与耗能性能良好。轴向滞回性能试件的节点承载效率均小于 1,即节点本身需通过塑性变形来耗能,结构的滞回特性将主要取决于节点部位的滞回特性;弯曲滞回性能试件的节点承载效率均大于 1,即节点自身具有足够的承载力

来使塑性铰形成在被连接构件上。本书还提出了钢管相贯节点局部变形的精细化测试方法和现行规范未予解决的焊缝抗弯承载力的计算建议。

在与试验结果进行相互校验的基础上,本书采用数值模拟方法对相贯节点的应力分布规律、单调弹塑性行为和滞回特性进行了深入的研究。结果表明,节点局部区域的三向拉应力场可能是造成焊缝或母材断裂韧性降低从而在较小拉力水平下出现开裂的主要原因。书中通过有限元参数分析进一步考察了影响节点滞回性能的主要因素,给出了钢管节点抗震这一重要问题的设计建议。最后,对于需进一步研究的课题进行了讨论。

目 录

总序
论丛前言
前言

第 1 章 引言	1
1.1 钢管结构与相贯节点	1
1.1.1 钢管结构	1
1.1.2 相贯节点概述	2
1.1.3 相贯节点分类	3
1.1.4 圆钢管相贯节点主要性能参数	4
1.2 国内外研究现状及最新进展评述	5
1.2.1 相贯节点轴向静力承载力的研究现状	5
1.2.2 相贯节点非刚性性能的研究现状	10
1.2.3 相贯节点屈服与极限承载力的判定	13
1.2.4 相贯节点滞回性能的研究现状	14
1.2.5 前人研究的不足	15
1.3 工程背景与研究意义	16
1.3.1 工程应用背景	16
1.3.2 研究意义	17
1.4 研究工作	17
1.4.1 研究内容	17
1.4.2 研究方法与技术路线	18
1.4.3 章节安排	19

第 2 章 圆钢管相贯节点非刚性性能的试验研究与有限元分析	21
2.1 引言	21
2.2 试验目的	21
2.3 试验方案	22
2.3.1 基本方法	22
2.3.2 试件设计	22
2.3.3 加载装置	23
2.3.4 加载工况	24
2.3.5 测试方案	26
2.4 试验内力校核	27
2.5 试验结果与分析	29
2.5.1 相贯节点抗弯刚度的定性分析	29
2.5.2 相贯节点抗弯刚度的杆系有限元分析模型	29
2.5.3 不同受力组合状态下的弹性抗弯刚度	29
2.5.4 屈服后的抗弯刚度	35
2.5.5 影响抗弯刚度的构造因素	35
2.5.6 节点抗弯承载力	36
2.6 节点弹性及弹塑性抗弯刚度的有限元分析与校验	37
2.6.1 有限元模型的建立	37
2.6.2 有限元分析与试验结果的比较	39
2.7 本章结论	42
第 3 章 圆钢管相贯节点非刚性性能的理论分析与计算公式	44
3.1 引言	44
3.2 相贯节点的变形机理及刚度定义	44
3.3 相贯节点刚度计算的有限元建模与分析	46
3.3.1 几何形式	47
3.3.2 荷载施加方法	47
3.3.3 单元类型和材料特性	47
3.3.4 边界条件	47

3.4	T形、Y形相贯节点刚度的影响因素与参数公式	48
3.4.1	影响因素	48
3.4.2	单参数分析	48
3.4.3	正交模型设计及分析	52
3.4.4	节点刚度参数公式的多元回归分析	53
3.4.5	节点刚度参数公式与试验结果的比较	55
3.5	K形相贯节点柔度系数影响因素与参数公式	56
3.5.1	影响参数	56
3.5.2	单参数分析	57
3.5.3	正交模型设计及分析	59
3.5.4	节点柔度系数参数公式的多元回归分析	61
3.5.5	节点柔度系数的参数公式与试验结果的比较	65
3.6	相贯节点的抗弯极限承载力	66
3.6.1	抗弯承载力公式的理论基础与参数化模型	66
3.6.2	各国规范公式比较	66
3.6.3	公式与试验数据的对比评价	68
3.6.4	弯矩与轴力组合作用下的节点承载力相关方程	68
3.7	相贯节点的弯曲非线性模型	71
3.7.1	$M-\theta$ 非线性曲线的模型化	71
3.7.2	模型参数的确定与检验	73
3.8	本章结论	79
第4章	圆钢管相贯节点刚度判定准则与钢管结构整体行为	81
4.1	引言	81
4.2	空腹格构梁的节点刚度判定准则	81
4.2.1	空腹格构梁	81
4.2.2	刚架模型	82
4.2.3	基于结构整体变形的节点刚度判定准则	83
4.3	节点刚度对 Warren 型钢管格构梁整体静力行为的影响分析	85
4.3.1	Warren 型钢管格构梁	85