

第25届
全国结构工程学术会议
论文集

第Ⅰ册

PROCEEDINGS OF THE 25TH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. I

主编：陆新征

《工程力学》杂志社
2016.8

CSTAM2016-P66

第 25 届

全国结构工程学术会议

中国 包头
BAOTOU CHINA
8.13 ~ 8.14, 2016

主办单位 中国力学学会结构工程专业委员会
内蒙古科技大学
中国力学学会《工程力学》编委会
清华大学土木工程系
水沙科学与水利水电工程国家重点实验室（清华大学）
土木工程安全与耐久教育部重点实验室（清华大学）
内蒙古自治区土木工程安全与耐久重点实验室（内蒙古科技大学）
内蒙古自治区建筑结构防灾减灾工程技术研究中心（内蒙古科技大学）

学术委员会

主 席 : 袁 驷

委 员 : (按姓氏拼音为序)

陈以一 陈 璞 陈宝春 陈 明 岑 松 崔京浩 杜修力 范 重 范 锋 方 秦
葛耀君 韩林海 郝际平 金 峰 李宏男 李忠献 李 斌 刘汉龙 刘 香 龙志飞
陆新征 罗建辉 吕振华 牛建刚 宋二祥 王 涛 魏德敏 徐世烺 薛 刚 杨庆山
杨亚政 张建民 曾 攀 赵根田 朱宏平 庄 茁

组织委员会

主 席 : 李 斌

常务副主席: 宋二祥

副 主 席 : 赵根田

委 员 : (按姓氏拼音为序)

曹万林 陈云敏 陈志华 陈 明 樊健生 傅向荣 顾祥林 韩建平 贾连光 李正良
李 斌 刘 香 陆新征 茹继平 谭 平 万 馨 王怀忠 王 伟 闻 洋 吴 波
吴 刚 肖 岩 邢 峰 徐礼华 叶康生 余志武 闫 鑫 赵世春 赵根田 张顶立
张 鑫 郑建岚 周新刚

秘 书 处

秘 书 长 : 刘 香

副秘书长 : 陈 明

学术秘书 : 黄丽艳(负责组织论文宣读、排序、分组、评定等学术工作)

秘 书 组 : (按姓氏拼音为序)

高春彦 郝润霞 万 馨 王英浩 闻 洋 闫 鑫 于景飞 陈 旭 陈亚栋 曹美玲
贾 然 李肖波 梁蓬勃 刘江森 落凯妮 孟春才 倪 晶 宋 浩 王 达 王丽娜
于洲欢 运喜刚 张 超

郑重声明

全国结构工程学术会议每年召开一届，并出版论文集属内部学术交流资料。为了扩大影响，确保作者论文能够得到广泛交流和宣传，便于同行学者及有关部门随时查阅、检索和引用，论文组织委员会每届均作如下的承诺和声明：

1. 会议论文集向全国 70 多个省市（包括港澳台地区）200 多所高等学校图书馆和情报部门免费赠送，总数有 300 多套
2. 为了扩大学术交流，会议论文集被中国有关信息部门及学术期刊光盘版收录。
3. 会议严格执行文责自负的原则。关于涉及保密问题及有关抄袭等学术不端行为，均由作者本人负责。

序

一年一度的全国结构工程学术会议去年在厦门度过了它 24 岁生日，今年在内蒙古包头召开第 25 届全国结构工程学术会议。

内蒙古幅员辽阔，资源丰富，号称“东林西矿、南农北牧”。稀土金属储量居世界首位，拥有我国最大的草原牧区，草原、森林和人均耕地面积居全国首位。并孕育了历史悠久的草原文化，使中华文明更加多姿多彩。

包头位于我国华北与西北的交通要冲，赵武灵王曾在包头境内筑“九原城”，此后包头就一直是我国古代沟通北方草原游牧文化与中原农耕文化之间的重要枢纽。包头名称源于蒙古语“包克图”的谐音，意为“有鹿的地方”，所以又有“鹿城”之称，拥有广袤的草场资源。中华人民共和国建国以来，包头的工矿业得到迅猛发展，被誉称“草原钢城”、“稀土之都”，是我国重要的基础工业基地和稀土产业中心。

今年会议的东道主内蒙古科技大学是内蒙古自治区直属大学。它始建于 1956 年，最初为包头钢铁工业学校和包头建筑工程学校，1958 年两校合并组建包头工学院，1960 年更名为包头钢铁学院，隶属原冶金工业部，1998 年划归内蒙古自治区管理，成为中央与地方共建的高等学校。2000 年内蒙古煤炭工业学校并入，2003 年更名为现在的校名“内蒙古科技大学”。经过 55 年的建设与发展，内蒙古科技大学已发展成为以冶金、采矿、煤炭、稀土为特色，以工科为主，工、理、文、管、经、法、艺术、教育协调发展的多科性大学。拥有“内蒙古自治区白云鄂博矿多金属资源综合利用重点实验室”（省部共建国家重点实验室培育基地），“白云鄂博矿稀土及铈资源高效利用省部共建教育部重点实验室”等一批优良的办学资源和一批优秀的教学科研人才。学校作为内蒙古高校管理体制改革的试点单位，秉承“自强不息、敢为人先”的校园精神和“百炼成钢”的校训，近年来在科学研究、人才培养、社会服务等方面都做出了很多重要成果。

在中国力学学会结构工程专业委员会、内蒙古科技大学、《工程力学》编辑部等单位的共同努力下，本次会议得到了广大与会代表的大力支持。论文集共征集到论文 236 篇，涵盖了包括土木工程、水利工程、机械工程、航空航天工程等诸多领域。相信各位与会代表一定可以在本次会议上得到丰硕的收获。

论文集主编 陆新征

陆新征

2016 年 8 月

第 25 届全国结构工程学术会议论文集

本次会议论文集收录论文 236 篇，共计 1594 页，分装成 3 册，每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II 册、第 III 册只载本册目录。

第 I 册论文 70 篇（共 534 页），包括特邀报告和两个学科类别：特邀报告；1. 力学分析与计算；2. 钢结构、材料与构件；

第 II 册论文 84 篇（共 526 页），包括四个学科类别：3. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构；4. 公路、铁路、桥梁、水工与港工；5. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构；6. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

第 III 册论文 82 篇（共 534 页），包括四个学科类别：7. 钢筋混凝土结构、材料与构件；8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析；9. 新材料、新能源、交叉学科及其他

第 25 届全国结构工程学术会议论文集目录

第 I 册目录

特邀报告

组合截面冷弯薄壁型钢结构研究进展	陈 明 黄骥辉 赵根田 (001)
防屈曲支撑的型式、设计理论与应用研究进展	郭彦林 童精中 周 鹏 (014)
土工合成材料加筋土挡墙筋材内力分析	刘华北 汪 磊 王春海 张 垭 (032)
千米级超高层建筑建造技术研究	毛志兵 (045)
塑钢纤维轻骨料混凝土与钢筋粘结锚固试验研究	牛建刚 郝 吉 孙立斌 李伯潇 (053)
土工结构安全系数定义及相应计算方法讨论	宋二祥 孔郁斐 (062)
超大跨斜拉桥多点振动台试验研究	孙利民 谢 文 (074)
材料结构状态集合分析理论	王梦恕 卫振海 张顶立 (088)
能量一致积分方法及其在混合试验中的应用	吴 斌 潘天林 谢金哲 (114)
基于 EEP 法的三维有限元超收敛计算初探	袁 驷 吴 越 徐俊杰 邢沁妍 (125)
隧道复杂支护结构体系的协同作用原理	张顶立 孙 毅 (132)
被动防护网系统强冲击作用下的传力破坏机制	赵世春 余志祥 赵 雷 齐 欣 韦 韬 (146)

1. 力学分析与计算

移动荷载激励下粘弹性基础上圆柱壳的振动特性分析	邓庆田 贺燕飞 尹冠生 (159)
复杂载荷下油井管接头数值仿真平台的研发与应用	狄勤丰 宋海涛 陈 锋 王文昌 张 鹤 靳泽中 (165)
颗粒阻尼器中填充沙粒真实几何形状研究	段绍臻 (171)
向心均布载荷作用下环板屈曲问题的理论分析及数值模拟	高 见 袁 俊 王学明 李晓露 王虎长 张 陵 (177)
反复荷载下带脱空缺陷的钢管混凝土压弯构件的有限元模拟	韩 浩 廖飞宇 李永进 (184)
核电厂 ASG 水箱液晃问题的分析方法研究	韩 治 唐 晖 (189)
仿竹高桥墩抗弯刚度分析	何湘粤 蒋志刚 谭清华 邱文白 (197)
负泊松比复合材料弹性性能分析	贺燕飞 邓庆田 尹冠生 (202)
刚架非线性大变形问题的优化求解算法与应用研究	侯祥林 王家祥 胡建强 贾连光 (209)
基于扩展有限元的 P280GH 钢裂纹扩展研究	黄洪涛 于 辉 王秀琳 翟建伟 (218)
风力发电机塔筒风致响应分析与风振控制研究	李 斌 文昊天 宫兆宇 (224)
架空导线细观温度、分层应力和拐点温度计算方法	李鹏云 刘永斗 肖 凯 周华敏 古 泉 (231)
复杂载荷下多层刚架的快速解析求解	李银山 孙 凯 贾佩星 李 彤 (241)

某超高层建筑风压分布特性研究	梁新华 郑云飞 刘庆宽 刘小兵 马文勇 (246)
基于能量原理的被动柔性防护网中减压环预紧力计算方法	刘成清 邓永祥 韦小丹 (250)
Mathcad 在杆系结构有限元计算中的应用	马二朋 邓思华 马天磊 (256)
弹性地基上复合材料夹层梁的热过屈曲及模态分析	钮 鹏 李世荣 金春福 郭宏浩 薛坤鹏 (260)
简支 I 型组合曲梁变形计算的刚度插值法	秦绪喜 刘寒冰 向成修 魏志刚 (265)
基于损伤模型的钢筋混凝土梁剪切破坏全过程分析	任晓丹 范伟达 (271)
冻融循环对 GFRP/BFRP 复合水泥板与混凝土界面的粘结性能影响试验研究	宋小软 闫 朝 徐宋兵 (278)
简支梁弯曲应力随跨高比变化规律的研究	卫梦希 黎立云 王宏伟 刘兵权 王博楠 (283)
钢管混凝土格构式风力发电机塔架结构施工过程模拟分析	李 斌 高 生 周保山 (287)
单向张弦梁平面外整体弹性稳定性能研究	赵洪金 宋顺龙 王 宝 易领兵 (293)
三维问题新型广义有限元法	杨 璞 牛红攀 肖世富 (300)
有界窄带激励下微梁系统主共振	杨志安 赵开元 (313)
穿斗木构架房屋榫卯节点传力特性、破坏形态和耗能机理分析	张令心 郭 宁 刘洁平 (321)
采油过程中产砂风险预测及采油最佳压力降选择的三维数值分析	张少波 沈新普 (330)
V 型复合材料绝缘子串风载响应的数值分析	赵芳灏 耿 力 张伟政 季国剑 路国运 张 陵 (336)
基于能量原理水平弹性支承张弦梁静力性能分析	赵洪金 宋顺龙 王 宝 董宁娟 (343)
热镀锌线沉没辊系统在线周期制约因素分析	郑乾坤 刘 句 冯建有 潘紫微 饶思贤 徐培民 (352)

2. 钢结构、材料与构件

高轴压比下圆形钢管混凝土柱滞回性能模拟研究	白涌滔 王建涛 乔崎云 周式明 孙 清 (361)
基于应变统计矩的梁结构无基线损伤识别数值研究	陈 振 王丹生 (370)
冷弯薄壁卷边槽钢梁畸变屈曲的加固分析	程 婕 姚 谏 (374)
索网冷却塔结构的数值分析及优化方法	谷 帅 罗晓群 (380)
带“保险丝”连接板的焊接高强钢梁柱节点抗震性能试验研究	胡阳阳 林旭川 吴开来 王 涛 (386)
方钢管高强混凝土偏心受压柱力学性能研究	李 斌 施松佐 高春彦 (393)
高温应变时效对 P91 疲劳及组织演化规律研究	刘 句 郑乾坤 冯建有 潘紫微 饶思贤 (399)
基于 SVM 的半刚性节点特性分析	刘 龙 潘文超 吴峰崎 (408)
内配型钢圆钢管混凝土轴压短柱承载力分析	毛文婧 史艳莉 王文达 (412)
人行激励下钢结构人行天桥的 TMD 减振控制分析	沈 昭 罗晓群 (419)
圆钢管混凝土构件抗剪性能数值模拟	史艳莉 鲜 威 王文达 (424)
方钢管混凝土翼缘工字形梁扭转刚度的有限元验证	张文福 陈克珊 宗 兰 邓 云 李明亮 谭英昕 (431)
考虑有檩体系屋面系统的网壳结构静力稳定性分析	王多智 李文亮 支旭东 (435)
压型钢板组合梁中柱子结构的抗连续倒塌试验	王俊杰 王 伟 孙 昕 (442)
圆 CFRP-钢管混凝土压弯构件滞回性能的参数分析	王庆利 牛献军 冯立明 (447)
四心圆煤棚风荷载分布规律的试验研究	王晓江 郑云飞 刘庆宽 刘小兵 马文勇 (454)

新型柱端反力量测装置开发	沃中原 覃俊宁 林楷奇 陆新征 (458)
方钢管混凝土自由扭转刚度的有限元验证	张文福 陈克珊 宗 兰 邓 云 李明亮 谭英昕 (465)
正品字形布置三管钢烟囱风荷载的数值模拟	杨 群 刘小兵 刘庆宽 马文勇 (469)
轴心受力冷弯薄壁 C 型钢 PEC 柱的试验研究	殷占忠 王立功 孙 源 (473)
基于加速粒子群算法 (APSO) 钢框架优化设计	袁 帅 郝润霞 (483)
钢-混凝土组合梁扭转刚度的有限元验证	张文福 陈克珊 宗 兰 邓 云 谭英昕 李明亮 (489)
腹板开孔冷弯薄壁型钢梁-石膏基自流平砂浆组合梁受弯承载力研究	张 辉 栗延庆 石 宇 管 宇 (493)
圆形煤场钢网架风荷载分布特性研究	张磊杰 郑云飞 刘庆宽 刘小兵 马文勇 (500)
钢板夹密排钢管组合板抗弯性能研究	周竞洋 夏志成 张建亮 (505)
单跨集中荷载下双跨钢-砼组合梁弯扭屈曲方程的近似解析解	张文福 邓 云 宗 兰 陈克珊 谭英昕 李明亮 (511)
FRP 约束薄壁钢管混凝土抗震性能试验	朱春阳 赵颖华 孙 丽 (516)
S350 冷弯薄壁型钢螺钉连接的抗剪性能试验研究	朱兰影 王志军 王小杰 (528)

第 II 册目录

3. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

危岩的外表和内部裂隙拉结加固方法研究	陈 航 曾祥勇 朱爱军 (001)
结构-土-结构相互作用的模型对比与影响因素分析	陈 晶 陈清军 (007)
各种处理措施对高填方边坡稳定性影响的研究	陈金锋 刘 佳 甘厚义 赵尚毅 周海清 (012)
堆载预压强夯组合排水固结法加固软土地基的室内试验研究	丁继辉 马 娜 全小娟 (020)
多种缺陷桩低应变检测与数值特性研究	侯世伟 胡世健 赵俭斌 郭少坡 张 鑫 (026)
破碎煤岩体渗流系统的结构稳定性研究	李顺才 李 强 郭静那 (032)
软土地区地铁基坑踢脚破坏的数值模拟研究	彭湘文 袁端才 (039)
基于 Hoffman 准则的层状岩体巷道稳定性研究	孙培峰 杨天鸿 (044)
砂土中自源微生物诱导的防渗封堵试验研究	王 草 郭红仙 李 萌 程晓辉 (051)
无支护条件下基坑开挖空间效应数值分析	王维玉 赵 拓 (056)
既有建筑桩基础开挖条件下承载特性试验研究	王忠帅 贾 强 (060)
矿山法隧道开挖对既有管线沉降的影响分析	魏畅毅 刘 飞 董 军 (069)
基于全尺寸试验的挖掘机具作用埋地输气管道的多体动力学仿真	徐涛龙 姚安林 李又绿 蒋宏业 曾祥国 (077)
轴力作用下预应力高强混凝土管桩抗弯性能研究	杨志坚 李帼昌 王 琦 (086)
超大基坑围护结构的三维有限元模拟分析	张 海 杨国岗 苏 籍 (093)

4. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

大型钢桁拱桥的整体试验模型设计研究	杜南刚 陈太聪 苏 成 (102)
钢箱梁缩尺模型爆炸冲击波作用下破坏实验研究	耿少波 刘亚玲 薛建英 (107)
单箱三室不等壁厚箱梁受弯与约束受扭时的力学特征	龚耀清 曹 海 (114)
某中承式钢管混凝土桁式拱肋节点疲劳开裂分析	黄汉辉 陈康明 吴庆雄 王 渠 (123)
横梁布置方案对索道桥横倾稳定性能的影响研究	景天虎 刘均利 莫时旭 王晓峰 (129)
分离双扁平箱梁气动力干扰效应研究	李少杰 刘小兵 杨 群 刘庆宽 马文勇 (135)
斜拉索表面粗糙度对干索驰振振幅影响的研究	卢照亮 刘晓玲 郑云飞 刘庆宽 马文勇 刘小兵 (139)
福建某整体桥极限长度研究	马 盛 薛俊青 Bruno Briseghlla 陈宝春 Miguel Walter Munoz Machicao 黄育凡 (144)
变速车辆作用下拱桥吊杆的动态内力分析	邵 元 孙宗光 陈一飞 (150)
移动荷载作用下简支梁振动的影响因素分析	施鸿展 董 军 (157)
大跨度连续钢箱梁系杆拱桥顶推施工方案设计	宋郁民 (162)
波形钢腹板导梁局部承压的加强构造与试验	苏庆田 杜 霄 曾明根 林 航 (168)
4×30m 简支转连续箱梁桥上部结构设计分析	王华阳 曹 霞 (176)
基于灰色关联度的拉索状态评估理论与试验研究	王修勇 韩骞子 钟 桔 孙洪鑫 (183)
风攻角对分离双扁平箱梁涡振特性的影响	张胜斌 刘小兵 杨 群 刘庆宽 马文勇 (190)
基于 CFRP 吊杆中承式拱桥静力特性分析	赵 斌 高 婧 郑毓玲 (194)
端板尺寸对斜拉索节段模型测压试验结果的影响	郑云飞 刘庆宽 刘小兵 马文勇 (198)
基于结构模型试验的路面结构层模量反算分析	周兴业 王旭东 张年梅 (202)

5. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构

大型宽体客机舱门密封结构的分析研究	白 阳 潘 阳 (206)
流体作用下燃料箱动态响应数值模拟	陈 伟 秦仙蓉 郝婧兰 潘 杰 杨志刚 (210)
有限元 Riccati 法在火箭振动特性计算中的应用	董 严 付小燕 张怀宇 (217)
振动浇注装置的振动幅值研究	付小燕 李锡文 薛 江 (221)
Kevlar 缠绕增强机匣包容过程研究	何泽侃 胡燕琪 吴亚楠 宣海军 (226)
导管架平台遭受球鼻艏撞击的试验研究及数值模拟	姜 超 胡志强 刘 昆 王 晋 (233)
斜浪中船体梁的逐次崩溃行为研究	裴志勇 朱 波 张水林 朱志辉 吴卫国 (240)
冰区航行 LNG 船舷侧抗撞性能评估	徐双东 胡志强 陈 刚 (248)
大型 FLNG 船体波浪诱导载荷及全船弯扭强度研究	张倩倩 胡志强 陈 刚 (255)
加筋板有限元建模方法研究	周 坤 李道奎 蒋国庆 (263)
弹性机翼静气动弹性数值研究	朱世权 李海元 陈志华 (270)

6. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

高铁环境激励对镗床基础减隔振影响测试与分析	陈建琪 张晓敏 孙 勇 赵 武 (274)
-----------------------------	-----------------------

区域建筑震害模拟方法分析对比	程庆乐 曾翔 熊琛 许镇 陆新征 (280)
X 形钢挡块与混凝土挡块抗震性能对比分析	崔侠侠 项乃亮 李建中 (289)
高强钢中空夹层钢管混凝土抗撞性能有限元分析	辜应卓 李威 韩林海 赵晓林 (296)
基于子结构试验的土-结相互作用实现研究	郭珺 唐贞云 李易 李振宝 (303)
高性能计算在土木工程中的应用	何韬 何煌 邓国强 陈斌 (311)
云南省少数民族地区农村房屋结构调查与分析	何世钦 姚晨辰 李悦 纪颖波 (318)
基于 ALE 算法的近地面 TNT 爆炸数值模拟研究	何长林 胡其高 刘靖晗 汪庆桃 (323)
旋转运动导电圆板磁气弹性横向强迫振动	李文强 胡宇达 (329)
酸雨腐蚀后圆钢管混凝土柱抗震性能有限元分析	林博洋 陈梦成 黄宏 (334)
爆炸荷载作用下弹簧支撑防护门动力响应分析	刘靖晗 胡其高 何长林 汪庆桃 (345)
手机保护套防屏幕跌落破坏分析研究	刘子尚 王飞 付志一 汪长智 杨风利 (351)
分层土-桩-结构相互作用体系地震反应分析	楼梦麟 韩飞 (356)
滚石撞击钢筋混凝土墩柱试验研究	罗征 王小荣 李应根 谷志敏 王银辉 (362)
采用界面单元协调子结构方法研究	罗清宇 王涛 (369)
刚性弹侵彻岩石靶工程模型	蒙朝美 谭清华 蒋志刚 宋殿义 (375)
复杂地形地震反应中峰值位移分布特征研究	彭小波 章小龙 李小军 洪海春 杨伟林 (381)
基于土-结构相互作用的桥墩结构地震响应分析	申彦利 王竹青 张杨娟 (387)
村镇建筑新型简易隔震技术研究	谭平 徐凯 刘晗 张亚飞 周福霖 (394)
局部振型对吊索拱桥中拉索地震反应的影响	谭晋鹏 潘旦光 雷素素 (399)
矮塔斜拉桥减隔震设计研究	万尚辉 项乃亮 李建中 (406)
侧向冲击下钢管混凝土构件受力性能试验研究	汪友弟 代春辉 蒋秀根 丁敏 (413)
甘肃省农村生土结构房屋现状调查与分析	王辉 常建军 李悦 纪颖波 (417)
19Cr19Mn2Ni0.88N 高氮奥氏体不锈钢动态压缩性能与微观组织研究	王彦莉 贾古寨 张婷 李鹏飞 李丰显 梁景恒 (422)
基于性能的钢筋混凝土构件抗爆设计研究综述	王子琪 柳锦春 (426)
分层壳单元法在核岛屏蔽厂房钢板混凝土结构中的适用性研究	魏超 周国良 唐晖 (431)
某框架-剪力墙基础隔震结构的动力响应分析	吴迪 霍维刚 谭平 (435)
中欧规范设计的钢筋混凝土桥墩抗震性能对比	吴家杰 聂尚杰 薛俊青 Briseghella Bruno Camillo Nuti (443)
金属吸能结构在舰载设备抗冲击中的应用研究	熊鑫 金晶 吴新跃 (450)
高速公路防撞垫概念模型的优化及控制参数研究	姚如洋 赵振宇 尹冠生 (456)
液压剪叉式升降台刚柔耦合模型的动力学仿真	袁端才 江民书 (463)
风向角对方形断面细长结构气动力特性的影响	岳光强 马文勇 刘庆宽 刘小兵 (469)
竖向加载装置对 RC 桥墩抗震性能影响试验研究	吴家杰 薛俊青 Briseghella Bruno Camillo Nuti 聂尚杰 Toto Davide (473)
两种剪切波速不确定性分析方法的对比	张海 季新星 尤红兵 王震 (479)
密闭空间内三种防爆隔墙的减爆吸能效应分析	张建亮 夏志成 周竞洋 姚新 (486)
考虑碰撞的隔震桥梁易损性分析	张磊鑫 龙晓鸿 樊剑 陈蓓蕾 (492)
基于数值子结构方法的低延性 RC 框架结构抗震性能精细化分析	张沛洲 孙宝印 古泉 欧进萍 (499)

AP1000 核岛厂房动力特性参数化分析与优化赵春风 陈健云 王静峰 (510)

串列双方柱气动力试验研究赵会涛 刘小兵 杨 群 刘庆宽 马文勇 (515)

基于 Bode 图的实时混合试验稳定性分析方法研究周惠蒙 冉田苒 李梦宁 王 涛 (519)

第III册目录

7. 钢筋混凝土结构、材料与构件

某方形截面高层建筑风荷载的干扰效应研究陈 帅 刘小兵 杨 群 刘庆宽 马文勇 (001)

基于自主开发分析平台的结构信息传递陈家焯 何 政 (005)

钢筋混凝土拔出试验的 ANSYS 数值模拟陈梦成 杨 超 (009)

预制钢筋混凝土叠合剪力墙抗震性能试验研究代桂霞 鲁 亮 潘陵娣 (017)

带楼板 RC 连梁抗震性能试验研究邓付元 纪晓东 王 涛 施 唯 (025)

沙漠砂钢筋混凝土梁受弯性能的试验研究董 存 沙吾列提·拜开依 伊力亚尔·阿不都热西提 袁海翔 (030)

分布钢管式高强混凝土低矮剪力墙抗震性能研究.....范光召 赵作周 刘 旭 (038)

材料应变率效应对钢筋混凝土柱动态承载能力影响的研究.....范国玺 王德斌 商怀帅 唐晓成 杨树桐 杜德润 (042)

预应力混凝土梁预应力损失影响因素分析研究郭二伟 陈 茜 陈焕侠 (047)

装配式板柱节点抗震性能试验研究亢二聪 谢 剑 (054)

钢管混凝土叠合构件压扭力学性能分析李 帅 侯 超 韩林海 (060)

FRP 加固低延性梁柱节点单元定参方法李江渭 何 政 (067)

基于自适应 POA 和 IDA 的 RC 框架填充墙结构超强系数分析李雁军 吕大刚 王震宇 (071)

MCFT 在剪力墙非线性分层壳模型中的集成.....李智泉 孙丞江 何 政 (075)

BFRP 拉结件预制混凝土夹心保温外墙板抗弯性能试验研究.....刘才华 蒋 庆 种 迅 完海鹰 朱惠锋 李浩然 王礼平 郝祝林 (080)

基于 AHP 法和熵权法组合权重对 RC 结构危险房屋多层次模糊综合评定研究芦白茹 张 坤 严心娥 刘 芳 丁思远 (086)

T 形高强钢筋 RPC 梁抗剪性能试验研究马洪伟 付 强 杨玉兰 (097)

表层嵌贴预应力 CFRP 板条加固 RC 梁抗弯疲劳性能影响因素研究.....彭 晖 刘 洋 苏 鹏 李 恒 张建仁 (103)

RC 矩形空心墩柱破口截面剩余承载力研究邱文白 蒋志刚 刘 飞 严 波 (110)

锈蚀钢筋混凝土梁非线性全过程分析申 伟 杨 鸥 李冬生 欧进萍 (115)

低周往复荷载作用下钢筋混凝土柱的非线性有限元分析.....苏 骏 杨家瑞 刘健平 (126)

中国钢筋混凝土烟囱设计规范升版过程分析孙 凯 王立成 王思莹 (133)

新型钢筋混凝土剪力墙多交叉杆模型的研究及其应用.....孙宝印 古 泉 张沛洲 欧进萍 (138)

大型冷却塔表面风压分布特性的试验研究田凯强 秦其伟 郑云飞 刘庆宽 刘小兵 马文勇 (146)

冻融损伤后钢筋与再生混凝土粘结滑移性能试验研究.....	曹芙波 丁兵兵 王晨霞 (150)
中美钢筋混凝土烟囱风荷载计算对比分析	王思莹 王立成 孙 凯 (159)
应变率对混凝土结构弹塑性地震反应影响研究	王伟东 张 皓 李艳凤 王德斌 尚 兵 (164)
植筋连接新旧砼结构的抗剪承载力研究	王献伟 李青宁 岳克锋 (172)
钢管混凝土柱-H 型钢梁节点在低周往复荷载作用下的弹塑性分析	王子英 张 聪 孙国梁 武启明 (176)
剪跨比对 HRB500 级钢筋 RPC 简支梁抗剪性能影响研究.....	温 晴 金凌志 张 猛 (183)
双相体不锈钢钢筋及普通碳素钢筋与混凝土粘结性能对比试验.....	徐春一 王元清 逯 彪 郭奕含 (189)
钢筋混凝土少筋梁断裂特性试验研究	徐晓良 杨树桐 (197)
大跨度混凝土连续箱梁桥运营阶段的温度场分析.....	薛 刚 孟煜童 白纬宇 (203)
织物增强混凝土永久性模板与现浇混凝土叠合梁的抗弯性能试验研究.....	荀 勇 徐业辉 支正东 (211)
工程结构非弹性地震动力反应分析的 BWBN 模型的研究进展.....	余 波 宁超列 (217)
咸阳机场 22 号桥墩桩基托换模型试验研究	岳克锋 李青宁 王献伟 (230)
利用超高韧性水泥基复合材料提高 RC 深梁的抗剪性能	张秀芳 许青青 胡少伟 (235)
低掺量下钢纤维混凝土抗压性能试验研究	张延年 刘晓阳 董 浩 郑 怡 (241)
劲性骨架拱桥中混凝土收缩徐变试验研究	赵人达 刘海波 徐腾飞 张双洋 王永宝 (247)
PC 框架结构梁柱剪力增大系数取值研究.....	郑汝芹 胡 梅 张诚诚 张耀庭 (255)
不同连接形式 PC 挂板-剪力墙抗震性能研究	朱元吉 谢 剑 (263)
基于 OpenSees 的钢筋混凝土梁粘结滑移数值分析.....	祝 双 张沛洲 古 泉 欧进萍 (271)
腹板开孔混凝土工字梁抗剪非线性数值分析	祝明桥 蒋 俏 卢忠良 汪建群 禹见达 (278)

8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析

防连续倒塌型高大模板支撑体系的两阶段设计研究.....	安宇骢 谢 楠 贾 影 (282)
三管钢烟囱体型系数取值试验研究	邓然然 马文勇 刘庆宽 刘小兵 赵春晓 (289)
某在役桥梁的加速度监测结果分析	邓云飞 金凌志 何 来 (294)
基于等效刚度的通井 BHA 评价方法	狄勤丰 张 鹤 王文昌 李 宁 覃光煦 白 楠 (299)
植筋法新旧混凝土界面剪切强度的实用计算公式.....	黄 璐 林新鹏 廖丽云 彭茹芯 卓卫东 (306)
串列光伏板体型系数遮挡效应研究	黄伯城 马文勇 刘庆宽 刘小兵 邢克勇 (316)
CBF 格栅增强砖砌体墙抗震性能试验研究.....	焦晨晓 沙吾列提·拜开依 阿肯江·托呼提 张宜东 胡什塔尔·尼亚孜 (320)
FAST 馈源支撑塔结构优化设计.....	李 辉 李庆伟 (330)
风洞体水磨石面层热应力分析	李博平 张笈玮 卜长明 张 麒 (341)
工程结构体系可靠度分析的最新研究进展	刘 娇 刘敬敏 余 波 杨绿峰 (350)
桥梁抗震性能相关性通用模型初探	刘 瑶 秦剑君 (359)
绿色钢结构建筑全寿命周期增量成本的研究	刘姗姗 徐 伟 (366)
基于 BIM 协同设计的建筑方案经济性分析研究.....	刘元东 徐 伟 (371)
FRP 加固非延性 RC 框架结构的地震易损性分析	吕大刚 代旷宇 于晓辉 李 宁 (375)

端部开口状态下柱面煤棚结构风荷载分布规律	孙高健 马文勇 刘庆宽 刘小兵 孟祥武 (380)
网状片材泥浆材料加固土坯砌体受力性能试验研究	王 斐 沙吾列提·拜开依 阿肯江·托呼提 保尔江·吾尔曼别克 张东旭 (385)
多工况组合下纤维混凝土桥面连续结构的有限元分析与优化设计	王激扬 王 跃 朱培良 吴志明 (393)
混凝土浇筑期泵管撞击荷载的试验研究	谢 楠 武 桐 胡 杭 李鸿飞 (401)
群体超高层住宅的结构抗风设计优化研究	许 伟 李庆祥 蔡 健 (407)
表面内嵌 FRP 筋加固混凝土梁剪切延性分析	张海霞 李程翔 刘国瑞 (415)
输气管道机械挖掘穿孔损伤预测模型研究	赵 璐 姚安林 徐涛龙 赵冬野 (422)
某高层建筑风荷载分布特性的试验研究	赵桂辰 郑云飞 刘庆宽 刘小兵 马文勇 (428)
FAST 馈源支撑塔基础地脚螺栓的精确定位施工方法	郑云勇 李 辉 (432)

9. 新材料、新能源、交叉学科及其他

火灾环境下玻璃首次破裂时间的模拟预测	陈昊东 王青松 孙金华 (442)
固化温度对地聚物力学性能影响机理研究	崔 潮 彭 晖 蔡春声 赵建伟 (446)
新疆沙漠砂砌筑砂浆配合比研究	吕志栓 沙吾列提·拜开依 董 存 (452)
粉煤灰对喷射超高韧性水泥基复合材料抗压抗折力学性能的影响	穆富江 李伟平 王激扬 徐世焱 (458)
基于数字图像处理的混凝土裂缝宽度检测	裴耀东 刘志文 (464)
水平式冷热空气交换系统性能研究	史明辉 尹冠生 (468)
钢铁业固体废物资源化效益评价模型与应用	宋海燕 崔宝霞 牛建刚 陈 旭 张 垚 (474)
人工海水环境下 GFRP 筋受压性能试验研究	孙 丽 吴松岩 朱春阳 米向乾 (479)
不同纤维对 RPC 保护层厚度的影响分析	唐 婷 曹 霞 (486)
基于双目立体视觉技术的靶板变形测试系统	陶 松 陈 斌 曾 勇 范兴俊 (492)
考虑温度梯度的热变形协调连接件设计与分析	陶永强 宋月娥 王 战 李 晶 (497)
基于 EMI 与马氏距离的木试件损伤检测试验研究	王清华 王丹生 (502)
AP1000 核电工程 PCS 水箱振动台试验模型研究	熊 杰 樊 焜 侯钢领 段 锐 周国良 (506)
我国智慧城市建设中新技术的应用及其经济相关性分析	杨新宇 徐 伟 (515)
泡沫陶瓷球壳与高黏弹沥青热压复合板材研制及其抗爆性能试验研究	张春晓 何 翔 刘国强 王世合 李 磊 孙 敖 (520)
不同配箍率活性粉末混凝土简支梁受剪性能试验研究	周家亮 金凌志 (528)

组合截面冷弯薄壁型钢结构研究进展

—第 25 届全国结构工程学术会议特邀报告—

*陈 明, 黄骥辉, 赵根田

(内蒙古科技大学土木工程学院, 包头 014010)

摘 要: 冷弯薄壁型钢房屋抗震性能优越, 适合工业化建造, 在国内外建筑行业已占有一席之地, 符合国家“十三五”规划对房屋建筑发展提出的新要求。本文对国内外在冷弯薄壁型钢房屋受力性能的研究成果和相关规范的设计规定进行了全面的综述, 发现传统冷弯薄壁型钢房屋在传力机制、受力构件截面种类等方面的不足, 提出新型组合截面的冷弯薄壁型钢“非盒子”式的框架结构体系, 总结该体系中受力构件、节点以及整体框架受力性能的研究进展, 给出了组合柱稳定承载力、节点极限弯矩和初始刚度的计算公式。最后对该类组合截面冷弯薄壁型钢框架结构体系今后需要深入研究的问题提出了建议。

关键词: 冷弯薄壁型钢; 组合截面; 框架结构; 组合柱; 节点; 受力性能

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A

RESEARCH PROGRESS FOR COMPOUND SECTION COLD-FORMED THIN-WALL STEEL STRUCTURES

CHEN Ming, HUANG Ji-hui, ZHAO Gen-tian

(College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Cold-formed thin-walled steel buildings are characterized by superior seismic behavior and suitable for industrialized construction. These features make it have a place in the construction industry at home and abroad, meanwhile meet the new requirements of China's "The thirteenth Five-Year Plan" for the development of building construction. Researches and design codes on mechanical performance of cold-formed thin-walled steel buildings were comprehensively reviewed in this paper, and some deficiencies are found for traditional cold-formed thin-walled steel buildings in load-transfer mechanism and member section type. The "non-box" type frame system using cold-formed thin-walled steel compound section was put forward. Summarizing the research progress in mechanic performance of the member, joint, and the overall frame, this paper present formulas of the composite column stability capacity, joint ultimate moment and joint initial stiffness. Finally, some further researches of the compound section cold-formed thin-walled steel frame system are proposed.

Key words: cold-formed thin-walled steel; compound section; frame; composite column; joint; mechanical performance

冷弯薄壁型钢房屋结构体系具有材料和建造绿色环保, 抗震性能优越, 工业化程度高等优势, 符合国家建筑行业的发展战略。在国家“十三五”时期, 钢结构建筑和装配式建筑已然是明确的发展热点, 冷弯薄壁型钢房屋结构体系属于装配式钢结构房屋建筑, 在中低层房屋建筑中有着自己独特的优势, 已经得到了广泛的发展, 并出版了相应的设计规程。目前广泛应用的冷弯薄壁型钢房屋结构体系是由复合墙板与楼

基金项目: 国家自然科学基金项目(51368043)

作者简介: *陈 明(1978—), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 硕导, 主要从事钢结构设计与理论研究(E-mail: cmlx-1978@163.com);

黄骥辉(1990—), 男, 河南人, 硕士生, 主要从事钢结构的抗震性能研究(E-mail: 437346519@qq.com);

赵根田(1962—), 男, 山西人, 教授, 博士, 硕导, 主要从事钢结构与组合结构研究(E-mail: zhaogentian93110@sina.com)。

板、屋架组成的“盒子”式结构，其水平荷载由抗剪墙体承担，竖向荷载由承重墙体中的立柱承担^[1]，结构形式如图 1 所示，应用于三层以下民用住宅房屋。

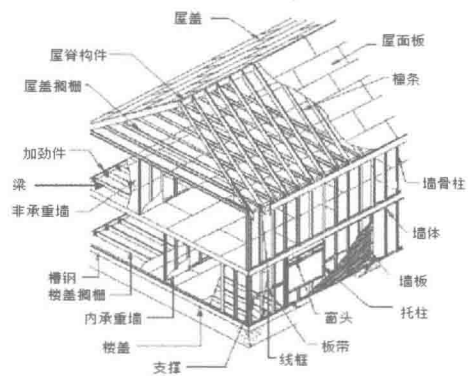


图 1 冷弯薄壁型钢房屋结构体系组成^[2]

Fig.1 The composition of cold-formed thin-walled steel building system^[2]

“盒子”式的冷弯薄壁型钢房屋结构体系是一种非框架的结构，承载能力相对较低，主要承力构件之间连接不够可靠，而且承力构件的截面类型过于单一^[3]，影响了该结构体系向多层建筑的发展，已经无法满足设计和使用要求。

本文首先对“盒子”式的冷弯薄壁型钢房屋结构体系的设计方法和国内外冷弯薄壁型钢组合截面构件的研究成果进行一定的综述分析，再提出新型组合截面结构体系的构成，最后将相关的研究进展进行总结。

1 低层冷弯薄壁型钢房屋的受力性能

1.1 冷弯薄壁型钢复合墙体的受力性能

“盒子”式的房屋结构中的复合墙体主要由钢骨架和墙板组成，是房屋水平刚度和承载力的主要来源，国内外学者对复合墙体的受力性能及设计指标进行了大量的研究。

Young-ki Lee 和 Thomas H. Miller 研究了 C 型钢与石膏板组成的复合墙板在轴向力作用下的屈曲行为，螺栓连接采用弹性分析，面板发生弯扭屈曲，采用差分平衡方程对屈曲荷载进行估算，墙体的强度与钢骨柱间距有关，而与北美钢铁协会 AISI 规定不一致^[4]。Yaip Telue 和 Mahen Mahendran 进行了 40 个足尺墙架试验，选择无覆板、单面覆板和双面覆板为研究参数，将试验结果与澳大利亚和美国的规范进行比较，得出了覆板情况对墙架承载力有明显提高作用的结论^[5]。Serrette.R 等进行了一系列 OSB 板与 C 型钢组合剪力墙动力时程分析试验，发现墙体的动力性能主要取决于护角材料、边柱的强度和螺钉的间距。滞回曲线有明显的捏缩现象，耗散了一定的地震能量，破坏现象中表现出墙体的连接滑移，基于试验结论，给出了相关的设计建议^[6]；研究了不同材质板覆面的轻型钢骨架墙体的受力性能，试验结果表明墙体破坏时发生了扭转，螺丝头部穿过了墙板，板边缘的紧固件断裂，紧固件破坏板面导致整片墙体最终破坏^[7]。Salenikovich, A.J 等进行了 16 个全尺寸覆 OSB 板的开洞和不开洞的冷弯型钢剪力墙在水平荷载作用下的抗震性能试验，选择覆板率从 30%到 100%，结果表明覆板可以提高框架的刚度和强度，但会降低结构的延性^[8]。Gad,E.F.等研究了石膏板在冷弯薄壁型钢住宅结构的横向抵抗阻力中起到的作用，利用有限元软件建立了石膏板覆面的冷弯型钢组合墙体模型，考虑墙体间阴角、与天花板相连处、檐口等位置的边界条件，发现具有这些边界条件的墙体是同样尺寸单墙体承载力的 3 倍以上，说明墙体横向承载力与边界条件关系密切^[9-11]。Tian,Y.S.等分析了冷弯型钢墙体的刚度构成，得到了支撑截面尺寸的大小对墙体刚度和极限承载力的影响^[12]。L.A.Fulop 和 D.Dubina 分析了轻型薄壁型钢骨架墙体的滞回性能，提出了可预估墙体抗震性能的分析模型，发现这种墙体在地震作用下承载力退化稳定，延性较好，具有良好的抗震性能。发现墙体连接方式对房屋抗震性能的影响较大，提出了连接的设计标准^[13-17]。Landolfo R 等针对采用冷弯薄壁型钢的轻型钢结构房屋，研究了房屋的受力性能和抗震性能，提出了快速施工的技术构造措施，为该体系的发展提出了建议^[18-19]。YL Liew 分析了承担不同类型横向荷载的墙体在不同边界条件下的承载能力和失效模

式,得到了墙体对房屋横向刚度的贡献^[20]。

周绪红院士团队将冷弯薄壁型钢组合墙体立柱改为背靠背槽钢,分析了该组合墙体的抗剪承载力、轴压承载力和抗侧刚度。随覆面材料刚度越大、钢骨架立柱越密、墙体高宽比越小、螺钉越密,组合墙体抗剪承载力越高,而冷弯薄壁型钢材料强度对抗剪承载力影响较小;组合墙体高宽比越小、连接螺钉间距越密、墙板厚度越厚,组合墙体的抗侧刚度会明显提高;提出将墙板简化成斜向拉杆,用等代拉杆法计算组合墙体在弹性范围内抗侧刚度的方法^[21-27]。张其林等研究了无墙板带支撑和带墙板两种不同情况的冷弯薄壁型钢骨架墙柱体系的受力性能,给出了钢骨架立柱计算长度系数的建议取值和钢骨架极限荷载的计算公式。研究发现:双侧覆板可提升钢骨架的极限承载力 200%,是设置支撑和单侧覆板的十倍左右,说明冷弯薄壁型钢与墙板搭配使用,尤其是双侧覆板对钢骨架立柱的支撑作用是明显的。极限承载力计算时可将我国现行规范计算结果放大 1.2 倍^[28-29]。苏明周等也证明了墙面板的蒙皮效果是组合墙体的抗剪承载力的来源,工程应用中注意保证蒙皮体的完整性,墙板接缝要少,而且要交错接缝,避免横向通缝^[30-31]。王静峰等将冷弯薄壁管件组成桁架体系,覆上墙板,作为组合墙体承担水平荷载,通过拟静力试验发现该类组合墙体滞回性能良好,延性和耗能能力都比较高,采用 OSB 板材双面覆着能起到蒙皮效果,当墙体开洞时削弱墙体的承载力和刚度,可以采用一定的构造措施来弥补^[32]。

1.2 冷弯薄壁型钢房屋的受力性能

Kim T W 等进行了两层密柱式冷弯薄壁型钢房屋振动台试验研究,如图 2 所示,发现该密柱房屋结构具有良好的抗震性能,密柱在发生局部屈曲后仍具有一定的承载力^[33]。



图 2 足尺模型振动台试验^[33]

Fig.2 Shaking table test of full scale model^[33]

石宇等以多层冷弯薄壁型钢房屋为研究对象,进行了弹塑性时程分析,找到了薄弱楼层,得到了影响弹塑性层间位移的因素。结构的弹性层间位移角为 1/750,弹塑性层间位移角为 1/100。总结研究成果,建议:8 度设防区可建到 6 层或 18m 高,高宽比宜小于 2.5;7 度及以下设防区高宽比宜小于 3^[34-35]。黄智光等进行了三层冷弯薄壁型钢房屋的线性和非线性地震反应分析,发现结构的变形形式呈剪切型,9 度抗震设防时,结构在多遇地震和罕遇地震下的最大弹性和弹塑性层间位移角分别为 1/934 和 1/52^[36]。沈祖炎在李元齐完成的超高强薄壁冷弯型钢足尺结构模型振动台试验的基础上,认为底部剪力法、时程分析法和反应谱法适用于弹性状态的多遇地震结构分析,非线性 Pushover 分析和非线性时程分析法适用于罕遇地震结构分析^[37-38]。史艳莉等研究发现风荷载控制结构常遇地震下的弹性层间位移,地震作用控制结构罕遇地震下的弹塑性层间侧移,这两个位移值均满足现行抗震规范要求;双面覆 OSB 墙面板,并且加强角柱的情况下抗震性能最优^[39]。

这些研究还是以墙体结构作为房屋横向刚度的主要来源,并对影响墙体抗剪承载力的因素进行了详细的分析,对比国内外规范提出了相应的修正方案。低层冷弯薄壁型钢住宅在欧美发达国家与木质住宅形成了较大的竞争,低层住宅市场占有份额达到四分之一左右,国外相应的研究和应用比较早。发达国家在冷弯薄壁型钢建筑领域的应用研发上身先士卒,已基本掌握了冷弯薄壁型钢“盒子”式房屋结构体系的基本

力学性能,并编著了相应的设计规范,推广冷弯薄壁型钢房屋在建筑领域的应用^[40]。

2 组合截面受力构件的设计方法

2.1 规范承载力计算

国外相关规范规定了组合截面构件的设计方法和承载力计算公式,我国现行规程中也给出了工字形、箱形和抱合箱形几类组合截面的设计公式。

北美钢铁协会 AISI 颁布文献[41]给出了双肢拼合冷弯薄壁型钢截面柱轴压承载力的设计公式:

$$P_n = A_e F_n \quad (1)$$

式中, F_n 为屈曲应力,按公式(2)确定, A_e 为有效截面面积, F_y 为钢材的屈服强度, E 为钢材弹性模量, k 为有效截面系数, F_e 为弹性弯曲应力、扭转应力及弯扭应力的最小值,按公式(4)确定。

$$F_n = (0.658^{\lambda_c^2}) F_y, \quad \lambda_c \leq 1.5 \quad (2a)$$

$$F_n = \frac{0.877}{\lambda_c^2} F_y, \quad \lambda_c > 1.5 \quad (2b)$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad (3)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(kL/r)^2} \quad (4)$$

当双肢柱由于局部屈曲变形而产生肢件剪力时,应对上述长细比 kL/r 进行修正:

$$\left(\frac{kL}{r}\right)_m = \sqrt{\left(\frac{kL}{r}\right)_0^2 + \left(\frac{a}{r_i}\right)^2} \quad (5)$$

式中, $(kL/r)_0$ 为组合截面原始长细比, $(kL/r)_m$ 为组合截面修正长细比, r_i 为单肢构件最小回旋半径, a 为连接件的间距, a/r_i 应小于组合构件控制长细比的 1/2。

澳大利亚和新西兰规范也对双肢冷弯 C 型钢组合受压构件的长细比进行修正^[42]:

$$\left(\frac{l_e}{r}\right)_{bn} = \sqrt{\left[\left(\frac{l_e}{r}\right)_m^2 + \left(\frac{l_e}{r}\right)_c^2\right]} \quad (6)$$

式中, $(l_e/r)_m$ 为组合构件相对于连接平面轴线的长细比, $(l_e/r)_c$ 为单肢组件最大长细比。关于连接件间距与北美 AISI 规范规定相同。

文献[1]中列举拼合截面构件的强度和稳定性验算公式:

$$N \leq A_{en} f \quad (7)$$

$$N \leq N_u \quad (8)$$

式中, N 为轴压力, A_{en} 为有效净截面面积, N_u 为稳定承载力设计值。 N_u 的取值对于 x 轴,取单个开口截面稳定承载力乘以截面个数;对于抱合箱形截面,当截面拼合连接处有可靠保证且构件长细比大于 50 时,对绕 y 轴的稳定承载力取单个开口截面对自身形心 y 轴的弯曲稳定承载力乘以截面个数后的 1.2 倍。

2.2 组合截面受压构件受力性能

G K Peters 对螺钉连接双肢抱合截面立柱承载力进行研究发现,螺钉间距过大或过小都会降低立柱轴压承载力,因此应当控制螺钉间距在合理范围内^[43]。李元齐等针进行了 40 根高强冷弯薄壁型钢箱形组合截面柱试验,按单肢截面计算承载力,发现计算结果的简单叠加不能反映组合截面柱的承载力,对比试验值偏低 10%~20%左右^[44]。周天华等拼合了四肢组合截面立柱,单肢为冷弯型钢,发现在轴向压力作用下四肢柱具有“1×4>4”的拼合效应,减小长细比和翼缘宽厚比能显著提高立柱的轴压承载力^[45]。彭雄等通过对比组合截面和单肢构件的屈曲行为和破坏机理,发现组合作用会明显提升其静力性能,而构件上先于整体失稳的局部塑性屈曲降低了构件的滞回性能^[46]。