

刘志文 王海东 主编



第五届全国土木工程 研究生学术论坛

*Collection of the 5th National Civil Engineering
Forum for Graduate Students*

论文集

湖南大学出版社

TU-53/46

2007

第五届全国土木工程研究生 学术论坛论文集

编委会

主 编：刘志文 王海东

委 员：（按姓氏拼音顺序）

胡盛华 胡尚瑜 黄英省 卢利平 吕东彦 莫 颖
潘 登 宋雯雯 谢华慧 杨忠凯 余继兴



湖南大学出版社

2007年·长沙

内 容 简 介

本次会议论文集集中收录了国内主要高校土木工程研究生论文 126 篇。全书分为六部分:结构、桥梁、暖通、岩土、市政、道路。论文集的内容涵盖了土木工程学科研究领域和工程应用的各个方面,其中不乏近年来一些最新研究成果、学术动态、新材料新技术、工程实践、思考与总结。整体上反映了国内高校土木工程研究及研究生教育的进展与成果。

本书可供高等学校土木工程专业师生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

第五届全国土木工程研究生学术论坛论文集/刘志文,王海东主编.

—长沙:湖南大学出版社,2007.7

ISBN 978-7-81113-230-4

I. 第... II. ①刘... ②王... III. 土木工程—文集

IV. TU-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 102443 号

第五届全国土木工程研究生学术论坛论文集

Di-wu Jie Quanguo Tumu Gongcheng Yanjiusheng Xueshu Luntan Lunwenji

主 编:刘志文 王海东

责任编辑:卢 宇

封面设计:张 毅

出版发行:湖南大学出版社

社 址:湖南·长沙·岳麓山 邮 编:410082

电 话:0731-8821691(发行部),8821315(编辑室),8821006(出版部)

传 真:0731-8649312(发行部),8822264(总编室)

电子邮箱:pressluy@hnu.cn

网 址: <http://press.hnu.cn>

印 装:长沙瑞和印务有限公司

开本:889×1194 16 开

印张:32.5

字数:1326 千

版次:2007 年 7 月第 1 版

印次:2007 年 7 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-81113-230-4/TU·31

定价:100.00 元

版权所有,盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错,请与发行部联系

序

由中国土木工程学会教育工作委员会主办的第五届全国土木工程研究生学术论坛，于2007年7月21至22日在千年学府湖南大学举办。本次会议由湖南大学研究生院、土木工程学院承办，中南大学、长沙理工大学和湖南工业大学协办。论坛就土木工程及水利、交通、力学、材料、管理等学科领域广泛进行了学术交流和研讨，旨在为全国土木工程学科各相关专业研究生提供一个学术交流的机会和展现个人风采的舞台。论坛主要以研究生自主报告的形式开展学术交流活动，同时，还邀请土木工程领域著名专家学者到场做学术前沿报告。

本次学术会议论文集共收录了土木工程及水利、交通、力学、材料、管理相关学科论文126篇，这些论文总体上反映了我国土木工程研究及研究生教育的进展与成果，论文集的出版对提高我国土木工程专业研究生学术研究水平和活跃研究生的学术交流具有十分重要的意义。

千年学府，弦歌不绝。岳麓书院“惟楚有才，于斯为盛”的楹联虽历经千年洗礼，仍焕发出勃勃生机。“自卑亭”的门匾仍警示我们本着谦虚坦诚的态度追求科学真理。湖南大学正以“985工程”和“211工程”建设为龙头，抓住国家促进中部崛起的历史性机遇，坚持以创新促发展，实施人才强校战略，努力建设国际知名的高水平研究型大学。科学是通过研究者的交流和思想的碰撞得到发展的，本次论坛也将为我们湖南大学的研究生教育提供有益的借鉴。通过这次论坛，将进一步推动湖南大学土木工程教学和研究工作的新进展。

来自祖国各地的同学青年，相聚在岳麓山下、湘江水畔，共同领略科技日新月异之魅力。相信本次论坛将作为我国当代年轻土木学者的一次学术盛会和一架友谊桥梁留在大家的记忆里。

肖 岩

湖南大学土木工程学院院长

2007年7月

目次

序

目次

多层钢框架外伸端板连接节点的受力性能研究	黄俊, 戴绍斌 (3)
钢框架柱—阶分析设计和二阶分析设计的比较	刘新春, 惠宽堂 (8)
型钢高强高性能混凝土梁试验研究及设计	车顺利, 郑山锁, 张伟军 (12)
钢框架基于性能的抗震设计方法研究	梁兴文, 张倩, 熊二刚 (15)
基础设施 BOT 模式立法之可行性研究	赵国富, 王守清 (19)
恒载作用下损伤悬臂梁位移变化研究	王英, 赵人达 (22)
自密实混凝土粘结强度试验研究	刘深华, 金贤玉, 赵颖, 黄晓峰 (26)
FIDIC 合同条件与“建设工程施工合同”的比较研究	王涛, 蒋红妍 (30)
国有大型施工企业劳务分包管理研究	黄铮, 徐蓉, 王旭峰 (34)
静压管桩承载力时效性的试验研究	陈勇, 赵俭斌, 刘坤 (38)
冷弯薄壁型钢住宅荷载路径分析及剪力墙设计	郭鹏, 陈卫海 (41)
基于 Pushover 方法的钢骨消能支撑钢框架性能研究	尚永亮, 陈云, 张俊良 (45)
基于 ANSYS 的碳纤维加固钢筋混凝土梁-柱节点研究	迟洪明, 邓思华, 霍沛东 (49)
薄壁钢筋混凝土管柱弯矩-曲率曲线试验研究	白国良, 孙玉品 (54)
沥青混合料半圆弯曲和劈裂试验力学特性数值分析	吕光印, 郝培文, 汪海年, 肖庆一, 庞立果 (58)
仙游寺法王塔动力特性分析	苏军, 高大锋, 李小珠, 张文明 (62)
某大型混合支架结构体系挡风墙风荷载特性数值模拟及其形式优化	焦江伟, 白国良, 唐六九 (66)
剪力墙静力弹塑性分析模型在 SAP2000 中的应用	刘林, 白国良 (71)
基于灰色理论对某建筑物地基沉降的预测	仇一颗, 潘登 (74)
斜梁式浅埋箱形卸煤沟模型试验研究	李尤, 王泽军, 李强 (78)
改进的 BP 网络对 RPC 流动度控制的研究	胡检, 黄政宇 (82)
拱的平面内屈及极限承载力问题研究	邢帆, 祝兵, 赵琳 (86)
SRC 柱-钢梁框架-核芯筒混合结构简化分析模型	刘林, 白国良 (90)
建设工程风险管理的博弈分析	李昱宇, 徐蓉, 王旭峰 (93)
沥青混合料生产配合比快速调整方法研究	徐慧宁, 谭忆秋, 李晓民, 董泽蛟, 王佳妮 (96)
大掺量粉煤灰混凝土性能研究	李红辉, 宋少民 (101)
短肢剪力墙的空间非线性墙元模型	朱琳, 李青宁, 张守军 (106)
基于结构性能的概率抗震设计方法	张欣心, 李力, 张建经 (109)
对施工企业开展绿色施工的思考	龙炎飞, 徐蓉, 王旭峰 (113)
暗钢梁板柱-核心筒混合结构抗震性能试验研究及分析	孔祥峰, 马洪旭, 张彬 (116)
建筑工程质量创优对策研究	邢新建, 胡长明, 郭剑峰 (121)
方钢管混凝土梁柱节点粘结滑移机理的研究	赵晓燕, 薛建阳, 赵鸿铁, 仵建斌 (124)
结构振型对 Pushover 水平侧向力分布影响的研究	门进杰, 史庆轩, 周琦 (127)
引进型汽轮发电机弹簧隔振基础分析	王广, 李晓文, 樊安礼, 康果果 (131)
高层剪力墙结构自重和抗震性能关系的研究	武蕾, 于丰泽 (135)
基于伪比能和小波包变换的梁式结构损伤识别	陈晓强, 朱宏平, 阎东东 (139)
二阶效应对钢框架结构地震反应的影响	胡理列, 赵成文 (143)
基于灰靶决策理论的土木工程管理效能研究	李准, 王进 (148)

以天然砂为骨料的 RPC 材料及力学性能试验研究	史芸芸, 董 军, 崔 征, 宋少民, 唐宗富 (152)
冷弯型钢组合墙体抗剪承载力理论分析	陈卫海, 郭 鹏, 王 栋 (157)
住宅现浇楼板裂缝的分析与控制	苗 鹏 (161)
海洋环境下锈蚀钢筋混凝土板力学性能研究	吕维波, 沈德建, 苏 盛 (164)
益损期望法在房地产风险分析中的应用研究	吴荫强, 王建平 (168)
展望——卖方市场下的投标决策	李赫然, 胡长明, 王 霞, 史秀琴 (171)
纯弯圆孔蜂窝梁的弯扭屈曲分析	周朝阳, 张益凡 (174)
粘 FRP 加固钢筋混凝土梁挠度计算	周朝阳, 程小念, 刘纯洁 (178)
圆钢管混凝土粘结强度的试验研究	周 璞, 薛建阳, 赵鸿铁, 康希良 (182)
HPF 加固 RC 梁受弯性能试验研究	胡尚瑜, 郭 曙 (186)
工程项目的粗糙集-贝叶斯风险规则挖掘算法	余 海 (190)
基于状态空间法的框架结构隔震数值模拟分析	陈小波, 刘海卿, 王学庆 (194)
圆钢管混凝土粘结应力分布范围及其变化规律	殷小激, 赵鸿铁, 薛建阳, 康希良 (198)
由风险管理谈工程质量安全事故的司法鉴定	王旭峰, 师安东 (201)
近场地震动对隔震结构的影响	陈 娟, 谭 平, 周福霖 (204)
节段施工体外预应力混凝土梁的非线性分析	曾永革, 李传习 (208)
关于二阶侧移计算中的假想水平荷载的探讨	刘小花, 林 鹏 (212)
Bearing Capacity Analysis of Multiplanar KX-, KT-joints of SHS	Yang Junfen, Gu Qiang (215)
The Load Carrying Capacity of Thin-Walled Steel I-Girder Subjected to Eccentric Patch Loading	Guo Peng, Guo Chengxi (219)
Experimental Research on Consolidation of Earthen Architecture Sites by Silicone-Acrylic Emulsion	Mao Xiaofei, Zhao Dong, Chen Ping, Zhang Weixi (225)
Analysis of the Stress Concentration of Hyperbolic Cooling Tower with a Hole	Zhang Weixi, Zhao Dong, Chen Ping, Mao Xiaofei (229)
Calculation of Shear Strengths of Masonry Walls Strengthened with CFRP	Zhang Wei (235)
Experimental Study on Multi-Ribbed Composite Wall of Moderate-high Storeyed Multi-ribbed Slab Structure	Jing Gang, Yao Qianfeng, Huang Wei (240)
Study on Load-bearing Performance and Multi-vertical-line Element Model of Multi-Ribbed Composite Wall	Zhang Xufeng, Yao Qianfeng, Huang Wei (246)

桥 梁

基于二维相干性自锚式悬索桥非线性时程分析	李 杰, 郑凯锋, 李 娜 (253)
钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑施工模型试验研究	李晓斌, 杨永清, 蒲黔辉, 刘祖胜 (259)
T 形刚构桥车致振动响应研究	桂水荣, 陈水生 (263)
拱桥 H 形细长吊杆的气动稳定性研究	刘慕广, 陈政清, 汪志昊 (267)
碳纤维布加固桥梁的可靠度分析研究	杜 斌, 赵人达, 黄质宏 (271)
人字形桥梁的动力特性及反应分析研究	卢彭真, 张俊平, 赵人达 (274)
既有钢桁梁桥裂纹病害及整治措施研究	李贞新, 李小珍, 李 俊, 强士中 (279)
用有限元程序对成桥荷载试验的仿真分析	董 浩, 于丽波 (283)
斜风计算模式对大跨度斜拉桥风荷载的影响	毛 敏, 陈政清, 刘志文, 黄立红 (287)
高墩大跨曲线连续刚构桥施工过程计算分析	贾 山, 杨永清, 周 维 (291)
湛江海湾大桥振动试验模态分析	吴新印, 颜全胜 (295)
城市轨道交通中桥梁节段预制拼装法的施工控制技术	李 波, 陈政清, 何旭辉, 胡盛华 (298)
长大公路隧道特殊情况下单洞运行交通组织研究	王 宁, 陈 红, 景 强, 潘文刚 (301)
两种相关桥梁养护规范的比较研究	严建玮, 王立彬 (305)

苏通大桥主 4 号墩特大钢吊箱抽水阶段的结构分析	谭萍, 徐伟, 孙 昊 (309)
隧道开挖对邻近既有地下结构安全影响分析	陈波, 董军 (313)
大跨桥上纵连板式无碴轨道纵向稳定性分析	林红松, 刘学毅, 杨荣山 (317)
隧道工程地下水渗漏环境试验模型	蒋雅君, 杨其新, 刘东民 (321)
斜拉桥换索研究	周燕其, 曾德荣, 杨善奎, 谭兴丰 (325)
斜桥塔在风作用下的受力分析	张明金, 李永乐, 汪 斌 (329)
城市高架桥模糊主动控制	刘栋栋, 渠昀山, 喻 言 (333)
普通钢筋模拟方式对高墩自体稳定性的影响	杨善奎, 韩 艳, 封周权, 周燕其 (336)
桩土相互作用对基础等效动力刚度的影响	胡盛华, 陈政清, 李 波 (340)
基于可靠性的桥梁工程保险费率研究	宋雯雯, 谢华慧 (344)

暖通

冰蓄冷空调在北京地铁车站应用的可行性分析	蔡伟, 解国珍, 李德英 (349)
基于边界元方法求解反热传导问题	陈生, 汤广发 (353)
Application of Simulation in Fault Detetion and Diagnosis of HVAC Systems	Lan Lili, Chen Youming (356)
美术馆展厅冬季空调气流组织分析与研究	肖震, 王季楼 (361)
用 Airpak 对室内空气品质和热舒适的模拟方法	王骏顺, 张国强 (365)
蓄冷技术在城镇 LNG 冷能利用方面的应用研究	周波, 詹淑慧 (369)
浅谈北方村镇节能住宅与太阳能利用	吴振荣, 李德英 (372)
地板辐射供暖房间室内热舒适度的数值模拟	任艳莉, 李德英 (376)
用边界元方法求解热传导/扩散正问题	陈生, 汤广发 (380)

岩土

盾构过站法修建地铁车站的应用分析	梁美丽, 扈伟昌, 高化兵, 董宁娟 (387)
砂卵石堤基中悬挂式防渗墙管涌控制研究	罗玉龙, 罗亮明, 彭 华 (391)
静压管桩静载荷试验的双重灰色预测	孙云彪, 赵俭斌, 张世峰, 高 扬 (395)
朔准线边连沟大桥桥基位置选择	邱恩喜, 荆志东, 王春雷 (398)
新型深水港码头高填土施工仿真分析	王崇宇, 刘晓平, 曹周红, 姚 迪 (402)
四桩承台破坏机理试验研究	童 敏, 刘肖凡 (406)
植物根系与边坡土体间的力学特性研究	江 锋, 张俊云 (411)
微型桩体系加固顺层岩质边坡初步研究	肖维民, 周德培, 王唤龙 (416)
顺层边坡岩体爆破的振动特性数值研究	宋小林, 张继春, 曹孝君, 陈 丽 (420)
某水电站左护岸爆破大块率优化与预报研究	刘健康, 王社良, 苏三庆, 姚文强, 吴世然 (424)
低活性粉煤灰稳定碎石的强度问题研究	祝小龙, 赵春花, 李 磊 (427)
盾构施工中地层变位模型的仿真方法对比研究	钱双彬, 董 军, 陈波, 史芸芸, 唐宗富 (431)
堤坝动力特性试验研究	王 磊, 周 晶, 朱 彤, 李 昕 (435)

市政

多层曝气生物滤池处理二级出水的效能研究	杨 青, 张林生, 赵玉华, 傅金祥 (441)
膜生物流化床与膜生物反应器运行特性的比较	马金霞, 王世和, 沈倩宇 (444)
人工湿地处理城市污水特性研究	鄢 璐, 王世和 (448)
昌吉西延干渠渠系原型观测和安全监测自动化系统	孙 亮, 王思志 (451)
多氯萘的环境含量及降解研究进展	吴小莉, 余 健 (454)
高水头岸边溢洪道三维流场数值模拟	麦栋玲, 张 挺 (458)
水中微量有机物在 O_3 -BAC 工艺中的去除特性研究	李 璇, 吕锡武 (462)
UPVC 塑料排水立管的研究现状	张 露, 袁玉梅 (466)

道 路

- 粉土路基的临界动应力和动应力-应变关系研究 杨献永, 刘建坤, 肖军华, 陈立宏 (471)
- 排水性沥青路面降温性能探讨 宋宪发, 凌建明, 朱方海 (474)
- 高速铁路轻型板式轨道的选型 赵 曼, 阎贵平, 李海蛟 (478)
- 西部地区公路水毁防治技术浅议 官盛飞, 凌建明, 赵鸿铎 (482)
- “共振法”破碎旧水泥混凝土路面的效果评价 徐柱杰, 凌建明, 黄琴龙 (486)
- 洞庭湖区公路建设决策问题研究 杨 靓, 刘晓平, 徐 进 (491)
- 高速公路资产管理系统研究 郝 媛, 徐天东, 孙立军 (495)
- 基于 GPS-GIS 技术的路段旅行速度调查及算法 戴剑军, 林航飞 (499)
- 新建地铁对既有结构影响的安全性评估新技术 陈 波, 董 军, 唐宗富 (503)
- 现行《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中徐变系数的指数型公式拟合 陈富强, 李传习 (507)

结 构

多层钢框架外伸端板连接节点的受力性能研究

黄 俊^{1,2*}, 戴绍斌²

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 武汉理工大学设计研究院, 武汉 430070)

摘 要:通过拟静力试验以及有限元程序,对外伸端板高强螺栓连接节点进行了低周反复荷载作用下试验研究和非线性有限元分析,研究了外伸端板高强螺栓连接节点的破坏形式、受力性能。分析结果表明:在焊缝质量能得到保证的情况下,外伸端板连接具有足够的强度和很好的抗震耗能性能;端板的厚度对于节点的性能有较大的影响,在一定的厚度范围内,随着端板厚度的增加,节点的承载能力也随之提高。这些研究结果对外伸端板高强螺栓连接节点的研究和应用提供了一定的理论基础。

关键词:外伸端板连接;半刚性连接;受力性能;试验研究;有限元分析

Research on Mechanical Performance of Overhang End Plate Connection Joint in Multi-story Steel Frame

Huang Jun^{1,2*}, Dai Shaobin²

(1. School of Civil Engineering of Wuhan University, Wuhan 430072;

2. Design & Research Institute of Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract: By pseudostatic test and finite element program, this paper did an experiment and nonlinear finite element analysis on high tensile bolted connected node of overhang end steel plate to study its damage form and non-linear finite element analysis. studied the damage form and mechanical performance of overhang end plate connection joint. The results of analysis indicate when the quality of welded seam is guaranteed, the joint has enough strength and good consuming energy capacity; the thickness of end plate has great influence on the performance of the joint, and when the thickness is in a given range, the bearing capacity increases with the thickness of end plate growing. These results provide theoretical basis of study and application of top and bottom angle steel connection joint.

Key words: overhang end plate connection joint; semi-rigid connection; mechanical performance; experimental research; finite element analysis

我国钢结构建筑的梁柱连接节点采用的连接形式主要包括:全焊接刚性连接、栓焊刚性连接、外伸端板高强螺栓连接、延伸端板连接和各种角钢连接等。刚性连接具有很大的抗转动刚度,能够有效地传递内力,过去人们一直认为这种连接受力合理,构造简洁,具有较好的变形性能。然而,在美国的 Northridge 地震中,却有数百栋采用这种连接的建筑发生了不同程度的脆性破坏^[1-2]。这一现象引起了国内外学术界和工程界的关注并引发了对半刚性连接的广泛研究。半刚性连接具有现场施工简单,安装速度快等优点。同时这种连接方式降低了对柱子的约束刚度的要求,改善了连接节点的变形和耗能性能,有利于结构抗震,因此对半刚性连接的研究和应用也越来越多。外伸端板高强螺栓连接是半刚性连接之一,目前仅 Egor P. Popov, Keh-Chyuan Tsai, Michael D. Engelhardt, 顾强、彭少明等教授对此进行了一些试验研究和分析^[3-7]。本文通过试验方法和有限元程序对外伸端板高强螺栓连接节点进行了试验研究和非线性有限元分析。

1 试验研究

1.1 材性试验

标准材料试验中的材料是从制作节点的同一批钢材中截取的。材料的截取位置、材性试验中试件的具体形状、尺寸要求及试验方法均依据《金属拉力试验方法》(中华人民共和国国家标准 GB228—87)。试件从钢板上切割后,通过刨边消除火焰切割的热影响区。全部材性试件共 2 个,厚度分别为 8 mm 和 12 mm。材料的力学性能试验在万能试验机上进行,其中弹性模量采用电阻应变片测量。为了消除偏心受力,在试件同一位置的正反两面各贴一片应变片,并采用全桥接法。试验结果见表 1。

表 1 材性试验结果

试件厚度/mm	平均屈服强度 $f_y/(N/mm^2)$	平均极限强度 $f_u/(N/mm^2)$	弹性模量 $E/(N/mm^2)$	伸长率 $\delta/\%$
8	302.5	445.5	1.904×10^5	26
12	289.5	415.5	2.087×10^5	25.8

* 黄俊(1977~),男,博士研究生,工程师。E-mail: hj@whut.edu.cn。

1.2 试件设计

试验采用的梁柱连接节点试件取自于常规钢框架结构在侧向荷载作用下梁柱反弯点之间的典型单元^[8]。通常情况下在对承受较大侧向荷载作用的抗弯框架进行分析时,假定反弯点位于梁的跨中和柱的中间是合理的,因此试验中采用了简化的悬臂式梁柱连接试件。同时,为了简化分析,试验中没有模拟柱中的轴力,而是重在研究连接节点本身的性能^[9]。

外伸端板高强螺栓连接通过与梁端焊接在一起的端板将梁和柱用高强螺栓连接在一起。试验中共制作两个此类型的试件(JD1-1 和 JD1-2),试件的连接螺栓均采用 M20 高强螺栓,端板厚度分别为 $1.0d$ 和 $1.25d$,试件详细尺寸见表 2。图 1 为试件示意图。端板通过焊脚尺寸 $h_f=10$ mm 的角焊缝(翼缘)和焊脚尺寸 $h_f=8$ mm 的角焊缝(腹板)与梁端部焊接,这些尺寸是根据《钢结构设计规范》(GB50017—2003)计算所得,能提供足够的强度来保证梁全截面塑性弯矩的发展。所有焊缝质量等级为一级。

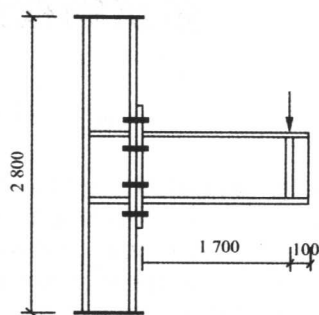


图 1 外伸端板高强螺栓连接示意图

表 2 外伸端板高强螺栓连接试件的尺寸

mm

试件编号	梁的尺寸	柱的尺寸	端板厚度
JD1-1	H300×200×8×12	H200×200×12×12	20
JD1-2	H300×200×8×12	H200×200×12×12	25

与端板相接触的柱翼缘、梁翼缘在安装螺栓前均经过了喷砂处理,经试验测定,摩擦面的摩擦系数 $\mu=0.41$ 。柱横向加劲板厚度与梁翼缘厚度一致,即 $t=12$ mm,位置处于与梁翼缘相应处。梁加劲板厚度与梁翼缘厚度也一致^[10-12]。

1.3 试验装置及量测仪器

试验装置如图 2 所示,反力架通过四个 50 mm 螺栓连在混凝土地板上,液压千斤顶通过 50 mm 直径的轴与连在反力架上的 U 形卡具连在一起,可以微转。用四根 32 mm 直径的螺杆和两个夹板制成的夹具一端与梁端连在一起,另外一端与千斤顶连在一起。试验时把柱水平放置在两个可动滚轴上,通过压梁将柱固定,柱的两端则用钢筋混凝土梁、钢板和螺旋千斤顶与两侧的反力架顶紧。

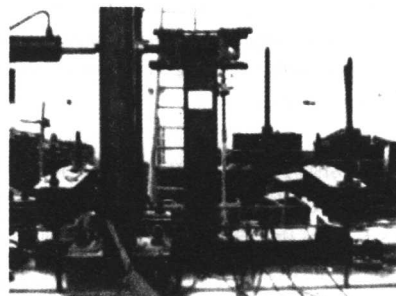


图 2 试验装置示意图

试验中,采用 DH3815 应变记录仪来记录加载过程中的各应变片的应变数值,采用百分表人工读数观测柱的水平位移和整体转动,节点域变形情况通过三块机电百分表量测,每个循环共记录四次,原位一次,正向加载结束记录一次,卸载后加载一次,反向加载结束记录一次。根据应变情况判断梁及连接的屈服情况。梁的水平位移通过机电百分表与 X-Y 函数记录仪相连,同时推拉千斤顶的荷载传感器也与 X-Y 函数记录仪相连,以直接绘出加载过程中 $P-\Delta$ 滞回曲线。在每个试件试验结束后,对所有的传感器、百分表及机电百分表重新标定。

1.4 加载方式

试验根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101—96),采用拟静力试验方案对梁柱连接施加低周水平反复荷载作用。

在梁端处施加反复水平荷载。反复水平荷载采用分级施加,初始加载为结构极限荷载的 20% 左右,每级增加约为总荷载的 20%,当大致接近屈服荷载后,每级增加减少到总荷载的 10% 左右。在结构达到屈服位移之前,采用以上控制力的方法逐级加荷载,每级循环 2 周,直至结构屈服。屈服位移的确定可以采用 $P-\Delta$ 曲线出现较明显拐点的方法。考虑到试验的具体情况,屈服后用梁量测处的水平位移控制,位移步长为屈服位移,每级也循环 2 周,直到位移很大或试件破坏。

1.5 试验结果

1.5.1 试验结果

两个外伸端板高强螺栓连接试件的试验结果见表 3,其中 P_u 为悬臂梁端部所承受的极限荷载,单位 kN; Δ_u 为悬臂梁端部在量测点处的极限位移,单位 mm; θ_u 为节点的极限转角,单位 rad; M_u 为与 P_u 对应的节点弯矩, $M_u=1.7 \times P_u$,单位 kN·m; E 为耗能系数; μ 为试验终止时节点的延性系数,两个试件在试验中的滞回曲线如图 3 所示。

表 3 外伸端板高强螺栓连接试件的试验结果

试件编号	P_u	Δ_u	θ_u	M_u	E	μ	破坏模式
JD1-1	103.4	20.8	0.072	175.7	2.1	3.3	梁端与端板连接处焊缝撕裂
JD1-2	113.4	16.7	0.064	192.7	2.3	2.6	梁端与端板连接处焊缝断裂

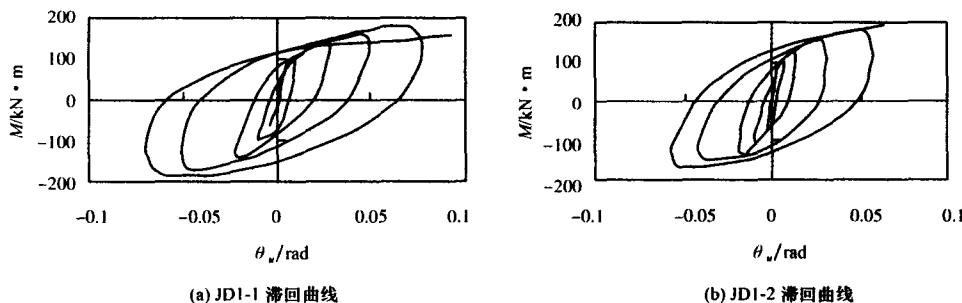


图 3 外伸端板高强螺栓连接节点的滞回曲线

1.5.2 破坏形式及滞回性能

两个外伸端板螺栓连接试件的破坏形式均为梁翼缘与端板连接处焊缝撕裂。试件破坏时端板出现较为明显的弯曲变形,与端板相连的柱翼缘螺栓连接处出现屈曲,端板外伸部分与柱翼缘明显脱离,螺栓有轻微松弛现象。柱节点域由于加设了横向加劲肋而没有出现屈曲现象。发生破坏时,两个试件的极限转角都大于美国 FEMA 要求的 0.03 rad,最大转角达到了 0.072 rad,这表明该连接方式具有较好的变形能力。

梁柱节点的抗震性能可以在其滞回性能上得到较好的反映。在试验所采用的低周反复荷载加载方式下,主要可以从节点的延性系数和耗能系数等方面来描述这一性能。

节点延性系数 μ 定义为塑性极限转角 θ_u 与弹性极限转角 θ_y 的比值。此指标是节点抵抗地震作用能力的有效度量,延性系数越大,节点进入塑性后承受大变形的潜力越大。但过大的延性系数,将可能导致节点承载力和刚度较大的降低。因此,节点延性系数取 3.0 较为合适,既能保证节点塑性的充分发挥,又能保证节点具有足够的承载力和刚度。JD1-1 的延性系数较大,达到了 3.3,JD1-2 的延性系数也接近 3,这说明在最终破坏前两个试件都具有较好的延性。

如图 4 所示,耗能系数 E 定义为:

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}}$$

其中, $S_{(ABC+CDA)}$ 为滞回曲线一个循环所包围的面积,是结构一个受力循环所消耗的能量。 $S_{(OBE+ODF)}$ 为与本结构相同的线弹性体系所消耗的能量。因此, E 值的大小就表征了结构通过塑性变形吸收能量的能力。通常,滞回曲线越饱满,耗能系数 E 就越大。从图 3 可以看出,两个试件的 $M-\theta$ 滞回曲线都比较饱满,计算所得能量耗散系数均超过了 2.0,说明该节点连接方式能起到较为理想的抗震耗能作用^[13]。

由于试件 JD1-2 的连接端板厚度要大于 JD1-1,因此在试验中 JD1-2 的性能相比 JD1-1 有所提高,这说明端板厚度对于端板连接节点的性能有一定影响,厚度增加,节点的刚度也相应提高。但是,这种影响在多大厚度范围内最为明显及其与梁翼缘厚度、螺栓尺寸等周围构件的相互协调性尚有待进一步研究。

2 有限元分析

2.1 有限元模型的建立

利用 ALGOR 程序提供的三维实体元定义了 Q235 钢结构模型。材料的应力应变关系简化为近似的三折线模型,见图 5。材料为各向同性,弹性模量取 2×10^5 MPa,泊松比取 0.3,容重为 7.85×10^{-6} kg/mm³,计算采用 Von-Mises 屈服准则及相关的流动准则,材料强化取多线性随动强化准则。焊缝同样利用三维实体元进行模拟,强度极限值取 200 MPa。图 6 是外伸端板高强螺栓连接进行网格划分后的图形。在各节点模型的建立中,忽略了节点焊缝和焊接残余应力的影响。荷载施加在梁的自由端,柱的两端为固定端。

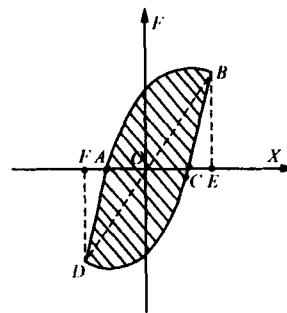


图 4 耗能系数计算简图

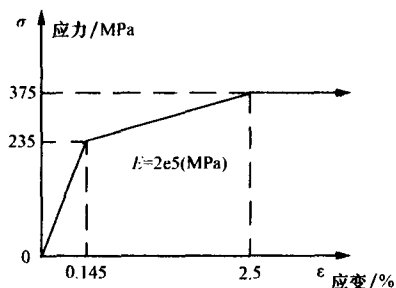


图5 材料应力应变关系曲线

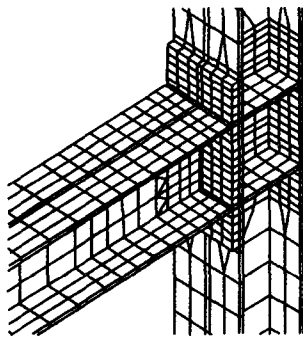


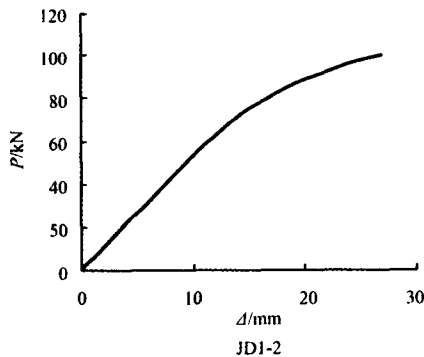
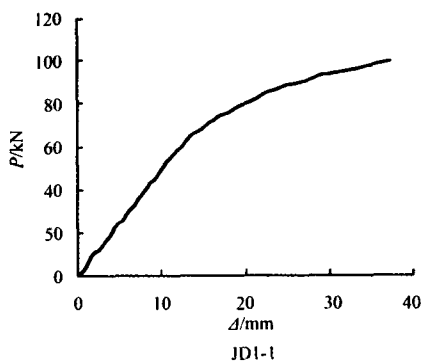
图6 外伸端板高强螺栓连接有限元模型

2.2 计算结果分析

表4中列出了两个外伸端板高强螺栓连接模型在不同静力荷载作用下的一些有限元计算结果。图7为根据有限元计算结果作出的 $P-\Delta$ 曲线。

表4 外伸端板高强螺栓连接模型有限元计算结果

荷载/kN	最大 VonMises 应力					
	应力值/MPa		分布位置		梁端位移/mm	
	JD1-1	JD1-2	JD1-1	JD1-2	JD1-1	JD1-2
20	150	130	端板和梁上翼缘连接处局部	端板和梁上翼缘连接处局部	4.1	3.7
30	200	180	端板和梁上、下翼缘连接处	端板和梁上翼缘连接处局部	6.1	5.7
40	235	200	与梁翼缘连接处端板局部屈服	端板和梁上、下翼缘连接处	8.1	7.5
50	235	235	与梁翼缘连接处端板屈服区扩大	与梁翼缘连接处端板局部屈服	10.1	9.3
60	235	235	屈服区域扩展至螺栓处	与梁翼缘连接处端板屈服区扩大	12.4	11.3
72	235	235	梁翼缘附近至螺栓处端板屈服	屈服区向螺栓处扩展	16.2	14.1
84	235	235	梁腹板附近端板也开始屈服	梁翼缘附近至螺栓处端板屈服	22.1	18.1

图7 外伸端板连接模型的 $P-\Delta$ 曲线

从计算结果可以看出,模型 JD1-1 当荷载加至约 40 kN 时与梁翼缘相连接处的端板局部出现屈服,随着荷载的不断加大,屈服区域先沿横向扩展至整个梁翼缘与端板连接处,然后沿竖向向螺栓处扩展。当加载至约 72 kN 时,处在螺栓和梁翼缘之间的端板整体基本屈服。此时, $P-\Delta$ 曲线的切线斜率发生较大变化,可以认为连接节点已经整体进入了塑性变形。此后,节点变形大幅度增长,直至最终破坏。模型 JD1-2 的受力过程基本与模型 JD1-1 相似,但是由于其端板厚度较大,因此进入塑性变形时的荷载要比 JD1-1 大(约 84 kN)且相同荷载作用下梁端的位移均要小于 JD1-1,这一点从 $P-\Delta$ 曲线上可以很清楚地看出。图8为 JD1-1 加载至 72 kN 时节点和端板的屈服区域应力云图,图9为 JD1-2 加载至 84 kN 时节点和端板的屈服区域应力云图。从图8、图9中可以看出,节点的屈服首先发生在梁翼缘与端板连接处的端板上,因此端板厚度较大时其刚度也较大,屈服荷载也就相应提高,所以端板的厚度对外伸端板连接的强度有很大影响。

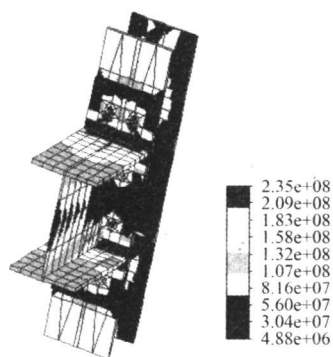


图 8 72 kN 时 JD1-1 节点和端板屈服区域应力云图

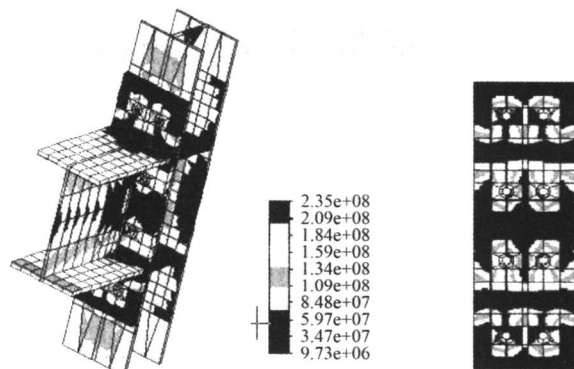


图 9 84 kN 时 JD1-2 节点和端板屈服区域应力云图

3 小 结

通过上述试验研究和非线性有限元分析,可以得出以下结论:

①外伸端板高强螺栓连接是较为刚劲的半刚性连接形式,在焊缝质量能得到保证的情况下,外伸端板连接具有足够的强度和很好的抗震耗能性能,因此在抗震设防要求高且承受弯矩作用较大的钢框架体系节点处采用这种连接方式是比较合适的。

②外伸端板高强螺栓连接节点的试验和非线性有限元分析结果基本一致。端板厚度不同对连接节点的强度和刚度有很大的影响,在一定的厚度范围内,随着端板厚度的增加节点的承载能力也随之提高。

参考文献

- [1] Egor P. Popov, Keh-Chyuan Tsai, Michael D. Engelhardt. On seismic steel joints and connections [J]. Engineering Structure, 1989, Vol. 11, July.
- [2] Astaneh-Asl A. Seismic Performance and design of bolted Steel moment-resisting Frames [J]. Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, 1999, 36(3).
- [3] 王新武,李捍无,蒋沧如,等. 剖分顶底角钢梁柱连接的滞回性能试验研究[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2003, 20(2): 47-49.
- [4] 郑廷银. H 形钢框架梁柱节点的设计方法[J]. 南京建筑工程学院学报, 1997(4): 14-22.
- [5] 徐永春,吕方. 住宅钢结构体系梁柱节点性能研究[J]. 建筑技术开发, 2002(7): 13-15.
- [6] 王新武,等. H 形钢梁柱顶底角连接的研究[A]. 第二届全国现代结构工程学术研讨会论文集[C]. 工业建筑(增刊), 2002.
- [7] KCTsai. Cyclic performance of steel beam-column moment joints [J]. Engineering and Structure, 1995, 17(8): 596-602.
- [8] 湖南大学等. 建筑结构试验[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1991.
- [9] 戴绍斌. 钢框架-混凝土筒住宅结构性能与配套技术研究[D]. 武汉理工大学博士学位论文, 2004.
- [10] 建筑抗震设计规范(GB50011—2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003.
- [11] 钢结构高强度螺栓连接的设计/施工及验收规程(JGJ82)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.
- [12] 钢结构用高强度大六角头螺栓(GB/T1228)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.
- [13] 王新武. 钢框架梁柱连接研究[D]. 武汉理工大学博士学位论文, 2003.

钢框架柱一阶分析设计和二阶分析设计的比较

刘新春*, 惠宽堂

(西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055)

摘 要:以我国现行钢结构设计规范(GB50017—2003)为基础,对钢框架柱的一阶分析(计算长度系数法)和二阶分析法所列公式进行详细比较,通过算例分析,对两种分析设计进行定量比较,并指出进行二阶分析的重要性。

关键词:钢框架柱; 一阶分析设计; 二阶分析设计

Comparison between First-order Analysis Design and Second-order Analysis Design of Column in Steel Frame

Liu Xinchun*, Hui Kuantang

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055)

Abstract: On the basis of Code for Design of Steel Structure (GB50017—2003), a detailed comparison between first-order analysis design (effective length approach) and second-order analysis design of column in steel frame was carried out by listing respective formulas. Then two examples were presented to illuminate the quantitative difference between the two designs and the necessity of second-order analysis design is emphasized.

Key words: column of steel frame; first-order analysis design; second-order analysis design

众所周知,钢框架柱是最常见的承重构件,目前我国钢框架柱的二阶分析严格讲只需对二阶内力进行分析和强度计算,钢结构设计规范(GB50017—2003)^[1]推荐公式是在一阶分析的基础上采用放大系数间接考虑了二阶效应,这种方法比结构的一阶分析方法算得的内力更能较好地反映实际情况。

1 GB50017—2003 对一阶分析设计和二阶分析设计所列公式的比较

现行钢结构规范规定,钢框架柱的内力可以按一阶分析计算,也可以按二阶分析计算,根据框架柱的受力特点,既承受轴向力又承受弯矩,框架柱的稳定性计算必须查表确定计算长度系数,然后计算长细比,进行稳定验算。

GB50017—2003 规定,按一阶分析计算强度公式为:

$$P/A_n \pm M_x/(\gamma_x W_{nx}) \leq f. \quad (1)$$

其中, A_n 为净截面面积, W_{nx} 为对 x 轴净截面抵抗矩, γ_x 为截面塑性发展系数, P 为构件轴心压力, M_x 为所计算构件段范围内的最大弯矩。

按一阶分析计算弯矩作用平面内稳定性公式:

$$P/(\Phi_x A) + \beta_{mx} M_x/[\gamma_x W_{1x}(1 - 0.8P/P'_{Ex})] \leq f. \quad (2)$$

其中, $P'_{Ex} = \pi^2 EA/(1.1\lambda_x^2)$, Φ_x 为弯矩作用平面内的轴心受压构件稳定系数, β_{mx} 为等效弯矩系数, 见 GB50017—2003 第 5.2.2 条规定, 有详细说明。

钢框架柱按二阶分析设计时, 要以公式(3)和公式(4)进行强度和稳定性计算,

$$P_1/A_n \pm M_{x1}/(\gamma_x W_{nx}) \leq f, \quad (3)$$

$$\beta_{mx1} M_{x1}/[\gamma_x W_{1x}(1 - 0.8P_1/P'_{Ex1})] \leq f. \quad (4)$$

其中, M_{x1} 为二阶分析得到的弯矩, 这与式(1)和式(2)中的 M_x 不同, P_1 近似取一阶分析的结果, β_{mx1} 则为 $\beta_{mx1} = 0.65 + 0.35M_2/M_1$ 。

通过钢框架柱一阶分析法和二阶分析法的公式比较, 可以看出, 一阶弹性分析和二阶弹性分析都没有考虑几何非线性和材料非线性的影响, 而钢框架柱达到极限承载力时常处于非线性弹塑性状态, 出现了内力重分布, 而按极限状态确定钢框架柱的承载力时已考虑了几何非线性和材料非线性的影响。因此, 按一阶弹性分析确定的框架柱内力并不是构件的实际内力, 导致构件分析与构件承载力极限状态的不协同。

* 刘新春(1975~), 男, 硕士研究生。E-mail: liuxinchun79@yahoo.com.cn。

2 算例 1

以图 1 所示三铰静定钢框架为例说明。

解:横梁具有较大的抗弯刚度,在跨中承受集中荷载 P ,如果仅从一阶分析的角度出发,把 P 分担到左右两个柱后(每柱承担 $P/2$),分别按照两端铰支柱和悬臂柱进行构件截面设计,即左柱计算长度为 h ,右柱计算长度为 $2h$,这样设计的结果是错误的。本钢框架在 P 作用下理论上不产生侧移,但结构在没有侧向支撑时,整体失稳形态是有侧移的,考虑该框架失稳时产生侧移 Δ 情况。如图 1(b)所示,针对左柱的平衡,节点 A 存在水平反力 H ,其值可由对 B 节点的力矩平衡条件得到

$$H = P\Delta/(2h)。 \quad (5)$$

由 GB50017—2003 规定: $\frac{\sum N \cdot \Delta u}{\sum H \cdot h} = 1 > 0.1$,宜采用二阶分析。

右柱的平衡状态如图 1(c)所示,根据悬臂柱在侧移 Δ 和竖向荷载 $P/2$ 作用下的平衡微分方程可求得,

$$\Delta = 2Hh[\tan(kh)/kh - 1]/P。 \quad (6)$$

式(5)代入式(6)得,

$$\tan(kh)/kh = 2, \quad (7)$$

求得 $kh = 1.67$, $P/2 = \pi^2 EI/(2.69h)^2$ 。

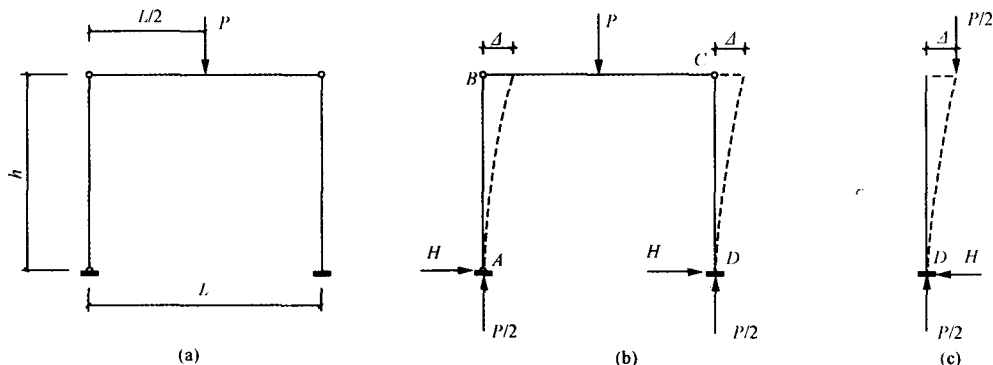


图 1 三铰钢框架的稳定分析

由此说明,右柱的计算长度应为 $2.69h$,而不是 $2h$,稳定承载力大大减小,不安全。究其原因,没有考虑该框架的侧向刚度只能由悬臂柱提供,忽略了 $P-\Delta$ 效应对结构承载力的影响,因此对于此类结构进行二阶分析是正确的。

3 算例 2

某冶炼车间的操作平台^[2],梁跨度 9 m,柱距 5 m,柱顶与横梁铰接,柱底与基础刚接,如图 2 所示,全部平台结构的自重标准值为 2 kN/mm^2 ,由检修材料产生的平台均布活荷载标准值为 20 kN/mm^2 ,每片框架承受的水平活荷载标准值为 50 kN ,在平台梁的跨中设置有检修用的单轨吊车,其集中荷载标准值 $F=100 \text{ kN}$ 。沿各列柱的纵向均设置有柱间支撑,平台面为 5 m 跨度的密布铺板梁。平台结构采用 Q235-B 钢,焊接使用 E4303 焊条。平台柱采用工字型焊接组合截面,钢板焰切边,边列柱截面为 $\text{H}400 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,中列柱截面为 $\text{H}500 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 。柱子的截面尺寸如图 3 所示。(注:①平台均布活荷载的分项系数取 1.3;②在框架平面外,柱底与基础铰接;③平台纵向柱间采用十字形交叉支撑,与柱底及底部连接。进行框架内力分析,用一阶分析和二阶分析分别进行柱的强度,稳定性计算和对比。)

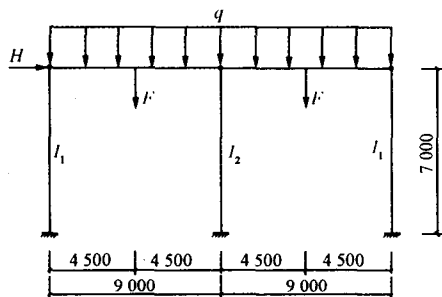


图 2 钢平台横剖面(单位:mm)

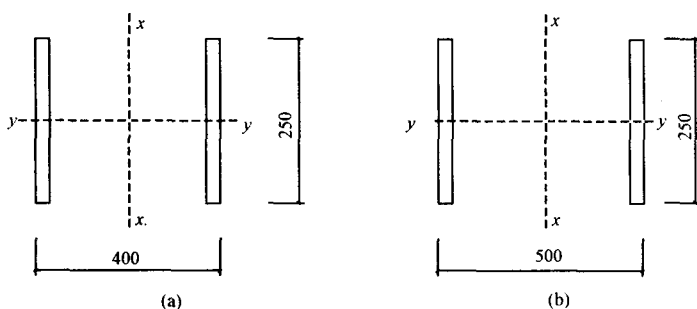


图 3 柱截面(单位:mm)