

第24届
全国结构工程学术会议
论文集

第Ⅱ册

PROCEEDINGS OF THE 24TH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. II

主编：陆新征

《工程力学》杂志社
2015.10

CSTAM2015-P32

序

一年一度的全国结构工程学术会议去年在兰州渡过了它 23 岁生日后，今年在福建厦门召开了第 24 届全国结构工程学术会议。

福建位于东海与南海的交通要冲，与台湾岛隔海相望，是我国东南沿海的重要窗口，是古海上丝绸之路的发源地。我国历史上伟大的航海家郑和从此扬帆远航，开启了我国与世界交流的重要篇章。

厦门市近代一直是我国东南重要贸易和航运中心，特别是改革开放后，厦门市作为最早实行对外开放政策的四个经济特区之一，为我国经济腾飞做出了重要开创性贡献。

今年会议的东道主厦门大学是由著名爱国华侨陈嘉庚先生于 1921 年创办的享誉海内外的著名高校。在厦门大学 90 余年的建校历史中，为我国高等教育事业做出了重要贡献。厦门大学目前建有多个国家级重点学科、重点实验室和工程研究中心，近年来发表了大量高水平的期刊论文，多次获得国际及国家级重要奖励，入选我国“211”工程和“985”工程。根据世界知名期刊《Nature》发布的统计报告，厦门大学科研实力长期名列国内所有科研机构前十名。

在中国力学学会结构工程专业委员会、厦门大学、厦门理工学院、《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 209 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富的收获。

论文集主编 陆新征



2015 年 10 月

第 24 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 209 篇，共计 1250 页，分装成 2 册，每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II 册只载本册目录。

第 I 册论文 99 篇（共 616 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. 钢筋混凝土结构、材料与构件；

3. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构

第 II 册论文 110 篇（共 634 页），包括四个学科类别：4. 钢结构、材

料与构件；5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构；6. 公路、铁

路、桥梁、水工与港工；7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；

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 24 届全国结构工程学术会议论文集目录

第 II 册目录

4. 钢结构、材料与构件

钢管混凝土叠合柱在电厂汽机房结构中的适用性探讨	陈锦阳 邢国雷 侯 超 王勇奉 (001)
多层装配式钢框架体系和研究	陈学森 施 刚 王 喆 王 琼 (005)
考虑随机缺陷的钢框架支撑结构试验研究与有限元分析	金 路 刘 丹 贾连光 (009)
高强方钢管高强混凝土轴压短柱有限元模型优化	李幅昌 陈博文 刘 余 (015)
钢管混凝土叠合柱-钢梁节点的有限元模拟	廖飞宇 李永进 (019)
不等高开缝钢板剪力墙低周反复试验研究	陆金钰 譙旭东 唐 屹 王恒华 (023)
三面受火的内配型钢方钢管混凝土柱火灾全过程分析	毛文婧 王文达 王景玄 (029)
高强钢结构研究进展和规程编制	施 刚 胡方鑫 石永久 (035)
Q460GJ 钢焊接 H 形梁整体稳定性能试验研究	
..... 王赛博 熊 刚 徐国友 杨 波 戴国欣 聂诗东 胡 鹰 张伟富 (040)	
Q345GJ 钢焊接 H 形截面残余应力测试	
..... 魏奇科 白巨波 熊 刚 杨 波 戴国欣 胡 鹰 聂诗东 张伟富 (045)	
风荷载作用下输电塔线耦联体系响应分析	徐 博 张盈哲 谢 强 (050)
带焊缝缺陷输电杆塔直缝焊管承载力试验研究	殷鹏飞 秦 亮 张琳琳 谢 强 (054)
可替换独立耗能梁段抗震性能分析	殷占忠 任亚歌 陈 伟 梁亚雄 (058)
斜拉索空间姿态对风雨激振影响研究	郑云飞 刘庆宽 刘小兵 马文勇 (067)
温度对 X80 管线钢韧/脆转变区断裂韧性的影响	卓小敏 徐 杰 李朋朋 (071)
碗扣式脚手架稳定性影响因素分析	邹阿鸣 李全旺 张 浩 (075)

5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

软岩浅埋隧道三台阶七步开挖变形破坏机理研究	陈 峥 何 平 张安琪 王秀英 (080)
露地联采高陡岩质边坡稳定性微震监测应用初步研究	方 军 李庶林 胡静云 (086)
地震作用下地下商业街结构动力反应的影响因素分析	高照宇 陈清军 (094)
基于连续边界条件的土层厚度随时间变化的平均固结度研究	
..... 何利军 吴立松 张 涛 梅国雄 (099)	
基于地质雷达技术的隧道衬砌缺陷识别分析	贺建涛 董 军 张 健 田 川 (107)
土压缩系数非线性表达式	胡佳星 李正农 (111)

盾构隧道施工过程及支护方式对高速铁路高架桥群桩基础影响分析	刘 喆 何 平 张安琪 陈 峥 (115)
多管式钢烟囱风致干扰效应研究	刘晓玲 李晓娜 刘庆宽 (124)
不同煤层条件对支承压力及矿压显现规律的影响	盛园园 魏 平 (129)
刚性芯夯实水泥土桩复合地基大比例静力试验及结果分析	王维玉 赵 拓 王利广 李仕良 (134)
地震波反演与地下结构的动力响应分析	王沿朝 陈清军 (139)
复杂结构性材料一维全状态函数模型研究	卫振海 王梦恕 张顶立 (144)
刚性桩复合地基在岩溶地区高层住宅基础的应用	吴志华 吴敏捷 (158)
考虑横观各向同性效应 Wolfersdorff 亚塑性模型的改进	熊保林 汤劲松 张保俭 (162)
某土石坝超深厚覆盖层场地地震动特性研究	杨正权 赵剑明 杜 超 刘小生 杨玉生 (168)
往复荷载作用下预应力高强混凝土管桩延性分析	杨志坚 王文进 康谷贻 (175)

6. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

基于易损性分析的自锚式悬索桥传感器布置	陈永健 罗春楠 林 文 罗钰梁 魏道标 刘思涵 (181)
三塔悬索桥中塔顶主缆抗滑移问题研究	冯江晓 董 军 (185)
运营实桥在线监测系统的建立及数据初步分析	何文朋 雷家艳 (188)
单梁法分析曲线梁桥的适用条件研究	焦驰宇 张 羽 龙佩恒 侯苏伟 (194)
不同路堤表面风速分布的数值计算研究	李聪辉 石 超 刘庆宽 (203)
单箱双室箱梁的局部扭转和畸变效应研究	蔺鹏臻 雒 敏 (208)
基于 ANSYS 的土木结构一致多尺度有限元建模方法探讨	司旭龙 董 军 (213)
我国桥梁健康监测系统工程应用存在的问题及对策	苏 成 廖 威 陈 冉 (217)
正交异性折形钢板-混凝土组合桥面板基本性能	苏庆田 田 乐 韩 旭 邵长宇 (224)
大跨径刚性系杆刚性拱桥承载能力评定	朱尚清 (230)
基于上塔柱及曲臂部分节段整体吊装施工塔柱竖转过程中钢管支架变形分析	田 川 董 军 贺建涛 杨 林 (236)
基于 FPS 下的城市曲线梁桥的抗震动力学分析	王 煦 焦驰宇 董 军 (240)
刚柔复合式路面接缝处疲劳损伤特性分析	王骁帆 刘朝晖 李 盛 (244)
成桥状态空间主缆线形计算	张 龙 李全旺 林道锦 颜智法 (249)
扁平箱梁涡激力的展向相关特性研究	张海东 刘小兵 王彦彪 (253)
桥梁伸缩缝局部冲击荷载的模型实验	章 伟 林 云 丁 勇 张晓东 (257)
基于实测车辆荷载模型的既有桥梁承载能力评估	朱尚清 (261)

7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

基于 FEMA-P58 方法的校园建筑地震经济损失预测案例分析	曾 翔 刘诗璇 许 镇 陆新征 (266)
高层建筑结构基于性能的抗震设计研究现状及性能目标设定	陈家伟 石建光 (273)
基于平稳随机激励下相关函数的结构损伤识别	邓永懋 雷 鹰 (279)

U 型钢板力学性能受硬度和层数的影响分析	杜红凯 韩 森 闫维明 崔相东 (283)
连续摇摆墙-屈曲约束支撑框架抗震性能分析	冯玉龙 吴 京 孟少平 (290)
屈曲约束支撑框架的刚度布置方法	傅 康 吴 京 庞熙熙 冯玉龙 (295)
真型试验线路六分裂导线防舞数值模拟研究	何小宝 严 波 杨晓辉 张 博 (301)
储液结构隔震优化模型及其影响参数分析	侯钢领 李 祯 贾晓飞 宋天舒 (305)
基于 OpenSees 的主裙楼 RC 框架结构碰撞反应分析	林 杰 周 奎 潘梦阳 (314)
集中荷载作用下侧向弹性支撑悬臂钢梁侧扭屈曲的能量变分解	刘迎春 张文福 计 静 卢召红 梁文锋 侯桂兰 (319)
多连拱板结构的静动力学性能分析	柳锦春 唐德利 荣 超 (323)
一种改进张弦桁架抗倒塌性能的方法研究	陆金钰 武啸龙 许 庆 (330)
基于响应时间段统计矩的损伤检测方法	罗素娟 雷 鹰 (336)
基于云图法的规则桥梁概率地震需求模型	马海滨 卓卫东 林 杰 邢文杰 谷 音 孙 颖 (340)
带楼板钢管混凝土叠合柱-钢梁节点抗震性能数值分析	钱炜武 李 威 韩林海 赵晓林 (347)
混凝土斜交梁桥车桥耦合振动分析	上官萍 卓卫东 黄新艺 谷 音 樊超越 (353)
风荷载作用下不同加强层体系的动力响应	邵 辉 卢山郎 张建霖 张建国 (362)
静止车辆作用对公路连续梁桥地震反应特性的影响分析	沈铂坦 黄新艺 魏祥湘 卓卫东 上官萍 (367)
含摩擦阻尼器钢连梁的往复加载试验	师 骁 王彦栋 曲 哲 纪晓东 (376)
长周期地震动作用下隔震连续梁桥地震反应特性研究	孙 颖 陈天海 卓卫东 谷 音 许智星 (382)
某古塔结构地震反应分析	谭 辉 杨 悦 张小波 费毕刚 刘晶波 (390)
基于 Hilbert 变换的非线性自由振动系统参数识别研究	王立岩 李东升 (394)
基于响应部分观测的分段线性恢复力参数的识别方法	王龙飞 雷 鹰 (400)
陶瓷装甲的一种抗侵彻模型及其验证	吴立朋 (404)
新型偏心支撑框架滞回性能数值评估	吴瑞尧 王春林 孙 逊 (411)
高层连体建筑抗震性能化分析与设计	吴志华 吴敏捷 (415)
采用耗能剪切板的双柱式高墩地震损伤控制研究	谢 文 孙利民 (420)
余震地区桥梁施工过程易损性分析	杨 成 陈文龙 徐腾飞 (429)
建筑玻璃抗冲击性能研究	杨 健 王星尔 王 瞳 张杨梅 赵世伟 (436)
新型伸臂加强层阻尼体系的风振控制研究	姚渊铭 范慧能 张建霖 (442)
预应力度对预应力混凝土框架结构抗震性能影响研究	张 江 张耀庭 杨 力 (449)
古建筑木材料拉-压疲劳试验研究	张宸赫 廖红建 钱春宇 李杭州 宋 丽 郑建国 (457)
带斜筋单排配筋低矮剪力墙的抗震性能	张建伟 杨兴民 曹万林 胡剑民 (462)
工字形钢-混组合梁等效截面法的适用性问题	张文福 付 烨 刘迎春 计 静 卢召红 梁文锋 (470)

8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析

某多层住宅楼燃气爆炸后结构受损检测鉴定及处理方案	蔡向荣 (474)
--------------------------------	-----------

某小高层宿舍楼桩基质量缺陷分析及加固设计	常 婧 王 蕊 曹 霞 (478)
任意方向荷载下拉压异性二杆结构柔度优化	胡杰云 周克民 (483)
连梁刚度折减系数影响分析	刘云博 范 重 (489)
SRC 组合铰缝加固疲劳性能试验研究	罗 征 王银辉 袁伟东 胡晓佳 (495)
基于实测数据的港工混凝土结构环境荷载模型及耐久性分析	庞 龙 应宗权 范志宏 田俊峰 李全旺 (502)
预拌干混砂浆柔性抹灰施工工法	史雅慧 张继超 周海涛 孙芳芳 (508)
车载过程非平稳性对桥梁时变可靠度的影响	王 草 李连友 李全旺 (513)
基于简化弹性层状体系的船厂柔性地坪结构设计方法研究	吴毅彬 黄 延 瞿 革 (517)
考虑施工中人为错误的响应面法	谢 楠 赵 凯 陈威克 安宇骢 张 晖 (527)
非标准圆形斜拉索气动性能试验研究	闫煦东 樊利兵 刘庆宽 (533)
可简易更换橡胶垫板的橡胶板式支座节点的设计研究	于岩磊 (538)
基于风洞试验的高层建筑围护结构抗风设计	左太辉 李庆祥 黄啟明 (543)
大型船厂工业刚性地坪结构设计方法研究	吴毅彬 黄 延 瞿 革 (549)

9. 新材料、新能源、交叉学科及其他

高韧性水泥基复合材料单轴拉伸试验研究	蔡向荣 傅柏权 (556)
低热水泥混凝土温控特性及在地下工程适用性研究	段 寅 袁 藏 岳朝俊 (560)
基于 Info-gap 理论的结构损伤识别方法研究	刘 纲 李 坤 王 茜 (565)
火灾后中空夹层钢管混凝土柱偏压力学性能研究	刘 晓 鲍俊涛 王 兵 (571)
三本国际土木工程期刊热点论文调查	裴正南 张道博 王 新 许 镇 陆新征 (579)
高性能泡沫铝框架填充墙连接装置有限元模拟	沙 奔 李爱群 (589)
降阶模型在风力机叶片流固耦合计算中的应用研究	孙芳锦 张大明 梁 爽 (594)
裂缝宽度和挠度控制的 GFRP 筋混凝土梁的设计方法	涂建维 赵 权 (598)
新型板囊组合结构抗压变形分析	王广政 李志刚 (605)
钢纤维 TRC 薄板的常温及高温后弯曲力学性能	王激扬 沈玲华 徐世焱 (610)
建筑结构设计总信息的辅助确定方法	杨迪珊 石建光 何柳辰 (616)
盐水干湿循环作用下 TRC 加固 RC 受弯梁的研究	尹世平 叶 桃 贾 申 那明望 (622)
PVC 膜材料不同温度下的应力松弛性能预测	张营营 许珊珊 张其林 (629)

钢管混凝土叠合柱在电厂汽机房结构中的适用性探讨

陈锦阳¹, 邢国雷², *侯超¹, 王勇奉²

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 国核电力规划设计研究院, 北京 100084)

摘要: 电厂汽机房的空间结构不规则, 根据工程设计需要, 其柱结构在承载力、抗震、抗火设计等方面有其特殊的要求。钢管混凝土叠合柱充分利用钢和混凝土两种材料的特点及其组合作用, 结合钢筋混凝土梁形成钢管混凝土叠合结构, 可以更好地满足上述需求。本文给出了钢管混凝土叠合结构的设计原则, 并对比钢筋混凝土结构、钢结构和钢管混凝土叠合结构的特点。结合某实际工程, 从轴压比等角度出发, 分析了钢管混凝土叠合柱在电厂汽机房结构中的适用性。

关键词: 钢管混凝土叠合柱; 电厂汽机房; 设计原则; 结构体系; 适用性分析

ANALYSIS ON THE APPLICABILITY OF CONCRETE-ENCASED CFST COLUMN IN ELECTRICAL POWER PLANT

CHEN Jin-yang¹, XING Guo-lei², HOU Chao¹, WANG Yong-feng²

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Nuclear Power Planning, Design & Research Institute, Beijing 100084, China)

Abstract: Concrete-encased CFST columns take full advantage of the characteristics and the combined action of steel and concrete, which can meet the needs of electrical power plant structures in terms of bearing capacity, anti-seismic and fire resistance. This paper investigated the structural performance of concrete-encased CFST structures, which consist of concrete-encased CFST columns and reinforced concrete beams. Furthermore, comparisons of the reference reinforced concrete structure, steel structure and concrete-encased CFST structure were considered. Based on an actual construction, analysis on the applicability of concrete-encased CFST structure of electrical power plant was conducted.

Key words: concrete-encased CFST column; electrical power plant; design principle; structural system; applicability analysis

随着我国能源行业的发展, 电厂单机容量不断增大, 电厂汽机房的跨度、层高、荷载相应增加, 结构的地震作用随之增大, 这对厂房的结构形式和设计提出了更高的要求。由钢管混凝土叠合柱与钢筋混凝土梁组成的钢管混凝土叠合结构是一种新型的组合结构体系, 可以较好地满足上述需求。

本文分析了电厂汽机房的结构特点, 通过对比钢筋混凝土结构、钢结构和钢管混凝土叠合结构的适用性, 总结了钢管混凝土叠合结构在承载力、抗震、抗火等方面的优越性; 结合某实际工程, 分析钢管混凝土叠合结构对于电厂汽机房的适用性。

基金项目: 清华大学本科生学术研究基金(20141081231)

作者简介: 陈锦阳(1993—), 男, 江苏人, 博士生, 主要从事钢与混凝土组合结构研究;

邢国雷(1977—), 男, 河南人, 硕士, 主要从事电厂土建结构设计;

*侯超(1988—), 男, 山东人, 博士, 主要从事钢与混凝土组合结构研究(E-mail: houc05@foxmail.com);

王勇奉(1970—), 女, 山东人, 本科, 主要从事电厂土建结构设计。

1 电厂汽机房结构设计特点

由于工艺专业、设备布置、使用功能十分相似，电厂汽机房的结构设计有很多共同点：

- 1) 柱距较大，并布置吊车梁；布置中间层和运转层，层高较大；屋架跨度较大。
- 2) 运转层和中间层楼板开洞面积较大；运转层以下存在错层、短柱、斜梁，运转层以上为大空间。
- 3) 汽轮机沿结构纵向布置，通常设置辅助厂房并布置除氧间，以满足设备布置、运转需求。
- 4) 节点构造较复杂，需考虑管道布置；汽机厂房通常设计为双向不规则空间结构体系。

如图 1 所示，某典型主厂房^[1]采用半地下室结构，布置分为汽机房和除氧间。结构体系选择框排架结构，内部平台选择钢结构平台，屋架选择为钢屋架。为了增加结构的侧向刚度，需要合理布置斜撑。因此，电厂汽机房的结构设计特点多，对于结构体系提出了更高的要求。

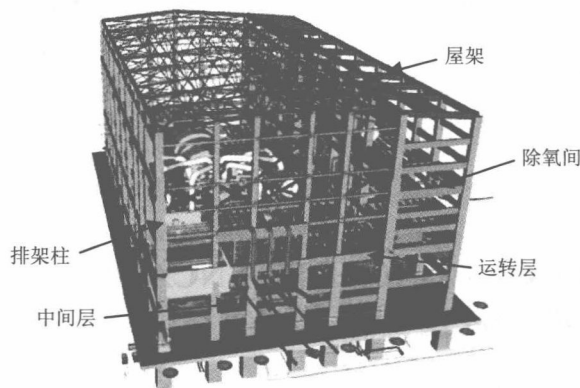


图 1 典型电厂汽机房结构示意图^[1]

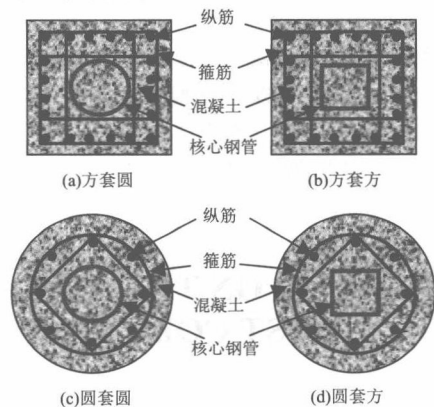


图 2 典型钢管混凝土叠合构件截面形式示意图

2 结构体系比选

2.1 钢管混凝土叠合结构

钢管混凝土叠合构件由内部钢管混凝土和外围钢筋混凝土叠合而成，如图 2 所示，目前方套圆截面构件(图 2(a))应用最为广泛。内部钢管的约束作用进一步提高了混凝土的承载力，核心混凝土和外围混凝土的双重约束作用有效控制了钢管局部屈曲，因此钢管混凝土叠合构件具有较好的组合作用和力学性能^[2]。

钢管混凝土叠合结构由钢管混凝土叠合柱与钢筋混凝土梁组成，是一种新型的组合结构体系，力学性能好、防火体系可靠、节点连接方便，正在越来越多地应用于工业厂房、高层建筑、桥梁工程之中^[3]。对于电厂汽机房，应用钢管混凝土叠合结构时，应遵循如下基本原则：

- 1) 设计时需要综合考虑强度、刚度、耐火性能、抗震性能等因素；
- 2) 合理设计截面几何尺寸，以满足电厂汽机房的设备布置、管道布置等工艺要求；
- 3) 为了保证构造合理、传力可靠，设计时应实现叠合柱内钢管通长布置，情况特殊时可采用喇叭口式变截面钢管设计；
- 4) 采用复合式钢管混凝土叠合柱脚设计，保证柱脚连接的可靠、有效。

2.2 典型结构体系特点

本文选取钢筋混凝土结构、钢结构和钢管混凝土叠合结构进行分析，三种结构体系的特点如下：钢筋混凝土结构抗火、经济性好，但是延性较差、施工复杂；钢结构延性好、施工方便，但是抗火性差、经济性一般；钢管混凝土叠合结构属于组合结构，具有承载力高、抗震、抗火等优点，施工具有可行性。

2.3 适用性分析

电厂汽机房注重结构的安全性，对结构体系的承载能力、抗震性能、抗火性能要求高，并兼顾施工性能和工程造价^[4]。目前的工程实际情况是部分电厂汽机房采用钢筋混凝土-钢结构（即结构地下部分采用钢筋混凝土结构，地上部分采用钢结构），因此，对钢筋混凝土结构、钢结构和钢管混凝土叠合结构进行适用性分析，具体情况见表 1。

表 1 三种结构体系电厂汽机房适用性对比分析

结构体系	钢筋混凝土结构	钢结构	钢管混凝土叠合结构
截面尺寸	较大	小	小
抗震性能	差(延性系数在 2-3)	优(延性系数在 4 以上)	优(轴压比在 0.3-0.6 的柱, 延性系数能保持在 4 以上 ^[5] , 类似钢结构)
防火性能	优(耐火极限 2-3h)	差(耐火极限 15min)	极优(耐火极限 3h 以上)
施工性能	较复杂(需要支模)	简便	一般(需支模, 钢管可作为临时支撑)
经济性	优(同等材料量情况)	一般	优(优于钢结构, 接近混凝土结构)
节点连接	施工难度大(节点处钢筋密集)	连接方便	施工可行、方便 (内、外环板方便工业化生产, 能够分散应力)

由表 1 可知, 钢管混凝土叠合结构在电厂汽机房中的适用性体现在以下几点:

1) 钢管混凝土叠合结构的竖向承载能力远大于相同尺寸的混凝土结构, 因此可以减小截面尺寸、节约使用空间、进一步满足电厂汽机房的工艺专业和设备布置需求, 并且降低工程造价。

2) 与混凝土结构相比, 钢管混凝土叠合结构通过优化截面尺寸, 减轻自重, 从而减小了地震力; 内部钢管混凝土提高了构件的延性和抗剪能力, 结构体系的抗震能力更好。

3) 防火性能方面, 钢管混凝土叠合结构通过截面内力重分布, 有效避免了外包混凝土在高温、高应力下可能发生的爆裂现象, 同时外包混凝土保护了内部钢管^[6]。因此, 与钢结构相比, 钢管混凝土叠合结构大大提高了结构的耐火极限, 进一步确保电厂汽机房的安全。

4) 钢管混凝土叠合结构施工可行, 通常先定位钢管并浇筑核心混凝土, 再在钢管外绑扎钢筋、叠浇外围混凝土; 通过环板、套筒等连接方式, 钢管混凝土叠合柱易于穿过框架节点, 梁柱节点区配筋构造简单、施工方便, 可以缩短工期。

因此, 对于电厂汽机房, 钢管混凝土叠合结构具有良好的工程适用性。本文结合某实际工程, 通过对比钢管混凝土叠合结构方案和传统的钢筋混凝土-钢结构方案, 进一步说明其适用性。

3 采用钢管混凝土叠合柱的电厂汽机房结构分析

图 3 所示为一种传统的钢筋混凝土-钢结构方案, 即地下部分为钢筋混凝土结构, 地上部分为钢排架结构。由于上部钢结构防火性能较差, 且整体方案不够经济, 因此本文提出一种钢管混凝土叠合结构方案, 即钢管混凝土叠合柱与钢筋混凝土梁组成的结构体系。

设计钢管混凝土叠合结构方案时, 保证了截面几何外边不超过钢筋混凝土-钢结构方案的相应柱、梁几何外边, 并且适度优化截面尺寸, 充分发挥材料性能的特点, 满足强度、刚度的要求, 因此上述两种结构体系方案具有一定的可比性。本文通过 PKPM 结构设计软件, 对内力、变形等特点进行了对比研究。

1) 数值分析模型的建立

PKPM 建模时考虑柱、梁, 为了较好模拟结构刚度, 建立楼板、忽略填充墙。斜撑提供了侧向刚度, 在分析层间位移角时不可忽略。建模时考虑了地下室侧壁刚度和土体的约束作用。

材料方面, 钢筋混凝土-钢结构的混凝土强度等级为 C40, 钢筋类别为 HRB335, 钢构件钢材为 Q345; 钢管混凝土叠合结构的柱外包混凝土强度等级为 C40, 内混凝土等级为 C60, 混凝土梁强度为 C40, 钢筋类别为 HRB400, 钢管材料为 Q345。混凝土容重为 25kN/m³, 钢材容重为 78 kN/m³。

2) 组合柱的设计轴压比

图 4 展示了主排架柱的轴压比设计值, 与混凝土柱相比, 叠合柱的轴压比降低了 5.88%-16.67%, 可见钢管混凝土叠合结构可以充分发挥叠合柱高承载力的优势, 在设计时可以适当优化截面尺寸, 以更好满足电厂汽机房的工艺需求。根据已有研究^[5], 叠合柱的轴压比在 0.3~0.6 之间时, 延性系数可以达到 4, 因此钢管混凝土叠合结构的延性更好, 抗震性能更优。

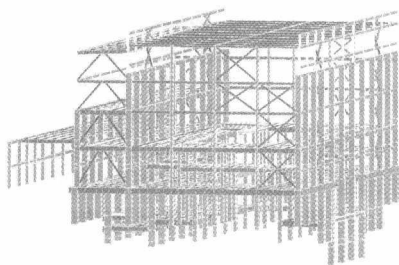


图3 某电厂汽机房结构体系示意图

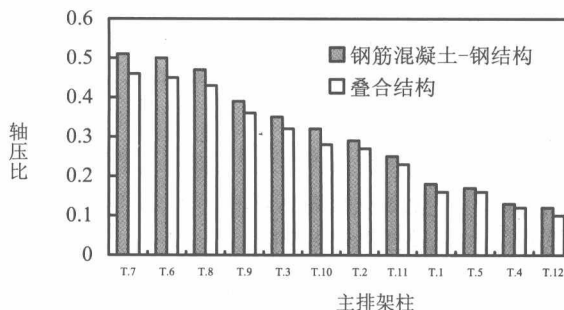


图4 两种结构体系主排架柱轴压比设计值对比图

3) 层间位移角

层间位移角反映了结构的侧向刚度，由于斜撑对结构体系的侧向刚度影响较大，本文考虑了结构未布置斜撑与布置斜撑两种情况，表2汇总了上述两种结构体系在地震作用下的最大层间位移角结果。

表2 两种结构体系的最大层间位移角

最大层间位移角	未布置斜撑	布置斜撑
钢筋混凝土-钢结构体系	X 向: 1/184	X 向: 1/572
	Y 向: 1/275	Y 向: 1/600
叠合结构体系	X 向: 1/228	X 向: 1/428
	Y 向: 1/186	Y 向: 1/472

通过对比未布置斜撑的情况可以发现，结构的最大层间位移角与柱的侧向刚度相关，但是没有等比例变化，原因可能是当柱的侧向刚度变小时，梁的作用相对增大，而楼板约束了梁的变形，进一步约束了整体结构的层间位移角。另外，钢管混凝土叠合结构体系将原本的钢梁换成了混凝土梁，梁的作用随之增大。

此外，由于优化钢管混凝土叠合柱的截面尺寸，钢管混凝土叠合结构的侧向刚度有限。根据表2可知，通过合理布置斜撑，可以提高结构侧向刚度，有效控制层间位移角。

钢管混凝土叠合结构充分发挥钢管和混凝土这两种材料的优势，在截面尺寸适度优化的前提下，有利于降低柱轴压比，提高结构延性，进一步保证汽机房的安全；侧向刚度方面，需要合理布置钢支撑来控制水平位移，满足汽机房的功能需求。

4 结论

本文分析了钢管混凝土叠合柱在电厂汽机房结构中的适用性，主要结论有以下几点：

- 1) 钢管混凝土叠合结构充分发挥钢和混凝土两种材料的特点，承载力高，抗震、防火性能好。
- 2) 结合某实际汽机房工程，通过PKPM软件建模分析，发现钢管混凝土叠合结构的竖向承载力高，优化钢管混凝土叠合柱截面尺寸后，与混凝土柱相比，叠合柱的轴压比仍降低5.88%~16.67%，并保证结构延性；通过合理布置斜撑，钢管混凝土叠合结构的层间位移角在X向和Y向分别降低了46.7%和60.6%。
- 3) 电厂汽机房在抗震、防火设计等方面有更多的要求；与混凝土结构和钢结构相比，钢管混凝土叠合结构可较好满足工程需求，并且经济性优，施工可行、方便，在电厂汽机房中应用有更好的适用性。

参考文献：

- [1] 林生逸. 基于性能的核电站常规岛主厂房结构抗震性能研究[D]. 华南理工大学, 2010.
- [2] Han LH, Li W, Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: Members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 100: 211—228.
- [3] 廖飞宇, 韩林海. 方形钢管混凝土叠合柱的力学性能研究[J]. 工程力学, 2010, (4):153—162.
- [4] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] 韩林海, 陶忠, 王文达. 现代组合结构和混合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [6] 侯舒兰. 均匀受火下钢管混凝土叠合柱耐火性能研究[D]. 清华大学, 2014.

多层装配式钢框架体系和研究

陈学森¹, *施 刚¹, 王 喆², 王 琼²

(1. 清华大学土木工程系, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 中国建筑标准设计研究院, 北京 100048)

摘 要: 多层装配式钢框架体系具有便于快速施工和规模化生产的特点, 是符合住宅产业化要求的结构形式。介绍了工程应用中某多层装配式钢框架体系, 结合已有研究分析了该体系在抗侧力性能、梁柱连接节点和楼板形式方面的主要特点。分析表明, 该多层装配式钢框架体系具有较强的抗侧承载力, 所采用的梁柱连接节点有较强的耗能能力, 所采用的预制楼板与钢梁之间的栓钉连接承载和变形性能良好。对于该体系在地震作用下结构的整体延性和耗能能力还需要进一步的分析。

关键词: 钢结构, 装配式框架, 抗侧力体系, 梁柱节点, 栓钉连接

ANALYSIS AND SYSTEM OF PREFABRICATED MULTI-STORY STEEL FRAMES

CHEN Xue-sen¹, SHI Gang¹, WANG Zhe², WANG Qiong²

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Department of Civil Engineering,

Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2. China Institute of Building Standard Design & Research, Beijing 100048, China)

Abstract: The prefabricated steel frames meet the requirements of residential building industrialization with the advantages in rapid construction and scale production. A system of prefabricated multi-story steel frame applied in practice is introduced, and the lateral force resisting performance, the configuration of the beam-to-column connections and the form of slabs are analyzed based on the existing research. According to the analysis, a satisfactory lateral resistance, as well as a large energy dissipation capacity can be developed with this system, and the stud connections between the precast slabs and the steel beams show a good shear resistance and a large deformability. The ductility and the energy dissipation capacity of the frame under earthquakes still need further investigation.

Key words: steel structure, prefabricated frame, lateral force resisting system, beam-to-column connection, stud connection.

预制装配式钢框架体系具有便于设计、工期较短、便于规模化生产等优点, 是适于多层产业化住宅的结构形式^[1]。但由于预制装配式结构的整体性一般较差, 在有抗震设防要求的地区应用预制装配式钢框架时需要确保其具有良好的抗侧力性能, 并且预制构件之间的连接应安全可靠。

本文针对实际工程中某多层装配式钢框架体系进行了研究。该体系的主要特点为: 柱采用冷弯方钢管柱, 梁采用工字型钢梁, 抗侧力体系采用框架-支撑体系, 当抗震设防烈度为 7 度及以下时采用中心交叉支撑, 当抗设防烈度为 8 度及以上时采用屈曲约束支撑; 梁柱连接采用半刚性端板连接; 楼板采用预留栓钉孔的预制混凝土楼板, 通过栓钉与钢梁连接。结合以上特点对该预制装配式钢框架体系的受力性能进行了分析和论证, 以期为该体系的推广应用提供依据。

作者简介: 陈学森(1990—), 男, 河北人, 博士生, 主要从事钢结构研究;

*施 刚(1977—), 男, 安徽人, 教授, 博士, 主要从事钢结构研究(E-mail: shigang@tsinghua.edu.cn);

王 喆(1976—), 男, 北京人, 教授级高工, 硕士, 主要从事钢结构设计和研究;

王 琼(1984—), 男, 河北人, 工程师, 博士, 主要从事钢结构设计和研究。

1 抗侧力体系

抗侧力体系是钢框架设计中的重要内容。纯框架体系通过梁、柱和刚接节点提供侧向刚度和水平承载力，抗侧能力相对较弱；在某一跨或几跨之间增加支撑后，抗侧体系变为支撑框架体系，能够显著增大结构的抗侧刚度和承载力^[2]。

针对所分析的钢框架所采用的抗侧力体系，对一榀采用不同支撑形式(包括无支撑、中心交叉支撑和屈曲约束支撑)的六层框架结构进行了不同地震烈度(7度、7.5度和8度)下的弹性时程计算^[3]，计算模型如图1所示。输入地震波为按烈度调幅后 EL-Centro 波。对每一烈度下不同支撑形式框架的位移时程和最大层间位移角进行了对比分析。分析结果表明，在7度区罕遇地震下各模型的最大层间位移角均小于1/50，但在7.5度区和8度区纯框架已不满足要求；7.5度区和8度区罕遇地震下中心支撑框架和屈曲约束支撑框架仍能满足最大层间位移角小于1/50的要求，但屈曲约束支撑框架的层间位移角明显小于中心支撑框架^[3]。基于该分析结果，在7度区应用中心支撑框架，在8度及以上地区使用屈曲约束支撑框架可以提供足够的抗侧承载力，保证结构的安全。

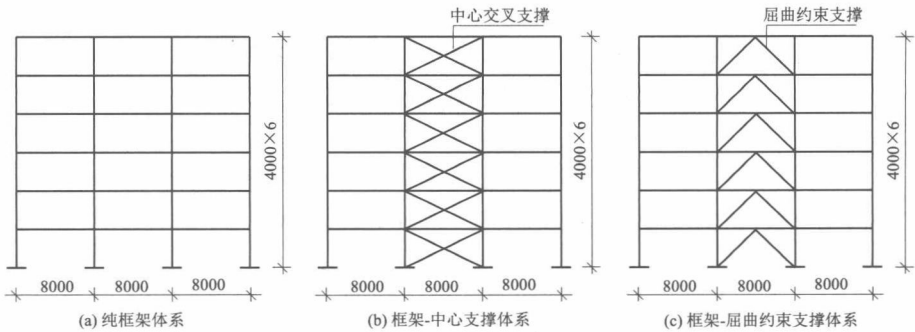


图1 钢框架计算模型示意图^[3]

2 梁柱节点

2.1 梁柱节点选型分析

端板连接节点通常不需要现场焊接，符合快速施工的要求，并且在合理设计的情况下能发展较大的转动刚度和承载力^[4]，是预制装配式钢框架中较为理想的节点形式。传统梁柱端板连接中梁和柱一般都采用工形截面，而所分析的框架体系中采用的是冷弯方钢管柱，因此在该体系中使用螺栓端板连接时有必要对其形式和性能进行分析。

综合考虑节点的制作难度和经济性，图2给出了4种可选的连接形式^[5]，通过对这4种连接形式的有限元分析发现：节点四的承载力和刚度都较大；节点二能发展较大的承载力，但初始刚度较节点四小；节点三和节点二的初始刚度相当，但节点三的承载力明显降低；节点一的承载力和刚度都较低。依照欧洲规范的节点分类标准，节点一属于铰接节点，其余节点则都属于半刚性节点^[6]。

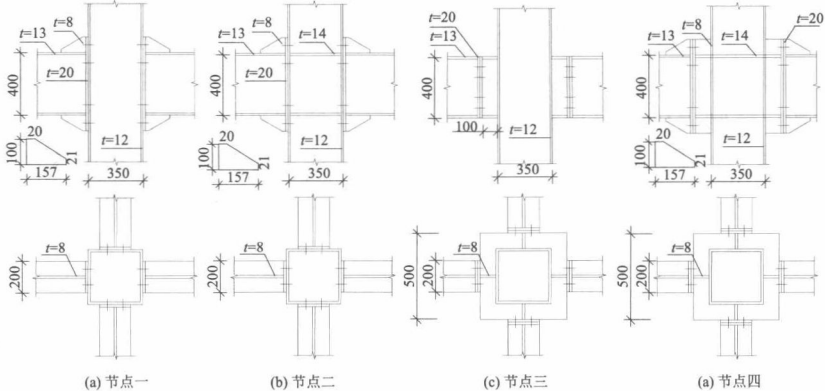


图2 梁柱节点备选形式^[5]

通过选型分析可以看出,节点四的刚度和承载力都较大,是性能最好的连接形式;但节点四需要在柱外设置外环板,导致其用钢量大、节点局部的楼板布置和混凝土浇筑难度大,并且会在一定程度上影响结构的使用功能;节点二初始刚度稍低于节点四,但也能得到较高的承载力,因此该体系最终采用节点二作为梁柱连接节点形式。

2.2 节点性能试验研究

为了对节点二的性能做进一步的分析,进行了4个十字形节点足尺试件的试验研究,分析了节点的单调承载性能、延性和耗能能力。结果表明,节点塑性转角的主要来源是柱翼缘的鼓曲,在循环荷载下的失效模式是柱翼缘开裂;不管是单调荷载还是循环荷载下,节点的最大承载力都已经超过了梁的全截面塑性屈服弯矩,表明节点二能发展较大的抗弯承载力;各试件的延性系数均达到5以上,能量耗散系数为5.35~5.74,表明节点二具有良好的延性和耗能能力。

3 预制楼板栓钉连接

3.1 预制楼板栓钉连接的特点

所分析的框架体系中采用的楼板为预制混凝土楼板。使用预制楼板可以节省模板、加快工期,更符合其快速安装的要求,并且在一定程度上可以避免现场湿作业从而减少施工过程中的环境污染。为了提高该体系中楼板的整体性能以及楼板和梁的组合效应,在预制楼板与钢梁之间采用栓钉抗剪连接。

对于栓钉抗剪连接件应用于普通现浇混凝土楼板时的性能国内外学者已经做过很多的研究,我国钢结构设计规范中也给出了栓钉连接抗剪承载力的验算方法^[7]。但是在采用预制混凝土楼板时,为了应用栓钉抗剪连接,预制楼板在栓钉对应位置需要预先留孔并在吊装完成后浇筑灌浆料补孔。由于后浇区域的存在,栓钉抗剪连接应用于预制混凝土楼板时的性能与应用于整体现浇混凝土楼板时的性能相比会存在一定的差异。目前国内外对于这种构造的栓钉连接也有一定的研究,但相对较少。

3.2 抗剪性能试验研究

为了研究预制楼板留孔后浇的施工方式对栓钉抗剪连接造成的影响,并对比现浇楼板与留孔后浇的预制楼板采用栓钉连接时抗剪性能的差异,进行了3个栓钉抗剪连接试件的推出试验研究,见图3。试验结果表明,留孔后浇的预制楼板栓钉连接与整体现浇楼板栓钉连接相比,滑移刚度较小,变形能力较强,抗剪承载力基本相同,可以满足规范规定的抗剪要求^[7]。

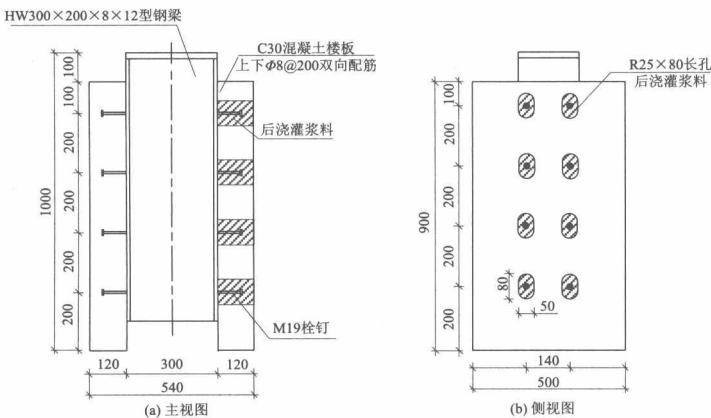


图3 推出试验试件构造示意图

4 下一步研究工作

以上介绍了所分析的多层装配式钢框架体系已开展的相关研究工作。然而现有的研究仍局限在对于单榀平面框架或局部连接构造的性能分析,尚无法对结构的整体性能进行评价;同时,对于平面框架的弹塑性时程分析仅计算了某一地震时程下结构的最大层间位移角,而在进行抗震设计时,框架的延性和耗能能力也是十分重要的性能指标^[8]。因此,为进一步验证该体系的有效性,并综合考察该体系的抗震性能,在

下一步的研究工作中计划开展足尺框架子结构的拟静力试验。

图 4 给出了框架子结构拟静力试验加载方案示意图。试验计划在清华大学结构试验室进行,选取的子结构为三层两跨(含走廊跨)的两榀框架,考虑混凝土楼板的影响。每层通过两个 MTS 千斤顶施加水平往复荷载。第三层的千斤顶通过位移控制加载,第一层和第二层的千斤顶则通过 MTS 系统控制千斤顶的出力值为第三层的 $1/3$ 和 $2/3$ 。

通过拟静力试验预期得到所分析的装配式钢框架体系的滞回性能、延性、耗能能力及失效模式,基于试验结果可以对该体系的抗震性能做进一步的分析和优化。

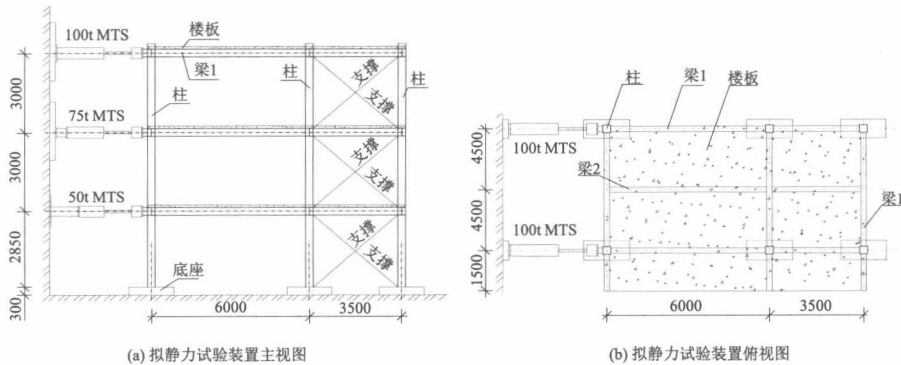


图 4 拟静力试验加载方案

5 结论

本文介绍了实际工程中某多层装配式钢框架体系的主要特点及研究情况,可以得到的主要结论如下。

(1) 所分析的多层装配式钢框架体系中采用框架-支撑体系抵抗水平荷载作用,在合理选用支撑形式的情况下可以得到较大的抗侧承载力;

(2) 该体系所采用的梁柱端板连接节点形式具有较强的抗弯承载力、延性和耗能能力,可以在抗震区的框架设计中予以应用。

(3) 该体系所采用的留孔后浇的预制楼板与钢梁之间通过栓钉连接,该连接的滑移刚度较小,变形能力较强,能够满足规范规定的抗剪承载力要求。

(4) 为进一步分析该体系在地震作用下的整体性能以及框架的延性和耗能能力,拟开展足尺框架子结构的拟静力试验研究,以为该体系在抗震区多层住宅建设中的推广应用提供依据。

参考文献:

- [1] Tam V W Y, Tam C M, Zeng S X, et al. Towards adoption of prefabrication in construction [J]. Building and environment, 2007, 42(10): 3642—3654.
- [2] 黄怡, 王元清, 石永久. 支撑布置方式对多高层钢结构抗震性能的影响分析[J]. 钢结构, 2006, 20(5): 41—44.
- [3] 王喆, 王琼, 陈学森, 等. 预制装配式钢框架抗侧力体系研究[C]//钢结构工程研究(十)-中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第 14 届(ISSF-2014)学术交流会暨教学研讨会论文集, 2014.
- [4] 施刚, 石永久, 王元清. 钢结构梁柱半刚性端板连接弯矩-转角全曲线计算方法[J]. 工程力学, 2006, 23(5): 67—73.
- [5] 陈学森, 施刚, 王喆, 等. 多层装配式钢框架梁柱节点选型分析[C]//第十四届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 2014.
- [6] BS EN 1993-1-8:2005, Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-8: Design of Joints [S]. CEN, 2005.
- [7] GB50017-2003, 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [8] GB50017-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

考虑随机缺陷的钢框架支撑结构 试验研究与有限元分析

*金 路, 刘 丹, 贾连光

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁, 沈阳 110168)

摘 要: 该文对一榀单跨双层钢框架—支撑结构进行了静力试验, 重点研究了初始几何缺陷对结构变形性能的影响, 由试验结果与有限元分析结果对比吻合较好, 证明了考虑随机初始缺陷有限元模型的正确性。采用有限元 ANSYS 软件对三跨三十二层钢框架—支撑结构的随机缺陷模型进行全过程高等分析, 采用蒙特卡罗法拉丁超立方抽样的技术模拟了框架随机初始缺陷的分布情况, 并对比多种国内外规范多种考虑初始缺陷的方法, 重点研究了结构和构件的变形性能。结果表明, 考虑随机初始几何缺陷的框架变形与无缺陷理想框架的柱顶侧移相差不大, 在高柔结构的高等分析中可不考虑。此外规范中假想力框架变形远远超出随机缺陷框架, 可知假想力计算方法过分夸大了缺陷的不利作用。

关键词: 高等分析; 钢框架—支撑结构; 试验研究; 变形性能; 随机初始几何缺陷;

EXPERIMENTAL STUDY AND FINITE ELEMENT ANALYSIS CONSIDERING RANDOM DISTRIBUTION OF INITIAL GEOMETRIC IMPERFECTIONS FOR BRACED STEEL FRAME

JIN Lu , LIU Dan , JIA Lian-guang

(School of civil engineering, Shenyang Jianzhu university, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: In this paper, the static test of a one-span two-story plane steel braced-frame structure has been carried out, and the influence of initial geometric imperfections on the deformation performance has been studied subsequently. The validity of the model considering the random initial imperfections is verified by the simulation using the Finite Element Method for this experiment. The advanced analysis on thirty-two stories three-span steel braced-frame structures with random imperfections have been carried out, using Monte Carlo method with Latin hypercube sampling technique to simulate the distribution of random initial imperfections. In addition, the comparing on methods of a variety of standards considering the initial imperfections at home and abroad have been done. The results showed that the defects simulation calculation values of lateral drifts are extremely close to those for ideal frames without any initial imperfections, the effects of initial imperfections could be neglected in advanced design for slender flexible structure. The specification of the frame designed by our standard is far beyond the framework of random defects because of the additional horizontal force exaggerated the detrimental effect of defects.

Key words: advanced analysis; steel braced-frame structure; experimental study; deformation performance; random initial imperfections;

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208314); 辽宁省教育厅项目(L2013234)

作者简介: *金 路(1982—), 女, 辽宁人, 副教授, 博士, 主要从事轻型和高层钢结构研究(E-mail: duobeibei@163.com);

刘 丹(1990—), 女, 黑龙江人, 硕士生, 主要从事钢结构高等分析研究(E-mail: 729966973@qq.com);

贾连光(1961—), 男, 辽宁人, 教授, 主要从事钢结构设计与计算理论研究(E-mail: syjlg@163.com).

采用钢结构高等分析直接缺陷法建模时,通常最不利的缺陷分布引入初始几何缺陷,这很可能导致各层单节柱的垂直度累计偏差超过结构整体垂直度的要求,对于高层结构超限更多,也不符合实际缺陷呈随机分布的趋势^{[1][2][3]}。为了得到钢框架-支撑结构考虑真实初始几何缺陷的变形性能以及同时验证采用 ANSYS 有限元模拟缺陷随机分布的可靠性,本文对一榀单跨双层的钢框架-支撑结构进行静力试验研究。采用蒙特卡罗法考虑了结构整体和单个构件的随机初始几何缺陷,并验证了模型的正确性。对 3 跨 32 层钢框架-支撑进行了大量的全过程高等分析,对比了采用多种规范方法考虑初始缺陷对结构变形性能的影响。

1 试验研究

1.1 试验概况

对一榀单跨两层的平面钢框架-十字支撑结构在静力荷载作用下进行试验研究。框架设计按 1:3 的缩尺比例,缩尺模型与原模型在各对应点处所受到荷载方向一致,荷载大小符合量纲原理,即:

$$S_p = p_m / p_p = A_m \sigma_m / (A_p \sigma_p) = S_i^2 S_\sigma \tag{1}$$

式中: S_σ 为应力相似常数,当 $S_\sigma = 1$ 表示缩尺模型的应力与原模型相同,荷载汇集后最终施加到顶层的荷载为 43.81kN。

表 1 试件尺寸
Table1 The frame size

高度/m	跨度/m	柱/mm	梁/mm	支撑/(直径 mm)
1.5	1.5	100×100×6×8	100×100×6×8	12

试件梁柱构件选用截面较小的热轧 H 型钢,钢号为 Q235B,泊松比为 0.3,材性试验测得屈服强度 309MPa。选取直径为 12mm 的 HPB300 钢筋作为框架的弱支撑。

本试验主要研究钢框架支撑结构在静力荷载作用下的受力和变形性能。在柱顶同时施加了竖向和水平集中荷载,竖向集中荷载施加在框架顶端的分配梁上,通过稳压机保证在试验过程中千斤顶施加的竖向荷载保持恒定不变,竖向荷载使用 30 吨液压推拉千斤顶施加。水平荷载通过由一台水平方向 25 吨 MTS 施加在框架顶层梁的中心,MTS 加载端头与框架顶层设计的连接板相连,加载装置如图 1 所示。

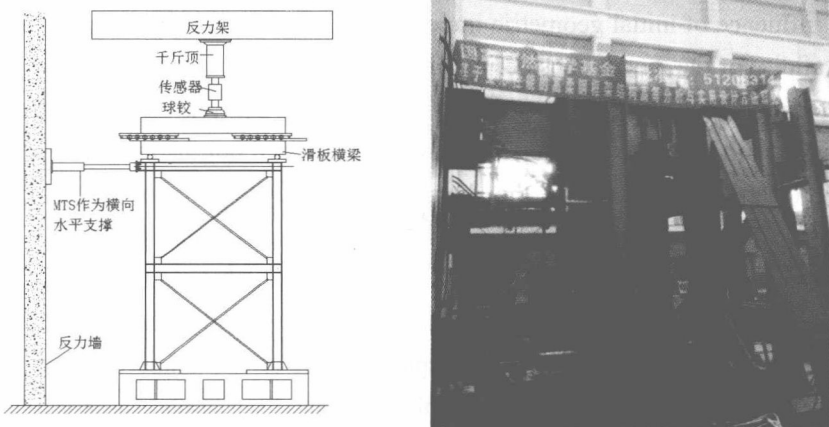


图 1 加载装置
Fig.1 Loading equipment

本次试验主要测量的内容为框架首层及顶层的水平位移以及梁柱受拉端和节点域的应变情况。为验证框架刚性支座是否可靠,在框架底座水平和竖直方向也布置了位移计。

试验前测量试件的真实初始几何缺陷,即各层柱子在平面内的初始弯曲 δ 和柱顶垂直度 Δ 以及各层梁的初始弯曲 ν ,不考虑支撑上的初始几何缺陷,见表 2。