

文章编号:1005-0523(2015)01-0001-08

异形截面巨型柱框架结构抗震研究与应用

曹万林,武海鹏,董宏英,张建伟

(北京工业大学建筑工程学院,北京 100124)

摘要:为适应超高层建筑平面设计需要,工程设计单位提出了一种异形截面巨型柱框架结构,并在多个超高层建筑巨型结构中应用,取得了良好效果。介绍了巨型结构体系及受力特点,结合多个大型复杂超高层建筑工程实际,分析了异形截面巨型柱框架结构的研究概况,包括在异形截面巨型柱框架结构抗震研究方面取得的进展,提出了该类结构发展的若干有待深化研究的技术问题。分析表明:“巨型柱框架-组合核心筒-伸臂桁架”结构体系,是一种受力性能优越的高效抗震体系;异形截面巨型柱框架结构,具有良好的抗震性能,异形截面巨型柱合理抗震构造是亟待深化研究的关键技术问题。

关键词:异形截面;钢-混凝土组合巨型柱;巨型框架结构;抗震性能;试验研究

中图分类号:TU375

文献标志码:A

我国已成为世界上高层和超高层建筑发展最快的国家。目前,已建成的世界十大高楼中,我国占据5座,已建成的世界14座超过400 m高楼中,我国占据了8座;在建的世界18座超过400 m高楼中,我国占据了11座;还有近60座超过400 m高楼正在规划筹备中,其中90%以上在中国。超高层建筑结构中,抗侧力体系设计是关键技术问题,随着建筑高度的不断增加,抗侧力体系不断发展,60年代末产生的巨型结构适应了超高层建筑发展趋势和特点,而巨型框架结构体系在21世纪得到了快速发展,越来越多的500 m级、600 m级超高层建筑采用该体系。因此,进行巨型框架结构体系的研究具有重要的理论意义和工程应用价值。

1 巨型结构与巨型框架结构

巨型结构的概念产生于上世纪60年代末,它是一种新型结构体系,由不同于通常梁柱概念的大型构件-巨型梁和巨型柱组成的主结构与常规结构构件组成的次结构共同工作的一种结构体系,按其受力体系可分为巨型框架结构、巨型桁架结构、巨型悬挂结构和巨型分离式筒体结构;按其材料可分为巨型钢结构、巨型钢筋混凝土结构、巨型钢骨钢筋混凝土结构及巨型钢-混凝土混合结构^[1]。

巨型框架结构体系是巨型结构中应用最多的结构形式^[2],它由作为主结构的巨型框架和作为次结构的楼层框架组成。巨型框架结构的巨型柱尺寸很大,有时可超过普通框架柱距的一倍,其形式上可以是实腹钢筋混凝土柱、钢骨混凝土柱、钢管混凝土组合柱、空间格构式桁架或筒体,通常布置在结构的四角和周边。巨型框架的巨型梁,较多的采用高度为一层至几层高的混凝土大梁或平面(空间)格构式桁架,通常每隔3~15层设置一道。巨型框架结构中主结构为主要抗侧力体系,次结构只起辅助作用和大震下的抗震耗能作用,并将承担的楼面荷载传递给主结构。巨型框架结构中也可设置支撑,形成巨型框架支撑结构。

巨型框架结构体系主次结构受力明确,布置灵活,可满足特殊的建筑形式和建筑功能要求。其最显著

收稿日期:2014-11-28

基金项目:国家自然科学基金(51178010)

作者简介:曹万林(1954—),男,教授,博士生导师。主持完成国家科技支撑重大和重点项目课题、国家自然科学基金项目、北京市科技计划重大项目等40余项。作为第一发明人,获国家发明专利50余项;作为第一完成人,获国家科技进步二等奖2项,省部级一、二等奖6项;发表学术论文近300篇,SCI、EI收录100余篇。在高层建筑钢-混凝土组合结构、再生混凝土结构、村镇建筑等相关领域取得了重大创新成果,研究成果在大量工程推广应用产生了显著的社会效益和经济效益。

的优点是可以满足大开洞的建筑功能要求,在巨型框架的下部若干层高度范围内,可以按需要设置大空间的无柱中庭、展览厅和多功能厅等。如日本的NEC大楼^[3]是典型的巨型框架结构,从底层到13层设置内部大庭院,从13层到15层设置一个横穿整个房屋的大开口,见图1。

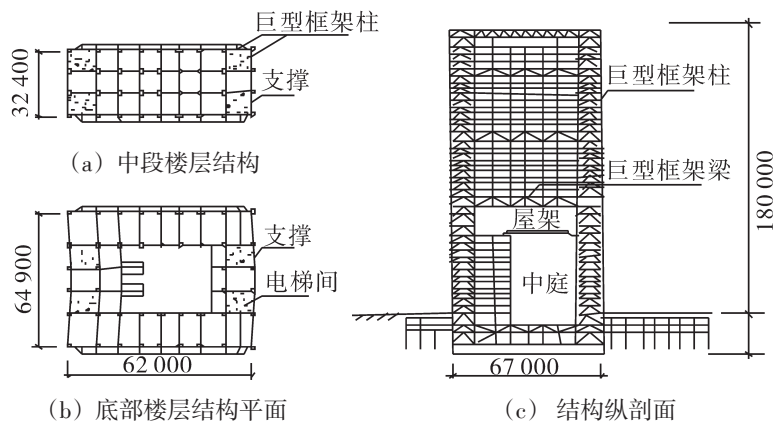


图1 日本NEC大楼巨型框架结构

Fig.1 Mega-frame structure of NEC Building in Japan

我国正在建设和已建成的代表性高楼大多采用了巨型柱框架结构体系。目前,我国正在建设三座主体结构高度近600 m的超高层建筑,包括深圳平安金融中心、上海中心大厦、天津117大厦,以及8度区建筑高度528 m的北京Z15大厦,它们均采用了巨型框架-核心筒结构作为抗侧力体系,见图2。

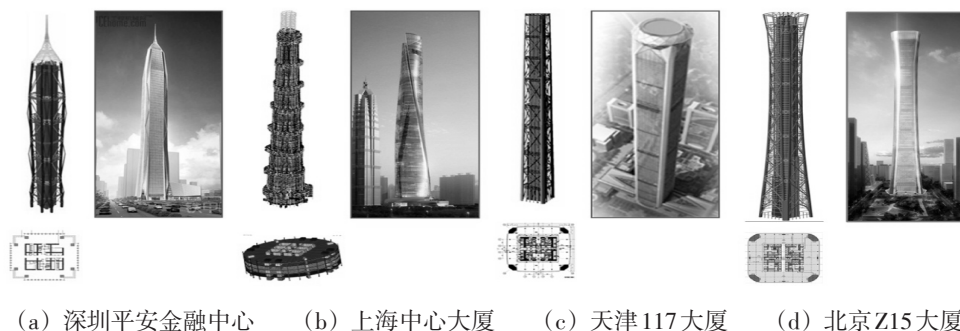


图2 我国在建巨型框架结构超高层建筑

Fig.2 Super high-rise building with mega-frame structure under construction

深圳平安金融中心^[4-5]位于深圳市福田区中心区,是一幢以甲级写字楼为主的综合性大型超高层建筑,总用地面积1.9万 m^2 ,总建筑面积46万 m^2 ,塔楼地上118层,塔尖高度660 m,结构高度597 m。塔楼结构采用了巨型钢斜撑外框架+劲性钢筋混凝土核心筒+伸臂桁架+空间带状桁架+角部V形撑体系,其中劲性钢筋混凝土核心筒、巨型钢斜撑外框架、伸臂桁架构成了塔楼结构的抗侧力体系。外框结构主要由8根巨柱、7道空间带状桁架、7道平面角桁架、巨型钢斜撑和角部V形撑及 layers 由带状桁架分层支托的框架柱梁组成。采用的8根型钢混凝土巨型柱截面近似为矩形,底部截面尺寸约为6.5×3.2 m,顶部逐渐缩小至2.0×2.0 m,底部截面见图3(a);巨型柱的钢材强度等级为Q345,钢板厚度为50~75 mm,含钢率由底部的8%减至顶部的4%,其内部混凝土强度等级由底部C70渐变至顶部C50。

上海中心大厦^[6-7]位于上海市浦东新区,也是一座以写字楼为主的综合性大型超高层建筑,包括商业、酒店、观光娱乐、会议中心和交易等五大功能区域。塔楼地上124层,建筑高度632 m,结构高度580 m,地上总面积38万 m^2 ,地下总面积14万 m^2 。塔楼结构为巨型框架-核心筒-伸臂桁架钢-混凝土混合结构体系。巨型框架由8根巨柱、4根角柱、6道外伸臂桁架和8道两层高空间环带桁架相连而成。其巨型柱为型钢混凝土柱,8根巨柱底部截面尺寸为5.3×3.7 m,顶部截面尺寸为2.4×1.9 m,底部截面见图3(b);4根角柱底部平面尺寸为5.5×2.4 m,顶部平面尺寸为4.5×1.2 m。巨型柱的混凝土强度等级由底部C70渐变至顶部C50。

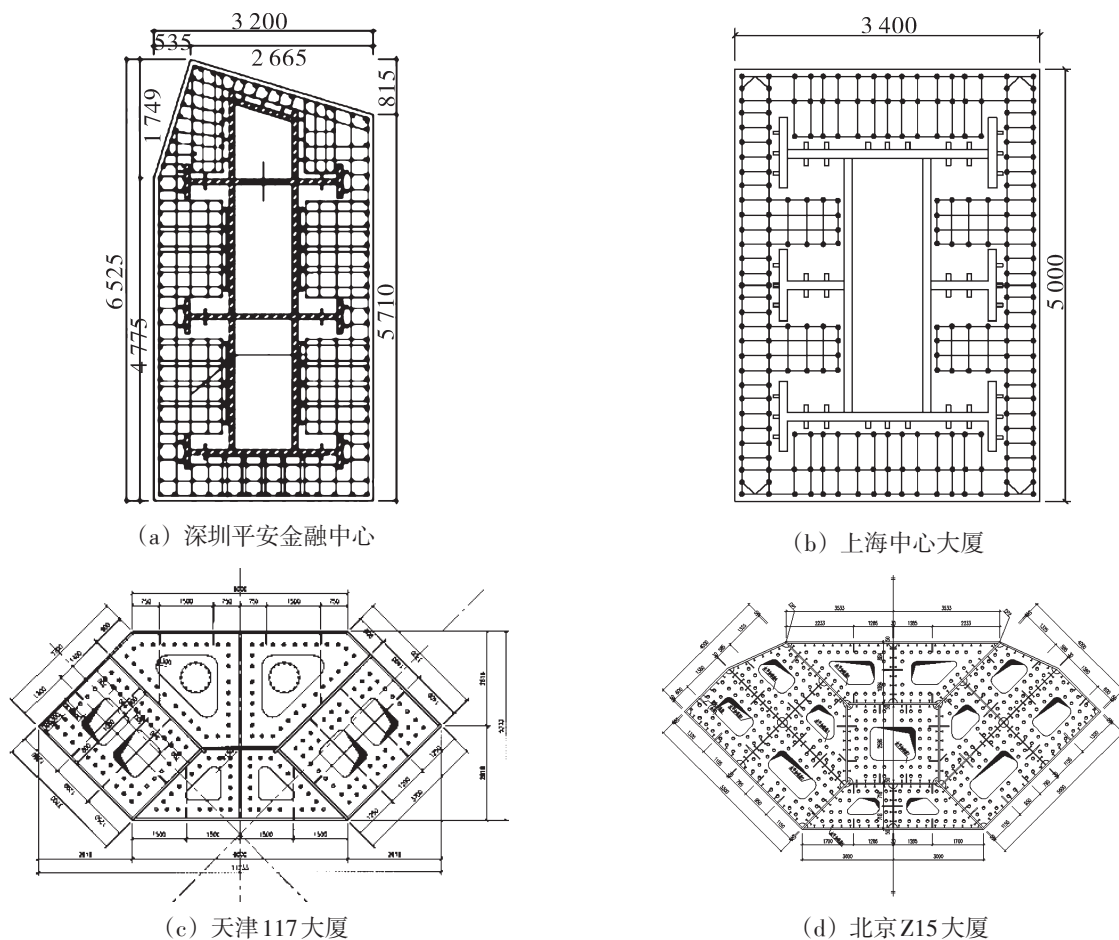


图3 巨型柱底部截面图

Fig.3 Bottom cross-sections of mega-columns

天津117大厦^[8]位于天津市滨海高新区中央商务区,是一座以甲级写字楼为主,并附有六星级豪华商务酒店及相关设施的大型超高层建筑。其建筑高度597 m,结构高度584 m,总建筑面积约37万 m^2 ,地下3层、地上117层,是7度(0.15 g)以上地震区全球最高建筑。该建筑采用巨型框架-核心筒结构作为主要抗侧力体系,巨型框架的主框架包括巨型桁架梁、巨型支撑和异形截面多腔钢管混凝土巨型柱。巨型支撑的最底层为人字撑,上部均为交叉撑,这种设计在满足建筑设计要求的同时最大程度的提高了结构整体抗侧刚度;4根多腔体钢管混凝土巨型柱位于建筑的四角,其截面尺寸在建筑底部最大,截面形状为六边形,截面外包尺寸为11.2 m $\times$ 5.2 m,横截面面积达45 m^2 ,沿高度向上逐渐减小,底部截面见图3(c)。

北京Z15大厦^[9]位于北京朝阳区CBD核心区,是一栋集甲级写字楼、高端商业及观光等功能于一身的混合建筑方案。其建筑高度528 m,地下7层,地上108层,地上总建筑面积35万 m^2 ,地下建筑面积约8.7万 m^2 。该建筑同样采用周边框筒-核心筒作为主要抗侧力体系,其中巨型柱、巨型斜撑、转换桁架组成了周边巨型框架筒体结构。底部巨型层采用了4根位于角部的多腔体钢管混凝土巨型柱,截面与天津117大厦巨型柱类似,第二巨型层开始每根巨型柱分叉成两根巨型柱,分叉后的8根巨型柱为矩形截面,底部巨型柱最大截面面积为60.8 m^2 ,含钢率为4.6%,混凝土强度等级为C70,截面见图3(d)。

因此,研究异形截面巨型柱框架结构,特别是异形截面巨型柱的抗震理论与方法,已成为重大工程亟需。

2 研究现状与分析

异形截面钢-混凝土组合柱满足了建筑平面设计的需求,近年得到了较快的发展。异形截面钢-混凝土组合柱,是为从截面形状上区分圆形、方形、矩形截面组合柱以及由它们嵌套形成的中空夹层钢-混凝土

柱而提出的(中空夹层钢管混凝土柱外形仍是圆形、方形或矩形),主要包括异形截面钢管混凝土柱和异形截面型钢混凝土柱,异形截面钢管混凝土柱、异形截面型钢混凝土柱又有不同的组合型式。

2.1 异形截面钢管混凝土柱

钢管混凝土充分利用钢管和混凝土两种材料在受力过程中的相互组合作用,充分发挥两种材料的优点,即不仅使混凝土的塑性和韧性性能大幅提高,而且可以避免或延缓钢管发生局部屈曲,从而使钢管混凝土具有承载力高、塑性韧性好、经济效果好、施工方便等优点。国内对圆形、方形混凝土进行了较多的研究,并出版了一系列的规范标准,但有时因建筑设计需要,出现了异形截面钢管混凝土,现行的规范标准不能很好的适用于该类钢管混凝土,为此学者进行了一定的研究。

异形截面柱钢管混凝土,其截面形状由圆形、方形、矩形、三角形拼合而成,其中的几种异形截面如图4所示。图4(a)~(c)所示的L形、T形、十字形截面多腔钢管混凝土柱,其截面均由方形和矩形拼合而成,国内外已有异形截面钢管混凝土柱的研究,主要针对这3种截面开展的;图4(d)所示的六边形截面多腔钢管混凝土柱,其截面外形由三角形、四边形和五边形拼合而成,天津117大厦采用了这种截面形式的巨型柱,北京Z15大厦底部巨型层也采用了类似截面形状的巨型柱。图4(e)所示的五边形截面多腔钢管混凝土柱,其截面由四边形拼合而成,大连国贸中心大厦采用了这种截面形式的巨型柱。图4(f)所示的乒乓球拍形截面多腔钢管混凝土柱,其截面外形由圆形和矩形拼合而成,北京财富中心三期办公楼采用了这种截面形式的多腔钢管混凝土柱。

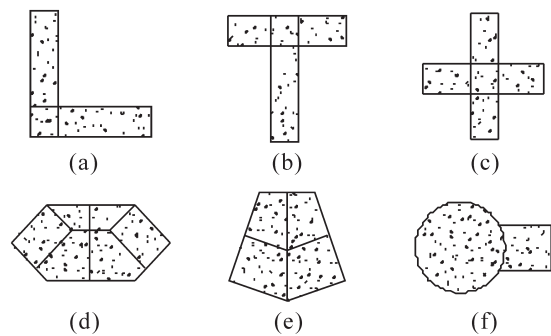


图4 异形截面钢管混凝土组合柱

Fig.4 Special-shaped CFST columns

1) T、L、十字形钢管混凝土柱。其主要包括普通T、L、十字形钢管混凝土柱、带约束拉杆的T、L、十字形钢管混凝土柱、带缀板的T、L、十字形钢管混凝土组合柱和由矩形(方形)钢管组合焊接而成的T、L、十字形钢管混凝土组合柱。吕西林等对6根L形截面、6根T形截面的普通钢管混凝土柱进行了低周反复荷载试验研究,考虑了轴压比、钢管壁厚、内填混凝土强度对其承载力和延性的影响^[10],并进一步对抗震模型与理论进行了深化研究^[11];林震宇等对7根L形钢管混凝土柱进行了抗震性能试验研究,其截面分为加劲和不加劲两种,分析了它们的滞回性能,研究表明,内部加劲肋能够明显延缓柱钢板的屈服^[12];左志亮、蔡健等对带约束拉杆的T形、L形、十字形钢管混凝土柱进行了系统的试验及理论研究,推导了承载力计算公式,建立了混凝土等效单轴本构关系,研究表明,约束拉杆的设置延缓了钢管局部屈曲,有助于提高钢管混凝土柱的承载力^[13-14];陈志华等对带缀板T形、L形、十字形形方钢管混凝土组合柱进行了较多的研究并进行了理论分析,研究表明,其短柱最终破坏形式为强度破坏,长柱的最终破坏形式为单肢首先失稳后导致整体失稳破坏,该类组合柱受力性能良好^[15-17];杜国锋、徐礼华等进行了矩形(方形)钢管组合焊接T形截面钢管混凝土短柱轴压性能和抗剪性能试验研究,研究表明,钢管混凝土短柱的两个组成部分能很好地协同工作,力学性能较好^[18-19];曾宇光、屠永清对多室式T形截面钢管混凝土柱压弯性能进行了研究,研究表明,该类柱具有良好的压弯性能^[20]。

2) 异形多边形钢管混凝土柱。除本文课题组的相关研究外,国内外已有的相关文献未见对该类特定工程中的异形多边形钢管混凝土柱的研究。笔者进行了12个六边形多腔钢管混凝土巨型柱、10个五边形多腔钢管混凝土巨型柱以及6个乒乓球拍截面多腔钢管混凝土柱模型试件的低周反复荷载试验研究,考虑了轴压比、剪跨比、分腔构造、腔体内配筋、底部加强构造措施等因素对试件抗震性能的影响;6个六边形多腔钢管混凝土巨型柱、6个五边形多腔钢管混凝土巨型柱模型试件的受压性能试验研究,考虑了分腔构造、混凝土强度等级、腔体内配筋、受力形式等因素对试件受压性能的影响;研究表明,合理设计的该类异形多边形钢管

模型和恢复力模型等方面理论研究^[25-26];李哲、秦浩等对L形和T形截面型钢混凝土柱进行了试验研究,考虑了剪跨比、轴压比、体积配箍率及配骨率等参数对其抗剪承载力和位移延性的影响,研究表明,配置钢骨可显著提高其抗剪承载力和延性,该类型钢混凝土柱可应用于地震区高层建筑^[27-28];秦岭对钢骨混凝土不对称十字形截面柱正截面承载力进行了试验研究并进行了理论分析,研究表明,与普通钢筋混凝土异形截面柱相比,其极限承载力明显提高^[29]。已有异形截面型钢混凝土组合柱抗震研究,主要涉及L形、T形和十字形截面。

笔者课题组对乒乓球拍截面型钢混凝土异形截面柱进行了试验研究和理论分析^[30-32],部分试件的设计图、加载装置示意图、破坏形态、滞回曲线见图6,研究表明,该类异形截面柱经合理抗震设计后,仍可具有良好的抗震性能,其中截面形式、钢骨和钢筋的配置是主要影响因素。

2.3 异形截面巨型柱框架结构

异形截面巨型柱框架是一种高效的抗侧力结构体系,有关其抗震性能的研究主要包括整体模型的模拟地震振动台试验、弹塑性有限元动力时程分析及其子结构模型的低周反复荷载试验等。针对高层建筑,特别是近年来出现的500 m级、600 m级甚至更高的超高层建筑,学者进行了较多的研究。

在试验研究方面,蒋欢军等完成了上海中心大厦结构模型振动台试验研究^[7];邹昀、吕西林等进行了上海环球金融中心结构模型等模拟地震振动台试验研究与分析^[33];何国松、方鄂华进行了钢筋混凝土巨型框架节点性能试验研究^[34];惠卓进行了巨型框架结构的抗震性能试验和理论分析^[35];张宇峰等进行了巨型框架结构的振动台试验研究^[36];Lan Zongjian等对巨型框架结构的耗能减震性能进行了试验研究^[37]。

笔者课题组对六边形多腔钢管混凝土巨型框架结构模型进行了低周反复荷载试验研究^[38],试件设计图、实验现场照片、破坏形态及“荷载-位移”曲线见图7,研究表明,该异形截面多腔钢管混凝土巨型框架结构,实现了支撑作为第一道防线首先屈服,之后巨型框架的桁架梁端上下弦杆屈服的“强柱-弱梁”延性屈服机制,工作性能较为稳定,具有良好的抗震耗能性能。

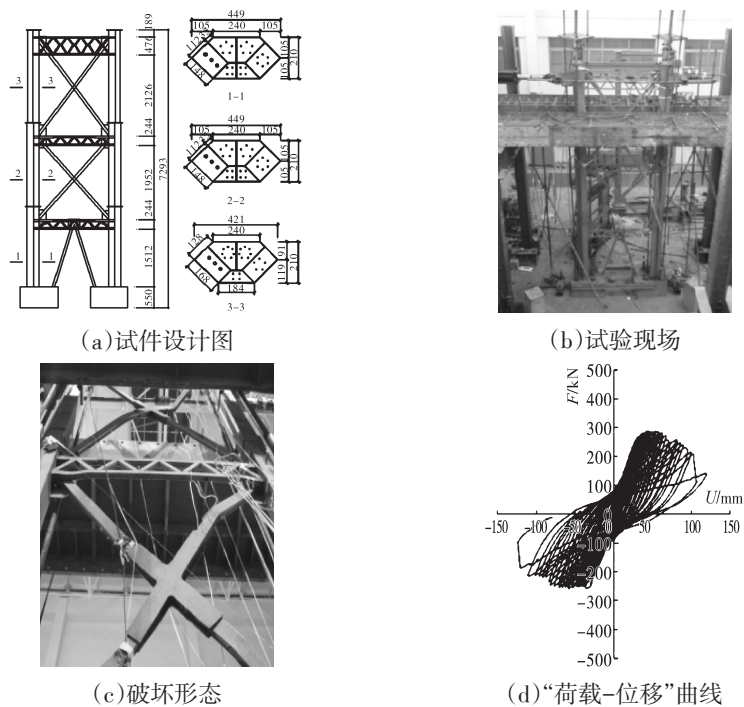


图7 巨型框架结构抗震性能试验

Fig.7 Mega-frame structure anti-seismic test

在理论研究方面,Takayuki等对日本千叶县NEC大厦巨型框架结构体系的抗震设计方法进行了研究^[39];

蓝宗建等对钢筋混凝土巨型框架结构的多功能减震作用进行了地震反应分析^[40];邹宏德等采用能量方法对钢筋混凝土巨型框架多功能减震结构地震反应进行了分析^[41];龚耀清等进行了巨型框架-核心筒结构体系三维半解析分析模型研究,并对其共振相应进行了分析^[42];沈霄鹤等研究了巨型钢框架结构的失效模式^[43];常磊等对巨型框架组合结构三维弹塑性地震反应进行了分析^[44];徐国林、张令心研究了巨型钢框架结构的三维非线性分析模型^[45];邓雪松等分析了巨型框架-耗能支撑结构的减震性能^[46];朱芳振等研究了巨型框架-支撑结构的非线性地震反应^[47];淦克丽等进行了巨型框架减振结构的动力时程分析^[48];苏健等对双伸臂巨型结构整体稳定性进行了分析^[49];张文元等对若干典型巨型钢框架结构的罕遇地震反应进行了理论研究,并对空间受力巨型钢柱滞回性能的影响因素进行了分析^[50-51]。

3 结论与展望

“巨型框架-核心筒-伸臂桁架”结构体系是一种受力性能优越的高效抗震体系;异形截面巨型柱框架结构,具有良好的抗震性能,但随着建筑高度的不断增加,对其受力性能也提出了更高的要求。笔者认为尚有以下问题有待深入研究与完善:① 异形截面巨型柱截面形式多样,目前的研究限于T、L、十字截面形状或特定工程中的截面形状及构造研究,对于广泛截面形状及构造的巨型柱在不同工况下的性能研究仍有待深入;② 异形截面巨型柱的理论计算方法仍需结合更多的模型试验深化研究;③ 异形截面巨型柱框架结构的性能和优化设计有待结合试验与理论方法深化研究。

参考文献:

- [1] 李君,张耀春. 超高层结构的新体系-巨型结构[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1997,30(6):21-27.
- [2] 张耀春,张文元. 超高层巨型钢结构体系的研究与应用[J]. 建筑钢结构进展,2005,7(2):19-26.
- [3] 刘大海,杨翠如. 高层建筑结构方案优选[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1996.
- [4] 傅学怡,吴国勤,黄用军,等. 平安金融中心结构设计研究综述[J]. 建筑结构,2012,42(04):21-27.
- [5] 傅学怡,余卫江,孙璨,等. 深圳平安金融中心重力荷载作用下长期变形分析与控制[J]. 建筑结构学报,2014,35(1):41-47.
- [6] 丁洁民,巢斯,赵昕,等. 上海中心大厦结构分析中若干关键问题[J]. 建筑结构学报,2010,31(6):122-131.
- [7] 蒋欢军,和留生,吕西林,等. 上海中心大厦抗震性能分析和振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(11):55-63.
- [8] 刘鹏,殷超,李旭宇,等. 天津高银 117 大厦结构体系设计研究[J]. 建筑结构,2012,42(3):1-9+19.
- [9] 设计团队. 北京朝阳区 CBD 核心区 Z15 地块项目超限高层建筑工程抗震设防专项报告[R]. 北京:北京中信和业投资有限公司,2013.
- [10] 王丹,吕西林. T 形、L 形钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2005,26(4):39-44.
- [11] 李学平,吕西林. T、L 形钢管混凝土柱的本构模型及非线性分析研究[J]. 建筑钢结构进展,2008,10(4):56-62.
- [12] 林震宇,沈祖炎,罗全辉. 反复荷载作用下 L 形钢管混凝土柱滞回性能研究[J]. 建筑钢结构进展,2009,1(2):12-17.
- [13] 左志亮,蔡健,朱昌宏. 带约束拉杆 L 形钢管混凝土短柱的偏压承载力[J]. 工程力学,2010,27(7):161-167,185.
- [14] 孙刚,蔡健. 带约束拉杆 L 形截面钢管混凝土的本构关系[J]. 工程力学,2008,25(10):173-179.
- [15] 乔景. T 形方钢管混凝土组合异形柱轴心受压承载力研究[D]. 天津:天津大学,2005.
- [16] 荣彬. 方钢管混凝土柱和 L 形截面方钢管混凝土组合异形柱研究[D]. 天津:天津大学,2005.
- [17] 李振宇. 十字形截面方钢管混凝土组合异形柱承载力研究[D]. 天津:天津大学,2005.
- [18] 徐礼华,杜国锋,徐浩然,等. 组合 T 形截面钢管混凝土构件抗剪性能试验研究[J]. 工程力学,2009,26(12):142-149.
- [19] 徐礼华,杜国锋,温芳,等. 组合 T 形截面钢管混凝土柱正截面受压承载力试验研究[J]. 土木工程学报,2009,42(6):14-21.
- [20] 曾宇光,屠永清. 多室式钢管混凝土 T 形柱压弯性能分析[J]. 钢结构,2010,25(5):8-11.
- [21] 曹万林,彭斌,王智慧,等. 底部加强型多腔钢管混凝土巨型柱抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2012,32(2):120-129.
- [22] 彭斌,曹万林,王智慧,等. 不同方向水平力下多腔钢管混凝土巨型柱抗震性能研究[J]. 世界地震工程,2012,28(2):90-97.
- [23] 曹万林,武海鹏,王立长,等. 不同加载方向下五边形截面钢管混凝土巨型柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(1):70-76.
- [24] 曹万林,王智慧,彭斌,等. 腔内带钢筋笼多腔钢管混凝土巨型柱轴压性能试验研究[J]. 结构工程师,2012,28(3):135-140.
- [25] 陈宗平,薛建阳,苏益声,等. 反复荷载作用下型钢混凝土 L 形柱的受力性能[J]. 地震工程与工程振动,2009,29(6):121-129.
- [26] 赵鸿铁,薛建阳,陈宗平. 型钢混凝土异形柱非线性分析[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2008,40(3):54-58.

- [27] 李哲,张小锋,郭增玉,等. 钢筋混凝土T形截面短柱力学性能的试验研究[J]. 土木工程学报,2007,40(1):1-5.
- [28] 秦浩,李哲,陈绍基,等. L形截面钢筋混凝土柱非线性全过程分析[J]. 水利与建筑工程学报,2009,7(2):26-29.
- [29] 秦岭. 钢筋混凝土异形柱-不对称十字形截面正截面承载力试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2005.
- [30] 曹万林,樊太,张维斌,等. 钢筋混凝土异形截面柱抗震性能试验及分析[J]. 土木工程学报,2007,40(1):20-27.
- [31] 曹万林,樊太,张维斌,等. 异形截面钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 世界地震工程. 2004,20(2):64-68.
- [32] 樊太,曹万林,张维斌. 钢筋混凝土异形柱正截面承载力及延性计算分析[J]. 世界地震工程. 2004,20(1):133-137.
- [33] 邹响,吕西林,钱江. 上海环球金融中心大厦结构抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2006, 27(6):74-80,107.
- [34] 何国松,方鄂华.住宅型钢筋混凝土巨型框架节点试验研究[J]. 土木工程学报,2000,33(2):13-18.
- [35] 惠卓. 巨型框架结构的计算理论及抗震性能的研究[D]. 南京: 东南大学, 1998.
- [36] 张宇峰. 巨型框架结构的抗震性能和抗震设计方法的研究[D]. 南京: 东南大学, 2002.
- [37] LAN ZONGJIAN, TIAN YUJI, FANG LIANG et al. An experimental study on seismic responses of multifunctional vibration-absorption reinforced concrete mega frame structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004,33(1):1-14.
- [38] 彭斌,曹万林,王智慧,等. 多腔钢管混凝土柱巨型框架抗震性能试验研究[J]. 结构工程师,2012,28(3):128-134.
- [39] TAKAYUKI ET AL. Seismic design of high-rise building with mega frame [J]. Seism Eng Res Pract, 1989:347-357.
- [40] 蓝宗建,邹宏德,梁书亭,等. 钢筋混凝土巨型框架多功能减振结构地震反应分析[J]. 建筑结构学报,2001,22(4):77-89.
- [41] 邹宏德,蓝宗建,梁书亭,等. 钢筋混凝土巨型框架多功能减振结构地震能量反应分析[J]. 工程力学,2001,18(S):231-235.
- [42] 龚耀清,张家彬. 超高层建筑巨型框架-核心筒结构体系的三维半解析分析模型及其应用[J]. 工程力学,2008,25(S2): 117-122.
- [43] 沈霄鹤,欧进萍. 超高层巨型钢框架结构失效模式分析[J]. 东南大学学报,2009,39(S2):144-150.
- [44] 常磊,叶献国,潘文军. 超高层巨型框架组合结构三维弹塑性地震反应分析[J]. 土木工程学报,2010,43(S):61-65.
- [45] 徐国林,张令心. 巨型钢框架结构的三维非线性分析模型[J]. 世界地震工程. 2009,25(1):102-106.
- [46] 邓雪松,王廷彦,陈麟,等. 巨型框架-耗能支撑结构的减震性能分析[J]. 地震工程与工程振动,2008,28(5):146-150.
- [47] 朱芳振,王廷彦,邓雪松,等. 巨型框架-支撑结构的非线性地震反应分析[J]. 世界地震工程,2008,24(9):59-62.
- [48] 涂克丽,盛宏玉,叶献国. 巨型框架减振结构的动力时程分析[J]. 合肥工业大学学报,2010,33(1):81-84.
- [49] 苏健,童根树. 双伸臂巨型结构整体稳定性分析[J]. 建筑结构学报,2010,31(12):32-39.
- [50] 张文元,张耀春. 若干典型巨型钢框架结构的罕遇地震反应分析[J]. 世界地震工程,2000,19(4):93-98.
- [51] 张文元,张耀春. 空间受力巨型钢柱滞回性能的影响因素分析[J]. 建筑结构,2007,37(1):4-7,74.

Research and Application of Mega-frame Structure with Special-Shaped Columns

Cao Wanlin, Wu Haipeng, Dong Hongying, Zhang Jianwei

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to meet the graphic design requirement of high-rise buildings, the design institute proposes the mega-frame structure with special-shaped columns which has been applied to several super high-rise buildings and achieved a good result. In this paper, the concept of the mega structure system and its mechanical characteristics are introduced; by the combination of several large and complex super high-rise buildings, the research situation of the mega-frame structure with the special-shaped columns including the progress made in seismic aspect by the research group is analyzed; several technical issues needing further researching of the mega-frame structure are proposed. Research shows that the mega-frame-composite core walls-outrigger truss structure system is an effective and anti-seismic system which has the perfect mechanical property and the mega-frame structure with the special-shaped columns possesses good anti-seismic performance, so how to achieve the reasonable structure of special-shaped mega columns is the key technical issue for further study.

Key words: special-shaped section; steel-concrete composite mega columns; mega-frame structure; anti-seismic performance; experimental research

(责任编辑 王建华)