



我国高层建筑钢-混凝土混合结构发展与展望

汪大绥, 周建龙

(华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘要:高层建筑钢-混凝土混合结构体系兼有钢结构和混凝土结构的优点。近年来,混合结构在我国高层及超高层建筑中得到了广泛的应用,但国内外对混合结构体系的抗震性能及设计中的一些关键技术问题尚有争议。对高层混合结构常用结构体系及工程应用实例等进行梳理,对混合结构的整体抗震性能、延性、构件设计、节点连接的可靠性、竖向变形差异、施工过程模拟、弹塑性时程分析、阻尼比等关键技术进行了讨论,并提出今后高层混合结构发展需进一步开展的研究工作。

关键词:混合结构体系; 结构体系; 设计关键技术; 工程应用实例

中图分类号:TU973.14 文献标志码:A

Development and prospect of hybrid high-rise building structures in China

WANG Dasui, ZHOU Jianlong

(East China Architectural Design & Research Institute Co. Ltd, Shanghai 200002, China)

Abstract: Hybrid high-rise building structure has both the advantages of steel structure and concrete structure. Steel and concrete hybrid structures are widely used in China in recent years. However, different views exist related to the seismic behavior of hybrid structures and key design methodologies. This paper attempts to summarize various hybrid structure systems along with introduction of typical engineering examples. Key technical issues are discussed, including seismic behavior, ductility design, member design, the reliability of connections, difference in vertical deformation, construction analysis, nonlinear time-history analysis and damping ratio. Future research needs are also suggested.

Keywords: hybrid structure; structure system; key technology; engineering cases

基金项目:上海科技人才计划(08XD14223)。

作者简介:汪大绥(1941—),男,江西乐平人,国家设计大师。E-mail:dasui_wang@ecadi.com

收稿日期:2010年3月

0 前言

混合结构体系是近年来在国内迅速发展起来的一种新型结构体系,主要用于高层及超高层建筑结构。与混凝土结构相比,其在降低结构自重、减少结构断面尺寸、改善结构受力性能、加快施工进度等方面具有明显的优势;与纯钢结构相比,其又具有防火性能好、综合用量小、风荷载作用舒适度好的特点。钢-混凝土混合结构在国外的应用始于1972年,此后的近20年中,美国、日本及法国等相继建成了一批混合结构建筑,但整体数量偏少。混合结构体系在国内最早应用是80年代的静安希尔顿饭店工程;90年代建成了一批高度150~200m的建筑,如上海森茂大厦、国际航运大厦、世界金融大厦、新金桥大厦、深圳发展中心、北京京广中心等;2000年以后一批高度超过300m的高层建筑也采用或部分采用了混合结构,如已建或在建的金茂大厦、上海环球金融中心、广州西塔、上海中心大厦、天津117大厦、平安国际金融中心、北京国贸三期等超高层建筑均采用了钢-混凝土混合结构。90年代以后,混合结构在世界范围得到了广泛的应用,根据世界高层建筑与城市住宅委员会发布的世界上最高的100幢建筑名单中,钢-混凝土混合结构有32幢,并且其比例还有不断上升的趋势,加强该结构体系的研究及工程经验的总结使其健康的发展,显得尤为重要。

1 混合结构国内外研究现状分析

国外在震区采用钢-混凝土混合结构的建筑数量较少,并对这种结构体系在震区应用尚有分歧,因此也缺乏相应混合结构抗震震害调整资料和对该结构抗震性能的系统研究。1991年底,中国建筑科学研究院进行了1:20的23层钢框架-钢筋混凝土筒体混合结构模型试验研究^[1]。研究表明:该类混合结构具有钢结构和混凝土结构两者的优点,既具有优于钢结构的刚度特性,又具有优于混凝土结构的变形性能,其整体性能更优于钢结构和混凝土结构。根据其试验结果,该结构可以应用于8度区。

1999年,同济大学在模拟地震振动台上完成了一个1:20的25层钢-混凝土混合结构的模拟试验^[2],通过对试验破坏现象的观测和试验数据的分析得出结论,只要按照现行建筑结构抗震设计规范进行合理设计,混凝土结构及钢结构7度设防要求设计的混合结构,能满足“小震不坏,中震可修,大震不倒”的要求。

2004年底,中国建筑科学院完成了一个1:10的

30层钢-混凝土混合结构模型试验^[3],26个组合剪力墙高轴压比抗剪性能试验,27个高含钢率型钢混凝土组合柱受力性能试验。完成了型钢混凝土框架-核心筒结构的抗震性能及设计与施工关键技术和型钢混凝土框架-核心筒结构的抗震性能及设计方法研究,多种组合剪力墙和高含钢率组合柱的抗震性能研究,混合结构施工方法研究,提出了钢-混凝土混合结构设计建议。

此外,混合结构工程也进行了振动台试验,为深入分析该种结构的抗震性能提供了宝贵的资料,对混合结构进行弹塑性分析也提供了可对比数据,《JGJ 3—2002《高层建筑混凝土结构技术规程》^[4]和《DG/TJ 08-15—2004《高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程》^[5]对混合结构的设计提出了具体指导要求。尽管上述文献对我国混合结构的发展提供了技术支持,但由于国内外对混合结构的抗震性能仍缺少全面、系统的研究,对混合结构的延性、耗能及地震作用下构件的协同工作能力、破坏机制和倒塌过程尚未完全了解,有必要对该种结构开展进一步的研究。

2 混合结构体系及工程应用

混合结构是指由钢框架或型钢混凝土框架与钢筋混凝土核心筒组成的框架-筒体结构,以及由钢或型钢混凝土外筒与钢筋混凝土核心筒组成的筒中筒结构。框架-筒体结构中的型钢混凝土框架可以是型钢混凝土梁与型钢混凝土柱(钢管混凝土柱)组成的框架,也可以是钢梁与型钢混凝土柱(钢管混凝土柱)组成的框架,筒中筒结构体系中的外筒可以是框筒、桁架筒或交叉网格筒。为减少柱截面尺寸或增加延性而在混凝土柱中设置型钢,而框架梁仍为混凝土梁时,该体系不宜视为混合结构。此外对于体系中局部构件(如框支梁柱)采用型钢梁柱(型钢混凝土梁柱),局部采用钢板混凝土核心筒,可视为构件层面的组合,也不应视为混合结构体系。我国高层建筑混合结构体系主要有框架-筒体结构体系、巨型柱框架-核心筒结构体系、筒中筒结构体系以及其它新型结构体系。

2.1 框架-核心筒结构体系

框架-核心筒结构体系是框架剪力墙结构的一种特例,具有协同工作的特点,其中核心筒承担了大部分的剪力,是抗震(抗风)的第一道防线,而外周的框架作为第二道防线对确保结构的整体性并承受竖向荷载也起着重要的作用。外框架柱间距可达8~10m,甚至更大,布置方式较为灵活,在建筑高度较大时,可在外框架与核心筒之间设置伸臂桁架,如需进一步提高整体结构的抗侧力效率,外围框架宜布置

环带桁架。设置伸臂桁架后的结构体系,其建造高度可达400m以上,在超高层建筑中应用较为广泛,比较典型的工程实例有:南京绿地紫峰大厦(图1)、马来西亚双塔大厦、深圳地王大厦等。

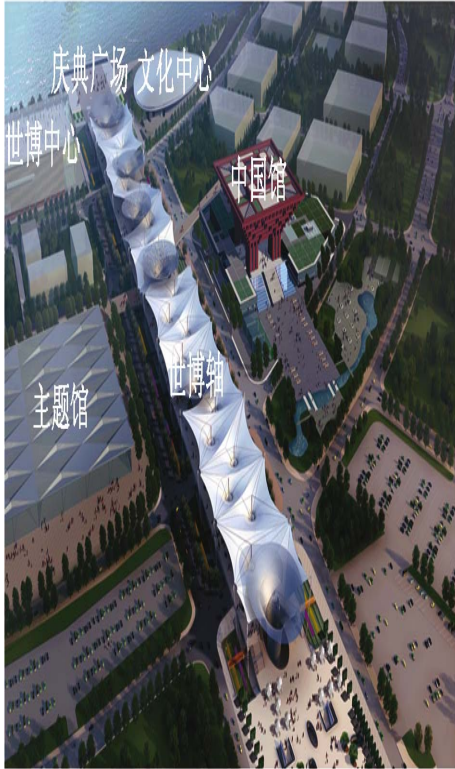


图1 南京国资绿地紫峰大厦
Fig.1 Nanjing Greenland International Zifeng Tower

南京绿地紫峰大厦座落于南京市鼓楼区,屋顶高度381m,天线顶尖高度450m,是一幢地下4层、地上70层的办公及酒店双用建筑。结构采用了带伸臂桁架的框架-核心筒混合结构体系,采用型钢混凝土柱、钢梁和钢筋混凝土核心筒,在10层、35层、60层处共设置了三个加强层。核心筒位于结构三角形平面的中心位置。由美国SOM与华东建筑设计研究院合作设计。

2.2 巨型柱框架-核心筒结构体系

巨型柱框架-核心筒结构体系是通过设置少量巨型组合柱,使带伸臂桁架的框架-混凝土核心筒体系的侧向刚度得以进一步提高。巨型组合柱不仅具有较大的抗侧刚度,而且具有更大的轴向刚度,其与外伸臂桁架的有效结合,可提高整体结构的抗侧力效率,该结构体系对环带桁架的依赖程度也大大降低。无论从使用的灵活性,还是造价的经济性和建造的便利性,该体系均具有很好的竞争优势,因此该体系在超高层混合结构中得到了广泛的应用。该种结构体系的典型工程实例有上海金茂大厦(图2)、香港国

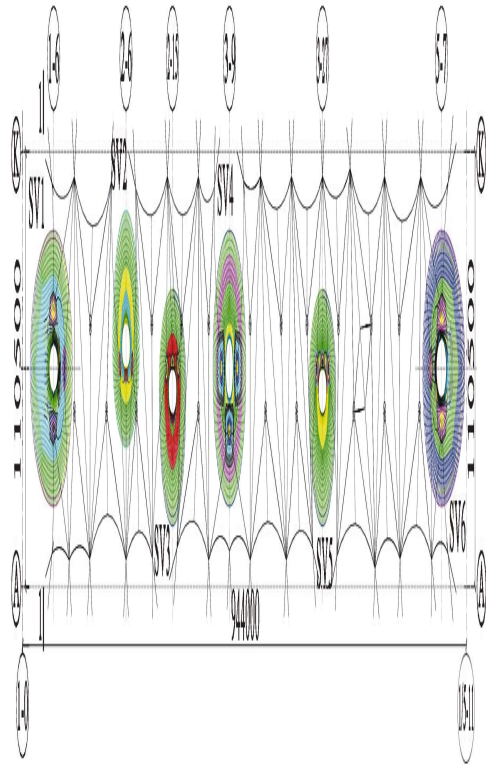


图2 上海金茂大厦
Fig.2 Shanghai Jinmao Tower

际金融中心、广州东塔、上海中心等。

上海金茂大厦于1999年建成,地下3层,地上88层,为多功能建筑,上部旅馆,下部53层办公,主体结构高度为372.1m,总高421m,为钢-混凝土混合结构,结构体系采用巨型柱框架-核心筒-伸臂桁架结构体系。外周边有8个钢筋混凝土巨型柱,与钢筋混凝土核心筒组成主要的抗侧力体系,角部还有8个相对小的钢柱,主要承受竖向荷载并参与受扭。在内筒和巨型柱之间设置了3道伸臂桁架,位于24~26层、51~53层以及85~87层,伸臂桁架是2层高的钢桁架。设计单位为美国SOM公司,华东建筑设计研究院提供设计咨询和工程监理,并进行部分施工图设计。

上海中心大厦位于上海浦东新区陆家嘴金融中心区,与金茂大厦、环球金融中心共同组成一组三角的“品”字型关系的建筑群。这组建筑群在世界上是独一无二的。上海中心大厦项目塔楼高为632m(结构高度为580m),共124层(图3)。塔楼平面布置呈圆形,上下中心对齐并逐渐收缩。塔楼的外层幕墙形状近似尖角削圆了的等边三角形。从建筑的底部一直扭转到顶部,每层扭转约1°左右,总扭转角度约为120°。塔楼抗侧力体系为“巨型框架-核心筒-外伸臂”结构体系。在8个设备层布置6道两层高外伸

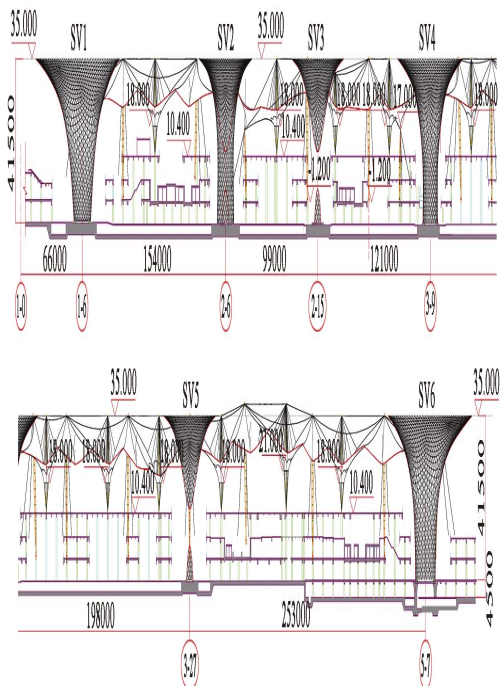


图3 上海中心大厦

Fig. 3 Shanghai Center Tower

臂桁架和8道箱型空间环带桁架,由箱型空间环带桁架和巨柱形成外围巨型框架,形成“巨型柱框架-核心筒-外伸臂”抗侧力体系。上海中心大厦由 Gensler 与同济大学建筑设计研究院共同设计,华东建筑设计研究院为第三方设计审核单位。

2.3 筒中筒结构体系

当结构内部及外部同时布置筒体时形成了筒中筒结构。筒中筒结构的外筒可以由密柱深梁组成的钢(型钢)框筒,也可以是桁架筒或交叉柱组成的网格筒,而内筒既可以是桁架筒,也可以是钢筋混凝土筒体。当房屋高度较高时,同样可在内、外筒之间设置伸臂桁架以减小建筑的侧移。在水平荷载作用下,外筒以剪切形为主,而内筒以弯曲为主,外筒和内筒通过楼板及外伸臂桁架协同工作。如果外筒的刚度足够大(如外筒采用交叉网格筒),内筒的大小及刚度要求可适当放松。该体系对外伸臂桁架的要求也较低,甚至可以不设置外伸臂桁架。筒中筒结构适用于50层以上的超高层建筑,该体系的典型工程实例有:上海环球金融中心(图4)、天津117大厦、广州西塔、美国约翰·汉考克中心、香港中国银行、广州中信广场等。

上海环球金融中心位于上海陆家嘴金融贸易区,主要为办公用途,兼有商贸、宾馆、观光、展览、零售和其它公共设施。主楼地上101层,地下3层,地面以上高度为492m(图4)。上部结构同时采用以下三重抗侧力结构体系:①由巨型柱、巨型斜撑和周边带状桁架构成的巨型结构框架;②钢筋混凝土核心

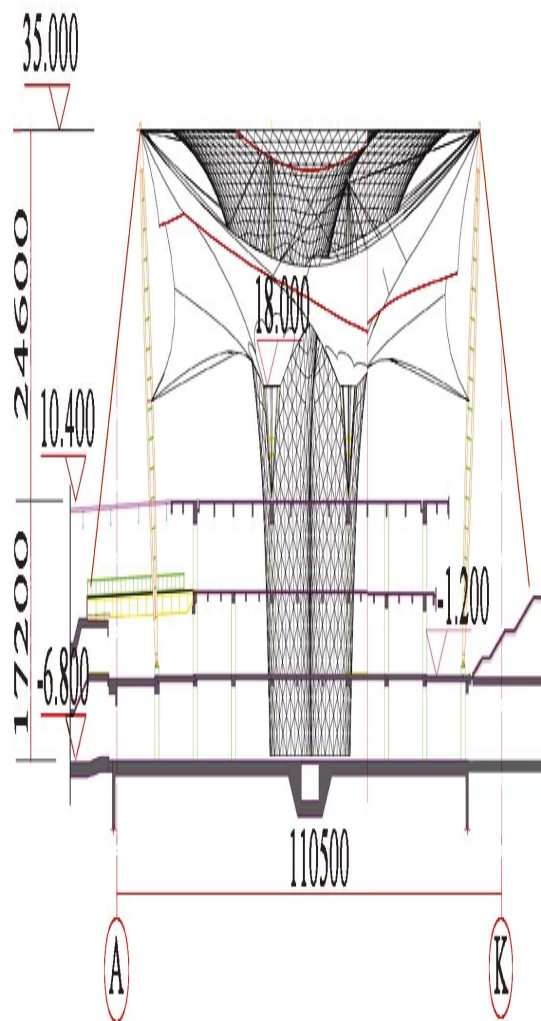


图4 上海环球金融中心

Fig. 4 Shanghai World Financial Center

筒(79层以上为带混凝土端墙的钢支撑核心筒);③联系核心筒和巨型结构柱之间的外伸臂桁架。以上三个体系共同承担了由风荷载和地震作用引起的倾覆弯矩。前两个体系承担了由风荷载和地震作用引起的剪力。环球金融中心建筑设计为美国 KPF,结构设计为华东建筑设计研究院有限公司与 Leslie E. Robertson Associates, RLLP 合作完成。

天津117大厦位于天津市高新区地块发展项目之中央商务区,是一幢以甲级写字楼为主,集六星级豪华商务酒店及其它设施于一身的大型超高层建筑,总建筑面积约37万平方米,建筑物高度约为597m,共117层,另有3层地下室(图5)。结构采用了多重抗侧力体系抵抗风荷载和水平地震作用,水平抗侧力体系由巨型框架和巨型支撑筒组成的周边抗侧力结构及混凝土核心筒组成,其中巨型支撑筒和混凝土核心筒起了主要的作用,而重力荷载经楼板传递核心筒和周边结构,传递给次框架的荷载,通

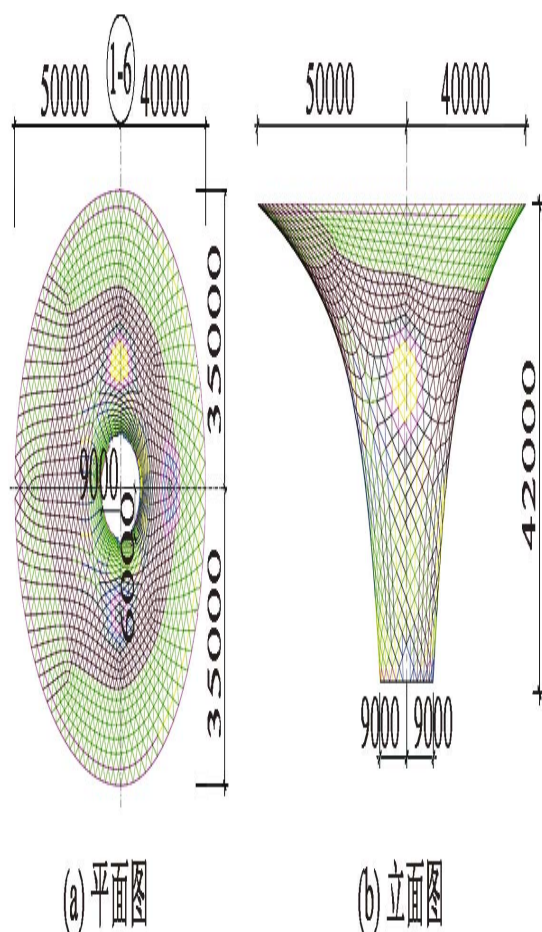


图5 天津117大厦
Fig.5 Tower 117 in Tianjin

过转换桁架直接传递至巨型角柱,最终传递至基础。天津117大厦结构设计由英国ARUP公司与华东建筑设计研究院有限公司共同完成。

2.4 其它一些新型的结构体系

已建成的330m高的北京国贸三期主塔楼采用钢-混凝土框架-核心筒结构,内筒采用了型钢、钢板混凝土巨型组合柱及型钢混凝土支撑结构体系;在建的337m高的天津津塔主要抗侧力体系由钢管混凝土框架+核心钢板剪力墙体系+外伸臂桁架抗侧力体系组成,具有较高的抗侧刚度和延性,是目前世界上应用钢板剪力墙的最高的高层建筑(图6)。

天津津塔位于兴安路北侧,海河岸边,其中办公楼地下4层,地上75层,高度为336.9m,采用“钢管混凝土柱+核心钢板剪力墙+外伸臂”结构体系。塔楼的外围框架部分由钢管混凝土柱和宽翼缘钢梁组成,周边柱距约为6.5m。核心筒由带有钢管混凝土柱和宽翼缘钢梁边框的钢板剪力墙组成。在15层、30层、45层、60层设置伸臂桁架加强层,包括4道伸臂桁架及周边腰桁架。根据分析结果,不同位

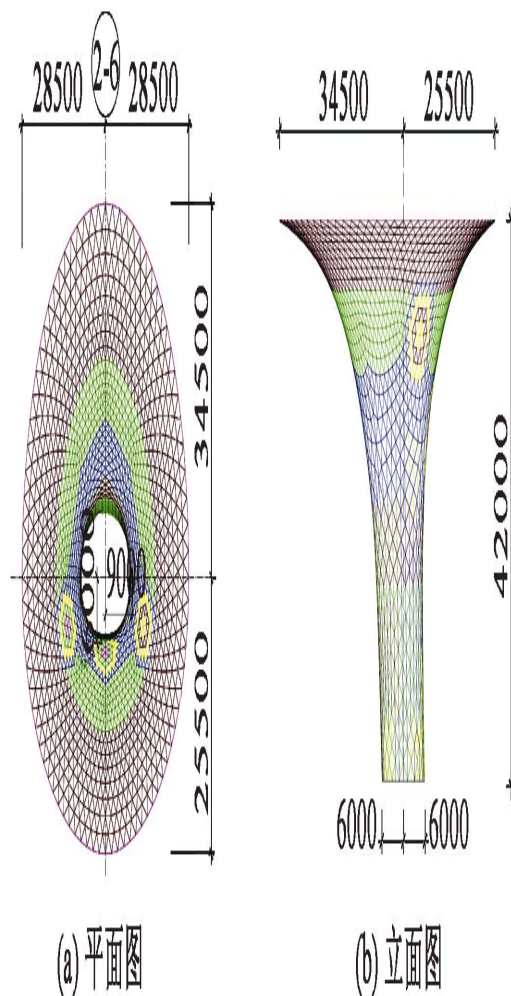


图6 天津津塔
Fig.6 Jin Tower in Tianjin

置的钢板剪力墙单元在不同高度转换为钢框架-钢支撑体系。薄钢板剪力墙结构作为一种新的结构体系,充分利用薄钢板的拉力场效应,具有较大的弹性初始刚度、大变形能力和良好的塑性性能、稳定的滞回特性等优点。该项目是目前天津最高的建筑,也是世界上高度最高的钢板剪力墙结构。由美国SOM与华东建筑设计研究院合作设计。

3 混合结构设计中的关键技术

3.1 钢-混凝土混合结构整体抗震性能

近年来我国混合结构高层建筑快速发展,但还没有经历过实际地震的考验。关于混合结构的震害调查分析,从目前的文献来看,只有美国1964年的阿拉斯加地震和1995年日本阪神地震的震害资料有所记载。

从阿拉斯加地震中与混合结构有关的震害资

料^[7]可以看出,混合结构中钢筋混凝土剪力墙或筒体承担了主要的地震作用,在地震中首先破坏,破坏后地震剪力需要由框架分担一部分,如果框架设计偏弱,从抗震设计角度讲,结构成为一个纯剪力墙筒体结构,型钢框架不能成为结构的第二道防线。资料显示,在钢筋混凝土构件中加设型钢,如果构造不当,不能保证型钢与混凝土共同工作,会对结构产生不利影响。因此,构造设计也是决定结构抗震性能的关键因素。阪神地震中,一些混合结构的建筑发生了破坏,主要表现为:①格构式型钢混凝土构件破坏严重;②实腹式型钢混凝土构件少量破坏;③非埋入式柱脚的破坏相当严重,部分型钢混凝土的非埋入式柱脚锚栓全部断裂,柱脚发生严重错动。因此,混合结构中,节点构造设计同样非常重要,许多在地震中破坏的结构,都是在节点处首先破坏。

对于在我国广泛采用的钢(型钢混凝土)框架-混凝土核心筒结构体系,国内工程界对这种体系尚有争议。在技术上主要认为该体系的抗震性能基本取决于钢筋混凝土核心筒,它相对来说刚度有余而强度不足,而外周钢(型钢混凝土)框架则正好相反,这使得混合结构在抗震性能上不协调,内筒和外框架不能合理分担地震作用。在罕遇地震作用下,塑性较主要出现在混凝土核心筒上,内筒因刚度大而承担大部分地震作用而首先破坏,外框架因刚度不足导致结构变形过大而整体破坏,未起到第二道防线的作

用。为此,国内相关科研院所、高校进行了混合结构的整体模型结构的拟静力及模型振动台试验研究^[1,4,5],并开展了增强混凝土核心筒剪力墙延性和组合柱的抗震性能的系列研究,还利用各种计算机软件进行了计算分析研究,试验及计算分析结果表明,经过合理设计的混合结构能够满足小震不坏、中震可修、大震不倒的抗震设计要求。

基于研究成果及工程实践,JGJ 3—2002《高层建筑混凝土结构技术规程》对混合结构的抗震设计提出了相关的规定。

(1)应保证框架能起到第二道防线的作

用,增大系数,墙体的抗震构造措施应按抗震等级提高一级后采用。

(2)应采取措施增强混凝土核心筒剪力墙延性。保证筒体延性可采取下列措施:①控制筒体剪力墙剪应力水平;②筒体剪力墙配置多层钢筋;③剪力墙端部设置型钢柱,四周配以纵向钢筋及箍筋形成暗柱;④采用钢板混凝土组合剪力墙;⑤采用带钢斜撑混凝土组合剪力墙;⑥连梁采用斜向配筋方式连梁;⑦采用型钢混凝土连梁或钢板混凝土连梁;⑧在连梁中设置水平缝,形成多连梁;⑨保证混凝土筒体角部的完整性,开洞位置尽量对称均匀。

3.2 构件及节点设计

(1)型钢混凝土竖向组合构件采用高强度钢材具有良好的经济性。

(2)型钢混凝土竖向组合构件宜优先采用实腹式型钢。

(3)应通过控制型钢混凝土组合构件的轴压比及配置必要的构造箍筋,改善组合构件的抗震性能,避免大震作用下构件刚度急剧退化及延性降低。

(4)通过规定型钢混凝土组合构件的最小含钢率,提高组合构件的延性,组合构件的合理含钢率可取4%~8%。

(5)通过增加型钢混凝土组合构件的混凝土保护层厚度、设置必要的栓钉、配置必要的构造箍筋、采用高强箍筋等来避免组合构件的粘结破坏。

(6)通过规定型钢混凝土组合构件中型钢的最小埋置深度来确保大震作用下组合构件柱脚不发生受拉破坏。

(7)应确保型钢混凝土构件节点受力性能可靠性及施工可行性,特别是梁柱节点区箍筋设置的可靠性、混凝土浇筑质量的保证,对钢管混凝土还应选择合适的浇筑方式并配备必要的施工检测手段。

(8)楼面钢梁与混凝土核心筒连接区受力复杂,预埋件与混凝土之间的粘结易遭受破坏,特别是核心筒角部节点区破坏较严重,建议设置内置型钢予以加强。

3.3 竖向荷载作用下竖向构件变形差异

20世纪70年代以后,高层建筑的竖向变形差问题逐渐引起人们的注意。美国的Russell H G等^[8]对两幢钢筋混凝土高层建筑竖向变形进行了跟踪测试,其中高197m的Lake Point Tower,经过3年后柱的最大轴向变形超过了200mm;高262m的Water Tower Place经过5年后柱与墙的竖向变形差超过23mm。这些与时间和环境相关的超高层结构竖向构件变形及差异,将使相邻的结构构件及非结构构件产生附加应力,还可能影响设备的安装和使用。

超高层结构的竖向变形及差异问题需要在概念

设计、计算分析、施工措施等方面加以分析和控制。随着研究的深入,对于超高层结构的竖向变形及差异问题的认识也逐渐接近于工程实际。就工程实践来讲,以下问题必须考虑:①竖向变形差异与施工方案密切相关,不同的施工方案将得出不同的计算结果;②施工过程中,正在施工的楼层标高将调整到设计标高,但是施工其上一楼层时已经施工完的楼层因弹性压缩、徐变、收缩而产生竖向变形;③混凝土的弹性模量、徐变、收缩和水泥材料类型、环境条件、施工进度、养护条件、施工顺序等因素有关,并且随时间不断发生变化;④超高层建筑的结构布置与荷载分布随高度变化而发生改变;⑤施工过程及竣工后基础沉降变形差异的影响

研究表明^[9],由于结构布置与荷载分布的变化,不同位置的核心筒与组合柱的竖向变形及差异可能存在区别;但一般来说,超高层结构核心筒与组合柱的竖向变形量及竖向变形差的最大值既不是在结构顶部,也不是在结构底部,而是发生在结构中上部或者中部偏上的位置。

3.4 钢-混凝土混合结构施工过程分析

施工过程分析应考虑以下因素:①施工阶段部分抗侧力构件延迟安装,如防屈曲支撑构件,钢板剪力墙的延迟安装等;②施工阶段部分构件、节点延迟安装,如外伸臂桁架的延迟安装、型钢混凝土构件混凝土的延后浇筑;③施工过程中节点支座约束条件变化;④施工过程中结构刚度(竖向刚度、抗侧刚度)逐步变化;⑤施工过程的荷载及结构可靠度的合理选取。

施工模拟计算分析得到的结构内力应与其它荷载(活荷载、风荷载或地震作用)进行组合,验算承载力。地震作用下结构的内力组合,应以施工全过程完成后的静载内力为初始状态;当施工方案与施工模拟计算分析不同时,应重新调整相应的计算;当施工中设置临时支架时,支架也应参与施工过程的结构分析,确保支架的安全,还应进行支架拆除过程的模拟计算分析。

3.5 钢-混凝土混合结构动力弹塑性时程分析

动力弹塑性时程分析是结构抗震性能设计的重要手段,动力弹塑性时程分析的4个关键问题是分析模型、地震波的选择、时域积分算法和计算结果的合理评价。分析模型需符合下列要求:

(1)当采用结构抗震性能设计时,应先预定结构的抗震性能目标。

(2)梁、柱、斜撑、剪力墙、楼板等结构构件,应根据实际情况和分析精度要求采用合适的简化模型;构件几何尺寸、混凝土构件所配的钢筋和型钢、混合结构的钢结构构件应按实际情况参与计算;梁、柱构

件宜优先采用纤维梁模型,以有效模拟组合结构的受力及变形特点;剪力墙宜采用壳单元模型,对厚度较大的墙体,宜采用分层壳单元模型。

(3)应根据预定的结构抗震性能目标,合理取用钢筋、钢材、混凝土材料的力学性能指标以及本构关系。钢筋和混凝土材料的本构关系可按现行国家标准 GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》的有关规定采用;钢筋及钢结构应考虑钢材的包辛格效应,对钢管混凝土及约束边缘构件部位的混凝土,可采用约束混凝土的本构关系;对于分层壳单元混凝土材料可采用基于增量理论的三维弹塑性模型,按照选择的材料本构关系进行构件或结构计算结果与模型试验结果应有较好的相符性。

(4)复杂结构应进行施工模拟分析,应以施工全过程完成后的内力作为初始状态。

(5)应考虑几何非线性影响。

地震波应根据频谱特性、加速度峰值和持时进行选择,可根据场地土类别、场地特征周期、反应谱的频段和反应谱的面积进行选择。应指出的是,由于高层混合结构自振周期较长,还需考虑低频成分较为丰富的长周期地震作用下结构的地震反应。

输入地震波宜进行傅里叶变换,变换后的地震影响系数与振型反应谱法采用的地震影响系数相比,在各周期点上相差不宜大于20%,每一组波形的持续时间一般不少于结构基本周期的5倍和15s,弹塑性时程分析宜采用双向或三向地震动输入,选择的地震波数量不宜少于5组;对重要工程,计算结果宜取多组地震波计算结果的包络值。

根据现有的计算分析手段,显式算法是比较可行的方法,但应确保计算结果的稳定。计算时距应尽可能减小。

弹塑性时程分析结果可信程度的基本判断标准:①结构弹塑性模型一般要比多遇地震反应谱计算时的分析模型有所简化,但在弹性阶段应与多遇地震下的分析模型基本相同,两种模型的嵌固端、主振动周期、振型和总地震作用相一致。弹塑性阶段,结构构件和整体结构实际具有的抵抗地震作用的承载力是客观存在的,在计算模型合理时,不因计算方法、输入地震波形的不同而改变。若计算得到的承载力明显异常,则计算方法或参数存在问题,需仔细复核、排除;②整体结构实际具有的最大受剪承载力应控制在合理、经济范围内,不需要接近更不可能超过相同阻尼比的理想弹性的最大震作用剪力;③进入弹塑性变形阶段的薄弱部位会出现一定程度的塑性变形集中,该楼层的层间位移应大于按相同阻尼比的理想弹性大震作用计算时该部位的层间位移;④薄弱部位可借助相邻楼层或主要竖向构件屈服强度

系数的比较予以复核,不同的方法、不同的波形,尽管计算得到的承载力、位移、进入塑性变形的程度差别较大,但得到的薄弱部位一般相同。

3.6 钢-混凝土混合结构的阻尼比

影响阻尼比的因素很多,准确确定结构的阻尼比是一件非常困难的事情,现有工程的实测数据也比较离散。试验研究及工程实践表明^[10],一般带填充墙的高层钢结构的阻尼比为 0.02 左右,钢筋混凝土结构的阻尼比为 0.05 左右,且随着建筑高度的增加,阻尼比有不断减小的趋势,钢-混凝土混合结构的阻尼比应介于两者之间,考虑到钢-混凝土混合结构多用于超高层建筑,主要抗侧力构件为混凝土核心筒,故阻尼比取为 0.04。抗风设计时,结构的塑性变形一般较设防烈度地震作用下为小,故抗风设计时的阻尼比应比抗震设计时为小,且风荷载回归期越短,其阻尼比取值越小,混合结构在多遇地震作用下的阻尼比可取为 0.04。抗风设计时,结构承载力验算时的阻尼比可取为 0.02~0.03,结构变形验算时的阻尼比可取为 0.015~0.020,结构顶部加速度验算时的阻尼比可取为 0.010~0.015。

4 进一步研究的内容和建议

随着我国超高层建筑的不断发展,钢-混凝土混合结构的应用将会更为普遍,但目前建成的混合结构高层建筑尚未经受实际地震的考验,而且随着建筑高度的增加,风荷载已成为结构设计的控制荷载,因此非常需要进一步开展混合结构体系的抗震、抗风性能研究,研究的内容可包括以下方面:

(1) 钢-混凝土混合结构体系及整体抗震性能的研究。尽管国内已进行过整体结构的模型试验,但数量较少,建成工程的地震结构反应的数据很少,一些抗震设计的重要参数(如阻尼比、整体结构刚度的控制和协调工作性能等)的取值仍缺少依据^[6]。

(2) 高性能结构材料的应用研究。随着建筑高度的不断增加,结构的自重所占的比重也不断增加,400m 以上的超高层建筑结构自重普遍在 20kN/m² 以上,墙体厚度达 1500mm 以上,核心筒自重又占了整体结构自重的 50% 以上,而目前由于对 C60 以上高强混凝土缺乏系统的研究,其工程应用受到一定的限制。自重的增加,给结构的抗震设计带来很大的困难,如何通过采用高强高性能混凝土来减轻结构的自重,进而改善结构的受力性能是今后必须研究的课题,此外,楼面轻质混凝土及组合构件中高强度钢材的采用,对结构设计的安全性也会产生重大的影响。

(3) 结构体系的多样化和周边构件的巨型化使

组合构件及连接的受力性能更为复杂,应加强巨型组合构件的受力性能、组合构件施工的可行性及构造连接可靠性的研究。

(4) 随着建筑高度的不断增加,结构对风荷载更加敏感,在不少地区,风荷载已成为控制结构安全和使用性能的关键因素。应进一步加强风剖面、横风向风振、行人风环境及居住舒适度标准等方面的研究,并对现有混合结构超高层建筑在台风作用下的工作状态作必要的观测,积累宝贵的工程经验,并为我国荷载规范的修订提供依据。

(5) 混合结构高层建筑消能减振控制技术的研究。减振控制技术是抗震、抗风设计的一条重要途径,近年来在日本、美国等国家得到了较为广泛的应用,近年我国在新建工程中也开始应用,北京银泰中心塔楼、上海世贸国际广场采用了粘滞流体阻尼器,上海环球金融中心顶部设置了两个各 250t 的有动力阻尼质量阻尼器。但我国研究工作与世界先进水平尚有较大差距,需要在消能减振设计方法、各种阻尼器的适用范围与设计基本原则和控制指标、结构控制理论及振动控制产品的研发等诸多方面进行深入的研究。

5 展望

现有的研究成果和大量的工程实践均表明,钢-混凝土混合结构是符合我国国情且具有良好的抗震抗风性能和较好经济性的结构形式,其在高层及超高层结构中将具有广阔的应用前景。

加强对混合结构整体抗震性能、抗风性能、新型结构体系的研发及高性能材料的应用、巨型构件的受力性能、消能减震技术、施工过程模拟等方面的研究将有助于混合结构设计整体水平的提高,对现有混合工程的使用情况进行分析和相关规范的及时修订将使混合结构的应用跃上一个新的台阶。

参 考 文 献

- [1] 龚炳年,郝锐坤,赵宁. 钢-混凝土混合结构模型试验研究[J]. 建筑科学, 1994, 10(1): 10-14. (Gong Bingnian, Hao Ruikun, Zhao Ning. Experimental investigations of a 23-storey steel-RC combined structure model[J]. Building Science, 1994, 10(1): 10-14. (in Chinese))
- [2] 李国强,周向明,丁翔. 高层建筑钢-混凝土混合结构模型模拟地震振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(2): 2-7. (LI Guoqiang, ZHOU Xiangming, DING Xiang. Shaking table experimental study of steel-concrete hybrid structures for high-rise buildings[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(2): 2-7. (in Chinese))

- [3] 徐培福,薛彦涛,肖从真,等. 高层型钢混凝土框筒混合结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构,2005, 35(5):3-8. (Xu Peifu, Xue Yantao, Xiao Congzhen, et al. Experimental study on seismic performance of high-rise SRC hybrid structures[J]. Building Structure, 2005,35(5):3-8. (in Chinese))
- [4] JGJ 3—2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. (JGJ 3—2002 Technical specification for concrete structures of tall building[S]. (in Chinese))
- [5] DJ/TJ 08-015—2004 高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程[S]. (DJ/TJ 08-015—2004 Code for design of steel-concrete hybrid structures for high-rise building[S]. (in Chinese))
- [6] 徐培福,王翠坤,肖从真. 中国高层建筑结构发展与展望[J]. 建筑结构,2009,39(9):28-32. (Xu Peifu, Wang Cuikun, Xiao Congzhen. Development and prospect of high-rise building structures in china[J]. Building Structure,2009,39(9):28-32. (in Chinese))
- [7] 徐培福,傅学怡,王翠坤,等. 复杂高层建筑设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005. (Xu Peifu, Fu xueyi, Wang Cuikun, et al. Design of complicated high-rise building structures[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese))
- [8] Russel H G, Larson S C. Thirteen years of deformations in water tower place[J]. ACI Structure Journal, 1989,86(2):182-191.
- [9] 闫锋,周建龙. 超高层结构竖向变形及差异问题分析与处理[J]. 建筑结构,2007,36(5):100-103. (Yan Feng, Zhou Jianlong. Analysis and treatment of vertical deformation difference of super high-rise building[J]. Building Structure, 2007, 36 (5): 100-103. (in Chinese))
- [10] JGJ 99—98 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. (JGJ 99—98 Technical specification for steel structure of tall buildings[S]. (in Chinese))