

超高层混合结构与混凝土结构综合经济比较分析

黄用军 尧国皇
(中建国际深圳设计顾问有限公司 深圳 518033)

摘要: 超高层建筑采用钢-混凝土混合结构与混凝土结构相比具有优越的结构性能, 但存在造价高, 用钢量增加等问题, 本文不对实际结构工程实例进行比较, 旨在基于相关文献和笔者的工程经验, 给出了超高层建筑采用钢-混凝土混合结构与混凝土结构设计方案综合经济效益比较分析的基本原则, 供设计人员在实际结构选型时参考。

关键词: 超高层建筑; 结构体系; 施工周期; 综合效益

1 前言

众所周知, 在超高层建筑结构设计中采用何种结构体系是投资方和设计方讨论最多的问题之一, 因为它直接影响到建筑的经济合理性。我国超高层建筑传统地采用钢筋混凝土结构体系, 近 10 多年来才开始采用钢-混凝土混合结构, 该结构体系融合了钢结构和混凝土结构的优点, 承载力高、延性好、变形能力强, 从而具有较强的抗风和抗震能力。目前落成的赛格广场大厦、香港中环东北大楼、长江中心大厦、上海金茂大厦、深圳地王大厦、台北国际金融中心(101 广场)、高雄国际广场大厦、北京 LG 大厦等, 均采用了混合结构体系, 而且越来越受到结构工程师的青睐。《高层建筑混凝土结构技术规程》^[1]给出了混合结构体系的定义, 上海市工程建设规范《高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程》^[2]则对《高规》中混合结构体系的范围作了扩展, 指出: 混合结构指钢框架(或钢支撑框架)或钢组合框架与钢筋混凝土筒体(或钢筋混凝土剪力墙)共同工作所构成的结构体系, 其中钢组合框架包括型钢混凝土柱框架和钢管混凝土框架。这些规程的颁布进一步促进了混合结构体系在实际工程中的应用。

与传统的钢筋混凝土结构体系相比, 采用混合结构体系必然带来结构用钢量的增加, 土建工程前期投入必然增大, 然而超高层建筑结构中采用混合结构与混凝土结构的综合经济效益比较如何, 相关报道还比较少见, 文献[3]以工程的上部结构造价、建筑的有效使用面积、地基基础的处理费用以及结构施工工期等方面对上海地区采用混合结构和混凝土结构的综合经济效益进行了比较分析, 分析结果

表明, 高层建筑采用钢结构时间成本相对较低, 具有优越的综合经济效益; 文献[4]通过 2 个工程实例的综合效益进行比较, 结果表明超高层结构中采用钢结构具有较明显的优势; 文献[5]对某 22 层高层建筑结构采用钢结构和混凝土结构进行了经济性分析, 并指出只要通过合理选用结构方案、构件布局、截面形状和节点构造设计等, 努力挖潜, 精心设计, 降低钢结构综合造价是完全可行的。

以上的研究成果为本文的撰写提供了宝贵的技术资料, 本文不对实际的结构工程实例进行比较, 旨在基于相关文献和自身工程经验, 给出了超高层建筑采用钢-混凝土混合结构与混凝土结构设计方案综合经济效益比较分析的基本原则, 供同行在实际工程结构方案选型时参考。

2 混合结构与混凝土结构综合经济比较分析

以下通过结构造价、结构占地面积和施工周期对整体成本的影响等方面, 论述超高层建筑采用混合结构和混凝土结构的综合经济效益比较, 其前提是机电设备、电梯、装修等非结构性项目不因结构体系变化而变化, 且采用不同结构材料所产生的结构抗震、建筑布置的灵活性、施工对周围环境的影响等也暂不作为本文的比较分析内容。

本文提及的工程整体成本并非指工程总投资额, 而是指工程的结构造价和由于采用不同结构材料所产生的结构施工工期与建筑有效使用面积的差异并由此带来的经济收益转换而成的等效成本之和^[3]。

2.1 结构造价对整体成本的影响

结构造价包括地基基础处理费用、地下室和上部结构的造价, 由于结构造价对工程总体成本的影响较

直观, 可直接把两工程所需投入的实物和资金体现出来, 也是开发商首先关心的问题。由于采用的结构体系不同, 结构材料也不同, 使得结构自重也差别较大, 因此对基础的造价影响也较大。

笔者曾参与一个超高层建筑的结构设计, 地上 58 层, 地下 3 层, 当混凝土结构方案改成混合结构方案后, 结构质量有较大减轻, 由原来的 181327t 减至 141435t, 减少了将近 4 万 t, 单是桩基费用就节约了 100.9 万元 (人工挖孔桩按当地平费用计算), 如果采用钢管桩, 节约的费用则在 800 万元以上。

表 1 给出了某超高层混合结构和混凝土结构的工程概况和造价比较^[3], 需要说明的是, 表 1 中没有将外墙维护费用对整体成本的影响列入, 混合结构中钢结构工程的防火保护费用包括在总体造价中。从表 1 可见, 由于混合结构采用了大量轻质高强的钢材, 因此结构自重比混凝土结构要轻, 基础造价比混凝土结构要低, 但由于结构构件中大量钢结构的使用, 使得在结构造价方面, 混合结构体系要比混凝土结构体系要高。

表 1 工程概况和造价比较^[3]

工程名称	上海森茂大厦	南京西路某商办大厦
结构体系	混合结构体系	混凝土结构
地点(建成时间)	上海(1998-04)	上海(1998-12)
高度(层数)	198m(48层)	193.3m(45层)
基础形式	钢管桩+箱基	箱基
建筑功能	综合写字楼	综合写字楼
总建筑面积(m ²)	113000	136240
实际总投资额(US\$)	约 2.0 亿	约 1.62 亿
总用钢量(t)	13000	15400
型钢用量(t)	8000	400
混凝土总用量(m ³)	63000	125964
基础混凝土用量(m ³)	32500	70064
上部结构混凝土用量(m ³)	30500	55000
基础及地下室造价	1995	1923
上部结构造价	2276	1821
结构造价	4271	3744
结构造价/m ²	378	275

混合结构中钢结构工程的防火保护也可以基于性能化的防火设计方法, 根据构件的实际受力状态和边界约束条件, 确定其防火保护层厚度, 降低钢结

构工程的防火保护费用。当然, 混合结构中钢结构工程的防火保护也可以采用外抹水泥砂浆, 框架柱也可以选用型钢混凝土柱或钢管混凝土叠合柱(不需要防火保护), 这样可使得混合结构的造价有所降低。

2.2 结构占用面积对整体成本的影响

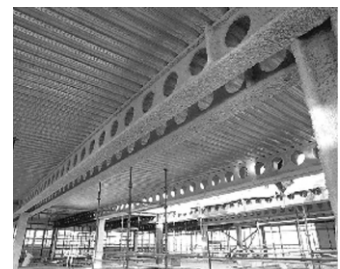
由于高强钢材的使用, 使得混凝土结构构件截面比混凝土结构要小, 尤其当框架柱采用钢管混凝土柱时, 由于钢管对核心混凝土的约束效果, 使得构件强度进一步提高, 且有关规程对钢管混凝土柱的轴压比限值较为宽松。另外, 由于钢-混凝土组合构件(钢管混凝土柱、钢管混凝土叠合柱、型钢-钢管混凝土柱)较好的延性, 使得高强混凝土的使用成为可能^[6,7], 可进一步减小结构占地面积, 增加实际可使用面积(包括办公面积和地下停车位等)。另外, 选用高强钢材, 能进一步减小结构占地面积, 但高强钢材往往价格较高, 因此也应进行比较分析。

上述原因使得超高层建筑中采用钢-混凝土混合结构的面积比例小于混凝土结构, 但建筑有效使用面积相对增大, 在销售上能体现其经济效益^[3]。通过表 2 的比较^[3]可见混合结构的有效使用面积率比混凝土结构要高。

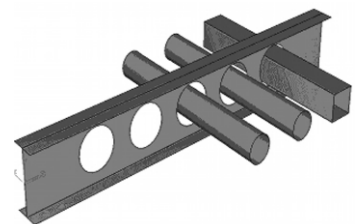
表 2 有效使用面积比较^[3]

工程名称	上海森茂大厦	南京西路某商办大厦
结构面积(m ²)	4475	10450
占总面积比例(%)	3.96	7.67
可增加的相对使用面积率(%)	3.71%	0%
可增加的相对使用面积(m ²)	4192	0

值得一提的是, 当超高层混合结构中的框架梁采用蜂窝梁, 管道从钢梁中开孔中穿过时(如图 1), 可在楼层净高要求相同的情况下使其层高更小。我们简单计算过一栋 60 层超高层混凝土建筑, 如采用蜂窝梁便可在相同建筑高度情况下, 增加 4-5 层结构面积, 在销售时可取得可观的经济效益。



(a)



(b)

图 1 钢梁腹板开洞

2.3 结构施工周期对整体成本的影响

由于结构体系以及使用的主体材料不同,工程上部结构施工工期会受到较大影响,同时施工环境及季节、工程量大小、地质条件等诸多因素也会对施工工期造成影响。

当采用钢-混凝土混合结构体系时,由于钢与混凝土弹性模量不同及混凝土的收缩徐变特性,使得核芯筒与外围竖向构件存在差异变形而引起较大的次应力,在组合结构设计中必须加以考虑。具体处理方法是让混凝土核芯筒先施工至一定高度,再开始外围构件施工,使楼面混凝土浇筑完时筒体与外围构件有效折算应力 σ 增量接近,从而控制两者的差异变形在可接受范围内,降低构件由于差异变形引起的次应力。对于有伸臂桁架的结构,需对伸臂桁架节点作先较后刚的连接处理,以释放施工阶段的相对位移。外围钢柱的制作长度也需根据现场测量情况作出调整,以降低徐变、收缩和弹性压缩的不利影响^[9]。

最符合上述原则的施工过程是将各部分的施工分别进行,之间相距数层^[9]: 钢筋混凝土核心筒采用爬模施工,爬模自支撑于核心筒上,无需脚手架;

安装周边钢框架,充分利用钢结构施工周期短的特点;若采用钢管混凝土柱,外钢管可一次立好数层,然后浇灌钢管内混凝土。

在合理施工组织下,混合结构体系的施工速度较快,与钢结构大致相同甚至更快,如一些超高层混合结构实例的平均每层施工周期为4d~7d,比混凝土结构缩短约2d。另外,混凝土结构施工受天气气候影响较大,工期的缩短有利于建筑物及早投入使用,缩短贷款建设的还贷时间,且提早出租增加租金收入,对整体成本的影响体现在利息和租金的收益上。作为实例,我们获得了某混合结构和混凝土结构利息节约情况^[11]。

超高层建筑采用混合结构体系,由于施工周期的缩短,建筑可提前投入使用,以及有效使用面积的增大,必然带来租金的收益,它与建筑场地、出租面积率和楼层位置等因素有关。

2.4 综合经济分析

超高层建筑采用钢-混凝土混合结构,在建筑有效使用面积和施工工期方面具有一定的优势,并能取得较可观的经济收益,从而可抵消一部分因采用钢结构而增加的材料费用,进而使工程整体成本明显降低^[4,11]。对于特定的实际工程,将以上各种有

利有弊的因素都加以考虑,投资方可在各方的配合下,对两种结构体系作详细的综合经济性比较分析,经多方论证找到最优和最合理经济的结构设计方案。

3 结语

超高层建筑采用钢筋混凝土结构的造价虽低,但工期相对较长,时间成本相对较高,而采用混合结构具有结构占用面积小、施工工期短的优点,但结构造价高,前期资金投入大,当然钢材也具有可回收、更环保的优点。

超高层建筑采用混合结构或是混凝土结构,其综合经济效益并非一个简单的课题,它涉及到结构设计、施工管理、风险投资和资本运作等多个方面,投资方可在各方的配合下,对两种结构体系作详细的综合经济性比较分析,进行多方面论证,找到最优最合理经济的结构设计方案,望本文能起到抛砖引玉的作用。

参 考 文 献

- [1] JGJ 3-2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S]
- [2] DG/TJ 08-015-2004 高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程[S]
- [3] 李国强,张洁. 上海地区高层建筑采用钢结构与混凝土结构的综合经济比较分析[J]. 建筑结构学报,2000(21)
- [4] 陆敏,许海峰. 超高层钢结构与钢筋混凝土结构综合经济对比分析[J]. 广东土木与建筑,2005(11)
- [5] 姜正荣,王仕统. 高层钢结构与钢筋混凝土结构技术经济比较[J]. 钢结构,2004(6)
- [6] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践(第二版)[M]. 北京:科学出版社,2007
- [7] CECS 188:2005 钢管混凝土叠合柱结构技术规程[S]
- [8] 张坚,陈国成. 混凝土筒体先于外钢框架施工阶段结构分析[J]. 结构工程师,2005,21(3)
- [9] 李国强,陈素文,丁翔等. 高层建筑钢-混凝土混合结构设计实例[J]. 建筑钢结构进展,2005,7(6)
- [10] 张力,朱颖菲,项宗方. 深圳星河世纪结构方案优选[J]. 后勤工程学院学报,2005(1)
- [11] 赵荣招,张友恩,王少一. 高层钢结构与高层钢筋混凝土结构的经济比较[J]. 钢结构,2004(1)