第 14 卷 第 22 期 2014 年 8 月
1671—1815(2014)22-0270-05

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 14 No. 22 Aug. 2014
ⓒ 2014 Sci. Tech. Engrg.

巨-子组合结构减震控制研究

夏 昌
(福州市规划设计研究院,福州 350003)

摘 要 巨型结构具有很大的整体稳定性和很高的结构效能,其主、子结构各自的受力特点决定了主、子结构的形式、建材、抗震性能要求等可以不同。利用该特点,以钢(型钢)混凝土建造巨型结构的主结构,轻钢构建子结构,形成不同于现有巨型结构和超高层混合结构的真正结构意义上的组合结构。为克服该新型组合结构体系中轻钢子结构过大的荷载响应,在子结构柱下设置夹层橡胶隔震支座,由此构成了巨-子组合减震结构。不同于已有的巨型框架多功能减振结构,本研究的建材不同,也更具实际工程意义。对依据该思想设计的一座 70 层超高层住宅做了多方案对比计算分析,得出一系列可供工程设计借鉴的结论。

关键词 高层建筑 巨-子结构体系 组合结构 减震控制
中图法分类号 TU352.11; **文献标志码** B

巨型结构是由几个大型结构构件组成的主结构与其他常规结构构件组成的子结构组合而成的结构,它具有很大的整体稳定性和很高的结构效能[1]。巨型结构的主结构构成了结构的主要抗侧力体系,结构整体刚度大,子结构仅需将竖向荷载传给主结构,传力途径明确,对抗震有利。主、子结构各自的受力特点决定了主、子结构的形式、建材、抗震性能要求等可以不同,从而可以采取适合各自结构特点的最优的设计方案。

由多种建筑材料组合而成共同承受外力的构件称为组合构件,或称为组合结构。现有组合结构的实质是构件层级上的组合[2],如钢管混凝土和型钢混凝土。

采用钢(型钢)混凝土建造巨型结构的主结构,采用轻钢构建子结构,由此构成了结构意义上的组合结构[3]。该巨-子型组合结构继承了巨型结构力学性能的特点,集纳了各建材性能的优点,不同于现有的由相同建材构建的巨型结构和不同建材构建的超高层混合结构[2],是真正意义上的高效、绿色建筑[3]。

由于两种建筑材料力学性能(强度、阻尼等)差异巨大,各自构成的(主、子)结构刚度差异巨大,该新型组合结构体系的主结构和子结构对风和地震荷载响应差异较大。为克服轻钢子结构过大的荷载响应,设想在其柱下设置夹层橡胶隔震支座,形成巨-子组合减震结构。不同于已有的巨型框架多功能减振结构[4—7],巨-子结构材料不同,具有绿色建筑意义并建立在实际工程可行的基础上。文章以巨型结构、组合结构、钢结构、减震控制技术为基础,结合工程实例进行了多方案对比计算分析,得出了一些有益的结论,可供高层或超高层工程设计借鉴。

2014 年 3 月 14 日收到 住房和城乡建设部 2012 年科学技术项目计划(2012-K2-40)、福州市科技计划资助项目(榕科 2011-S-75)资助
作者简介:夏 昌(1966—),男,江苏金坛人,高级工程师(教授级)。研究方向:结构减震和隔震。E-mail: 13950309637@163.com。

1 巨-子组合减震结构

1.1 减震控制技术

工程结构减震控制技术是指在工程结构的特定部位装设某种耗能减震装置(或某种机构、某种子结构、施加外力等),借以改变或调整结构的动力参数,衰减结构的震(振)动反应,有效地保护结构及内部设施在强风或地震时安全的现代工程技术[8]。夹层橡胶垫隔震技术是目前最为成熟,理论和试验研究成果最为丰富的结构减震控制技术。由于拉、压性能的巨大差异,夹层橡胶垫通常不能用于受拉工况,因此隔震技术一般多用于多层建筑,较少应用于高层建筑,特别是超高层建筑。

1.2 巨-子组合减震结构体系

利用巨型结构体系受力特点,采用钢筋混凝土(型钢混凝土、钢)构建其主结构,采用钢(轻钢)构建其子结构,在子结构柱下设置夹层橡胶隔震垫,由此构成了一种新型结构体系——巨-子组合减震结构体系。

新结构体系的构成表明:①该体系具有良好的建筑适应性和潜在的高效结构性能,建筑布局不再受传统以标准楼层为单元的限制,子结构实现了建筑的灵活空间,可以满足许多具有特殊体型和使用

功能的建筑平、立面要求;②该体系具有明显的二级受力特征,打破了传统的以单独楼层作为基本结构单元的格局,和上述构件层次上的所谓组合结构相比,该巨型组合结构是结构层次意义上的真正的组合结构;③体系中的子结构犹如基础隔震的多层框架结构,隔震后的子结构受地震作用减小,安全度、舒适度提高;④子结构底层柱底的橡胶垫如同耗能装置,消耗了地震输入的能量。

巨-子组合减震结构集纳了巨型结构的特点和现代减震控制技术,集纳了各自建材性能优点,是减震的、二元受力的、组装的、高灵活性的理想结构。

2　工程实例

基于巨-子组合减震结构体系理念,构建新型钢混凝土巨-子型组合减震结构住宅。即由钢筋(型钢)混凝土构建主结构,轻钢结构为子结构(住宅单元),在轻钢子结构柱下设置橡胶隔震垫。该住宅体系秉承了上述巨-子组合减震结构的优点,成为集钢筋混凝土结构的大刚度、钢材的高强度、大灵活性和钢结构工厂化加工现场装配等诸多优点,受力明确、抗震性能好、舒适性高、建筑布置灵活且节能、环保的绿色新型住宅[3]。

工程概况及结构设计方案

一座总层数为 70 层的超高层住宅,所处场地类别为Ⅱ类,抗震设防烈度为 7 度一组,住宅层高为 3.0 m,建筑总高度为 210 m。

如图 1,将该建筑设计成 Y 型,每层为 6 单元,每单元进深为 12 m、面宽为 12 m。以下述 3 种结构设计方案进行分析对比。方案一:传统的结构设计方案。抗侧力构件为剪力墙(底部 800 mm 厚、C70 混凝土,随高度变化混凝土强度渐变),楼层采用钢筋混凝土梁板体系,主框架梁 500 mm × 700 mm,封边梁 500 mm × 1 200 mm,砌体填充墙为加气粉煤灰砌块;方案二:巨-子组合结构方案。抗侧力构件同方案一,主结构为 14 层,子结构均为 5 层,轻钢结构子结构填充墙为轻质墙板。方案三:巨-子组合减震结构方案。即将所有子结构采用夹层橡胶隔震技术隔震,其余同方案二。

方案一的标准层平面如图 1 所示;方案二、三的标准层(子结构)平面如图 2,子结构剖面如图 3;方案二、三主结构层平面类似于方案一标准层平面,不再赘述。

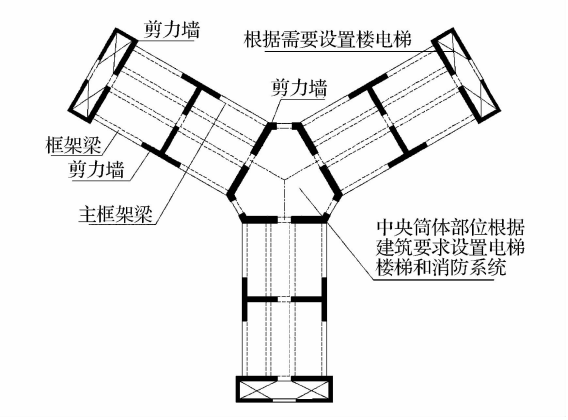


图 1　方案一的标准层平面

Fig. 1　Structural typical floor plan of scheme 1

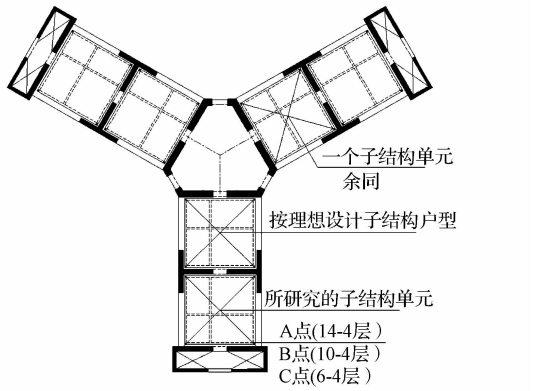


图 2　方案二、三的标准层平面

Fig. 2　Structural typical floor plan of scheme2/3

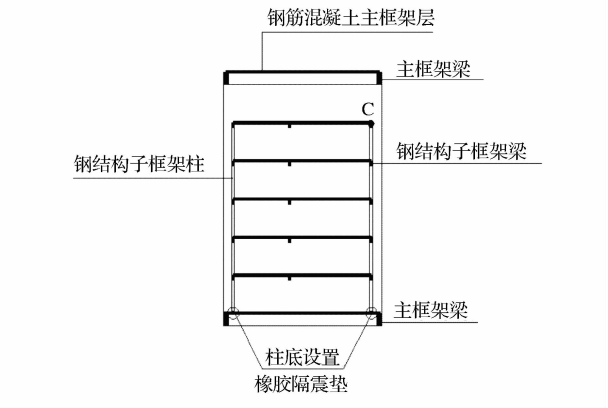


图 3　子结构剖面

Fig. 3　Sub structural section plan

3　计算结果及分析

3.1　结构计算模型

利用有限元分析软件 ETABS 对结构进行多维非线性动力时程分析,其中梁、柱构件采用空间杆系单元模拟,混凝土楼板采用膜单元模拟,剪力墙采用壳单元模拟,隔震支座采用连接单元 Isolator1 模拟。普通叠层橡胶支座水平向计算模型为线性模型,铅芯叠层橡胶支座水平向计算模型为双向耦合的双折线型非线性模型。采用 Ritz 向量分析。

在对方案二、三的“标准件”子结构按现行抗震规范进行设计和分析对比，采用 GZP350 型橡胶隔震支座，支座水平刚度 543 N/mm，等效阻尼比 0.04。将子结构“植入”主结构进行分析计算。采用适合本场地上的 2 条地震历史记录 El Centro 波（NS，1940 年）、北京饭店记录波（EW，1976 年）以及该场地人工波，计算时将 3 条记录的峰值按现行规范要求调幅。

3.2 结构的质量和相对位移

ETABS 分析（振型分解反应谱法）所得部分计算结果列于表 1。表 1 中 X 向及 Y 向数据为层间位移角，即相对位移。

表 1 三种结构设计方案的部分计算结果

Table 1 The part results of three structural schemes

	方案一	方案二	方案三
总质量/10^4 t	17.35	14.49	14.67
X 向最大层间位移角	1/1 243	1/912	1/1 021
Y 向最大层间位移角	1/1 240	1/1 038	1/1 164

表 1 表明，在竖向抗侧力构件（剪力墙）相同的情况下，采用传统混凝土梁板结构、传统砌体填充材料的方案一的质量明显大于子结构为轻钢结构、填充材料为轻质墙的方案二和方案三的质量，而隔震的子结构需在其底层增设结构层，故方案三质量略大于方案二质量。

高层和超高层建筑抗震设计的一个重要影响因素是结构质量。结构质量大小既和地震作用大小直接相关，也会直接影响建筑基础的造价。减轻结构自重对提高结构经济性极有意义[9]。方案二、三采用轻型钢结构住宅单元，与同样的钢筋混凝土结构相比重量仅为 1/3，整体结构质量约为方案一的 85%，经济性好。

表中所列最大层间位移角为结构平面中心点的位移角。计算表明，三个方案的层间位移角均满足抗震规范的要求。尽管三个方案竖向抗侧力构件相同，但水平抗侧力构件不同，方案一每层设置梁板结构，方案二、三只是在主结构层设置对主体结构有刚度贡献的梁板结构，因此，方案一的层间位移最小。而方案三的层间位移小于方案二，则显示了采用隔震技术的有利影响。

3.3 结构自振周期

表 2 表明，抗震结构（方案一、二）各阶振型的周期分布比较离散，而减震结构（方案三）各阶振型的周期分布比较密集。三个结构设计方案的第一、第二周期均为平动周期。由于方案二的主体结构刚度小于方案一，在方案二质量较小的情况下，方案二的结构自振周期和方案一相当。而对于方案三，子结构减震作用导致结构的第一、第二自振周期略长于方案二[4-7]，而自结构第四自振周期（平动）开始，方案三的自振周期明显加长，表明了结构高阶振型的减震作用。

表 2 不同结构设计方案的结构自振周期对比（s）

Table 2 The comparison of structural frequencies of three structural schemes（s）

振型序号	方案一	方案二	方案三
1	5.29	5.28	5.46
2	5.29	5.22	5.44
3	2.93	2.64	3.16
4	1.297	1.264	2.83
5	1.295	1.259	2.83
6	0.835	0.829	2.79
7	0.554	0.695	2.79
8	0.551	0.694	2.70
9	0.392	0.652	2.49
10	0.313	0.647	2.49
11	0.311	0.587	2.21
12	0.207	0.534	2.19

3.4 结构地震响应

考察结构在地震荷载作用下的振动响应。考察对象为三个结构设计方案中住宅单元右下角点，如图 1 所示。其中点 A 为第 14 大层第 4 小层角点，点 B 为第 10 大层第 4 小层角点，点 C 为第 6 大层第 4 小层角点。罕遇地震荷载作用下考察点水平向加速度值列于表 3。

表 3 罕遇地震作用下代表位置点振动加速度（$m \cdot s^{-2}$）

Table 3 Acceleration responses of typical node under waves（$m \cdot s^{-2}$）

	考察点	方案一	方案二	方案三	比值一	比值二	比值三
地震记录一	A	4.16	6.10	1.33	0.32	0.22	1.47
	B	2.46	4.68	0.55	0.22	0.12	1.90
	C	2.10	3.37	0.78	0.37	0.23	1.60
地震记录二	A	4.60	5.84	1.17	0.25	0.20	1.27
	B	2.55	3.73	0.54	0.21	0.14	1.46
	C	2.75	5.20	0.89	0.32	0.17	1.89
地震记录三	A	3.42	4.57	1.79	0.52	0.39	1.34
	B	2.23	3.37	0.84	0.38	0.25	1.51
	C	2.11	2.56	0.76	0.36	0.30	1.21

注：表中比值一为方案三计算结果与方案一计算结果比值；比值二为方案三计算结果与方案二计算结果比值；比值三为方案二计算结果与方案一计算结果比值。

由表 3 可以看出，采用隔震技术的方案三的地震响应均小于传统设计的方案一，其比值最大为 0.52；对应非隔震设计的方案二，方案三的减震效果更为明显，其比值最大为 0.39。由于方案二的子结构为轻钢结构，其阻尼比、楼层刚度、楼层质量均不同于方案一，其地震时结构地震响应大于方案一，其比值最小为 1.21。上述数据表明，巨-子结构体系中的轻型子结构有必要采取隔震技术措施。

3.5 分析

结构振动的被动控制有两条基本途径[8]：一是通过材料屈服耗散能量；二是通过振动模态间的相

互传递,将结构的振动传递给附加质量,如调谐质量阻尼器 TMD,建筑结构的振动传递给 TMD,由 TMD 的阻尼元件耗散能量,从而减小建筑结构的振动。

研究表明[8]:在 TMD 体系中,当外部激励频率(或卓越频率)高于主结构的固有频率(或基本频率)时,系统具有较好的减震控制效果。因此,建设在一般场地上的高层建筑等柔性结构,被动调谐质量减震控制的减震效果是明显的。此外,TMD 的减震效果,还随主结构阻尼比的减小而提高,也和子结构的数量、子结构的质量、子结构的阻尼成正比。

通常,超高层建筑等柔性结构主振型并不明显,因此,必须考虑多个振型的结构减震控制,要考虑适当增大子结构的阻尼或装设多个子结构。

计算表明,本工程结构所设计三个方案的第一、第二阶振型均为平动,X、Y 向振型质量参与系数约为 65%,高阶振型质量参与系数较大,因而高阶振型不容忽视。结构的第三阶振型均为扭转振型。自第四阶振型始,结构振动的形式差异凸现,方案三表现为子结构平动,子结构的 TMD 作用明显。观察主振型结构的振动,可以发现,子结构隔震垫均已屈服,子结构振动迟滞,从而令主结构基本周期延长,地震作用减小,此外,隔震支座屈服耗散能量的作用也是显然的。

由于本工程系超高层结构,结构总质量的主要部分在于竖向构件,轻钢子结构总质量约占结构总质量的 25%,比一般 TMD 子结构质量占比 5% 大得多,且以多子结构形式出现,符合上述理想 TMD 减震系统理念,减震效果良好。和文献[4—7]相比,本文讨论的结构方案更具有实际工程意义。

采用轻钢子结构的方案二、三,完全发挥了钢结构高强、轻质、可改、绿色等优点,结构的总质量较小,基础造价低,经济性好;方案二子结构楼层的地震响应大于传统设计的方案一,必须对子结构采取减震措施,而在子结构柱下设置了隔震支座后,结构的振动得到了很好的控制。

4　结论

通过分析可以得到以下结论。

1)集纳巨型结构力学特点和各自建材性能优点以及现代减震控制技术的巨-子组合减震结构,具有减震、二元受力、组装、高灵活性以及经济性好等特点。

2)由于材料性能的差异和楼层刚度、楼层质量等的差异,巨-子组合结构中轻钢子结构楼层的振动响应大于传统设计的结构,应对子结构采取减震措施。在子结构采取隔震技术措施后,子结构的振动得到了很好的控制。

3)巨-子组合减震结构中隔震子结构对主结构的减震作用体现在隔震支座屈服耗散能量以及振动模态间的相互传递(多系统 TMD)。

4)采用巨-子结构体系、子结构隔震技术,解决了橡胶垫隔震技术在高层建筑中应用的难题,拓展了隔震技术应用领域。

5)由于本新型结构体系中存在明显的结构层次;主、子结构材料性质完全不同;子结构柱下设置有非线性性能的隔震支座,结构特性十分复杂,尚需进一步深入研究。

参　考　文　献

1　沈蒲生. 巨型框架结构设计与施工. 北京:机械工业出版社,2007:1—14
Shen Pusheng. Design and construction of mega-frame structure. Beijing: China Machine Press, 2007:1—14

2　徐培福,傅学怡,王翠坤,等. 复杂高层建筑结构设计. 北京:中国建筑工业出版社,2005:392—395
Xu Peifu, Fu Xueyi, Wang Cuikun, *et al*. Structural design for complex tall buildings. Beijing: China Architecture Industry Press, 2005: 392—395

3　夏　昌. 钢混凝土组合型高层和超高层绿色住宅. 建筑科学,2013;29(6):6—9
Xia Chang. Steel-concrete composite high-rise and super high-rise green residential buildings. Building Science, 2013; 29(6): 6—9

4　蓝宗建,田玉基,曹双寅,等. 巨型框架多功能减振结构体系的减振机理及其减振效果分析. 土木工程学报,2002;35(6):1—5
Lan Zongjian, Tian Yuji, Cao Shuangyin, *et al*. The Mechanism and efficiency of multifunctional vibration absorption for Mega-frame structures. China Civil Engineering Journal, 2002; 35(6): 1—5

5　刘海卿,崔衍斌,王学庆. 叠层橡胶支座特性对巨-子结构减震效果影响. 华中科技大学学报,2008;25(4):36—39
Liu Haiqing, Cui Yanbin, Wang Xueqing. Influence of characteristics of laminate-rubber bearing on the seismic response of Mega-sub structure. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2008; 25(4): 36—39

6　淦克丽,盛宏玉,叶献国. 巨型框架减震结构的动力时程分析. 合肥工业大学学报,2010;33(1):81—84
Gan Keli, Sheng Hongyu, Ye Xianguo. Dynamic time-history analysis of the vibration-isolation Mega-frame. Journal of Hefei University of Technology, 2010; 33(1): 81—84

7　杨　坚,周宏德. 巨型框架多功能减震结构的参数优化. 四川建筑科学研究,2007;33(4):159—162
Yang Jian, Zhou Hongde. Parameters optimization of the multifunctional vibration-absorption Mega-frame structures. Sichuan Building Science, 2007; 33(4): 159—162

8　周福霖. 工程结构减震控制. 北京:地震出版社,1997
Zhou Fulin. Vibration-reduction control of engineering structures. Beijing: Earthquake Press, 1997

9　汪大绥,周建龙,包联进. 超高层建筑结构经济性探讨. 建筑结构,2012;42(5):1—7
Wang Dasui, Zhou Jianlong, Bao Lianjin. Analysis on the cost of structural construction in super-tall buildings. Building Structure, 2012; 42(5): 1—7

Research on Vibration-absorption Control of Mega-sub Composite Structural System

XIA Chang
(Fuzhou Planning Design & Research Institute, Fuzhou 350003, P. R. China)

[**Abstract**] Mega structure possesses a great deal of overall stability and very high structure efficiency. Due to the respective mechanical behavior of main and sub structure, the form, building materials, and seismic performance requirements of main and sub structure can be different. By using this characteristic, a new composite structure which conforms to real engineering implication and differs from the existing mega structure and super high-rise composite structure is formed by using steel reinforced concrete to build main structure and using light steel to build substructure. In order to overcome the excessive load response of light steel substructure in the new mega composite structure system, the laminated rubber bearings are set under the column of the substructure, with the main and sub structure mentioned above, the mega-sub vibration-absorption structure is formed. Differs from the existing multi-functional vibration-absorption mega structure, the building materials in this study are also different, and possess more practical engineering implication. A 70-storey super high-rise building is compared, calculated and analyzed in various structure schemes based on this structure concept, and a series of conclusions are drawn for the engineering design.

[**Key words**] high-rise building mega-sub structural system composite structure vibration-absorption control

(上接第 244 页)

4 吴庆波. 基于虚拟机的可信操作系统关键技术及应用研究. 长沙: 国防科学技术大学, 2010
Wu Q B. The research of key techniques and application of trusted operating system based on virtual machine technology. Changsha: National University of Defense Technology, 2010

5 魏 辉, 吴庆波, 谭郁松. 基于虚拟机的运行时入侵检测技术研究. 计算机应用与软件, 2011; 8(9): 52—55, 59
Wei H, Wu Q B, Tan Y S. Study on intrusion detection technology at running based on virtual machine. Computer Applications and Software, 2011; 8(9): 52—55, 59

6 曾勇军, 耿俊燕, 奚 琪. Linux 可信引导技术研究. 计算机应用与软件, 2009; 26(8): 275—277
Zeng Y J, Geng J Y, Xi Q. Research on Linux trusted booting technology. Computer Applications and Software, 2009; 26(8): 275—277

7 Rutlowska J, Wojtczuk R. Qubes OS architecture. Invisible Things Lab, http://invisiblethingslab.com. 2010

8 邓晓军. 可信计算的研究与发展. 计算机安全, 2008; (2): 32—34
Deng Xiaojun. Research and development of trusted computing. Computer Security, 2008; (2): 32—34

9 刘孜文. 基于可信计算的安全操作系统研究. 合肥: 中国科学技术大学, 2010
Liu Z W. Research on secure operating system based on trusted computing. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010

Design and Research of Multiple Network Security Office System Based on Virtualization

YANG Qi-chao, XU Kai-yong, SHANG Jing, HE Zhou-yang
(The PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450001, P. R, China)

[**Abstract**] With the constant improvement of the degree of informatization, departments usually need to access different network to complete normal office business, such as the internal office network, external office network and Internet. In order to solve the security problem of multiple network office, the multiple network office terminal based on virtualization technology was proposed. By introducing key strategies, such as control strategy, security policy and credible strategy, the function of information one-way import, peripheral control, information controlled copies between virtual machine, trusted startup and transparent storage encryption can be realized.

[**Key words**] virtualization multiple network office trusted startup controlled information