

巨型框-筒结构的地震反应分析*

Study on Seismic Response of Megaframe-Tube

Structures

邓志恒, 林倩, 安沁丽

Deng Zhiheng, Lin Qian, An Qinli

(广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004)

(Coll. of Civil & Architectural Engi., Guangxi Univ., Nanning, Guangxi, 530004, China)

摘要: 采用空间有限元计算模型和时程分析方法, 分析巨型框-筒结构的地震反应, 比较巨型框-筒结构与普通框-筒结构的抗震性能. 结果表明: 两者的受力性能相似, 巨型框-筒结构的前 2 阶自振周期比普通框-筒结构稍大, 而其后 13 阶自振周期均比普通框-筒结构小; 两者的振型图相似, 第 3、6 阶振型以扭转为主; 迁安地震波、EL Centro 地震波和天津宁河地震波作用下, 2 种结构在控制结构体系的顶点位移、顶层速度、最大楼层加速度相差均不超过 7%, 而底层剪力、弯矩相差略大, 且巨型框-筒的底层最大弯矩均小于普通框-筒; 罕遇地震作用下, 结构的顶层位移、速度、加速度反应谱相似. 说明巨型框-筒结构具有良好的抗震性能, 可以用于高层建筑的抗震设计.

关键词: 巨型框-筒 地震反应 有限元法 时程分析

中图分类号: TU352.1; O241.82 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2005)02-0106-05

Abstract The finite element method of structural dynamics is applied to analyse the seismic response of megaframe-tube structures, and a comparison is made between the megaframe-tube and traditional frame-tube structures. The results of the examples in this paper show that the characteristics of seismic response for these two kinds are similar, the first two periods of megaframe-tube structure are little more than frame-tube structure, and the next 13 periods are opposite, these two kinds of structures have similar mode shapes, the 3rd and 6th mode shapes are torsion shape. Under Qian'an, EL Centro and Tianjin Ninghe earthquake excitations, the differences of top floor displacement, velocity and acceleration of these two kinds of structures are less than 7%, but the differences of the bottom floor shear force and moment are a little bigger, and the maximum values of the bottom floor moment of the megaframe-tube structure are all less than that of frame-tube structure. Under rare seism, the top floor displacement, velocity and acceleration time histories of these two kinds of structures are similar. All these show that megaframe-tube system has a good seismic performance, and can be applied to the seismic design of tall buildings.

Key words megaframe-tube, seismic response, finite element method, time-history analyses

随着经济的发展和城镇化建设的不断加快, 现代建筑无论是在建筑形式还是在建筑结构体系上均有很大变化和创新. 高层建筑的功能趋向于多样化和综合化, 建筑的平面布置和竖向体型日趋复杂. 这些趋

势和变化对建筑物的抗侧力体系和建筑功能适应性提出了更高要求. 巨型建筑结构体系正是适应上述高层建筑发展趋势和特点的巨型结构体系^[1~4].

巨型框-筒结构体系是一种高层及超高层建筑巨型结构新体系, 它集预应力混凝土结构、巨型框架体系、框筒结构体系于一体, 是一种具有良好发展前景的高层及超高层建筑结构新体系^[5]. 巨型框-筒结构体系是出现多次转换的结构体系, 因而其结构动力特性及抗震性能是工程设计人员所关注的关键问题, 也

收稿日期: 2004-09-03

修回日期: 2004-10-26

作者简介: 邓志恒 (1963-), 男, 湖南邵东人, 博士, 教授, 主要从事结构抗震及控制研究.

* 广西自然科学基金 (0135049) 资助项目.

是结构体系发展和完善的关键,目前这方面的研究还很少^[1-6].

本文采用空间有限元计算模型对一栋48层的超高层建筑进行了动力特性分析,并采用普通框筒结构体系和巨型框筒结构体系分别进行设计,比较了两者的抗震性能.

1 结构模型

典型的巨型框筒结构体系平面图、立面图如图1所示^[5,6].结构的外圈采用巨型框架体系,分为主结构和次结构,主结构是由巨型梁和巨型柱组成的主框架.次结构是布置在主框架巨型梁之间的次框架,起辅助作用,并负责将竖向荷载传给主框架.结构内部设置的混凝土芯筒与巨型框架一起抵抗侧力.计算模型采用空间有限元计算模型,核心筒体采用在4节点等参单元基础上用静力凝聚原理构造的一种超单元,各层楼板采用壳单元,巨型框架梁、柱采用空间杆单元.

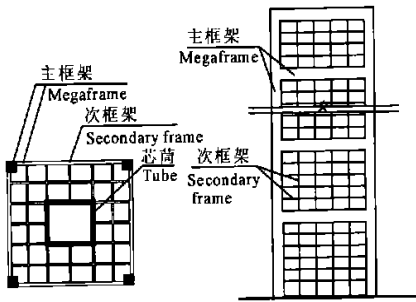


图1 体系平面图、立面图

Fig. 1 System plane, elevation

2 结构动力时程分析方法

动力时程分析法有直接积分法,它主要基于以下2个基本假定^[7]:

(1)在各时间内进行离散,原方程在任何时刻都满足平衡要求,经离散后,只有在离散的时间区间 Δt 内满足平衡要求.这样,只需寻求在一些离散时间上的平衡,那么除了惯性力和阻尼力的影响外,原动力平衡问题基本上与静力问题一样.

(2)假定每个时间区间 Δt 内的位移、速度、加速度的变化.对位移、速度、加速度的变化采用不同的假定形式,列出不同的解题方法,同时也决定了求解过程的精度、稳定性和所需计算量的大小.

假定整个时间区段 $[0, T]$ 被分成 n 等份,即

$$\Delta t = T/n, \quad (1)$$

则结构系统动力平衡方程为:

$$MX_{i+1}'' + CX_{i+1}' + KX_{i+1} = -MZ_{i+1}, \quad (2)$$

其中, $X_{i+1} = X_i + \Delta X_{i+1}$; $X_{i+1}' = X_i' + (1 + V)X_i''\Delta t + VX_{i+1}''\Delta t$; $\Delta X_{i+1} = X_i'\Delta t + (-\frac{1}{2} + U)X_i''\Delta t^2 + UX_{i+1}''\Delta t^2$; M, C, K 分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵; V, U 为积分参数; Z_{i+1} 为第 $i+1$ 时间区间的地面运动加速度; $X_i, X_{i+1}, \Delta X_{i+1}$ 分别为结构在第 i 时间区间内的位移、第 $i+1$ 时间区间的位移和位移增量.

由于影响阻尼矩阵 C 的因素较多,在线弹性阶段,假定 C 与刚度阵 K 、质量 M 间满足如下关系:

$$C = \frac{M}{f_1} f_2 K, \quad (3)$$

其中, $f_1 = (k_j^2 - k_i^2) / 2k_i k_j (\lambda_i k_j - \lambda_j k_i)$; $f_2 = 2k_i k_j (\lambda_j k_j - \lambda_i k_i) / (k_j^2 - k_i^2)$; λ_i, λ_j 和 k_i, k_j 分别为第 i, j 振型的阻尼比和频率.对高层建筑取 $i=1, j=3$.

动力方程求解采用Newmark- β 法求解^[7].

3 算例

48层超高层建筑结构 X, Y 方向跨度为32m, 30m, 筒体尺寸为12m \times 10m, 楼层层高均为3.6m.采用2种结构布置方案:方案一是采用普通框筒结构体系(平面图如图2所示),具体尺寸:1~16层柱为1.5m \times 1.5m, 17~32层柱1.4m \times 1.4m, 33~48层柱1.3m \times 1.3m, 外环梁尺寸均为0.4m \times 1.0m, 筒体厚度1~16层为0.7m, 17~32层为0.5m, 33~48层为0.3m, 梁、柱和筒体采用的混凝土等级为1~16层C60, 17~32层C40, 33~48层C30, 楼板混凝土均采用C30;方案二是采用巨型框筒结构体系(如图3所示),巨型框架设6层,沿高度每隔7层设1层.具体尺寸:1~16层巨型柱为2.4m \times 2.4m, 17~32层柱2.2m \times 2.2m, 33~48层柱2.0m \times 2.0m, 次框架柱尺寸均为0.4m \times 0.4m, 巨型梁尺寸均为0.8m \times 2.5m, 次框架外环梁尺寸均为0.25m \times 0.8m, 梁、柱、筒体和楼板混凝土等级以及筒体厚度与方案一相同.

总体上,两方案梁、柱截面相当,筒体尺寸一致,适于进行比较.

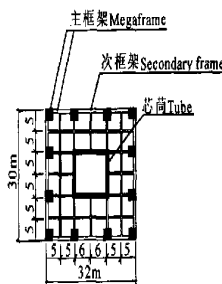


图2 普通框筒结构平面图

Fig. 2 Frame-tube system plane

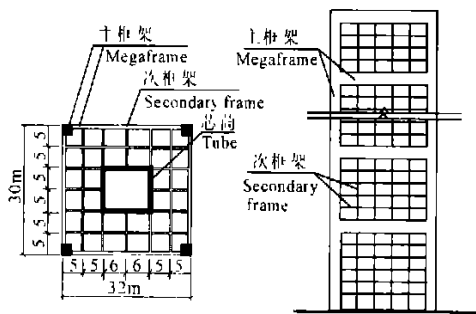


图3 巨型框筒结构平面图、立面图

Fig. 3 Megaframe-tube system plane, elevation

3.1 结构的周期和振型

从表1的比较可知,2种结构体系前5阶振型的周期均超过1s,其中巨型框筒结构的前2阶自振周期分别超过普通框筒结构7.8%和10.1%,后3~15阶的周期均小于普通框筒。

图4和图5列出了2种结构体系的前3阶振型图,从图中可以看出两者的振型图相似,其中第3阶振型以扭转为主。从基频上看巨型框筒结构的抗侧刚度相当大,它是一种有效的抗侧力体系。

表1 框筒结构的自振周期

Table 1 The periods of the two kinds of frame-tube structures

前5阶周期 The first 5 periods					
普通框筒(s) Frame-tube	5.099	4.603	2.119	1.335	1.207
巨型框筒(s) Megaframe-tube	5.497	5.069	1.939	1.248	1.117
前5阶周期 The first 5 periods					
普通框筒(s) Frame-tube	0.804	0.615	0.551	0.481	0.364
巨型框筒(s) Megaframe-tube	0.667	0.530	0.470	0.399	0.308
前5阶周期 The first 5 periods					
普通框筒(s) Frame-tube	0.343	0.319	0.263	0.251	0.222
巨型框筒(s) Megaframe-tube	0.283	0.268	0.217	0.208	0.184



图4 普通框筒结构的前3阶振型

Fig. 4 The first three models of frame-tube structure

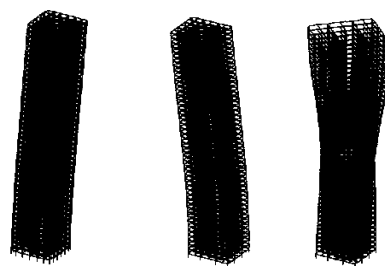


图5 巨型框筒结构的前3阶振型

Fig. 5 The first three models of megaframe-tube structure

3.2 多遇地震作用下的时程分析

采用空间三维结构分析程序对2种结构体系进行时程分析。输入迁安地震波(QIA)、EL Centro地震波(ELC)和天津宁河波(NIN)。图6为2种结构体系的最

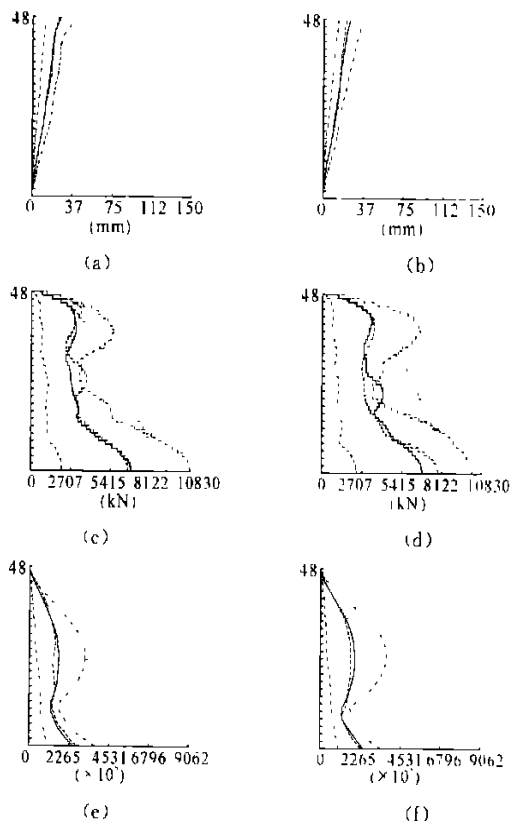


图6 最大地震响应(X方向)

Fig. 6 The maximum values of seismic response (X direction)

(a)普通框筒最大楼层位移;(b)巨型框筒最大楼层位移;(c)普通框筒最大楼层剪力;(d)巨型框筒最大楼层剪力;(e)普通框筒最大楼层弯矩;(f)巨型框筒最大楼层弯矩。(a) The maximum values of frame-tube floor displacement;(b) The maximum values of megaframe-tube floor displacement;(c) The maximum values of frame-tube floor shear force;(d) The maximum values of megaframe-tube floor shear force;(e) The maximum values of frame-tube floor moment;(f) The maximum values of megaframe-tube floor moment.
—:平均 Average reaction; - - - : QIA; —: ELC; - - - : NIN; —: 平方和的平方根 SRSS.

大楼层位移曲线、最大楼层剪力曲线、最大楼层弯矩曲线。表 2 为 2 种结构的最大楼层反应。从图 6 和表 2 的比较可知:

(1) 3 种地震波分析得到的巨型框-筒 X 方向的顶点位移与普通框-筒结构相近,最大仅相差 6.3%。

(2) 迁安地震波、EL Centro 地震波分析得到的巨型框-筒 X 方向的底层剪力要大于普通框-筒结构,迁安波分析结果相差 10.92%, EL Centro 相差 16.54%;而天津宁河波则相反,两者相差 4.51%。

(3) 3 种地震波分析得到的巨型框-筒 X 方向的底层最大弯矩均小于普通框-筒,最大相差 11.60%。

(4) 3 种地震波分析得到的巨型框-筒 X 方向的顶层最大速度均小于普通框-筒结构,最大仅相差 4.44%。

(5) 迁安地震波、天津宁河地震波分析得到的巨型框-筒 X 方向的最大楼层加速度略大于普通框-筒结构,分别相差 6.24%、4.40%, EL Centro 波的结果相反,两者相差 5.00%。

(6) 2 种结构体系的最大楼层位移曲线、剪力曲线和弯矩曲线的形状相似。

3.3 罕遇地震作用下的时程分析

输入 EL Centro 地震波(最大加速度为 341.7 cm/s^2)对 2 种结构体系进行弹塑性时程分析。图 7 为 2 种结构体系方案的顶层侧移时程、速度时程、加速度时程。

从本文的算例分析结果可知,巨型框-筒结构和普通框-筒结构在受力性能上相似:巨型框-筒结构的

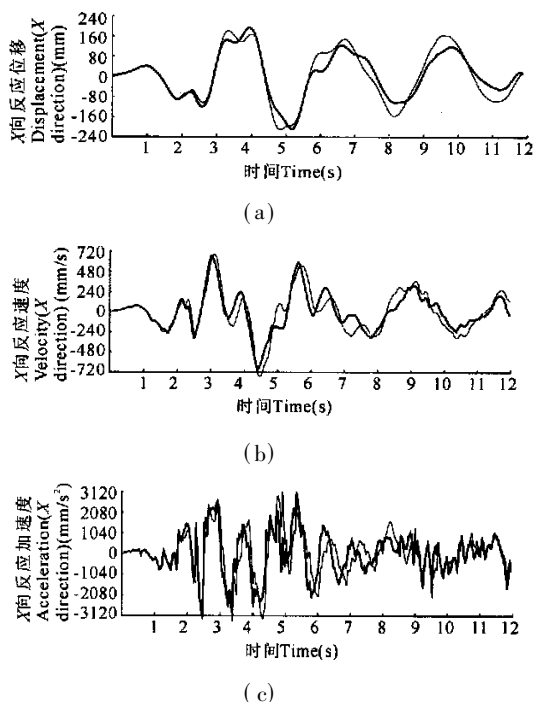


图 7 地震时程响应 (X 方向)

Fig. 7 The seismic response time histories (X direction)

(a) 顶层侧移时程; (b) 顶层速度时程; (c) 顶层加速度时程. (a) Top floor displacement; (b) Top floor velocity time histories; (c) Top floor acceleration time histories
— 巨型框-筒 Megaframe-tube — 普通框-筒 Frame-tube
前 2 阶自振周期比普通框-筒结构稍大,而其后 13 阶自振周期均比普通框-筒结构小. 两者的振型图相似,第

表 2 框-筒类型的最大地震响应

Table 2 The maximum values of seismic response of 2 kinds of frame-tube structures

最大地震响应 The maximum values of seismic response	迁安波 Qian'an earthquake		EL Centro 波 EL Centro earthquake		天津宁河波 Tianjin Ninghe earthquake	
	普通 Frame-tube	巨型 Megaframe-tube	普通 Frame-tube	巨型 Megaframe-tube	普通 Frame-tube	巨型 Megaframe-tube
最大楼层位移(第 48 层)(mm) The maximum values of floor displacement(top floor)	12.73	13.41	21.09	22.43	43.11	40.50
最大楼层剪力(第 1 层)(kN) The maximum values of floor shear force(bottom floor)	2151.6	2386.5	6847.6	7980.3	10816.4	10328.2
最大楼层弯矩(第 1 层)($\times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}$) The maximum values of floor moment(bottom floor)	1.036	0.987	2.647	2.340	3.726	3.300
最大楼层速度(第 48 层)(mm/s) The maximum values of floor velocity(top floor)	29.3	28.0	101.5	97.1	148.5	146.6
最大楼层加速度(第 48 层)(mm/s^2) The maximum values of floor acceleration(top floor)	413.3(32) 401.4	439.1(9) 381.8	779.2(35) 737.0	740.5	809.8	845.1

注: 括号表示最大响应出现的楼层. Note: Where () is the floor number which has the maximum values of seismic response.

3 6阶振型以扭转为主. 迁安地震波、EL Centro地震波和天津宁河地震波作用下, 普通框-筒结构体系和巨型框-筒在控制结构体系的顶点位移、顶层速度、最大楼层加速度相差均不超过 7%, 而底层剪力、弯矩相差略大(相差 10%左右, 个别达 17%), 且巨型框-筒的底层最大弯矩均小于普通框-筒. 罕遇地震作用下, 结构的顶层位移、速度、加速度反应谱(图 7)相似.

4 结束语

巨型框-筒结构体系和普通框-筒结构体系均具有良好的抗震性能, 两者具有相似的振型. 巨型框架多次转换未出现较大的刚度突变和结构薄弱层. 本文的分析结果表明, 巨型框-筒结构体系与普通框-筒结构体系一样具有良好的抗震性能, 可以用于抗震设计.

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] 刘大海, 杨翠如. 高层建筑结构优选[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
 [3] 惠卓, 秦卫红, 吕志涛. 巨型建筑结构体系的研究与展望[J]. 东南大学学报, 2000, 30(4): 1-8.
 [4] 沈祖炎, 陈荣毅. 巨型结构的应用与发展[J]. 同济大学学报, 2001, 29(3): 258-261.
 [5] 邓志恒, 秦荣, 谢肖礼. 预应力巨型框-悬挂结构新体系[J]. 世界地震工程, 2000, 16(4): 96-100.
 [6] 邓志恒, 秦荣. 巨型框筒部分悬挂结构控制体系地震反应特性及阻尼控制研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(4): 133-138.
 [7] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

(责任编辑: 黎贞崇)

(上接第 105页 Continue from page 105)

导致了交通阻塞. 计算机数值模拟结果得到的基本图显示出较大的交通容量, 接近于实测的交通容量, 而且还显示出交通崩溃这一复杂的实际交通行为.

参考文献:

[1] Nagel K, Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. J Phys I (France), 1992, 2: 2221-2229.
 [2] Fukui M, Ishibashi Y. Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed[J]. J Phys Soc (Japan), 1996, 65: 1868-1870.
 [3] Biham O, Middleton A A, Levine D. Self-organization and a dynamical transition in traffic flow models[J]. Phys Rev A, 1992, 46: R6124-R6127.
 [4] OLSIM. Online Simulation of the Inner City of Duisburg [EB/OL]. Physics of Transport and Traffic University of Duisburg. <http://traffic.comphys.uni-duisburg.de>. 2002-12-30.
 [5] Rickert M, Nagel K. Experience with a simplified micro-simulation for the Dallas/Fort-Worth area[J]. Int J Mod Phys C, 1997, 8: 483.
 [6] Kauman O. On-line simulation of the freeway network of North Rhine Westphalia [M]. In: Helbing D,

Herrman H J, Schreckenberg M eds. Traffic and Granular Flow 99. Singapore: Springer, 2000. 351.

[7] Wagner P. Traffic simulations using cellular automata comparison with reality [M]. In Traffic and granular flow. Singapore World Scientific, 1996: 193.
 [8] Chowdhury D, Santen L, Schreckenberg A. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems [J]. Phys Rept, 2000, 329: 199-329.
 [9] Barlovic R, Santen L, Schadschneider A, et al. Metastable states in cellular automata for traffic flow [J]. Eur Phys J B, 1998, 5: 793-800.
 [10] Takayasu M, Takayasu H. 1/f noise in a traffic model [J]. Fractals, 1993, 1: 860-866.
 [11] Benjamin S C, Johnson N F, Hui P M. Cellular automaton models of traffic flow along a highway containing a junction [J]. J Phys A, 1996, 29: 3119-3127.
 [12] Zhang H M. A non-equilibrium traffic flow model devoid of gas-like behavior [J]. Transport Res B, 2002, 36: 275-290.
 [13] Xue Yu, Dai Shiqiang. Continuum traffic model with the consideration of two delay time scales [J]. Phys Rev E, 2003, 68(066123): 1-6.

(责任编辑: 黎贞崇)