

非对称大底盘双塔连体结构的 动力特性和地震响应分析^①

郭涛¹, 宋娟², 姚激¹, 魏业清¹

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224;

2. 邵阳学院 城市建设系, 湖南 邵阳 422000)

摘要:依据现行抗震设计规范,运用三维有限元软件 ANSYS 对某 25 层大底盘非对称双塔连体结构进行了时程法地震反应分析,得到结构的自振特性和地震响应,并与未设连体的双塔结构的结果进行了比较。结果表明增设连体后双塔的扭转振型更加丰富,且运动和变形得到了统一和协调。

关键词:高层建筑;双塔结构;连体;地震响应;时程分析

中图分类号: TU311.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2009)03-0254-05

Dynamic Characteristics and Seismic Responses Analysis of Unsymmetrical Double-tower Connecting Structure with Large Chassis

GUO Tao¹, SONG Juan², YAO Ji¹, WEI Ye-qing¹

(1. Kunming University of Science and Technology Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kunming 650224, China;

2. Department of Urban Construction, Shaoyang University, Hunan Shaoyang 422000, China)

Abstract: According to the present Code for Seismic Design of Buildings, a time history method of seismic analysis for a 25-story unsymmetrical double-tower connecting structure, is carried out by using FEA software ANSYS. Its dynamic characteristic and seismic responses are analyzed, and compared with the double-tower structure without connection. The results show that the structure has complex torsional modal and its movement and deformation are harmonized when set the connection.

Key words: Tall building; Double-tower structure; Connection; Seismic responses; Time-history analysis

0 引言

带有双塔楼的高层建筑是大底盘多塔楼高层建筑中最常见的结构形式之一^[1]。目前越来越多的双塔都采取在上部塔楼间某些楼层设置连体(如连廊)的结构形式,既加强了两塔间的联系又使连体自身具有了特殊的使用功能,例如作为紧急情况下的安全通道和观光走廊或咖啡吧、餐厅等。由于连体结构的存在,塔楼之间将相互作用,造成该结构比一般高层建筑要复杂得多。因此对大底盘多塔楼连体结构进行广泛全面的研究有重要意义。

目前,国内外学者还对大底盘多塔楼连体结构形式进行了大量的试验和理论研究。其中试验主要集中在整体结构模型模拟地震振动台研究和风洞试验。理论研究包括静力与动力两个方面,动力方面的研究主要是应用振型分解反应谱法、动力时程分析法、随机分析法、能量分析法和静力推覆法等方法分析对称和非对称双塔连体结构的动力特性和地震响应。如文献[1]探讨了双塔结构平动与扭转耦联时的振动特性,但是其结论只适用具有对称性的双

① 收稿日期:2008-10-09

基金项目:湖南省教育厅基金项目(08C792)

作者简介:郭涛(1983-),男(汉族),云南玉溪人,硕士研究生,从事计算力学及水工结构方面的研究。

塔高层建筑结构;文献[2]着重对双塔结构的地震反应特点进行了平面分析,指出对称双塔和非对称双塔结构动力特性具有较大差异,其中高塔地震反应加重,低塔部分反应相应减弱而且由于上部双塔振动的非对称性,底部部分裙房出现较强的扭转变形;文献[3、4]运用连续化方法研究了大底盘多塔和双塔连体结构的动力特性,但是其算例仅针对对称双塔楼结构的情况;文献[5、6]进一步研究了连体两端连接刚度和自身刚度对双塔动力特性的影响。本文在文献[5、6]的基础上将对非对称双塔结构的动力特性和地震反应做进一步探讨。

1 工程概况

某花园大厦结构形式为框架-剪力墙结构,底部裙房3层,上部主体结构的高塔22层,共25层,低塔为21层。楼层高均为4.0 m,占地面积2 960 m²,总建筑面积31 920 m²。在塔顶部设两层连廊(20、21层),连廊跨度10 m。柱截面为800 mm×800 mm,剪力墙厚300 mm,混凝土强度等级梁柱取C40,板采用C30。基础采用桩筏基础;地震设防烈度Ⅶ度(0.1 g);拟建场地类别Ⅱ类,设计地震分组Ⅰ组。其平面图见图1。

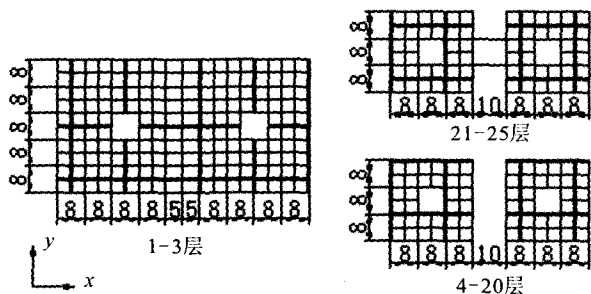


图1 非对称双塔连体结构平面示意图

Fig.1 Structural plan of unsymmetrical double-tower connecting structure.

2 计算模型

计算模型采用凝聚模型:对塔楼楼层引入楼板面内刚度无穷大假定进行静力凝聚,凝聚后楼层只考虑水平向和绕竖向扭转的自由度。柱、梁选用空间梁单元,均采用3节点 beam4 梁单元,每个节点有3个平移自由度和3个扭转自由度,单元包含应力强化和大变形效应,且可以考虑拉伸、压缩、扭转和弯曲。为便于单元连接,楼板采用4节点 shell63 壳单元模拟,单元包含应力强化和大变形能力,可以承受面内荷载和横向荷载。整个双塔结构模型离散为20 288个单元,共10 935个节点。不考虑填充的

墙影响;不考虑土-上部结构共同作用;基础与地基刚接;约束与地面接触的框架柱上节点的所有自由度。计算模型见图2。

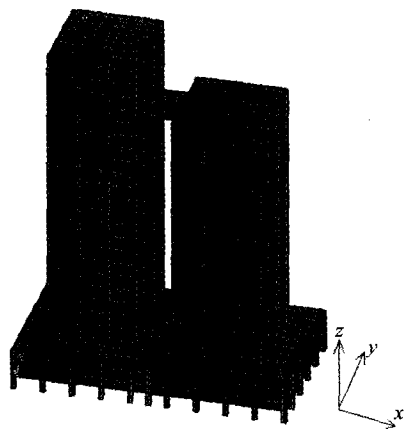


图2 整体计算有限元模型

Fig.2 Structure FEA model.

通过对比发现连体连接方式的不同(铰接和固接)对连体结构整体动力响应的影响较小,主要是对连体本身和所连楼层有所影响。在铰接和刚接情况下,结构只在高阶频率区别明显,在振动形态方面对结构的低阶振型几乎没有影响^[10](从十三阶振型开始有明显的区别)。限于篇幅,本文仅列出连体固接和无连体的情况。

3 动力特性分析

模态分析是用来确定结构振动特性的方法,这些振动特性包括结构的固有频率、振型和振型参与系数等。模态分析同时也是其他更为详细动态分析的起点。

模态分析的求解是经典的特征值问题,可表示为

$$[K]\{\varphi_i\} = \omega_i^2 [M]\{\varphi_i\} \quad (1)$$

式中: ω_i 、 $[\varphi_i]$ 、 $[K]$ 、 $[M]$ 分别为第*i*阶模态的圆频率、振型向量、刚度矩阵和质量矩阵。

本文选取了结构的前三十阶模态进行分析,表1列出了该结构在未设连体和设置连体时的前20频率。从表中可以看出,有连体双塔楼的各阶自振周期均比无连体双塔楼的各阶自振周期要小,分析其原因主要是连体结构刚度大,无连体结构低阶振型都是双塔各自独立的振动。

《高规》4.3.5条规定,对复杂高层建筑,结构扭转为第1周期与平动为第1周期之比不应大于0.9。它的目的是要限制结构的抗扭刚度不能太弱。对于无连体多塔结构,因为具有各自相对独

立的振动形态,所以应各塔分别计算。对于高塔楼 $T_5/T_1=0.473$,低塔 $T_6/T_3=0.509$ 。对于连体结构(固接) $T_4/T_1=0.290$ 。

表1 结构前20阶周期

振型	周期		振型	周期	
	双塔结构	双塔连体结构		双塔结构	双塔连体结构
1	1.915 7	1.772 9	11	0.311 0	0.238 4
2	1.884 8	1.723 8	12	0.254 8	0.234 5
3	1.468 6	1.196 4	13	0.230 7	0.213 0
4	1.431 5	0.513 8	14	0.221 7	0.196 7
5	0.907 0	0.490 7	15	0.212 2	0.184 3
6	0.747 2	0.475 0	16	0.193 7	0.182 4
7	0.493 1	0.447 2	17	0.182 7	0.182 4
8	0.481 0	0.411 9	18	0.181 3	0.181 5
9	0.379 2	0.339 0	19	0.172 0	0.167 3
10	0.361 7	0.271 3	20	0.164 2	0.164 1

构的前四阶振型分别是高塔(1、2阶)和低塔(3、4阶)的水平侧移,如1、3和2、4分别是沿 y 、 x 向的平动,后两阶分别是高塔和低塔 xy 平面的扭转振型,竖向振动出现在高阶振型(17阶)。整体来看无连体结构呈现出高低塔各自独立的振型,在高阶振型中会出现相互间振型的耦合并伴有平动和扭转振动形态的耦合,但耦合不强。增设连体后结构的整体刚度得到了提高,使两塔楼的振动变形有所统一和协调,两塔间的相互作用明显。前三阶振型的侧移方向和无连体时一样,表现出双塔同向振动(1、3阶因连体的作用,伴有部分扭转振动)。连体结构的高阶振型表现出平动与扭转耦合的复合振型,且扭转振型更加丰富,17、20阶为竖向振动。

结构前几阶振型如图3、4所示。未设连体时结

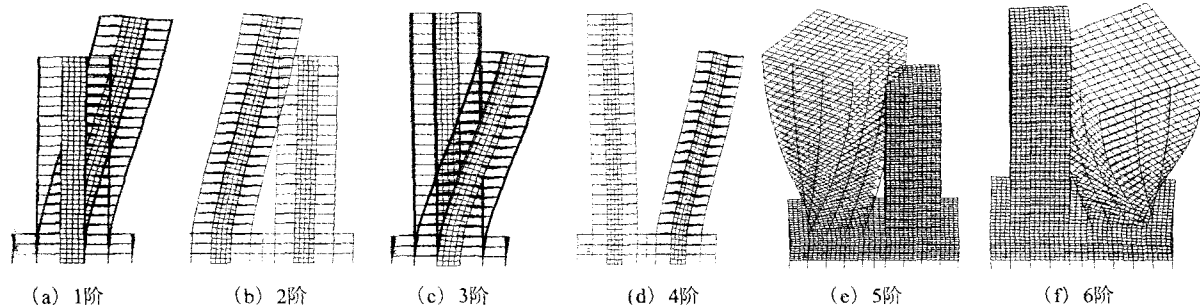


图3 非对称双塔结构的前6阶模态

Fig. 3 The first six Mode Shapes (MS) of Double tower Structure without connection.

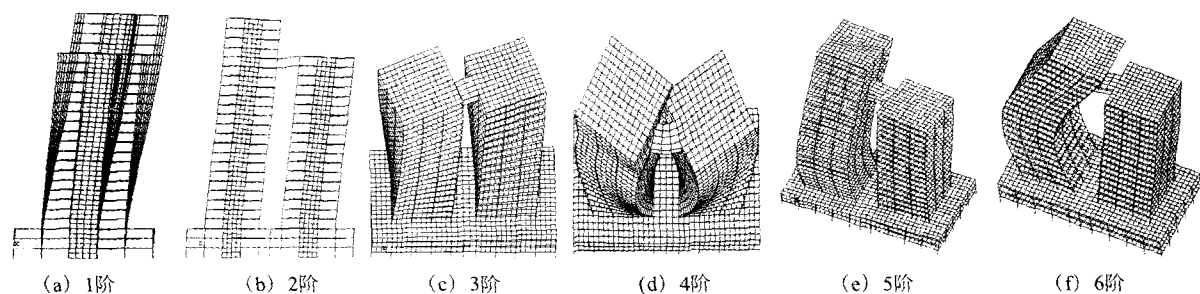


图4 非对称双塔连体结构的前6阶模态

Fig. 4 The first six Mode Shapes (MS) of Double tower Structure with connection.

4 弹性时程分析

目前在结构抗震设计中广泛使用的方法是反应谱法,它的特点是理论比较成熟,计算简单。虽然该方法考虑了结构动力特性所产生的共振效应,然而在结构设计中仍然把地震惯性力按照静力来对待,而且在制作反应谱过程中只考虑了强震三要素中的振幅、频谱而不能反映地震动持续时间对建筑破坏程度的重要影响,只能算是一种准动力理论。因此,

作为基本设计方法它只适用于规则结构,对于不规则结构、具有明显薄弱部位的建筑以及高层建筑,各国规范要求采用时程分析方法进行补充计算,详见我国《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)规定^[7]。

时程分析法就是根据选定的地震波和结构恢复力特性曲线,在每一个很短的时间间隔 Δt 内,利用数值积分的手段求解出多质点体系运动微分方程 $[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = -\ddot{y}[m]\{l\}$ 的方法^[8],

从而求得结构在地震过程中每一瞬间的地震响应,以便观察结构在整个强震过程中从弹性到弹塑性阶段内的变形和内力变化以及开裂直至倒塌的破坏过程,因此通常称为直接动力法,在数学上亦称为逐步积分法。本文采用 Newmark- β 方法进行逐步数值积分(积分参数取 $\delta=0.5, \alpha=0.25$, 此时它是无条件稳定的线性加速度法)求解动力学方程,获得结构在地震作用下的时间历程反应。

动力分析中阻尼是结构的重要参数之一,对结构的影响不可忽略。本文采用 rayleigh 阻尼理论^[9]进行动力分析,即

$$[C] = \alpha[M] + \beta[k]$$

式中, α, β 为阻尼参数; $\alpha = \bar{\omega}_i \bar{\omega}_j (\zeta_i \bar{\omega}_j + \zeta_j \bar{\omega}_i) / (\bar{\omega}_i^2 - \bar{\omega}_j^2)$; $\beta = 2(\zeta_i \bar{\omega}_i - \zeta_j \bar{\omega}_j) / (\bar{\omega}_i^2 - \bar{\omega}_j^2)$ 。 $\bar{\omega}_i, \bar{\omega}_j, \zeta_i, \zeta_j$ 为任意两个振型的频率和阻尼比, 这里取 $\zeta_i = \zeta_j = 0.05$ 。

地震响应分析时,假设结构受 EL Centro 波的激励作用,见图 5。分别考虑 x, y 向的地震波输入,把 EL Centro 波做相应调试后用于时程分析。EL Centro 波是一个典型的 II、III 类场地的地震记录,特征周期为 0.3~0.4 s,记录时间间隔为 0.02 s,长度为 7.98 s,具有较大的加速度峰 ($A_{\max} = 341.7 \text{ gal}$),而且在相同的加速度值时,它的波形能产生更大的地震反应。

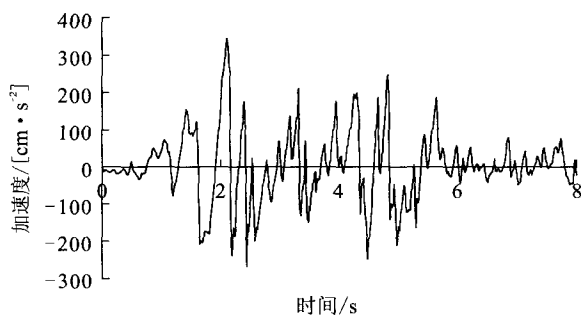


图5 地面加速度时程曲线图(EL Centro 波)

Fig. 5 Acceleration time history curve of ground (EL Centro wave).

弹性时程分析时,结构在 x, y 向输入地震波下,建筑物顶部位移和加速度时程反应曲线,水平位移沿楼高分布及层间变位角见图 6—9。表 2 是顶层响应达最大时结构各部位的地震响应极值,括号里面的是低塔的反应。

由图 6、7 和表 2 可以看出:(1)两种结构的顶层位移及加速度时程曲线走向、形状类似,数值也相差不大,分析原因主要是大底盘对上部结构的影响,使

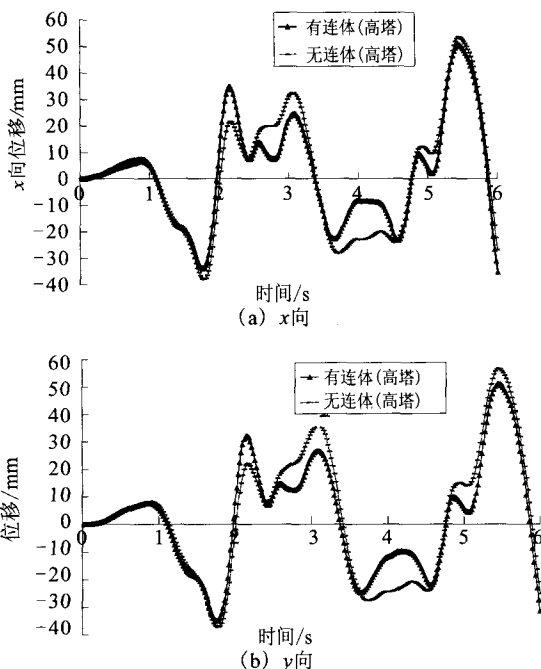


图6 输入地震波时顶层位移响应

Fig. 6 Roof displacement time history curves under El Centro earthquake input.

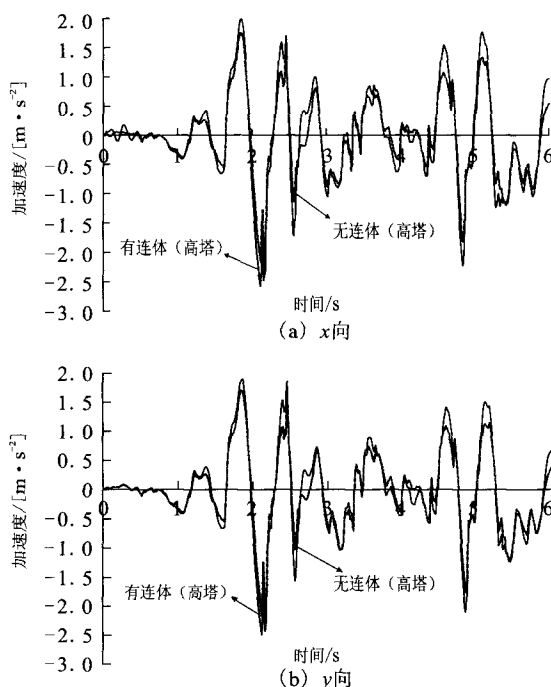


图7 输入地震波时顶层加速度响应

Fig. 7 Roof acceleration time history curves under El Centro earthquake input.

其表现出同步振动;(2)非对称双塔连体结构在 x, y 方向上的顶层位移相差不大,这说明连体的增设使两塔楼之间的运动和变形的到了协调和统一;(3)结构的整体刚度 x 向要大于 y 向,所以 y 向地震响

表 2 结构各部位的地震响应极值

	非对称双塔结构		非对称双塔连体结构	
	x 向输入地震波	y 向输入地震波	x 向输入地震波	y 向输入地震波
顶层位移/mm	53.46 (37.93)	56.49(40.46)	50.51(41.06)	50.88(40.55)
顶点加速度/[$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]	-2.15(-2.10)	-2.11(-2.08)	-2.57(-1.80)	-2.47(-1.83)
层间位移角/ $^{\circ}$	1/1456.13	1/1352.72	1/1480.93	1/1483.13
	(1/1739.89)	(1/1650.17)	(1/1622.72)	(1/1620.09)
基底剪力/[10^3 kN]	4304.9	4429.44	5183.7	4830.2
基底弯矩/[$10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}$]	4711.3	4522	5377.8	4836.2

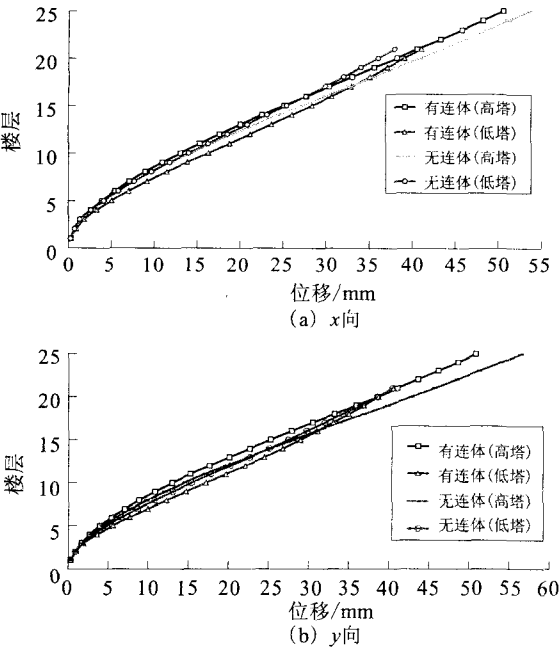


图 8 向输入地震波时水平位移沿楼高变化关系
Fig. 8 Distribution of Horizontal displacement along height under El Centro earthquake input.

应时的顶层位移要大于 x 向地震响应时;(4)双塔连体结构的高塔楼由于低塔的支撑作用,使得其侧向位移要小于双塔楼结构。

从图 9 可以看出:(1)在结构底部由于大底盘的影响,结构的层间位移角变化基本不大;(2)由于结构的整体刚度 x 向要大于 y 向,所以在 y 向地震响应时的层间位移角大于 x 向的层间位移角;(3)对于双塔结构高、低塔的层间位移角最大值分别发生在 18、13 层,双塔连体结构低塔的层间位移角最大发生在 11 层,而高塔 x 向地震作用下发生在 22 层,y 向地震作用下发生在 19 层,这些楼层都是结构在地震作用下容易产生塑性变形的地方;(4)由于连体的影响使得高塔在连体上部相邻楼层的层间位移角产生了较大的突变。

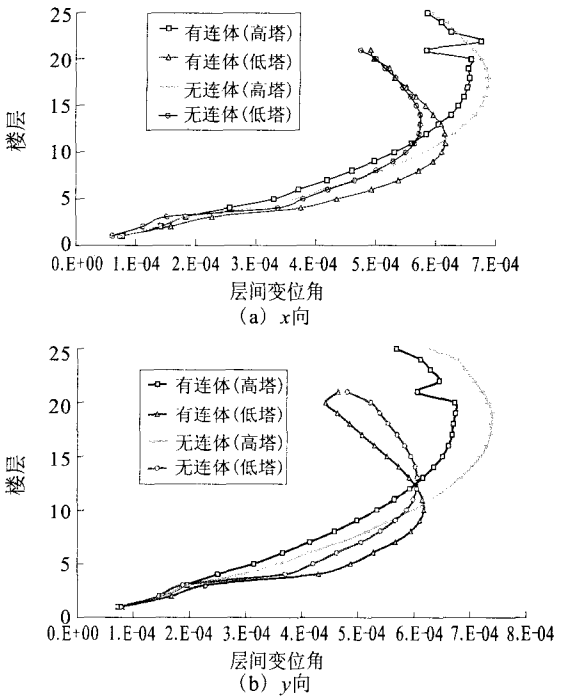


图 9 输入地震波时层间位移角沿楼高变化关系
Fig. 9 Distribution of Inter-story drift angle along height under El Centro earthquake input.

5 结语

通过以上的计算分析,对于地震作用下的非对称双塔连体结构可以得到以下几点结论:

- (1)对于双塔结构,高、低塔呈现出各自独立的振型,而增设连体后结构两塔间的相互作用明显,在高阶振型中平动与扭转的振型耦合加强,其扭转振型更加丰富;
- (2)增设连体后结构的整体刚度提高、自振周期变短;
- (3)双塔连体结构的变形有所统一和协调;
- (4)由于结构整体刚度 y 向弱于在 x 向,在加上连体的扭转,所以在 y 向地震作用下,结构的侧向位移和层间位移角相对要大。

(下转 264 页)

- 1-13.
- [5] 汪万红,张慧,苏鹤军.秦岭北缘断裂带温泉水循环深度与地震活动性的关系研究[J].西北地震学报 2008,30(1):36-41.
- [6] 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组[M].鄂尔多斯周缘活动断裂系,北京:地震出版社,1988,143.
- [7] 陆明勇,牛安福,鲁德顺,等.地壳形变与地下水动态异常特征研究进展[J].西北地震学报 2005,27(1):89-95.
- [8] 黄建国,张流.水对断层摩擦滑动稳定性的影响[J].地震地质,2002,24(3):387-399.
- [9] 陈连旺,杨树新,谢富仁,等.中国大陆构造应力应变场现今变化特征的数值模拟[J].中国地震,2005,21(3):341-349.

(上接 258 页)

[参考文献]

- [1] 范重,吴学敏.带有双塔楼高层建筑结构动力特性分析[J].建筑结构学报,1996,(6):11-17.
- [2] 薛彦涛,魏琰.底部整体裙房上部多塔结构地震反应分析[J].建筑结构学报,1989,(3):21-28.
- [3] 包世华,王建东.大底盘多塔楼结构的振动计算[J].建筑结构,1996,(6):3-9.
- [4] 包世华,王建东.大底盘多塔楼连体结构的振动计算和动力特性[J].建筑结构,1997,(6):40-44.
- [5] 黄坤耀,孙炳楠,楼文娟,等.非对称双塔连体结构的动力特性和地震响应分析[J].工业建筑,2001,(8):27-29.
- [6] 黄坤耀,孙炳楠,楼文娟.连体刚度对双塔连体高层建筑地震响应的影响[J].建筑结构学报,2001,(3):21-26.
- [7] 建筑抗震设计规范(GB 50011-2001)[S].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [8] 刘大海.高层建筑抗震设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [9] 李君如.高层建筑结构分析[M].北京:民交通出版社,1990.
- [10] 周优文,李宏.双塔楼连体结构抗震性能分析[J].四川建筑,2006,(1):124-127.