文章编号: 1007 - 6069(2011)01 - 0121 - 10

高层隔震结构扭转分析

祁 皑,商昊江,范宏伟
(福州大学 土木工程学院,福建 福州 350108)

摘 要: 为研究高层隔震结构在地震作用下的扭转效应,用Etabs软件建立1个高层抗震结构和4个具有不同扭转特性的高层隔震结构的空间模型进行地震响应分析,以验证此原则"上部结构质量中心与隔震层刚度中心的重合与否"对结构扭转效应的影响程度,而后考察偏心高层隔震结构在偶然偏心地震作用下结构的扭转效应。结果表明: 由于地震作用的减小,扭转效应要远小于原抗震结构,且隔震本身对于结构扭转效应的抑制效果要好于上述原则; 扭转效应的减震率大于平动效应的减震率。布置在隔震层平面外围的铅芯橡胶隔震支座对隔震层的扭转有一定的控制作用。

关键词: 高层隔震结构; 扭转控制; 质量中心; 刚度中心; 偶然偏心; 铅芯橡胶支座
中图分类号: TU352; P315.966 **文献标志码**: A

Study on torsion of high-rise isolation structures

QI Ai, SHANG Haojiang, FAN Hongwei
(College of Civil Engieneering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To study the torsional effect of high-rise isolation structure under seismic action, with Etabs software spatial models of a high-rise seismic structure and 4 high-rise isolation structures which have different torsional properties are established, and comparative seismic response analyses of the above-metioned 5 models are done to check up the influence of "the upper structure mass center coincident with the isolation layer rigidity center or not" on the torsion inhibition of the high-rise isolation structures. Then the torsional effect of the high-rise isolation structure under accidental eccentric seismic action is observed in the case that upper structure mass center and the isolation layer rigidity center is not coincident. The results show that as the intensity of earthquakes decreases, torsion effect is far smaller than the original seismic structure and the isolation itself has better inhibitory effect to torsion than the case of the upper structure mass center coincident with the isolation layer rigidity center; the isolation rate of torsion is greater than the isolation rate of translation. Lead rubber bearings arranged in the periphery of isolation layer plane have some control effect on the torsion of isolation layer.

Key words: high-rise isolated structure; control of torsion; mass center; rigidity center; occasional eccentricity; lead rubber bearing

引言

现代建筑,除了不断增加结构的高度,还创造很多"异形"建筑(如央视新大楼),这就在结构上产生了一定程度的"不规则",若将隔震技术应用于高层不规则结构,则扭转对高层隔震结构的影响如何以及如何控

收稿日期: 2010 - 06 - 07; **修订日期**: 2010 - 08 - 02
基金项目: 福建省科技厅重点项目(2007Y0025)
作者简介: 祁 皑(1964 -),女,教授,博士,主要从事结构振动控制、防震减灾工程研究. E-mail: qikai@fzu.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

制和减少高层隔震结构的扭转效应,是一个需要探讨的问题。

文献[1 -7]的研究都表明“上部结构质量中心与隔震层刚度中心的重合”是抑制隔震结构扭转的关键因素,但以上的研究都是基于简化的扭转模型。文中首先尝试用 Etabs 软件建立 1 个高层抗震结构和 4 个具有不同扭转特性的高层隔震结构的空间模型进行地震响应分析,以便研究“上部结构质量中心与隔震层刚度中心的重合与否”对高层隔震结构扭转效应的影响程度,而后考察偏心高层隔震结构在偶然偏心地震作用下结构的扭转效应。鉴于《高层建筑混凝土技术规程》(JGJ 3 -2002) [8] (以下简称《高规》) 使用周期比和位移比作为结构扭转的控制指标,文中将周期比和位移比作为评估结构扭转的参考指标。

1 模型的建立

以某实际工程为抗震结构原型,其结构形式为钢筋混凝土框架剪力墙结构,总高 39. 3m,底层层高 3. 6m,标准层层高 3m,顶层层高 2. 7m,丙类建筑,设防烈度为 7 度,Ⅱ类场地,特征周期为 0. 4s。文中将建立 5 种结构模型,分别为:

(1) 普通抗震结构。

(2) 无偏心隔震结构(上部结构质量中心与隔震层刚度中心基本重合) 。

(3) 无铅芯的偏心隔震结构(没有布置铅芯橡胶隔震支座) 。

(4) 中部铅芯的偏心隔震结构(在隔震层平面中部设置铅芯橡胶隔震支座) 。

(5) 外围铅芯的偏心隔震结构(在隔震层平面外围设置铅芯橡胶隔震支座) 。

无铅芯的偏心隔震结构隔震层平面布置如图 1 所示。无偏心隔震结构的隔震层平面为将图 1 中编号为 4 和 24 的隔震支座分别替换为直径为 500 和 700 的普通橡胶隔震支座,并将编号为 2、3、6、24、26、27 的隔震支座替换为同等直径的铅芯橡胶隔震支座; 中部铅芯的偏心隔震结构的隔震层平面为将图 1 中编号为 10、11、13、14、16、17 的支座替换为同等直径的铅芯橡胶隔震支座; 外围铅芯的偏心隔震结构的隔震层平面为将图 1 中编号为 1、2、3、25、26、27 的支座替换为同等直径的铅芯橡胶隔震支座。橡胶隔震支座的性能参数见表 1 和表 2。

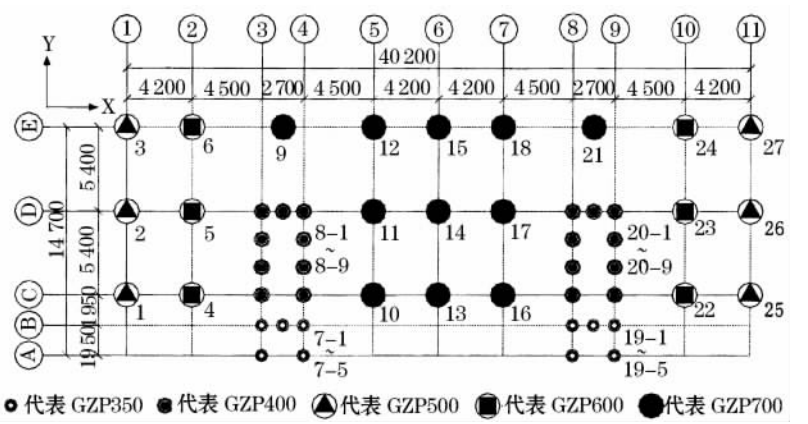

图 1 无铅芯的偏心隔震结构的隔震层平面

Fig. 1 Isolation layer of eccentric isolated structure without lead rubber bearing

表 1 普通橡胶隔震支座(GZP) 性能参数

Table 1 Performance parameters of natural rubber bearing(GZP)

型号	橡胶直径/mm	橡胶总厚度/mm	支座高度/mm	1 次形状系数	2 次形状系数	水平刚度 K_{eq}/(N·m^{-1})	阻尼比 ζ_{eq}/%	竖向刚度 K_v/(kN·m^{-1})
GZP350	350	60.0	132.50	25.5	5.83	521	<5.0	1 412
GZP400	400	68.6	132.50	25.5	5.83	595	<5.0	1 613
GZP500	500	96.0	164.00	25.5	5.21	664	<5.0	1 801
GZP600	600	110.0	185.00	29.4	5.45	835	<5.0	2 600
GZP700	700	110.0	216.50	34.5	6.36	1136	<5.0	3 900

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　铅芯橡胶隔震支座(GZY) 性能参数

Table 2　Performance parameters of lead rubber bearing(GZY)

型号	橡胶直径 /mm	橡胶总厚度 /mm	支座高度 /mm	1 次形状系数	2 次形状系数	剪切变形 γ = 250%(直径大于 600 mm 时 γ = 100%) 时的特性值				竖向刚度 K_v/(kN·m^{-1})
						屈服后刚度 K_d/(N·m^{-1})	屈服力 Q_d/kN	水平刚度 K_{eq}/(N·m)	阻尼比 ζ_{eq}/%	
GZY500	500	96.0	164.00	26.0	5.21	572	66.73	749	14.0	2 030
GZY600	600	110.0	185.00	30.0	5.45	904	96.08	1 461	23	2 900
GZY700	700	110.0	216.50	35.0	6.36	1 230	130.78	1 988	23	4 450

2　结构扭转特性分析

表 3 为 1 “模型的建立”中所述 5 种结构的上部结构质量中心和底层(隔震层) 刚度中心。

表 3　上部结构质量中心和底层(隔震层) 刚度中心

Table 3　Mass center of upper structure and rigidity center of first floor(or isolation layer)

结构	质量中心		刚度中心		相对偏心距	
	X/mm	Y/mm	X/mm	Y/mm	X/%	Y/%
抗震结构	20 402.84	9 920.01	19 995.58	9 593.69	1.0	2.2
无偏心隔震结构	20 410.06	9 980.72	20 494.63	9 929.25	0.21	0.35
偏心隔震结构(无铅芯)	20 410.06	9 980.72	20 000.00	9 189.83	1.0	5.4
偏心隔震结构(中部铅芯)	20 410.06	9 980.72	20 000.00	8 953.18	1.0	6.9
偏心隔震结构(外围铅芯)	20 410.06	9 980.72	20 000.00	9 277.63	1.0	4.8

从表 3 中的偏心距可以看出,各结构都有一定程度的偏心,且各不相同,这将影响各结构的模态。各结构的前 3 阶模态如表 4 所示。

表 4　各结构前 3 阶模态

Table 4　The first three modes of structures

结构	振型序号	周期 /s	周期比 T_t/T_1	*UX*(平移) 振型质量参与系数%	*UY*(平移) 振型质量参与系数%	*RZ*(扭转) 振型质量参与系数%
抗震结构	1	1.13	0.79	71.14 (71)	0.00 (0)	0.29 (0)
	2	0.89		0.28 (71)	2.86 (3)	66.50 (67)
	3	0.81		0.00 (71)	65.53 (68)	2.88 (70)
无偏心隔震结构	1	3.18	0.89	99.14 (99)	0.00 (0)	0.02 (0)
	2	3.05		0.00 (99)	99.74 (100)	0.00 (0)
	3	2.84		0.02 (99)	0.00 (100)	99.52 (100)
偏心隔震结构(无铅芯)	1	3.34	0.92	70.07 (70)	3.28 (3)	26.23 (26) 2
	2	3.20		16.03 (86)	70.75 (74)	12.93 (39)
	3	3.09		13.32 (99)	25.77 (100)	60.59 (100)
偏心隔震结构(中部铅芯)	1	3.24	1.08	35.87 (36)	2.67 (3)	61.11 (61) 2
	2	3.01		52.68 (89)	26.40 (29)	20.34 (81) 3
	3	2.93		10.70 (99)	70.67 (100)	18.29 (100)
偏心隔震结构(外围铅芯)	1	3.18	0.89	93.07 (93)	0.98 (1)	5.33 (5)
	2	3.05		2.09 (95)	93.98 (95)	3.68 (9)
	3	2.83		4.17 (99)	4.81 (100)	90.60 (100)

注: ( ) 内为前几阶振型质量参与系数之和; T_t/T_1 即扭转周期与平动周期的比。

从表 4 中的振型质量参与系数可以看出抗震结构的第 2 振型以扭转为主; 无偏心隔震结构各阶振型很单纯,几乎没有平扭耦联的振型存在; 无铅芯的偏心隔震结构第 1 振型虽然以平动为主,但有一定程度的扭转参与其中,而扭转振型为第 3 振型; 中部铅芯的偏心隔震结构,以扭转为主的振型已经上升至第 1 振型; 外围铅芯的偏心隔震结构,以扭转为主的振型排到第 3 振型,各振型的成分较为单纯。从抑制扭转的效果来

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

看,依次是无偏心隔震结构、外围铅芯的偏心隔震结构、无铅芯的偏心隔震结构、中部铅芯的偏心隔震结构,以上对各种结构的振型质量参与系数分析也验证了这个原则。

《高规》规定"结构扭转为主的第1自振周期 T_t 与平动为主的第1自振周期 T_1 之比,A级高度高层建筑不应大于0.9"。4种隔震结构的周期比 T_t/T_1 相对原抗震结构都有不同程度的增加,这主要是由于隔震层平面的周边的支座偏弱(即使布置了铅芯橡胶隔震支座),这似乎将加剧结构扭转相对平动的效应。

3 无附加偶然偏心双向地震反应分析

对抗震结构、无偏心隔震结构、外围铅芯的偏心隔震结构分别施加地震作用(7度罕遇),重点对比上述2种"隔震结构"的计算结果,以考察上部结构质量中心和隔震层刚度中心的重合与否对隔震结构扭转效应的影响。计算采用振型分解反应谱法,根据《抗震规范》,双向水平地震作用的扭转效应采用下列公式中的较大值确定:

$$S_{EK} = \sqrt{S_x^2 + (0.85S_y)^2},\ S_{Ek} = \sqrt{S_y^2 + (0.85S_x)^2} \tag{1}$$

式中,S_x 和 S_y 分别为 X 向和 Y 向单向水平地震作用下的扭转效应。

3.1 上部结构地震反应分析

上部结构地震反应的计算结果如表5所示。

表5 双向地震上部结构响应(无附加偶然偏心)

Table 5 Responses of upper structure under bilateral earthquake excitation(without additional accidental eccentricity)

方向	结构类型	顶点平动加速度/(mm·s^{-2})	顶点平动加速度减震率	一层剪力/kN	一层剪力减震率	一层层间位移/mm	一层层间位移减震率
UX	抗震结构	14665.22	—	23 089.10	—	7.39	—
	无偏心隔震结构	917.24	93.75%	5 056.79	78.10%	4.92	33.42%
	偏心隔震结构(外围铅芯)	864.49	94.11%	4 833.75	79.06%	3.99	45.98%
UY	抗震结构	13 834.59	—	28 302.34	—	3.4347	—
	无偏心隔震结构	827.30	94.02%	4 947.19	82.52%	1.637 7	52.32%
	偏心隔震结构(外围铅芯)	797.62	94.23%	4 729.64	83.29%	1.197 6	65.13%
RZ	抗震结构	3.195 07	—	650 000	—	0.000 15	—
	无偏心隔震结构	0.017 83	99.44%	110 000	83.12%	0.000 035	76.67%
	偏心隔震结构(外围铅芯)	0.018 67	99.42%	116 000	82.24%	0.000 039	74.00%

注:减震率=(抗震结构-隔震结构)/抗震结构×100%

从表5中可以看出无论是 *UX*、*UY* 平动方向,还是 *RZ* 扭转方向,顶点加速度、1层内力、1层位移的减震率依次下降。这个现象可以作如下解释。上部结构多质点体系的动力方程为

$$\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{x} = -\boldsymbol{M}(\ddot{\boldsymbol{x}} + \ddot{\boldsymbol{x}}_g) \tag{2}$$

式中,$(\ddot{\boldsymbol{x}} + \ddot{\boldsymbol{x}}_g)$、$\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}$、$\boldsymbol{x}$、$\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}}$、$-\boldsymbol{M}(\ddot{\boldsymbol{x}} + \ddot{\boldsymbol{x}}_g)$ 分别代表上部结构的加速度向量、弹性恢复力向量、位移向量、阻尼力向量、惯性力向量。一般将惯性力向量当作地震作用的等效荷载。抗震结构变为隔震结构时,地震作用变小,即 $-\boldsymbol{M}(\ddot{\boldsymbol{x}} + \ddot{\boldsymbol{x}}_g)$ 变小,又由式(2)可知,惯性力等于阻尼力和弹性恢复力之和,即使隔震层的阻尼比有所增加,但频率的减少也会使结构体系的阻尼力的减少程度比惯性力的减少大,因此弹性恢复力的减少程度就比惯性力的减少小,这体现为1层剪力(或扭矩)的减震率小于顶点平动(或扭转)加速度的减震率;隔震层的加入使得1层柱子和剪力墙底部的约束变弱,以致隔震结构1层的侧向刚度比抗震结构要小,因此位移的减少就比弹性恢复力的减少小,这体现为1层层间位移(转角)减震率小于1层剪力(扭矩)减震率。

对比平动与扭转可以发现,顶点扭转加速度的减震率要大于平动加速度的减震率,从《抗震规范》中可

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

知,本例中的抗震结构的基本周期位于地震加速度反应谱曲线的曲线下降段,曲线下降段的斜率随着周期增大而减小,又由于结构的扭转周期比平动周期小,所以扭转加速度的减少量要大于平动加速度的减少量; 1 层层间转角的减震率大于 1 层层间位移的减震率,这是由于隔震层平面外围铅芯的作用使得隔震结构 1 层的扭转刚度的减少相对侧向刚度的减少要小。

3.2　隔震层地震反应分析

隔震层地震反应的计算结果如表 6 所示。

从表 6 中可以看出,无偏心隔震结构的隔震层剪力要大于偏心隔震结构,但扭矩却小于偏心隔震结构,表 5 中 1 层的剪力和扭矩也有相似的规律,这主要是由于无偏心隔震结构上部结构质心与隔震层刚心的偏心距比偏心隔震结构大,即无偏心隔震结构上部结构质量的扭转惯性矩要大于偏心隔震结构,从模态上看,表 4 显示无偏心隔震结构的振型组成成分比外围铅芯的偏心隔震结构要好,即各阶振型更加单纯。以上分析表明无偏心隔震结构对扭转的抑制效果要略好于外围铅芯的偏心隔震结构。从隔震层的位移及转角来看,无偏心隔震结构的水平位移比外围铅芯的偏心隔震结构大,而转角却偏小,这主要是由于无偏心隔震结构的扭转刚度大于外围铅芯的偏心隔震结构。

上文分析可知无偏心隔震结构对扭转的抑制效果要略好于外围铅芯的偏心隔震结构,但对比表 5 中两种隔震结构的“减震率”可以发现由于隔震后地震作用减少很多,这种抑制效果相差不大,因此从这个角度上看,隔震本身对于结构扭转效应的抑制效果要好于“上部结构质量中心与隔震层刚度中心的重合”。

表 6　双向地震隔震层响应(无附加偶然偏心)

Table 6　Responses of isolation layer under bilateral earthquake excitation(without additional accidental eccentricity)

方向	结构	隔震层 /kN	隔震层相对减震率	隔震层位移 /mm	隔震层位移相对减震率/%
UX	无偏心隔震结构	5 391.74	-4.51%	156.81	-3.10
	偏心隔震结构(外围铅芯)	5 159.04	—	152.09	—
UY	无偏心隔震结构	5 302.04	-4.57%	154.20	-3.93
	偏心隔震结构(外围铅芯)	5070.18	—	148.37	—
RZ	无偏心隔震结构	118 000	5.01%	0.002 2	24.14
	偏心隔震结构(外围铅芯)	124 000	—	0.002 9	—

注: 相对减震率 =(外围铅芯的偏心隔震结构-无偏心隔震结构) /外围铅芯的偏心隔震结构 ×100%

表 7　抗震结构楼层位移比(无附加偶然偏心)

Table 7　Storey displacement ratio of seismic structure(without additional accidental eccentricity)

结构	楼层号	*UX* 最大位移 d_{xm} /mm	*UX* 平均位移 d_{xa} /mm	*UX* 位移比 d_{xm}/d_{xa}	*UY* 最大位移 d_{ym} /mm	*UY* 平均位移 d_{ya} /mm	*UY* 位移比 d_{ym}/d_{ya}
抗震结构	13	242.39	225.54	1.075	207.64	207.64	1.145
	12	226.73	210.97	1.075	209.25	172.96	1.21
	11	201.86	190.88	1.057	191.09	157.71	1.212
	10	183.58	173.61	1.057	171.98	141.71	1.214
	9	164.01	155.11	1.057	151.92	124.95	1.216
	8	143.37	135.60	1.057	131.11	107.62	1.218
	7	121.90	115.30	1.057	109.84	89.97	1.221
	6	100.15	94.75	1.057	88.63	72.43	1.224
	5	78.47	74.28	1.057	67.91	55.37	1.227
	4	57.82	54.77	1.056	48.43	39.37	1.23
	3	38.48	36.51	1.054	30.87	25.02	1.234
	2	21.52	20.47	1.051	16.21	13.09	1.238
	1	8.31	7.83	1.062	5.61	4.51	1.243

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.3 楼层位移比分析

表7、表8和表9分别为抗震结构、无偏心隔震结构和外围铅芯的偏心隔震结构在无偶然偏心地震作用下的各楼层位移比。

表8 无偏心隔震结构楼层位移比(无附加偶然偏心)

Table 8 Storey displacement ratio of isolation structure without eccentricity itself (without additional accidental eccentricity)

结构	楼层号	*UX*			*UY*		
		最大位移 d_{xm}/mm	平均位移 d_{xa}/mm	位移比 d_{xm}/d_{xa}	最大位移 d_{ym}/mm	平均位移 d_{ya}/mm	位移比 d_{ym}/d_{ya}
无偏心隔震结构	13	215.34	212.96	1.011	186.28	182.46	1.021
	12	212.09	209.87	1.011	185.42	180.71	1.026
	11	207.81	206.08	1.008	183.20	178.63	1.026
	10	204.02	202.45	1.008	180.90	176.48	1.025
	9	199.98	198.56	1.007	178.51	174.24	1.024
	8	195.67	194.41	1.006	176.02	171.92	1.024
	7	191.09	189.98	1.006	173.46	169.53	1.023
	6	186.30	185.35	1.005	170.85	167.10	1.022
	5	181.34	180.54	1.004	168.24	164.67	1.022
	4	176.35	175.69	1.004	165.68	162.29	1.021
	3	171.32	170.80	1.003	163.22	160.02	1.02
	2	166.39	165.99	1.002	160.97	157.92	1.019
	1	161.76	161.42	1.002	159.01	156.11	1.019
	隔震层	156.70	156.47	1.002	157.24	154.48	1.018

表9 偏心隔震结构(外围铅芯)楼层位移比(无附加偶然偏心)

Table 9 Storey displacement ratio of isolation structure with lead rubber bearings in peripheral part of isolation layer (without additional accidental eccentricity)

结构	楼层号	*UX*			*UY*		
		最大位移 d_{xm}/mm	平均位移 d_{xa}/mm	位移比 d_{xm}/d_{xa}	最大位移 d_{ym}/mm	平均位移 d_{ya}/mm	位移比 d_{ym}/d_{ya}
无偏心隔震结构(外围铅芯)	13	215.18	207.41	1.037	214.95	196.62	1.093
	12	212.63	204.93	1.038	224.27	197.79	1.134
	11	209.76	202.12	1.038	221.77	195.61	1.134
	10	206.69	199.13	1.038	219.16	193.34	1.134
	9	203.37	195.88	1.038	216.42	190.97	1.133
	8	199.77	192.36	1.039	213.56	188.49	1.133
	7	195.90	188.58	1.039	210.59	185.92	1.133
	6	191.82	184.58	1.039	207.55	183.29	1.132
	5	187.54	180.39	1.04	204.48	180.65	1.132
	4	183.22	176.16	1.04	201.45	178.05	1.131
	3	178.84	171.86	1.041	198.53	175.55	1.131
	2	174.52	167.62	1.041	195.83	173.23	1.13
	1	170.35	163.52	1.042	193.47	171.22	1.13
	隔震层	165.91	159.14	1.043	191.33	169.40	1.129

从表7~表9中可以看出,无论*UX*方向或是*UY*方向,楼层最大位移和平均位移的比从大到小依次是抗震结构、外围铅芯的偏心隔震结构、无偏心隔震结构。这说明了外围铅芯的偏心隔震结构和无偏心隔震结构对扭转有一定的抑制,且无偏心隔震结构的效果要略好于外围铅芯的偏心隔震结构。

4 附加偶然偏心双向地震反应分析

参考《建筑抗震设计规范》(GB 50011-2010)[9]取*X*、*Y*双向偶然偏心为0.2,对抗震结构、无铅芯的偏心隔震结构、中部铅芯的偏心隔震结构、外围铅芯的偏心隔震结构分别沿*X*向和*Y*向施加地震作用(7度罕遇),重点比较上述3种"隔震结构"的地震反应,以考察铅芯橡胶隔震支座对结构扭转的抑制效果。计算采用振型分解反应谱法。

4.1 上部结构地震反应分析

上部结构地震反应的计算结果如表10所示。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 10 双向地震上部结构响应(附加偶然偏心 0.2)

Table 10　Responses of upper structure under bilateral earthquake excitation(with additional accidental eccentricity 0.2)

方向	结构	顶点平动加速度 /(mm • s^{-2})	顶点平动加速度减震率	1 层剪力 /kN	1 层剪力减震率	1 层层间位移 /mm	1 层层间位移减震率/%
UX	抗震结构	14 665.22		23 089.11		7.56	
	偏心隔震结构(无铅芯)	876.00	94.03%	4 980.99	78.43%	3.25	57.07
	偏心隔震结构(中部铅芯)	897.23	93.88%	4 937.64	78.61%	3.23	57.26
	偏心隔震结构(外围铅芯)	864.49	94.11%	4 833.75	79.06%	3.39	55.16
UY	抗震结构	13 834.59		28 302.34		3.52	
	偏心隔震结构(无铅芯)	814.27	94.11%	4 903.09	82.68%	1.27	63.89
	偏心隔震结构(中部铅芯)	857.18	93.80%	4 965.59	82.46%	1.33	62.26
	偏心隔震结构(外围铅芯)	797.62	94.23%	4 729.64	83.29%	1.51	57.27
RZ	抗震结构	3.195		872 600		0.000 37	
	偏心隔震结构(无铅芯)	0.018 66	99.42%	147 000	83.15%	0.000 11	70.27
	偏心隔震结构(中部铅芯)	0.022 18	99.31%	147 200	83.13%	0.000 12	67.57
	偏心隔震结构(外围铅芯)	0.018 67	99.42%	142 400	83.68%	0.000 1	72.97

注: 减震率 =(抗震结构 - 隔震结构) /抗震结构 ×100%

与无附加偏心地震作用下的结果类似,无论是 *UX*、*UY* 平动方向,还是 *RZ* 扭转方向,顶点加速度、1 层内力、1 层位移的减震率依次下降; 顶点扭转加速度的减震率要大于顶点平动加速度的减震率; 1 层层间转角的减震率大于 1 层层间位移的减震率。

4.2　隔震层地震反应分析

隔震层地震反应的计算结果如表 11 所示。

表 11　双向地震隔震层响应(附加偶然偏心 0.2)

Table 11　Responses of isolation layer under bilateral earthquake excitation (with additional accidental eccentricity 0.2)

方向	结构	隔震层 /kN	隔震层相对减震率	隔震层位移 /mm	隔震层位移相对减震率/%
UX	偏心隔震结构(无铅芯)	5 319.01	3.01%	177.90	12.36
	偏心隔震结构(中部铅芯)	5 266.86	2.05%	154.78	-0.73
	偏心隔震结构(外围铅芯)	5 159.04		155.92	
UY	偏心隔震结构(无铅芯)	5 257.92	3.57%	171.16	12.16
	偏心隔震结构(中部铅芯)	5 321.22	4.72%	149.34	-0.67
	偏心隔震结构(外围铅芯)	5 070.18		150.34	
RZ	偏心隔震结构(无铅芯)	157 800	3.11%	0.010 33	26.33
	偏心隔震结构(中部铅芯)	158 000	3.23%	0.010 58	28.07
	偏心隔震结构(外围铅芯)	152 900		0.007 61	

注: 相对减震率 =(无偏心隔震结构或中部铅芯的偏心隔震结构 - 外围铅芯的偏心隔震结构/无偏心隔震结构或中部铅芯的偏心隔震结构 ×100%)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由《抗震规范》中的地震影响系数曲线可知，随着周期的增大结构的地震反应减小，而外围铅芯的偏心隔震结构的地震反应，从表4及表11中可以看出，虽然其周期比无铅芯的偏心隔震结构和中部铅芯的偏心隔震结构小，但无论是平动还是扭转地震反应都比上述两者小，这主要是由于上文所述的外围铅芯的偏心隔震结构“各振型的成分较为单纯”。外围铅芯的偏心隔震结构的转角的相对减震率比平动位移的相对减震率大，这体现了铅芯对转角的控制具有一定的效果。

4.3 楼层位移比分析

表12～表15分别为抗震结构、无铅芯的偏心隔震结构、中部铅芯的偏心隔震结构、外围铅芯的偏心隔震结构在附加偶然偏心地震作用下的各楼层位移比。

表12 抗震结构楼层位移比(附加偶然偏心0.2)

Table 12 Storey displacement ratio of seismic structure(with additional accidental eccentricity 0.2)

结构	楼层号	*UX*			*UY*		
		最大位移 d_{xm}/mm	平均位移 d_{xa}/mm	位移比 d_{xm}/d_{xa}	最大位移 d_{ym}/mm	平均位移 d_{ya}/mm	位移比 d_{ym}/d_{ya}
抗震结构	13	316.76	263.56	1.202	332.46	260.40	1.277
	12	296.31	246.56	1.202	357.01	246.84	1.446
	11	250.95	216.20	1.161	327.01	225.68	1.449
	10	228.18	196.62	1.16	295.30	203.37	1.452
	9	203.83	175.69	1.16	261.84	179.91	1.455
	8	178.15	153.60	1.16	226.92	155.53	1.459
	7	151.41	130.61	1.159	190.99	130.55	1.463
	6	124.31	107.31	1.158	154.89	105.57	1.467
	5	97.28	84.08	1.157	119.34	81.09	1.472
	4	71.45	61.90	1.154	85.62	57.97	1.477
	3	47.33	41.15	1.15	54.95	37.06	1.483
	2	26.26	22.95	1.144	29.08	19.53	1.489
	1	10.47	8.95	1.171	10.14	6.78	1.496

表13 偏心隔震结构(无铅芯)楼层位移比(附加偶然偏心0.2)

Table 13 Storey displacement ratio of eccentric isolation structure without lead rubber bearing (with additional accidental eccentricity 0.2)

结构	楼层号	*UX*			*UY*		
		最大位移 d_{xm}/mm	平均位移 d_{xa}/mm	位移比 d_{xm}/d_{xa}	最大位移 d_{ym}/mm	平均位移 d_{ya}/mm	位移比 d_{ym}/d_{ya}
偏心隔震结构(无铅芯)	13	288.95	258.22	1.119	358.93	295.26	1.216
	12	285.67	255.34	1.119	400.17	296.19	1.351
	11	280.05	251.12	1.115	396.16	293.22	1.351
	10	276.50	247.85	1.116	391.95	290.12	1.351
	9	272.65	244.29	1.116	387.51	286.85	1.351
	8	268.49	240.45	1.117	382.84	283.43	1.351
	7	264.03	236.32	1.117	377.97	279.87	1.35
	6	259.34	231.97	1.118	372.96	276.23	1.35
	5	254.43	227.41	1.119	367.87	272.54	1.35
	4	249.48	222.81	1.12	362.84	268.89	1.349
	3	244.48	218.14	1.121	357.97	265.38	1.349
	2	239.58	213.55	1.122	353.43	262.11	1.348
	1	234.86	209.12	1.123	349.45	259.26	1.348
	隔震层	229.90	204.42	1.125	345.82	256.66	1.347

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 14　偏心隔震结构(中部铅芯) 楼层位移比(附加偶然偏心 0.2)

Table 14　Storey displacement ratio of eccentric isolation structure with lead rubber bearings in central part of isolation layer (with additional accidental eccentricity 0.2)

结构	楼层号	*UX*			*UY*		
		最大位移 d_{xm}/mm	平均位移 d_{xa}/mm	位移比 d_{xm}/d_{xa}	最大位移 d_{ym}/mm	平均位移 d_{ya}/mm	位移比 d_{ym}/d_{ya}
偏心隔震结构(中部铅芯)	13	263.95	234.06	1.128	335.32	273.31	1.227
	2	260.62	231.15	1.127	376.33	273.61	1.375
	11	256.00	227.44	1.126	372.27	270.60	1.376
	10	252.46	224.17	1.126	368.02	267.45	1.376
	9	248.63	220.63	1.127	363.52	264.14	1.376
	8	244.50	216.80	1.128	358.80	260.68	1.376
	7	240.06	212.69	1.129	353.86	257.07	1.377
	6	235.39	208.35	1.13	348.80	253.38	1.377
	5	230.52	203.82	1.131	343.66	249.64	1.377
	4	225.61	199.25	1.132	338.57	245.95	1.377
	3	220.65	194.62	1.134	333.65	242.39	1.376
	2	215.79	190.06	1.135	329.07	239.09	1.376
	1	211.12	185.67	1.137	325.05	236.21	1.376
	隔震层	206.21	181.00	1.139	321.38	233.58	1.376

表 15　偏心隔震结构(外围铅芯) 楼层位移比(附加偶然偏心 0.2)

Table 15　Storey displacement ratio of isolation structure with lead rubber bearings in peripheral part of isolation layer (with additional accidental eccentricity 0.2)

结构	楼层号	*UX*			*UY*		
		最大位移 d_{xm}/mm	平均位移 d_{xa}/mm	位移比 d_{xm}/d_{xa}	最大位移 d_{ym}/mm	平均位移 d_{ya}/mm	位移比 d_{ym}/d_{ya}
偏心隔震结构(外围铅芯)	13	254.87	229.39	1.111	305.79	254.18	1.203
	12	251.69	226.59	1.111	338.02	254.68	1.327
	11	244.43	221.59	1.103	334.12	251.81	1.327
	10	240.97	218.40	1.103	330.04	248.80	1.327
	9	237.23	214.94	1.104	325.73	245.63	1.326
	8	233.19	211.21	1.104	321.19	242.32	1.326
	7	228.85	207.19	1.105	316.46	238.87	1.325
	6	224.28	202.96	1.105	311.59	235.33	1.324
	5	219.51	198.53	1.106	306.66	231.75	1.323
	4	214.70	194.05	1.106	301.78	228.22	1.322
	3	209.84	189.52	1.107	297.05	224.82	1.321
	2	205.07	185.06	1.108	292.65	221.66	1.32
	1	200.49	180.76	1.109	288.79	218.89	1.319
	隔震层	195.68	176.19	1.111	285.27	216.38	1.318

从表 12 ~ 表 15 中可以看出,无论 *UX* 方向或是 *UY* 方向,楼层最大位移和平均位移的比从大到小依次是抗震结构、中部铅芯的偏心隔震结构、无铅芯的偏心隔震结构、外围铅芯的偏心隔震结构。这说明隔震结构对扭转有一定的抑制,且在隔震层平面外围布置铅芯橡胶隔震支座增强了对结构扭转的抑制。

5　结论

(1) 由于地震作用的减小,高层隔震结构的扭转效应要远小于原抗震结构,且隔震本身对于结构扭转效应的抑制效果要好于“上部结构质量中心与隔震层刚度中心的重合”。

(2) 无论对于平动或是扭转,高层隔震结构的顶点加速度、1 层内力、1 层位移的减震率依次下降; 高层隔震结构扭转效应的减震率大于平动效应的减震率。

(3) 布置在隔震层平面外围的铅芯橡胶隔震支座对隔震层的扭转有一定的控制作用。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献

[1] Lee D M. Base isolation for torsion reduction in asymmetric structures under earthquake loading[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,1979, 8(3): 349 – 359.

[2] Pan T. C., Kelly J. M. Seismic response of torsionally coupled base isolated structures[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1982, 11(6): 749 – 770.

[3] 李 慧,王文武,杜永峰,等. 偏心隔震结构随机响应分析[J]. 兰州理工大学学报,2006,32(6):114 – 117.
LI Hui, WANG Wenwu, DU Yongfeng, et al. Analysis of random response of eccentric vibration-isolative structures [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2006, 32(6): 114 – 117.

[4] 李向真. 平扭耦联隔震体系的简化模型及有关参数变化的计算分析[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(3):163 – 166.
LI Xiangzhen. Simplified model of the lateral-torsional coupling isolated system and its parameter analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(3): 163 – 166.

[5] 王建强,姚谦峰. 基础隔震单层偏心结构扭转地震反应分析[J]. 世界地震工程,2004,20(1):35 – 38.
WANG Jianqiang, YAO Qianfeng. Analysis on torsional seismic response of one-story asymmetric structure with base isolation [J]. World Earthquake Engineering, 2004, 20(1): 35 – 38.

[6] 吴香香,李宏男. 结构偏心对基础隔震结构地震反应的影响[J]. 地震工程与工程振动,2003,23(1):145 – 151.
WU Xiangxiang, LI Hongnan. Effects of structural eccentricity on seismic responses of base-isolated structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(1): 145 – 151.

[7] 江宜城,唐家祥. 单轴偏心的基础隔震结构扭转反应分析[J]. 华中理工大学学报,1999,27(6):80 – 82.
JIANG Yicheng, TANG Jiaxiang. The torsional response analysis of the base-isolated building [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technolog, 1999, 27(6): 80 – 82.

[8] 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].

[9] GB 50011 – 2010 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011 – 2010 Code for Seismic Design of Building [S].

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net