

金建敏, 陈鹏, 谭平, 等. P- Δ 效应对基础隔震结构地震响应影响研究[J]. 华南地震, 2017, 37(2): 58-64. [XU Jie, DENG Baichang, YANG Jingjing, et al. Study of the Perturbations of Ionosphere over South China Associated with Heyuan Earthquakes[J]. South china journal of seismology, 2017, 37(2): 58-64.]

P- Δ 效应对基础隔震结构地震响应影响研究

金建敏, 陈鹏, 谭平, 黄襄云, 刘彦辉

(广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405)

摘要: 隔震支座在地震作用过程中水平变形时, 会对上部结构附加由于隔震支座 P- Δ 效应造成的弯矩。国内, 关于隔震支座的 P- Δ 效应对基础隔震结构地震响应具体影响相关的研究, 相对较少。采用 PERFROM-3D 软件, 建立上部结构弹塑性的基础隔震结构模型, 进行了考虑与不考虑隔震支座 P- Δ 效应的计算分析, 对比了层剪力系数、层间位移、层倾覆弯矩、加速度等地震响应。结果表明: 隔震支座的 P- Δ 效应对基础隔震结构的底层层间位移响应及上部结构柱底转角位移造成一定影响, 其它地震响应基本无差异。

关键词: P- Δ 效应; 隔震支座; 基础隔震结构; 地震响应

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2017) 02-0058-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2017.02.010

Study on the Effect of P- Δ Effects on Seismic Response of Base Isolation Structure

JIN Jianmin, CHEN Peng, TAN Ping, HUANG Xiangyun, LIU Yanhui

(Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou, 510405, China)

Abstract: Horizontal deformation of isolation bearings in the earthquake action produces additional moment on the upper structure of base isolated structure, which is caused by P- Δ effects of isolation bearings. In China, there are relatively few researches on the influence of P- Δ effects of isolation bearings on the seismic response of base isolated structure. Using PERFROM-3D software, a base isolation structure model considering plasticity of the upper structure is established to be analyze. Considering and unconsidering P- Δ effects of isolation bearings, seismic response of base isolated structure are compared, such as acceleration, storey drift, storey shear, storey overturning moment, etc. The results show that the storey drift of bottom layer and the bottom rotation displacement of the upper structure are affected by P- Δ effects of isolation bearing and other seismic response almost have no difference.

Keywords: P- Δ effects; Isolation bearing; Base isolation structure; Earthquake response

收稿日期: 2017-03-23

基金项目: 广州市属高校科研项目(1201620162); 国家自然科学基金(51468050、51478131)

作者简介: 金建敏(1973-), 男, 高工, 博士, 主要从事隔震、抗震研究。

E-mail: jinjianmin152@aliyun.com.

0 引言

隔震结构在上、下部结构间设置隔震装置,为了达到明显的减震效果,隔震装置需具备承载特性(较大的竖向承载力)、隔震特性(延长结构水平自振周期)、阻尼耗能特性(附加阻尼,消耗地震输入能量)及复位特性(震后回复到初始状态)^[1];当前,橡胶支座尤其是铅芯橡胶支座应用最为广泛。国外学者对抗震结构在地震作用下的 P-Δ 效应进行过研究^[2-4]。扶长生应用解析解和能量法讨论了等截面均质悬臂杆模型以及基于顶点位移等效原理的等效刚重比的理论缺陷和不确定性,明确指出带 P-Δ 杆或 P-Δ 柱的力学模型是对结构进行 P-Δ 效应数值分析的最理想模型^[5]。梁仁杰分析了 P-Δ 效应对结构动力特性的影响,提出用白噪声扫描的手段,结合数值计算的方法,求解结构考虑 P-Δ 效应时的模态参数^[6]。魏斌以等效线性化法为理论基础,提出了改进的考虑 P-Δ 效应的理论公式,并进行了桥梁结构单墩 P-Δ 效应的地震反应有限元统计分析^[7]。马长飞,刘彦辉分别研究了 P-Δ 效应对柱顶隔震结构(仅考虑了隔震层非线性)地震响应的影响研究,研究表明下部独立悬臂柱的计算需考虑 P-Δ 效应的影响^[8-10]。

既往研究的大多只考虑了隔震层的非线性且研究的重点主要是 P-Δ 效应对下部结构的影响,对于工程中最常见的基础隔震结构, P-Δ 效应对上部结构地震响应影响的相关研究相对较少。

1 隔震模型介绍

采用的隔震结构模型,上部结构为 9 层(钢筋混凝土框架),丙类建筑,层高 3.6 m,隔震层层高 2 m,上部结构平面示意图见图 1,7.5 度设防,Ⅱ类场地,第一组, $T_g=0.35$ s。由于结构规则、对称,选取图 1 中阴影范围内的一榀框架进行计算分析。首先,用 PERFORM-3D 建立隔震及抗震模型(上部结构弹性),依据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[11]进行中震作用的减震效果分析,计算表明隔震后,层间剪力及各层倾覆弯矩降为抗震结构的 53% 以下,上部结构可降半度设计;然后,用 PKPM 按 7 度设防进行了上部结构配筋设计,纵筋及箍筋均采用 HRB400,配筋结果见图 2,上部结构楼板厚度为 120 mm (隔震层顶部楼板厚度为 160 mm),梁、板混凝土标号均为 C30,梁、柱截面尺寸及各层柱的混凝土标号

见表 1;之后,用 PERFORM-3D 建立隔震模型(上部结构弹塑性),梁、柱均采用纤维单元模拟,并考虑了箍筋对核心区混凝土的约束效应(保护层为非约束混凝土),梁、柱节点区采用软件默认的节点区,并按《混凝土结构设计规范》(GB50010-2010)^[12]考虑了楼板作为翼缘对梁刚度的影响,隔震层支座采用工程中常用的第 2 形状系数 $S_2=5$ 系列铅芯橡胶支座(第 1 形状系数 S_1 大于 30),支座在重力荷载代表值作用下的压应力限值按丙类建筑取 15 Mpa^[12],支座布置及参数见图 2 及表 2,隔震前结构的基本周期为 1.229 s,隔震后周期为 4.073 s,在重力荷载代表值作用下边柱及中柱下支座压应力分别为 7.79 Mpa 及 11.44 Mpa。

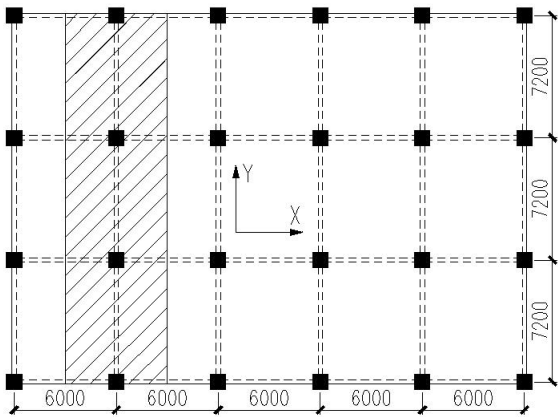


图 1 结构平面布置图

Fig.1 Structural layout

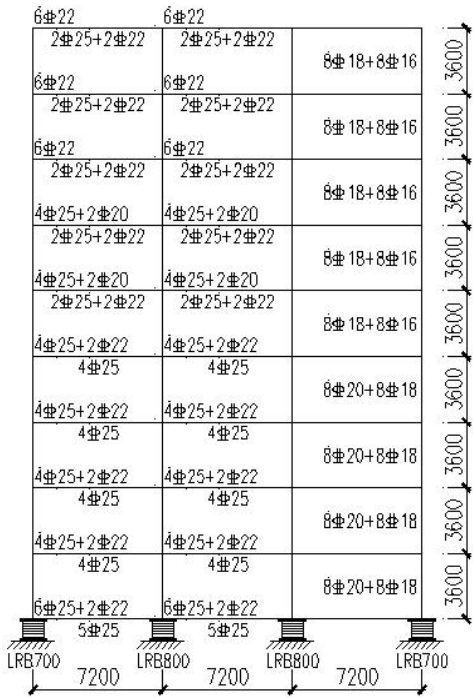


图 2 配筋及支座布置图

Fig.2 Reinforcement drawing and isolators arrangement

表 1 框架梁柱参数

Table 1 Data for beams and columns			
层数	柱尺寸(mm×mm)	柱混凝土标号	梁尺寸(mm×mm)
1-3 层	700×700	C40	300×600(400×900)
4 层	700×700	C35	
5-9 层	600×600	C35	

注：括号内为隔震层顶部梁截面尺寸

表 2 支座设计参数

Table 2 Design parameters for LRB									
型号	橡胶 G 值/MPa	直径 D /mm	铅径 D_p /mm	内部橡胶总厚 Tr /mm	S_1	S_2	屈服后刚度 $K_d /$ (kN.mm ⁻¹)	屈服力 Q_d /kN	竖向刚度 $K_v /$ (kN.mm ⁻¹)
LRB-G4-700-140	0.392	700	140	140	35	5	1.084	122.7	3 259
LRB-G4-800-120	0.392	800	120	162	33.3	4.94	1.213	90.2	3 535

2 计算工况

分别进行了设防烈度为 7.5 度的中震及大震时程分析，输入地震波选择了 7 条地震波(5 条天然波及 2 条人工波)，5 条天然波如表 3 所示，中震时，2 条人工波，加速度峰值 1.47 m/s²，与 $T_g=0.35$ s 的规范反应谱相吻合；大震时，2 条人工

波，加速度峰值 3.1 m/s²，与 $T_g=0.4$ s 的规范反应谱相吻合，按《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[1]将 T_g 延长 0.05 s。所选的 7 条地震波，单波地震影响系数在结构(隔震、抗震)主要周期点大于规范的 65%，平均地震影响系数曲线在各周期点与规范的地震影响系数误差不超过±20%，图 3 为输入地震波加速度反应谱与规范反应谱对比。

表 3 地震动记录

Table 3 Natural earthquake records			
地震波编号	地震波名称	所选分量	PGA/g
GM1	Chi-Chi-Taiwan-05(1999)	CHY032-E	0.060 1
GM2	Landers (1992)	MCF090	0.131 6
GM3	Imperial Valley (1979)	CAL225	0.128 8
GM4	Iwate (2008)	54013EW	0.161 7
GM5	Kocaeli (1999)	IST090	0.042 7

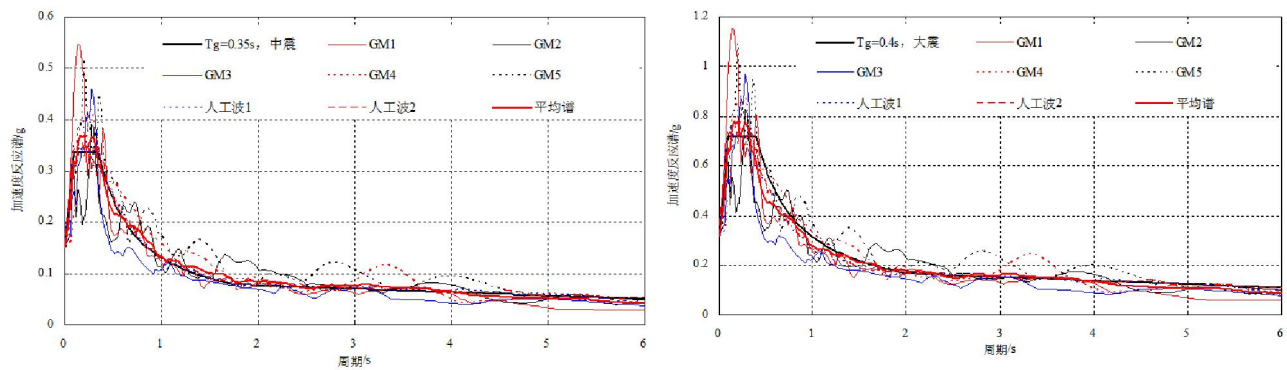


图 3 输入地震波加速度反应谱与规范反应谱对比

Fig.3 Comparison between input waves response spectrum and China earthquake response spectrum

3 地震响应分析

3.1 隔震层地震响应

表 4 为考虑与不考虑支座 P-Δ 效应时，7.5 度

中震及大震输入，隔震层位移的对比分析，表中括号内为大震输入，表中偏差=(考虑 P-Δ 效应/不考虑 P-Δ 效应-1)×100%，下表同，从表 4 可见，考虑支座 P-Δ 效应后，隔震层位移总体而言，稍有放大，但其偏差基本可忽略。表 5 为隔震层顶

部节点(上部结构底部节点) 转角的对比分析, 表中分别列出了边柱、中柱节点转角的对比分析; 图 4 为 7.5 度大震人工波 1 输入时, 中柱节点转角时程对比; 分析可知, 支座 P-Δ 效应对隔震层顶部节点的转角有较明显影响, 对中柱节点的影响要大于边柱节点, 这是因为中柱处的轴力 P 大于边柱处的轴力, 在同样隔震层位移时, 中柱处的支座 P-Δ 效应会大于边柱处的支座 P-Δ 效应。

表 4 隔震层位移
Table 4 Displacement of the isolation layer

隔震层位移 /mm	输入地震波						
	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	人工波 1	人工波 2
考虑 P-Δ 效应	47.13 (125.30)	47.61 (231.89)	40.46 (139.10)	54.28 (234.90)	110.39 (327.94)	77.81 (213.19)	68.91 (225.22)
不考虑 P-Δ 效应	46.82 (125.98)	45.25 (231.31)	39.81 (137.28)	53.99 (231.91)	109.82 (331.27)	77.18 (211.25)	68.62 (223.71)
偏差/%	0.66 (-0.54)	5.22 (0.25)	1.63 (1.33)	0.54 (1.29)	0.52 (-1.01)	0.82 (0.92)	0.43 (0.67)
平均偏差/%	1.16 (0.42)						

表 5 隔震层顶部节点转角
Table 5 Joint rotation of top of isolation layer

节点转角/rad	输入地震波						
	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	人工波 1	人工波 2
边柱考虑 P-Δ 效应	0.00165 (0.00263)	0.00160 (0.00382)	0.00159 (0.00268)	0.00168 (0.00467)	0.00191 (0.00939)	0.00193 (0.00381)	0.00184 (0.00430)
边柱不考虑 P-Δ 效应	0.00155 (0.00238)	0.00148 (0.00309)	0.00152 (0.00237)	0.00156 (0.00325)	0.00154 (0.00530)	0.00175 (0.00307)	0.00169 (0.00288)
偏差/%	6.37(10.28)	8.16(23.63)	4.35(13.13)	7.87(43.69)	23.76(77.22)	10.46(23.88)	9.42(49.36)
平均偏差/%	10.06(34.46)						
中柱考虑 P-Δ 效应	0.00102 (0.00178)	0.00101 (0.00284)	0.00096 (0.00181)	0.00108 (0.00331)	0.00160 (0.00746)	0.00127 (0.00281)	0.00121 (0.00301)
中柱不考虑 P-Δ 效应	0.00089 (0.00138)	0.00086 (0.00194)	0.00087 (0.00139)	0.00092 (0.00208)	0.00125 (0.00285)	0.00103 (0.00193)	0.00100 (0.00201)
偏差/%	15.41(29.00)	17.56(45.94)	11.01(30.14)	17.74(58.89)	28.43(161.74)	23.26(45.76)	21.22(49.57)
平均偏差/%	19.23(60.15)						

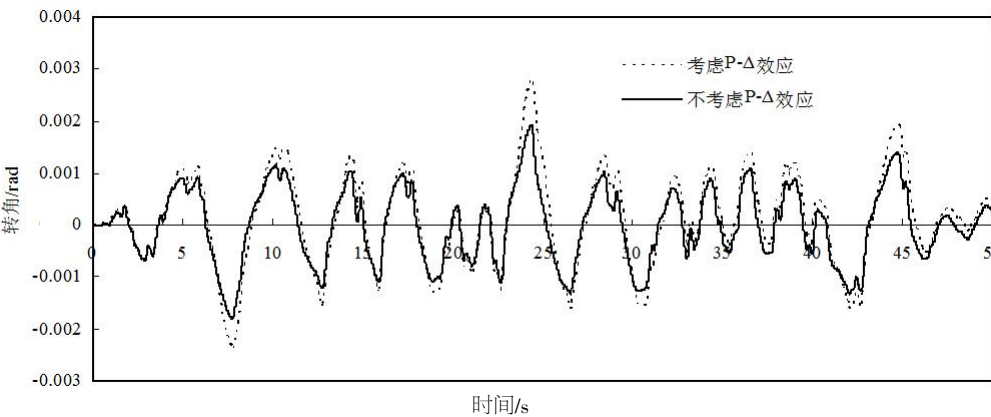


图 4 隔震层顶部节点转角时程(中柱, 人工波 1, 3.1m/s²)
Fig.4 Time history of joint rotation at the top of isolation layer (centre column, artificial wave, 3.1m/s²)

3.2 上部结构地震响应

图 5~8 为考虑支座 P-Δ 效应时, 7.5 度中震及

大震输入, 上部结构加速度、层间位移角、层剪力、层倾覆弯矩包络图。由结果分析可知, 7 条波平均后, 上部结构各楼层加速度, 在中震输入时

降为输入加速度的 30.92%~50.04%，在大震输入时降为输入加速度的 26.42%~40.54%，减震效果良好；上部结构的最大层间位移角发生在第 3 层，中、大震输入时，分别为 1/405 及 1/155 (7 条波平均)。表 6~9 分别为考虑与不考虑支座 P- Δ 效应相比较，上部结构加速度、层间位移、层剪力及层倾覆弯矩对比偏差，图 9 为 7.5 度大震人工波 1 输入时，上部结构底层层间位移时程对比。分析可知，上部结构底层层间位移有一定差异，7 条波平均后，7.5 度中震输入时，考虑支座 P- Δ 效应后，上部结构底层层间位移增加 5.31%，7.5 度大

震输入时，上部结构底层层间位移增加 13.94%，可见，支座 P- Δ 效应造成的上部结构底层层间位移增加随地震输入峰值增加而增大；加速度、层剪力、层倾覆弯矩及其它楼层的层间位移基本无差异。从表 5 可见，考虑支座 P- Δ 效应后，上部结构底层层剪力并没有随层间位移的增大而增大，是因为支座 P- Δ 效应造成上部结构底部节点(即隔震层顶部节点)的转角增大，相当于降低了上部结构底部转动约束条件，会造成上部结构底层层刚度的降低，从而导致上部结构底层层剪力并没有随层间位移的增大而增大。

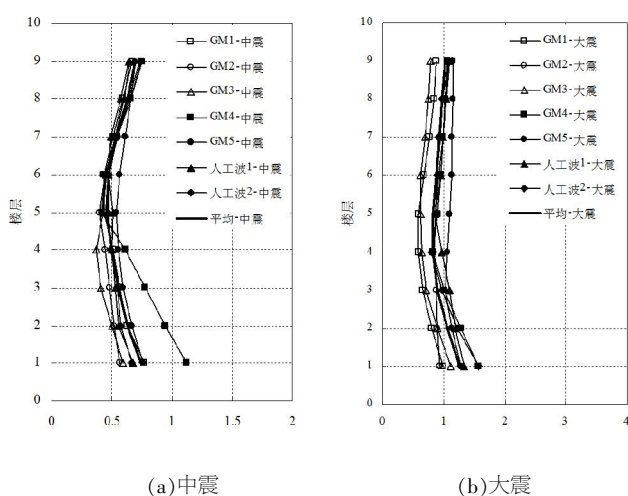


图 5 上部结构加速度

Fig.5 Acceleration of the upper structure

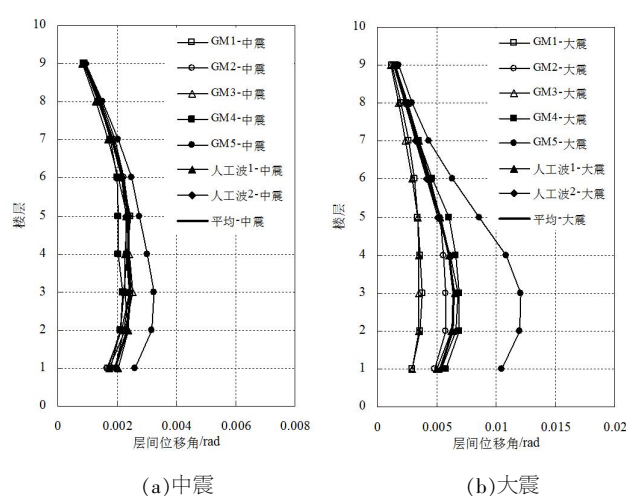


图 6 上部结构层间位移角

Fig.6 Storey drift ratio of the upper structure

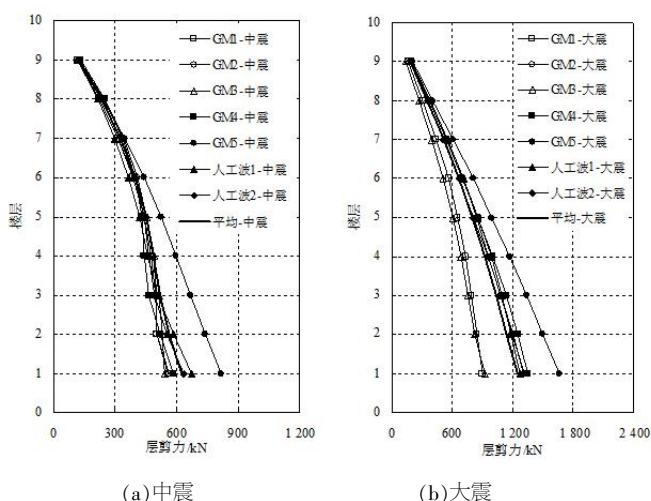


图 7 上部结构层剪力

Fig.7 Storey shear of the upper structure

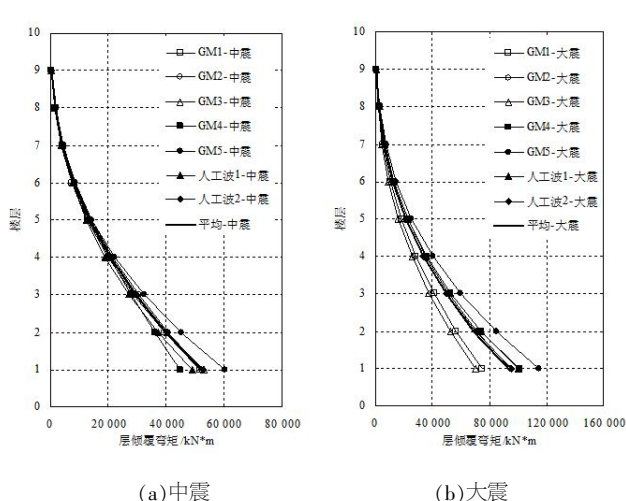


图 8 上部结构层倾覆弯矩

Fig.8 Storey overturning moment of the upper structure

4 结语

本文建立考虑上部结构非线性的基础隔震模型(上部结构为 9 层)，钢筋混凝土框架，隔震支

座为工程中常用的第 2 形状系数 $S_2=5$ 系列，第 1 形状系数 S_1 大于 30)，研究了支座 P- Δ 效应对基础隔震结构地震响应的影响，可以得到初步结论如下：

表 6 上部结构加速度偏差
Table 6 Acceleration deviation of the upper structure

楼层	输入地震波							平均偏差/ (%)
	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	人工波 1	人工波 2	
	偏差/(%)							
1	-1.79(-0.11)	0.07(-0.12)	-0.56(-0.48)	-1.01(-0.22)	3.28(2.60)	-0.55(0.15)	0.78(1.86)	0.03(0.56)
2	-1.81(-0.18)	-0.16(-1.57)	-1.02(3.24)	-1.07(-0.34)	2.47(2.12)	-0.01(-1.02)	-0.85(2.40)	-0.35(0.66)
3	-1.58(-1.28)	0.05(-1.28)	-1.02(-0.98)	-0.96(-0.31)	-0.34(-4.85)	-0.69(0.95)	-1.06(2.82)	-0.80(-0.71)
4	-1.32(-1.72)	-0.33(-1.12)	-0.65(-1.17)	-0.98(-1.80)	-1.05(-4.53)	-1.20(2.93)	-0.71(-4.54)	-0.89(-1.71)
5	-0.99(-1.67)	-0.28(-2.16)	-1.43(-1.68)	-1.13(-1.88)	-1.40(-4.68)	-1.19(-0.44)	-1.03(-1.50)	-1.06(-2.00)
6	-1.22(-1.28)	-1.47(-1.89)	-1.16(-1.08)	-0.90(-1.68)	-0.81(-4.32)	-1.27(-0.90)	-0.88(-2.09)	-1.10(-1.89)
7	-1.14(-1.03)	-1.57(-1.50)	-0.85(-1.24)	-0.82(-1.26)	-0.71(-4.27)	-1.13(-1.42)	-0.96(-2.17)	-1.02(-1.84)
8	-1.12(-1.36)	-0.49(-1.42)	-1.08(-2.09)	-0.76(-0.21)	-0.70(-4.80)	-0.64(-1.19)	-0.37(-1.44)	-0.74(-1.79)
9	-1.59(-1.23)	-0.41(-1.49)	-0.91(-1.39)	-0.76(-0.32)	-0.88(-5.10)	-0.92(-1.15)	-0.33(-1.40)	-0.83(-1.73)

表 7 上部结构层间位移偏差
Table 7 Storey drift deviation of the upper structure

楼层	输入地震波							平均偏差/ (%)
	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	人工波 1	人工波 2	
	偏差/(%)							
1	4.11(7.96)	5.30(11.83)	2.43(9.46)	5.71(16.39)	8.29(26.29)	7.35(12.39)	6.79(13.24)	5.91(13.94)
2	-0.02(1.69)	-1.31(2.23)	-0.24(2.49)	1.22(3.96)	2.00(4.27)	1.72(2.96)	0.84(2.16)	0.69(2.82)
3	-0.49(0.20)	-1.61(-0.29)	-0.76(0.97)	-1.21(0.80)	0.40(-1.52)	0.35(0.66)	-0.10(-0.66)	-0.45(0.02)
4	-1.18(-0.29)	-1.73(-1.43)	-0.91(0.27)	-0.43(-0.99)	-0.15(-4.79)	-1.33(-0.51)	-0.13(-2.12)	-0.82(-1.41)
5	-1.18(-0.54)	-0.46(-1.85)	-0.94(-0.26)	-0.03(-2.00)	-0.43(-7.76)	-1.19(-1.47)	-1.55(-3.08)	-0.83(-2.42)
6	-1.23(-0.65)	-0.43(-1.85)	-0.88(-0.65)	-0.85(-2.39)	-0.53(-8.75)	-1.09(-1.85)	-0.33(-3.01)	-0.75(-2.74)
7	-1.28(-0.73)	-0.46(-1.62)	-0.86(-0.90)	-0.81(-1.75)	-0.62(-8.06)	-1.25(-1.63)	-0.36(-2.35)	-0.79(-2.43)
8	-1.29(-0.77)	-0.46(-1.43)	-0.83(-1.01)	-0.81(-1.17)	-0.60(-6.52)	-1.25(-1.31)	-0.35(-1.91)	-0.79(-2.02)
9	-1.27(-0.70)	-0.45(-1.28)	-0.78(-0.98)	-0.78(-1.01)	-0.62(-5.61)	-1.19(-1.15)	-0.34(-1.70)	-0.76(-1.78)

表 8 上部结构层剪力偏差
Table 8 Storey shear deviation of the upper structure

楼层	输入地震波							平均偏差/ (%)
	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	人工波 1	人工波 2	
	偏差/(%)							
1	-1.40(-1.64)	0.36(-1.84)	-1.55(-1.02)	-1.28(-1.61)	-1.24(-4.35)	-1.08(-1.11)	-1.44(-1.94)	-1.09(-1.93)
2	-1.31(-1.29)	-1.76(-1.85)	-1.30(-0.52)	-1.00(-1.66)	-0.91(-4.24)	-0.84(-1.13)	-1.11(-2.01)	-1.18(-1.81)
3	-1.24(-1.05)	-1.70(-1.72)	-1.17(-0.59)	-0.83(-1.74)	-0.61(-4.24)	-0.79(-1.13)	-1.18(-2.05)	-1.07(-1.79)
4	-1.24(-0.89)	-1.63(-1.56)	-1.03(-0.66)	-0.84(-1.68)	-0.62(-4.44)	-1.35(-1.24)	-1.88(-2.14)	-1.23(-1.80)
5	-1.25(-0.87)	-1.64(-1.51)	-0.90(-0.87)	-0.83(-1.52)	-0.65(-4.53)	-1.18(-1.46)	-1.60(-2.07)	-1.15(-1.83)
6	-1.19(-0.91)	-0.48(-1.42)	-0.88(-1.10)	-0.79(-1.25)	-0.67(-4.55)	-1.24(-1.46)	-0.42(-1.94)	-0.81(-1.81)
7	-1.23(-0.99)	-0.47(-1.36)	-0.82(-1.34)	-0.77(-0.87)	-0.70(-4.81)	-1.20(-1.07)	-0.38(-1.63)	-0.80(-1.73)
8	-1.68(-1.07)	-0.45(-1.40)	-0.81(-1.58)	-0.77(-0.56)	-0.81(-5.03)	-1.06(-1.02)	-0.35(-1.48)	-0.85(-1.73)
9	-1.59(-1.23)	-0.41(-1.49)	-0.91(-1.39)	-0.76(-0.33)	-0.89(-5.10)	-0.89(-1.16)	-0.33(-1.40)	-0.82(-1.73)

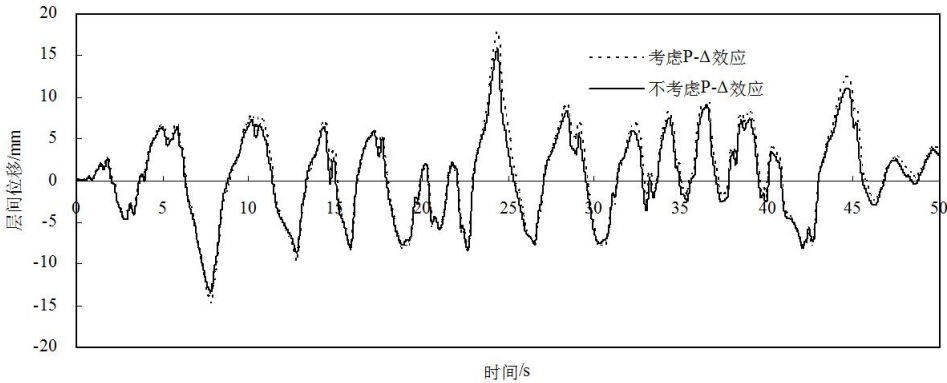


图 9 上部结构底层层间位移时程

Fig.9 Time-history of storey drift at the bottom layer of the upper structure

表 9 上部结构层倾覆弯矩偏差
Table 9 Storey overturning moment deviation of the upper structure

楼层	输入地震波							平均偏差/ (%)
	GM1	GM2	GM3	GM4	GM5	人工波 1	人工波 2	
	偏差/(%)							
1	-1.28(-0.56)	-1.78(-1.36)	-0.93(-0.50)	-0.82(-1.35)	-0.52(-4.12)	-1.12(-1.18)	-0.32(-1.94)	-0.97(-1.57)
2	-1.27(-0.63)	-0.43(-1.33)	-0.89(-0.66)	-0.80(-1.28)	-0.57(-4.33)	-1.05(-1.26)	-0.30(-1.91)	-0.76(-1.63)
3	-1.26(-0.70)	-0.43(-1.32)	-0.86(-0.82)	-0.78(-1.15)	-0.57(-4.50)	-1.16(-1.27)	-0.31(-1.84)	-0.77(-1.66)
4	-1.26(-0.77)	-0.45(-1.31)	-0.83(-1.00)	-0.79(-1.04)	-0.63(-4.65)	-1.17(-1.19)	-0.34(-1.75)	-0.78(-1.67)
5	-1.26(-0.84)	-0.45(-1.30)	-0.81(-1.16)	-0.78(-0.91)	-0.69(-4.81)	-1.23(-1.11)	-0.36(-1.63)	-0.80(-1.68)
6	-1.26(-0.89)	-0.45(-1.32)	-0.79(-1.28)	-0.76(-0.79)	-0.76(-4.93)	-1.22(-1.08)	-0.38(-1.51)	-0.80(-1.69)
7	-1.65(-0.97)	-0.44(-1.40)	-0.78(-1.35)	-0.76(-0.71)	-0.81(-5.01)	-1.21(-1.07)	-0.36(-1.45)	-0.86(-1.71)
8	-1.63(-1.07)	-0.43(-1.44)	-0.81(-1.27)	-0.78(-0.58)	-0.87(-5.10)	-1.15(-1.07)	-0.36(-1.42)	-0.86(-1.71)
9	-1.59(-1.23)	-0.41(-1.49)	-0.91(-1.39)	-0.76(-0.33)	-0.89(-5.10)	-0.89(-1.16)	-0.33(-1.40)	-0.82(-1.73)

(1) 考虑支座 P-Δ 效应后，隔震层位移稍有放大，其偏差基本可忽略，隔震层顶部节点的转角有较明显增大。

(2) 考虑支座 P-Δ 效应后，上部结构的底层层间位移会有所放大，但加速度、层剪力、层倾覆弯矩及其它楼层的层间位移的偏差基本可忽略，上部结构底层的层剪力未随层间位移的增大而增大，是由于隔震层顶部节点的转角增大造成结构底层层刚度的降低而导致的。

参考文献：

[1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京：地震出版社，1997

[2] Wilson E L, Habibullah A. Static and dynamic analysis of multi -story buildings including P -Delta effects [J]. Earthquake Spectra, 1987, 3 (2): 289-298.

[3] Wilso n E L. Three Dimensional Static and Dynamic Ana-lysis of Structures; A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering [M]. Berkly, California: Computer s and Structures, Inc. , 1999.

[4] BERNAL D. Amplification factors for inelastic dynamic P-Δ effects in earthquake analysis [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1987, 15: 635 - 651.

[5] 扶长生，周立浪，张小勇.长周期超高层钢筋混凝土建筑 P-Δ 效应分析与稳定设计[J]. 建筑结构，2014，44 (2): 1-7.

[6] 梁仁杰，吴 京，何 婧，等. P-Δ 效应对结构动力特性的影响[J]. 土木工程学报，2013，46 (S2): 68-72.

[7] 魏 斌，蒋娜芳. 动力 P-Δ 效应位移增大系数研究[J]. 工程抗震与加固改造，2010，32 (5): 8-13.

[8] 刘彦辉，周福霖，谭 平，等. 考虑隔震支座转动及 P-Δ 效应的串联隔震结构响应研究[J]. 土木工程学报，2015，48 (9): 60-66.

[9] 马长飞，谭 平，张亚辉，等. 近场地震作用下考虑 P-Δ 效应的首层柱顶隔震结构地震反应分析[J]. 振动工程学报，2012，25 (4): 439-445.

[10] 马长飞，谭 平，张亚辉，等. 考虑 P-Δ 效应的柱顶隔震结构的动力响应分析[J]. 土木工程学报，2010，56 (S1): 230-234.

[11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范：GB50011-2010 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范：GB50010-2010[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.