

金建敏, 肖骥, 陈鹏, 等. 强震下基础隔震结构与挡土墙碰撞响应分析[J]. 华南地震, 2018, 38 (4): 74–83. [JIN Jian-min, XIAO Ji, CHEN Peng, et al. Response of Base Isolated Structures During Impact with Retaining Wall Under Strong Earthquakes [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(4): 74–83]

强震下基础隔震结构与挡土墙碰撞响应分析

金建敏^{1,2,3}, 肖 骥¹, 陈 鹏¹, 谭 平^{1,2,3}, 刘彦辉^{1,2,3}

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405;
3. 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广州 510405)

摘要: 基础隔震结构在罕遇地震作用下可以大幅降低上部结构的地震响应, 达到保护结构的目的; 但在超过罕遇地震的强震作用下, 隔震层位移可能超过预留的隔震沟宽度, 隔震结构与周边挡土墙碰撞。建立考虑上部结构非线性的隔震结构模型, 设防烈度为 8 度, 进行了超过罕遇地震的强震下地震响应分析, 结果表明, 隔震结构与挡土墙碰撞减小了隔震层位移, 但导致上部结构加速度、位移及层剪力明显放大, 放大程度随碰撞刚度及地震动强度的增大而增大, 随隔震沟宽度的增大而减小; 碰撞刚度增大到一定程度后, 层间位移的增大对碰撞刚度的增大不再敏感, 加速度及上部结构基底剪力系数则未表现出这一趋势; 碰撞还导致支座最大面压的增大及最小面压的减小。

关键词: 强震; 基础隔震结构; 碰撞; 响应

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2018)04-0074-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.04.013

Response of Base Isolated Structures During Impact with Retaining Wall Under Strong Earthquakes

JIN Jianmin^{1,2,3}, XIAO Ji¹, CHEN Peng¹, TAN Ping^{1,2,3}, LIU Yanhui^{1,2,3}

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology, Guangzhou 510405, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigation and Structural Safety, Ministry of Education, Guangzhou 510405, China)

Abstract: The base isolated structures can greatly reduce the seismic response of the superstructure and protect the structure under rare earthquakes. However, under strong earthquakes exceeding rare earthquakes, displacement of the isolation layer may exceed the width of the isolation trench, causing impact between isolated structure and retaining wall. A base isolated structure model considered the nonlinearity of the superstructure is established. The fortification intensity is 8. The seismic response under strong earthquakes exceeding rare

收稿日期: 2018-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(51468050、51778163); 广东省教育厅创新团队项目(2016KCXTD016); 广州市科技计划项目(20170710333);

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.

earthquakes is analyzed. The results show that the impact between isolated structures and retaining wall decreases the displacement of the isolation layer. The acceleration, story drift and story shear force of the upper structure are obviously enlarged, which increases with the increase of impact stiffness and ground motion intensity, and decreases with the increase of the width of isolation trench. When the impact stiffness increases to a certain extent, the increase of the interlayer displacement is no longer sensitive to the increase of the impact stiffness, but the acceleration and story shear force of the superstructure do not show this trend. In addition, the collision causes the maximum compressive pressure of the bearing to increase and the minimum compressive surface pressure to decrease.

Keywords: Strong earthquake; Base isolation structure; Impact; Response

0 引言

关于地震作用下的结构碰撞问题,早期研究主要集中于相邻房屋结构之间及桥梁结构的碰撞作用。基础隔震结构可以大幅降低上部结构的地震响应,但隔震层水平刚度较小,在地震作用下的位移主要集中在隔震层,我国的大地构造位置造成地震多发且震害严重,地震烈度超过本地区设防烈度时有发生,因此隔震结构与隔震沟挡土墙(基坑侧壁)之间可能会发生碰撞。

Maison B F 以美国第一幢叠层橡胶支座隔震建筑为例,采用 ETABS 建立三维模型(上部结构弹性),分析了碰撞对上部结构地震响应的影响^[1]。Hall J F 和 Heaton T H 将上部结构为 3 层的隔震结构简化为 4 质点模型,研究了隔震沟的预留宽度、隔震支座阻尼等因素对隔震结构与隔震沟挡土墙发生碰撞后的响应影响^[2]。Tsai H C 把上部结构理想化为弹性的剪切变形梁,与隔震结构底板相撞的基坑侧壁用弹簧阻尼单元模拟,研究了弹簧的刚度、基底板与基坑之间的预留宽度等因素对隔震结构碰撞响应的影响^[3]。中安诚明等将上部结构为 5 层的隔震结构简化为 2 质点模型,通过改变挡土墙刚度,研究了碰撞后隔震结构的地震响应^[4]。Matsagar V A, Jangid R S 对不同类型的隔震结构(上部结构弹性、多质点模型)在近断层地震作用下与相邻附属结构(挡土墙等)的碰撞反应作了研究^[5]。Komodromos P 对上部结构为 4 层的隔震结构,采用多质点弹性模型,探讨了不同隔震沟宽度及碰撞刚度对隔震结构位移、加速度及基底剪力系数的影响^[6]。叶献国、谢一可选用某四层钢筋混凝土框架结构教学楼为对象,采用线性弹簧模拟碰撞力,分别从隔震距离(4 cm、6 cm、7 cm)、地震动强度、隔震支座、上部结构刚度和碰撞刚度五个方面分析了碰撞对结构地震响应的影响^[7]。樊

剑对不同类型的基础隔震结构(上部结构 3 层、多质点模型)在强烈地震作用下与周围附属结构的碰撞反应作了研究,并分析了隔震类型、上部结构自振周期和层数以及附属结构刚度对基础隔震结构碰撞反应的影响^[8]。叶昆等通过 SAP2000 建立了平面框架模型(上部结构 5 层)研究了碰撞对基础隔震结构的影响规律,并进一步分析了隔震距离、不同地震动、碰撞刚度对碰撞响应的影响。研究发现,碰撞会使结构上部绝对加速度和层间位移放大,通过控制变量的方法,也可以发现,随着隔震距离的减小,地震作用的增大,碰撞刚度的增大,结构的地震响应也会增大^[9]。

既往研究的上部结构大多为质点系模型或者低矮建筑,考虑上部结构非线性及按规范要求设置隔震沟宽度后,基础隔震结构与周边挡土墙碰撞对上部结构地震响应影响的相关研究相对较少。

1 隔震模型介绍及地震波输入

1.1 隔震模型

采用的隔震结构模型,上部结构为 8 层(钢筋混凝土框架),乙类建筑,层高 3.6 m,隔震层层高 1.9 m,上部结构平面示意图见图 1,8 度设防,Ⅱ类场地,第一组, $T_g=0.35s$ 。由于结构规则、对称,选取图 1 中范围内的一榀框架进行计算分析。首先,依据《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[10]进行中震作用的减震效果分析,计算表明隔震后,水平向减震系数在 0.53 以下,上部结构可降半度设计;然后,用 PKPM 按 7.5 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,柱混凝土标号为 C40(4 层以下)、C35(5-7 层)及 C30(8 层),梁混凝土标号均为 C30,梁、柱截面尺寸及各层柱的混凝土标号见表 1。之后,用 ETABS 建立隔震模型(上部结构弹塑性),

采用纤维 P-M2-M3 铰单元模拟柱的非线性行为,采用 M3 铰单元模拟梁的非线性行为,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),隔震层支座在重力荷载代表值作用下的压应力限值按乙类建筑取 12 Mpa^[10],支座布置及参数见图 2 及表 2,隔震前结构的基本周期为 1.258 s,隔震后周期为 4.604 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 11.64 Mpa 及 11.31 Mpa。

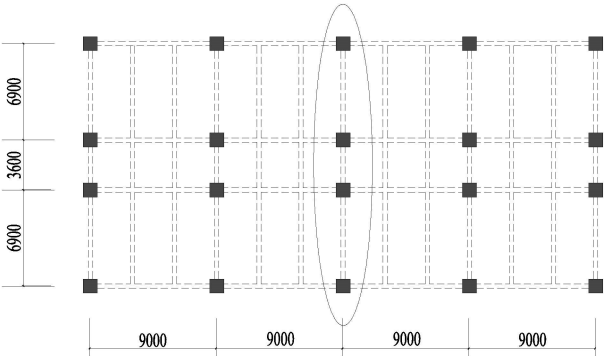


图 1 结构平面布置图
Fig. 1 Structural layout

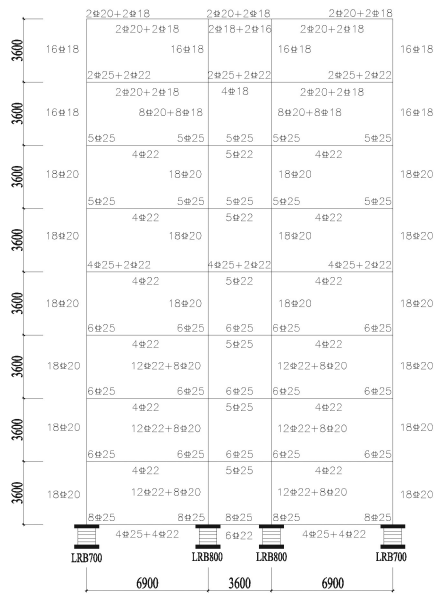


图 2 配筋及支座布置图
Fig. 2 Reinforcement drawing and supports arrangement

表 1 梁柱截面尺寸(mm)

楼层	边柱	中柱	梁
隔震层	1100×1100	1200×1200	400×900
1~3 层	700×700	800×800	400×550
4~6 层	700×700	700×700	400×550
7~8 层	600×600	600×600	400×550

表 2 支座设计参数
Table 2 Data for LRB

型号	LRB700	LRB800
橡胶 G 值/ MPa	0.392	0.392
铅径 D_p /mm	700	800
内部橡胶总厚 T_r /mm	140	162
第 1 形状系数 S_1	35	33.3
第 2 形状系数 S_2	5	4.94
竖向刚度 K_v / (kN.mm ⁻¹)	3259	3535
屈服后刚度 K_d / (kN.mm ⁻¹)	1.084	1.221
屈服力 Q_d / kN	122.7	140.9

1.2 地震波输入

在首先进行的无碰撞地震响应分析时,输入地震波选择了 7 条地震波(5 条天然波见表 3 所示,及 2 条人工波),分别进行了 8 度罕遇地震、8.5 度罕遇地震、9 度罕遇地震下的时程分析,加速度峰值依次为 4.0 m/s²、5.1 m/s² 及 6.2 m/s²。大震输入时,2 条人工波与 $T_g=0.4$ s 的规范反应谱相吻合,按《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)^[10]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主要周期点大于规范的 65%,平均地震影响系数曲线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。以 8 度大震的时程分析得到的隔震层位移按规范确定隔震沟宽度。

在之后进行的碰撞地震响应分析时,选用 GM1 波、GM2 波及人工波 1,进行 8.5 度罕遇地震及 9 度罕遇地震作用下的时程分析。

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
GM1	Chi-Chi	CHY052-W
GM2	Landers	MCF090
GM3	Imperial Valley	CAL225
GM4	San Fernando	ISD284
GM5	Darfield Landers	DORCN20W

3 地震响应分析

3.1 无碰撞地震响应

图 4、图 5 及图 6 分别为 8 度罕遇地震作用

下,上部结构楼层加速度包络图、层间位移角包络图及层剪力包络图。由图 4 可见,上部结构的加速度响应最大值出现在顶层,上部结构中下部的加速度响应最大值出现在首层底。8.5 度罕遇地震及 9 度罕遇地震作用下,顶层加速度依然最大,首层底加速度次之,表 4 为 GM1、GM2 及人工波 1 输入时,结构顶层及首层底的最大加速度,均比输入加速度峰值小 50%以上,基础隔震发挥出良好的隔震效果。8 度罕遇地震作用下,七条波平均后,最大层间位移角平均值为 1/323,小于规范的 1/100 限值;8.5 度罕遇地震及 9 度罕遇地震作用下,七条波平均后,最大层间位移角平均值分别为 1/201 及 1/122,表 5 为 GM1、GM2 及人工波 1 输入时,上部结构最大层间位移角及所在楼层。表 6 为 8.5 度罕遇地震及 9 度罕遇地震作用下, GM1、GM2 及人工波 1 输入,上部结构基底剪力系数。

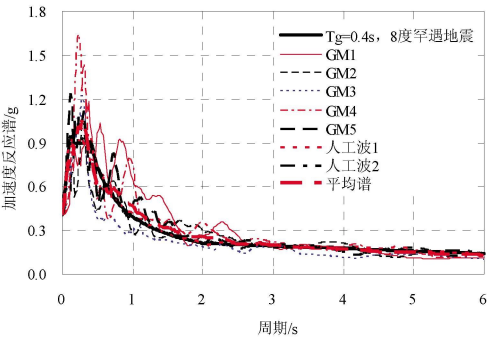


图 3 输入地震波加速度反应谱与规范反应谱对比
Fig. 3 Comparison between input waves response spectrum and China earthquake response spectrum

8 度罕遇地震、8.5 度罕遇地震及 9 度罕遇地震作用下,七条波平均后,隔震层位移分别为 279.9 mm、401.8 mm 及 528.1 mm。8.5 度罕遇地震及 9 度罕遇地震作用下, GM1、GM2 及人工波 1 输入,隔震层位移见表 7,支座的最大、最小面压见表 8,以压为正,支座未出现拉应力,始终处于受压状态;边柱下 LRB700 支座面压相对于重力荷载作用下面压(11.64 MPa)的变动,分别约为±50%、±60%,略大于中柱下 LRB800 支座的面压变动。

表 4 顶层及首层底最大加速度(m/s², 无碰撞)
Table 4 Peak acceleration of top floor and isolation layer (m/s², no impact)

地震影响	楼层	输入地震波		
		GM1	GM2	人工
8.5 度罕遇地震	8	2.498	2.084	1.8350
	0	1.942	1.216	1.601
9 度罕遇地震	8	3.089	2.328	2.3270
	0	2.560	1.583	2.307

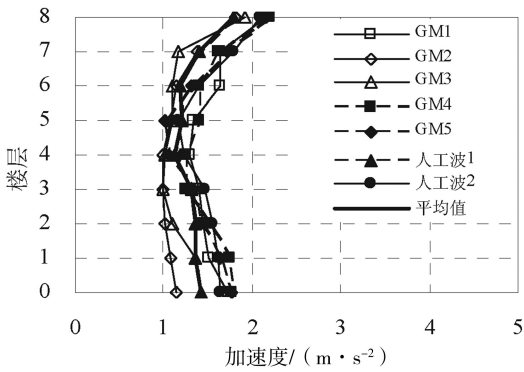


图 4 加速度包络图(8 度无碰撞)
Fig.4 Peak acceleration envelope diagram (Intensity 8, no impact)

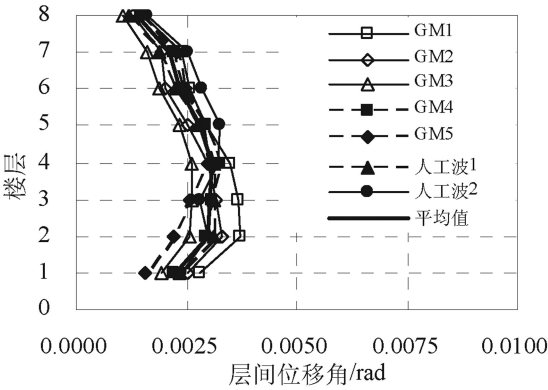


图 5 层间位移角包络图(8 度无碰撞)
Fig.5 Story drift angle envelope diagram (Intensity 8, no impact)

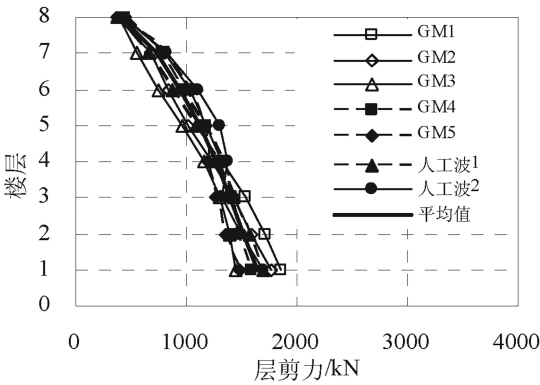


图 6 层剪力包络图(8 度无碰撞)
Fig.6 Peak story shear force envelope diagram (Intensity 8, no impact)

表 5 上部结构最大层间位移角及楼层 (1/θ, 无碰撞)
Table 5 Peak story drift angle of superstructure and floor (1/θ, no impact)

地震影响	输入地震波		
	GM1	GM2	人工波 1
8.5 度罕遇地震	141, 2	167, 2	171, 2
9 度罕遇地震	92, 2	102, 2	105, 2

表 6 上部结构基底剪力系数(无碰撞)
Table 6 Base shear coefficient of superstructure (no impact)

地震影响	输入地震波		
	GM1	GM2	人工波 1
8.5 度罕遇地震	0.135	0.128	0.131
9 度罕遇地震	0.162	0.156	0.163

8 度设防地震、8 度罕遇地震、8.5 度罕遇地震及 9 度罕遇地震作用下，隔震层位移见表 2-11，由表可见，隔震层位移增大明显大于地震波加速度输入峰值的增大，表明随着地震作用的增大，变形主要集中在隔震层，隔震层发挥了良好的隔震耗能功能。8 度罕遇地震、8.5 度罕遇地震及 9 度罕遇地震作用下，支座最大、最小面压及相对于重力荷载下面压的变化程度均出现在 LRB700 支座；LRB700 支座的最大、最小面压见表 8，以压为正。由于上部结构高宽比(1.66)较小，计算结果表明，支座未出现拉应力，始终处于受压状态。分析可知，随地震波输入峰值的增加，边柱下 LRB700 支座面压相对于重力荷载作用下面压的变动，分别约为±40%、±50%、±60%。

表 7 隔震层位移(mm, 无碰撞)
Table 7 Displacement of isolation layer (mm, no impact)

地震影响	输入地震波		
	GM1	GM2	人工波 1
8.5 度罕遇地震	475.1	437.8	457.5
9 度罕遇地震	596.6	565.6	605

表 8 支座面压(MPa, 无碰撞)
Table 8 Compressive stress of bearing (MPa, no impact)

地震影响	支座型号	支座面压	输入地震波		
			GM1	GM2	人工波
8 度罕遇地震	LRB700	最大	16.35	16.00	16.07
		最小	7.07	7.38	7.30
8.5 度罕遇地震		最大	17.43	17.16	17.43
		最小	5.99	6.35	6.10
9 度罕遇地震		最大	18.71	18.35	18.72
		最小	4.93	5.32	4.98

3.2 与挡土墙碰撞地震响应分析

3.2.1 碰撞模型选用及参数设置

樊剑等研究表明，不同碰撞分析模型对最终计算结果的影响不大，但非线性碰撞模型(Hertz 模型和 Hertz-damp 模型)的计算时间较线性弹簧碰撞模型和 Kelvin 模型的计算时间长很多，本文的分析选用线性弹簧碰撞模型。

隔震结构模型在 8 度罕遇地震作用下，七条波的隔震层位移的平均值为 279.9 mm，根据《抗震设计规范》(GB 50011-2010)，隔震沟的宽度不宜小于隔震支座在 8 度罕遇地震作用下的最大水平位移值的 1.2 倍且不小于 200 mm，则隔震沟宽度不小于 336 mm，即可满足规范要求，将隔震沟宽度分别取为 350 mm、400 mm，设置钢筋混凝土挡土墙，同时分析碰撞刚度对基础隔震结构碰撞响应的影响，以“K”代表隔震层屈服后刚度，碰撞刚度分别设为 10 K、20 K、50 K。

3.2.2 上部结构加速度

图 7 为在 8.5 度、9 度罕遇地震作用下，GM1 波输入，基础隔震结构设置不同隔震沟宽度、碰撞刚度时，碰撞前后，上部结构楼层加速度包络图，表 9 为结构顶层及首层底的层最大加速度以及相对于无碰撞上部结构层最大加速度的放大系数，表中斜体加粗的层最大加速度大于对应的输入加速度峰值。

结合图 7 及表 9 可见，与无碰撞相比较，碰撞后，上部结构的加速度响应出现明显放大，加速度响应放大程度随碰撞刚度及地震动强度的增大而增大，随隔震沟宽度的增大而减小。与无碰撞的加速度响应最大值出现在顶层不同，碰撞后，加速度响应最大值均出现在首层底，中下部楼层(以 4 层为分界点)加速度放大明显比中上部楼层强烈。

由表 9 分析，与输入加速度峰值对比，8.5 度罕遇地震作用下，当隔震沟宽度为 350 mm，碰撞刚度分别为 10 K、20 K、50 K 时，顶层最大加速度分别为输入的 71.1%~82.1%，84.4%~102.7%，100.2%~127.1%，首层底最大加速度分别为输入的 71.5%~95.1%，98.5%~138.1%，171.1%~232.5%；当隔震沟宽度为 400 mm，碰撞刚度分别为 10 K、20 K、50 K 时，顶层最大加速度分别为输入的 54.9%~64.4%，66.8%~84.6%，78.3%~107.5%，首层底最大加速度分别为输入的 57.0%~77.0%，82.3%~115.1%，134.6%~200.2%；与挡土墙碰撞

后, 随隔震沟宽度的减小及碰撞刚度的增大, 隔震结构对层最大加速度的减震效果大为降低, 甚至出现放大的结果, 9 度罕遇地震作用下, 这一趋势更为明显, 其它楼层最大加速度也表现出这一趋势。过大的加速度会造成对加速度敏感的结构、重要设备及非结构构件等造成不利影响, 因此, 应避免隔震结构与周边挡土墙的碰撞, 隔震沟的宽度不宜过窄或预留不足。

表 9 顶层及首层底最大加速度(m/s², 碰撞)
Table 9 Peak acceleration of top floor and isolation layer(m/s², impact)

地震影响	隔震沟宽度/mm	楼层	碰撞刚度/k	输入地震波		
				GM1	GM2	人工波 1
8.5 度罕遇地震	350	8	10	3.628	3.679	4.188
		0		3.646	4.027	4.851
		8	20	4.306	4.693	5.236
		0		5.024	6.210	7.042
		8	50	5.111	5.914	6.481
		0		8.727	11.291	11.858
	400	8	10	3.048	2.799	3.385
		0		3.107	2.908	3.927
		8	20	3.405	3.484	4.316
		0		4.198	4.340	5.868
		8	50	3.993	4.397	5.480
		0		6.865	7.689	10.212
9 度罕遇地震	350	8	10	4.494	5.337	5.175
		0		4.579	6.894	6.148
		8	20	5.558	6.732	6.270
		0		6.596	10.667	8.843
		8	50	6.679	8.446	7.345
		0		11.382	18.808	14.545
	400	8	10	4.166	4.905	4.594
		0		4.329	6.086	4.855
		8	20	5.298	6.170	5.265
		0		5.990	9.603	6.960
		8	50	6.168	7.748	6.788
		0		10.298	17.650	12.161

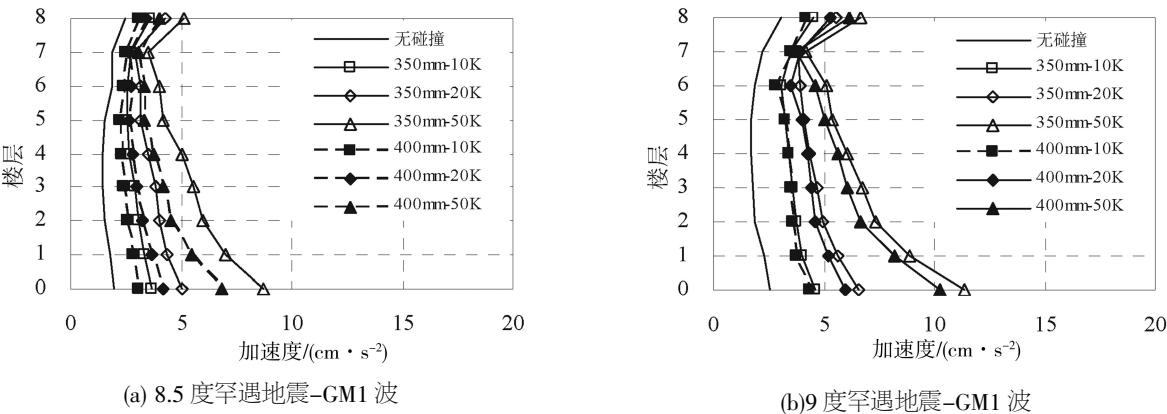


图 7 加速度包络图
Fig.7 Peak acceleration envelope diagram

3.2.3 上部结构层间位移

图 8 为在 8.5 度、9 度罕遇地震作用下，GM1 波输入，基础隔震结构设置不同隔震沟宽度、碰撞刚度时，碰撞前后，上部结构的层间位移角包络图，表 10 列出了不同工况上部结构的最大层间位移角，图 9 为 GM1 波输入时，设置不同隔震沟宽度、碰撞刚度时，各楼层层间位移响应变化情况。

由图 8 可见，与无碰撞相比较，碰撞后，上部结构的层间位移响应出现明显放大，上部结构的层间位移响应放大程度随碰撞刚度及地震动强度的增大而增大，随隔震沟宽度的增大而减小，上部结构最大层间位移出现在第 2 层。结合图 9 可见，当碰撞刚度为 10 K 时，结构从无碰撞到发生碰撞，各楼层层间位移有较大程度的增大；当碰撞刚度大于 20 K 时，层间位移的增大趋于平

缓，表明结构层间位移对碰撞刚度的增大不再敏感，9 度罕遇地震作用下，这一趋势更为明显；对比表 9 及表 10，不同于层间位移，加速度响应的放大并非随碰撞刚度的增大而趋于平缓，特别是首层底最大加速度。基于 8 度罕遇地震作用下隔震层位移及规范，当隔震沟宽度为 350 mm 时，8.5 度罕遇地震作用下，碰撞后，上部结构最大层间位移角易于超过 1/100 的限值，9 度罕遇地震作用下，隔震沟宽度设为 350 mm 或 400 mm，碰撞后，上部结构最大层间位移角接近框架结构弹塑性层间位移角 1/50 的限值^[10]。可见，考虑到超过 8 度罕遇地震的强震发生的可能性，按 1.2 倍的 8 度罕遇地震作用下的隔震层位移确定的隔震沟宽度，偏于不安全，隔震沟的宽度不宜过窄或预留不足。

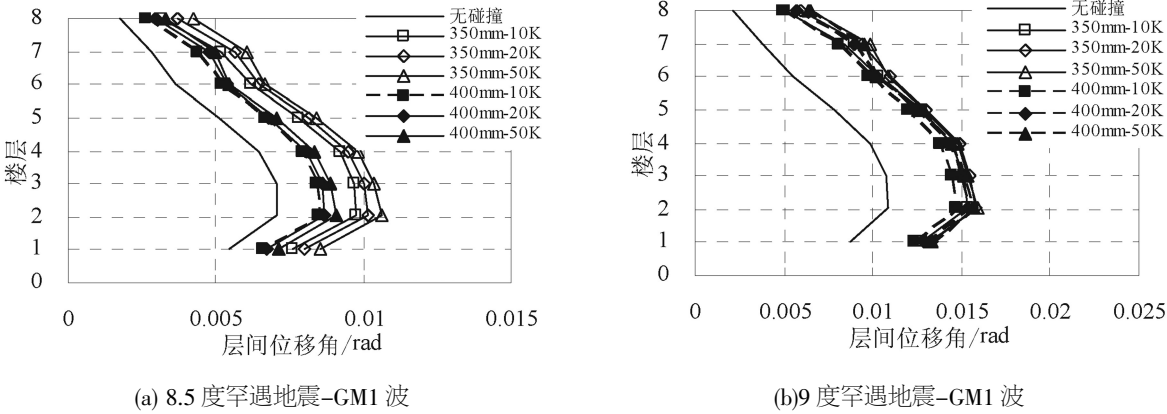


图 8 层间位移角包络图
Fig.8 Story drift angle envelope diagram

表 10 最大层间位移角(碰撞)
Table 10 Peak story drift angle (impact)

地震影响	隔震沟宽度/mm	碰撞刚度/K	输入地震波		
			GM1	GM2	人工波 1
8.5 度罕遇地震	350	10	10	11	105
		20	99	102	95
		50	94	97	90
	400	10	118	14	129
		20	115	132	118
		50	110	12	109
9 度罕遇地震	350	10	65	65	65
		20	6	61	62
		50	6	60	62
	400	10	68	7	66
		20	65	68	64
		50	64	66	63

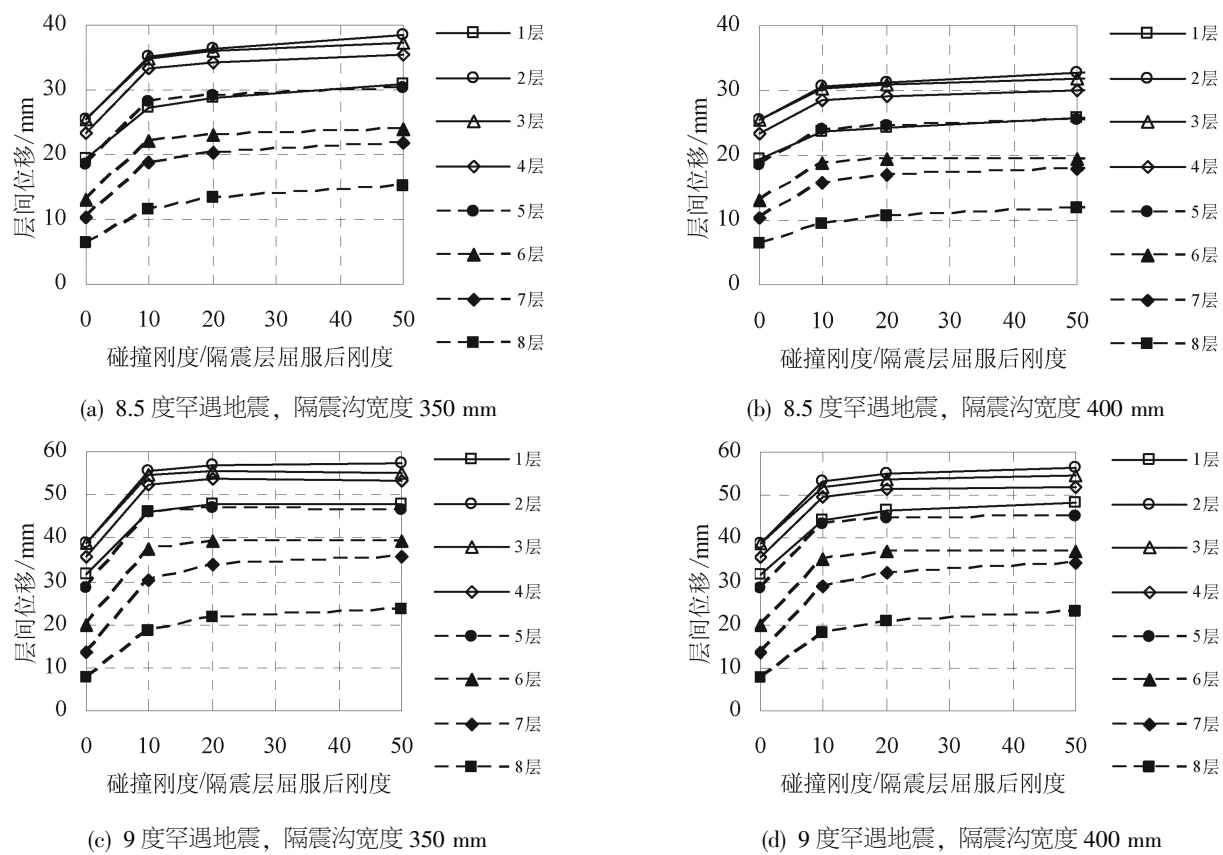


图9 层间位移(碰撞)
Fig.9 Story displacement (Impact)

3.2.4 上部结构层剪力

图 10 为在 8.5 度、9 度罕遇地震作用下, GM1 波输入, 基础隔震结构设置不同隔震沟宽度、碰撞刚度时, 碰撞前后, 上部结构的层剪力包络图, 表 11 为上部结构基底剪力系数。由图 10 分析可知, 与无碰撞相比较, 碰撞后, 上部结构的层剪力出现明显放大, 上部结构的层剪力放大程

度随碰撞刚度及地震动强度的增大而增大, 随隔震沟宽度的增大而减小。由表 11 分析可知, 碰撞后, 上部结构基底剪力系数显示出与上部结构层剪力同样的趋势, 对比表 10 及表 11, 不同于层间位移, 上部结构基底剪力系数的放大并非随碰撞刚度的增大而趋于平缓。

表 11 上部结构基底剪力系数(碰撞)
Table 11 Base shear coefficient of superstructure (impact)

地震影响	隔震沟宽度/mm	碰撞刚度/K	输入地震波		
			GM1	GM2	人工波 1
8.5 度罕遇地震	350	10	0.196	0.213	0.230
		20	0.219	0.247	0.267
		50	0.257	0.290	0.309
	400	10	0.184	0.174	0.194
		20	0.196	0.196	0.224
		50	0.216	0.229	0.266
9 度罕遇地震	350	10	0.259	0.307	0.304
		20	0.289	0.360	0.343
		50	0.317	0.427	0.377
	400	10	0.245	0.284	0.292
		20	0.275	0.330	0.306
		50	0.312	0.393	0.317

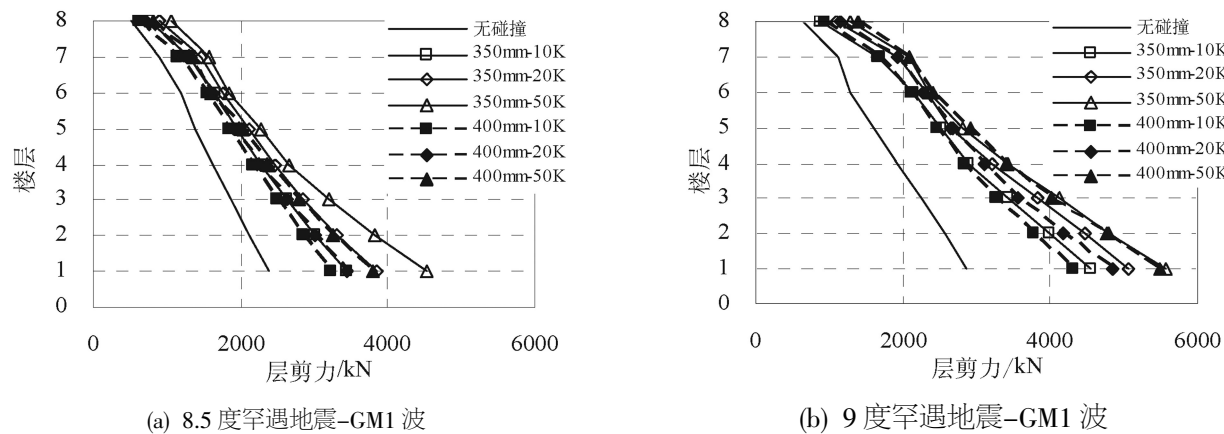


图 10 层剪力包络图

Fig.10 Peak story shear force envelope diagram

3.2.5 隔震层位移及支座面压

隔震层位移见表 12，可见，隔震层位移随隔震沟宽度及地震动强度的增加而增加，随碰撞刚度增加而减小。对碰撞后，隔震支座面压分析表明，支座未出现拉应力，碰撞导致支座最大面压的增大及最小面压的减小。与无碰撞时相同，支座最大、最小面压及相对于重力荷载下面压的变化程度均出现在 LRB700 支座；LRB700 支座，8.5 度罕遇地震作用下，隔震沟宽度为 350 mm 时，最大、最小面压分别为 19.82 MPa 及 3.73 MPa，隔震沟宽度为 400 mm 时，最大、最小面压分别为

19.07 MPa 及 4.48 MPa；9 度罕遇地震作用下，隔震沟宽度为 350 mm 时，最大、最小面压分别为 22.62 MPa 及 1.21 MPa，隔震沟宽度为 400 mm 时，最大、最小面压分别为 22.27 MPa 及 1.59 MPa。可见，随地震动强度的增加及隔震沟宽度的减小，LRB700 支座面压相对于重力荷载作用下面压的变动呈现增大的趋势，8.5 度罕遇地震及 9 度罕遇地震作用下，分别约为±70%、±90%，与无碰撞的支座面压对比表明，隔震结构与周边挡土墙碰撞后，会造成支座极大面压一定程度的增加，由于最小面压的一定程度的减小，偏于不利。

表 12 隔震层位移(mm，碰撞)

Table 12 Displacement of isolation layer (mm, impact)

地震影响	隔震沟宽度/mm	碰撞刚度/K	输入地震波		
			GM1	GM2	人工波 1
8.5 度罕遇地震	350	10	389.0	396.3	405.0
		20	377.1	383.9	383.1
		50	366.7	370.8	372.8
	400	10	428.4	424.5	434.9
		20	418.6	419.2	427.1
		50	411.1	412.8	417.5
9 度罕遇地震	350	10	413.3	437.5	429.1
		20	390.9	412.5	395.4
		50	371.4	387.1	373.7
	400	10	454.6	472.5	482.4
		20	437.3	452.2	454.1
		50	421.9	432.6	429.0

4 结语

本文对一 8 度设防的框架模型进行了 8 度罕

遇地震、8.5 度罕遇地震及 9 度罕遇地震作用下非线性时程分析；通过地震波强度、挡土墙刚度及隔震沟宽度这三个参数进行了隔震结构与周边挡

土墙碰撞后的地震响应分析,得出如下结论:

(1)按照规范要求,设置隔震沟宽度,在8.5度罕遇地震以及9度罕遇地震下,隔震结构可能与周边挡土墙发生碰撞。

(2)与无碰撞相比较,虽然减小了隔震层位移,但造成上部结构加速度的明显放大,放大程度随碰撞刚度及地震动强度的增大而增大,随隔震沟宽度的增大而减小。加速度响应最大值发生的位置由无碰撞隔震结构的顶层转移至与挡土墙碰撞的首层底,过大的加速度会对结构、重要设备及非结构构件等造成不利影响。

(3)碰撞导致层间位移及层剪力的明显放大,放大程度受碰撞刚度、地震动强度及隔震沟宽度的影响趋势与加速度响应一致。但碰撞刚度增大到一定程度后,层间位移的增大对碰撞刚度的增大不再敏感,而加速度及上部结构基底剪力系数则未表现出这一趋势。

(4)碰撞导致支座面压的相对于重力荷载作用下面压的变动呈现增大的趋势,偏于不利。

(5)由于碰撞会对基础隔震结构造成不利影响,考虑到超过本地区设防罕遇地震的强震发生的可能性,隔震沟的宽度不宜过窄或预留不足。

参考文献:

- [1] Maison B F, Ventura C E. Seismic Analysis of Base - Isolated San Bernardino County Building [J]. Earthquake Spectra, 1992, 8(4): 605-633. 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.
- [2] Hall J F, Heaton T H, Halling M W, Wald D J. Near-source ground motion and its effects on flexible buildings [J]. Earthquake Spectra, 1995, 11(4): 569-605.
- [3] Tsai H C. Dynamic analysis of base-isolated shear beams bumping against stops [J]. Earthquake Engineering and Structural dynamics, 1997, 26(5): 515-528.
- [4] 中安誠明, 中島正愛. 擁壁に衝突する免震建築に応答特性 [C]//日本建築学会大会学術講演梗概集, 2002, B-2: 477-478.
- [5] Matsagar V A, Jangid R S. Seismic response of base-isolated structures during impact with adjacent structures [J]. Engineering Structures, 2003, 25(12): 1311-1323.
- [6] Komodromos P. Simulation of the earthquake-induced pounding of seismically isolated buildings [J]. Computers & Structures, 2008, 86(7-8): 618-626.
- [7] 叶献国, 谢一可, 李康宁. 基础隔震结构在侧向碰撞下的地震反应分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(4): 161-167.
- [8] 樊剑, 刘铁, 魏俊杰. 近断层地震下摩擦型隔震结构与限位装置碰撞反应及防护措施研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40(5): 10-16.
- [9] 叶昆, 陈耀晖, 胡轩等. 近断层脉冲型地震动下基础隔震结构的碰撞响应 [J]. 地震工程与工程振动, 2014(s1): 836-840.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011-2010, 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.