

文章编号: 1673-2049(2009)02-0038-08

“5·12”汶川地震灾区典型教学楼框架与 楼梯共同工作性能

张望喜¹, 易伟建¹, 肖岩^{1,2}, 刘蒙¹, 张胜军¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 南加利福尼亚大学 土木系, 加利福尼亚 洛杉矶 CA90089)

摘要:以“5·12”汶川地震灾区典型教学楼框架为对象,研究了框架与楼梯的共同工作性能,包括框架独立单元的静力抗侧刚度、整体框架的静力抗侧刚度、整体框架动力特性,并进行了地震反应谱分析以及地震时程分析。结果表明:楼梯的存在对框架抗侧刚度、动力特性、规范地震反应谱下内力峰值、不同地震作用下的构件内力及节点反应谱峰值均存在较大的影响。所得结论可为灾区类似建筑的新建和修复加固提供必要参考。

关键词:“5·12”汶川地震;框架;楼梯;时程分析;教学楼;动力特性

中图分类号:TU352 **文献标志码:**A

Interaction Performance Between Frames and Stairs of Typical Teaching Building in “5·12” Wenchuan Earthquake Disaster Area

ZHANG Wang-xi¹, YI Wei-jian¹, XIAO Yan^{1,2}, LIU Meng¹, ZHANG Sheng-jun¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;

2. Department of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles CA90089, California, USA)

Abstract: Associating with the typical teaching building in “5·12” Wenchuan Earthquake disaster area of Sichuan Province, the interaction performance between frames and stairs was explored. The interests cover the static lateral stiffness of the static single frame unit, the lateral stiffness of the whole frame, the dynamic performance of the whole frame, the responding analysis under the standard earthquake spectrum of current Chinese code, and the calculation of time history under different earthquake records. The results show that the existence of stairs greatly affect the lateral stiffness of frame, dynamic performance, the peak of internal forces under standard earthquake spectrum of current Chinese code, and the peak of internal forces and node response spectrum under different earthquakes. These can be used as necessary references for the construction and strengthening of the similar buildings in disaster area.

Key words: “5·12” Wenchuan Earthquake; frame; stair; time history analysis; teaching building; dynamic performance

0 引言

目前,工程设计者大多只考虑楼梯部位楼面开洞及竖向荷载的传递,几乎不考虑楼梯对结构抗侧

刚度的影响。一般认为楼梯间部位的楼面开洞削弱了层刚度,但梯板(梁)又增大了层刚度,两者大体上相互抵消。

“5·12”汶川大地震(M8.0级)中,(中、小)学

收稿日期:2009-02-20

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90815002);国家自然科学基金项目(50678064);湖南省科技计划项目(2008FJ3122)

作者简介:张望喜(1971-),男,河北黄冈人,副教授,工学博士,E-mail:wzhang2000@163.com。

校和医院建筑成了重灾区,而学校建筑中,教学楼是重灾区;教学楼中楼梯间是重灾区^[1]。作为生命通道的楼梯间在地震中的性能表现,是土木工作者必须认真对待和考虑的问题。中华人民共和国住房和城乡建设部公告第 71 号(2008 年 8 月 1 日)对中国国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001,下文简称规范)进行了局部修订。本次修订内容中有近 20 处出现了“楼梯”,其中第 3.6.6 条中提到利用计算机进行结构抗震分析,其应符合下列要求:计算模型的建立、必要的简化计算与处理,应符合结构的实际工作状况;计算中应考虑楼梯构件的影响。对应修订说明中描述为:“本次修订,考虑到楼梯的梯板等具有斜撑的受力状态,对结构的整体刚度有较明显的影响,建议在结构计算中予以适当考虑。”

目前,公开发表的关于楼梯间对框架结构整体刚度影响的文献非常少,文献[2]~[5]中反映了中国关于带楼梯框架研究的主要成果,曹万林等的模

型试验表明,楼板的存在可以提高框架模型(两榀中框架,3 层,缩尺比例 1:3)层刚度约 100%。

结合笔者在“5·12”汶川地震灾区的考察成果,以典型(中、小)学校钢筋混凝土框架教学楼为研究对象,着重研究楼梯与框架之间的共同作用,分析楼梯对框架结构性能的影响,为灾区类似建筑的新建和修复加固提供必要参考^[6-10]。

1 研究对象

图 1、2 分别为四川理县某小学典型教学楼标准层平面和结构布置及配筋,整个建筑为 6 层,层高均为 3.6 m,混凝土强度等级 C30,主要构件截面尺寸:框架柱 500 mm×500 mm;横向框架梁 250 mm×600 mm;纵向框架梁 250 mm×400 mm;楼梯梯口梁 250 mm×400 mm;楼梯平台支撑柱及平台边梁 250 mm×250 mm;走廊边梁 250 mm×400 mm;构件材料弹性模量取 3.0×10^4 MPa。

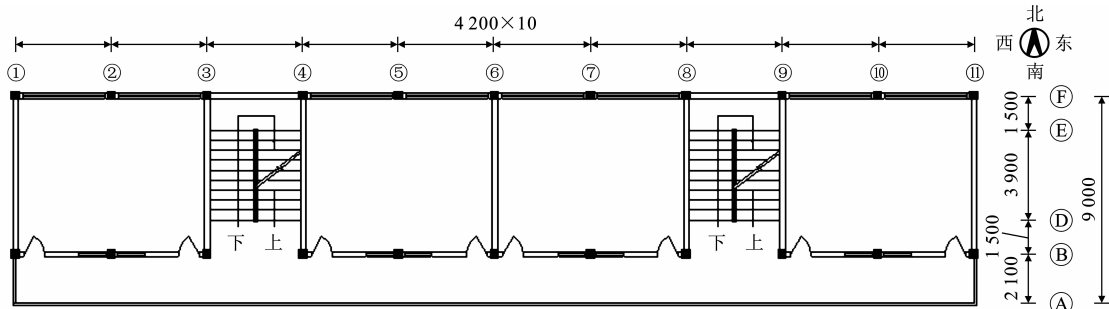


图 1 教学楼标准层平面(单位:mm)

Fig. 1 Plane of Standard Story in Teaching Building (Unit:mm)

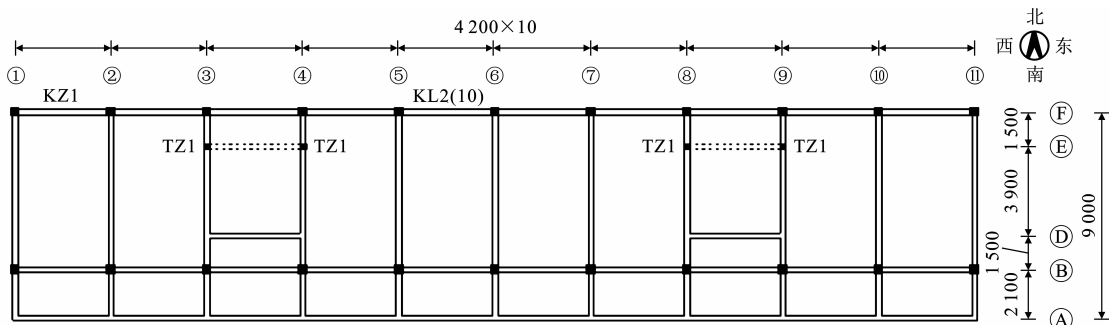


图 2 教学楼标准层结构布置(单位:mm)

Fig. 2 Structural Distribution of Standard Story in Teaching Building (Unit:mm)

2 框架独立单元静力抗侧刚度

为深入了解墙体开洞及楼梯对框架抗侧刚度的影响,取图 3 所示的有楼梯的两榀中框架独立单元和无楼梯的两榀中框架独立单元分别进行侧向受力分析。取相同的倒三角形荷载 F_i 沿房屋纵横 2 个方向分别作用在这 2 类框架独立单元的框架节点

(每层 4 个节点,每个节点上的荷载均为 F_i)上, F_i 的大小及框架节点水平位移见图 4 和表 1,图 4 中的位移比为有楼梯和无楼梯的框架节点位移的比。

由表 1 可以看出:由于楼板开洞、楼梯梁及楼梯板的影响,有楼梯的框架独立单元无论沿房屋纵向还是横向的各层整体水平位移(1[#]~4[#]点水平位移平均值)均小于无楼梯时的对应值;3[#]和 4[#]点有楼

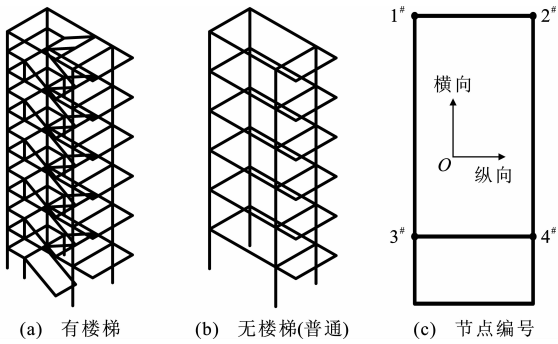


图3 框架独立单元与节点编号

Fig. 3 Single Frame Unit and Node Number

梯时沿房屋纵向的水平位移大于无楼梯时的对应值;有楼梯时1[#]和2[#]点沿房屋纵横2个方向及3[#]和4[#]点沿房屋横向的水平位移均小于无楼梯时的对应值。结果表明,由于楼板开洞的影响导致相关的框架柱抗侧刚度(层刚度)减小,但楼板的斜撑作用和平台板及相关梁的加强作用使框架柱的抗侧刚度增大。根据“5·12”汶川地震灾区典型教学楼的结构布置特点可知,楼梯的存在使对应框架独立单

表1 框架独立单元节点水平位移

Tab. 1 Lateral Displacements of Single Frame Unit Nodes

位移方向	楼层	F_i/kN	水平位移(有楼梯)/mm				水平位移(无楼梯)/mm			
			1 [#] 点	2 [#] 点	3 [#] 点	4 [#] 点	1 [#] 点	2 [#] 点	3 [#] 点	4 [#] 点
沿房屋纵向	6	15.0	31.178	31.178	33.115	33.115	33.845	33.845	32.245	32.245
	5	12.5	27.788	27.788	29.755	29.755	30.400	30.400	28.933	28.933
	4	10.0	22.980	22.980	24.808	24.808	25.295	25.295	24.055	24.055
	3	7.5	16.908	16.908	18.450	18.450	18.750	18.750	17.828	17.828
	2	5.0	10.100	10.100	11.190	11.190	11.318	11.318	10.778	10.778
	1	2.5	3.563	3.563	4.058	4.058	4.083	4.083	3.913	3.913
沿房屋横向	6	15.0	21.965	21.965	21.968	21.968	26.793	26.793	26.793	26.793
	5	12.5	19.953	19.953	19.958	19.958	24.360	24.360	24.360	24.360
	4	10.0	16.805	16.805	16.813	16.813	20.498	20.498	20.498	20.498
	3	7.5	12.663	12.663	12.673	12.673	15.400	15.400	15.400	15.400
	2	5.0	7.845	7.845	7.855	7.855	9.478	9.478	9.478	9.478
	1	2.5	2.955	2.955	2.968	2.968	3.535	3.535	3.535	3.535

元的水平侧移减少,沿房屋纵向约减小3%,沿房屋横向约减小18%。

3 整体框架静力抗侧刚度及动力特性

与第2节的分析结果类似,整体框架的静力抗侧刚度分析同样集中在房屋的纵向和横向,建立了图5所示的整体框架的计算模型,分有楼梯和无楼梯2种情况进行沿房屋纵向和沿房屋横向的侧向受力分析。

取相同的倒三角形荷载 F_i 沿房屋纵向和横向分别作用在2类框架独立单元的框架节点(每层22

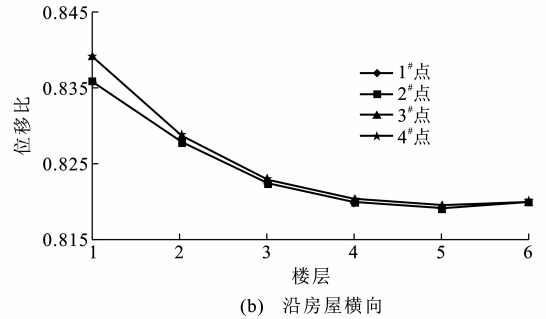
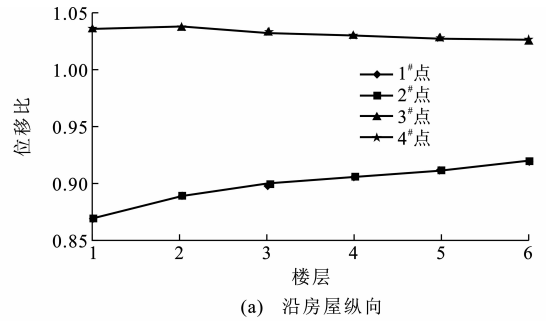


图4 相同荷载下框架独立单元节点水平位移比曲线

Fig. 4 Lateral Displacement Ratio Curves of Single Frame Unit Nodes Under Same Load

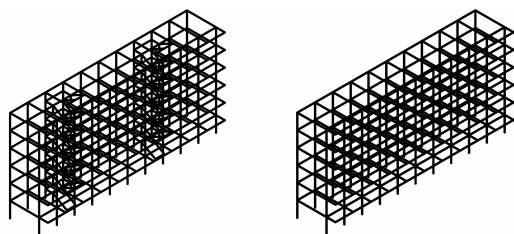
个节点,每个节点上的荷载为 F_i)上, F_i 的大小及框架节点水平位移见图6和表2。

由表2可以看出:由于楼板的存在,楼盖平面内刚度较大,同一框架中各层楼面节点的水平位移均十分接近;由于楼梯梁及楼梯板的影响,有楼梯的整体框架无论沿房屋纵向还是沿房屋横向各节点的水平位移均小于无楼梯时的对应值。根据“5·12”汶川地震灾区典型教学楼的结构布置特点可知,楼梯的存在使整体框架的水平侧移减少,沿房屋纵向约减小4%,沿房屋横向约减小7%。与框架独立单元降低幅度的比较结果体现了楼板及其开洞的影响。

表 2 整体框架节点水平位移

Tab. 1 Lateral Displacements of Whole Frame Nodes

位移方向	楼层	F_i/kN	水平位移(有楼梯)/mm				水平位移(无楼梯)/mm			
			1#点	2#点	3#点	4#点	1#点	2#点	3#点	4#点
沿房屋纵向	6	15.0	19.318	19.309	19.303	19.302	20.101	20.093	20.091	20.082
	5	12.5	17.750	17.745	17.744	17.745	18.472	18.470	18.469	18.468
	4	10.0	15.105	15.098	15.096	15.097	15.716	15.712	15.711	15.710
	3	7.5	11.517	11.512	11.510	11.513	11.981	11.978	11.977	11.976
	2	5.0	7.262	7.258	7.258	7.261	7.551	7.550	7.550	7.550
	1	2.5	2.825	2.829	2.834	2.839	2.942	2.950	2.952	2.954
沿房屋横向	6	15.0	24.294	24.273	24.266	24.265	26.232	26.224	26.221	26.216
	5	12.5	22.086	22.069	22.063	22.064	23.856	23.850	23.848	23.844
	4	10.0	18.600	18.586	18.581	18.583	20.084	20.079	20.077	20.073
	3	7.5	14.002	13.990	13.987	13.991	15.099	15.096	15.095	15.092
	2	5.0	8.652	8.647	8.647	8.651	9.306	9.305	9.305	9.303
	1	2.5	3.250	3.250	3.252	3.257	3.481	3.483	3.484	3.484

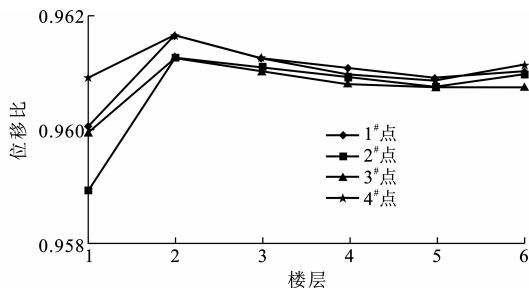


(a) 有楼梯

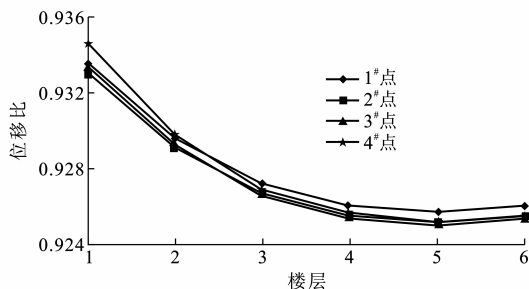
(b) 无楼梯

图 5 整体框架分析模型

Fig. 5 Analysis Model of Whole Frame



(a) 沿房屋纵向



(b) 沿房屋横向

图 6 相同荷载下整体框架节点水平位移比曲线

Fig. 6 Lateral Displacement Ratio Curves of Whole Frame Nodes Under Same Load

为进一步研究楼梯对框架抗侧刚度的影响,对图 5 所示整体框架的固有频率和振型分别进行计算

分析,构件质量按实际体积及钢筋混凝土重度进行计算,构件钢筋混凝土重度近似取 $25 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,计算结果见表 3。由表 3 可以看出:楼梯的存在使框架结构对应的弯曲模态频率略有提高(2%~8%),对扭转模态频率的影响不明显;对弯曲模态振型的影响不明显,对扭转模态振型出现的阶次存在明显影响,尤其是在高阶模态时。

4 地震反应谱分析

为进一步研究罕遇近场地震下楼梯对框架梁、柱反应谱最大弯矩的影响,根据“5·12”地震灾区典型教学楼的特点,采用规范标准反应谱曲线对图 5 所示整体框架进行反应谱分析,横隔墙和外墙(填充墙)的质量向框架节点凝聚,墙体(含粉饰层)厚度取 250 mm,重度近似取 $22 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。水平地震影响系数最大值为 0.5,对应于 7 度(0.10g, g 为重力加速度)设防区,设计地震分组为第 2 组,场地类别为 II 类,特征周期为 0.40 s,结构阻尼比为 0.05,地震作用方向沿房屋横向,其分析结果见图 7 和表 4。图 7 中的弯矩比为有楼梯与无楼梯的框架节点弯矩的比。









































由表 4 可以看出:楼梯的存在使框架梁对应的反应谱最大弯矩绝对值下降 6%~18%;框架柱对应的最大弯矩绝对值则下降 7%~10%,受影响最大的为楼梯所在区格的框架梁和框架柱。

5 地震时程分析

为进一步研究罕遇近场地震下楼梯对框架梁、柱最大弯矩时程曲线的影响,采用与地震反应谱相

表 3 整体框架动力特性计算结果

Tab. 3 Calculation Results of Whole Frame Dynamic Characteristics

阶次	有楼梯		无楼梯		阶次	有楼梯		无楼梯	
	频率/Hz	振型图	频率/Hz	振型图		频率/Hz	振型图	频率/Hz	振型图
1	0.96		0.89		11	8.59		8.60	
2	1.03		1.01		12	8.79		8.81	
3	1.08		1.01		13	9.12		9.23	
4	3.06		2.85		14	9.25		9.86	
5	3.24		3.18		15	10.40		11.11	
6	3.40		3.19		16	11.62		11.23	
7	5.62		5.28		17	11.75		11.44	
8	5.83		5.71		18	11.89		11.44	
9	6.12		5.79		19	11.92		11.62	
10	8.53		8.15		20	12.26		11.99	

同的计算模型进行地震时程分析。地震动记录采用 3 组典型实测强震记录: El Centro 波、迁安波和 Taft 波。地震波时程曲线均按比例将最大值转换成 $2.20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 结构阻尼比取 0.05, 地震作用方向沿房屋横向。由图 8~10 可以看出: 在 El Centro 波作用下, 楼梯的存在使框架梁端的正负弯矩分别下降 50% 和 38%; 框架柱顶的弯矩分别下降 42% 和 30%, 节点反应谱最大下降 16%; 在迁安波作用下, 楼梯的存在使框架梁端的正负弯矩分别下降 63% 和 67%, 框架柱顶的弯矩分别下降 68% 和 73%, 节点反应谱最大下降 14%; 在 Taft 波作用下, 楼梯的存在使框架梁端的正负弯矩分别下降 66% 和 63%, 框架柱顶的弯矩分别下降 62% 和

58%, 节点反应谱最大下降 25%。由此可见, 在不同的地震波作用下, 楼梯对构件弯矩及节点反应谱的影响程度不同, 最大弯矩发生的构件及最大反应谱发生的节点也可能不同。

6 结 语

(1) 对于“5·12”汶川地震灾区典型教学楼框架, 楼梯的存在使对应框架独立单元的水平侧移减少, 沿房屋纵向约减小 3%, 沿房屋横向约减小 18%。楼梯对“5·12”地震灾区典型教学楼抗侧刚度的影响主要是沿房屋横向, 对房屋纵向抗侧刚度的影响较小。

(2) 楼梯的存在使整体框架的水平侧移减少, 沿

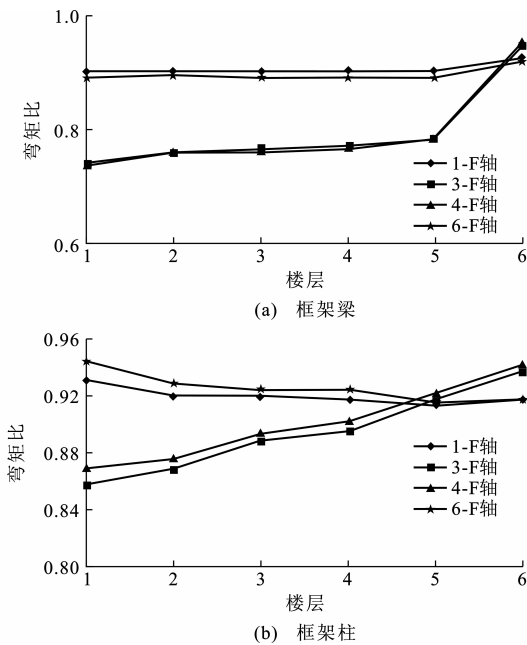


图 7 标准反应谱下整体框架梁、柱最大弯矩比曲线

Fig. 7 Maximal Moment Ratio Curves of Frame Beams and Columns Under Standard Response Spectrum

房屋纵向约减小 4%，沿房屋横向约减小 7%。与框架独立单元降低幅度的比较结果体现了楼梯及其开洞的影响。

(3)楼梯的存在使框架结构对应的弯曲模态频率略有提高(2%~8%)，对扭转模态频率的影响不

明显；对弯曲模态振型影响不明显，对扭转模态振型出现的阶次存在明显影响，尤其是在高阶模态时。

(4)楼梯的存在使框架梁对应的反应谱最大弯矩绝对值下降 6%~18%，框架柱对应的最大弯矩绝对值下降 7%~10%，受影响最大的为楼梯所在区格的框架梁和框架柱。

(5)在 El Centro 波作用下，楼梯的存在使框架梁端的正负弯矩分别下降 50%和 38%，框架柱顶的弯矩分别下降 42%和 30%，节点反应谱最大下降 16%；在迁安波作用下，楼梯的存在使框架梁端的正负弯矩分别下降 63%和 67%，框架柱顶的弯矩分别下降 68%和 73%，节点反应谱最大下降 14%；在 Taft 波作用下，楼梯的存在使框架梁端的正负弯矩分别下降 66%和 63%，框架柱顶的弯矩分别下降 62%和 58%，节点反应谱最大下降 25%。由此可见，在不同的地震波作用下，楼梯对构件弯矩及节点反应谱的影响程度不同，最大弯矩发生的构件及最大反应谱发生的节点也可能不同。

(6)由于周边框架的约束影响，楼梯梁及楼梯板存在地震引起的轴力、弯矩和剪力的不利影响，传统设计方法只考虑承受竖向荷载，设计偏于不安全，这也是地震灾区部分楼梯板出现严重裂缝的原因之一。本文中所得结论可为灾区类似建筑的新建和修复加固提供必要参考。

表 4 标准反应谱下整体框架梁、柱最大弯矩

Tab. 1 Maximal Moment of Frame Beams and Columns Under Standard Response Spectrum

位置	楼层	F_i/kN	最大弯矩(有楼梯)/(kN·m)				最大弯矩(无楼梯)/(kN·m)			
			1-F轴	3-F轴	4-F轴	6-F轴	1-F轴	3-F轴	4-F轴	6-F轴
框架梁	6	15.0	-121.72	-121.31	-120.79	-120.28	-131.67	-127.28	-127.30	-130.63
	5	12.5	-217.99	-190.60	-189.76	-215.29	-242.41	-242.76	-242.84	-241.71
	4	10.0	-308.28	-264.40	-263.31	-304.81	-343.27	-342.48	-342.67	-342.44
	3	7.5	-378.70	-321.85	-320.46	-374.36	-420.84	-419.67	-419.79	-419.63
	2	5.0	-423.98	-356.56	-354.97	-419.08	-470.85	-469.48	-469.57	-469.44
	1	2.5	-385.41	-315.65	-314.42	-381.09	-428.26	-427.24	-427.42	-427.19
框架柱	6	15.0	-127.69	-127.61	-128.01	-130.48	-139.04	-135.84	-135.70	-142.02
	5	12.5	-187.68	-180.42	-181.39	-192.91	-205.32	-196.59	-196.79	-210.53
	4	10.0	-223.89	-215.82	-216.98	-231.11	-244.02	-240.58	-240.59	-250.00
	3	7.5	-251.11	-240.64	-241.98	-258.92	-272.78	-270.86	-270.47	-279.65
	2	5.0	-251.24	-237.16	-238.71	-260.77	-273.03	-272.86	-272.78	-280.49
	1	2.5	-140.52	-131.00	-131.93	-148.67	-150.79	-152.72	-151.79	-157.48

参考文献:

References:

[1] 《汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告》编委会. 汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

Editorial Committee of Analytical Reports About Disaster Investigation and Reconstruction of Architecture Subjected to Wenchuan Earthquake. Analytical Reports About Disaster Investigation and Reconstruction of Architecture Subjected to Wenchuan Earthquake [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,

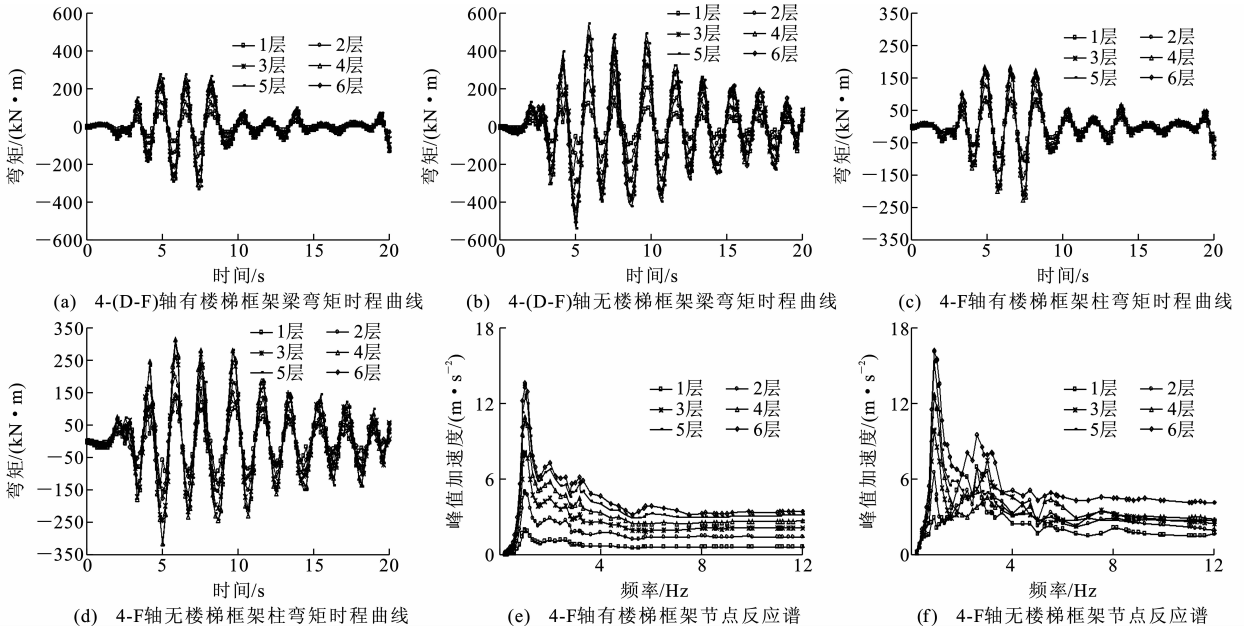


图8 El Centro波作用下有楼梯框架计算结果

Fig. 8 Calculation Results of Frame with Stairs Under El Centro Waves

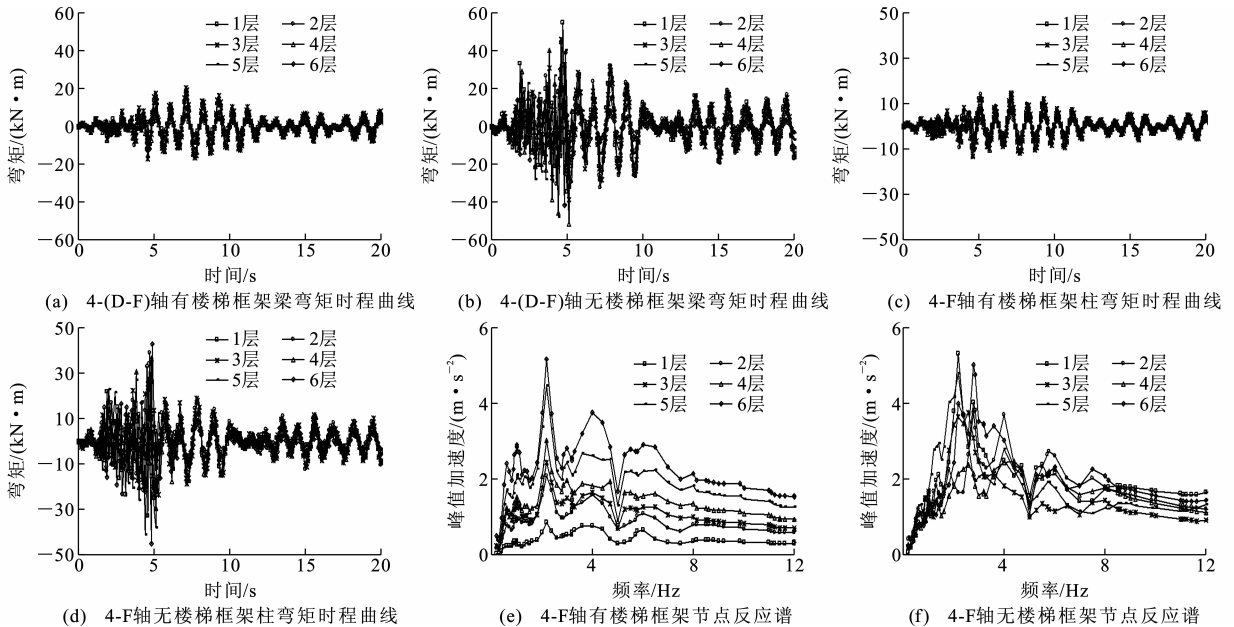


图9 迁安波作用下有楼梯框架计算结果

Fig. 9 Calculation Results of Frame with Stairs Under Qian-an Waves

2008.

[2] 曹万林, 庞国新, 李云霄. 带楼梯框架弹性层刚度的试验研究[J]. 世界地震工程, 1996(2): 29-32.

CAO Wan-lin, PANG Guo-xin, LI Yun-xiao. The Test Research on Elastic Floor Rigidity of Frame with Staircase[J]. World Information on Earthquake Engineering, 1996(2): 29-32.

[3] 曹万林, 庞国新, 李云霄. 带楼梯框架弹塑性工作性能研究[J]. 世界地震工程, 1996(3): 52-56.

CAO Wan-lin, PANG Guo-xin, LI Yun-xiao. Re-

search on Elastoplastic Performance of Frames with Staircases[J]. World Information on Earthquake Engineering, 1996(3): 52-56.

[4] 曹万林, 王光远, 刘建民, 等. 异型柱框架楼梯间结构层刚度及其衰减过程的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(1): 58-65.

CAO Wan-lin, WANG Guang-yuan, LIU Jian-min, et al. Experimental Study on Story Stiffness and Its Degeneration of Staircase Frame Structure with Special Shaped Columns[J]. Journal of Building Struc-

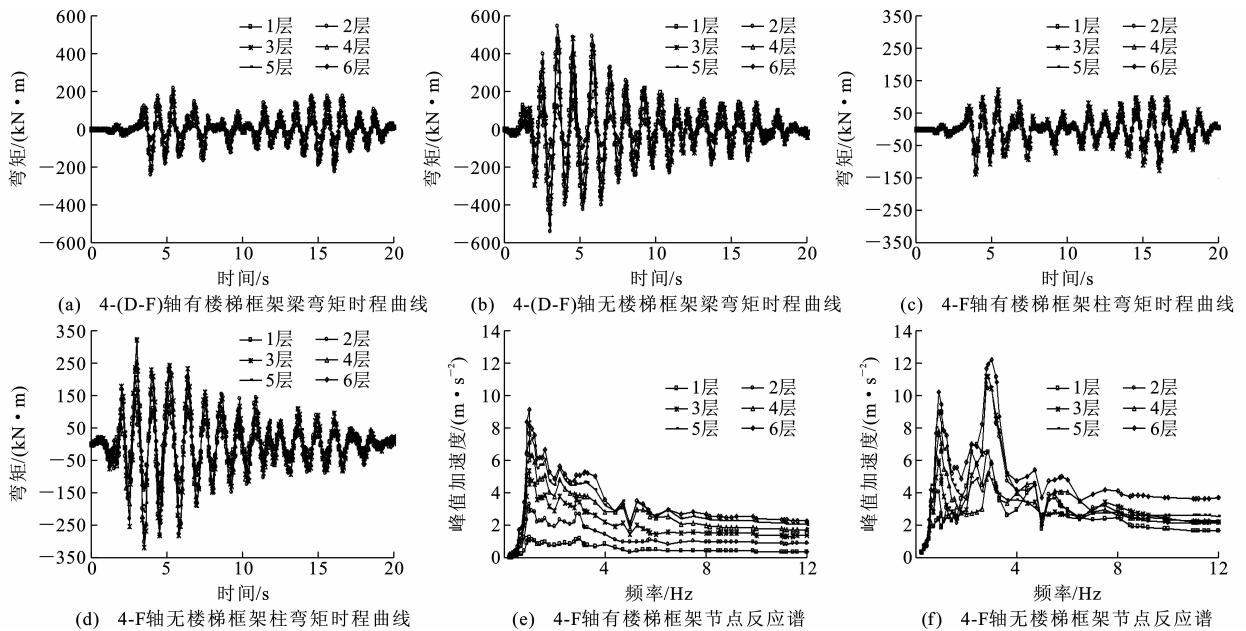


图10 Taft波作用下楼梯框架计算结果

Fig. 10 Calculation Results of Frame with Stairs Under Taft Waves

tures, 1998, 19(1): 58-65.

- [5] 曹万林, 胡国振, 周明杰, 等. 钢筋混凝土框架与楼梯共同工作性能试验研究[J]. 工程力学, 1999, 16(增2): 23-26.
- CAO Wan-lin, HU Guo-zhen, ZHOU Ming-jie, et al. Test Research on Performance of Interactions Between RC Frames and Staircases[J]. Engineering Mechanics, 1999, 16(S2): 23-26.
- [6] 门进杰, 史庆轩, 刘继明, 等. 高强混凝土复合受扭构件钢筋应变及极限扭矩的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(5): 648-653.
- MEN Jin-jie, SHI Qing-xuan, LIU Ji-ming, et al. Strain of Steel Reinforcement and Ultimate Torque on Torsional Behaviors of High-strength Reinforced Concrete Members Subjected to Combined Torsion [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(5): 648-653.
- [7] 卢林枫, 周绪红, 刘永健, 等. 交错桁架结构的设计[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(3): 308-313.
- LU Lin-feng, ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian, et al. Design of Staggered Truss Structure [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(3): 308-313.

- [8] 郭健, 刘伟庆. 钢筋混凝土异形柱框架-短肢剪力墙结构振动台试验与理论分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(5): 610-615.
- GUO Jian, LIU Wei-qing. Shaking Table Test and Theoretical Analysis on RC Frame-short Pier Shear Wall Structure with Special-shaped Columns [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(5): 610-615.
- [9] 白国良, 楚留声, 朱丽华. 型钢混凝土框架静力非线性分析塑性铰参数研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(6): 756-761.
- BAI Guo-liang, CHU Liu-sheng, ZHU Li-hua. Determination of Plastic Hinge Property for Steel Reinforced Concrete Frame in Nonlinear Static Analysis [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(6): 756-761.
- [10] 高洪俊, 王羨农, 闫亚光, 等. 框剪结构协同分析的状态空间法[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(4): 573-575.
- GAO Hong-jun, WANG Xian-nong, YAN Ya-guang, et al. Coordination Analysis of Frame-shear Wall Structure [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(4): 573-575.