

基于摩擦摆支座的层间隔震结构振动台 试验研究

段存坤,张春巍

(青岛理工大学土木工程学院,山东 青岛 266033)

摘要 目的 为解决基底隔震技术在高层结构中应用易倾覆倒塌的局限性,提出摩擦摆层间隔震技术,探究摩擦摆层间隔震技术在高层结构中应用的可行性。方法 在第三阶段9层 benchmark 模型的基础上,设计 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 2.065\text{ m}$ 的9层试验模型,并设计3种不同滑道半径的摩擦摆隔震支座;考虑8种隔震层布置位置、4条典型地震动和4种地震地面运动加速度峰值,进行摩擦摆层间隔震结构的振动台试验,研究摩擦摆层间隔震结构的动力响应及其参数影响规律。结果 在结构6~8层设置摩擦摆时,结构顶部加速度衰减率在30%~67%;采用摩擦摆层间隔震可以控制高宽比大于4的结构;将试验结果与数值模拟结果进行比较分析,验证了有限元模型能够较好地模拟摩擦摆层间隔震结构系统的动力响应。结论 摩擦摆层间隔震技术可用于高烈度地区高层结构的地震作用致结构振动控制,研究结果可为发展新型结构层间隔震技术奠定基础。

关键词 高层结构;摩擦摆支座;层间隔震;振动台试验

中图分类号 TU355

文献标志码 A

Shaking Table Test of Inter-Story Isolation Structure Based on Friction Pendulum System

DUAN Cunkun, ZHANG Chunwei

(College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, China, 266033)

Abstract: To solve the limitations of base isolation technology in the application of high-rise structures, the friction pendulum system (FPS) inter-story isolation technology is proposed to explore the feasibility of the application in high-rise structures. Based on the third stage 9-layer benchmark model, a 9-layer test model of $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 2.065\text{ m}$ is designed, and three kinds of FPS with different slideway radius are designed. In the test, 8 isolation layers, 4 typical ground motions, and 4 kinds of ground motion acceleration peak are considered to study the dynamic

收稿日期:2021-04-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0112400, 2017YFC0703603)

作者简介:段存坤(1991—),男,博士研究生,主要从事结构振动控制方面研究。

response of the FPS inter-story isolation structure and the influence of its parameters, and then the shaking table test of the FPS inter-story isolation structure is carried out. The test results show that when the FPS is installed on the top of the sixth to the eighth floor, the top acceleration attenuation rate is between 30% and 67%. The use of FPS inter-story isolation technology can control structures with an aspect ratio greater than 4. Comparing the test results with the numerical simulation results, it is verified that the finite element model can better simulate the dynamic response of the FPS inter-isolation structure system. The FPS inter-story isolation technology can be used for seismic control of high-rise structures in high-intensity areas. The results of this paper lay a solid theoretical foundation for the future research and development of new inter-story isolation technology.

Key words: high-rise structure; friction pendulum system; inter-story isolation technology; shaking table test

高层结构采用基础隔震后,因上部结构与隔震层刚度比较大,结构动力特性主要受薄弱隔震层的控制。采用基础隔震技术的高层建筑结构在受到地震作用并发生较大幅度的摆动时,会引起支座受拉破坏,使结构极易发生倾覆倒塌破坏^[1]。我国抗震设计规范对隔震结构的高宽比也有明确要求^[2];结构高宽比宜小于4。

层间隔震技术是在基础隔震技术的实践与研究中发展起来的一种新型隔震形式^[3-4],不仅可以将高层结构拆分成两个高宽比较小的子结构,使结构整体在地震作用下以剪切变形为主,避免了弯曲变形,而且消除了以往基底隔震结构将结构变形集中在隔震层上容易引起支座剪压破坏的缺点。摩擦摆隔震系统(Friction Pendulum System, FPS)由美国 V. A. Zayas 教授等研发^[5]。相比于传统橡胶隔震支座,具有大位移与自恢复的优点^[6-11]。因此,采用橡胶隔震支座的层间隔震结构可以由摩擦摆隔震系统替代^[12-13]。

为了解决高层建筑采用基础隔震技术易倾覆的问题,笔者将摩擦摆与层间隔震技术结合起来,提出了摩擦摆层间隔震技术,并应用在一个高层结构中进行振动台试验与数值模拟;研究摩擦摆层间隔震在大高宽比结构中的控制效果,并验证了其可靠性;分析了隔震层在不同位置以及地震动峰值的影响;研

究表明:当摩擦摆安装于6~8层,摩擦摆层间隔震技术可用于高烈度地区高层结构的振动控制,研究结果可为发展新型结构层间隔震技术奠定基础。

1 摩擦摆支座隔震机理

摩擦摆支座由球面滑道下支座板,铰接滑块以及连接上部结构的上支座板组成。可以从两个方面分析摩擦摆支座的减震机理。

首先,从受力的角度分析摩擦摆的减震机理,由于滑块沿支座板圆弧面滑道运动,摩擦摆支座可以简化为一个单摆系统,其中滑块滑面半径与滑道半径均为 R , θ 表示滑块相对于滑道竖向对称轴运动的转角,以逆时针为正,摩擦摆支座计算模型如图1所示。

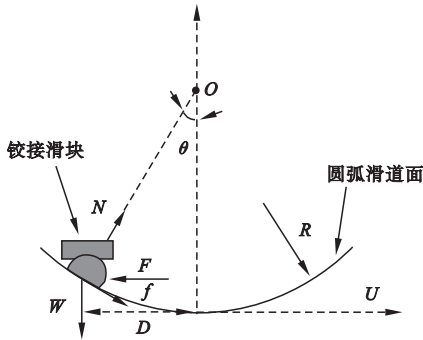


图1 摩擦摆计算模型

Fig. 1 Calculation model of FPS

水平滑移量 $D = R\sin\theta$; W 为上部结构垂直载荷 $W = mu$, 滑块正压力 $N = W\cos\theta$; 摩擦力 $f = \mu N \text{sgn}(\dot{\theta})$, 其中, μ 为摩擦系数。 F 为

摩擦摆水平力,利用弯矩在圆弧中心点的静力平衡,可写成恢复力和摩擦力的组合,当 θ 很小时,可简化为

$$F = \frac{WD}{R} + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{\theta}). \tag{1}$$

根据式(1),可以得到摩擦摆支座的滞回曲线,如图 2 所示。其中, $k_h = W/R$,即摩擦摆支座的摆动刚度; $k_i = \mu W/d_y$,即摩擦摆支座的初始刚度; d_y 为屈服位移,即摩擦摆支座克服静摩擦力滑行的微小位移。

摩擦摆支座的等效刚度,即

$$k_{\text{eff}} = \frac{F}{D} = \frac{W}{R} + \frac{\mu W}{D}. \tag{2}$$

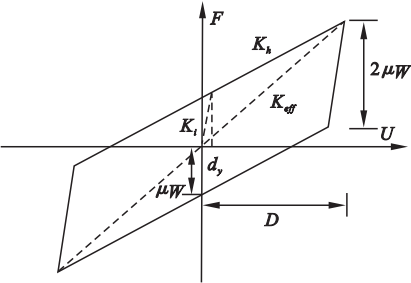


图 2 摩擦摆滞回模型

Fig.2 Hysteretic model of FPS

从耗能角度分析摩擦摆支座的减震机理,由图 2 可知,结构在水平力或地震作用下,滑块在滑道内滑动,摩擦摆支座的摩擦耗能量等于滞回曲线所包裹的面积。

2 试验概况

2.1 摩擦摆装置

摩擦摆支座如图 3 所示。

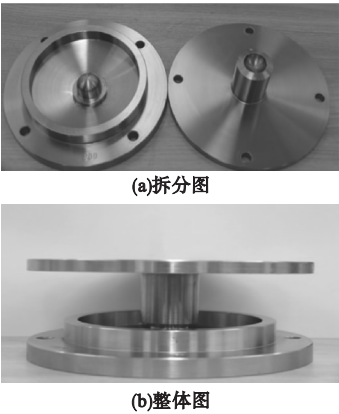


图 3 摩擦摆支座

Fig.3 FPS device

安装在结构层中的隔震系统由 4 个相同的摩擦摆装置组成,本试验中使用摩擦摆装置完全由不锈钢制成,由凹面、铰接滑块和盖板组成,单个摩擦摆质量为 6.6 kg,高 82 mm,底座半径为 200 mm,设计行程为 ± 40 mm。设计了三种不同滑道半径的摩擦摆,分别为 150 mm,175 mm 和 200 mm。根据 $T = 2\pi \sqrt{R/g}$ 可得,摩擦摆支座固有周期分别为 0.77 s,0.83 s,0.89 s。

2.2 试验模型

试验模型取自第三阶段地震作用 Benchmark 结构^[14],模型长 \times 宽为 9.15 m \times 9.15 m,高 37.17 m,该结构地上 9 层,首层层高 5.49 m,其余各层层高均为 3.96 m,属于高层结构。

试验采用 Quanser 公司 Shake table 3 型 71.1 cm \times 71.1 cm 双向输入振动台。综合考虑振动台性能参数、试验室操作条件等因素,确定模型结构几何相似常数 $S_l = 1/18$,应力相似常数 $S_\sigma = 0.20$,加速度相似常数 $S_a = 1.5$ 及质量相似常数 $S_m = 4 \times 10^{-4}$ 。根据模型相似常数设计模型,长 \times 宽为 50 cm \times 50 cm,高 2.065 m,首层层高 0.305 m,其余各层层高均为 0.22 m,结构高宽比为 4.13,试验模型如图 4 所示。



图 4 试验模型

Fig.4 Photograph of tested model structure

2.3 试验方案

试验中 8 种层间隔震形式如图 5 所示。在各楼层与振动台台面中间布置加速度传感器,共采用 10 个 LORD Sensing Wireless Sensor。其次,选取了 4 个具有重要水平分

量的地震动,分别为 1940 El Centro 地震动,1952 Kern County 地震动,1979 Imperial Valley 地震动及 1994 Northridge 地震动。地震动峰值分别考虑 0.1 g,0.15 g,0.2 g 以及 0.25 g,输入地震动方向为 X 向。

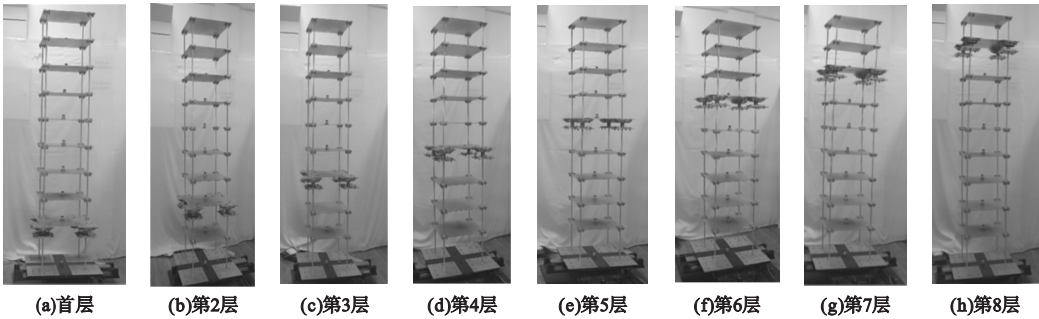


图 5 摩擦摆层间隔震结构

Fig. 5 Tested model of FPS inter-story isolation structure

2.4 模态分析

首先对模型进行模态分析,试验输入振幅 8 mm 白噪声激励,频率范围为 0 ~ 10 Hz。

通过对获取的结构响应进行频响分析,确定原结构与摩擦摆层间隔震结构的振型频率如表 1 与图 6 所示。其中滑道半径为 200 mm。

表 1 摩擦摆层间隔震结构动力特性

振型	频率								Hz
	原结构	首层隔震	第 2 层隔震	第 3 层隔震	第 4 层隔震	第 5 层隔震	第 6 层隔震	第 7 层隔震	
1	2.20(2.25)	2.07(2.41)	1.90(2.60)	1.69(2.61)	1.57(2.39)	1.47(2.12)	1.42(1.89)	1.42(1.72)	1.31(1.60)
2	8.10(8.17)	4.95(8.42)	4.67(6.95)	4.72(5.77)	4.99(5.81)	5.40(6.74)	5.02(8.55)	4.98(9.90)	4.95(8.68)
3	14.7(17.99)	12.73(14.68)	11.16(13.00)	13.46(15.15)	15.32(18.67)	12.05(18.03)	12.57(14.46)	12.49(14.85)	15.66(20.09)

注:括号中为 ANSYS 数值模拟值。

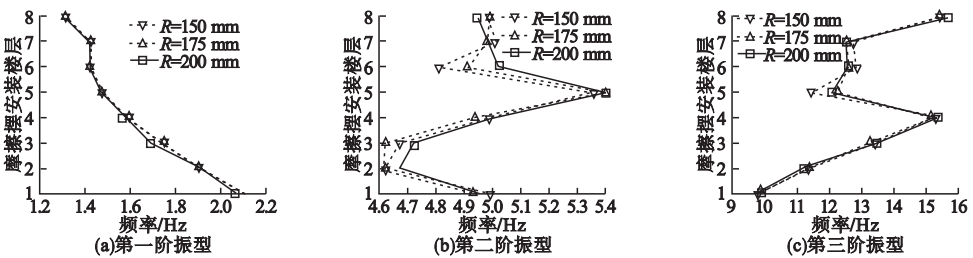


图 6 摩擦摆层间隔震结构自振频率与摩擦摆安装楼层的关系

Fig. 6 Relationship between natural frequency and FPS installation floor

由表 1 可知:第 8 层隔震时结构自振频率为 1.31 Hz,而原结构自振频率为 2.2 Hz;摩擦摆层间隔震结构的自振频率随着摩擦摆安装楼层的升高而减小,且小于原结构的自

振频率,采用摩擦摆层间隔震技术可以延长结构自振周期。由图 6 可知,不同摩擦摆滑道半径的摩擦摆层间隔震结构自振频率的差异较小,特别是在第一阶频率时摩擦摆滑道

半径对自振频率基本上没有影响,通过改变摩擦摆滑道半径不能延长结构自振周期。隔震层位置对摩擦摆层间隔震结构自振频率的影响明显大于摩擦摆滑道半径。

2.5 动力时程分析

摩擦摆层间隔震结构 8 层层间隔震与原

结构的顶层加速度时程曲线如图 7 所示。选取第 8 层隔震结构作为代表,其中滑道半径为 200 mm,地震动峰值为 0.25 g。顶层绝对加速度峰值如表 2 所示。由图 7 可知,摩擦摆层间隔震结构的顶层加速度峰值明显小于原结构的顶层加速度峰值,隔震效果明显。

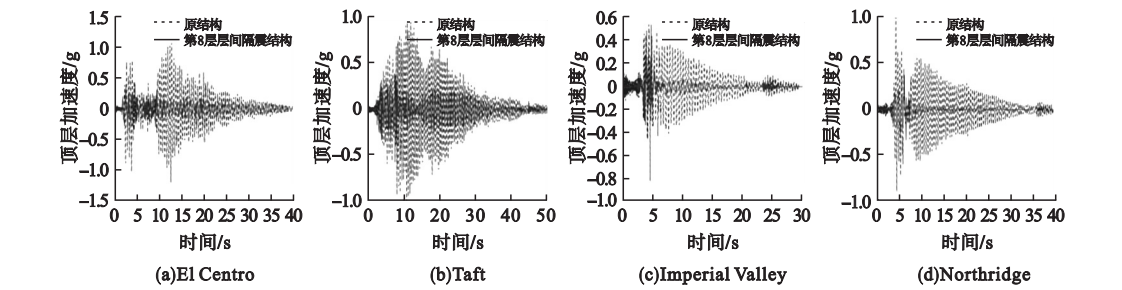


图 7 摩擦摆层间隔震结构 8 层层间隔震与原结构的顶层加速度时程曲线

Fig. 7 The acceleration time history curve on the top of FPS inter-story isolation structure with 8th-floor isolation compared to the primary structure

表 2 顶层绝对加速度峰值

地震动类型	加速度峰值/g	
	原结构	第 8 层层间隔震结构
1940 El Centro	1.202 2	0.405 2
1952 Taft	0.997 4	0.381 9
1979 Imperial Valley	0.817 4	0.291 0
1994 Northridge	1.015 3	0.378 4

表 3 列出了振动台输入信号,摩擦摆滑道半径,地震动峰值以及不同摩擦摆支座安装楼层下的结构顶层加速度衰减率。表中所列数据为顶层加速度衰减率(加速度衰减率=(原结构顶层加速度绝对值峰值-摩擦摆层间隔震结构顶层加速度绝对值峰值)/原结构顶层加速度绝对值峰值×100%)。由表 2 可知,不同地震动的隔震效果有所不同。El Centro 地震动作用下的结构顶层加速度隔震效果比较理想,加速度衰减率在 12.52%~66.29%。此外,在输入 Northridge 0.25 g 地震动的例子中,摩擦摆支座上下板之间发生了碰撞。这表明在遭遇近断层脉冲地震作用时,摩擦摆层间隔震结构存在因摩

擦摆支座变形过大而发生碰撞破坏的可能性。在实际应用中需考虑摩擦摆支座在层间隔震结构中遭遇强动荷载作用发生碰撞破坏的影响。

分析表 3 结果的摩擦摆层间隔震结构顶层加速度衰减率分布情况;在四种地震动作用下,顶层加速度衰减率在 20%~60% 的工况占整体工况的 50% 以上,这表明摩擦摆层间隔震技术在多数情况下可以有效发挥其性能,起到减小结构地震响应的效果。因此,针对高宽比大于 4 的高层钢框架结构,采用摩擦摆层间隔震技术进行振动控制是一种行之有效的办法,并为其他高层结构的结构振动控制提供了参考。

表 3 摩擦摆层间隔震结构顶层加速度衰减率

Table 3 The acceleration attenuation rate on the top of FPS inter-story isolation structure										
地震动 类型	摩擦摆滑道 半径/mm	地震动 峰值/g	加速度衰减率/%							
			1 楼	2 楼	3 楼	4 楼	5 楼	6 楼	7 楼	8 楼
1940 El Centro	150	0.10	37.83	37.77	39.33	23.02	12.52	45.19	43.92	48.88
		0.15	38.63	43.85	41.60	17.11	16.38	28.22	44.66	44.56
		0.20	46.62	42.50	45.25	53.45	36.22	48.63	58.20	60.15
		0.25	37.03	36.95	41.31	26.59	35.86	56.86	41.10	56.12
	175	0.10	38.19	23.58	24.95	26.52	43.28	47.12	54.66	58.32
		0.15	32.99	38.34	37.62	29.69	26.96	43.42	48.39	43.77
		0.20	60.12	44.63	44.99	48.21	49.25	52.01	57.08	66.27
		0.25	55.08	46.46	43.84	32.98	48.48	56.09	56.06	56.41
	200	0.10	35.43	44.22	43.22	40.19	41.79	53.45	51.10	58.56
		0.15	29.35	46.48	44.32	34.77	24.51	43.86	51.82	53.16
		0.20	42.36	54.68	53.24	55.80	57.73	53.00	63.56	65.20
		0.25	49.78	46.00	45.90	32.75	40.42	60.36	64.70	66.29
1952 Taft	150	0.10	10.81	8.97	28.95	-8.11	-49.16	9.58	8.66	7.19
		0.15	41.12	30.59	40.41	13.58	3.50	32.64	46.83	47.59
		0.20	16.34	4.45	34.45	8.24	-8.52	31.14	26.59	54.01
		0.25	45.91	37.13	51.19	39.02	30.34	49.67	40.68	54.78
	175	0.10	15.58	74.40	33.13	-5.12	-23.78	23.42	21.76	12.65
		0.15	37.97	33.76	41.27	26.07	9.49	49.32	34.08	51.31
		0.20	22.93	32.47	30.16	36.88	0.58	45.21	24.74	46.74
		0.25	45.76	51.23	51.08	42.50	44.56	62.13	65.15	63.19
	200	0.10	11.05	29.19	30.77	-4.19	-4.36	30.58	26.32	25.87
		0.15	42.03	33.14	45.78	24.58	15.24	47.53	54.46	55.69
		0.20	19.42	20.91	29.88	8.59	-0.99	43.16	38.53	44.83
		0.25	48.57	51.29	50.70	43.89	33.20	59.50	59.60	61.71
1979 Imperial Valley	150	0.10	-18.24	9.30	11.26	-84.15	22.05	18.28	13.60	36.48
		0.15	18.27	4.42	18.54	25.61	42.77	33.99	33.56	51.12
		0.20	30.00	30.08	51.49	37.75	55.61	52.45	58.25	56.71
		0.25	25.63	38.05	55.21	56.79	58.13	49.65	60.34	66.50
	175	0.10	-12.24	54.27	11.43	17.38	18.57	30.64	20.12	32.24
		0.15	19.67	-0.35	8.97	36.33	43.48	38.75	37.56	51.47
		0.20	24.14	25.51	44.58	38.53	56.26	50.77	57.25	56.55
		0.25	27.69	37.55	55.06	55.83	54.85	52.69	54.86	63.21
	200	0.10	-9.15	15.25	5.62	16.91	30.86	26.02	4.10	40.07
		0.15	18.24	17.50	5.78	44.31	44.30	39.61	38.25	46.65
		0.20	19.73	19.30	43.47	40.80	47.62	52.01	58.39	54.67
		0.25	27.90	39.94	57.56	59.33	54.21	50.00	56.83	64.41
1994 Northridge	150	0.10	10.10	29.46	34.30	-11.19	33.25	10.07	53.31	22.02
		0.15	36.32	34.64	41.02	4.67	5.59	47.52	52.83	59.90
		0.20	57.58	45.29	77.41	36.83	41.06	45.01	38.98	51.95
		0.25	43.15	54.97	46.11	40.90	24.95	46.80	61.52	62.73
	175	0.10	19.95	32.80	31.91	8.64	-16.05	25.12	2.82	25.99
		0.15	44.46	40.12	40.91	29.72	35.69	49.85	59.44	57.19
		0.20	56.97	46.36	48.21	44.81	51.06	46.28	61.95	40.59
		0.25	42.02	72.31	39.56	45.08	31.45	49.00	48.17	—
	200	0.10	23.00	21.38	25.64	-2.34	-12.55	24.22	5.08	27.79
		0.15	45.50	52.66	43.05	29.31	45.77	50.57	61.24	57.92
		0.20	54.19	63.59	50.49	43.69	52.58	50.40	16.27	34.22
		0.25	29.64	52.52	50.51	40.91	40.30	44.84	50.53	—

2.6 隔震层位置的影响

摩擦摆支座安装层位置对顶层加速度衰

减率的影响如图 8 所示。

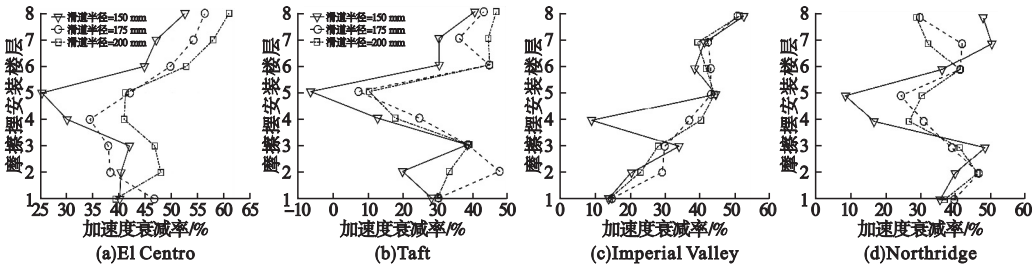


图 8 摩擦摆支座安装层位置对顶层加速度衰减率的影响

Fig. 8 Influence of acceleration attenuation rate on the top considering different installation floor of FPS

由图 8 可知,将摩擦摆支座安装于 6 ~ 8 层柱顶时的顶层加速度衰减率平均值在 30% ~ 67%,减震效果显著,控制效果稳定。而安装于 1 ~ 5 层时,结构响应存在局部放大的现象。摩擦摆层间隔震技术将高层结构分为两个子结构,在遭遇地震作用时,通过摩擦摆支座上部结构与下部结构产生相对位移,而在产生相对运动时上部结构的惯性力通过摩擦摆支座的水平力对下部结构产生相反的作用力,从而对下部结构的振动起到抑制作用,同时减小了上部结构的动力响应。对于隔震层上部结构,类似于基础隔震,在地震作用下主要为水平方向平动。对于下部结构,上部结构的作用相当于调谐质量块。通过摩擦摆层间隔震结构的模态分析可知,隔震层位置对摩擦摆层间隔震结构自振频率的影响明显大于摩擦摆滑道半径。当隔震层位置较高时,整体结构周期的明显延长且远大于无控结构。隔震层位置是影响摩擦摆层间隔震结构自振频率的主导因素。相比于调谐质量

阻尼器,通过调整自身刚度改变上部结构自振频率从而接近主结构自振频率通过调谐减小结构振动反应,摩擦摆层间隔震技术则没有了对频率敏感的局限性。

2.7 地震动输入峰值的影响

顶层加速度峰值直方图如图 9 所示。由图可知,输入地震动峰值为 0.1 g 时,顶层加速度的控制效果较差,摩擦摆层间隔震结构顶层加速度峰值接近于原结构;随着地震动输入峰值的增大,从 El Centro 地震动, Northridge 地震动及 Imperial Valley 地震动等可以看出,原结构顶层加速度峰值随着增大,而摩擦摆层隔震结构的顶层加速度峰值相对于原结构增长缓慢。说明摩擦摆层间隔震技术在小震情况下不能充分发挥性能;随着地震动峰值的增大,隔震效果越明显。进一步而言,摩擦摆层间隔震结构在大震或超大震情况下的减震效果明显优于遭遇小震情况下的减震效果,高烈度区的高层结构可以采用摩擦摆层间隔震技术进行减震控制。

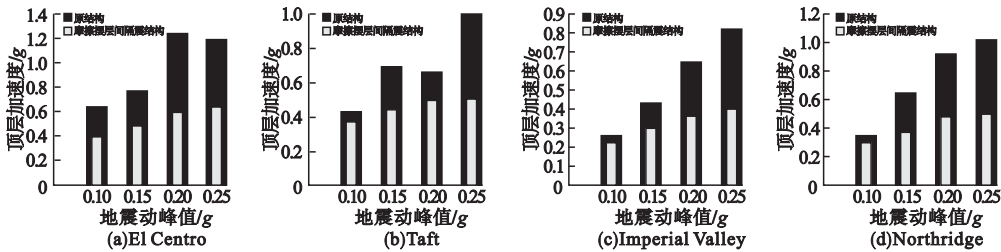


图 9 顶层加速度峰值直方图

Fig. 9 The peak acceleration histogram on the top floor

3 数值模拟与试验结果对比

为了与试验结构对比,选用 ANSYS Workbench 有限元分析软件对摩擦摆层间隔震结构进行非线性时程分析。有限元模型如图 10 与图 11 所示。对模型梁板分别采用梁单元与壳单元建模,摩擦摆与振动台台面采

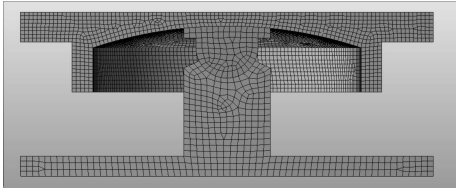


图 11 摩擦摆支座有限元模型

Fig. 11 Finite element model of FPS

用实体单元建模,对振动台台面以施加力荷载的形式模拟地震动输入。其中,滑道面朝下的支座一般用于层间隔震^[10]。

顶层加速度时程与层间加速度有效值的数值分析与试验结果的对比曲线如图 12、图 13 所示,其中有限元模型摩擦系数设置为 0.015,滑道半径为 200 mm。由图可知,数值模拟和试验结果吻合较好,趋势相同,ANSYS Workbench 有限元分析软件能够很好地模拟摩擦摆层间隔震结构与原结构的地震反应。

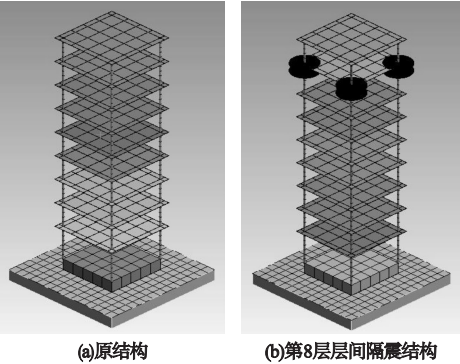


图 10 摩擦摆层间隔震结构有限元模型

Fig. 10 Finite element model of FPS inter-story isolation structure

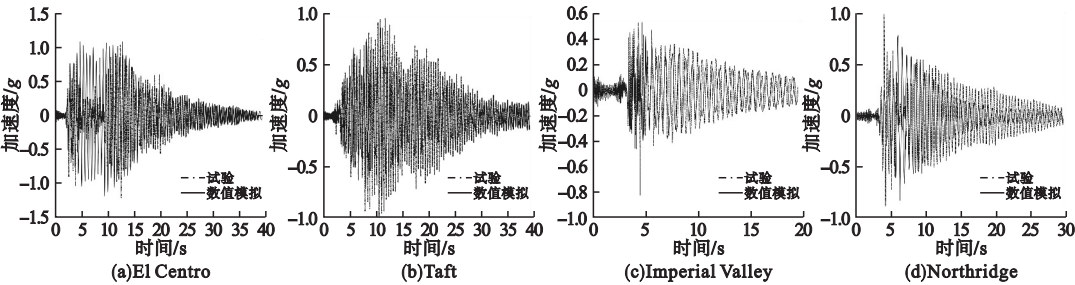


图 12 原结构顶层加速度时程曲线

Fig. 12 The acceleration time history curve on the top of primary structure

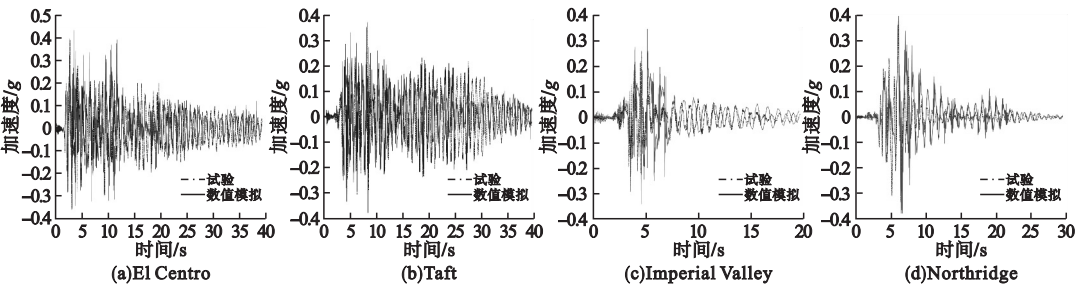


图 13 第 8 层层间隔震结构加速度时程曲线

Fig. 13 The acceleration time history curve on the top of FPS inter-story isolation structure with 8th-floor isolation

4 结 论

(1) 顶层加速度衰减率在 20% ~ 60% 的情况占整体的 50% 以上,表明摩擦摆层间隔震技术在多数情况下可以有效发挥其性能,起到减小结构地震响应的效果。因此,针对高宽比大于 4 的高层钢框架结构,采用摩擦摆层间隔震技术进行振动控制是一种行之有效的方法,并为其其他高层结构的隔震减震控制提供了参考。

(2) 采用摩擦摆层间隔震技术时,隔震层位置并不是越低,控制效果越好;同将摩擦摆安装于 1 ~ 5 层柱顶相比,将摩擦摆安装于 6 ~ 8 层柱顶时的顶层加速度衰减率在 30% ~ 67%,减震效果显著,控制效果稳定。摩擦摆安装位置较高时,在产生相对运动时上部结构的惯性力对下部结构产生相反的作用力,对下部结构起到一定减震作用。

(3) 摩擦摆层间隔震结构在大震或超大震情况下的减震效果明显优于在遭遇小震情况下的减震效果,可以采用摩擦摆层间隔震技术对高烈度区的高层建筑进行减震控制。

参考文献

- [1] 王学庆,刘海卿. 高层分段隔震结构的动力响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 170 - 174.
(WANG Xueqing, LIU Haiqing. Analysis of dynamic responses of the high-rise structure controlled by segmented isolation [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2008, 28(1): 170 - 174.)
- [2] 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.
(Ministry of Construction of the PRC. Code for seismic design of buildings: GB50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [3] 刘德稳, 刘长春, 张亚飞, 等. 基于多模态能量平衡法的层间隔震结构性能评估研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(5): 832 - 838.
(LIU Deyun, LIU Changchun, ZHANG Yafei, et al. Evaluation of seismic performance for mid-story isolation based on MMEB [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(5): 832 - 838.)
- [4] 张颖, 谭平, 周福霖. 分段隔震新体系的参数设计与减震性能研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊1): 270 - 275.

- (ZHANG Ying, TAN Ping, ZHOU Fulin. Study on seismic reduction performance and parameter design of newly segmented isolation system [J]. China civil engineering journal, 2010, 43(S1): 270 - 275.)
- [5] MAKRIS N. Seismic isolation: early history [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2019, 48(2): 269 - 283.
- [6] 张常勇, 钟铁毅, 杨海洋. 摩擦摆支座隔震连续梁桥地震能量反应研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16): 63 - 67.
(ZHANG Changyong, ZHONG Tieyi, YANG Haiyang. A study on seismic energy responses of a continuous girder bridge isolated by a friction pendulum system [J]. Journal of vibration and shock, 2017, 36(16): 63 - 67.)
- [7] 荣强, 张兴, 吴东. 近断层地震动作用下摩擦摆隔震体系的参数研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(2): 85 - 92.
(RONG Qiang, ZHANG Xing, WU Dong. Parametric research of friction pendulum isolation system subjected to near-fault ground motions [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2017, 39(2): 85 - 92.)
- [8] 温佳年, 李洪营, 韩强, 等. 滑动摩擦隔震桥梁振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(2): 102 - 110.
(WEN Jianian, LI Hongying, HAN Qiang, et al. Shaking table tests of bridge model with sliding friction isolation bearings [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2016, 36(2): 102 - 110.)
- [9] 薛素铎, 赵伟, 李雄彦, 等. 摩擦摆支座在单层球面网壳结构隔震控制中的参数分析[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(7): 933 - 938.
(XUE Suduo, ZHAO Wei, LI Xiongyan, et al. Parameter analysis of single-layer spherical lattice shell with FPS [J]. Journal of Beijing university of technology, 2009, 35(7): 933 - 938.)
- [10] 龚健, 周云. 摩擦摆隔震技术研究和应用的回顾与前瞻 (I): 摩擦摆隔震支座的类型与性能[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(3): 1 - 10.
(GONG Jian, ZHOU Yun. State of the art and prospect of the research and application of friction pendulum isolation technology (I): types and performance of friction pendulum bearings [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2010, 32(3): 1 - 10.)
- [11] CALVI P M, CALVI G M. Historical development of friction-based seismic isolation systems [J]. Soil dynamics & earthquake engineering, 2018, 106: 14 - 30.
- [12] ZHOU Ying, CHEN Peng. Shaking table tests and numerical studies on the effect of viscous dampers on an isolated RC building by friction pendulum bearings [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2017, 100: 330 - 344.
- [13] CHANG C M, SPENCER JR B F. Active base isolation of buildings subjected to seismic excitations [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2010, 39(13): 1493 - 1512.
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)