

分离式三维隔震结构与非隔震结构振动台试验对比研究^{*}

田坤¹ 刘文光^{1†} 魏陆顺²

(1. 上海大学土木工程学院, 上海 200073) (2. 佛山科学技术学院土木建筑系, 佛山 528000)

摘要 提出了一种分离式三维隔震结构设计方法, 将竖向隔震层和水平隔震层分开布置, 实现它们的解耦, 进行设计计算时更加方便快捷. 根据这种方法制作了一个2层钢框架模型, 与非隔震结构模型一同进行振动台试验, 对试验结果进行对比分析, 试验结果表明分离式三维隔震结构模型加速度反应和层剪力均小于传统结构模型, 三维隔震效果良好.

关键词 水平隔震, 竖向隔震, 三维隔震, 振动台试验, 摇摆角控制

DOI: 10.6052/1672-6553-2015-025

引言

我国处于地中海南亚地震带与太平洋地震带交界处, 这使得我国地震频发, 并且烈度高, 破坏性大. 传统观点认为, 对结构破坏起决定性作用的是水平方向地震力, 因此国内外学者在水平隔震技术方面进行了大量的试验与研究^[1-8], 水平隔震技术研究成熟, 应用广泛. 但是在高烈度区, 特别是在震中和发震断层附近, 竖向地震分量很大, 对建筑物的破坏作用不可轻视. 因此, 国内外学者对三维隔震技术也进行了大量试验研究^[9-10]. 传统的三维隔震结构是通过在结构底部安装三维隔震支座来实现三维隔震的, 因此三维隔震技术的研究大部分是伴随着三维隔震支座的开发进行的. 本文提出了一种分离式三维隔震设计方法: 将竖向隔震层与水平隔震层分开布置, 分别设置水平隔震层和竖向隔震层. 这种设计方法实现了水平方向与竖直方向的解耦, 使设计计算更加方便. 为验证这种三维隔震结构设计方法的三维隔震效果, 分别制作了三维隔震结构模型和非隔震结构模型, 并进行了振动台试验.

1 试验模型

三维隔震结构模型(图1左)在1层与振动台台面之间设置水平隔震层, 由4个铅芯橡胶支座组成, 来实现水平隔震; 在1层与2层之间设置竖向

隔震层, 由4根钢弹簧、4根竖向导轨和4个粘滞阻尼器组成, 实现竖向隔震, 如图2所示. 模型两侧沿 X 方向分别安装2根竖向导轨, 结构 Y 方向摇摆控制较强. 为保证非隔震结构模型的高度不变, 将竖向隔震装置用钢连接件代替(图1右).



图1 三维隔震结构模型 非隔震结构模型

Fig. 1 Separation type 3D isolated structure and non-isolated structure



图2 竖向隔震层

Fig. 2 Vertical isolation layer

2015-03-23 收到第1稿, 2015-04-14 收到修改稿.

^{*} 国家自然科学基金(51278291, 51308331), 高等学校博士点基金(20133108110024)资助项目

[†] 通讯作者 E-mail: liuwg@aliyun.com

三维隔震结构模型上部结构为2层钢框架结构, X 向边长为1m, Y 向边长为1.6m,层高1m,1层与2层之间设置40cm高竖向隔震层,模型总高度为2.4m.非隔震结构模型在1层与2层之间安装40cm高的钢连接件.模型1层安装2块1.2t的配重块,2层安装1块1.2t配重块,总配重为3.6t,钢框架总重为2.4t,结构模型总重为6t.模型 X 方向高宽比为2.4, Y 方向高宽比为1.5.

2 模型相似系数

相似理论是模型试验的基础,进行结构模型试验的目的是通过模型试验的结果预测分析原型结构的性能,为我们的结构设计提供帮助.相似理论中最重要的三个物理量是:长度、力与时间.在结构模型设计和试验中,必须通过量纲分析来确定模型结构与原型结构的相似比.此次振动台试验采用的相似比见表1.

表1 试验相似比

Table 1 Similarity ratio

	expression	formula	ratio
size	S_l	M_l/A_l	1/40
elastic modulus	S_E	M_E/A_E	1
acceleration	S_a	M_a/A_a	1
velocity	S_V	$S_V = \sqrt{S_l S_a}$	1/6.325
displacement	S_U	$S_U = S_l$	1/40

3 试验工况

此次振动台试验共选用了以下4条地震波:1940年El-Centro(El)波、1952年Taft(Ta)波、1968年Hachinohe(Ha)波和1999年台湾集集地震TCU068(Chi)波,详见表2.

表2 试验选用地震波

Table 2 Seismic waves

No.	abbrev	name	Duration/(s)	inter-record/(s)
1	El	El Centro, 1940	53	0.020
2	Ta	Taft, 1952	54	0.020
3	Ha	Hachinohe, 1968	65	0.010
4	Chi	TCU068, 1999	90	0.005

此次振动台试验共进行了10个工况的试验:水平单向加载频率为4Hz的正弦波、竖向单向加载频率为4Hz的正弦波、分离式三维隔震结构模型4条地震波XYZ三方向加载试验和非隔震结构模型4条地震波XYZ三方向加载试验.水平方向单向加载正弦波用以测定水平隔震层铅芯橡胶支座的力

学性能,竖向单向加载正弦波用以测定竖向隔震层竖向隔震装置的力学性能.

在模型与振动台台面之间安装三向力传感器,用来测定铅芯橡胶支座三个方向所受的力;在分离式三维隔震结构模型的竖向隔震层安装拉压力传感器,用来测定竖向隔震装置所受的力;在分离式三维隔震结构模型的水平隔震层和竖向隔震层安装激光位移传感器,分别测定水平隔震层的水平位移和竖向隔震层的竖向位移;在振动台台面和模型的各层分别安装加速度传感器,用来测定三个方向的加速度.

4 试验结果分析

4.1 竖向隔震层反应

为了确定竖向隔震装置的性能,进行了竖直方向单向加载频率为4Hz正弦波的工况试验,得到竖向隔震装置的滞回曲线,如图3所示,对滞回曲线进行简化,计算得到阻尼比为0.34.

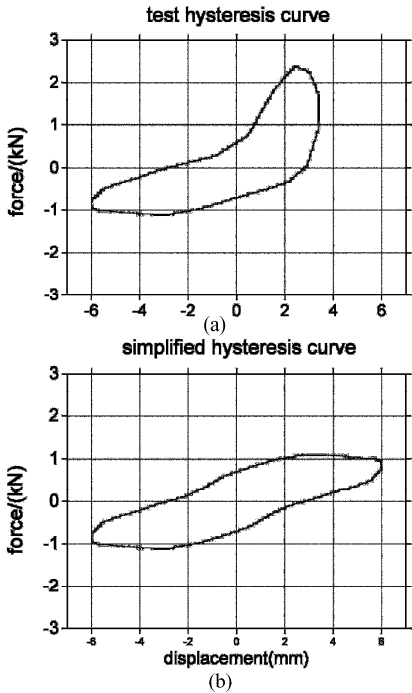


图3 竖向滞回曲线
Fig. 3 Vertical hysteretic curve

从图3中竖向隔震装置的滞回曲线可以看出,滞回曲线中受压产生的位移小于受拉产生的位移,并且呈现出两刚度的特性,这是由试验中所采用的阻尼器特点所导致的.当阻尼器受压时,阻尼器中间导杆对阻尼液有剪切和挤压的作用,当阻尼器受拉时,导杆对阻尼液仅有剪切效果,导致了阻尼器的受压刚度大于受拉刚度.

XYZ 方向三方向加载地震波时,4 条地震波对 应的滞回曲线如图 4 所示.

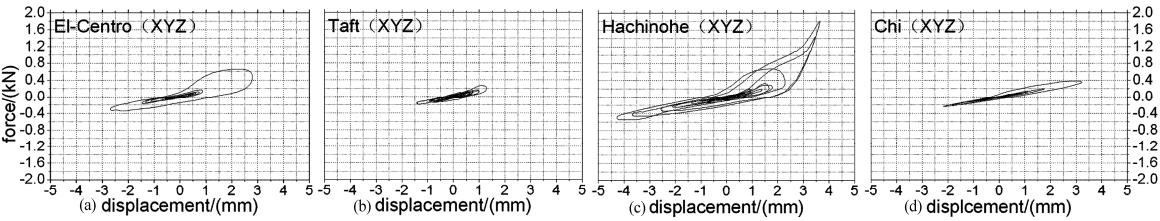


图 4 竖向隔震装置滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic curve of vertical isolation bearing

从图 4 中可以看出,三向加载 El 地震波工况 阻尼器受压产生的位移与受拉产生的位移基本相 等,三向加载 Chi 地震波工况阻尼器受压产生的 位移大于受拉产生的位移,三向加载 Ta 地震波和 Ha 地震波两个工况阻尼器受压产生的位移小于受拉 产生的位移.

4.2 水平隔震层反应

为了确定橡胶隔震支座的性能,进行了水平方 向单向加载频率为 4Hz 正弦波的工况试验,得到橡 胶隔震支座的滞回曲线如图 5 所示.

从上图的滞回曲线可以得到橡胶隔震支座的 刚度:

- 屈服后刚度 $K_d=0.15\text{kN/mm}$
- 卸载刚度 $K_u=1.39\text{ kN/mm}$
- 等效刚度 $K_E=0.19\text{kN/mm}$

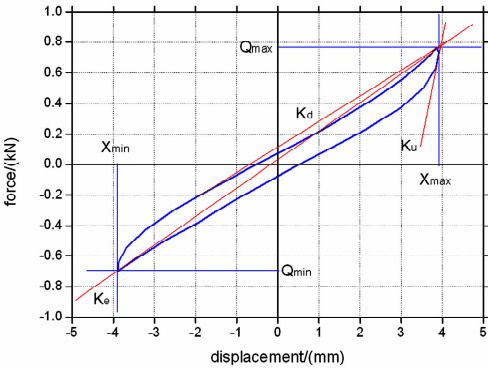


图 5 橡胶支座滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curve of rubber isolation bearing

XYZ 方向三方向加载地震波时,4 条地震波对 应橡胶隔震支座 X 方向和 Y 方向的滞回曲线如图 6 所示,水平隔震层运动轨迹如图 7 所示.

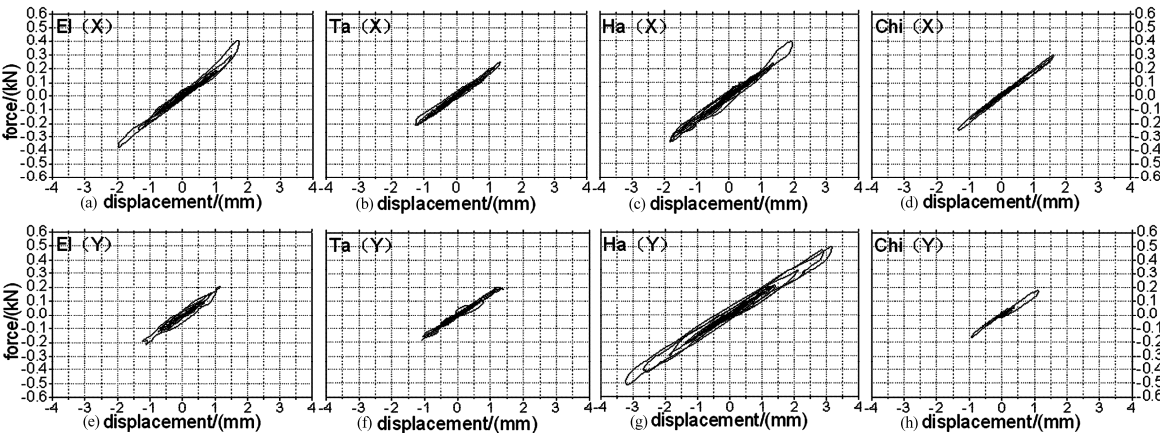


图 6 X 向和 Y 向滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curve X and Y direction

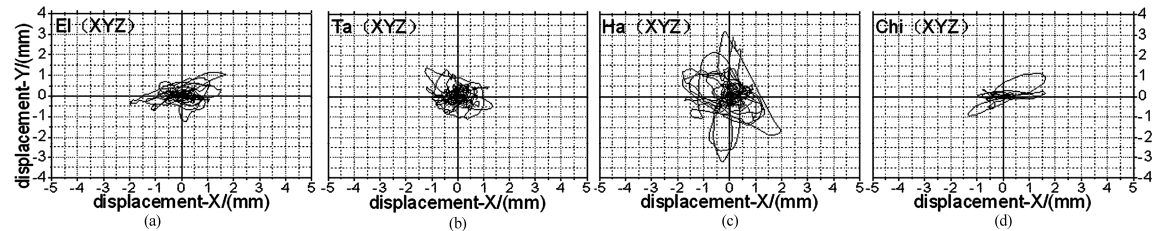


图 7 隔震层运动轨迹

Fig. 7 Motion locus of isolation layer

从隔震层运动轨迹图可以看出,El地震波工况下,隔震层 X 向最大位移为1.956mm, Y 向最大位移为1.240mm, X 向和 Y 向的最大位移几乎同时发生,合成后的位移相对于单向位移来说较大;Ta地震波工况下,隔震层 X 向最大位移为1.340mm, Y 向最大位移为1.404, X 向和 Y 向的最大位移同时发生,合成后的位移相对于单向位移来说较大;Ha地震波工况下,隔震层 X 向最大位移为1.968mm, Y 向最大位移为3.232mm, X 向最大位移和 Y 向最大位移发生在不同时刻,合成后的位移与单向位移基本相同;Chi地震波工况下,隔震层 X 向最大位移为1.632mm, Y 向最大位移为1.140mm, X 向和 Y 向的最大位移同时发生,合成后的位移相对于单向位移来说较大。

4.3 加速度反应对比

XYZ方向三方向加载地震波时,三维隔震结构与非隔震结构在 X 向、 Y 向和 Z 向的加速度峰值对比如图8所示。

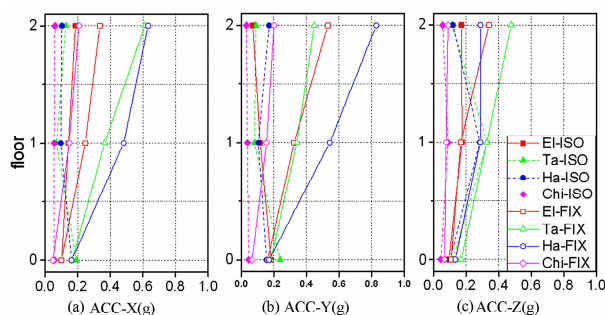


图8 加速度峰值对比

Fig. 8 Comparison of peak acceleration between fixed and 3D isolated structure

从图8中可以看出,三维隔震结构模型3个方向加速度均远小于非隔震结构模型的加速度。Ta地震波工况下,三维隔震结构模型 X 方向加速度放大系数为0.66,非隔震结构模型 X 方向加速度放大系数为3.71,是三维隔震结构的5.62倍;三维隔震结构模型 Y 方向加速度放大系数为0.37,非隔震结构模型 Y 方向加速度放大系数为2.48,是三维隔震结构的6.70倍;三维隔震结构模型 Z 方向加速度放大系数为0.34,非隔震结构模型 Z 方向加速度放大系数为1.46,是三维隔震结构的4.29倍,3个方向的隔震效果非常明显。

4.4 层剪力对比

XYZ方向三方向加载地震波时,三维隔震结构与传统结构在 X 向和 Y 向的层剪力峰值对比如图9所示。

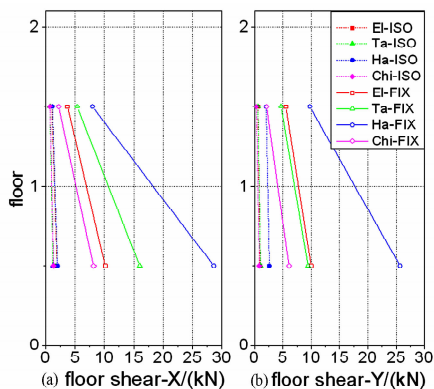


图9 层剪力对比

Fig. 9 Comparison of floor shear between fixed and 3D isolated structure

从层剪力峰值对比图可以看出,El地震波工况下,分离式三维隔震结构模型水平隔震层 X 向和 Y 向剪力仅为非隔震结构模型的0.19倍和0.10倍;Ta地震波工况下,分离式三维隔震结构模型水平隔震层 X 向和 Y 向剪力仅为非隔震结构模型的0.08倍和0.11倍;Ha地震波工况下,分离式三维隔震结构模型水平隔震层 X 向和 Y 向剪力仅为非隔震结构模型的0.07倍和0.10倍;Chi地震波工况下,分离式三维隔震结构模型水平隔震层 X 向和 Y 向剪力仅为非隔震结构模型的0.16倍和0.14倍。

4.5 三维隔震结构倾角

三维隔震结构遭受地震作用时,4套竖向隔震装置产生的竖向位移不同,因此会使结构产生竖向倾角。假设竖向隔震层上部结构绕结构的中点旋转,竖向隔震层上部结构重量使竖向隔震层产生的静位移为 δ_0 ,定义 r 为转角系数:

$$r = \frac{\theta \cdot B/2}{\delta_0} \quad (1)$$

上式中 θ 为结构竖向倾角, B 为结构边长。

转角系数 r 反映的是竖向隔震装置的受力状态,当 r 的值超过1的时候,说明竖向隔震装置处于受拉状态。竖向隔震装置不能承受拉力作用,设计时应避免这种情况的发生。

XYZ方向三方向加载地震波时,三维隔震结构 X 方向和 Y 方向的竖向倾角和转角系数见表3。

从表 3 看出,进行 XYZ 方向三方向加载试验时,除 Ha 波工况外,结构 X 方向产生的竖向倾角最大值为 0.0043,转角系数为 0.0319;结构 Y 方向产生的竖向倾角最大值为 0.0017,转角系数为 0.0205. 结构 X 方向产生的竖向倾角均大于 Y 方向竖向倾角,与模型设计时在 X 边安装导轨进行 Y 方向强控制是相符的. Ha 地震波工况 X 方向与 Y 方向的竖向倾角相近,根据 Ha 地震波的反应谱分析,结构 Y 向的摇摆频率与反应谱的峰值频率相近引起共振,使 Ha 波工况 Y 向结构倾角增大.

表 3 XYZ 方向加载结构转角系数

Table 3 Rotation angel and rotation coefficient of structure

		El	Ta	Ha	Chi
X	θ	0.0043	0.0030	0.0048	0.0037
	r	0.0319	0.0222	0.0358	0.0276
Y	θ	0.0017	0.0010	0.0045	0.0012
	r	0.0205	0.0118	0.0542	0.0143

5 结论

通过对试验结果的分析,可以看到分离式三维隔震结构模型在 X 方向、Y 方向和 Z 方向的加速度峰值相对于非隔震结构有明显的减小,三维隔震结构模型 XYZ 方向加速度放大系数仅为非隔震结构模型的 0.18、0.15 和 0.23. 分离式三维隔震结构模型水平隔震层 X 方向和 Y 方向的层剪力相对于非隔震结构有明显的减小,三维隔震结构模型 XY 方向层剪力仅为非隔震结构模型的 0.07 和 0.10. 加速度峰值和层剪力均有明显减小,三维隔震效果良好. 进行 XYZ 方向三方向加载试验时,除 Ha 地震波工况外,三维隔震结构模型 X 方向产生的竖向倾角大于 Y 方向竖向倾角,与结构模型的导轨在 Y 方向进行强控制是相符的. 分离式三维隔震结构模型在 X 方向和 Y 方向的转角系数 r 最大值分别为 0.0385 和 0.0542,远远小于竖向隔震装置受拉的极限值 1,抗倾覆效果良好.

本文提出了一种分离式三维隔震结构设计方法,并按此种方法设计制作了三维隔震结构模型,与非隔震结构模型一同进行振动台试验,验证这种分离式三维隔震结构的三维隔震效果,并且定义了一个可以反映竖向隔震装置受力状态的转角系数 r . 通过对试验结果的对比分析,可以看出分离式三维隔震结构模型的加速度反应峰值和层剪力均小

于非隔震结构模型,三维隔震效果良好,三维隔震结构模型的竖向倾角较小,转角系数 r 远远小于 1,三维隔震结构模型的抗倾覆效果良好.

参 考 文 献

1 赵楠. 高层中间层隔震结构的非线性动力分析. 动力学与控制学报, 2011, 9(3): 286 ~ 288 (Zhao N. Nonlinear dynamic analysis of tall story isolation structure. *Journal of Dynamic and Control*, 2011, 9(3): 286 ~ 288 (in Chinese))

2 刘文光,周福霖,庄学真,等. 中国铅芯夹层橡胶隔震支座各种相关性能及长期性能研究. 地震工程与工程振动, 2002, 22(1): 114 ~ 120 (Liu W G, Zhou F L, Zhuang X Z, et al. Dependence and durability properties of Chinese lead plug rubber bearings. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(1): 114 ~ 120 (in Chinese))

3 刘文光,杨巧荣,冯德民. 橡胶座非线性弹性压缩特性的理论和试验研究. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5): 196 ~ 204 (Liu W G, Yang Q R, Feng D M. Theoretical and experimental studies on nonlinear elastic compression property of rubber isolators. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 23(5): 196 ~ 204 (in Chinese))

4 刘文光,杨巧荣,周福霖等. 橡胶座非线性弹性回转剪切特性的理论和试验研究. 地震工程与工程振动, 2004, 24(1): 172 ~ 179 (Liu W G, Yang Q R, Zhou F L, et al. Nonlinear elastic rotation and shear property theoretical and experimental research of rubber isolators. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2004, 24(1): 172 ~ 179 (in Chinese))

5 刘文光,杨巧荣,周福霖等. 橡胶座非线性弹性拉伸特性的理论和试验研究. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 158 ~ 167 (Liu W G, Yang Q R, Zhou F L, et al. Theoretical and experimental researches on nonlinear elastic tension property of rubber isolators. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2004, 24(2): 158 ~ 167 (in Chinese))

6 Zhou X Y, Han M, Yang L. Study on protection measures for seismic isolation rubber bearings. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 2003, 40(2): 137 ~ 160

7 Kelly J, Takhirov S. Tension buckling in multilayer elastomeric isolation bearings. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2007, 2(8): 1591 ~ 1605

- 8 Ravari A K, Othman I, Ibrahim Z, et al. Variations of horizontal stiffness of laminated rubber bearings using new boundary conditions. *Scientific Research and Essays*, 2011, 6(14): 3065 ~ 3071
- 9 熊世树, 陈金凤, 梁波等. 三维基础隔震结构多维地震反应的非线性分析. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 81 ~ 84 (Xiong S S, Chen J F, Liang B, et al. Nonlinear analysis of multi-dimensional seismic response in 3d base isolated structure. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2004, 32(12): 81 ~ 84 (in Chinese))
- 10 魏陆顺, 周福霖, 任珉, 等. 三维隔震(振)支座的工程应用与现场测试. 地震工程与工程振动, 2007, 27(3): 121 ~ 125 (Wei L S, Zhou F L, Ren M, et al. Application of three-dimensional seismic and vibration isolator to building and site test. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2007, 27(3): 121 ~ 125 (in Chinese))

COMPARATIVE STUDY OF SEPARATION TYPE THREE-DIMENSIONAL ISOLATED STRUCTURE AND NON-ISOLATED STRUCTURE *

Tian Kun¹ Liu Wenguang^{1†} Wei Lushun²

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200073, China)

(2. Department of Civil Engineering and architecture, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract This paper proposes a design method for the separation type 3D isolated structure, where the vertical isolation layer and the horizontal isolation layer are in separate arrangement in order that both layers are decoupling and the design calculation is more convenient and quicker. According to this method, a 2-floor steel frame model is built as a 3D isolated structure. The simulated earthquake tests on the designed isolated model and a non-isolated structure model are then carried out by a shaking table. The experimental results shows that peak acceleration and floor shear of the separation type 3D isolated structure model are less than that of the non-isolated structure model. It is illustrated that the effect of the 3D isolation is good.

Key words horizontal isolation, vertical isolation, 3D isolation, shaking table test, rocking angle control