

文章编号:1674-2974(2016)05-0039-05

三维复合隔震墩试验研究*

尚守平[†], 苏俊, 崔向龙

(湖南大学 土木工程学院 湖南 长沙 410082)

摘要:针对国内现有隔震装置在竖向隔震的空白,以基础隔震原理为依据,在钢筋混凝土复合隔震层的基础上,提出并开发了一种新型三维隔震装置——三维复合隔震墩,在减轻水平地震的同时也能有效地进行竖向隔震,并介绍了其构成及工作原理.用刚体质量块作为上部结构,对三维复合隔震墩进行振动台模拟试验.结果表明,该三维复合隔震装置竖向及水平向隔震效果均显著,还具有造价低廉、构造简单等特点,十分适用于我国村镇地区.

关键词:竖向隔震;三维复合隔震墩;振动台试验;隔震效果

中图分类号:TU352.1;TU318

文献标识码:A

Research on Three-dimensional Composite Isolation Pier

SHANG Shou-ping[†], SU Jun, CUI Xiang-long

(College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: According to the structural properties and basic isolation theory, a new three-dimensional composite isolation pier was developed, which can effectively reduce the horizontal and vertical loads due to earthquake. This study introduced the isolation device configuration, work principle, and design theory. To evaluate the structural performance of the three-dimensional composite isolation pier, shaking table test of the rigid body mass was carried out. The test results show that the composite isolation device exhibits superb isolation performance. Furthermore, the proposed composite isolation device improved the cost-effectiveness and constructability, which can be used for the practical engineering in the Chinese rural area.

Key words: vertical isolation; three-dimensional composite isolation pier; shaking table test; isolation effect

随着建筑结构的不断发展,基础隔震已经完成了从理论再到实践的过程,取得了巨大的进步.在人们的观念中水平地震作用占据了主导地位,在以往的地震研究中,大部分结构只考虑了水平地震作用,认为竖向地震作用在大部分情况下可不予考虑.然而,地震运动实际上是三维的,不仅具有水平向的运动而且还具有竖向的运动.随着地震领域研究中测

震技术的深入发展,在近年来的一些强烈地震中,也获得了很多关于竖向地震的记录,如1999年台湾Chi-Chi地震和2008年汶川地震,这些数据都显示了竖向地震的影响很大,不容忽视^[1].由地震反应谱曲线可知,由于结构竖向刚度较大,结构竖向周期较小,因此地震影响系数都较大^[2-4].因此,研究开

* 收稿日期:2015-05-05

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAJ08800);湖南省科技计划重点项目(06SK4057)

作者简介:尚守平(1953-),男,山东黄县人,湖南大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: sps@hnu.edu.cn

发具有抵御竖向地震和水平地震的低成本三维隔震技术具有迫切的现实意义。

本文针对竖向地震不容忽略的情况提出了一种三向隔震装置——三维复合隔震墩,它以钢筋沥青复合隔震层^[5-7]为基础,在考虑竖向隔震的同时兼顾水平隔震.为了更好地了解三维复合隔震墩的性能,在理论研究基础上,进行了振动台试验,以检验其实际隔震效果.

1 三维复合隔震墩构造

三维复合隔震墩由4个方面组成,分别为上墩块、下墩块、隔震单元以及沥青油膏.三维复合隔震墩设置在上部结构与基础之间作为隔震层,依据工程具体情况确定三维复合隔震墩的数量.隔震单元由一定数量的弹簧与钢筋笼组成,弹簧通过钢筋笼锚固在上墩块与下墩块上,依据三维隔震体系竖向振动的振幅来确定上墩块底面和下墩块两侧的护板顶面的间隙,同时护板的总承载力不应小于隔震单元中所能承受承载力的2倍,以确保其可作为隔震层的第二道防线.沥青油膏作为防锈与阻尼材料,可在上下墩块之间进行填充,可以保护隔震单元中钢筋与弹簧不锈蚀,提高耐久性的同时也作为阻尼材料,消耗一定的地震能量,为满足上述要求,沥青油膏需要具备冬天不结硬、夏天不流淌的特性^[8].三维复合隔震墩构造如图1所示.

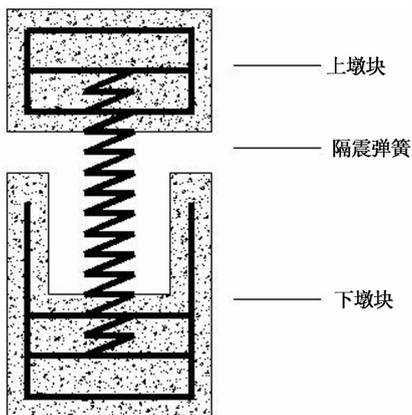


图1 三维复合隔震墩示意图

Fig. 1 Sketch of three-dimensional composite isolation pier

三维复合隔震墩中隔震单元是隔震体系中最关键的部分,在隔震单元中,弹簧既作为水平隔震构件,又作为竖向隔震构件,通过调整弹簧的数量,直

径和圈数等来确定适宜的水平刚度和竖向刚度,使弹簧在水平向及竖向都具有较小的刚度,这样隔震层在整个隔震体系中刚度较小,从而延长了结构的自振周期,使地震时位移集中在隔震层,从而达到减弱和隔离地震的作用.

当装有三维复合隔震墩的隔震建筑处于多遇地震状态时,上部建筑在3个方向上作弹性往复运动,隔震单元处于弹性状态,同时由于隔震墩的减震作用,上部结构的运动加速度大大减小,基本不会受到地震破坏,而隔震墩也在震后复位,达到“中震不坏”的设防要求.而在遭遇罕遇地震时,隔震墩中弹簧在三向振动中受力会超过屈服强度,出现塑性变形,当塑性变形到一定程度时,隔震单元失去承载能力,在设计隔震单元时,确保隔震弹簧不会断裂,只在罕遇地震下达到屈服,不再承重,这时上部结构会落在隔震墩下墩块的护板上,护板强度经过验算,由护板承受上部荷载,保持一定的减小加速度的作用,防止上部结构倒塌,达到“大震不倒”的目的.

2 隔震单元减震设计

2.1 弹簧竖向刚度

弹簧竖向刚度 k_v 作为弹簧的主要参数之一,由式(1)求得:

$$k_v = \frac{Gd}{8C^3n}. \quad (1)$$

式中: G 为切变模量; d 为弹簧丝径; C 为弹簧旋绕比; n 为弹簧有效圈数.

因此隔震层内 N 根弹簧的竖向刚度为 K_v :

$$K_v = Nk_v = \frac{GdN}{8C^3n}. \quad (2)$$

2.2 弹簧水平刚度

由于弹簧水平刚度的计算一直没有一个精确的定论,参考文献[9-10],则单根弹簧水平刚度 k_h 为:

$$k_h = \frac{P}{2\sqrt{\left(\frac{1+P}{S}\right) \frac{B}{P} \left[\tan\left(\sqrt{\frac{PH}{2B}\left(1+\frac{P}{S}\right)}\right) - H\right]}}, \quad (3)$$

$$B = \frac{E}{2(2G+E)} D^2 k_v H, \quad (4)$$

$$S = \frac{Ek_v H}{G}, \quad (5)$$

$$H = H_0 - \lambda - d. \quad (6)$$

式中: P 为弹簧所承受的上部荷载; B 为弹簧等效弯

曲刚度; S 为弹簧等效剪切刚度; E 为弹性模量; G 为剪切模量; D 为弹簧中径; H_0 为弹簧有效高度; H 为弹簧计算高度; λ 为弹簧压缩量; d 为弹簧丝径.

因此隔震层内 N 根弹簧的水平刚度为 K_h :

$$K_h = Nk_h. \quad (7)$$

2.3 减震设计

根据《建筑抗震设计规范》求出三维复合隔震墩竖向自振周期和水平自振周期:

$$T_v = 2\pi \sqrt{\frac{G_{GEk}}{K_v g}}, \quad (8)$$

$$T_h = 2\pi \sqrt{\frac{G_{GEk}}{K_h g}}. \quad (9)$$

式中: G_{GEk} 为上部结构重力荷载代表值.

得到自振周期后, 通过反应谱得到加速度影响系数 α_{1v} 与 α_{1h} , 由于在对地震力的计算中采取等效重力荷载与加速度影响系数的乘积形式, 为了方便直观地体现隔震体系的隔震效果, 本文定义了三维复合隔震墩中的水平减震系数 β_h 和竖向减震系数 β_v :

$$\beta_h = \frac{\alpha_{1h}}{\alpha_{2h}}, \quad (10)$$

$$\beta_v = \frac{\alpha_{1v}}{\alpha_{2v}}. \quad (11)$$

由于农村民居多为砌体结构, 刚度较大, 周期较短, 因此 α_{2h} 取水平加速度影响系数的最大值, α_{2v} 取竖向加速度影响系数的最大值.

3 三维复合隔震墩振动台试验设计

3.1 试验模型制作

本试验采用的三维复合隔震墩是根据上部质量采用 2 t 重力块的振动台试验进行设计的. 通过地震作用以及上部结构承受的重力荷载来确定弹簧的受力情况, 以此确定弹簧的数量、外径、圈数等参数. 下墩块两侧护板的总承载力不应小于两倍以上部重力荷载, 确保在弹簧失效以后, 上部结构落在护板上, 避免倒塌发生.

在试验中设计隔震墩高为 400 mm, 采用 C30 混凝土, 钢筋笼为 HRB400 钢筋, 直径为 8 mm, 设计每个隔震墩包含 3 个隔震单元, 弹簧中径为 40 mm, 弹簧丝径为 8 mm, 高度为 280 mm, 其中上下两端各有 60 mm 埋入墩块内, 具体尺寸见图 2, 由于考虑到本试验时间不长, 不考虑三维复合隔震墩

中的防水防锈要求, 因此在本次试验中未填充沥青油膏, 三维复合隔震墩实物如图 3 所示.

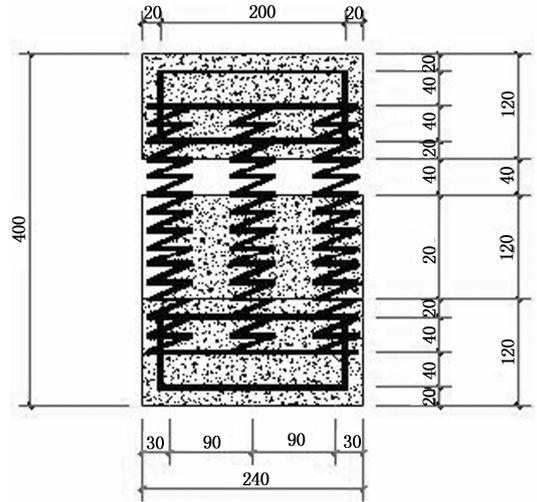


图 2 三维复合隔震墩尺寸图(mm)

Fig. 2 Size of three-dimensional composite isolation pier(mm)



图 3 三维复合隔震墩实物图

Fig. 3 Real object

3.2 试验设备及测点布置

试验在湖南大学工程结构综合防护实验室中进行, 振动台采用某机械厂制作的 ZP1.2×1.4 振动台, 台面尺寸为 1.2 m×1.4 m, 最大负载为 3 t, 可输出三向正弦波, 频率可在 5~20 Hz 之间调节(通过水平振动台测试, 这种弹簧隔震墩消减地震作用效果极好; 故在有限条件下用三维输出正弦波的振动台来考察弹簧隔震墩的竖向隔震效果也是具有参考价值的), 通过台面螺栓孔与三维复合隔震墩相连

接,由于农村房屋多为砌体结构,刚度较大,因此用 2 t 重的钢筋混凝土试块代表上部结构进行试验. 由于需要测量振动台输入加速度与上部结构输出加速度,因此试验采用中国工程力学研究所开发的拾振器(941B 型),测点布置如图 4 所示,测点 1,2,3 及 4,5,6 分别表示测量竖向、水平 X 方向和水平 Y 方向的加速度.

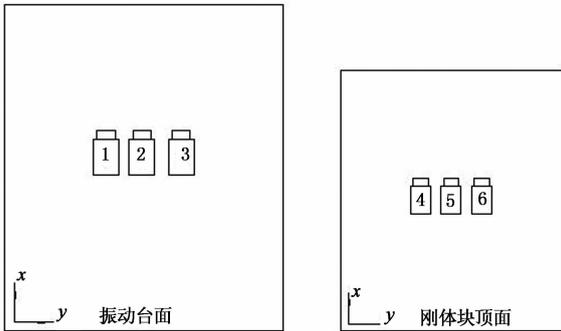


图 4 拾振器测点布置图

Fig. 4 Sketch of the arrangement of the transducers

3.3 试验方案

采用 ZP1.2 X 1.4 振动台进行三向试验,由以往经验可知,竖向地震的卓越频率较小,在 6.7~10 Hz 之间,因此试验选取了 6~9 Hz 的工况进行试验. 振动台三向输出正弦波,正弦波持续时间为 30 s,振动平台在起振 3~4 s 后正弦波输出达到最大功率,同时加速度幅值达到最大值,此后持续等幅振动直至结束. 在振动台面上布置拾振器测量隔震输入加速度,在刚体块顶面上布置拾振器测量隔震输出加速度,由加速度时程获得加速度折减系数,振动台试验装置见图 5.

4 试验结果及分析

4.1 试验结果

为了更加直观地了解三维复合隔震墩的隔震效果,本文定义三维复合隔震墩减震系数 β 为:

$$\beta = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \tag{12}$$

式中: α_1 为台面输入时的最大加速度; α_2 为隔震后输出的最大加速度;若加速度折减系数 β 越小,则表明减震效果越好. 试验选取振动频率为 8 Hz,台面输入和隔震输出的加速度时程曲线如图 6 所示.



图 5 振动台试验装置图

Fig. 5 Shaking table test device

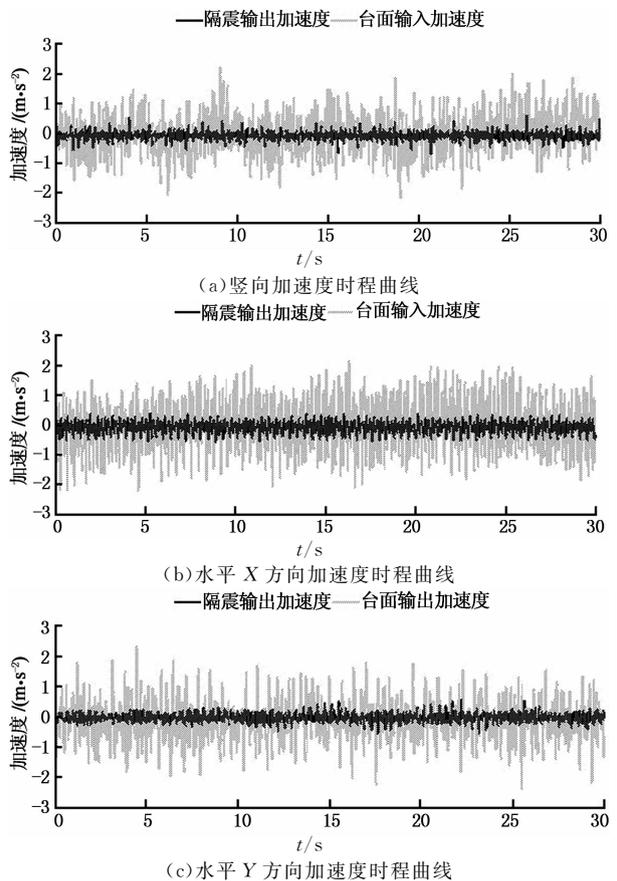


图 6 加速度时程曲线

Fig. 6 Time-histories of acceleration

4.2 试验分析

由表1可以看出,在通过三维复合隔震墩进行隔震后,竖向减震系数达到0.3左右,同时也保证了水平减震效果,减震系数保持在0.2左右,说明三维复合隔震墩具有良好的复合隔震能力,能有效地减小加速度向上部结构的传递,并且在振动台振动结束后,上部结构回到初始位置附近,说明隔震墩具有良好的恢复力。

表1 加速度幅值对比

Tab.1 Comparison between the peak values of acceleration

工况	输入加速度 /($m \cdot s^{-2}$)	输出加速度 /($m \cdot s^{-2}$)	减震系数
X向(6 Hz)	1.104 0	0.382 9	0.347
X向(7 Hz)	1.508 5	0.477 3	0.316
X向(8 Hz)	2.210	0.554	0.251
X向(9 Hz)	2.677	0.612	0.229
Y向(6 Hz)	1.130 7	0.340 6	0.301
Y向(7 Hz)	1.565 3	0.440 4	0.281
Y向(8 Hz)	2.357 5	0.566 4	0.240
Y向(9 Hz)	2.701 2	0.630 8	0.233
竖向(6 Hz)	1.986 1	0.648 2	0.326
竖向(7 Hz)	2.012 4	0.671 7	0.334
竖向(8 Hz)	2.156 2	0.684 9	0.318
竖向(9 Hz)	2.448 3	0.808 3	0.330

5 结论

1)在振动平台进行竖向振动和水平振动时,三维复合隔震墩能明显地减弱上部结构竖向及水平向的加速度,具有良好的隔震效果;

2)三维复合隔震墩具有良好的恢复原位性能;

3)三维复合隔震墩是一种适合于多、底层房屋的价廉物美的隔震装置。

参考文献

- [1] 贾俊峰,杜修力,韩强.近断层地震动特性及其对工程结构影响的研究进展[J].建筑结构学报,2015,36(1):1-12.
JIA Jun-feng,DU Xiu-li,HAN Qiang. A state-of-the-art review of near-fault earthquake ground motion characteristics and effects on engineering structures [J]. Journal of Building Structures, 2015,36(1): 1-12. (In Chinese)
- [2] 尚守平,周福霖.结构抗震设计[M].北京:高等教育出版社,2003:5-10.

SHANG Shou-ping,ZHOU Fu-lin. Seismic design of structures[M]. Beijing: Higher Education Press,2003:5-10. (In Chinese)

- [3] GB 50011-2011 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011:31-34.
GB 50011-2011 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing:China Architecture & Building Press, 2011:31-34. (In Chinese)
- [4] 李雄彦,薛素铎.竖向隔震的机理研究和装置设计[J].北京工业大学学报,2008,34(10):1043-1047.
LIU Xiong-yan,XUE Su-duo. Mechanism and devices for 3-Dimensional seismic isolation bearing in vertical direction[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(10): 1043-1047. (In Chinese)
- [5] 尚守平,刘可,周志锦.农村民居隔震技术[J].施工技术,2009,38(2):97-99.
SHANG Shou-ping, LIU Ke, ZHOU Zhi-jin. Seismic isolation technology of rural buildings[J]. Construction Technology, 2009,38(2):97-99. (In Chinese)
- [6] 尚守平,姚菲,刘可.一种新型隔震层的构造及其振动台试验研究[J].土木工程学报,2011,44(2):36-41.
SHANG Shou-ping, YAO Fei, LIU Ke. Study of the structure of a new type of isolation layer and shaking table test[J]. China Civil Engineering Journal,2011,44(2):36-41. (In Chinese)
- [7] 尚守平,周浩,朱博闻,等.钢筋沥青隔震层实际应用与推广[J].土木工程学报,2013,46(2):7-12.
SHANG Shou-ping,ZHOU Hao, ZHU Bo-wen, et al. Application and promotion of reinforced-asphalt seismic isolation layer[J]. China Civil Engineering Journal,2013,46(2):7-12. (In Chinese)
- [8] 尚守平,沈戎.砌体模型隔震试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2012,39(9):1-5.
SHANG Shou-ping, SHEN Rong. Research on isolation properties of masonry model[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences,2012,39(9):1-5. (In Chinese)
- [9] 米彩盈.一种确定高圆簧横向刚度的有效方法[J].西南交通大学学报,1998,33(3):294-298.
MI Cai-ying. A method for analyzing the lateral stiffness of flexcoil springs[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1998,33(3):294-298. (In Chinese)
- [10] 阳光武,肖守纳,张卫华.螺旋圆弹簧的横向刚度分析[J].中国铁道科学,2010,31(4):59-62.
YANG Guang-wu,XIAO Shou-na,ZHANG Wei-hua. Analysis on the lateral stiffness of the helical circle spring[J]. China Railway,2010,31(4):59-62. (In Chinese)