

文章编号:1673-2049(2018)02-0030-08

新型三维隔震墩振动台试验与数值分析

尚守平, 曹 勇, 崔向龙

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:研究了一种以竖向圆柱螺旋压缩弹簧为隔震单元的新型三维隔震墩,介绍了隔震墩的构造和工作原理,通过静力试验确定三维隔震墩的竖向以及水平向刚度,在此基础上通过振动台试验研究了这种三维隔震墩的隔震效果。为定性研究三维隔震墩,采用VB编制计算程序对三维隔震墩的隔震性能进行数值分析,在加速度时程分析的基础上对单向与双向地震波作用下的梁端内力进行分析。振动台试验结果表明:三维隔震墩竖向以及水平向隔震系数均低于0.4,证明三维隔震墩具备良好的隔振性能。数值分析结果表明:在单向地震波作用下,隔震墩隔震系数低于0.4,双向地震波作用下,隔震墩隔震系数均低于0.6,证明三维隔震墩具有优秀的隔震效果。内力分析结果表明:竖向地震作用不可忽略。由此可知这种三维隔震墩具备良好的隔震效果,该新型三维隔震墩构造简易、效果良好,适于广大农村地区推广。

关键词:三维隔震墩;振动台试验;隔震效果;内力分析;竖向地震

中图分类号:TU352.1

文献标志码:A

New Three-dimension Isolation Pier Vertical Vibration Table Test and Numerical Analysis

SHANG Shou-ping, CAO Yong, CUI Xiang-long

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

Abstract: A new kind of three-dimension isolation pier in the unit of vertical cylinder helix compression spring was studied. The structure and the operation principle of the isolation pier were introduced. The vertical and horizontal rigidities of the three-dimension isolation pier were determined through static test, and the three-dimension pier's isolation effect was studied by vibrating table test. What's more, the VB computer program was used to do the numerical analysis for the qualitative research of the three-dimension pier. On the basis of the acceleration time-history analysis, the internal forces of the beam end under the unidirectional and bidirectional seismic waves were analyzed. The results of vibrating table test show that three-dimensional isolation pier's horizontal and vertical isolation coefficients are less than 0.4, proving that the three-dimension isolation has a good vibration isolation effect. The results of numerical analysis show that the three-dimension isolation pier's isolation coefficient is less than 0.4 under unidirectional seismic wave, while its isolation coefficient is less than 0.6 under bidirectional seismic wave, which indicates that the three-dimension pier has a good isolation effect. Meanwhile, the results of internal force analysis show that the vertical seismic action's effect should not be neglected. With simple structure as well as good effects, this new three-dimension

收稿日期:2017-07-25

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAL03B01)

作者简介:尚守平(1953-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:sps@hnu.edu.cn。

isolation pier is suitable for the rural areas.

Key words: three-dimension isolation pier; vibration table test; vibration isolation effect; analysis of internal force; vertical seismic

0 引言

随着地震数据的收集完善和震害的深入研究,大量的数据表明震中区或者是靠近震中区的竖向地震作用不容忽视,特别在烈度较高地区尤为明显。汶川地震和雅安地震的震中附近竖向地震动峰值加速度较大,甚至超过了水平向峰值加速度,震中区出现大量因为竖向地震作用而破坏的建筑物^[1]。

近年来研究人员在三维隔震技术方面取得了一定的成果^[2-9]。1995 年 Tokuda 等^[2]采用叠层橡胶支座对一幢核电站进行了三维基础隔震试验;1999 年 Yoot 等发明了一种包括碟簧和铅芯橡胶支座的三维基础隔震座,用于结构三维隔震;2002 年 Kageyama 等提出了一种以钢丝加强型空气弹簧为隔震单元的三维基础隔震系统;2014 年 Kubo 等采用铅芯叠层橡胶对日本柏崎刈羽核电站的 2 种核反应堆进行了三维基础隔震设计和可行性研究分析。这些隔震系统普遍存在构造较为复杂、成本较高等缺陷,而中国地震频发地区主要分布在川桂云青等乡镇地区,农村一般为震中区,遭受竖向地震破坏的可能性较大,因此针对乡镇地区有隔震需求的多层低矮建筑,笔者提出了一种以竖向圆柱螺旋压缩弹簧为隔震单元的新型三维隔震墩^[10]。

这种新型三维隔震墩不但构造相对简单、造价便宜,同时也能有效地减轻水平地震^[11]和竖向地震对结构的影响和破坏。本文对三维隔震墩的力学性能进行研究,同时对隔震墩进行振动台模拟振动试验,并通过 VB 编程对其进行加速度时程分析,检验三维隔震墩实际隔震效果。

1 三维隔震墩构造及工作原理

1.1 三维隔震墩的构造

试验用三维隔震墩由上墩块、两侧带护板的下墩块以及隔震单元组成,如图 1 所示。复合隔震墩的竖向刚度由弹簧提供,通过调整三维复合隔震墩的竖向刚度和水平刚度,使隔震体系自振周期远离场地特征周期,以达到减弱和隔离竖向地震作用及通过隔震层向上部结构传递的目的。

新型三维隔震墩中最重要的部分为竖向圆柱螺旋压缩弹簧,即三维隔震墩的隔震单元,它在地震作

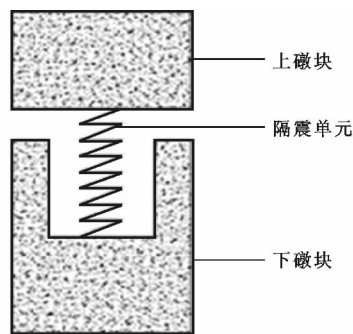


图 1 三维隔震墩示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Three-dimensional Isolation Pier

用下能同时起到水平隔震和竖向隔震的效果。研究表明,通过控制选配弹簧的个数、弹簧的圈数以及弹簧的丝径和直径等参数来确定隔震单元的刚度,从而获得理想的水平向及竖向的隔震性能。

由于上墩块和下墩块间存在空隙,在实际工程中可在缝隙里面加入具有耐候性能的沥青油膏,沥青油膏的加入除了能够防止隔震墩中间弹簧的锈蚀以外,还能够为三维隔震墩提供一定的阻尼,从而起到更好的耗能效果。

1.2 隔震单元相关系数的计算

1.2.1 竖向刚度

竖向刚度作为三维隔震墩竖向隔震性能的主要参考系数,根据文献^[12],可由计算式(1)确定

$$k_v = \frac{Gd^4}{8D^3n} \quad (1)$$

式中: k_v 为弹簧竖向刚度; G 为所选取弹簧切变模量; d 为弹簧丝直径; D 为弹簧中径; n 为弹簧有效圈数。

设隔震墩隔震单元内有 N 根同级别弹簧,作为隔震墩整体的竖向刚度 K_v 可以按下式来确定

$$K_v = Nk_v = \frac{NGd^4}{8D^3n} \quad (2)$$

1.2.2 水平向刚度

根据文献^[13],隔震弹簧水平刚度求解公式为

$$\frac{k_v}{k_h} = [0.295(\frac{H}{D} - \frac{\delta_v}{D}) + 0.384]i \quad (3)$$

$$i = \frac{1}{1 - p/p_{cr}} \quad (4)$$

$$\frac{p}{p_{cr}} = \{1.3[\sqrt{1 + 4.29(\frac{H}{D} - \frac{\delta_v}{D})^{-2}} - 1] \cdot$$

$$(\frac{H}{\delta_v}-1)\}^{-1}$$

(5)

式中： k_h 为弹簧水平刚度； H 为弹簧自由高度； δ_v 为弹簧竖向压缩量； i 为与比值 H/D 和 δ_v/D 有关的函数，与弹簧高径比和上部结构荷载有关； p 为轴向荷载； p_{cr} 为临界荷载。

若设隔震墩隔震单元内有 N 根同级别弹簧，则隔震墩整体的水平向刚度 K_h 值可以按下式来确定

$$K_h=Nk_h$$

(6)

1.2.3 竖向隔震系数

本文定义新型三维隔震墩的竖向隔震系数 β 为

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

(7)

式中： α_1 为地震时地面运动竖向最大加速度； α_2 为单质点体系隔震后上部结构的竖向最大加速度。

2 刚度及振动台试验

2.1 隔震墩制作

本文试验以振动台上部结构 2 t 质量块为依据，下部设置 4 个三维隔震墩，三维隔震墩由 3 个部分组成：上墩块、下墩块以及隔震单元。隔震单元采用的竖向圆柱螺旋压缩弹簧的相关参数为：弹簧丝直径 $d=8\text{ mm}$ ，弹簧中径 $D=32\text{ mm}$ ，有效圈数 $n=10$ 。具体的竖向刚度、承载力将通过计算和试验进行复核，三维隔震墩实物图如图 2 所示。



图 2 三维隔震墩

Fig. 2 Three-dimensional Isolation Pier

2.2 竖向刚度

使用万能压力机对编号为 A,B,C,D 的 4 个隔震墩分别进行轴心受压试验，试验中于隔震墩上下两端分别搁置厚 1 mm、截面尺寸为 200 mm×200 mm 的钢板，使隔震墩受力均匀，通过力-位移关系来确定三维隔震墩的竖向承载力以及竖向刚度，其中隔震墩上下块竖向最大压缩量为 40 mm。A 试件竖向加载试验如图 3 所示，力-位移曲线实测值与理论值对比如图 4 所示。



图 3 三维隔震墩竖向加载试验

Fig. 3 Vertical Load Test on Three-dimensional Isolation Pier

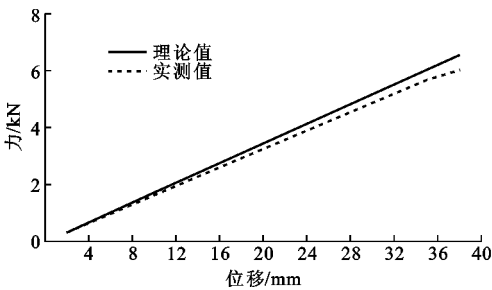


图 4 力-位移曲线实测值与理论值对比

Fig. 4 Comparison Between Measured Value and Theoretical Value of Force-displacement Curve

通过试验，得到三维隔震墩竖向承载力理论值与试验值，如表 1 所示。竖向刚度理论值与试验值如表 2 所示。

表 1 隔震墩竖向承载力理论值与试验值对比

Tab. 1 Comparison Between Theoretical Value and Experimental Value of Isolation Pier Vertical Capacity

隔震墩编号	实测承载力/kN	理论承载力/kN	相对误差/%
A	6.748	7.584	11.03
B	7.063	7.584	6.87
C	6.897	7.584	9.06
D	7.183	7.584	5.29

表 2 隔震墩竖向刚度理论值与试验值对比

Tab. 2 Comparison Between Theoretical Value and Experimental Value of Isolation Pier Vertical Stiffness

隔震墩编号	实测刚度/(kN·m ⁻¹)	理论刚度/(kN·m ⁻¹)	相对误差/%
A	185.41	189.60	2.210
B	177.92	189.60	6.160
C	181.91	189.60	4.056
D	171.97	189.60	9.299

从表 2 可以看出，三维隔震墩竖向刚度实测值小于理论值，相对误差在 10% 以内，主要原因为三维隔震墩竖向刚度理论计算公式中考虑的是弹簧的

有效圈数 n ,由式(1)可知,弹簧有效圈数 n 越大,隔震单元竖向刚度 k_v 越小,试验中隔震单元实际圈数较理论计算时的有效圈数偏大,导致三维隔震墩实际竖向刚度小于理论竖向刚度。

2.3 水平刚度

三维隔震墩的水平刚度是影响其水平隔震性能的重要参数,为符合隔震墩实际承载情况,试验中采用上部结构荷载 2 t 作用下三维隔震墩的水平力与水平位移关系来确定水平刚度。

试验器材及装置主要包括百分表、电子吊钩秤、手拉葫芦、水平反力架、合成纤维吊装带等,具体试验原理简化图如图 5 所示,试验现场如图 6 所示。

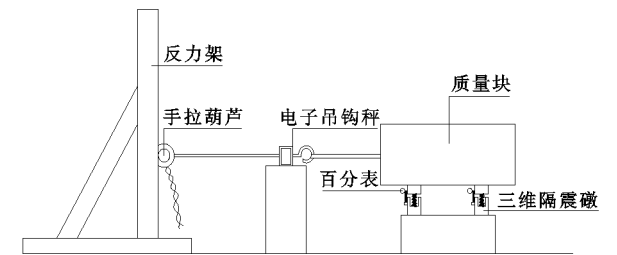


图 5 试验原理
Fig. 5 Test Principle



图 6 试验现场
Fig. 6 Test Site

在上部结构荷载作用下进行了水平刚度试验,得到水平力-位移曲线,如图 7 所示。

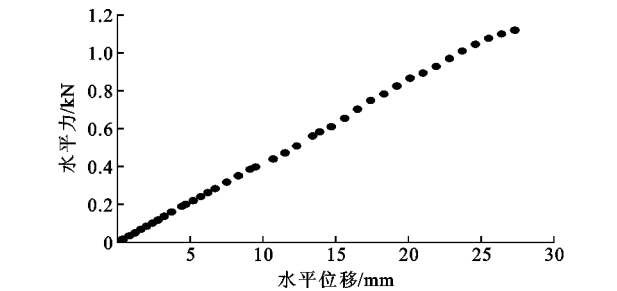


图 7 水平力-位移曲线

Fig. 7 Horizontal Force-displacement Curve

由此可以得到三维隔震墩水平刚度实测值为 $42.12 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$,稍小于按照式(3)计算所得的水平刚度理论值 $45.1 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$,主要原因为竖向刚度实测值小于理论值,隔震墩水平刚度实测值小于理论值[式(3)]。

2.4 振动台试验

2.4.1 试验设备及测点布置

采用最大负载为 3 t 的 ZP1.2×1.4 型振动台进行三维隔震墩振动台试验,台面尺寸为 $1.2 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$,振动台可输出区段为 $5 \sim 20 \text{ Hz}$ 的水平向以及竖向正弦波。

因试验数据采用输入最大加速度与隔震作用下结构上部最大加速度的比值来确定隔震系数,在振动台面以及刚体质量块顶面放置 2 个由中国地震局工程力学研究所生产的 941B 型拾振器采集水平向以及竖向输出加速度值^[14]。拾振器布置如图 8 所示,测点 X_1, Z_1 以及 X_2, Z_2 分别测取水平向和竖向的加速度。

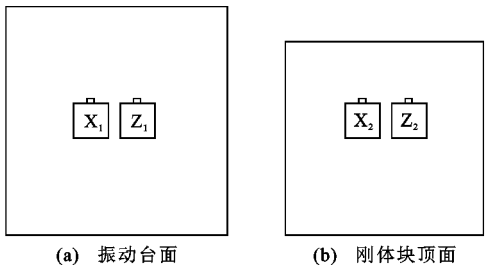


图 8 测点布置

Fig. 8 Test Point Arrangement

2.4.2 试验方案

由动力学原理可知,在弹性范围内,可用正弦波的线性组合得到任意随机地震波。因此,某一正弦波即为随机地震波的分量,即用正弦波(主频范围)模拟地震波,可以得到定性的结论。由现有的研究资料以及地震记录了解到竖向地震卓越周期较大,卓越频率较小,故选用 $6 \sim 9 \text{ Hz}$ 的 4 种不同工况来进行试验^[15-18]。振动台输出正弦波,振动持续时间为 30 s,振动台在 $3 \sim 4 \text{ s}$ 后达到最大输出功率,此后保持等幅振动直至试验结束。振动台试验如图 9 所示。

试验过程中,通过拾振器测得振动台面输入加速度以及刚体顶面输出加速度。

2.4.3 试验结果及分析

采用隔震系数 β 定义三维隔震墩的隔震效果,计算公式为

$$\beta = \frac{\alpha_2'}{\alpha_1'} \quad (8)$$



图 9 试验振动台

Fig. 9 Experimental Vibration Table

式中： α_1' 为振动台输入最大加速度； α_2' 为拾振器输出最大加速度。

各工况加速度幅值对比如表 3 所示。各工况下的竖向加速度时程曲线如图 10 所示。由图 10 可知，不论是水平振动还是竖向振动，上部结构输出的加速度都比振动台面输入的加速度低，说明三维复合隔震墩具备良好的隔震效果，竖向隔震系数稳定在 0.3 左右，水平向隔震系数也可以达到 0.2~0.35，不同工况下隔震系数有一定差异，当台面输入加速度幅值越大时，隔震系数越小，隔震效果越明显。

表 3 试验加速度幅值对比

Tab. 3 Comparison of Experimental Amplitude Values of Acceleration

工况		输入加速度幅值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	输出加速度幅值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	隔震系数
1	竖向	1.987	0.663	0.334
	水平向	1.105	0.387	0.350
2	竖向	2.013	0.668	0.332
	水平向	1.509	0.487	0.323
3	竖向	2.156	0.703	0.326
	水平向	2.211	0.560	0.253
4	竖向	2.449	0.789	0.322
	水平向	2.678	0.633	0.236

3 时程分析

振动台试验输入波采用的是简谐波，由于在弹性范围内天然地震波可由一系列简谐波线性组成，用简谐波也能定性确定三维隔震墩是否具有隔震效果。定量分析隔震效果应采用实际地震波，使用 VB 程序进行数值模拟分析^[19-20]。

设计一层框架结构，梁尺寸为 300 mm×600 mm，柱尺寸为 400 mm×400 mm，混凝土强度为

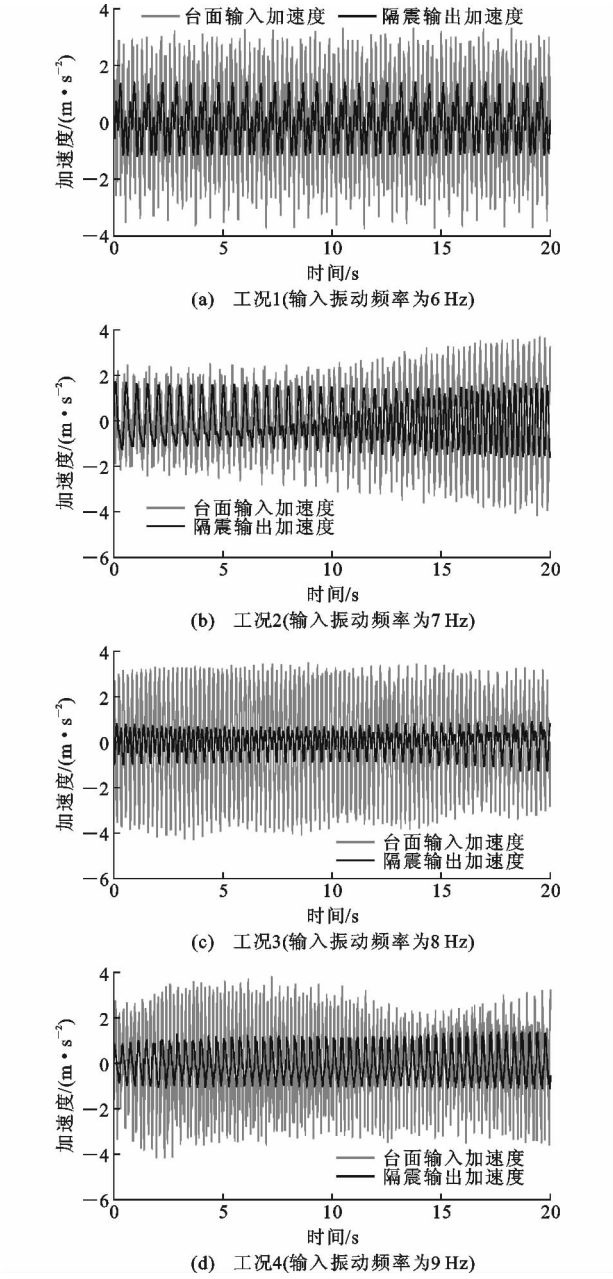


图 10 各工况下的加速度时程曲线

Fig. 10 Time History Curves of Acceleration Under Different Working Conditions

C30，层高 3.3 m，预制空心板厚 120 mm，隔墙采用 C30 混凝土空心砌块，采用独立基础，于独立基础之下均匀布置 173 个三维隔震墩。地震输入采用 Taft 波和 El Centro 地震波，分别按 2 种工况（隔震结构与非隔震结构）进行时程分析并对比②-②梁端内力情况，框架计算简图如图 11 所示。

对梁端输入单向竖向地震波及双向地震波，其中水平向与竖向加速度之比为 1：0.65^[21]。得到梁端竖向加速度时程结果见图 12(g 为重力加速度)，隔震墩刚度取理论值，加速度峰值计算结果见表 4。

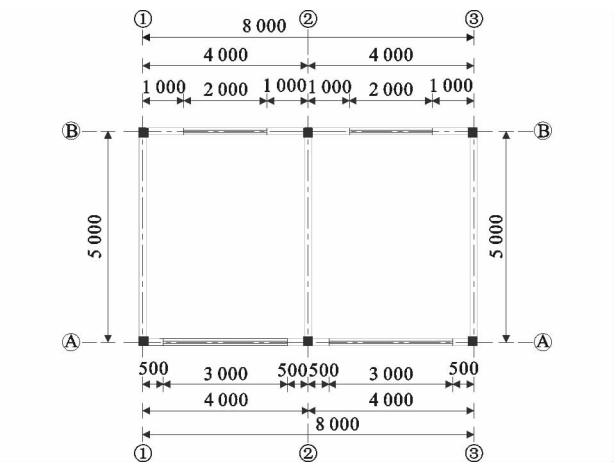


图 11 框架计算简图(单位:mm)

Fig. 11 Calculation Diagram of Frame (Unit:mm)

分析单向输入地震波时程图 12(a),(b)与双向叠加输入地震波时程图 12(c),(d)可知,通过三维隔震墩的隔震作用后,结构反应周期均有所增大,且加速度的峰值分布更加均匀。比较加速度峰值(PGA)计算结果可知,单向输入地震波后,上部结构的加速度峰值得到大幅度减小,隔震系数均低于 0.4,证明三维隔震墩具备良好的竖向以及水平向隔震性能,当水平向地震波与竖向地震波叠加作用后,结构的水平向与竖向输出加速度峰值较单向输入有较大程度提升。双向地震波作用下,水平向隔震系数低于 0.56,竖向隔震系数低于 0.46,进一步证明三维隔震墩具备良好的三维隔震性能。

通过时程分析得到的梁端内力结果见表 5。由表 5 分析结果可知,对于非隔震结构与隔震结构 2 种不同工况,相较于单向地震波作用,输入双向地震波后,结构内力有较大幅度的增加。对于非隔震结构,仅竖向输入的梁端弯矩与仅水平向输入的梁端弯矩比值为 0.33~0.51,梁端剪力比值为 0.98~1.60,单向竖向输入的梁端弯矩与双向输入的梁端弯矩比值为 0.17~0.26,梁端剪力比值为 0.37~0.40;对于隔震结构,仅竖向输入的梁端弯矩与仅水平向输入的梁端弯矩比值为 0.19~0.20,梁端剪力比值为 0.525~0.57,单向竖向输入的梁端弯矩与

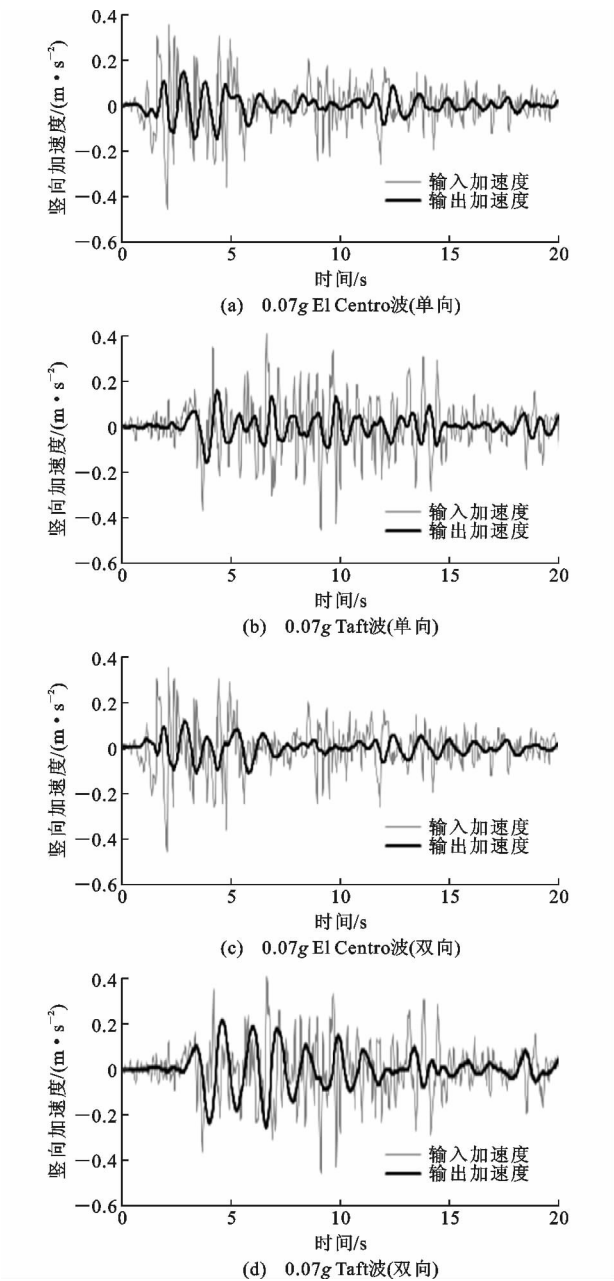


图 12 竖向加速度时程曲线

Fig. 12 Time History Curves of Vertical Acceleration

双向输入的梁端弯矩比值为 0.12~0.14,梁端剪力比值为 0.28~0.31,由此可知在进行地震分析时竖向地震波作用不可忽略。同时可知,三维隔震墩具有较好的竖向隔震性能。

表 4 加速度峰值计算结果

地震波	输入加速度峰值		仅水平向输入		仅竖向输入		水平向+竖向输入		竖向+水平向输入	
	水平向 PGA/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	竖向 PGA/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	输出 PGA/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	水平向隔 震系数	输出 PGA/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	竖向隔 震系数	输出 PGA/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	水平向隔 震系数	输出 PGA/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	竖向隔 震系数
El Centro 波	0.7	0.455	0.247	0.353	0.144	0.315	0.343	0.491	0.197	0.420
Taft 波	0.7	0.455	0.278	0.397	0.165	0.364	0.491	0.560	0.209	0.459

表 5 梁端内力对比

Tab. 5 Comparison of Beam Internal Force

地震波	仅水平向输入		仅竖向输入		水平向+竖向输入		M_2/M_1	V_2/V_1	M_2/M_3	V_2/V_3
	$M_1/(\text{kN}\cdot\text{m})$	V_1/kN	$M_2/(\text{kN}\cdot\text{m})$	V_2/kN	$M_3/(\text{kN}\cdot\text{m})$	V_3/kN				
0.07gEl Centro 波(非隔震)	3.72	1.84	1.24	1.81	7.25	4.95	0.333	0.984	0.171	0.366
0.07gTaft 波(非隔震)	4.03	1.40	2.05	2.17	7.94	5.44	0.509	1.550	0.258	0.399
0.07gEl Centro 波(隔震)	2.49	1.28	0.50	0.73	3.57	2.36	0.201	0.570	0.140	0.309
0.07gTaft 波(隔震)	2.94	1.60	0.57	0.84	4.85	3.00	0.194	0.525	0.118	0.280

注： M_1, M_2, M_3 为弯矩； V_1, V_2, V_3 为剪力。

4 结 语

(1)由内力分析可知,竖向地震作用产生的内力占水平地震产生内力的 20%以上,且在非隔震体系中输入双向地震波作用与仅输入水平向地震波在水平构件中产生的内力比在 1.9 以上,说明即便在非震中区域,竖向地震作用也不可忽略。

(2)振动台试验和时程分析的结果表明,三维隔震墩在竖向地震作用、竖向与水平地震共同作用下的竖向加速度都有较大程度的减弱,证明三维隔震墩具有良好的隔震效果。

(3)这种新型三维隔振墩具有施工方便、价格低廉的特点,适合用于农村以及城镇中的低层结构。

参考文献:

References:

[1] ZHOU F L, TAN P, XIAN Q L, et al. Research and Application of Seismic Isolation System for Building Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(2): 1-8.

[2] TOKUDA N, KASHIWAZAKI A, OMATA L, et al. Three-dimensional Base Isolation System for FBR Reactor Building[C]//IASMiRT. SMiRT 13, Porto Alegre: IASMiRT, 1995: 513-518.

[3] TYLER R G. Rubber Bearings in Base-isolated Structures; A Summary Paper[J]. Bulletin of the New Zealand and National Society for Earthquake Engineering, 1991, 24(3): 251-274.

[4] LEE D M. Base Isolation for Torsion Reduction in Asymmetric Structures Under Earthquake Loading [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1980, 8(4): 349-359.

[5] 陆 鸣,田学民,王笃国,等. 建筑结构基础隔震技术的研究和应用[J]. 震灾防御技术, 2006, 1(1): 31-38. LU Ming, TIAN Xue-min, WANG Du-guo, et al. Research and Application of Building Structure Base Isolation Technology [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(1): 31-38.

[6] 吴 体,李静文,郭阳照,等. 建筑三维隔震技术研究与应用 的回顾与前瞻[J]. 四川建筑科学研究 2016, 42 (4): 76-82.

WU Ti, LI Jing-wen, GUO Yang-zhao, et al. Review and Foresight of Study and Application on the Three-dimensional Isolation Technology for Buildings[J]. Sichuan Building Science, 2016, 42(4): 76-82.

[7] DAVID M L. Base Isolation for Torsion Reduction in Asymmetric Structures Under Earthquake Loading [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1980, 112(8): 349-359.

[8] ROBINSON W H, TUCKER A G. A Lead-rubber Shear Damper[J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1977, 10(3): 151-153.

[9] KUBO T, YAMAMOTO T, SATO K, et al. A Seismic Design of Nuclear Reactor Building Structures Applying Seismic Isolation System in a High Seismicity Region — A Feasibility Case Study in Japan[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2014, 46 (5): 581-594.

[10] 尚守平,崔向龙. 基础隔震研究与应用的新进展及问题[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2016, 41(1): 21-28.

SHANG Shou-ping, CUI Xiang-long. New Progress and Problems in Research and Application of Base Isolation[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2016, 41(1): 21-28.

[11] 薛素铎,李雄彦. 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. XUE Su-duo, LI Xiong-yan. Mechanism Study and Device Design of Vertical Isolation[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34 (10): 1043-1047.

[12] 尚守平,苏 俊,崔向龙. 三维复合隔震墩试验研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(5): 39-43. SHANG Shou-ping, SU Jun, CUI Xiang-long. Research on Three-dimensional Composite Isolation Pier [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences,

- 2016,43(5):39-43.
- [13] 刘天适,赵强,王兴国,等.碟形弹簧竖向减震体系的分析与研究[J].世界地震工程,2004,20(2):1-5.
LIU Tian-shi,ZHAO Qiang,WANG Xing-guo,et al. A Study on Vertical Seismic Isolation System with Disk Spring [J]. World Earthquake Engineering, 2004,20(2):1-5.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 吴克川,兰香,马健,等.考虑三维地震动作用下振动台试验隔震层简化[J].土木建筑与环境工程,2017,39(1):65-74.
WU Ke-chuan,LAN Xiang,MA Jian,et al. Simplified Method of Isolation Layer in Shaking Table Test Considered Three-dimensional Seismic Effect [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering,2017,39(1):65-74.
- [17] 尚守平,周可威.复合隔震墩性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2012,32(6):119-123.
SHANG Shou-ping,ZHOU Ke-wei. Research on Composite Seismic Isolation Pier [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012,32(6):119-123.
- [18] 尚守平,郜志远,朱博闻,等.复合隔震墩隔震性能的振动台试验研究[J].地震工程与工程振动,2011,31(6):117-122.
SHANG Shou-ping,GAO Zhi-yuan,,ZHU Bo-wen, et al. Research on Isolation Properties of Composite Isolation Pier by Shaking Table Test [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013,31(6):117-122.
- [19] 裴星洙,张立,任正权.高层建筑结构地震响应的时程分析法[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
PEI Xing-zhu,ZHANG Li,REN Zheng-quan. Time History Analysis Method for Seismic Response of Tall Building Structures [M]. Beijing: China Water Power Press,2006.
- [20] 周浩.线性数据拟合方法的误差分析及改进应用[J].大学数学,2013,29(1):70-76.
ZHOU Hao. Error Analysis and Improvement of Linear Data Fitting Method [J]. College Mathematics, 2013,29(1):70-76.
- [21] 尚守平,周福霖.结构抗震设计[M].3版.北京:高等教育出版社,2015.
SHANG Shou-ping,ZHOU Fu-lin. Seismic Design of Structures [M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press,2015.