

地震速度脉冲下巨-子结构体系动力性能研究*

李祥秀¹, 王瑶², 谭平², 张颖², 刘爱文¹

(1. 中国地震局地球物理研究所 北京, 100081)

(2. 广州大学工程抗震研究中心 广州, 510405)

摘要 为了研究速度脉冲地震动作用下巨-子结构体系的动力性能, 制作了巨-子结构抗震体系及隔震体系的试验模型, 首先, 选择 2 组具有速度脉冲特性的实际地震动记录及人工合成的具有相同加速度反应谱而无速度脉冲的地震动时程作为地震动输入, 分别对巨-子结构抗震体系及隔震体系进行了振动台试验; 其次, 利用 SAP2000 对试验模型进行了仿真分析, 并与振动台实测结果进行了对比。结果表明: 仿真分析与试验实测结果具有一定的误差, 但结构响应的整体变化趋势一致; 不论是理论计算结果还是试验实测结果, 近断层地震动速度脉冲作用下巨-子结构抗震体系及隔震体系的地震响应要大于无速度脉冲型地震动作用下的地震响应; 与巨-子结构抗震体系相比, 隔震体系在速度脉冲地震动作用下的反应降低明显, 具有良好的减震效果。

关键词 速度脉冲; 动力性能; 巨-子结构体系; 减震效果

中图分类号 TU352.1

1 问题的引出

巨型结构体系因其良好的整体性、新颖美观的结构形式以及能够满足建筑结构的不同布局形式和功能要求等优点, 在高层结构设计和研究中受到越来越多的关注。巨型结构由主、子两级结构构成, 主结构是由不同于常规梁、柱结构的巨型构件组成, 子结构是由常规的梁、柱构件组成, 最后形成一种特殊的结构体系, 如图 1 所示。巨-子结构控制体系的概念^[1-2], 是在巨型框架结构的基础上将子结构顶部与主结构底部的连接断开, 放松主结构和子结构的侧向连接, 使主、子结构之间产生相对运动从而形成的一种新型结构体系。巨-子结构隔震体系便是采取了这种理念, 通过在巨型框架结构中的主结构和子结构底部采用隔震装置连接而形成的一种新的隔震结构形式。文献[3-5]最早提出这种具有多功能减震控制机构的超高层结构体系, 并对该结构体系的构成、调谐减振原理进行了较系统的研究。刘良坤等^[6]利用第 2 代非支配排序遗传算法对巨-子结构层间隔震体系进行了参数优化, 并通过仿真分析表明了文中所提方法的高效性与准确性。谭平等^[7]通过分析巨-子结构隔震体系的动力特性得出其在地震作用下的减震机理。李祥秀等^[8]从理论和试验两方面均证明了巨-子结构隔震体系能够有效地减小主结构和子结构在地震作用下的响应。颜学渊等^[9]通

过对巨-子结构 3 维隔震的原型和缩尺模型开展了振动台试验和仿真分析, 系统地研究了巨-子结构 3 维隔震的减震机理。

近断层地震动与远场地震动有着显著的不同, 其主要特点表现为长周期、大位移和速度脉冲等。最近几年, 许多学者关注并研究了含有速度脉冲的近断层地震动特性对工程结构的影响。张莹等^[10]采用有限元方法对近断层速度脉冲型地震动引起的钢筋混凝土框架结构的响应行为进行了初步研究。王亚楠等^[11]研究了脉冲型地震动作用下隔震结构动力响应的影响参数。吴应雄等^[12]通过振动台试验分析

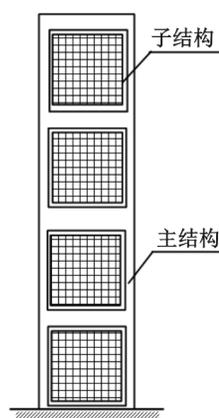


图 1 巨-子结构体系简化图

Fig.1 Simplified diagram of mega-sub structural system

* 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1511003, 2019YFE0112500); 国家自然科学基金资助项目(51608491); 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项资助项目(DQJB19B43)

收稿日期: 2020-07-06; 修回日期: 2020-08-18

与验证了近、远场长周期地震动中的长周期和近场脉冲特性对长周期的高层隔震结构减震性能带来的不利影响。喻隽雅等^[13]利用 SAP2000 对某座实际连续梁桥建模,输入有、无速度脉冲效应的 2 类地震波,并以非减震桥梁为对比,考察了速度脉冲效应对隔减震连续梁桥纵向地震响应的影响。李小军等^[14]研究了速度脉冲对桥梁结构的影响,研究过程中选取了有速度脉冲特性的实际地震动记录及人工合成的具有相同加速度反应谱而无速度脉冲的地震动时程作为输入,结果表明,速度脉冲会对桥梁结构产生一定的影响。李祥秀等^[15]以巨-子结构抗震体系、隔震体系以及智能隔震体系为研究对象,通过输入多组加速度反应谱一致的包含和不含速度脉冲的实际强震动记录和人工合成地震动时程,研究了速度脉冲对巨-子结构体系在采用不同控制策略时地震响应的影响。李小军等^[16]研究了地震动的速度脉冲特性对基础隔震结构在采用不同高宽比时抗震性能的影响。

目前,速度脉冲对工程结构的地震响应影响方面已有众多研究,并取得了很多有意义的理论研究成果,但速度脉冲作用下对结构体系开展振动台试验的研究较少。笔者基于以往对巨-子结构体系理论分析的基础上,制作了巨-子结构抗震和隔震体系的试验模型,选择 2 组具有速度脉冲特性的实际地震动记录及人工合成的具有相同加速度反应谱而无速度脉冲的地震动时程作为输入,对 2 种试验模型开展近断层速度脉冲作用下的振动台试验,研究速度脉冲特性对巨-子结构体系地震响应的影响。利用 SAP2000 对 2 种试验模型进行仿真分析,并与振动台实测模型的动力特性和地震响应结果对比,完善对相关规律和特性的认识。

2 试验概况

2.1 试验模型

制作了 2 个试验模型:抗震结构模型和隔震结构模型。材料采用 Q235,缩尺比取 1/25。试验模型的平面设计图如图 2 所示。试验模型放置在振动台上的方位示意图如图 3 所示。试验中,在各层主结构 A 点及子结构的 F_1 点、 F_2 点以及 F_3 点布置了传感器。图 4 为抗震结构和隔震结构试验模型图。

2.2 隔震支座性能测试

试验采用的支座由 3 部分构成:导轨、弹簧及小型的黏滞阻尼器。其中,导轨的功能是提供竖向刚度;弹簧的功能是提供恢复力;阻尼器的功能是提供阻尼力,其水平力学模型相当于天然橡胶隔震支座

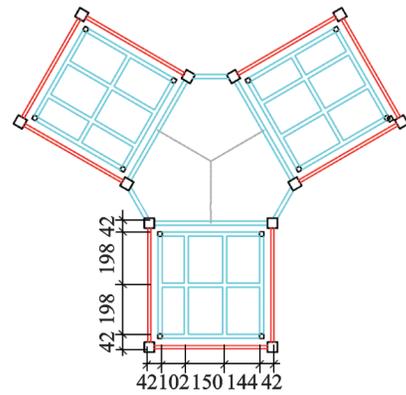


图 2 试验模型平面设计图(单位:mm)

Fig.2 Graphic design of the experimental model(unit:mm)

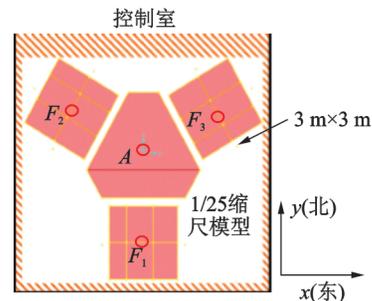


图 3 结构模型在振动台上的方位图

Fig.3 Orientation diagram of test model in shaking table



(a) 抗震结构模型
(a) Aseismic structural model



(b) 隔震结构模型
(b) Isolation structural model

图 4 试验模型

Fig.4 Experimental models

和黏滞阻尼器并联。采用压剪试验机对该支座装置进行性能测试,试验时由于单个支座承压面积小,因此采用4个支座一起测试,如图5所示。试验分9个工况进行,不同工况中施加面压均为32 kN,加载频率和位移幅值分别为:①0.005 Hz, 5 mm;②0.05 Hz, 5 mm;③0.1 Hz, 5 mm;④0.2 Hz, 5 mm;⑤0.3 Hz, 5 mm;⑥0.4 Hz, 5 mm;⑦0.5 Hz, 5 mm;⑧0.25 Hz, 10 mm;⑨0.25 Hz, 15 mm。导轨分为上下两层,其中上导轨为 x 向,下导轨为 y 向,上下导轨试验工况相同。图6为工况⑦下上层支座的滞回曲线。



图5 支座测试试验
Fig.5 Test of bearing

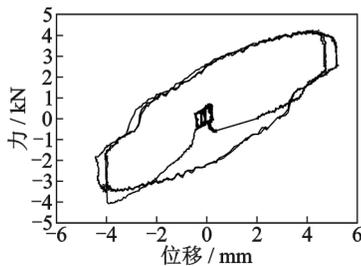


图6 支座的滞回曲线
Fig.6 Hysteretic curve of bearing

工况①可看作静力加载,黏滞阻尼器是速度相关型阻尼器,因此基本不发挥作用,可以根据力-位移曲线求得支座的弹性刚度(4个支座总弹性刚度)。其中: x 向支座弹性刚度为0.503 kN/mm; y 向支座弹性刚度为0.502 5 kN/mm。由于导轨的摩擦力较小,近似将其等效于黏滞阻尼力的一部分,用总恢复力减去支座弹性恢复力可得到支座的阻尼力,即可以得到阻尼器的滞回曲线。上层导轨的阻尼器在工况⑦下第3圈的滞回曲线如图7所示。通过不同加载速度下最大阻尼力与速度的关系可以拟合出 x 向导轨实测值和拟合曲线关系,如图8所示。此值可用于之后的仿真分析,即 x 向分析时阻尼器的阻尼系数为1.435 3,阻尼指数为0.290 5。同理可以求出 y 向分析时阻尼器的阻尼系数为1.998 4,阻尼指数为0.242。图9为 y 向导轨实测值和拟合曲线关系图。

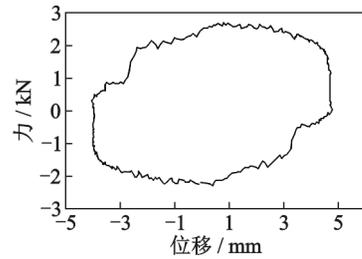


图7 阻尼器的滞回曲线
Fig.7 Hysteretic curve of damper

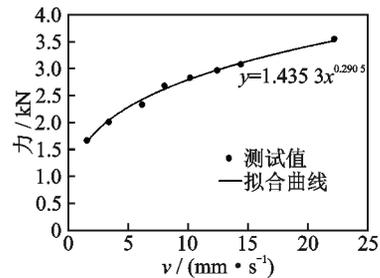


图8 阻尼器 x 向的拟合曲线
Fig.8 Fitted curve of damper in x direction

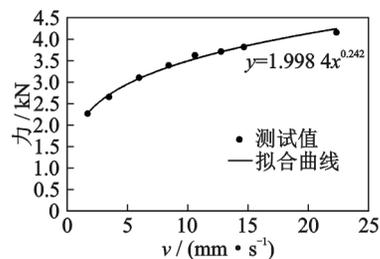


图9 阻尼器 y 向的拟合曲线
Fig.9 Fitted curve of damper in y direction

3 输入地震动

表1列出了本次试验中所采用的近断层速度脉冲型地震动记录 A_1 和 A_2 的基本参数信息,其加速度时程和速度时程如图10所示。针对每一条带有速度脉冲的实际地震动记录,分别合成了1条人工地震动时程,合成的人工地震动时程与原始地震动记录相比,具有相同的加速度反应谱和相近的时程强度包络,但是不再具有速度脉冲特性。人工地震动加速度和速度时程的样本如图11所示。

4 试验结果分析

4.1 模态特征测定

抗震结构模型和隔震结构模型的动力特性可以通过输入加速度为0.05g的白噪声来测得。理论计算的结果是在SAP2000中建模并对结构模型进行模态分析得到。结构模型的理论计算周期与试验测得的1阶周期对比列于表2中。由表2可以看出,抗

表 1 近断层速度脉冲型地震动记录参数

Tab.1 Parameters of the near-fault ground motions with velocity pulse

代号	地震名称	震级	台站	地震动分量	人工合成地震记录代号
A_1	Northridge(1994)	7.1	Newhall-W.Pico Canyon Rd	046	A_{11}
A_2	CHI-CHI(1999)	7.6	TCU76	EW	A_{21}

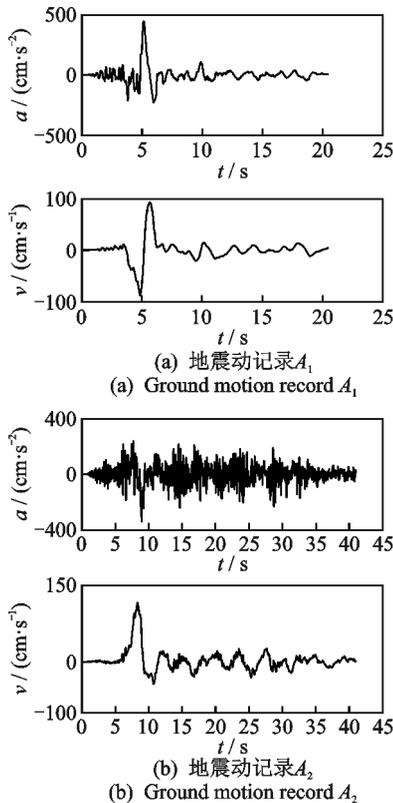


图 10 速度脉冲型地震动记录的加速度和速度时程
Fig.10 Acceleration and velocity time histories of ground motion records with velocity pulse

震结构的理论周期与试验周期吻合较好,而隔震结构的理论周期与试验周期相比有一定的误差,但均在可接受范围之内。不论是试验测得还是理论计算,隔震结构的周期相较于抗震结构而言都有一定的延长。

4.2 速度脉冲影响分析

以 A_1, A_{11}, A_2 和 A_{21} 作为地震动输入,对抗震结构模型和隔震结构模型分别进行 7 度小震(x, y 向)、中震(x, y 向)以及大震(x, y 向)下的振动台试验。试验采用的加速度相似比为 1.25, 对应 7 度小震、中震以及大震的加速度峰值分别为 0.043 75g, 0.125g 和 0.275g。

图 12~14 给出了抗震结构和隔震结构在部分工况下主结构和子结构的层位移在有无脉冲地震动作用下的对比图。定义位移反应脉冲影响系数 $K =$

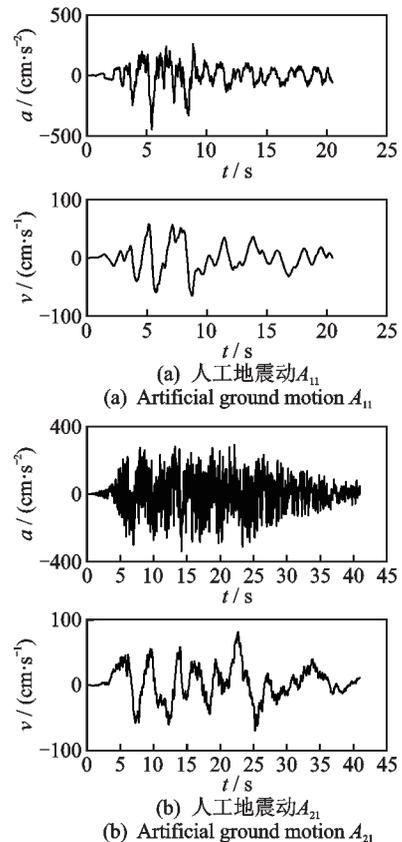


图 11 人工合成地震动的加速度和速度时程
Fig.11 Acceleration and velocity time histories of synthetic ground motions

表 2 结构模型特征

Tab.2 Dynamic characteristics of the structural models

模型结构	试验周期/s	理论周期/s	误差/%
抗震结构	0.470	0.466	0.85
隔震结构	0.485	0.518	6.89

$\frac{|D_i|_{\max}}{|D_{i1}|_{\max}}$, 其中: D_i 和 D_{i1} 分别为速度脉冲型地震动 A_i 和人工合成的无速度脉冲型地震动 A_{i1} 引起的结构最大位移反应。表 3 列出了隔震层位移的脉冲影响系数。

由图 12~14 及表 3 可以看出,抗震结构和隔震结构在速度脉冲型地震动作用下的位移反应要大于无速度脉冲型地震动作用下结构的位移反应,且速度脉冲地震动对隔震层的位移反应影响显著,分析其原因主要为近断层速度脉冲是震源破裂传播过程

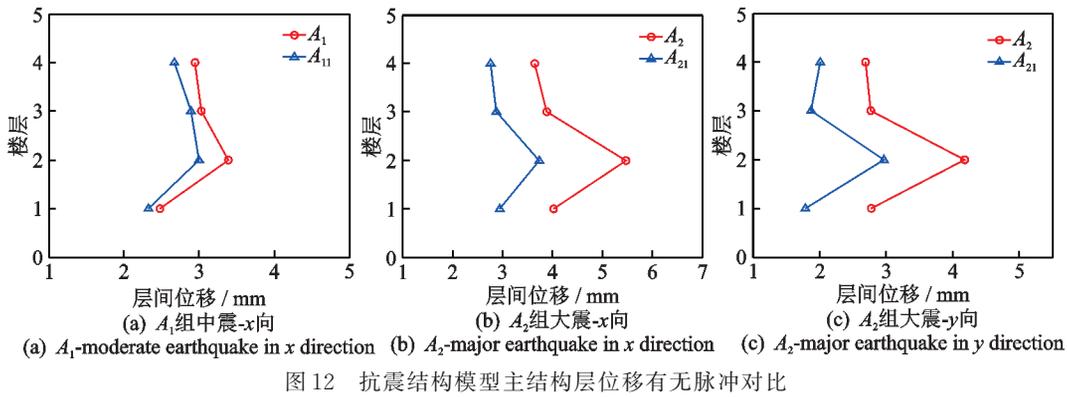


Fig.12 Comparison of inter-story displacements of the mega-structure in the aseismic test model and ground motions with and without pulses

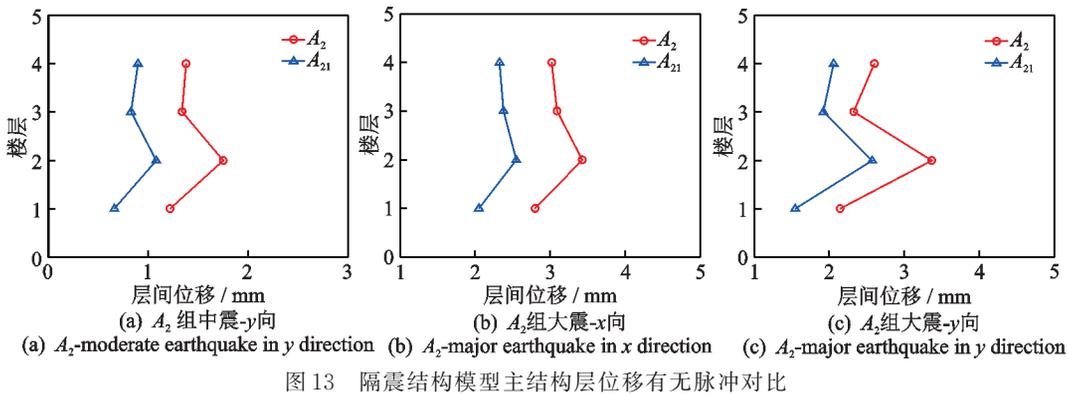


Fig.13 Comparison of inter-story displacements of the mega-structure in the isolation test model and ground motions with and without pulses

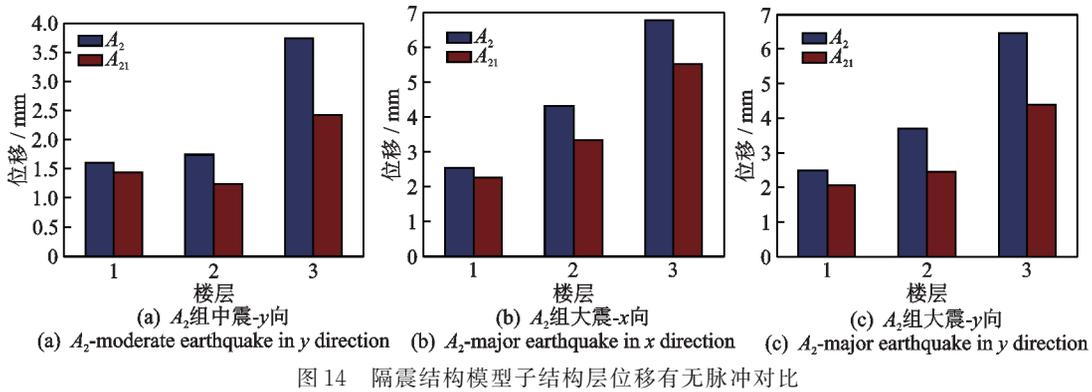


Fig.14 Comparison of inter-story displacements of the sub-structure in the isolation test model and ground motions with and without pulses

中产生的多普勒效应引起,属于具有较高能量的冲击型地面运动;同时,速度脉冲的长周期成分与巨-子结构的基本周期接近,会引起共振效应。因此,巨-子结构体系在速度脉冲地震动作用下的位移反应要大于无速度脉冲地震动作用下的位移反应,这与以往所做理论分析得到的结论一致^[15]。

5 仿真分析与试验结果对比

利用 SAP2000 对抗震结构和隔震结构的试验

模型进行地震反应分析。图 15 为仿真分析的有限元模型。在隔震结构的仿真分析模型中,支座中的弹簧采用 Rubber Isolator 单元来模拟,黏滞阻尼器采用 Damper 单元模拟,其阻尼系数和阻尼指数的取值根据支座性能测试的结果确定。其中: x 向时分别取值为 1.435 3 和 0.290 5; y 向时分别取值为 1.998 4 和 0.242。以台面反馈的地震波作为输入,对 2 种试验模型的位移反应和加速度反应进行了分析研究,并与试验结果进行对比。

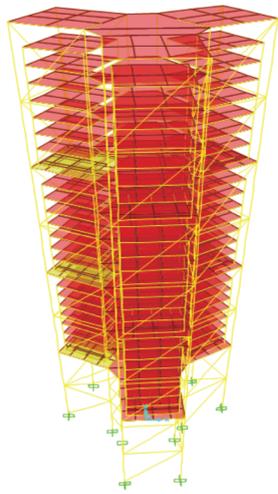


图 15 有限元分析模型

Fig.15 Finite element model

部分工况下,抗震结构主结构层间位移和顶层加速度时程的试验结果与仿真结果对比如图 16~17 所示,隔震结构子结构层间位移、主结构顶层加速度时程及隔震层顶层位移时程的试验结果与仿真结果对比如图 18~20 所示。

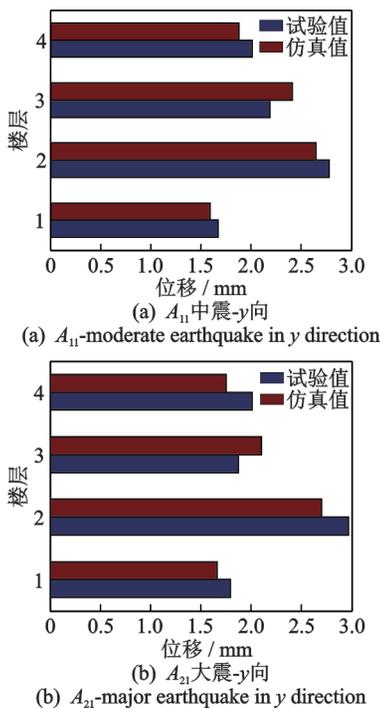


图 16 抗震结构模型主结构层间位移试验与理论值对比
Fig.16 Comparison of the inter-story displacements from the test and numerical simulation of the aseismic mega-structure

由图 16~20 可以看出,结构响应的理论值与试验实测值相比较具有一定的误差,产生误差的原因可能是:同一型号的隔震装置在做不同的试验工况

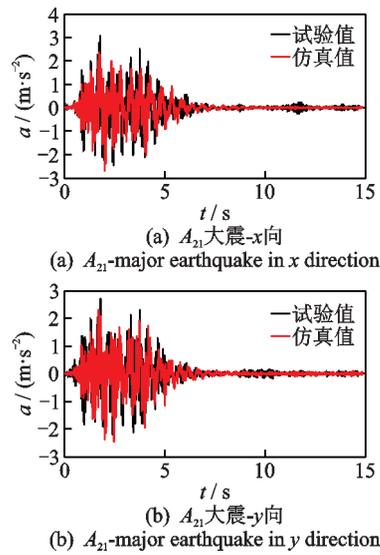


图 17 抗震结构模型主结构顶层加速度时程试验与理论值对比

Fig.17 Comparison of acceleration time histories from the test and numerical simulation of the aseismic top mega-structure

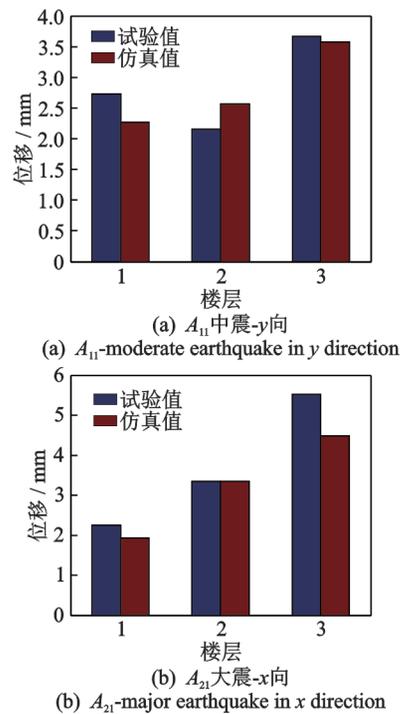


图 18 隔震结构模型子结构层间位移试验与理论值对比

Fig.18 Comparison of the inter-story displacements from the test and numerical simulation of the isolation sub-structure

时,由于反复被使用且来回往复的运动,会使隔震装置产生一定的内力和变形,这对它们的性能会产生一定的影响,而有限元分析中得到的计算结果都是独立的,未能考虑到这一因素影响。另外,人工安装

表3 隔震层位移脉冲影响系数

Tab.3 Pulse influence factor of the isolation layer displacement

工况	参数	1	2	3	工况	参数	1	2	3
中震-x向	A_1 位移/mm	1.76	2.79	3.51	中震-y向	A_1 位移/mm	2.69	1.44	3.35
	A_{11} 位移/mm	1.63	2.70	3.76		A_{11} 位移/mm	0.77	0.97	2.91
	K	1.08	1.03	0.93		K	3.49	1.48	1.15
	A_2 位移/mm	1.44	1.94	1.89		A_2 位移/mm	1.01	1.09	1.94
	A_{21} 位移/mm	1.27	1.70	1.55		A_{21} 位移/mm	0.64	0.78	1.25
	K	1.13	1.14	1.22		K	1.58	1.40	1.55
大震-x向	A_1 位移/mm	4.84	13.58	13.69	大震-y向	A_1 位移/mm	3.24	5.62	11.13
	A_{11} 位移/mm	5.46	9.18	13.47		A_{11} 位移/mm	2.78	4.93	9.78
	K	0.89	1.48	1.02		K	1.17	1.14	1.14
	A_2 位移/mm	2.91	6.13	8.39		A_2 位移/mm	1.55	3.91	8.19
	A_{21} 位移/mm	2.11	4.31	6.83		A_{21} 位移/mm	0.97	2.78	6.42
	K	1.38	1.42	1.23		K	1.60	1.41	1.28

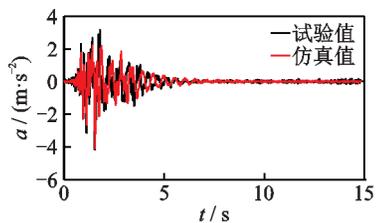
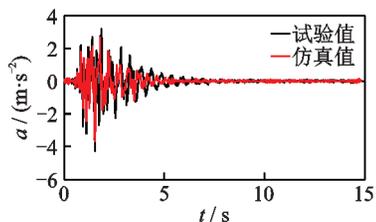
(a) A_{11} -major earthquake in x direction(b) A_{11} -major earthquake in y direction

图19 隔震结构模型主结构顶层加速度时程试验与理论值对比

Fig.19 Comparison of acceleration time histories from the test and numerical simulation of the isolation top mega-structure

过程中配重施加的准确性、各配件间的摩擦力、螺栓间的连接方式等因素也会影响试验实测结果的准确性,但不论是理论计算结果还是试验实测结果,结构整体的变化趋势是一致的。

6 结论

1) 理论分析结果和试验测试结果均表明,2种结构体系在速度脉冲型地震动作用下的结构反应要大于无速度脉冲地震动作用下的结构反应,即速度脉冲型地震动会对主结构、子结构的地震响应产生放大效应,特别是对隔震结构中隔震层位移的影响显著,设计时应给予重点考虑。

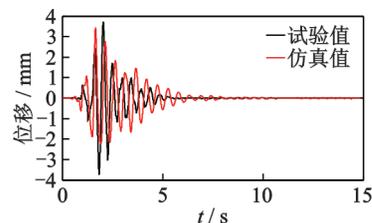
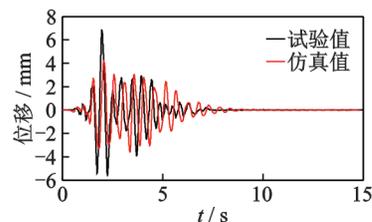
(a) A_{11} -moderate earthquake in x direction(b) A_{21} -major earthquake in x direction

图20 隔震层顶层位移时程试验与理论对比

Fig.20 Comparison of the theoretical and experimental displacements of the top isolation layer

2) 与抗震结构相比,隔震结构中的主结构和子结构的地震响应都有所减小,说明采用子结构隔震的巨-子结构体系能有效减小结构响应,增强结构的安全性。

3) 虽然抗震结构、隔震结构中结构响应的仿真分析值与试验实测值相比具有一定的误差,但是结构反应的整体变化趋势是一致的。

参 考 文 献

- [1] FENG M Q, MITA A. Vibration control of tall buildings using mega subconfiguration[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(10):1082-1088.
- [2] CHAI W, FENG M Q. Vibration control of super tall buildings subjected to wind loads[J]. International Journal of Non-linear Mechanics, 1997, 32(4):657-668.

- [3] 蓝宗建,田玉基,曹双寅,等. 巨型框架多功能减振结构体系的减振机理及其减振效果分析[J]. 土木工程学报, 2002, 35(6): 1-5.
LAN Zongjian, TIAN Yuji, CAO Shuangyin, et al. The mechanism and efficiency of multifunctional vibration absorption for megaframe structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(6): 1-5. (in Chinese)
- [4] 蓝宗建,田玉基,梁书亭,等. 钢筋混凝土巨型框架多功能减振结构的调频减振原理[J]. 工业建筑, 2002, 32(1):4-6.
LAN Zongjian, TIAN Yuji, LIANG Shuting, et al. Structure-control mechanism of multifunctional vibration-absorption of RC megaframe structures[J]. Industrial Construction, 2002, 32(1):4-6. (in Chinese)
- [5] LAN Z J, TIAN Y J, FANG L, et al. An experimental study on seismic responses of multifunctional vibration-absorption reinforced concrete megaframe structures[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004, 33(1):1-14.
- [6] 刘良坤,谭平,李祥秀,等. 基于NSGA-II的巨-子结构层间隔震体系优化分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(6):187-193.
LIU Liangkun, TAN Ping, LI Xiangxiu, et al. Optimization analysis of mega-substructure inter-story isolation system based on NSGA-II algorithm[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(6):187-193. (in Chinese)
- [7] 谭平,李祥秀,刘良坤,等. 巨-子结构控制体系的减振机理及性能分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(11): 55-63.
TAN Ping, LI Xiangxiu, LIU Liangkun, et al. Control mechanism and performance analysis of a mega-sub structure control system[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(11):55-63. (in Chinese)
- [8] 李祥秀,谭平,刘良坤,等. 巨-子结构控制体系振动台试验与有限元模型对比分析[J]. 工程力学, 2016, 33(9):76-84.
LI Xiangxiu, TAN Ping, LIU Liangkun, et al. Comparative analysis of mega-sub control system by shaking table test and finite element modeling[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(9):76-84. (in Chinese)
- [9] 颜学渊,祁皓,毛会敏,等. 基于三维隔震的巨子结构多维地震反应分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(5): 36-46.
YAN Xueyuan, QI Ai, MAO Huimin, et al. Multi-dimensional seismic response analysis of three-dimensional seismic-isolation mega-sub structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(5):36-46. (in Chinese)
- [10] 张莹,孙广俊,李鸿晶. 钢筋混凝土框架近断层速度脉冲地震响应分析[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(3):611-619.
ZHANG Ying, SUN Guangjun, LI Hongjing. Near-fault velocity pulse motions on seismic responses of the RC frame[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3):611-619. (in Chinese)
- [11] 王亚楠,杜永峰,李慧. 脉冲型地震动作用下隔震结构动力响应的影响参数研究[J]. 地震工程学报, 2016, 38(5):707-712.
WANG Yanan, DU Yongfeng, LI Hui. Parametric study on dynamic response of base-isolated structure subjected to pulse-like ground motions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(5):707-712. (in Chinese)
- [12] 吴应雄,颜桂云,石文龙,等. 长周期地震动作用下高层隔震结构减震性能试验研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(5):806-816.
WU Yingxiong, YAN Guiyun, SHI Wenlong, et al. Experimental study on the seismic-reduction performance of high-rise isolated structure under long-period ground motions[J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(5):806-816. (in Chinese)
- [13] 喻隽雅,袁万城,党新志. 地震动速度脉冲对减隔震连续梁桥纵向地震响应的影响[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(2):174-178.
YU Juanya, YUAN Wancheng, DANG Xinshi. Influence of velocity pulse on longitudinal seismic response of seismic isolated continuous beam bridge[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(2): 174-178. (in Chinese)
- [14] 李小军,贺秋梅,亓兴军. 地震动速度脉冲对大跨斜拉桥减震控制的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(2):272-285.
LI Xiaojun, HE Qiumei, QI Xingjun. Seismic mitigation control effects of long-span cable-stayed bridges to ground motions with velocity pulse[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(2): 272-285. (in Chinese)
- [15] 李祥秀,李小军,刘爱文,等. 地震动速度脉冲对巨型结构体系地震响应影响研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(5):843-852.
LI Xiangxiu, LI Xiaojun, LIU Aiwen, et al. Influence of a near-fault velocity pulse on the seismic response of a mega structural system[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(5):843-852. (in Chinese)
- [16] 李小军,贺秋梅,张慧颖,等. 地震动速度脉冲对不同高宽比基础隔震结构抗震性能的影响[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(1):35-42.
LI Xiaojun, HE Qiumei, ZHANG Huiying, et al. Effects of velocity pulse of ground motion on seismic capacity of base-isolated structures with different height-to-width ratios[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(1):35-42. (in Chinese)



第一作者简介:李祥秀,女,1987年10月生,副研究员。主要研究方向为工程抗震、地震动特性对结构反应的影响。曾发表《地震动速度脉冲对巨型结构体系地震响应影响研究》(《地震工程学报》2017年第39卷第5期)等论文。
E-mail:lixiangxiu1005@163.com