

## 近断层激励下子结构组合隔震的巨-子结构试验\*

颜学渊<sup>1†</sup>, 毛会敏<sup>2</sup>, 吴应雄<sup>1</sup>, 祁皑<sup>1</sup>, 徐小勇<sup>1</sup>

(1.福州大学 土木工程学院,福建 福州 350116;2.福建工程学院 生态环境与城市建设学院,福建 福州 350118)

**摘要:**为解决受限于隔震支座的抗拉能力和结构高宽比限值、隔震技术很少应用在超高层建筑的问题,在新型巨-子结构体系的子结构底部设置由铅芯橡胶隔震支座和弹性滑动支座组成的组合隔震层,设计制作了一个有3个巨型结构层的巨-子结构模型,对其进行了近断层地震动及远场地震动作用下的振动台试验,研究了组合隔震层对主结构和子结构振动的减震效果和近场地震对其影响.研究表明,子结构底部设置组合隔震层,对主结构来说相当于调谐质量阻尼器,其对主结构的地震响应具有较好的调谐减震作用;对子结构来说相当于基底隔震,其对子结构的地震响应具有显著的隔震效果.由于脉冲效应,近断层地震动作用下主结构和子结构的地震响应都要大于相同场地的远场地震动.

**关键词:**巨-子结构;组合隔震;近断层地震动;振动台试验;振动控制

**中图分类号:**TU352.1

**文献标志码:**A

## Experimental Study on Mega-sub Structures with Combined Isolation under Near-fault Ground Motion

YAN Xueyuan<sup>1†</sup>, MAO Huimin<sup>2</sup>, WU Yingxiong<sup>1</sup>, QI Ai<sup>1</sup>, XU Xiaoyong<sup>1</sup>

(1.College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2.College of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** To solve the problem of seldom use of isolation technology in super high-rise buildings as well as the restriction on the tensile capacity of isolation bearing and structural height-width ratio limitation, in this paper, the combined isolation layers consisting of lead rubber bearings and elastic sliding bearings were set at the bottom of the sub-structures in the new mega-sub structure system. An experimental model of mega-sub structure was designed and manufactured, which included three mega floors. Shaking table tests of the uncontrolled and controlled mega-sub structure under near-fault and far-fault ground motions were carried out. Vibration control effects of combined isolation layers on the seismic vibrations of main-structure and sub-structures and the influences of near-fault ground motions were studied. The results show that the combined isolation layer at the bottom of sub-structure is equivalent to a tuned mass damper for the main-structure, and it has obvious damping effect of TMD on the seismic reactions of main structure, while it is equal to a base isolation structure for the sub-structure itself, and it has significant iso-

\* 收稿日期:2016-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578160), National Natural Science Foundation of China(51578160);福建省教育厅科技项目(JA15050), Science and Technology Project of the Education Department of Fujian Province(JA15050);福建省高校杰出青年科研人才计划项目(810104), The Outstanding Young Scientific Research Plan of Colleges and Universities in Fujian Province(810104)

作者简介:颜学渊(1982-),男,福建永春人,福州大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: yxy820910@sina.com

lation effect on the seismic responses of sub-structure. Seismic reactions of the main-structure and the sub-structures under near-fault ground motions are larger than that under far-fault ground motions due to the pulse effect.

**Key words:** mega-sub structure; combined isolation; near-fault ground motion; shaking table test; vibration control

巨型框架结构由2级结构组成,是一种新型的结构形式,具有整体性好、抗侧刚度大、传力明确等特点.高层和超高层建筑由于荷载大、重心高,且受限于隔震支座的抗拉能力和结构高宽比限值,基础隔震较少应用在高宽比较大的高层建筑和超高层建筑<sup>[1-2]</sup>.如果把巨型框架中主结构和子结构的连接断开,在子结构的底部设置隔震层,每个子结构相当于一个基础隔震结构;隔震子结构相对于主结构来说,则是一个大质量的调谐质量阻尼器(TMD),多个隔震子结构就是MTMD;可以解决橡胶垫隔震技术在高层建筑中应用的难题,整个结构体系具有调谐减振、基础隔震和耗能减振等多种减振功能.

Feng等<sup>[3]</sup>率先提出了巨型框架减振结构模型及振动控制策略.蓝宗建等<sup>[4-6]</sup>给出了巨型框架多功能减振结构的三维简化计算模型;通过时域和频域分析,研究了巨型框架多功能减振结构体系在地震和风荷载作用下的减振效果;对钢筋混凝土巨型框架结构及隔震结构进行了振动台试验.张洵安等<sup>[7-8]</sup>提出了巨型有控结构体系的运动方程,进行振动控制参数分析;研究了巨型有控结构体系在罕遇地震及超罕遇地震时的结构响应控制特性、塑性铰发生规律及结构灾变情况.谭平等<sup>[9-10]</sup>建立了巨-子结构层间隔震体系的分析模型与运动方程,采用复模态方法推导了该体系的随机地震响应方差,基于NSGA-II算法提出了巨-子结构层间隔震体系参数优化流程.陈昉健<sup>[11]</sup>、陈俊岭<sup>[12]</sup>等研究了近场地震对结构地震响应的影响.Calugaru等<sup>[13-18]</sup>对近场地震作用下隔震结构的地震反应和抗倾覆性能等进行了分析.

综上,巨型框架结构的相关研究主要集中在数值分析、节点及结构抗震性能方面<sup>[19-20]</sup>.振动控制方法应用于巨-子结构的研究较少,且集中在理论及数值分析,试验研究仅见个别报道<sup>[6]</sup>,也未考虑近断层地震作用,巨型框架结构的周期较长,近断层地震动包含的动态长周期脉冲对其地震反应有较大影响.本文通过对一基于子结构组合隔震的巨-子结

构模型进行振动台试验,实际考察近断层地震动、远场地震动作用下主结构和子结构的地震响应.

## 1 结构模型及试验方案

### 1.1 结构模型

试验在福州大学的地震模拟振动台系统上进行.结构模型是一个具有3个巨型结构层的巨型钢框架结构,根据振动台台面尺寸及最大有效载荷等确定结构模型的相似系数如表1所示.结构模型含有3个子结构,从下往上依次为第1,2,3子结构;每个子结构3×2跨,3层,总高度0.78 m,由于第1子结构不与主结构直接相连,在不发生碰撞的情况下,其动力响应与主结构间的相互影响可以忽略,因此在实际振动台模型中未设置第1子结构,仅有第2和第3子结构.模型的平、立面如图1所示,其长跨方向为X向,跨度为1.6 m;短跨方向为Y向,跨度为1.0 m;模型总高度为3.27 m;模型结构自身质量1.851 t,质量不足部分通过增加配重满足,每层主结构楼面配重0.28 t,子结构每层楼面配重0.55 t,模型总质量为5.991 t.每个子结构与主结构的质量比为77.6%.模型结构的构件尺寸如表2所示.

表1 模型结构相似系数

Tab.1 Similarity coefficients of the model structure			
物理量	相似系数符号	计算公式	相似系数
长度	$S_l$	—	1/30
弹性模量	$S_E$	—	1
加速度	$S_a$	—	1
质量	$S_m$	$S_m = S_E S_l^2 / S_a$	1/900
速度	$S_v$	$S_v = (S_l S_a)^{1/2}$	$(1/30)^{1/2}$
位移	$S_u$	$S_u = S_l$	1/30
应力	$S_\sigma$	$S_\sigma = S_E$	1
应变	$S_\epsilon$	$S_\epsilon = 1$	1
力	$S_F$	$S_F = S_E S_l^2$	1/900
时间	$S_t$	$S_t = (S_l / S_a)^{1/2}$	$(1/30)^{1/2}$
刚度	$S_k$	$S_k = S_E S_l$	1/30

基于子结构组合隔震的巨-子结构是在结构模型每个子结构的底部布置两个铅芯橡胶隔震支座和两个弹性滑移支座,同类型支座对角布置.模型支

座根据上述刚度和力的相似系数及原型结构组合隔震层参数计算得到其力学参数,再进行几何参数设计及加工;而原型结构隔震层参数经数值分析、

设计及验算得到,两种模型支座的几何参数及性能试验得到的力学参数基本相同,见表 3.子结构与外部巨型柱之间的隔震缝宽设置为 15 mm.

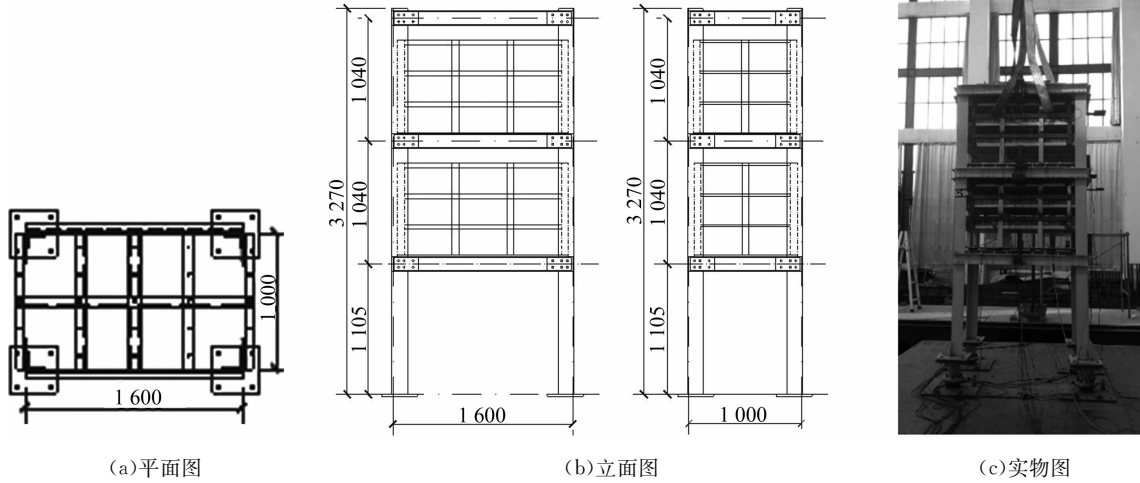


图 1 巨-子结构模型平、立面图

Fig.1 Plans and elevations of the mega-sub structure model

表 2 模型结构构件尺寸

Tab.2 Sizes of model structure members

构件	截面尺寸/ (mm×mm)	构件	截面尺寸/ (mm×mm×mm)
巨型框架柱	L140×10	子结构框架柱	□60×60×2.5
巨型框架主梁	12.6# 槽钢	子结构框架梁	□40×40×1.5
巨型框架次梁	8# 槽钢		

### 1.2 试验方案

巨型框架结构的周期较长,基于子结构组合隔震的巨型框架结构的动力特性也会不一样,为了研究近断层、远场以及不同场地类型地震动对巨型结构体系动力响应及减震效果的影响,选用 Chi-Chi

地震不同测站点的两个场地类型的 3 条不同特性地震记录作为本次试验时的输入,地震记录的参数见表 4.振动台试验时,地震动的输入方向为 X 向,输入幅值为 310 gal,对应 7 度(0.15 g)罕遇,按照表 4 中的编号顺序逐一输入进行试验.先进行组合隔震结构(基于子结构组合隔震的巨-子结构,指的是断开子结构与主结构的刚性连接,而采用隔震支座或滑移隔震支座连接的巨型框架-子结构体系)的试验,后进行抗震结构(巨-子抗震结构,指的是子结构与主结构刚性连接的巨型框架-子结构体系)的试验.

表 3 隔震支座参数

Tab.3 Parameters of bearings

剪切模量/ MPa	总高度/ mm	橡胶外径/ mm	铅芯直径/ mm	橡胶总高/ mm	钢板总高/ mm	水平刚度/ (N·mm <sup>-1</sup> )	竖向刚度/ (kN·mm <sup>-1</sup> )	水平刚度 (弹性滑移)/ (N·mm <sup>-1</sup> )	摩擦因数 (弹性滑移)
0.392	35	65	10	7(6)	2.0×4(3)	145.1 (164.7)	22.5 (19.3)	134.1 (149.8)	0.04

注:括号内的数值代表第 3 子结构的隔震支座参数;其余参数为第 2 和第 3 子结构的隔震支座的共用参数.

表 4 试验用地震动

Tab.4 Ground motions for the shaking table test

编号	记录名称	类别	测站点	场地类型	断层距/km	分量	时间间隔/s	PGA/gal	PGV/ (cm·s <sup>-1</sup> )	PGV/PGA	特征周期/s
1	Chi-Chi2N	近断层	TCU056	Ⅱ类	10.48	WE	0.005	153.23	42.86	0.28	0.90
2	Chi-Chi2F	远场	TAP042	Ⅱ类	106.48	WE	0.005	94.91	12.34	0.13	1.20
3	Chi-Chi3N	近断层	TCU110	Ⅲ类	11.58	WE	0.005	187.96	48.72	0.26	2.05

注:记录名称后缀 2 和 3 分别代表Ⅱ和Ⅲ类场地;N 和 F 分别代表近断层和远场.

结构测量系统采用了 3 种传感器:加速度传感器、位移传感器和力传感器.如图 2 所示,在振动台

台面上沿 X 向布置 1 个加速度传感器,以测量结构的实际输入.在主结构的每层楼板及两个子结构的

每层沿 X 向均布置 1 个加速度传感器,以测量主结构和子结构的加速度响应.在主结构每层主梁的中部及振动台台面沿 X 向各布置一个位移传感器,在第 2 和第 3 子结构的顶层沿 X 向各布置一个位移传感器,以测量模型结构中主结构各层、子结构顶层位移响应.对于组合隔震结构,在第 2 和第 3 子结构底部沿 X 向各布置一个位移计用以测量组合隔震层的变形.在 4 个巨型柱子底部各布置一个三向力传感器,以测量主结构柱的剪力和轴力.

对白噪声扫频工况采集到的数据进行分析,得到抗震结构和组合隔震结构的基本周期分别为 0.462 s 和 0.501 s,且试验前后的周期数值基本不变,说明在子结构底部设置组合隔震层的形式以及减震机理不同于基础隔震,设置组合隔震层未显著延长结构的基本周期,也说明了试验并未对结构造成损伤或者破坏.

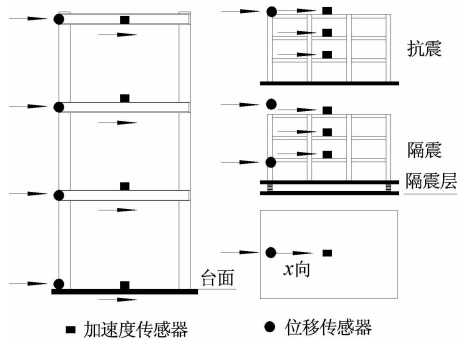


图 2 传感器布置图

Fig.2 Layout of the sensors

## 2 主结构地震响应

### 2.1 主结构位移响应

主结构作为主要的抗侧力体系,其地震响应大小关系结构整体安全性.7 度(0.15 g)罕遇地震作用下,抗震结构和组合隔震结构的主结构各层位移响应峰值及调谐减震效果如表 5 所示.限于篇幅,仅给出抗震结构和组合隔震结构的顶层主结构梁位移响应时程曲线,如图 3 所示.

下文中的减震效果或隔震效果定义为:

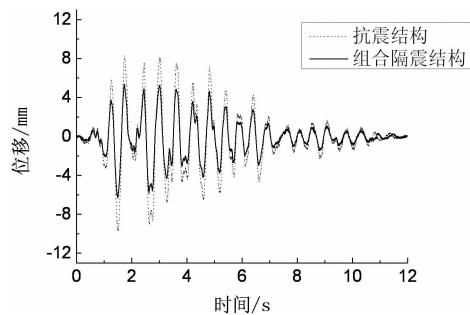
减(隔)震效果 = [(抗震结构地震响应 - 组合隔震结构地震响应) / 抗震结构地震响应] × 100%.

由表 5 和图 3 可见,在 3 条不同特性地震动作用下,组合隔震子结构对主结构梁位移响应都具有明显的调谐减震作用,减震效果不低于 30.30%,最大值达到 39.14%. II 类近断层地震动 Chi-Chi2N 作

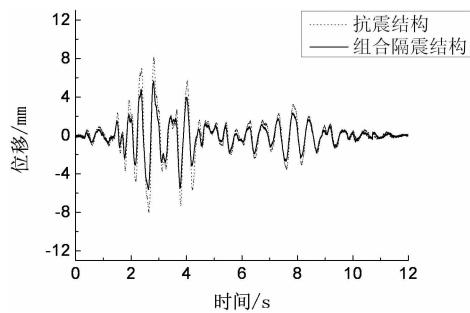
表 5 主结构梁位移响应及减震效果

Tab.5 Displacement responses and controlled effects of main-structure beams mm

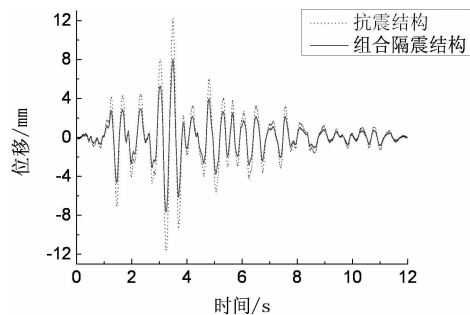
楼层	结构	Chi-Chi2N	Chi-Chi2F	Chi-Chi3N
顶层	抗震结构	9.83	8.12	12.23
	组合隔震结构	6.32	5.66	8.02
	减震效果/%	35.71	30.30	34.42
中间层	抗震结构	6.54	5.49	7.53
	组合隔震结构	3.98	3.66	4.82
	减震效果/%	39.14	33.33	35.99
底层	抗震结构	4.22	3.53	4.77
	组合隔震结构	2.64	2.31	3.14
	减震效果/%	37.44	34.56	34.17



(a) Chi-Chi2N



(b) Chi-Chi2F



(c) Chi-Chi3N

图 3 主结构顶层位移响应时程曲线

Fig.3 Displacement time histories of top of the main-structure

用下,主结构的位移响应及调谐减震效果都明显比 II 类远场地震动 Chi-Chi2F 大;抗震结构的响应增大较明显,约 20%,组合隔震结构增大 10%;说明

近断层地震动的脉冲效应增大了主结构的位移响应.Ⅲ类近断层地震动 Chi-Chi3N 作用下的主结构位移响应明显比Ⅱ类近断层地震动 Chi-Chi2N 大,抗震结构最多增大 24.4%,组合隔震结构最多增大 26.9%;由于Ⅲ类近断层地震动 Chi-Chi3N 的长周期成分与结构基本周期更接近,使得主结构的位移响应显著增加,但是减震效果并没有受到明显影响;三层主结构梁中,一般中间层主结构梁位移响应的控制效果更好一些.抗震结构和组合隔震结构的各层主结构位移响应从下往上渐增,主结构顶层的位移最大.

### 2.2 主结构加速度响应

罕遇地震作用下抗震结构和组合隔震结构的主结构各层加速度响应峰值及减震效果如表 6 所示.图 4 给出了抗震结构和组合隔震结构的主结构顶层加速度响应时程曲线.

由表 6 和图 4 可见,在 3 条不同特性地震动作用下,组合隔震子结构对主结构的加速度响应都具有明显的调谐减震作用,减震效果不低于 35.23%,最大值达到 40.61%.由于近断层地震动的脉冲效应,在Ⅱ类近断层地震动 Chi-Chi2N 作用下,主结构的加速度响应比Ⅱ类远场地震动 Chi-Chi2F 大 10%左右.由于Ⅲ类近断层地震动 Chi-Chi3N 的长周期成分与结构基本周期更接近,使得Ⅲ类近断层地震动 Chi-Chi3N 作用下的主结构加速度响应明显比Ⅱ类近断层地震动 Chi-Chi2N 大,一般要大 20%以上,但是减震效果没有受到影响.3 个主结构层中,主结构顶层的加速度响应较大且控制效果要好一些,也比顶层位移的减震效果好;中间层的加速度响应较小.

表 6 主结构加速度响应及减震效果

Tab.6 Acceleration responses and controlled effects of main-structure beams		$m \cdot s^{-2}$		
楼层	结构	Chi-Chi2N	Chi-Chi2F	Chi-Chi3N
顶层	抗震结构	6.88	6.18	8.01
	组合隔震结构	4.13	3.67	5.02
	减震效果/%	39.97	40.61	37.33
中间层	抗震结构	4.32	4.03	5.56
	组合隔震结构	2.76	2.47	3.57
	减震效果/%	36.11	38.71	35.79
底层	抗震结构	5.28	4.84	6.51
	组合隔震结构	3.42	3.08	4.13
	减震效果/%	35.23	36.36	36.56

### 2.3 基底剪力响应

在 3 条不同特性地震动作用下,抗震结构和组合隔震结构巨型柱的底部剪力时程曲线如图 5 所

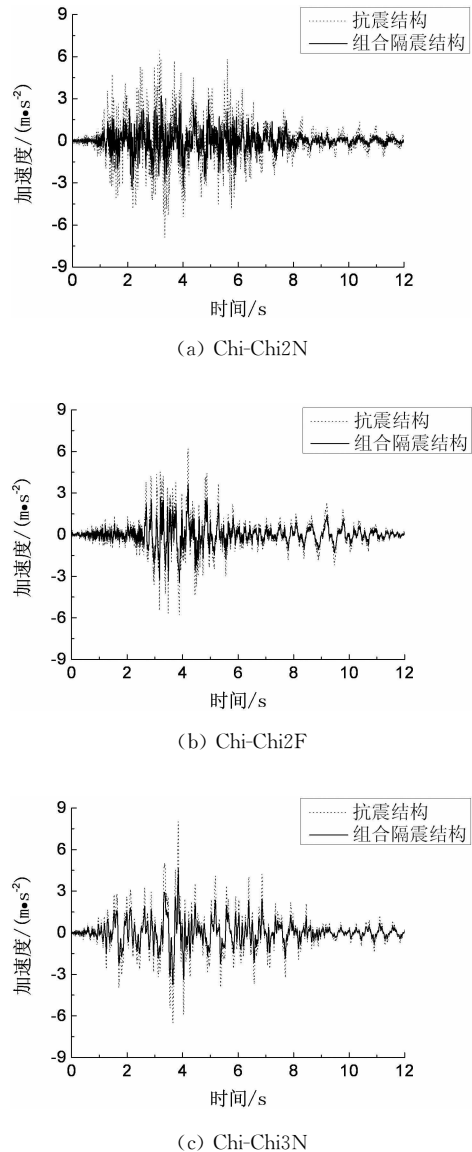


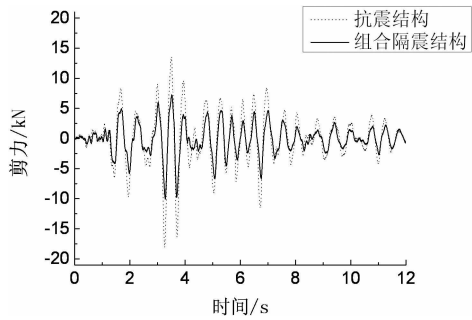
图 4 主结构顶层加速度响应时程曲线  
Fig.4 Acceleration time histories of top of the main-structure

示,其幅值分别为 18.02,15.14,20.26 kN 和 10.08,9.42,11.95 kN,减震控制效果分别达到 44.06%,37.78%和 41.02%.与主结构的位移和加速度响应规律一样,近断层地震动作用下的基底剪力响应要比远场地震动大,且Ⅲ类场地地震动作用下的响应比Ⅱ类场地地震动大,减震效果较明显且相差不大.

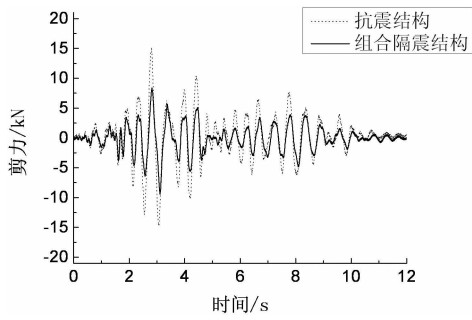
## 3 子结构地震响应

### 3.1 子结构顶层位移响应

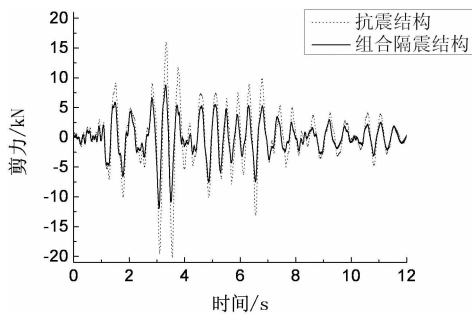
子结构作为巨-子结构的主要组成部分,是生活和工作的场所,其安全性和舒适度是结构振动控制



(a) Chi-Chi2N



(b) Chi-Chi2F



(c) Chi-Chi3N

图 5 主结构基底剪力反应时程曲线  
Fig.5 Base shear time histories of the main-structure

的首要目标.地震动加速度从振动台台面向上传递,经过主结构放大后,再传递给子结构,传递给子结构时,由于组合隔震层的隔震作用,子结构最终的地震响应下降.对于子结构自身而言,从形式上它相当于一个基底隔震结构.

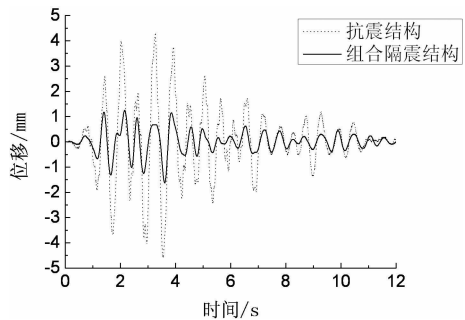
抗震结构和组合隔震结构在地震作用下的各子结构顶层位移响应峰值及隔震效果列于表 7.图 6 为抗震结构和组合隔震结构第 2 子结构的顶层位移响应时程曲线.

由表 7 和图 6 可知,在 3 条不同特性地震动作用下,组合隔震层对两个子结构的位移响应都有显著的隔震作用,隔震效果不低于 60.27%,最大值达到 66.24%.前述在不同特性地震动作用下主结构的地震响应规律对于子结构的位移响应仍适用: II 类

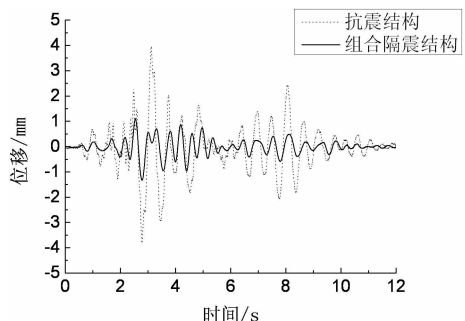
表 7 子结构顶层位移响应及隔震效果

Tab.7 Displacement responses and controlled effects of top of sub-structures mm

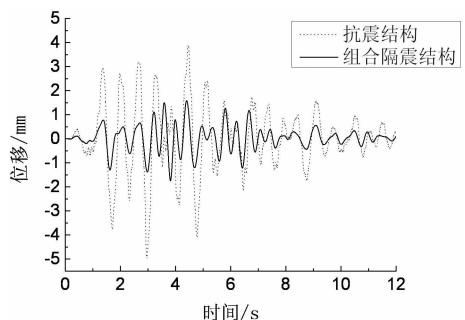
楼层	结构	Chi-Chi2N	Chi-Chi2F	Chi-Chi3N
第 3 子结构	抗震结构	3.81	3.38	4.38
	组合隔震结构	1.43	1.26	1.74
	隔震效果/%	62.47	62.72	60.27
第 2 子结构	抗震结构	4.58	3.94	4.96
	组合隔震结构	1.63	1.33	1.74
	隔震效果/%	64.41	66.24	64.92



(a) Chi-Chi2N



(b) Chi-Chi2F



(c) Chi-Chi3N

图 6 第 2 子结构顶层位移响应时程曲线  
Fig.6 Displacement time histories of top of the 2<sup>nd</sup> sub-structure

近断层地震动 Chi-Chi2N 作用下,子结构的位移响应比 II 类远场地震动 Chi-Chi2F 作用下大; III 类近断层地震动 Chi-Chi3N 作用下的子结构位移响应明显比 II 类近断层地震动 Chi-Chi2N 大,但是隔震效果没有受到影响.由于两个组合隔震层设计合理,两

个组合隔震子结构的位移响应和隔震效果没有明显差异,但第 2 子结构的位移响应(尤其是抗震结构)一般要略大于第 3 子结构。

### 3.2 子结构加速度响应

罕遇地震作用下抗震结构和组合隔震结构各子结构每层的加速度响应及隔震效果见表 8。限于篇幅,仅给出抗震结构和组合隔震结构第 2 子结构的顶层加速度响应时程曲线,如图 7 所示。

由表 8 和图 7 可知,不管是远场地震动还是近断层地震动作用下,组合隔震层对两个子结构的各层加速度响应都有明显的隔震作用,隔震效果不低

于 41.11%,最大值达到 59.24%。与前述子结构的位移响应规律相似:Ⅱ类近断层地震动 Chi-Chi2N 作用下,两种结构的子结构各层加速度响应都比Ⅱ类远场地震动 Chi-Chi2F 作用下大,但隔震效果接近。Ⅲ类近断层地震动 Chi-Chi3N 作用下的两种结构的子结构各层加速度响应明显比Ⅱ类近断层地震动 Chi-Chi2N 大,尤其是抗震结构的第 3 子结构增大更明显;隔震效果略有增大,特别是第 3 子结构的 1 和 2 层。两个子结构的隔震效果较接近,但第 2 子结构的各层加速度响应都大于第 3 子结构。

表 8 子结构加速度响应及隔震效果

Tab.8 Acceleration responses and controlled effects of sub-structures

$m \cdot s^{-2}$

楼层	结构	Chi-Chi2N			Chi-Chi2F			Chi-Chi3N		
		3层	2层	1层	3层	2层	1层	3层	2层	1层
第 3 子结构	抗震结构	4.28	3.01	2.71	3.86	2.77	2.43	5.23	4.43	3.68
	组合隔震结构	1.96	1.72	1.55	1.73	1.54	1.42	2.34	2.04	1.71
	隔震效果/%	54.21	42.86	42.80	55.18	44.40	41.56	55.26	53.95	53.53
第 2 子结构	抗震结构	5.24	3.90	2.78	4.76	3.22	2.53	6.26	4.54	3.13
	组合隔震结构	2.27	1.88	1.63	1.94	1.74	1.49	2.56	2.31	1.81
	隔震效果/%	56.68	51.79	41.37	59.24	45.96	41.11	59.11	49.12	42.17

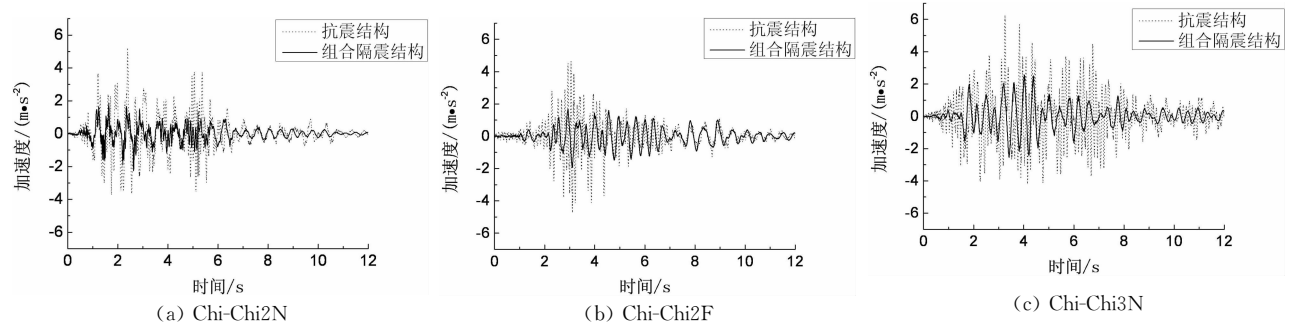


图 7 第 2 子结构顶层加速度响应时程曲线

Fig.7 Acceleration time histories of top of the 2<sup>nd</sup> sub-structure

### 3.3 隔震层位移响应

罕遇地震作用下的隔震层位移响应是一项关系到结构整体安全性的重要指标,隔震层的位移响应要小于隔震缝的宽度。罕遇地震作用下两个子结构组合隔震层的位移响应列于表 9。从表 9 可看出,近断层地震动 Chi-Chi2N 作用下的隔震层位移响应比远场地震动 Chi-Chi2F 大 20%以上,且Ⅲ类近断层地震动作用下的隔震层位移响应大于Ⅱ类近断层地震动下的位移响应。组合隔震层的位移响应最大值为 8.65 mm,未超过预留的隔震缝宽 15 mm;试验中也未观察到子结构与外部主结构有发生碰撞,结构整体安全。

表 9 子结构隔震层位移响应

Tab.9 Displacement responses of isolation layers mm

楼层	Chi-Chi2N	Chi-Chi2F	Chi-Chi3N
第 3 子结构	7.65	5.94	8.65
第 2 子结构	5.96	4.95	6.72

## 4 结论

在巨-子结构的子结构底部设置组合隔震层,对巨-子结构缩尺模型进行了振动台试验,得到如下结论:

1) 试验表明,在巨-子结构的子结构底部设置组合隔震层后,结构的基本周期未显著延长。

2)组合隔震子结构对外部主结构的地震响应具有明显的调谐减震效果,可确保主体结构的安全.

3)组合隔震层对子结构的地震响应具有显著的隔震效果,第2子结构的地震响应大于第3子结构;罕遇地震作用下,隔震层的位移响应小于预设的主结构和子结构间的隔震缝宽,试验中未观察到子结构与主结构发生碰撞.

4)本文试验结果表明,由于近断层地震动的脉冲效应及长周期成分,近断层地震动作用下主结构和子结构的地震响应都要大于相同场地的远场地震动,且Ⅲ类近断层地震动作用下的响应大于Ⅱ类近断层地震动.鉴于试验的局限性,后续将进行大量数值分析,进一步研究其近场反应特性.

## 参考文献

- [1] 颜学渊,张永山,王焕定,等.高层结构三维基础隔震抗倾覆试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(4):1-8.  
YAN Xueyuan, ZHANG Yongshan, WANG Huanding, *et al.* Experimental study on high-rise structure with three-dimensional base isolation and overturn resistance devices[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4): 1-8. (In Chinese)
- [2] 颜学渊,张永山,王焕定,等.三维隔震抗倾覆结构振动台试验[J].工程力学,2010,27(5):91-96.  
YAN Xueyuan, ZHANG Yongshan, WANG Huanding, *et al.* Shaking table test for the structure with three-dimensional base isolation and overturn resistance devices[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(5): 91-96. (In Chinese)
- [3] FENG M Q, MITA A. Vibration control of tall buildings using mega subconfiguration[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(10): 1082-1088.
- [4] 蓝宗建,杨东升,房良,等.巨型框架多功能减振结构体系的减振效果分析[J].东南大学学报:自然科学版,2003,33(5):557-561.  
LAN Zongjian, YANG Dongsheng, FANG Liang, *et al.* Study on the effectiveness of multifunctional vibration-absorption megaframe structures [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2003, 33(5): 557-561. (In Chinese)
- [5] 田玉基,蓝宗建,杨庆山.巨型框架多功能减振结构的有限元计算方法[J].工程力学,2004,21(3):118-122.  
TIAN Yuji, LAN Zongjian, YANG Qingshan. Finite element analysis of multi-functional vibration-absorption mega-frames [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(3): 118-122. (In Chinese)
- [6] 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 & Structural Dynamics, 2004, 33(1): 1-14.
- [7] 张洵安,周湘鄂,何官剑.巨-子型有控结构体系在地震激励下的响应控制特性[J].沈阳工业大学学报,2008,30(2):219-222.  
ZHANG Xunan, ZHOU Xiange, HE Guanlian. Response controlling characteristics of mega-sub controlled structural system under seismic excitation [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2008, 30(2): 219-222. (In Chinese)
- [8] ZHANG X A, QIN X J, CHERRY S, *et al.* A new proposed passive mega-sub controlled structure and response control [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2009, 13(2): 252-274.
- [9] 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)
- [10] 谭平,李祥秀,刘良坤,等.巨-子结构控制体系的减震机理及性能分析[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)
- [11] 陈昉健,易伟建.近场地震作用下锈蚀钢筋混凝土桥墩的IDA分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2015,42(3):1-8.  
CHEN Fangjian, YI Weijian. Incremental dynamic analysis of corroded reinforced concrete bridge columns subjected to near-field earthquake [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2015, 42(3): 1-8. (In Chinese)
- [12] 陈俊岭,阳荣昌,马人乐.近断层地震滑冲效应下风力发电塔动力响应和振动控制试验研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2013,40(8):27-33.  
CHEN Junling, YANG Rongchang, MA Renle. Experimental study of the seismic response and vibration control of wind turbine tower considering near-fault ground motion with fling step [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(8): 27-33. (In Chinese)
- [13] CALUGARU V, PANAGIOTOU M. Seismic response of 20-story base-isolated and fixedbase reinforced concrete structural wall buildings at a nearfault site [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(6): 927-948.
- [14] ALHAN C, ÖNCÜ-DAVAS S. Performance limits of seismically isolated buildings under near-field earthquakes [J]. Engineering Structures, 2016, 116: 83-94.
- [15] JENSEN H A, KUSANOVIC D S. On the effect of near-field excitations on the reliability-based performance and design of base-isolated structures [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2014, 36: 28-44.
- [16] SHI Y, KURATA M, NAKASHIMA M. Disorder and damage of base-isolated medical facilities when subjected to nearfault and long-period ground motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(11): 1683-1701.
- [17] 马长飞,谭平,张亚辉,等.近场地震作用下考虑P-Δ效应的首层柱顶隔震结构地震反应分析[J].振动工程学报,2012,25(4):439-445.  
MA Changfei, TAN Ping, ZHANG Yahui, *et al.* Seismic analysis of first-floor column top isolation structures subjected to near-field ground motions considering P-Δ effects [J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25(4): 439-445. (In Chinese)
- [18] 杜永峰,徐超,李慧.近断层地震作用下基础隔震结构抗倾覆性能的分析[J].兰州理工大学学报,2012,38(5):111-115.  
DU Yongfeng, XU Chao, LI Hui. Analysis of overturning resistant performance of base-isolated structures subjected to near-fault earthquake [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012, 38(5): 111-115. (In Chinese)
- [19] JIANG Q, LU X, GUAN H, *et al.* Shaking table model test and FE analysis of a reinforced concrete mega-frame structure with tuned mass dampers [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2014, 23(18): 1426-1442.
- [20] 张宇峰,舒赣平,吕志涛,等.巨型框架结构的抗震性能和振动台试验研究[J].建筑结构学报,2001,22(3):2-8.  
ZHANG Yufeng, SHU Ganping, LÜ Zhitao, *et al.* Aseismic capability and shaking table experiment of mega-frame structures [J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(3): 2-8. (In Chinese)