

[文章编号] 1002-8412(2023)01-0024-08

DOI:10.16226/j.issn.1002-8412.2023.01.004

## 三类组合变刚度隔震核岛抗震性能对比研究

方超<sup>1,4</sup>,孔德睿<sup>1,4</sup>,魏陆顺<sup>2</sup>,李春<sup>3</sup>,李全华<sup>3</sup>

(1.信阳学院土木工程学院,河南 信阳 464000;2.佛山科学技术学院 交通与土木建筑学院,广东 佛山 528000;3.信阳市建筑勘察设计研究院有限公司,河南 信阳 464000;4.信阳市装配式建筑重点实验室,河南 信阳 464000)

**[提要]** 基于橡胶支座与滑板支座串联形成高弹性滑板支座(HESLB),协同铅芯橡胶支座(LRB)、橡胶支座(NRB)构成变刚度组合隔震系统应用于核岛结构。首先,结合不同支座力学特性对组合隔震系统力学性能参数进行分析;其次,基于单质点隔震模型给出不同运动状态下的动力方程;最后,针对目标核岛设计 3 种组合隔震方案并进行数值分析。结果表明:组合隔震方案均具备两阶段刚度特性,LRB+NRB+HESLB 组合隔震方案可同时控制核岛加速度与位移响应,具备较好的耗能效果。

**[关键词]** 隔震核岛;变刚度;组合隔震;地震响应

[中图分类号] TU317 [文献标识码] A

### Study on seismic performance of three types of combined variable stiffness isolation nuclear islands

Fang Chao<sup>1,4</sup>, Kong De-rui<sup>1,4</sup>, Wei Lu-shun<sup>2</sup>, Li Chun<sup>3</sup>, Li Quan-hua<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xinyang University, Xinyang 464000, China; 2. Transportation and Civil Building College, Foshan University, Foshan 528000, China; 3. Xinyang Architectural Survey, Design and Research Institute Co. Ltd, Xinyang 464000, China; 4. Laboratory Fabricated Building of Xinyang City, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** Based on the rubber bearing and the sliding board bearing in series to form a high elastic sliding board bearing (HESLB), the lead rubber bearing (LRB) and rubber bearing (NRB) are combined to form a variable stiffness combined seismic isolation system and applied to the nuclear island structure. First, the mechanical performance parameters of the combined isolation system are analyzed based on the mechanical characteristics of different supports; secondly, the dynamic equations under different motion states are given based on the single-particle isolation model; Finally, three combined isolation schemes are designed and numerically analyzed for the target nuclear island. The results show that: the combined isolation schemes have two-stage stiffness characteristics, and the LRB+NRB+HESLB combined isolation scheme can control the acceleration and displacement response of the nuclear island at the same time, and has a good energy consumption effect.

**Keywords:** isolation of the nuclear island; variable stiffness; combined isolation; seismic response

E-mail:378700611@qq.com

2011 年日本福岛大地震造成了严重的核泄露事件,超设计地震给核电安全提出了挑战<sup>[1,2]</sup>。不同隔震体系下结构响应特点与新型隔震支座的研发引起众多学者关注<sup>[3]</sup>。南非的 Koeberg 核电厂隔震体系中采用有早期滑板装置,然而其机械性能表现

却不尽满意<sup>[4]</sup>。2008 年,魏陆顺等将橡胶支座、滑板支座构成组合隔震系统应用于某工程中取得较好减震效果<sup>[5]</sup>;2012 年,谢礼立等分析了核电工程应用隔震技术的可行性,并给出参数化设计建议<sup>[6]</sup>;2014 年,魏陆顺等基于线性分析法对核岛结构隔震响应进行了预测<sup>[7]</sup>;2017 年,上海核工院提出闭锁变刚度隔震理念以充分利用核岛抗震裕度并控制大震下位移响应<sup>[8]</sup>;2018 年,刘文光等设计一种新型高性能多级性态支座并进行试验,结果显示该支座

[收稿日期] 2021-08-21

[基金项目] 国家自然科学基金(51778162);河南省高等学校重点科研项目(22A560016);信阳学院校级科研项目(2021-XJLYB-008,2021-XJLYB-020)

Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting Feb. 2023

具备多线性变刚度特点<sup>[9]</sup>;2021年,富腾等对曲面滑道变摩擦滚动支座隔震效果进行分析<sup>[10]</sup>;同年,赖振峰等在隔震层中设置柔性限位装置形成变刚度特性,结果显示该隔震体系能有效降低隔震层水平位移<sup>[11]</sup>。

基于上述研究成果,提出一种将橡胶支座与滑板支座串联形成的高弹性滑板支座(HESLB),协同铅芯橡胶支座(LRB)、橡胶支座(NRB)构成变刚度组合隔震系统应用于核岛结构。结合不同支座力学特性对组合隔震层力学性能参数进行了分析,给出不同运动状态下单质点体系动力方程。针对某核岛设计3种组合隔震方案并进行数值分析。结果表明:组合隔震方案均具备两阶段刚度特性,LRB+NRB+HESLB组合隔震方案可同时控制核岛加速度与位移响应,且具备较好的耗能能力。

### 1 三类组合隔震系统力学特性分析

#### 1.1 隔震层构成

组合隔震系统由三类支座构成(见图1):①普通橡胶支座(NRB)、②铅芯橡胶支座(LRB)、③橡胶-滑板支座串联的高弹性滑板支座(HESLB)。隔震系统中橡胶支座提供弹性恢复力,铅芯橡胶支座铅棒在屈服之前提供启动力,铅棒屈服后提供耗能、橡胶体提供恢复力。高弹性滑板支座分为两阶段工作状态,滑动前橡胶体(RB)提供弹性力,此时支座整体处于弹性工作状态;滑动后滑动面摩擦力做功耗能,橡胶体做跟随运动。

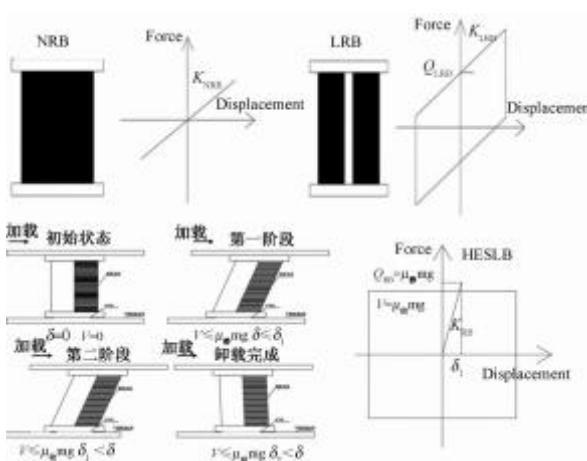


图1 隔震支座构成

Fig. 1 The types of seismic isolation bearings

### 1.2 三类组合隔震层水平力学特性

#### 1.2.1 NRB+HESLB组合

隔震层整体变形为 $\delta_h$ ,当滑板支座未滑动时即 $\delta_h \leq \delta_1$ 时,橡胶支座(NRB)与高弹性滑板支座中的橡胶体(RB)协同变形,此时隔震层处于第一阶段,总水平剪力如式(1)所示:

$$V_{11} = F_{\text{NRB}} + F_{\text{HESLB}} \quad (1)$$

式中: $\delta_1$ 为HESLB支座屈服位移; $F_i, k_i$ 代表第*i*类支座回复力、刚度; $RB$ 代表高弹性滑板支座中的橡胶体支座,对应隔震层水平刚度如式(2)所示:

$$K_{11} = K_{\text{NRB}} + K_{\text{RB}} \quad (2)$$

当 $\delta_h > \delta_1$ 时,滑板支座开始滑动,高弹性滑板支座橡胶体退出工作开始追随滑板运动,隔震层进入第二工作状态,高弹性滑板支座橡胶体屈服力 $Q_{\text{RB}} = \alpha \mu_{\text{静}} mg$ ,屈服位移如式(3)所示:

$$\delta_1 = \frac{Q_{\text{RB}}}{K_{\text{RB}}} = \frac{\alpha \mu_{\text{静}} mg}{K_{\text{RB}}} \quad (3)$$

式中: $m$ 为核岛、底板、隔震层总质量; $\mu$ 为摩擦系数; $\alpha$ 为滑动支座承重系数;隔震层屈服力如式(4)所示:

$$Q_{1d} = \delta_1 K_{11} = (K_{\text{NRB}} + K_{\text{RB}}) \delta_1 = (K_{\text{NRB}} + K_{\text{RB}}) \frac{\alpha \mu_{\text{静}} mg}{K_{\text{RB}}} \quad (4)$$

此时水平剪力如式(5)所示,对应隔震层水平刚度如式(6)所示:

$$V_{12} = F_{\text{NRB}} + \mu_{\text{动}} mg \alpha \quad (5)$$

对应隔震层水平刚度为:

$$K_{12} = k_{\text{NRB}} \quad (6)$$

#### 1.2.2 铅芯橡胶支座+高弹性滑板支座

地震剪力 $V \leq Q_{\text{LRB}}$ 时隔震层位移 $\delta_h$ 为零,隔震层处于第一工作阶段。当隔震层水平剪力 $V > Q_{\text{LRB}}$ 时铅芯屈服, $\delta_h \leq \delta_1$ 时,隔震层处于第二工作阶段,此时水平剪力如式(7)所示:

$$V_{21} = F_{\text{LRB}} + F_{\text{HESLB}} \quad (7)$$

对应隔震层水平刚度如式(8)所示:

$$K_{21} = k_{\text{LRB}} + k_{\text{RB}} \quad (8)$$

当 $\delta_h > \delta_1$ 时,高弹性滑板支座橡胶体开始追随滑板运动,隔震层进入第三工作状态,隔震层屈服力如式(9)所示:

$$Q_{2d} = \delta_1 K_{21} = (K_{\text{LRB}} + K_{\text{RB}}) \delta_1 = (K_{\text{LRB}} + K_{\text{RB}}) \frac{\mu_{\text{静}} mg \alpha}{K_{\text{NRB}}} \quad (9)$$

此时水平剪力如式(10)所示,对应隔震层水平刚度如式(11)所示:

$$V_{22} = F_{LRB} + \alpha\mu_{\text{动}} mg \quad (10)$$

$$K_{22} = K_{LRB} \quad (11)$$

### 1.2.3 铅芯橡胶支座+橡胶支座+高弹性滑板支座

地震剪力  $V \leq Q_{LRB}$  时隔震层位移  $\delta_h$  为零, 隔震层处于第一工作阶段。当隔震层剪力  $V > Q_{LRB}$  时铅芯屈服,  $\delta_h \leq \delta_1$  时, 隔震层处于第二工作阶段, 此时水平剪力如式(12)所示:

$$V_{31} = F_{NRB} + F_{LRB} + F_{HESLB} \quad (12)$$

对应隔震层水平刚度如式(13)所示:

$$K_{31} = K_{NRB} + K_{LRB} + K_{RB} \quad (13)$$

当  $\delta_h > \delta_1$  时, 滑板支座橡胶体开始追随滑板运动, 隔震层进入第三工作状态, 隔震层屈服力如式(14)所示:

$$\begin{aligned} Q_{3d} = \delta_1 K_{31} &= (K_{NRB} + k_{LRB} + k_{RB}) \delta_1 = \\ &= (K_{NRB} + K_{LRB} + K_{RB}) \frac{\alpha\mu_{\text{静}} mg}{K_{NRB}} \end{aligned} \quad (14)$$

此时水平剪力如式(15)所示:

$$V_{32} = F_{NRB} + F_{LRB} + \alpha\mu_{\text{动}} mg \quad (15)$$

对应隔震层水平刚度如式(16)所示:

$$K_{32} = K_{NRB} + K_{LRB} \quad (16)$$

### 1.3 组合隔震层竖向力学特性

文献[12]表明弹性滑动支座中橡胶层部分竖向刚度远小于滑板支座刚度, 高弹性滑动支座竖向刚度近似于橡胶体部分刚度。故隔震层整体竖向抗压刚度可视为铅芯橡胶支座竖向刚度  $K_{VLRB}$ 、橡胶支座  $K_{VNRB}$ 、橡胶体竖向刚度  $K_{VRB}$  之和, 其压缩刚度如式(17)所示:

$$\begin{aligned} K_V &= K_{VLRB} + K_{VNRB} + K_{VRB} = \frac{E_{LRB} \times A_{LRB}}{T_{RLRB}} + \\ &\quad \frac{E_{NRB} \times A_{NRB}}{T_{RNRB}} + \frac{E_{RB} \times A_{RB}}{T_{RB}} \end{aligned} \quad (17)$$

式中:  $E_{LRB}$ 、 $E_{NRB}$ 、 $E_{RB}$ ,  $A_{LRB}$ 、 $A_{NRB}$ 、 $A_{RB}$ ,  $T_{RLRB}$ 、 $T_{RNRB}$ 、 $T_{RB}$  分别为铅芯橡胶支座、橡胶支座、橡胶体修正弹性模量、有效承载面积、橡胶层总厚度。参考选用支座的生产参数取抗拉刚度退化系数为 1/8, 即隔震层拉伸刚度  $K_{Vt}$  如式(18)所示:

$$K_{Vt} = \frac{1}{8} \sum (K_{VLRB} + K_{VNRB}) \quad (18)$$

图 2 显示上述组合隔震层水平与竖向刚度力学特性, 可见不同装置组合下隔震层水平刚度呈明显变刚度特性, 以满足不同工程结构设计需求。

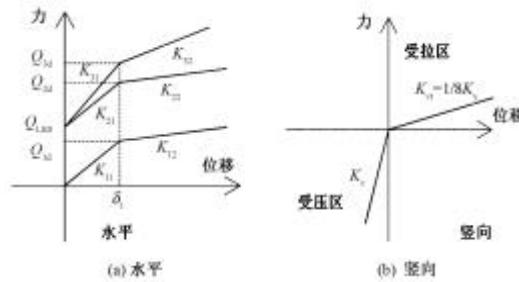


图 2 隔震层刚度特性

Fig. 2 The Stiffness characteristics of seismic isolation layer

### 2 组合隔震核岛单质点动力方程

结合组合隔震系统特点, 假定高弹性滑板支座只在平面内滑动, PTFE 材料与不锈钢滑动面间的动、静摩擦系数近似且在滑动过程中保持稳定。图 3 为单质点组合隔震核岛平面分析模型, 核岛结构刚度远大于隔震层可等效为刚体, 忽略隔震层扭转与摆动, 当滑动支座未启动时, 此时隔震体系运动方程如式(19)所示:

$$m\ddot{x} + c_h\dot{x} + k_hx = -m\ddot{x}_g \quad (19)$$

当滑动支座启动时, 此时隔震体系运动方程如式(20)所示:

$$m\ddot{x} + c_h\dot{x} + k_hx = -m\ddot{x}_g - \mu_{\text{动}} \alpha mg \cdot \text{sign}(\dot{x}) \quad (20)$$

式中:  $m_s$  表示核岛结构质量;  $m_b$  表示底板与隔震层质量;  $m$  为两者之和。 $K_h$ 、 $C_h$  表示不同状态下隔震层水平刚度、阻尼;  $K_v$  表示隔震层竖向刚度;  $H$  表示质点 m 距基底高度;  $B$  表示结构宽度;  $\dot{x}_g$  表示水平地震动加速度;  $x$  表示平动位移;  $\mu_{\text{动}}$  表示滑动面动摩擦系数;  $\alpha$  为滑动支座承重系数;  $\text{sign}(\dot{x})$  为符号函数, 如式(21)所示:

$$\text{sign}(\dot{x}) = \begin{cases} 1 & (\dot{x} > 0) \\ -1 & (\dot{x} < 0) \end{cases} \quad (21)$$

### 3 某核岛组合隔震设计

#### 3.1 数值模型

目标核岛总质量为  $12.8 \times 10^4 \text{ t}$ , 核岛结构采用质量杆模型, 隔震层采用群支座模型。SAP2000 建立的数值模型(见图 4)铅芯橡胶支座、橡胶支座均采

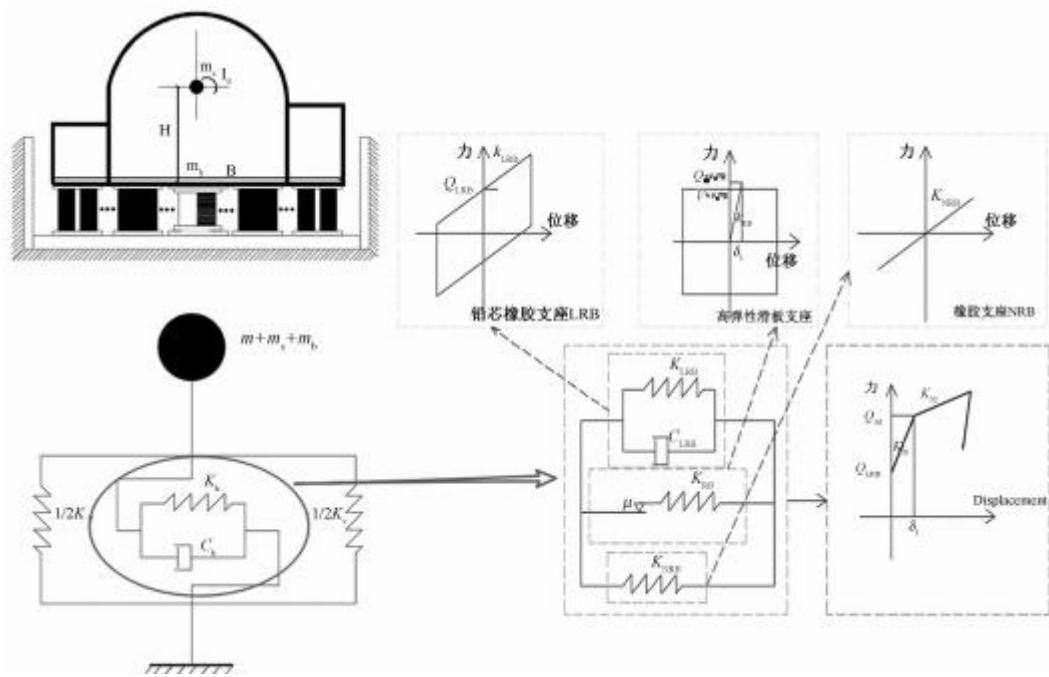


图3 计算模型

Fig. 3 The calculation model of isolation

用Rubber单元,考虑橡胶支座竖向拉压不等采用Multilinear Elastic单元,高弹性滑板支座采用WEN塑性单元(见图4)。控制隔震支座总数不变前提下,采用表1所示组合方案进行对比分析,支座力学参数如表2、表3所示。

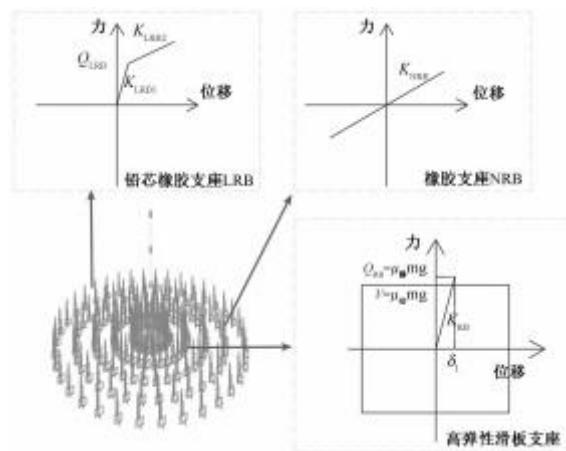


图4 数值分析模型

Fig. 4 The analysis model of finite element

### 3.2 地震动与启动目标设计

采用单组时程进行输入,SSE 标定为 0.3g。图 5 为地震波反应谱曲线,时程谱高频段符合 RG1.6 谱包络要求。

表1 组合隔震方案(个)

Tab. 1 Combined seismic isolation scheme

编号	LRB	NRB	HESLB
方案一	80	180	—
方案二	156	—	104
方案三	—	156	104
方案四	70	86	104

### 4 隔震性能分析

表4为各组合方案振动特性对比,各方案均延长核岛振动周期。其中方案四与传统 LRB+NRB 隔震结构振动周期相近。表5为各方案层加速度峰值对比、图6为层加速度包络曲线,与抗震结构相比加速度均显著降低,减小至 40%~46%,隔震层以上加速度响应趋于一致。方案三层加速度响应最小,方案四与 LRB+NRB 隔震方案加速度相近。

图7为层相对位移包络曲线对比,与抗震结构相比,各隔震方案上部结构呈现出平动状态,这与图6中加速度变化规律相符。0.3g 地震下 NRB+HESLB 方案位移与 LRB+NRB 方案几乎相同,0.6g 地震下 NRB+HESLB 方案位移超出滑板位移限值 800mm,其余方案位移均较接近。

表 2 LRB、NRB 力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of LRB、NRB

型号	有效直径 mm	橡胶总厚度 mm	屈服前刚度 (kN/m)	等效刚度		屈服力 (kN)
				100% 变形 (kN/m)	250% 变形 (kN/m)	
NRB1000	1000	210	—	—	1980	—
LRB1100	1100	260	12150	5560	2680	365

表 3 HESLB 力学参数

Tab. 3 The Mechanical parameters of HESLB

型号	构成	有效直径 mm	橡胶总厚度 mm	屈服前刚度 (kN/m)	等效刚度		屈服力 (kN)
					100% 变形 (kN/m)	250% 变形 (kN/m)	
HESLB	RB1000	1000	210	—	—	1980	—
	SLB800	800	—	静摩擦系数:0.02	动摩擦系数:0.02	—	极限位移 $\pm 800\text{mm}$

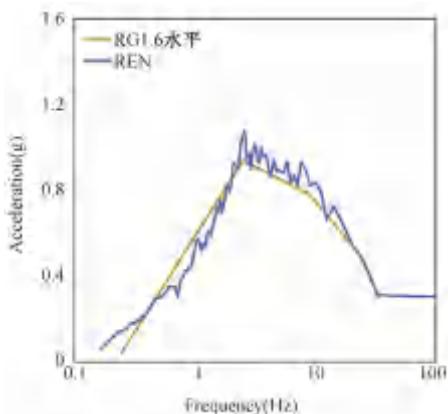


图 5 输入地震动时程反应谱

Fig. 5 Input the time history response spectrum of ground motion

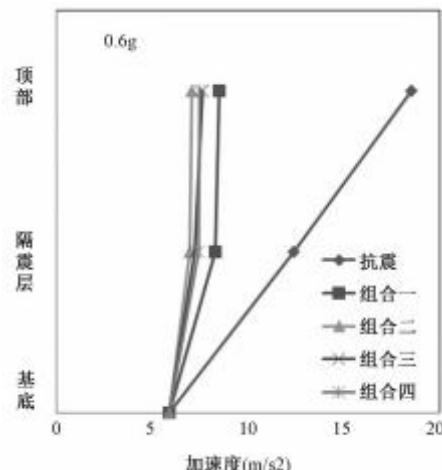


图 6 层加速度峰值包络

Fig. 6 The input seismic time history analysis

图 8 为各方案支座滞回与滞回耗能对比、图 9 为 HESLB 支座力时程曲线。地震作用下 LRB、HESLB 支座滞回环饱满, 形状保持稳定。不同方案下 LRB 支座总屈服力基本保持稳定, LRB+HESLB 方案屈服力明显高于其他方案, LRB+NRB+HESBL 与 LRB+NRB 方案 LRB 滞回环面积趋于相等。

表 4 模态信息

Tab. 4 The information of modal

项目	周期(s)				
	抗震	方案一	方案二	方案三	方案四
X 向	0.223	2.510	2.168	3.131	2.568
Y 向	0.221	2.510	2.160	3.131	2.566

表 5 顶端加速度峰值对比

Tab. 5 The comparison of Top peak acceleration

输入地震动 (m/s <sup>2</sup> )	抗震	方案一		方案二		方案三		方案四	
		峰值 (m/s <sup>2</sup> )	比值 (%)						
0.3g	9.25	3.91	42.3	3.82	41.2	3.78	41.1	4.01	43.4
0.6g	18.49	8.47	45.8	7.04	38.1	7.64	41.3	7.45	40.3

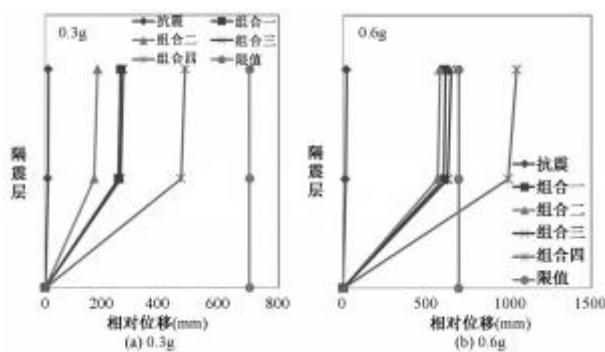


图7 相对位移包络图

Fig. 7 Envelope diagram of relative displacement of structure

0.3g、0.6g 地震下, LRB+NRB+HESLB 方案高弹性滑板支座滞回环均明显包络 LRB+NRB 方案, 表明方案四滑动摩擦耗能更大, 这与图 11 中方案四力时程平台段多于方案二表述现象相符。

0.3g、0.6g 地震输入时, 在方案二与方案四隔震层位移基本相同前提下, LRB+NRB+HESLB 方案耗能明显大于 LRB+NRB 方案。表明总输入能量恒定时, LRB 支座、HESLB 支座配置越多隔震层耗能越大。

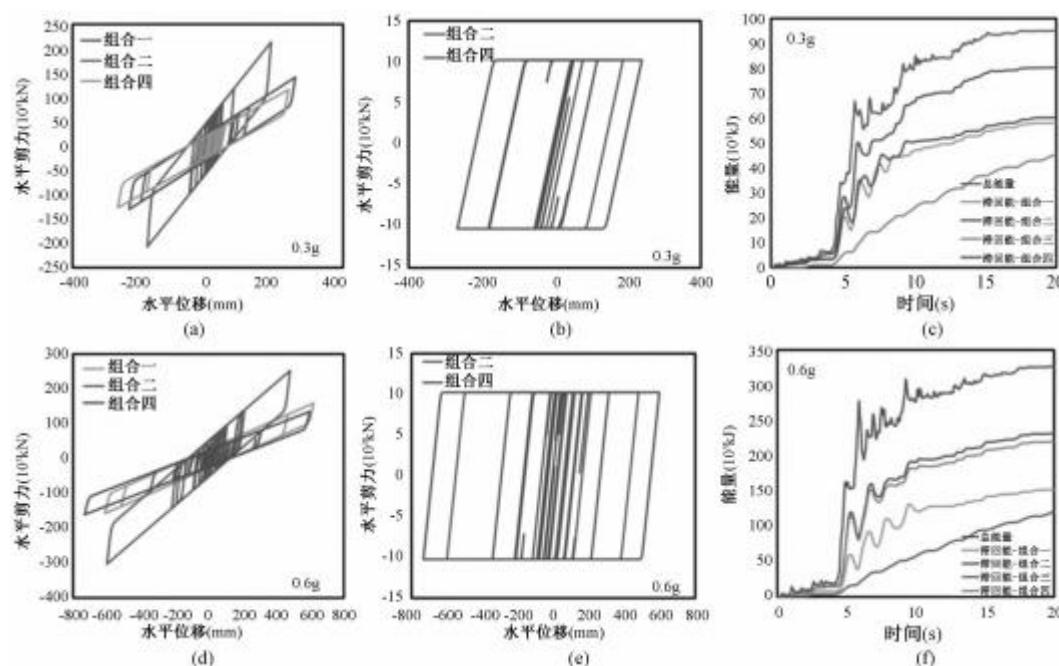


图8 隔震层总滞回曲线与滞回耗能对比

Fig. 8 Comparison of total hysteresis curves and energy of seismic isolation layer

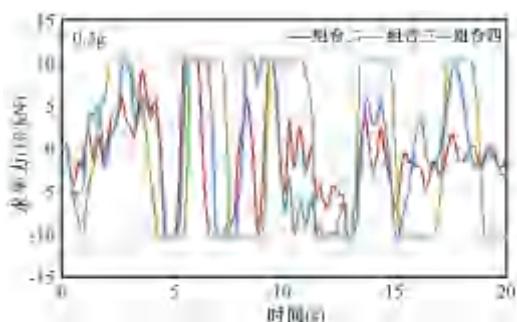


图9 滑板支座力时程

Fig. 9 Skateboard bearing force time history

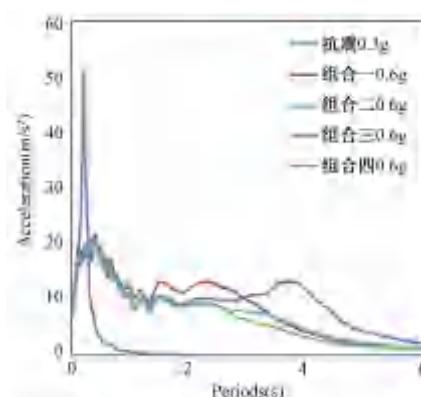


图10 顶部反应谱对比

Fig. 10 The comparison of top Response Spectrum

图 10 为顶端加速度反应谱对比,表 6 为反应谱峰值数据对比。结果显示,各组合隔震方案反应谱峰值均明显降低,峰值频率由低周向高周区域移动。0.6g 输入下各组合方案低周段曲线均包络在抗震结构 0.3g 反应谱内。2~3s 区段时,LRB+NRB+

HESLB 谱曲线包络在 LRB+NRB 传统隔震区段内,表明方案四减震效果更优。但在周期超过 1s 区段内,各组合隔震方案峰值均明显高于抗震结构,需针对核岛内卓越周期在此区段内的柔性管线加强制振设计。

表 6 顶端加速度谱峰值对比

Tab. 6 The peak acceleration spectrum peak comparison

输入地震动 (m/s <sup>2</sup> )	抗震	方案一		方案二		方案三		方案四	
		峰值 (m/s <sup>2</sup> )	比值 (%)						
0.3g	50.48	16.63	32.9	19.96	39.6	14.36	28.5	17.88	35.5
0.6g	75.46	21.69	28.8	23.78	31.5	20.05	26.6	20.78	27.6

## 5 结论

研究将橡胶支座与滑板支座串联形成高弹性滑板支座(HESLB),协同铅芯橡胶支座(LRB)、橡胶支座(NRB)构成组合隔震系统应用于核岛结构,针对某核岛进行组合隔震设计与数值分析,得到结论如下所述

(1) 进行组合隔震层力学参数与动力响应方程分析,三类组合隔震系统具备滑动前后两阶段工作状态,HESLB 与其他支座组合的隔震层具备两阶段变刚度特性;组合隔震结构平动周期与抗震结构相比均有延长,LRB+NRB+HESLB 组合方案与 LRB+NRB 传统隔震结构周期相当。

(2) 多水准地震动输入下,各组合方案加速度减小至抗震结构 40%~46%,组合隔震结构上部保持为平动;0.6 g 输入下 NRB+HESLB 组合方案隔震层位移超出滑板位移限值;LRB、HESLB 支座滞回形状稳定、滞回环饱满,LRB+NRB+HESLB 方案滑动支座滞回环明显包络 LRB+NRB 方案,表明 HESLB 支座滑动位移越大,摩擦耗能做功越多。

(3) 能量分析表明,在 LRB+NRB 传统隔震方案与 LRB+NRB+HESLB 方案隔震层位移基本相同前提下,LRB+NRB+HESLB 方案耗能明显大于 LRB+NRB 方案;组合隔震反应谱峰值均明显降低,0.6g 输入下各组合方案低周段曲线均包络在抗震结构 0.3g 反应谱内。2~3s 区段内,LRB+NRB+HESLB 谱包络在 LRB+NRB 传统隔震内,表明前者隔震效果更优。

## 参考文献(References):

[ 1 ] 毛庆,吴应喜,张健,等. 福岛核事故后中国广东核电

集团核电厂抗震设计和评估进展 [J]. 中国工程科学, 2013, 15(4):45~51.

Mao Qing, Wu Ying-xi, Zhang Jian, et al. The development on seismic design and evaluation of CGNPC after Fukushima accident [J]. Foreign Nuclear News, 2013, 15(4):45~51 (in Chinese)

- [ 2 ] CAL. Seismic base isolation for nuclear facilities [A]. Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Structure Mechanics in Reactor Technology [C]. Los Angeles: International Committee on Reactor Structural Mechanics, 1989
- [ 3 ] Formi M. Seismic isolation of nuclear power plants [A]. Proceedings of the “Italy in Japan 2011” Initiative Science, Technology and Innovation [C]. 2011
- [ 4 ] Malushte S R, Whittaker A S. Survey of past isolation application in nuclear power plants and challenges to industry/regulatory acceptance [A]. Transactions of the 18<sup>th</sup> International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology [C]. K10-7, 2011
- [ 5 ] 魏陆顺,周福霖,刘文光. 组合基础隔震在建筑工程中的应用 [J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(2): 158~163  
Wei Lu-shun, Zhou Fu-lin, Liu Wen-guang. Application of combined base isolation in construction engineering [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(2): 158~163 (in Chinese)
- [ 6 ] 谢礼立,翟长海. 核电工程应用隔震技术的可行性探讨 [J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(1): 1~10  
Xie Li-li, Zhai Chang-hai. A prospective study on applicability of base isolation in nuclear plants [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(1): 1~10 (in Chinese)
- [ 7 ] 魏陆顺,张永山,孔德睿,等. 核电结构三维隔震研究

- [J]. 华南地震,2015,35(1):37-42  
Wei Lu-shun, Zhang Yong-shan, Kong De-rui, et al. Research on 3D seismic isolation of nuclear power structure [J]. South China Journal of Seismology, 2015,35(1):37-42 (in Chinese)
- [8] 夏祖枫,李韶平,王晓雯. 近期核电厂抗震设计输入及AP1000核岛隔震的总体考虑[J]. 南方能源建设, 2017,4(3):106-115  
Xia Zu-feng, Li Shao-ping, Wang Xiao-wen, et al. General consideration for seismic input of NPP seismic design and seismic-isolated research for AP1000 nuclear island [J]. Southern Energy Construction, 2017,4(3):106-115 (in Chinese)
- [9] 刘文光,许浩,冯祎鑫,等. 多级性态隔震支座滞回模型和力学性能试验研究[J]. 振动工程学报, 2018, 31(4):582-590  
Liu Wen-guang, Xu Hao, Feng Wei-xin, et al. Mechanic properties of high performance multi-level bearing [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(4):582-590 (in Chinese)
- [10] 富腾,王兴国,张馨园,等. 任意曲面滑道变摩擦系数滚珠支座隔震体系效果分析[J]. 工程抗震与加固改  
造,2021,43(2):46-53  
Fu Teng, Wang Xing-guo, Zhang Xin-yuan, et al. Analysis of the effect of the seismic isolation system of the ball bearing with variable friction coefficient of the arbitrary curved slideway [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2021,43(2):46-53 (in Chinese)
- [11] 赖振峰,刘彦辉,张超洋. 隔震结构限位保护装置软碰撞研究[J]. 工程抗震与加固改造,2021,43(3):73-81  
Lai Zhen-feng, Liu Yan-hui, Zhang Chao-yang. Research on soft collision of limit protection device of seismic isolation structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2021,43(3):73-81 (in Chinese)
- [12] 日本建筑学会. 隔震结构设计[M]. 刘文光,译. 北京:地震出版社,2006  
Architectural Society of Japan. Recommendation for the design of base isolated building [M]. Liu Wen-guang, Translation. Beijing: Seismological Press, 2006 (in Chinese)

[作者简介] 方超(1986-),男,硕士,讲师,研究方向:工程结构安全管理与设计