

[文章编号] 1002-8412(2022)03-0130-09

DOI:10.16226/j.issn.1002-8412.2022.03.016

# 分离式三维隔震核岛动力响应与抗震性能研究

王玉静<sup>1,3</sup>,孔德睿<sup>1,3</sup>,李春<sup>2</sup>,李全华<sup>2</sup>,李运刚<sup>2</sup>(1.信阳学院 土木工程学院,河南 信阳 464000;2.信阳市建筑勘察设计研究院有限公司,河南 信阳 464000;3.信阳市装配式建筑重点实验室,河南 信阳 464000)

**[提要]** 核电是碳达峰目标下我国重要能源构成,隔震为核电厂选址拓展提供了技术支撑。研究基于分离式三维隔震核岛结构双质点简化分析模型,给出平摆耦合作用下分离式隔震核岛动力平衡方程,并分析竖向、水平隔震层刚度比对结构动力特性的影响规律。依据某核岛结构进行了分离式三维隔震设计,分别进行了传统核岛(TRA)、水平隔震核岛(HISO)、分离式三维隔震核岛(3DISO)三类结构在水平 0.3g、0.6g,竖向 0.2g、0.4g 下动力时程分析。结果表明,HISO 结构与 3DISO 结构均能有效降低核岛上部水平地震响应,在地震输入下核岛水平向加速度减震效果良好,且结构反应谱卓越周期由短周期区域向长周期区域移动。短周期区域内,3DISO 结构水平向 0.6g 作用下顶部加速度谱包络在 TRA 结构 0.3g 内,竖向 0.4g 作用下顶部加速度谱包络在 TRA 结构 0.2g 内,分离式三维隔震设计能够实现核岛三维减震目标。

**[关键词]** 三维隔震;动力响应;数值分析;抗震性能

[中图分类号] TU352 [文献标识码] A

## Research on dynamic characteristics and seismic performance of separate three-dimensional isolated nuclear island

Wang Yu-jing<sup>1,3</sup>, Kong De-rui<sup>1,3</sup>, Li Chun<sup>2</sup>, Li Quan-hua<sup>2</sup>, Li Yun-gang<sup>2</sup>(1. School of Civil Engineering , Xinyang University, Xinyang 464000, China; 2. Xinyang Architectural Survey, Design and Research Institute Co. Ltd, Xinyang 464000, China; 3. Laboratory Fabricated Building Xinyang City, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** Nuclear power is an important energy component in China under the goal of carbon peak, and seismic isolation provides technical support for the expansion of nuclear power plants. The research is based on the simplified analysis model of the double-particles of the separated three-dimensional seismic isolation nuclear island structure. The dynamic balance equation of the separated seismic isolation nuclear island under the coupling action of horizontal and pendulum is given, and the effect of the stiffness ratio of the vertical and horizontal seismic isolation layer on the structure dynamics characteristics is analyzed. Based on a certain nuclear island structure, a separate three-dimensional seismic isolation design is conducted, and the dynamic time history analyses of the three types of structures: traditional nuclear island (TRA), horizontal seismic isolation nuclear island (HISO), separated three-dimensional seismic isolation nuclear island (3DISO) were carried out at a level of 0.3g, 0.6g, vertical 0.2g, 0.4g. The results show that both the HISO structure and the 3DISO structure can effectively reduce the horizontal seismic response of the upper part of the nuclear island. Under seismic input, the nuclear island has a good horizontal acceleration and damping effect, and the remarkable period of the structure response spectrum shifts from the short-period area to the long-period area. In the short period area, the top acceleration spectrum envelope of the 3DISO structure under the action of 0.6g horizontally is within 0.3g of the TRA structure, and the top acceleration spectrum envelope under the action of 0.4g vertically is within 0.2g of the TRA structure. The separated three-dimensional seismic isolation design can achieve the goal of three-dimensional shock absorption for nuclear island.

**Keywords:** three-dimensional isolation; vertical shock absorption; numerical analysis; seismic response

E-mail:1510423135@qq.com

[收稿日期] 2021-05-07

[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(22A560016,20B560014);信阳学院校级科研项目(2021-XJLYB-008,2021-XJLYB-020)

## 1 引言

基于我国碳达峰、碳中和目标实现前提,核电稳步发展构成我国清洁能源战略的重要举措。当前时期超

Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting Jun. 2022

设计基准地震的频繁发生, 为核电厂平稳有序发展带来严峻挑战<sup>[1]</sup>。2007 年日本柏崎刈羽核电站遭受 6.8 级地震、2011 年日本福岛核电站遭受 9 级地震, 均对核电站功能与安全造成损伤<sup>[2,3]</sup>。隔震技术成为提升核电结构抗震能力保障核电安全的优选策略<sup>[4]</sup>。当前只有法国的 Cruas 和南非的 Koeberg 核电厂应用了水平隔震技术<sup>[5,6]</sup>。核电结构应用水平隔震技术提升抗震能力的同时, 仍需关注竖向地震作用下核岛内设备、管线的响应, 核电结构三维隔震技术研发成为重要研究课题<sup>[7]</sup>。核岛整体三维隔震需重点关注三向地震作用耦合下引起的摇摆问题, 而三维分离式隔震设计则能够有效限制结构摇摆<sup>[8]</sup>。2007 年, 孟庆利等<sup>[9]</sup>提出竖向半主动控制的三维隔震系统, 并进行了振动试验得到较好的三向减震结果; 2015 年, 魏陆顺等<sup>[10]</sup>设计了一种由叠层橡胶支座、螺旋弹簧、导向装置等构成的分离式三维隔震装置, 对该三维隔震装置进行两层钢框架振动试验验证, 在得到装置三向隔震有效试验结果的同时将该装置应用于新建核电站, 提出了响应预测。2018 年, 郭阳照等<sup>[11]</sup>提出 LRB-DSB 串联式三维隔震系统, 并进行效果分析, 得出了 LRB-DSB 三维隔震装置能有效弥补普通隔震装置竖向地震隔震能力不足。2019 年, 刘文光等<sup>[12]</sup>基于隔震结构平移-摇摆耦合模型建立了核电厂隔震结构运动方程, 提出支座受拉界限地震动峰值公式, 对峰值界限影响参数分析并进行了某核岛 1:10 振动试验, 得到隔震有

效降低核电厂上部结构地震响应的结论, 但在超设计地震动输入下隔震支座存在受拉风险。2021 年, 刘文光等<sup>[13,14]</sup>进一步提出一种滑动型三维隔震装置并给出承载能力参数相关性公式, 在双向加载试验条件下得出装置能够实现竖向与水平性能解耦, 并且具备较好的耗能效果, 可以应用于核电等特种结构中。

研究基于上述学者提出的理论和试验基础, 结合某三代非能动压水堆核电站核岛分离式三维隔震技术应用开展, 建立分离式三维隔震核岛双质点简化分析模型, 并探究水平、竖向隔震层刚度比对结构动力特性的影响规律。依据该核岛结构进行了分离式三维隔震设计, 分别进行了传统核岛(TRA)、水平隔震核岛(HISO)、分离式三维隔震核岛(3DISO)三类结构在水平向 0.3g、0.6g, 竖向 0.2g、0.4g 下时程分析。结果表明, HISO 结构与 3DISO 结构均能有效降低核岛上部水平地震响应, 在水平地震输入下核岛水平向减震效果良好, 且结构反应谱峰值周期由高频区域向低频区域移动。短周期区域内, 3DISO 结构水平向 0.6g 作用下顶部加速度谱包络在 TRA 结构 0.3g 内, 竖向 0.4g 作用下顶部加速度谱包络在 TRA 结构 0.2g 内, 分离式三维隔震设计能够实现核岛三维减震目标。

## 2 分离式三维隔震核岛动力响应

图 1(a) 为分离式三维隔震核岛模型示意, 从下至上依次为水平隔震层、竖向隔震层、原核岛结构。

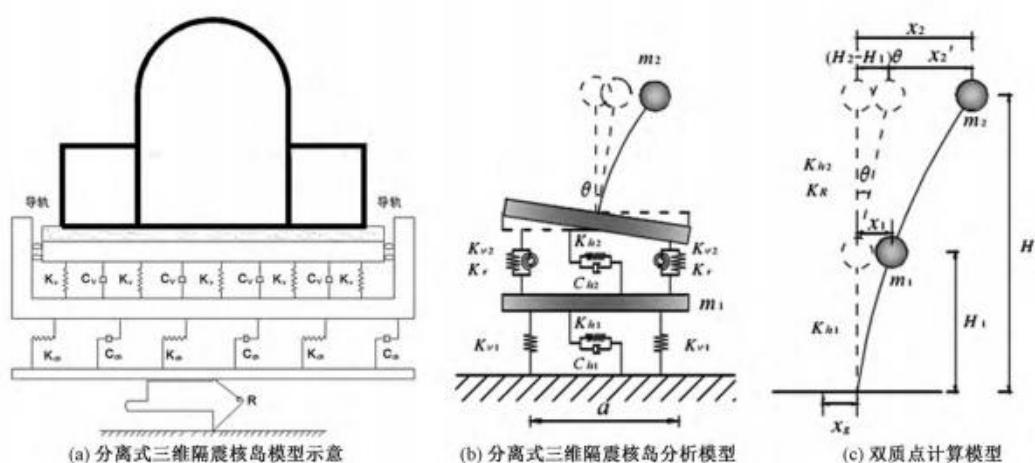


图 1 分离式三维隔震计算模型

Fig.1 The computational Model of Separated Three-dimensional Isolation

图 1(b) 所示为分离式三维隔震核岛分析模型,

图 1(c) 所示为双质点计算模型, 该模型包含 5 个自

由度。 $\ddot{x}_g$  表示水平地震动加速度, $m_1$  表示水平隔震层与竖向隔震层之间结构质量, $m_2$  表示竖向隔震层上部结构质量, $K_{h1}$ 、 $C_{h1}$  表示水平隔震层水平刚度与水平阻尼, $K_v$  表示水平隔震层竖向刚度, 分别  $K_{h2}$ 、 $C_{h2}$  表示竖向隔震层水平刚度与水平阻尼, $K_{v2}$  表示竖向隔震层竖向刚度, $K_r$  表示结构附加抗摇摆刚度, $H_1$  表示质点  $m_1$  距地面高度, $H_2$  表示质点  $m_2$  距地面高度, $\theta$  表示竖向隔震层上部结构绕隔震层中心的摇摆转角, $a$  表示结构宽度, $x_1$  表示水平隔震层水平变形, $x_2$  表示质点  $m_2$  相对于地面水平位移, $I_0$  为结构自身转动惯量, $y_1$  表示  $m_1$  相对地面竖向变形, $y_2$  表示质点  $m_2$  相对于地面竖向位移, $\ddot{x}_{gv}$  表示竖向地震动加速度, 由该模型可得:

质点  $m_2$  水平方向动力平衡方程为,

$$m_2 \ddot{x}_2 + K_{h2}x_2 - K_{h2}x_1 - (H_2 - H_1)C_{h2}\dot{\theta} + C_{h2}\dot{x}_2 - C_{h2}\dot{x}_1 - (H_2 - H_1)C_{h2}\dot{\theta} = -m_2 \ddot{x}_g \quad (1)$$

质点  $m_1$  水平方向动力平衡方程为,

$$m_1 \ddot{x}_1 + K_{h2}x_2 + (K_{h1} + K_{h2})x_1 + (H_2 - H_1)K_{h2}\theta - [M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K](U) = -[M]\{\ddot{X}\} \quad (6)$$

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} x_2 \\ x_1 \\ \theta \\ y_2 \end{Bmatrix}, \{X_g\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{x}_g \\ \theta \\ \ddot{x}_{gv} \end{Bmatrix}, \{M\} = \begin{Bmatrix} m_2 \\ m_1 \\ I_0 \\ m_2 \end{Bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{h2} & -C_{h2} & - (H_2 - H_1)C_{h2} & 0 & 0 \\ -C_{h2} & C_{h2} + C_{h1} & C_{h2}(H_2 - H_1) & 0 & 0 \\ -C_{h2}(H_2 - H_1) & C_{h2}(H_2 - H_1) & C_R + C_{h2}(H_2 - H_1)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2C_{v2} & -2C_{v2} \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{h2} & -K_{h2} & - (H_2 - H_1)K_{h2} & 0 & 0 \\ -K_{h2} & K_{h2} + K_{h1} & K_{h2}(H_2 - H_1) & 0 & 0 \\ -K_{h2}(H_2 - H_1) & K_{h2}(H_2 - H_1) & K_R + K_{h2}(H_2 - H_1)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2K_{v2} & -2K_{v2} \end{bmatrix}$$

其中  $K_R = \frac{a^2}{2}K_v + 2K_r$ , 为竖向隔震层总抗摆刚度。

图 2 表明当结构附加抗摆刚度  $K_r$  一定时, 分离式隔震核岛竖向隔震层抗摆刚度随着  $K_v$  增大呈指

$$\begin{bmatrix} K_{h2} - m_2\omega^2 & -K_{h2} & - (H_2 - H_1)K_{h2} & 0 & 0 \\ -K_{h2} & K_{h1} + K_{h2} - m_1\omega^2 & (H_2 - H_1)K_{h2} & 0 & 0 \\ -(H_2 - H_1)K_{h2} & (H_2 - H_1)K_{h2} & K_R + K_{h2}(H_2 - H_1) - I_0\omega^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2K_{v2} - m_2\omega^2 & -2K_{v2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting Jun. 2022

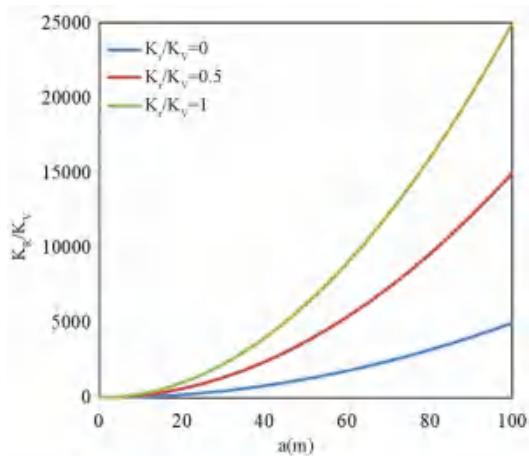


图2 坚向隔震层抗摆刚度影响参数分析

Fig.2 The analysis of influencing parameters of swing stiffness of vertical isolation layer

可见,分离式隔震计算模型中水平、坚向平衡方程仅与相应的隔震层参数相关,水平与坚向振动实现解耦。

式(7)存在非零解时,可推导得其振动频率为:

$$\frac{\omega^2}{\omega_h^2} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \left( \frac{\omega_R}{\omega_{h1}} \right)^2 + \frac{m_2(H_2 - H_1)}{I_0} \right\} + \sqrt{\left\{ \frac{1}{2} \left( 1 + \left( \frac{\omega_R}{\omega_{h1}} \right)^2 + \frac{m_2(H_2 - H_1)}{I_0} \right) \right\}^2 - \left( \frac{\omega_R}{\omega_{h1}} \right)^2}$$
(8)

由图3可见,分离式隔震核岛振动特性与高宽比 $H/a$ 、坚向隔震层抗摆刚度与水平隔震层刚度 $K_R/K_h$ 的比值相关,高宽比 $H/a$ 处于3~5时,当 $K_R/K_h$ 在1~100之间结构第一振型为平摆,当 $K_R/K_h$ 在100~1000之间结构第一振型为平摆耦联,当 $K_R/K_h > 1000$ 时结构第一振型为平动。

### 3 某核岛分离式三维隔震设计

#### 3.1 核岛数值模型

某核岛厂房为C-I类结构,安全壳高72m,总容积为 $1.58 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,长宽为78m×50m,总质量 $12.8 \times 10^4 \text{ t}$ 。未考虑顶部PCS水箱与结构动力耦合前提下,分别建立其传统(TRA)、水平隔震(HISO)、分离式三维隔震(3DISO)动力计算模型,简化模型中上部核岛采用集中质量杆模型,隔震层采用群支座模型,具体模型信息如图4所示。

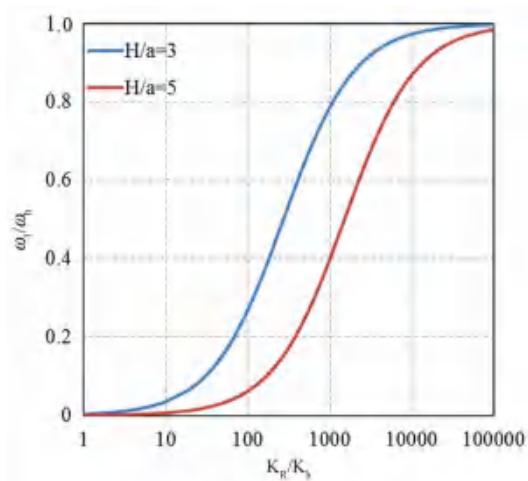


图3 分离式隔震结构振动特性影响参数分析

Fig.3 The analysis of influencing parameters of vibration characteristics of separate isolated structures

#### 3.2 水平、坚向隔震层设计

水平隔震层采用112个LRB铅芯橡胶支座、188个NRB普通橡胶支座组合构成,绕核岛底部呈环形布设(见图4)。坚向隔震层采用300个钢弹簧配合限位滑动导轨组合构成。水平隔震层总刚度为LRB、NRB水平刚度总和,当忽略滑动导轨摩擦效应时,坚向刚度可认为与钢弹簧刚度等效。设计要求水平隔震支座压应力不应超过10 MPa,且不宜产生拉应力,若局部产生拉应力则不超过1 MPa。坚向钢弹簧设计要求满足上部结构承载力且变形需控制在单个弹簧有效变形幅度内。隔震支座力学参数如表1、表2所示。

#### 3.3 地震波输入

目前多数核电站建设场址SSE水平与坚向抗震设防基准在0.2g以内,考虑近期超设计基准地震频发及目标核电厂标准设计要求,按照RG1.6标准谱标定输入地震动SSE设计水准为水平向0.3g、坚向0.2g。结合目标核电厂动力时程输入规定,采用单组时程方式进行输入,该时程包含水平2个、坚向1个共3个分量,彼此间独立统计、且彼此正交。图5所示为地震波时程及反应谱对比,该地震波持时共20s,强震持时8s大于规定6s要求,与RG1.6标准反应谱进行对比分析,时程谱高频区域内均包络RG1.6谱,故所选时程满足设计要求。

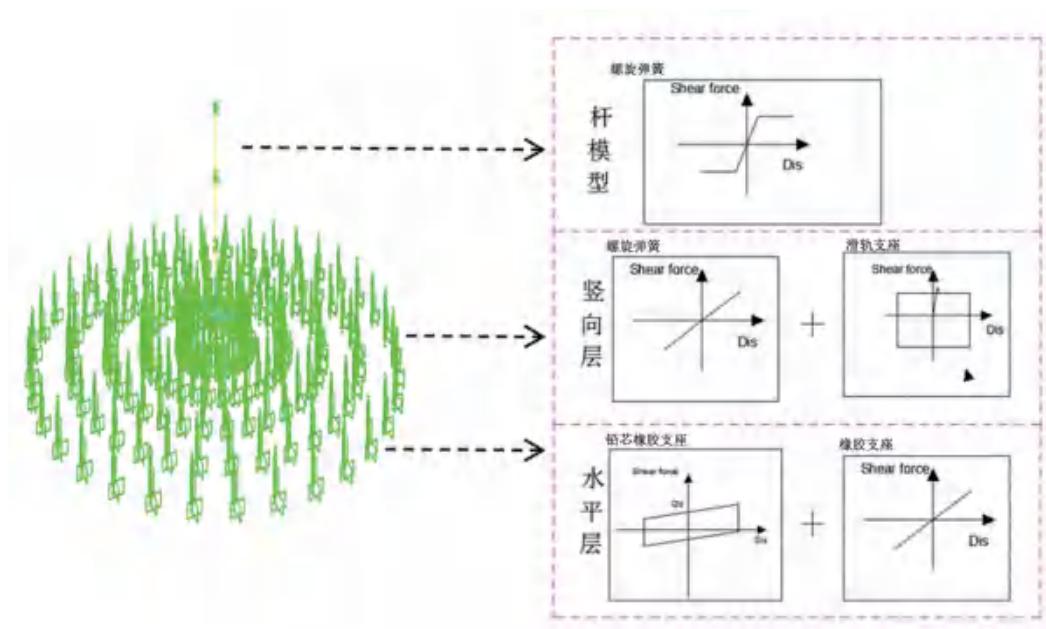


图 4 数值分析模型

Fig.4 The analysis model of finite element

表 1 水平隔震支座力学参数

Tab.1 The Mechanical parameters of horizontal isolation bearing

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)	
NRB1200	1400	220	—	—	2687	—
LRB1300	1500	280	13110	6767	2580	465

表 2 坚向隔震支座力学参数

Tab.2 The mechanical parameters of vertical isolation bearing

项目	有效直径 (mm)	变形幅度 (mm)	弹簧总高度 (mm)	坚向刚度 (kN/m)	个数
钢弹簧	2200	±1500	1500	3500	300

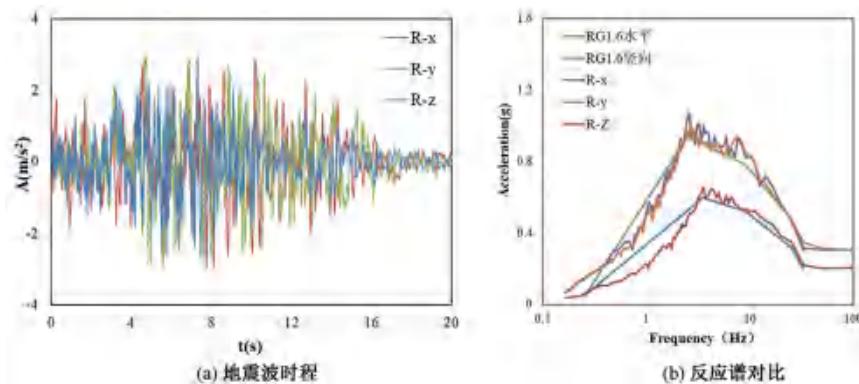


图 5 输入地震动时程分析

Fig.5 The input seismic time history analysis

## 4 隔震性能分析

### 4.1 模态分析

表3所示为传统核岛(TRA)、水平隔震岛(HISO)、分离式三维隔震核岛(3DISO)结构振动特性对比,可见HISO、3DISO结构较TRA结构水平向平动周期分别延长8.5倍、8.6倍,表明水平隔震层能够有

效延长核岛水平振动周期。HISO结构与TRA结构竖向平动周期保持一致,而3DISO结构则将竖向周期延长11倍,表明分离式竖向隔震层的设置同样能够有效延长竖向振动周期。3DISO结构水平平动周期与HISO结构水平平动周期仅相差2.8%,表明3DISO结构水平、竖向振动特性无明显耦合。

表3 模态信息

Tab.3 The information of modal

项目 方向	TRA 周期(s)	阶数	HISO 周期(s)	阶数	3DISO 周期(s)	阶数
X向 平动	0.223	1	1.865	1	1.911	1
Y向 平动	0.223	2	1.865	2	1.911	2
Z向 平动	0.090	6	0.096	5	1.004	3

### 4.2 隔震效果分析

图6所示为三类结构在地震波作用下顶层加速度时程曲线。水平方向,HISO、3DISO结构较TRA结构加速度峰值均有显著减小,0.3g地震输入下X向减震率为46%、Y向减震率为38%,0.6g地震输入下X向减震率为45%、Y向减震率为36%,隔震效果明显。竖直方向,HISO结构与TRA结构加速度峰值基本持平,3DISO结构较TRA结构加速度响应有减小,0.2g地震输入下Z向减震率为35%,0.4g地震输入下Z向减震率为38%。表明分离式三向隔震层的设置在水平、竖向均有效降低加速度响应。

图7所示为三类结构各测点在地震波作用下层加速度峰值响应对比。水平地震波输入下HISO、3DISO结构上部核岛各点水平加速度相近,处于水平平动状态。而竖向作用下仅3DISO结构上部核岛各点竖向加速度相近,竖向隔震层上部核岛处于竖向平动。图8所示为三类结构在地震波作用下的最大层相对位移包络图,可见核岛随着高度增加变形均有增大趋势。0.3g地震输入下X向隔震层最大位移在70~78mm范围内、Y向隔震层最大位移80~90mm范围内,0.6g地震输入下X向隔震层最大位移在600~625mm范围内、Y向隔震层最大位移570~595mm范围内。竖直方向,HISO结构与TRA结构层相对位移趋同,而3DISO结构竖向相对位移集中在竖向隔震层,0.2g地震输入下Z向隔震层最

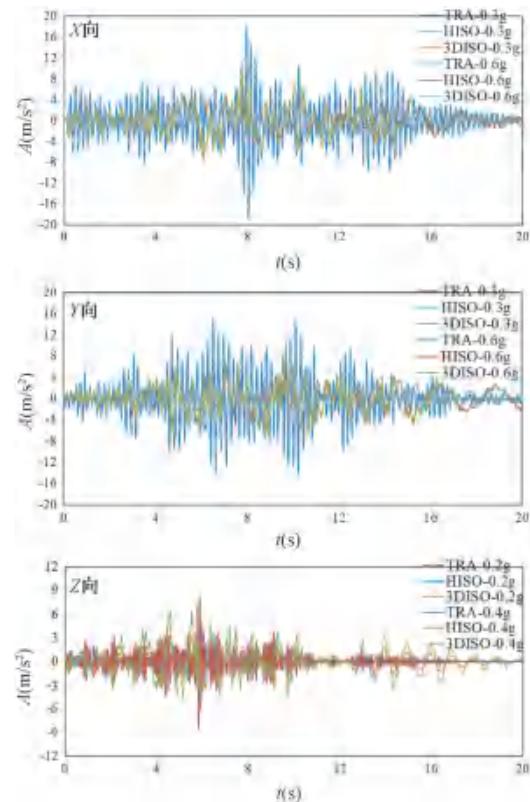


图6 顶层加速度响应曲线  
Fig.6 Top layer acceleration response curves

大位移为55mm,0.4g地震输入下Z向隔震层最大位移为110mm。

表4所示为三类结构在地震波输入下核岛内部

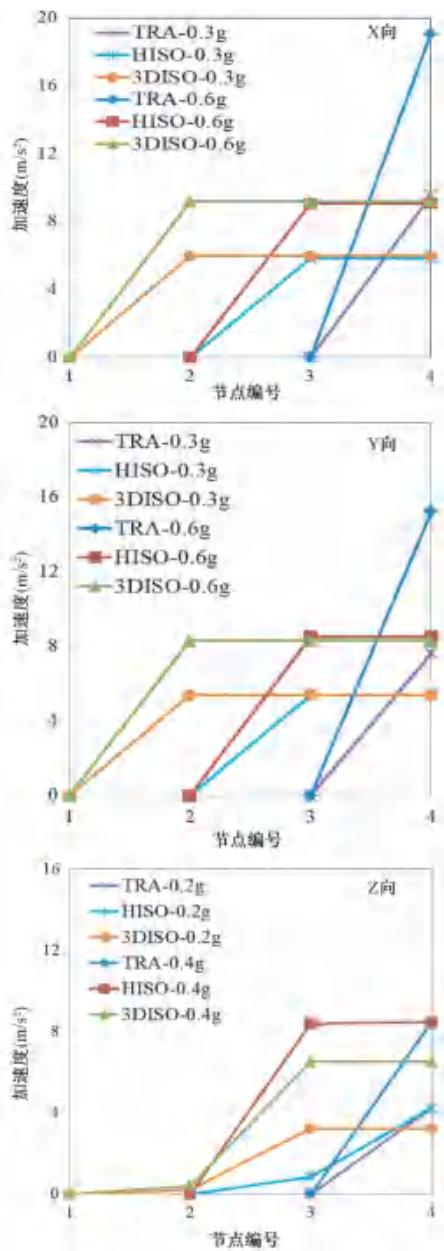


图 7 各测点加速度包络图

Fig.7 Acceleration envelope diagrams of each measuring point

剪力峰值对比。水平方向,0.3g 地震输入下  $X$  向、 $Y$  向平均减震率为 60%,0.6g 地震输入下  $X$  向、 $Y$  向平均减震率为 73%。竖直方向,HISO 结构与 TRA 结构轴力基本持平,3DISO 结构较 TRA 结构轴力有所减小,0.2g 地震输入下  $Z$  向减震率为 50%,0.4g 地震输入下  $Z$  向减震率为 57%。

图 9 所示为各工况下顶层加速度反应谱对比。结果显示,水平方向 HISO、3DISO 结构顶层加速度

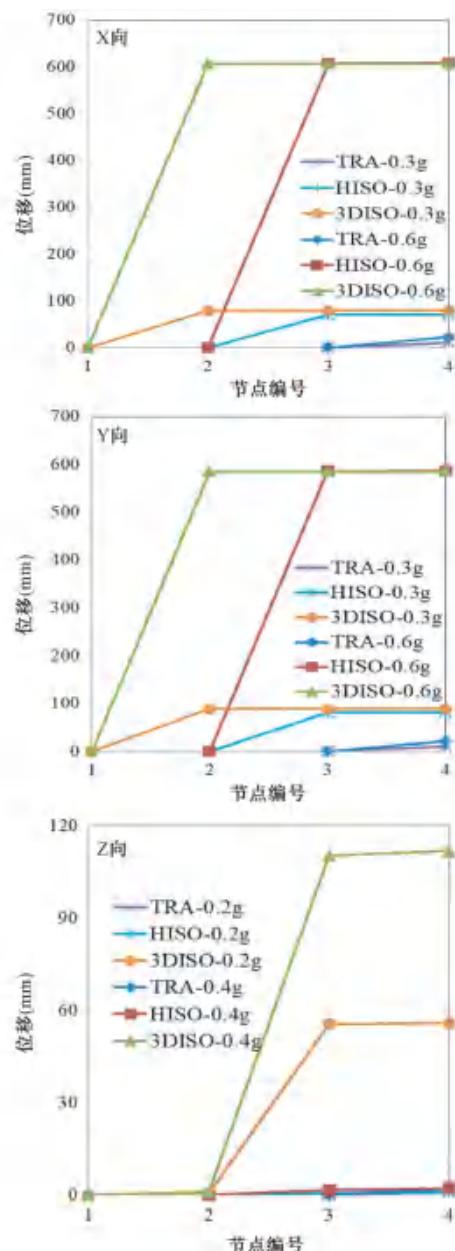


图 8 各测点相对位移包络图

Fig.8 Envelope diagrams of relative displacement of each measuring point

反应谱卓越频率由 4.5Hz 向 1.4Hz、0.4Hz 移动。加速度谱峰值 0.3g 输入下降幅度在 30%~52%、0.6g 输入下降幅度在 42%~56%, 水平向减震效果明显,但在低于 2Hz 区域内 HISO、3DISO 加速度谱较 TRA 加速度谱呈现放大趋势。竖直方向表现为由 11Hz 向 1Hz 移动,能够避开核岛内主设备卓越频率 4~6Hz。高频区域内 3DISO、HISO 水平向 0.6g 反应谱包络在 TRA 0.3g 内,3DISO 竖向 0.4g

表4 核岛内部剪力峰值

Tab.4 The peak internal shear force of nuclear island

剪力 (kN)	TRA		HISO		3DISO	
	0.3g	0.6g	0.3g	0.6g	0.3g	0.6g
X向	1178813	2357626	409436	465875	422420	466051
Y向	1086695	2173390	419732	449651	433401	450923
Z向	657490	1314980	657475	1314960	280573	561146

反应谱同样包络在 TRA0.2g 区域内,但仍需重点关注内部长周期段管线的制震与加强。

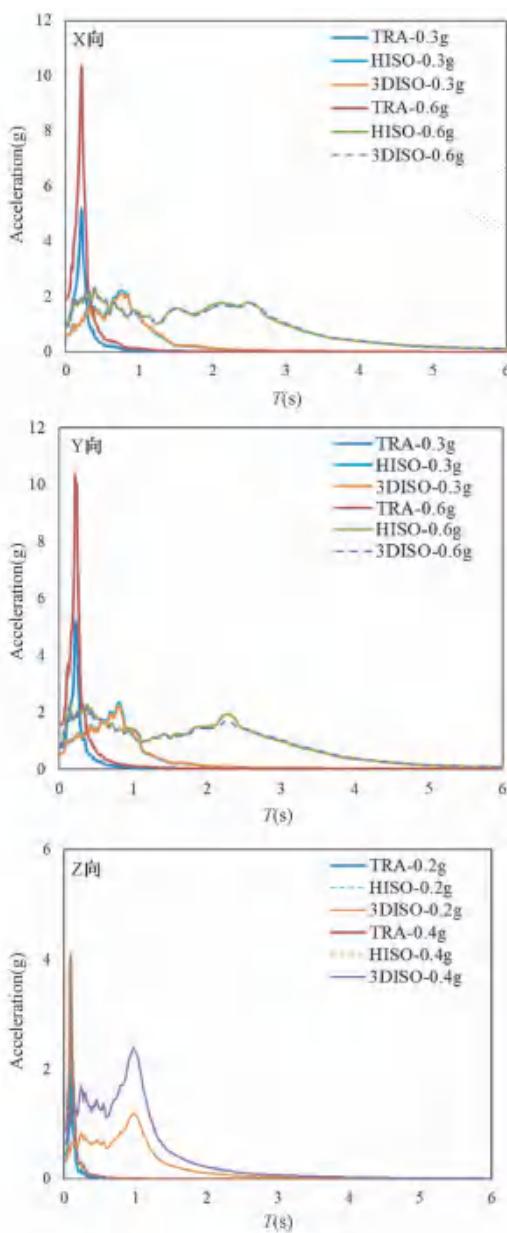


图9 顶层楼层反应谱

Fig.9 The response spectrum of top floor

## 5 结论

研究结合某三代非能动核电站核岛结构分离式三维隔震设计展开,建立核岛结构双质点简化分析模型,确定平摆耦合作用下核岛动力平衡方程,研究不同参数对结构动力影响规律,并进行时程波输入分析,得到结论如下:

(1)通过对核岛简化双质点模型动力特性分析可得,分离式三维隔震核岛振动特性与竖向隔震层抗摆刚度与水平隔震层刚度  $K_R/K_h$  的比值相关性较明显,高宽比  $H/a$  处于 3~5 时,当  $K_R/K_h$  在 1~100 范围时结构第一振型为平摆,当  $K_R/K_h$  在 100~1000 之间结构第一振型为平摆耦联,当  $K_R/K_h > 1000$  时结构第一振型为平动。竖向隔震层抗摆刚度  $K_R$ 、竖向隔震效果与竖向隔震层刚度  $K_v$  相关性较大;

(2)在前述理论分析基础上,进行了目标核岛结构分离式三维隔震设计并进行动力时程分析。结果显示 HISO、3DISO 结构较 TRA 结构水平向平动周期分别延长 8.5 倍、8.6 倍,3DISO 结构竖向周期较 TRA 结构延长 11 倍。3DISO 结构水平平动周期与 HISO 结构水平平动周期仅相差 2.8%,表明 3DISO 结构水平、竖向振动特性无明显耦合;水平 0.6g、竖向 0.4 g 地震输入下,3DISO 结构顶层加速度峰值水平向减震率平均为 40%、竖向减震率平均为 38%,上部核岛剪力减震率平均为 70%、竖向减震率平均为 57%,减震效果良好;3DISO 结构上部核岛表现为水平、竖向平动,无明显耦合现象;

(3)3DISO 结构顶层加速度反应谱卓越频率水平向由 4.5Hz 向 0.4Hz 移动、竖向由 11Hz 向 1Hz 移动,水平 0.6g 输入加速度谱峰值下降幅度在 42%~56%,但在低于 2Hz 区域内 HISO、3DISO 加速度谱较 TRA 加速度谱呈现放大趋势。竖向表现为由 11Hz 向 1Hz 移动,能够避开核岛内主设备卓越频率 4~6Hz。3DISO 水平向 0.6g 反应谱包络在 TRA0.3g 内,竖向 0.4g 反应谱包络在 TRA0.2g 内,

表明三向隔震有效的同时仍需关注内部长周期段设备的制震加强。下阶段仍需对隔震核岛专用特种支座展开研究。

#### 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]. Engineering Science, 2013, 15(4):45-51 (in Chinese)
- [ 2 ] 気象庁(日本). 2007年7月16日1013分ころ新潟県上中越で発生した地震について(報道発表資料)[N]. 新潟県灾害対策本部, 2007-12-14  
Japan Meteorological Agency (Japan). July 16, 2007 early for the earthquake that occurred on in the Chuetsu new prefecture (press release) [N]. Niigata Prefecture Disaster Countermeasures Headquarters, 2007-12-14
- [ 3 ] メルトダウン」という悪夢--ドキュメント原発神話崩壊(緊急特集3? 11日本最大の試練.Nikkei business (1583)[N]. 日経BP社, 2011-04-25  
Nikkei business (1583). Nightmare that meltdown, Document primary mythology collapse (emergency Feature 3. 11Japan's largest test) [N]. Nikkei BP Inc., 2011-04-25
- [ 4 ] 日本建築学会. 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)
- [ 5 ] Malusht S R, Whittaker A S. Survey of past isolation applications in nuclear power plants and challenges to industry/regulatory acceptance [C]//Transactions of the 18th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 18), K10-7, 2005
- [ 6 ] Forni M. Seismic isolation of nuclear power plants[C]//Proceedings of the "Italy in Japan 2011" Initiative Science, Technology and Innovation, 2011
- [ 7 ] 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 Xiong-wen, et al.
- [ 8 ] 王江来,赵钦,梁琛,等.新型分离式隔震装置理论分析与试验研究[J].工程抗震与加固改造, 2021, 43(1):86-92  
Wang Jiang-lai, Zhao Qin, Liang Shen, et al. Theoretical analysis and experimental study of a new type of separation isolation device [J]. Engineering Seismic Resistance and Reinforcement [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2021, 43(1):86-92 (in Chinese)
- [ 9 ] 孟庆利,林德全,张敏政. 三维隔震系统振动台实验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007(3):116-120  
Meng Qing-li, Lin De-quan, Zhang Min-zheng. The 3D isolation system experiment [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007 (3): 116-120 (in Chinese)
- [ 10 ] 魏陆顺,刘雷斐,梁欢文. 三维隔震振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 42(3):33-38  
Wei Lu-shun, Liu Lei-fei, Liang Huan-wen. Experimental study on three-dimensional seismic isolation [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 42 (3): 33-38 (in Chinese)
- [ 11 ] 郭阳照,潘毅,吴体,等. LRB-DSB 三维隔震系统的隔震效果分析[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(6): 1195-1204  
Guo Yang-zhao, Pan Yi, Wu Ti, et al. Analysis of LRB-DSB three dimensional isolation system's isolating effect [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(6): 1195-1204 (in Chinese)
- [ 12 ] 刘文光,程颖,李韶平,等.核电厂隔震支座的受拉临界理论与结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(14):153-160  
Liu Wen-guang, Cheng Ying, Li Shao-ping, et al. Theoretical analysis of bearings in tension and shaking table tests on a base-isolated nuclear power plant structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(14):153-160 (in Chinese)
- [ 13 ] 刘文光,梅晓晨,许浩,等.滑动型三维隔震装置双向加载试验及力学性能相关性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(2):49-56

(下转第 148 页)

- performance of prefabricated assembled pier with grouted sleeve and prestressed reinforcements [ J ]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18 ( 2 ) : 42–52 (in Chinese)
- [ 10 ] 葛继平,夏樟华,江恒.灌浆波纹管装配式桥墩双向拟静力试验 [ J ]. 中国公路学报, 2018, 31 ( 12 ) : 221–230, 266.  
Ge Ji-ping, Xia Zhang-hua, Jiang Heng. Biaxial quasi-static experiment of precast segmental bridge piers with grouting corrugated pipe connection [ J ]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31 ( 12 ) : 221–230, 266 (in Chinese)
- [ 11 ] 张弦波.PET 材料在实际工程应用中的经济性研究 [ J ].山东工业技术,2017,36(8):130,138  
Zhang Xian-bo. Economic research of PET material in practical engineering application [ J ]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2017, 36 ( 8 ) : 130, 138 (in Chinese)
- [ 12 ] Bai, Y.L., Dai, J.G., Teng, J.G.. Monotonic stress-strain behavior of steel rebars embedded in FRP-confined concrete including buckling [ J ]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21 ( 5 ) : 04017043. 1–04017043. 11
- [ 13 ] 张闯,张大伟,赵羽习,等.PET 纤维布加固锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能试验研究 [ J ].建筑结构学报, 2015,36( 增刊 2 ):209–215  
Zhang Chuang, Zhang Da-wei, Zhao Yu-xi, et al. Experimental study on seismic behavior of corroded reinforced concrete column wrapped with PET sheet [ J ]. Journal of Building Structures, 2015, 36 ( S2 ) : 209–215 (in Chinese)
- [ 14 ] 李伟鹏,石明强,杜思远.桥梁抗震设计中地震波的合理选取 [ J ].交通科技,2011,37(4): 5–7.  
Li Wei-peng, Shi Ming-qiang, Du Si-yuan. Reasonable selection of seismic wave in bridge seismic design [ J ]. Transportation Science and Technology, 2011, 37 ( 4 ) : 5–7 (in Chinese)
- [ 12 ] Bai, Y.L., Dai, J.G., Teng, J.G.. Monotonic stress-strain

[ 作者简介 ] 王鹏程(1996-),男,河北张家口,硕士,研究方向为桥梁抗震

(上接第 138 页)

Liu Wen-guang, Mei Xiao-chen, Xu Hao, et al. Two-way loading test of sliding three-dimensional seismic isolation device and correlation analysis of mechanical properties [ J ]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40 ( 2 ) : 49–56 ( in Chinese )

[ 14 ] Liu Wen-guang, Tian Kun, Wei Lu-shun, et al. Earthquake response and isolation effect analysis for separation type three-dimensional isolated structure [ J ]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, ( 7 ) : 5–35

[ 作者简介 ] 王玉静(1990-),女,汉,硕士,讲师,研究方向为工程结构分析与减隔震控制