

隔震核岛启动控制设计与动力性能研究

方超^{1,4}, 孔德睿^{1,4}, 魏陆顺², 李春³, 李运刚³ (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)

[摘要] 隔震能够降低核岛受震损伤概率, 低烈度地震下隔震装置的频繁启动不能发挥核岛原有抗震裕度。研究提出在隔震层中加设启动控制装置设计方案, 使隔震层具备多级隔震性态以满足核岛多重抗震需求。首先, 结合启动控制隔震设计理念对隔震层力学参数进行分析; 其次, 给出单质点启动控制隔震模型动力方程, 并对谐振下位移响应规律进行讨论; 最后, 进行某核岛启动控制隔震设计与数值分析。结果表明, 启动控制隔震方案具备多级刚度特性, 0.2g 地震下能够发挥原核岛抗震能力, 0.6g 地震下具备与传统隔震相当的减震能力。

[关键词] 隔震核岛; 启动控制; 数值分析; 抗震性能

[中图分类号] TU317 **[文献标识码]** A

Research on start-up control design and dynamic performance of isolated nuclear island

Fang Chao^{1,4}, Kong De-rui^{1,4}, Wei Lu-shun², Li Chun³, Li Yun-gang³ (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 Xinyang City, Xinyang 464000, China)

Abstract: Seismic isolation can reduce the probability of earthquake damage to the nuclear island, and frequent activation of seismic isolation devices under low-intensity earthquakes cannot give full play to the original seismic tolerance of the nuclear island. The design plan for adding a start-up control device to the seismic isolation layer is put forward, so that the seismic isolation layer has a multi-level isolation state to meet the multiple seismic requirements of the nuclear island. First, the mechanical parameters of the isolation layer are analyzed based on the design concept of start-up control isolation; secondly, the dynamic equation of the single-particle start-up control isolation model is given, and the displacement response law under resonance is discussed. Finally, the start-up control seismic isolation design and numerical analysis of a certain nuclear island are carried out. The results show that the start-up control seismic isolation scheme has multi-level stiffness characteristics. It can exert the anti-seismic capacity of the original nuclear island under 0.2g earthquake, and has a shock absorption capacity equivalent to traditional isolation under 0.6g earthquake.

Keywords: isolation of the nuclear island; start control; numerical analysis; seismic response

E-mail: 378700611@qq.com

随着华龙一号等重大核电项目的稳步推进, 核电能源已成为实现碳排放“3060”目标的重要支撑。核电结构必须具备足够的抗震裕度以适应严峻的地震形势^[1]。2011 年日本福岛大地震导致福岛核电

站大量核废水泄露^[2]。隔震技术利用以柔克刚的方式隔离地震作用, 降低结构受震损伤概率^[3]。隔震技术在民用建筑领域已取得较多应用, 而在核电领域则应用较少^[4,5]。2012 年, 谢礼立等^[6]对核电工程应用隔震技术的可行性进行了探讨, 并从标准化与适用性设计等方面给出建议; 2015 年, 孔德睿等^[7]针对 AP1000 核岛结构设计了 1:80 隔震试验模型并试验, 结果表明隔震能够实现该堆型水平设

[收稿日期] 2021-08-05

[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(2022-XJLYB-015)

计地震翻倍目标;同年,魏陆顺等^[8]设计了一种由叠层橡胶支座、螺旋弹簧、导向装置构成的三维隔震装置,进行两层钢框架振动试验验证得到装置三向隔震有效,同时将该装置应用于新建核电站响应进行了预测。2017年,夏祖枫等^[9]在考虑核电抗震设计输入整体提升的趋势下,为充分利用 AP1000 核电厂原有抗震裕度提出了核电站整体基底隔震的设计构思;2019年,刘文光等^[10]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,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结论,但需控制超设计地震下隔震支座受拉超限现象。关注隔震技术提升核电抗震安全的同时,如何充分发挥原核岛抗震裕度并降低大震下隔震层位移响应也成为研究重点之一。2013年上海核工院对 AP1000 核岛抗震能力进行分析,得出该机组高置信度低失效概率裕度值基本满足 0.5g 水平^[11];2018年,刘文光等^[12]设计开发一种新型高性能多级性态支座并进行试验,结果显示该支座具备良好的多线性变刚度特点;2021年,赖振锋等^[13]针对隔震结构进行了设置柔性限位防护装置的计算分析,结果表明防护装置能够有效降低隔震层水平位移。

基于上述研究理论和试验基础,提出一种在传统隔震层中添加启动控制装置设计方案,使隔震层具备多级隔震性态以满足核岛多水准抗震需求。首先,结合启动控制隔震设计理念对不同烈度下隔震层力学参数进行分析;其次,基于单质点启动控制隔震模型给出动力响应方程,并对谐振下结构位移响应规律进行讨论;最后,依据某三代核岛结构进行启动控制隔震设计与数值分析。结果表明,启动控制隔震设计方案具备多级刚度特性,小震下发挥原核岛抗震裕度,大震下具备与传统隔震相当的减震能力。

1 启动控制隔震设计理念

图 1 为启动控制隔震核岛示意,从上至下依次为核岛结构、隔震层、基础,橡胶支座(NRB)、铅芯橡胶支座(LRB)、启动控制装置(LSD)共同构成隔震层,LSD 装置拟采用现有的 SMA 材料或预压弹簧构件组成。

传统隔震方案输入地震动在 0.05g~0.1g 时隔震装置即启动,不能够有效发挥原核岛自身抗震裕度。小震下隔震层产生的位移存在导致地下管道破

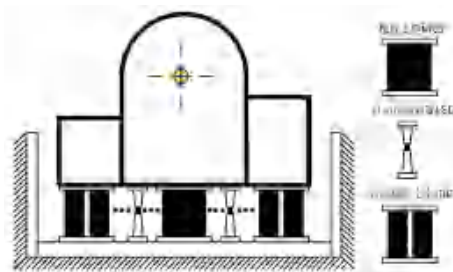


图 1 启动控制隔震核岛设计原理示意

Fig. 1 The Schematic diagram of the design principle of start-up control seismic isolation nuclear

断引起停堆的风险。研究设想在原隔震层内配备适量的启动控制装置(LSD),通过启动控制装置的初始、屈服工作状态变换[见图 2(a)],使隔震层具备较大的启动力,当地震作用小于启动控制装置的启动力时,隔震层不产生或仅产生小位移,此时核岛处于抗震结构状态,当输入地震力超过启动控制装置的启动力时,核岛进入隔震体系状态。

1.1 隔震层水平刚度

水平地震下,启动控制隔震层水平恢复力包含橡胶支座(NRB)的弹性力 F_{NRB} ,铅芯橡胶支座(LRB)的回复力 F_{LRB} ,启动控制装置(LSD)的回复力 F_{LSD} 。隔震层总水平位移记为 δ ,启动控制装置屈服力 Q_{LSD} 对应的位移记为 δ_1 。当地震水平剪力小于铅芯橡胶支座屈服力 Q_{LRB} ,隔震层未发生水平变形;地震水平剪力超过铅芯橡胶支座屈服力 Q_{LRB} 时,铅芯橡胶支座屈服,隔震层开始产生变形;当 $\delta < \delta_1$ 即水平剪力小于 Q_{LSD} 时,隔震层处于第一阶段工作状态,在此区段内隔震层水平刚度较大,限制小震下隔震层位移;随着水平剪力超过 Q_{LSD} 时水平变形增加 $\delta > \delta_1$,启动控制装置屈服刚度退化,隔震层进入第二阶段工作状态。

当隔震层水平剪力 $V > Q_{LRB}$ 时铅芯屈服启动控制装置投入工作,当隔震层水平位移 $\delta \leq \delta_1$ 时,隔震层处于第一工作阶段,此时水平剪力如式(1)所示。

$$V = F_{LSD1} + F_{LRB} + F_{NRB} \quad (1)$$

对应隔震层水平刚度如式(2)所示。

$$K_1 = k_{LSD1} + k_{LRB} + k_{NRB} \quad (2)$$

当隔震层水平位移 $\delta > \delta_1$ 时,隔震层进入第二工作状态,此时水平剪力如式(3)所示。

$$V = F_{LSD2} + F_{LRB} + F_{NRB} \quad (3)$$

对应隔震层水平刚度如式(4)所示。

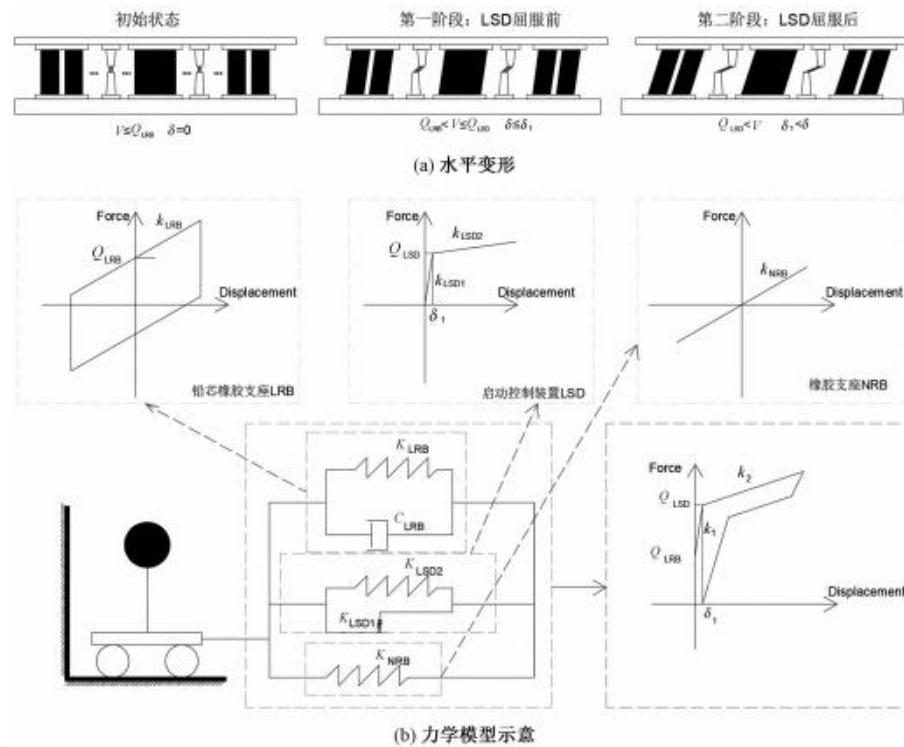


图 2 启动控制隔震层水平刚度特性

Fig. 2 The horizontal stiffness characteristics of the start-up control seismic isolation layer

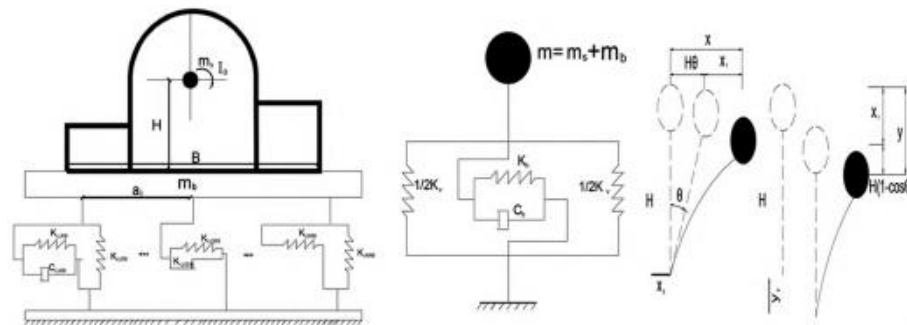


图 3 单质点计算模型

Fig. 3 The calculation model of single isolation mass

$$K_2 = k_{LSD2} + k_{LRB} + k_{NRB} \quad (4)$$

1.2 隔震层竖向刚度

启动控制装置(LSD)变形超过 δ_1 时,设计需求其表现为理想弹塑性特性,不承担竖向荷载。故隔震层整体竖向刚度可视为铅芯橡胶支座竖向刚度 K_{VLRB} 、橡胶支座 K_{VNRB} 。其压缩刚度如式(5)所示。

$$K_V = K_{VLRB} + K_{VNRB} = \frac{E_{LRB} \times A_{LRB}}{T_{RLRB}} + \frac{E_{NRB} \times A_{NRB}}{T_{RNRB}} \quad (5)$$

式中: E_{LRB} 、 E_{NRB} 分别为铅芯橡胶支座、橡胶支座橡

胶修正弹性模量; A_{LRB} 、 A_{NRB} 分别为铅芯橡胶支座、橡胶支座有效承载面积; T_{RLRB} 、 T_{RNRB} 分别为铅芯橡胶支座、橡胶支座橡胶层总厚度。

文献[14]表明橡胶支座拉伸刚度较压缩刚度呈现明显的退化特性,正常使用状态隔震支座拉伸刚度约为压缩刚度的 1/5~1/10,参考选用支座的生产参数取 1/8,即隔震层拉伸刚度 K_{Vt} 如式(6)所示。

$$K_{Vt} = \frac{1}{8} (K_{VLRB} + K_{VNRB}) \quad (6)$$

1.3 隔震层抗摆刚度

当隔震层发生微小转动时,由水平地震力产生的倾覆力矩与隔震层抗倾覆力矩处于平衡状态(见图3)。可计算隔震层转动刚度 K_R 如式(7)所示。

$$K_R = \sum_{i=1}^n k_{vi} \left(\frac{n+1-2i}{n-1} \right)^2 a_i^2 \quad (7)$$

式中: a_i 为第*i*排隔震支座距质心的距离; K_{vi} 为第*i*排隔震支座的竖向刚度; n 为隔震支座总排数。

2 启动控制单质点隔震核岛动力方程

图3所示为单质点启动控制隔震核岛平面分析模型,核岛结构上部刚度远大于隔震层,可视为刚体。忽略隔震层扭转,仅考虑平面内的平移-平摆耦合运动。

m_s 表示核岛质量, m_b 表示隔震层质量, m 为两者之和。 K_h 、 C_h 表示隔震层水平刚度、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, I_0 表示转动惯量, a_i 为第*i*排隔震支座距中心的距离。 \ddot{X}_g 、 \ddot{Y}_g 表示水平、竖向地震动加速度, X 、 Y 分别表示总位移, x_1 、 y_1 分别表示平动位移, θ 表示结构绕隔震层中心的转角。则启动控制单质点隔震体系的运动方程可表示为:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M]\{\ddot{U}_g\} \quad (8)$$

其中,

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ \theta \end{Bmatrix}, \{\ddot{U}_g\} = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g + g \\ 0 \end{Bmatrix}, \{M\} = \begin{Bmatrix} m \\ m \\ I_0 \end{Bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_h & 0 & -C_h H \\ 0 & 0 & 0 \\ -C_h H & 0 & C_h H^2 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_h & 0 & -HK_h \\ 0 & K_v & BK_v \\ -HK_h & BK_v & \frac{B^2}{4} K_v \end{bmatrix}$$

参考文献[15]定义 $r = \frac{B\theta}{2\delta_0}$ 为转角系数,其中 δ_0

$= \frac{G}{K_v}$ 为结构竖向静位移。图4为转角系数与平动位移比值曲线,可见摆动转角 θ 随着竖向刚度 K_v 的减小呈放大趋势,表明隔震支座竖向刚度均匀对称布设时可有效避免摆动产生。

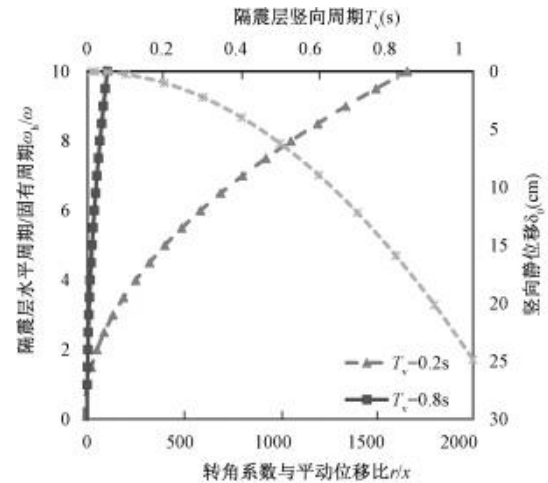


图4 竖向转角影响参数分析

Fig. 4 The analysis of influence parameters of vertical rotation angle

假设隔震层支座竖向刚度均匀不产生扭转,仅水平向地震下动力方程如式(9)所示。

$$m\ddot{x} + c_h\dot{x} + k_h x = -m\ddot{x}_g \quad (9)$$

令简谐荷载作用 $p_0 \sin \omega t = m\ddot{x}_g$,定义 R_d 为谐振下单质点位移响应系数,则其值为:

$$R_d = \frac{1}{\sqrt{(1 - (\omega/\omega_b)^2)^2 + [2\xi(\omega/\omega_b)]^2}} \quad (10)$$

式中: ω 、 p_0 为简谐荷载圆频率、力幅值, $\xi = \frac{C_h}{2m\omega_b}$ 为隔震层阻尼比, $\omega_b^2 = \frac{K_h}{m}$ 为隔震层固有圆频率。图5

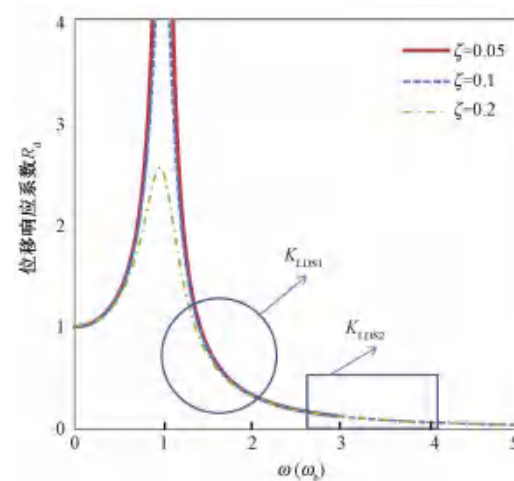


图5 谐振激励下结构位移响应系数

Fig. 5 The displacement response amplification factor of structural under resonance excitation

所示为隔震核岛 R_d 响应曲线,结构体系位移响应与圆频率比 $\frac{\omega}{\omega_b}$ 呈现明显的非单调性,表明通过隔震层刚度的多级设置可以有效限制不同水准地震动下相应的水平位移。

3 某核岛启动控制隔震设计

3.1 数值模型

某核岛高 72m、长为 78m×50m,总质量 $12.8 \times 10^4 \text{t}$, SAP2000 建立的未考虑水-结构耦合启动控制数值模型如图 6 所示,上部核岛采用集中质量-杆

单元,隔震层采用群支座模型,铅芯橡胶支座 (LRB)、橡胶支座 (NRB) 采用 Rubber 单元,考虑橡胶支座竖向拉压不等采用 Multilinear Elastic 单元,启动控制装置同样采用 Multilinear 非线性单元。

3.2 地震动与启动目标设计

依照目标核电厂时程输入规定,采用单组时程方式进行输入,水平向沿 X 、 Y 方向分别输入地震动 $R-x$ 、 $R-y$ 。图 7 所示为选用地震波调幅至 0.2g 时程曲线及加速度反应谱,该波彼此独立统计且相互正交,时程谱高频段包络 RG1.6 谱。启动控制目标设计为 0.2g。

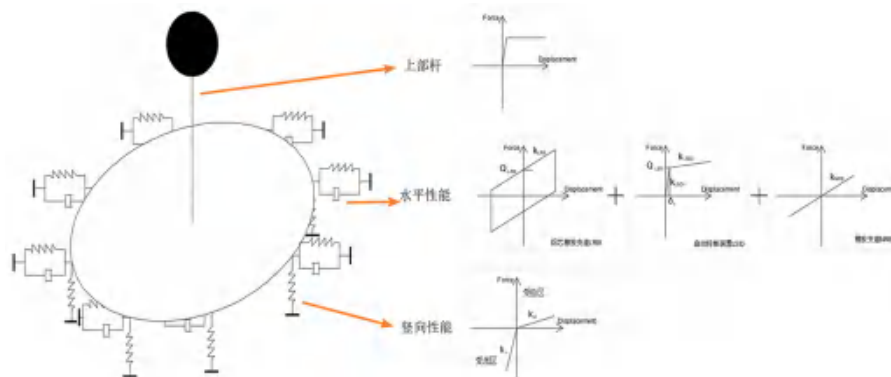


图 6 数值分析模型

Fig. 6 The analysis model of Finite element

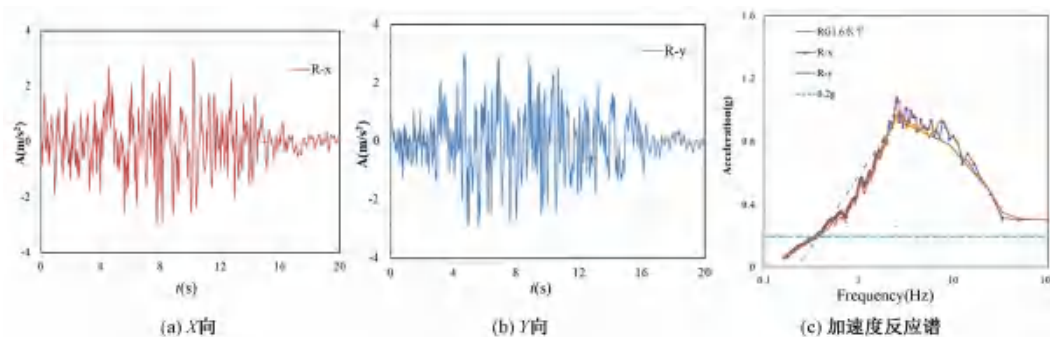


图 7 输入地震动时程分析

Fig. 7 The input seismic time history analysis

3.3 隔震层参数设计

隔震层力学参数如表 1 所示,共采用 112 个铅芯橡胶支座 (LRB)、188 个普通橡胶支座 (NRB),绕核岛底部环形均匀布设。启动控制装置 (LSD) 力学参数如表 2 所示,共 300 个配套水平隔震支座使用。

4 隔震性能分析

表 3 为传统核岛 (TRA)、水平隔震核岛 (HISO)、启动控制隔震核岛 (LSDISO) 振动特性对比, LSDISO 结构与 HISO 结构周期较 TRA 结构延长 8.9 倍、8.3 倍, LSDISO 结构同 HISO 结构周期相差

6%,表明两类结构均延长核岛振动周期、避开场地特征周期。

图 8 为三类结构层加速度包络曲线,表 4 以基底输入加速度作归一化处理。结果显示多水准地震输入下, HISO、LSDISO 结构加速度较 TRA 结构均有显著降低, HISO 结构、LSDISO 结构均具有较好的隔震效果。0.2g 地震下, LSDISO 上部结构保持平动的同时,隔震层顶部加速度为 4.35m/s^2 与 TRA 结构同位置 4.68m/s^2 相当,表明此时 LSD 装置水平出力较好,隔震层整体处于第一工作阶段。0.3g 地

震下, LSDISO 结构顶部加速度放大 1.74 倍,处于 0.62 倍、0.73 倍,有效降低罕遇地震下上部加速度
TRA 结构 3.15 倍和 HISO 结构 1.08 倍之间。0.6g 0.62 倍、0.73 倍,有效降低罕遇地震下上部加速度
地震下, TRA 结构顶部加速度较基底放大了 3.28 响应以保证核岛安全。

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 启动控制装置力学参数
Tab. 2 The mechanical parameters of LSD

型号	屈服前刚度 K_{LSD1} (kN/m)	屈服位移 δ_1 (mm)	屈服后刚度 K_{LSD2} (kN/m)	屈服力 (kN)
LSD50	17000	50	860	850

表 3 模态信息
Tab. 3 The information of Modal

项目	TRA		HISO		LSDISO	
	周期(s)	阶数	周期(s)	阶数	周期(s)	阶数
X 向	0.223	1	1.993	1	1.865	1
平动						
Y 向	0.221	2	1.990	2	1.864	2
平动						
Z 向	0.090	3	0.089	3	0.091	3
平动						

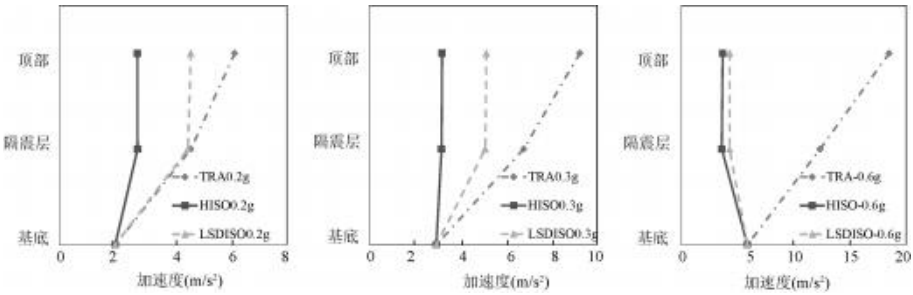


图 8 加速度包络图
Fig. 8 Acceleration envelope diagram of structure

表 4 多水准地震下加速度放大系数
Tab. 4 The acceleration response under multi-level PGA input

输入地震动 (m/s^2)	TRA		HISO		LSDISO	
	峰值 (m/s^2)	比率	峰值 (m/s^2)	比率	峰值 (m/s^2)	比率
0.2g	6.16	3.14	2.74	1.39	5.02	2.53
0.3g	9.25	3.15	3.19	1.08	5.14	1.74
0.6g	19.29	3.28	3.69	0.62	4.32	0.73

图 9 为 HISO 与 LSDISO 结构隔震层总滞回曲线。多水准地震作用下, LSDISO 结构隔震层总屈服力基本保持稳定。0.2g 地震下, LSDISO 滞回曲线斜率明显高于 HISO 结构; 0.3g 地震下, HISO 滞回曲线基本包络在 LSDISO 滞回曲线内, 且 LSDISO 最大出力明显高于 HISO 结构, 此时启动控制装置 (LSD) 出力良好。LSDISO 隔震层滞回曲线在 0.3g、0.6g 地震下呈现明显的捏缩效应, 表明其变刚度特性明显, 这与图 8 中加速度变化规律相符。

图 10 为三类结构层相对位移包络图。随着核

岛高度增加, 相对位移均呈增大趋势。不同水准地震动输入下, HISO 结构上部均几乎保持平动、相对位移主要集中在隔震层。LSDISO 结构相对位移则与输入地震动水准相关性较大, 0.2g 地震下, LSDISO 结构变形靠近于 TRA 结构且明显小于 HISO 结构; 0.3g、0.6g 地震动输入下, LSDISO 结构相对位移则靠近 HISO 结构, 且随着地震动输入值增大上部平动现象越明显。结果表明随着启动控制装置 (LSD) 刚度的变化, LSDISO 结构隔震层呈现出明显变刚度特性。

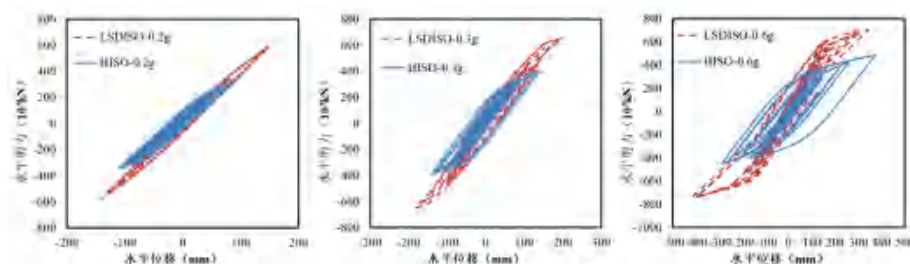


图 9 隔震层总滞回曲线对比

Fig. 9 Comparison of hysteretic curves of total isolator

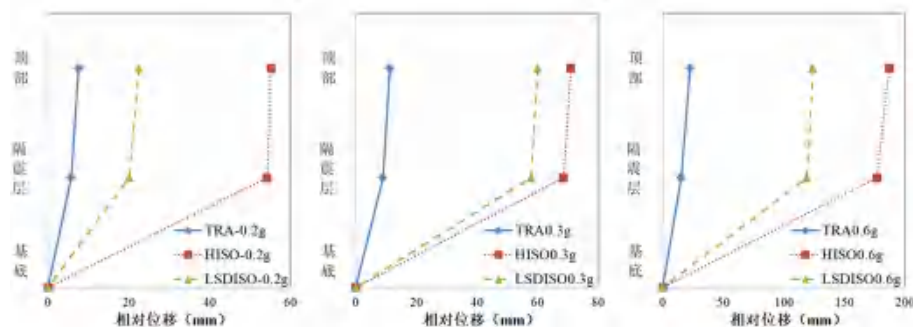


图 10 相对位移包络图

Fig. 10 Envelope diagram of relative displacement of structure

图 11 为顶端加速度反应谱对比, 表 5 为反应谱峰值数据对比。结果显示, HISO、LSDISO 反应谱卓越频率与 TRA 结构相比均由低周段向高周段移动。0.2g 输入下 LSDISO 结构与 TRA 结构谱值相当, 0.3g 输入下 LSDISO 结构与 HISO 结构谱值相当, 0.6g 输入下

LSDISO 结构谱值高于 HISO 结构。但 0.6g 输入下 HISO、LSDISO 结构低周段谱值均包络在 TRA 结构 0.3g 输入谱内, 均实现设计翻倍目标。但在超过 1s 区段内, LSDISO、HISO 谱值均明显高于 TRA 结构, 需重点关注此周期区段内敏感的设备、管线振动控制。

表 5 反应谱峰值对比

Tab. 5 The Comparison of Response spectrum peak comparison

输入地震动 (m/s^2)	TRA		HISO		谱峰值比 HISO/TRA (%)	LSDISO		谱峰值比 LSDISO/TRA (%)
	峰值 (m/s^2)	卓越周期 (s)	峰值 (m/s^2)	卓越周期 (s)		峰值 (m/s^2)	卓越周期 (s)	
0.2g	33.65	0.22	17.82	0.86	52.9	35.49	0.62	105.5
0.3g	50.48	0.21	34.13	0.73	67.61	40.09	0.64	76.42
0.6g	75.46	0.24	19.52	1.24	25.86	35.27	0.94	46.73

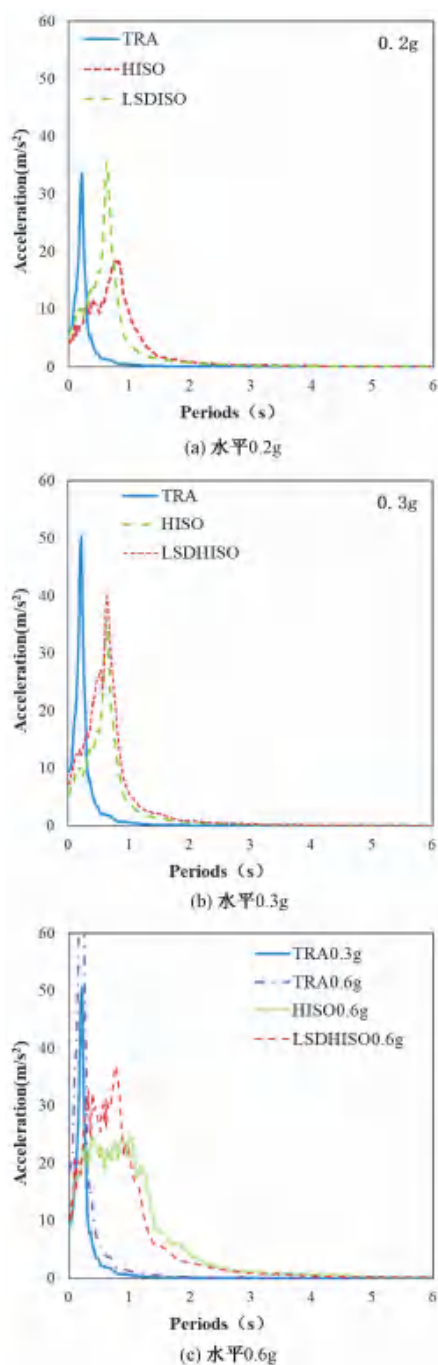


图11 顶端楼层反应谱

Fig. 11 The Response Spectrum of top structure

5 结论

研究提出一种启动控制隔震设计方案,分析多水准地震动作用下隔震层力学参数,建立启动控制核岛单质点分析模型,并结合某核岛进行启动控制设计和数值分析,得到结论如下:

(1) 利用弹性启动控制装置性能变化,构成

具备小震刚度大、大震刚度小的多水准变刚度隔震层;基于提出的启动控制隔震层力学模型,分析隔震层的水平、竖向、抗摆特性,并建立启动控制隔震核岛单质点动力方程;通过动力特性分析得出摆动转角 θ 随着竖向刚度 K_v 的减小呈明显放大趋势;通过位移响应系数 R_d 分析,启动控制隔震结构体系位移响应与圆频率比 $\frac{\omega}{\omega_b}$ 呈现明显的非单调性,通过启动控制装置刚度的多级设置可以限制不同水准地震动下相应的水平位移;

(2) 对某核岛进行启动控制隔震参数设计并进行时程分析。结果显示 HISO、LSDISO 结构较 TRA 结构平动周期延长 8.9 倍、8.3 倍;水平 0.2g 地震下, LSDISO 结构出力良好,有效发挥上部核岛抗震裕度;0.6g 地震下 HISO、LSDISO 结构顶部加速度仅为输入的 0.62 倍、0.73 倍;滞回曲线对比发现, LSDISO 在 0.2g 地震动输入下刚度较大、限制位移效果明显;在 0.3g、0.6g 地震下滞回曲线呈现明显变刚度捏缩现象;

(3) LSDISO 结构、HISO 结构水平向 0.6g 反应谱均包络在 TRA0.3g 内; LSDISO 结构顶层加速度反应谱卓越频率由低周段向高周段移动, 水平向 0.3g、0.6g 输入下, LSDISO 结构加速度谱峰值下降幅度在 35%~46%,但在超过 1s 区域内 HISO、LSDISO 加速度谱较 TRA 加速度谱均呈现放大趋势,需关注内部长周期段管线制振加强措施。下阶段仍需对隔震核岛专用启动控制装置、隔震支座展开进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] CAL. Seismic base isolation for nuclear facilities [A]. Proceedings of 10th International Conference on Structure Mechanics in Reactor Technology [C]. Los Angeles: International Committee on Reactor Structural Mechanics, 1989
- [2] 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)
- [3] 日本建筑学会著. 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
- [4] 周福霖,谭平,刘德稳. 核电站安全的地震威胁及对策分析[J]. 中国工程科学, 2013,15(4):36-40
- Zhou Fu-lin, Tan Ping, Liu Dewen. The earthquake threat and counter measures to the safety of nuclear power plants [J]. Engineering Sciences, 2013, 15(4): 36-40 (in Chinese)
- [5] Forni M. Seismic isolation of nuclear power plants [A]. Proceedings of the "Italy in Japan 2011" Initiative Science, Technology and Innovation [C]. 2011
- [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] 孔德睿,魏陆顺,梁欢文. 核电结构隔震试验研究[J]. 工程抗震与加固改造,2016,38(2):58-62
- Kong De-rui, Wei Lu-shun, Liang Huan-wen. Experimental research on seismic isolation of nuclear power structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016,38(2):58-62 (in Chinese)
- [8] 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 China)
- [9] 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. 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)
- [10] 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)
- [11] 夏祖枫. 核电厂的抗震设计输入及 AP1000 核岛隔震课题简介[J]. 中国工程科学, 2013,15(4):52-61
- Xia Zu-feng. Seismic input of NPP topic of seismic isolated research for AP1000 nuclear island [J]. Engineering Sciences, 2013, 15(4): 52-61 (in Chinese)
- [12] 刘文光,许浩,冯祎鑫,等. 多级性能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)
- [13] 赖振锋,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)
- [14] 刘文光. 橡胶隔震支座力学性能及隔震结构地震反应分析[D]. 北京:北京工业大学, 2003
- Liu Wen-guang. Mechanics properties of rubber bearings and earthquake response analysis of isolated structures [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003 (in Chinese)
- [15] 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] 方超(1986-),男,硕士,讲师,研究方向:工程结构安全管理与设计