

# 核电厂隔震结构附加侧向阻尼系统分析模型及减震效果

冯祎鑫<sup>1</sup>, 刘文光<sup>1</sup>, 潘蓉<sup>2</sup>, 李韶平<sup>3</sup>

(1. 上海大学力学与工程科学学院土木工程系, 上海 200444; 2. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082;  
3. 上海核工程研究设计院有限公司, 上海, 200233)

**摘要:** 提出对半埋置/全埋置小堆三维隔震结构附加侧向黏滞阻尼的混合控制系统, 达到同时控制水平加速度、水平位移以及摇摆反应且不影响竖向隔震效果的目的。基于隔震层及侧向阻尼系统变形分析, 建立考虑隔震层平动及摇摆的耦合效应和侧向阻尼器协调转动变形的刚体动力学模型。基于 RG1.60 谱选取 30 条地震输入信号开展参数分析, 探究阻尼布置参数、附加阻尼力参数及阻尼滞回形状参数对减震效应的影响。研究发现合理的附加阻尼力与隔震层出力比值区间为 10%~20%, 最优参数下水平加速度位移可同时分别减小 20%, 40%, 最大摇摆反应减小 70%。选取合理阻尼参数对某真实核电厂模型进行案例分析, 摇摆角、加速度、隔震层位移等地震响应指标均减小, 边支座受拉现象消失, 案例数值模拟结果与参数分析规律一致, 也与理论分析吻合。

**关键词:** 复合隔震结构; 核电厂; 耦合模型; 参数分析; 减震性能

**中图分类号:** TU352.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)05-1371-09

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.05.021

## 引言

全埋置/半埋置的小堆核电厂是未来核电发展的方向之一<sup>[1]</sup>, 利用洞室围岩增加了实体屏障, 可减小外部冲击的威胁, 提升泄露处置的安全性; 同时也面临着更复杂的厂址条件及更高的地震安全要求。针对全埋置/半埋置的小堆核电厂, 开展提升地震安全性研究有重要意义<sup>[2]</sup>。三维隔震技术可以满足核电结构多方向的高地震安全需求, 是近年来的研究热点之一。众多学者从理论、模拟及试验等方面对三维隔震技术在核电中应用的可行性进行了研究, 同时也发现了一些不可忽视的问题。三维隔震结构的摇摆反应过大是其中之一, 诸多学者针对这一问题进行了研究。王涛等<sup>[3]</sup>提出一套由厚层橡胶支座和油阻尼器组成的三维隔震系统, 并建立简化模型开展试验研究, 结果表明三维隔震系统在水平向具有与水平隔震相当的减震效果, 竖向可避开设备敏感周期区间较好地提升安全性, 同时发现延长竖向周期可提升竖向隔震效果, 但会增加结构摇摆反应。Fujita 等<sup>[4]</sup>开发了竖向采用碟形弹簧的三维隔震支座, 并为解决大的摇摆反应设计了抗摇摆装置, 但这一装置的造价较高。Shimada 等<sup>[5]</sup>发明了一种基于空气弹簧与橡胶支座的三维隔震系统, 设计竖向周

期接近 2 s, 牺牲竖向变形和摇摆反应可以较好地控制竖向加速度。魏陆顺等<sup>[6]</sup>、Liu 等<sup>[7]</sup>提出一种分离式的三维隔震系统, 竖向周期约 3.3 s, 这套系统采用对整个结构摇摆进行控制的思路, 附加导轨使隔震层变形不产生其他方向分量, 但对附加导轨的强度精度要求较高。Liu 等<sup>[8]</sup>提出将橡胶支座斜置组合的三维隔震装置, 竖向的承载力大, 通过支座内部竖向放置的油阻尼器套筒提供摇摆抗力, 在输入峰值较大的三向地震作用下, 需要额外附加抗摇摆装置抑制摇摆。竖向隔震效果依赖于较长的竖向周期, 但势必会增加摇摆反应, 如何抑制三维隔震的摇摆反应仍是需要进一步研究的课题。

三维隔震同样面临隔震支座变形过大的问题。丁阳等<sup>[9]</sup>对近场地震作用下三维隔震网壳结构的隔震层位移响应进行了研究, 发现三维隔震结构的水平位移由于摇摆反应的增加而增加。刘文光等<sup>[10]</sup>对三维隔震结构体系进行动力响应分析, 发现 0.6g 输入下水平位移接近 500 mm。Nagarajaiah 等<sup>[11]</sup>发现一栋应用隔震技术的结构在地震中发生了隔震层上底板与隔震沟挡墙碰撞的情况, 造成了结构较大的破坏。Manish 等<sup>[12]</sup>发现研究摩擦隔震系统时可能会因未考虑温度对摩擦材料的影响而对位移的计算偏小, 造成实际核电厂摩擦隔震结构的破坏。一些学者进行了控制位移响应的尝试。杨巧荣等<sup>[13]</sup>对

收稿日期: 2021-12-17; 修订日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778355, 51778356)。

核电厂负刚度隔震结构的地震响应进行分析得出附加负刚度装置后位移加速度都能有所控制,但经过计算得出负刚度装置应用于实际核电厂隔震结构时,需要较大的尺寸。田坤<sup>[14]</sup>提出将隔震支座曲面布置以控制隔震层位移和支座受拉,经过理论和试验研究分析验证其设想的可行性,但同时也发现这种控制手段会造成上部结构加速度响应的放大。周年强等<sup>[15]</sup>提出在摩擦滑移隔震结构与周围相邻结构间添加阻尼支撑并进行三自由度模型的分析,结果表明合理地设置阻尼力可以有效减小隔震层位移。吴巧云等<sup>[16]</sup>、何宛澄<sup>[17]</sup>提出在相邻结构间添加阻尼器与分段隔震形成混合被动控制,分析结果表明附加阻尼支撑后,分段隔震系统隔震层位移得到控制。如何有效控制三维隔震、水平隔震结构的位移,且不影响其他结构响应指标仍是未来三维隔震研究的热点之一。

## 1 理论分析

### 1.1 平动-摇摆耦合3自由度模型

针对隔震层位移和摇摆过大的问题,基于全埋置/半埋置小堆的未来核电发展方向,本文提出将核

岛结构整体进行三维隔震,并在结构厂房侧壁与埋置核岛空间的侧壁之间布置黏滞阻尼器以达到水平向上控制隔震层位移、减小加速度,竖直向上不影响隔震效果且能抑制摇摆的目的,如图1所示。不考虑土体地震响应与主体结构的相互耦合作用,假定土体为刚体且多点支撑激励一致,建立考虑运动平面内平动-摇摆耦合的简化3自由度计算模型。坐标系选择如图1所示,隔震层上底板中心为坐标原点, $x$ 轴为水平向与底板重合, $z$ 轴为竖直方向,摇摆角 $\theta$ 顺时针方向为正。上部结构可视作刚体。上部结构质量记为 $m$ ,上部结构对质心转动惯量记为 $J$ 。 $b$ 、 $h$ 和 $e$ 分别为结构宽度、质心高度和偏心距; $H$ 为阻尼器布置高度。

### 1.2 阻尼器出力分析

图2为两种支座的变形状态和阻尼器变形状态, $\alpha_{hr}$ 为变形后阻尼器与水平方向的夹角; $L$ 为隔震沟宽度(未变形时阻尼器长度); $L'$ 为变形后阻尼器长度。需要说明的是整个结构的运动状态并不止这两种,此处仅列举两种可能的阻尼器协调转动角度及分别所对应的其中一种支座三个方向耦合变形组合。

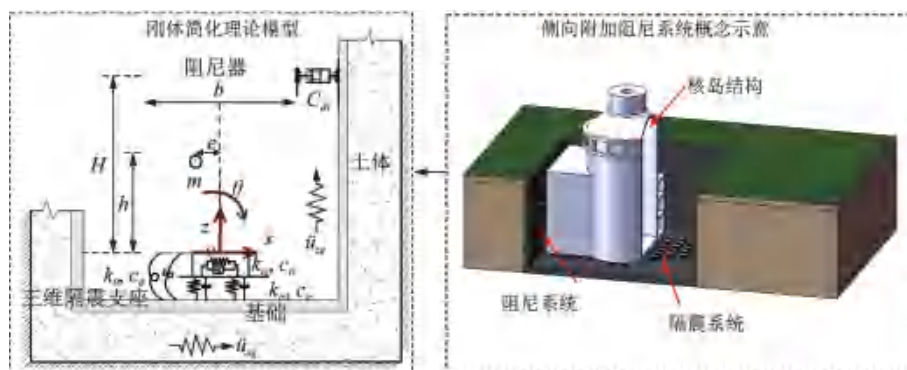


图1 概念示意图及刚体简化模型

Fig. 1 The concept and simplified model

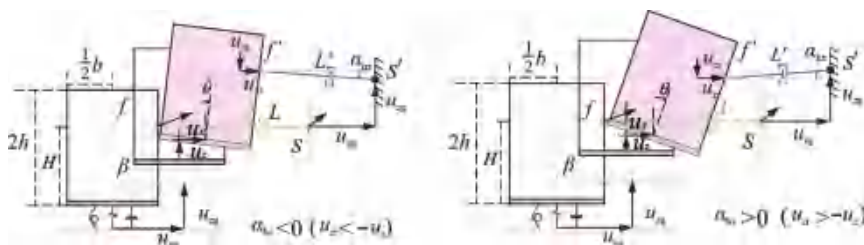


图2 侧向阻尼器变形计算简图

Fig. 2 Diagram of deformation of lateral damper

结构摇摆产生的水平、竖向位移分量分别记为 $u_{xr}$ 、 $u_{zr}$ ,如下式所示:

$$\begin{aligned} u_{xr} &= H \sin \theta + \frac{b}{2} (\cos \theta - 1), \\ u_{zr} &= H (\cos \theta - 1) - \frac{b}{2} \sin \theta \end{aligned} \quad (1)$$

水平阻尼系统两端相对变形:

$$u_{dh} = L - \sqrt{(L - u_x - u_{xr})^2 + (-u_z - u_{zr})^2} \quad (2)$$

水平向阻尼系统两端相对变形的速度:

$$\dot{u}_{dh} = \frac{\left[ L - u_x - H \sin \theta - \frac{b}{2} (\cos \theta - 1) \right] \left( \dot{u}_x + \dot{\theta} H \cos \theta - \dot{\theta} \frac{b}{2} \sin \theta \right) - \left[ -H (\cos \theta - 1) - \frac{b}{2} \sin \theta - u_z \right] \left( H \dot{\theta} \sin \theta - \frac{b}{2} \dot{\theta} \cos \theta - \dot{u}_z \right)}{\sqrt{\left[ L - u_x - H \sin \theta - \frac{b}{2} (\cos \theta - 1) \right]^2 + \left[ -H (\cos \theta - 1) - \frac{b}{2} \sin \theta - u_z \right]^2}} \quad (3)$$

由于阻尼器与结构及挡土墙侧壁的连接均为不限制转动的铰接,阻尼器因结构平动—摇摆耦合变形产生与水平方向的夹角 $\alpha_{hr}$ ,定义为:

$$\alpha_{hr} = \arctan \frac{-H (\cos \theta - 1) + \frac{b}{2} \sin \theta - u_z}{L - u_x - H \sin \theta + \frac{b}{2} (\cos \theta - 1)} \quad (4)$$

$\Delta f_{dx}$ ,  $\Delta f_{dz}$  定义为阻尼力水平、竖向分量与阻尼力的比值,即阻尼器单位出力时的水平向、竖向分量,可分别表示为:

$$\Delta f_{dx} = \cos \alpha_{hr} \cdot \text{sign}(\dot{u}_{dh}), \Delta f_{dz} = \sin \alpha_{hr} \cdot \text{sign}(\dot{u}_{dh}) \quad (5)$$

同样地阻尼器单位出力时产生的摇摆抗力 $\Delta f_{dr}$ 表示为:

$$\Delta f_{dr} = \left[ \cos \alpha_{hr} \sqrt{H^2 + \frac{1}{4} b^2} \cos(\beta + \theta) - \sin \alpha_{hr} \cdot \sqrt{H^2 + \frac{1}{4} b^2} \sin(\beta + \theta) \right] \text{sign}(\dot{u}_{dh}) \quad (6)$$

$\alpha_{hr}$  与阻尼器布置高度 $H$ 、结构宽度 $b$ 、阻尼器原长 $L$ 、水平变形 $u_x$ 、竖向变形 $u_z$ 及摇摆角 $\theta$ 相关,其中,结构宽度 $b$ 与阻尼器原长 $L$ 为结构参数,阻

尼布置高度 $H$ 是可变参数。结构瞬时变形根据阻尼器协调转动夹角可分为4种,分别为 $u_z < -u_{xr}$ 且 $u_x < L - u_{xr}$ ,  $u_z > -u_{xr}$ 且 $u_x > L - u_{xr}$ ,  $u_z < -u_{xr}$ 且 $u_x > L - u_{xr}$ , 及 $u_z > -u_{xr}$ 且 $u_x < L - u_{xr}$ 。实际上,支座的水平变形以及摇摆产生的水平分量不会小于阻尼器原长,也即分母不会小于0。阻尼器协调转动夹角的方向由表达式 $-u_z - u_{xr}$ 的正负决定。假设结构宽度 $b=50$  m,质心高度 $h=30$  m,阻尼器原长 $L=1$  m。

图3所示为阻尼器布置位置对阻尼力的影响曲线。水平、竖向及摇摆三个方向的分量均为比值,没有单位。阻尼器布置高度与阻尼力的关系不是单调的,也不是阻尼器布置位置越高出力分量越大,在不同的结构变形状态下是不同的。 $\alpha_{hr}$ 的正负号代表方向。当 $u_z < -u_{xr}$ 且 $u_x < L - u_{xr}$ 时, $\alpha_{hr}$ 随着 $H/(2h)$ 的增大而增大,相应的水平分量随着 $H/(2h)$ 的增大而减小,竖向分量则增大,摇摆分量先减小至零再反向增加。当 $u_z > -u_{xr}$ 且 $u_x > L - u_{xr}$ ,或 $u_z < -u_{xr}$ 且 $u_x > L - u_{xr}$ , $\alpha_{hr}$ 随着 $H/(2h)$ 的增大而减小,相应的水平分量随着 $H/(2h)$ 的增大而增大,竖向分量减小,摇摆分量增加。当 $u_z > -u_{xr}$ 且 $u_x < L - u_{xr}$ 时, $\alpha_{hr}$ 随着

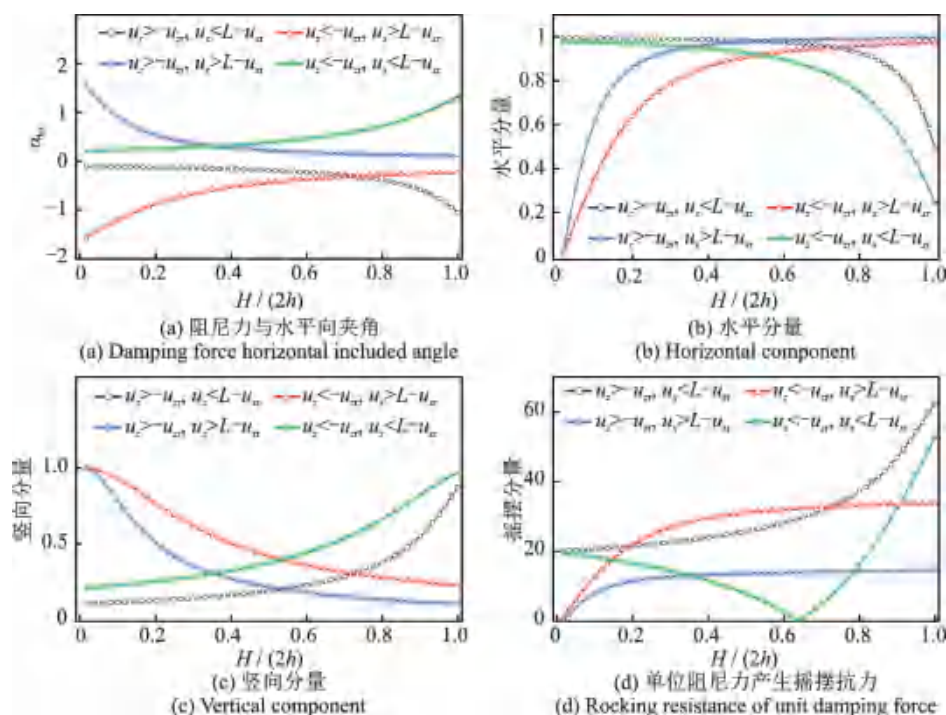


图3 阻尼器布置位置对阻尼力的影响

Fig. 3 The influence of damper arrangement parameter on damping force



$H/(2h)$ 的增大而增大,水平分量随着 $H/(2h)$ 的增大而减小,竖向分量增大,摇摆分量增加。

### 1.3 动力方程

平动-摇摆耦合模型共三个自由度。双向地震输入为 $\ddot{u}_{xg}$ 及 $\ddot{u}_{zg}$ ,基于D'Alembert原理推导动力方程。隔震层水平向与竖向滞回模型均为双线性。 $k_x, k_z$ 表示水平、竖向等效刚度。摇摆刚度表示为 $k_\theta = 2 \int_0^{0.5b} k_z/b \cdot x^2 dx = b^2 k_z/12$ ,忽略了摇摆方向阻尼。上一节对阻尼器的出力进行了分析,记 $f_{dx}, f_{dz}$ 和 $f_{dr}$ 为阻尼力水平方向、竖向方向和摇摆方向的分量,分别如下式所示:

$$\begin{aligned} f_{dx} &= \text{abs}(c_{dx} \cdot \Delta \dot{u}_{dh}) \Delta f_{dx}, \\ f_{dz} &= \text{abs}(c_{dz} \cdot \Delta \dot{u}_{dh}) \Delta f_{dz}, \\ f_{dr} &= \text{abs}(c_{dr} \cdot \Delta \dot{u}_{dh}) \text{sign}(\dot{u}_{dh}) \Delta f_{dr} \end{aligned} \quad (7)$$

进而,结构动力方程可推导如下:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{u}_g - \begin{Bmatrix} f_{dx} \\ f_{dz} \\ f_{dr} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式中  $\ddot{u}_g$  为地震作用向量,  $\ddot{u}_g = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{xg} \\ \ddot{u}_{zg} + g \\ 0 \end{Bmatrix}$ ;

$$\ddot{u} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_x \\ \ddot{u}_z \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix}; \dot{u} = \begin{Bmatrix} \dot{u}_x \\ \dot{u}_z \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix}; u = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_z \\ \theta \end{Bmatrix}; K = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_z & 0 \\ 0 & 0 & k_\theta \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{ix} & 0 & 0 \\ 0 & c_{iz} & 0 \\ 0 & 0 & c_\theta \end{bmatrix}; M = \begin{bmatrix} m & 0 & mh \\ 0 & m & me \\ mh & me & J + mh^2 + me^2 \end{bmatrix}.$$

## 2 参数分析

减震效果指标 $\beta$ 定义为附加侧向水平阻尼支撑后结构的地震反应与传统无控三维隔震结构反应之比。根据RG1.60谱<sup>[18]</sup>选取30组地震动记录进行参数分析,其中,天然地震波26条,人工核电波4条,阻尼力参数 $f_c$ 定义为附加阻尼力与隔震层最大出力比值,阻尼位置参数 $f_d$ 定义为阻尼布置高度与质心高度的比值,黏滞阻尼指数 $f_a$ 可表征阻尼滞回形状。图4为30条地震波反应谱、平均反应谱及RG1.60谱对比。

根据已有三维隔震相关的理论分析,可知三维隔震水平向与水平隔震设计一致,隔震后水平方向周期为2.0~3.5 s,竖向周期越长,竖向隔震效果越好,但引起摇摆响应越大,控制摇摆振型不成为主振型,竖向周期为0.7~1.2 s<sup>[19-20]</sup>。本文主要探究附加侧向阻尼器对结构各响应指标的影响,不对三维隔

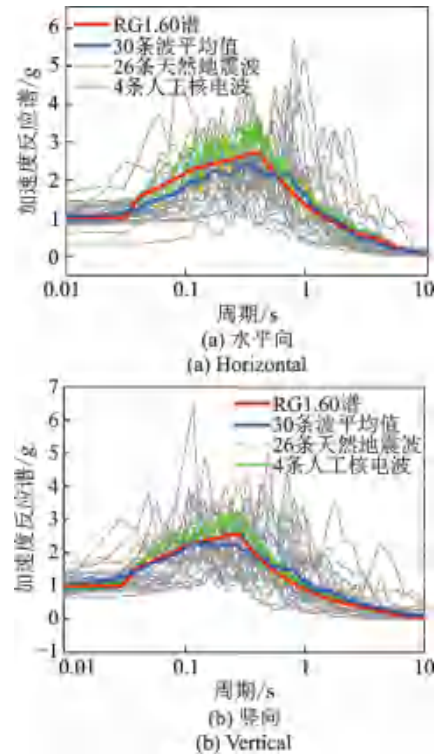


图4 30条地震波反应谱

Fig. 4 Response spectra of 30 seismic waves

震的参数取值进行研究。假定结构宽度为50 m,质心高度为30 m,水平隔震周期为3 s,竖向周期为1 s,水平向屈重比为3%,竖向屈重比为8%,阻尼器原长 $L$ 为1 m。阻尼系数为0~58000 kN·m/s,增量为2000 kN·m/s,阻尼指数分别取0.15,0.45及0.75。基于MATLAB软件对动力方程进行求解,得到减震效果指标 $\beta$ 关于 $f_c, f_d$ 及 $f_a$ 三个参数的变化规律。

附加阻尼力与隔震层出力比值、布置高度及阻尼指数对减震效果指标 $\beta$ 的影响如图5所示。

图5(a)为水平向加速度减震效果的变化规律,随着阻尼力比值的增加,水平向加速度先减小后增加,在阻尼力比值较小时,随着阻尼器布置位置的增高,减震效果变好,但阻尼力比值超过最优区间后,减震效果随着布置位置升高先增加后减小,甚至响应大于无附加阻尼的原三维结构。不同的阻尼指数下,阻尼力比值与布置位置对结构减震效果的影响规律一致,阻尼指数越大,减震效果越好,阻尼力比值及阻尼位置的最优区间越大。

图5(b)为水平向位移减震率的变化规律,减震效果与阻尼力比值正相关,阻尼力与隔震层出力的比值越大,减震效果越好,可减小至无附加阻尼结构的50%以下。在阻尼力比值较小时,减震效果与阻尼器位置的相关性较小,随着阻尼力比值的增加,相关性也随之增加,阻尼力比大于0.4时,阻尼器布置越接近隔震层越好。不同的阻尼指数下,减震效果随着附加阻尼力比和布置位置的变化规律一致,但与水平

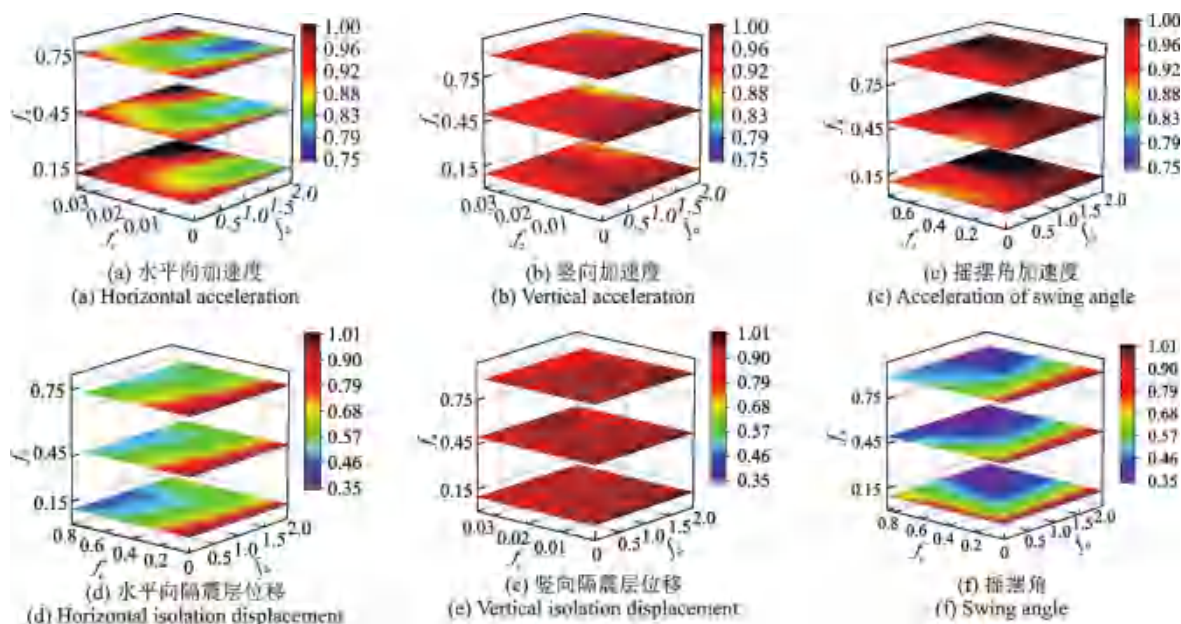


图5 减震效果指标 $\beta$ 关于附加阻尼力与隔震层出力比值、布置高度以及阻尼指数的参数分析

Fig. 5 Parameter analysis of  $\beta$  on the ratio of damping force to isolation force, arrangement parameter and damping exponent

向加速度不同的是,阻尼指数越小,减震效果越好。

图5(c),(d)为竖向减震效果。从图中可知,水平布置的阻尼装置在地震作用时会产生竖向的分量,但与竖向隔震层的出力相比较小,对竖向的减震效果也较小。图5(e),(f)为摇摆角加速度及摇摆角减震效果变化规律,存在最优的阻尼力比值区间,使摇摆角加速度最小,阻尼器布置位置越高,摇摆角加速度减震效果越差,阻尼指数越小,减震效果对于阻尼力比值及阻尼位置参数更敏感。附加侧向的阻尼装置对于摇摆角加速度的控制效果较一般,约为无附加阻尼结构的90%。随着布置位置的升高,阻尼力比值的增大,摇摆角可降至无控结构的35%,随着阻尼指数的增加,摇摆角减震效果与位置参数的相关性降低。

### 3 算例分析

#### 3.1 模型介绍

将某核电厂简化为集中质量-梁单元模型,如图6所示,各质点质量及结构参数详见文献[21]。对该核电厂模型进行三维隔震数值计算,水平向隔震周期约3 s,竖向隔震周期约为0.8 s,采用群支座模型,共布置121个支座,模型关于X向和Y向均对称,边支座中心距为40 m。水平竖向本构模型均为经典双线性模型,单个支座水平初始刚度约为39 kN/mm,屈服力约800 kN,屈服系数取0.0769。竖向初始刚度650 kN/mm,竖向的屈服力及屈服系数同水平向的一致。

根据第三节参数分析结论,附加阻尼力与水平

隔震出力比值取15%,可初步求得0.6g地震波输入下隔震层水平向出力约为 $1.3 \times 10^5$  kN,设计阻尼器最大出力约 $2 \times 10^4$  kN。根据隔震周期及隔震层位移可估算阻尼器两端速度约为250 mm/s。X方向结构两侧与挡土墙之间各对称等距布置12个阻尼器(共24个),布置高度距底板约45 m,单个阻尼指数为0.65,阻尼系数约为23 kN·mm/s。Y方向与X方向一致。使用有限元内置的黏滞 damper 单元进行模拟。

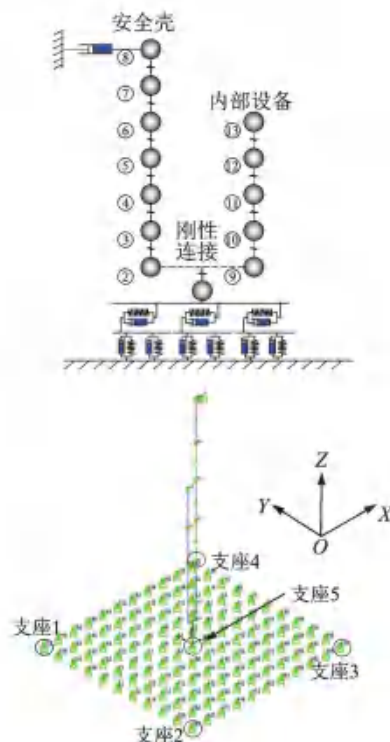


图6 简化计算模型及有限元软件分析模型图

Fig. 6 Simplified calculation model and finite element model

基于RG1.60<sup>[18]</sup>谱拟合得到4条人工波用于时程分析,时间步长为0.005 s,地震波反应谱如图4所示。加速度输入峰值分别为0.3g,0.6g和0.9g,以研究核电厂三维隔震结构附加侧向阻尼后在基准地震(OBE)、安全停堆地震(SSE)及超设计基准地震作用下的地震响应。

### 3.2 地震响应分析

传统无隔震模型前10阶振型与文献[21]中的计算结果对比如表1所示,本文计算模型的振型频率与参考文献相吻合。在三向地震作用下各节点的加速度、隔震层位移以及摇摆角是重点关注的响应指标。图7为0.3g,0.6g及0.9g,4条人工波输入下各节点X向加速度均值对比,图中3ISO表示未附加侧向阻尼系,3DISO表示附加侧向阻尼系统。3DISO体系中安全壳及核设备的加速度均有不同程度的减小。安全壳顶部加速度及隔震层加速度的减小率大于中部节点,0.3g,0.6g及0.9g顶部加速度减小率分别约为24%,33%及26%。附加侧向阻尼

表1 前10阶振型频率(单位:Hz)

Tab. 1 Frequencies of the first 10 modes(Unit: Hz)

序号	无隔震	隔震	文献[21]
1	4.43	0.33	4.44
2	5.55	0.36	5.53
3	12.81	0.86	12.79
4	13.76	1.23	13.72
5	14.55	4.66	14.57
6	15.31	5.22	15.34
7	18.79	6.4	18.85
8	23.61	7.63	24.78
9	30.37	11.22	30.72
10	35.48	11.79	32.54

系统后隔震层加速度减小,向上传递至设备的地震能量减小,从而内部设备的加速度也有所降低,顶层加速度减小率分别为15%,16%及13%。在侧向附加阻尼支撑,由于结构摇摆转动,水平布置的阻尼产生竖向分量,但竖向减震效果较小。

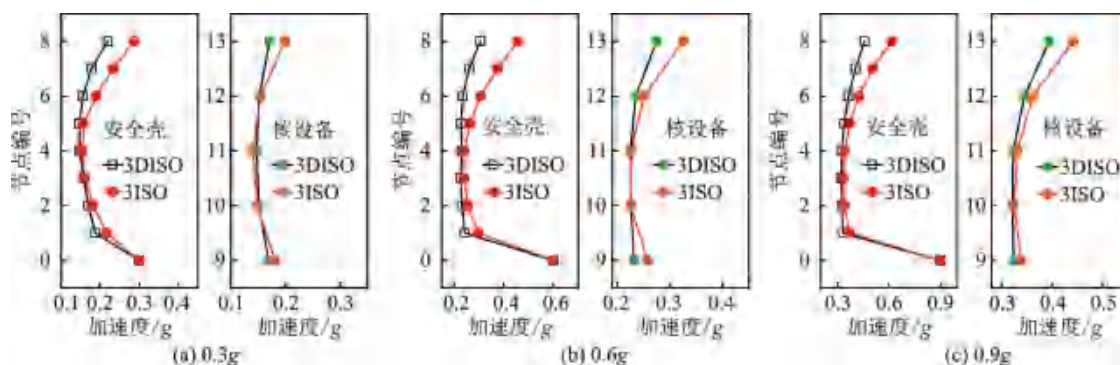


图7 4条人工波输入下传统结构与附加侧向阻尼结构的各节点X方向加速度均值对比

Fig. 7 Comparison of the average acceleration values of 3ISO structure and the 3DISO structure in the X direction under 4 artificial waves input

表2为隔震层位移及摇摆响应结果对比,附加侧向阻尼对水平方向隔震层位移控制有效。作为对照补充了相同阻尼附加于隔震层,结果表明阻尼附加

于结构顶部时对于摇摆的控制远优于阻尼的传统布置方案,即附加于隔震层。附加水平侧向阻尼支撑后,0.3g输入下X向隔震层位移由91 mm减小为66 mm,

表2 隔震层位移及摇摆响应4条人工波均值结果

Tab. 2 Isolation displacement and rocking response under 4 artificial waves input

方向	无附加阻尼均值/mm			附加阻尼均值/mm			相同阻尼附加于隔震层均值/mm		
	0.3g	0.6g	0.9g	0.3g	0.6g	0.9g	0.3g	0.6g	0.9g
X	91	345	638	66	225	438	66	270	525
(减震率/%)				(27.5)	(34.8)	(31.3)	(27.3)	(21.7)	(17.7)
Y	94	320	655	71	224	435	75	246	504
(减震率/%)				(24.5)	(30)	(33.6)	(19.7)	(22.9)	(23)
Z	27	68	121	25	64	117	26	66	119
(减震率/%)				(7.4)	(5.9)	(3.3)	(2.9)	(2.9)	(1.5)
$R_y$	137	234	372	76	123	228	119	201	288
(减震率/%)				(44.6)	(47.4)	(38.5)	(12.9)	(14.1)	(22.2)
$R_x$	153	255	358	71	120	195	131	223	306
(减震率/%)				(53.6)	(53.1)	(45.5)	(14.1)	(12.5)	(14.5)



0.6g 输入下由 345 mm 减至 225 mm, 0.9g 输入下由 638 mm 减小为 438 mm, 减震率约为 30%。竖向隔震层位移也有所减小, 但减震率较小, 约为 5%。分别定义边支座 1 和 2, 边支座 2 和 3 的竖向位移差峰值为绕 X 和 Y 轴的摇摆响应指标, 记为  $R_x$  和  $R_y$ 。如表 2 所示, 在结构顶部附加水平侧向阻尼支撑对三维隔震结构的摇摆响应控制有效, 0.3g、0.6g 及 0.9g 地震动输入下, X 向摇摆减小 44.6%, 47.1% 及 38.5%, Y 向减小约 53.6%, 53.1% 及 45.4%。

隔震支座易受拉破坏。如图 8 所示, 无附加侧向阻尼在 0.9g 输入下, 大量边支座处于受拉状态, 拉应力超出设计安全阈值, 结构处于不安全状态; 附加侧向阻尼支撑后, 在相同地震波输入下, 减小结构的摇摆响应进而使受拉支座转为受压, 提升了结构安全性。

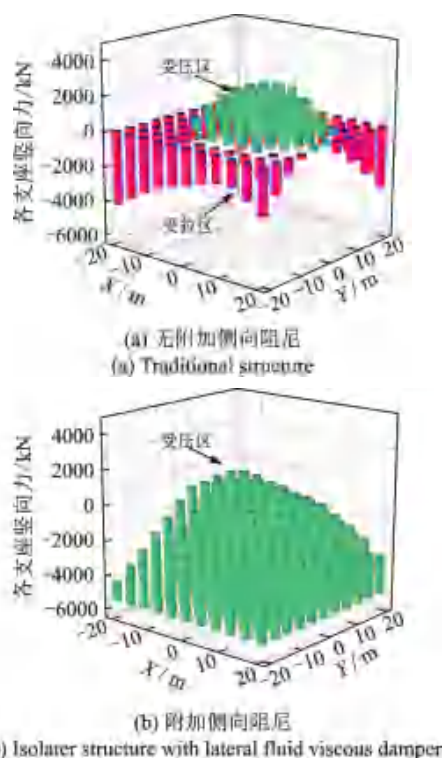


图8 0.9g 4条人工波输入下支座竖向反力均值结果

Fig. 8 Support reaction under 4 waves input when PGA is 0.9g

## 4 结 论

本文针对半埋置/全埋置核电厂三维隔震结构, 提出在结构及埋置空间侧壁之间附加黏滞速度型的阻尼系统, 完成阻尼系统的受力分析, 并建立平动-摇摆耦合的刚体模型, 开展参数分析探究阻尼系统布置位置、附加阻尼力与隔震层出力比值及

阻尼滞回形状对结构地震响应的影响规律, 具体结论如下:

(1) 由于平动-摇摆的耦合, 水平附加的阻尼装置在地震作用下产生与水平向的夹角, 对水平、竖向产生不同的分量, 推导了各分量  $f_{dx}$ ,  $f_{dy}$ ,  $f_{dr}$  表达式并进行分析;

(2) 推导动力方程, 完成减震效果指标  $\beta$  关于附加阻尼力与隔震层出力比值、阻尼布置位置以及阻尼滞回形状(阻尼指数)三个参数的影响分析。水平向和摇摆的响应控制明显, 对竖向响应影响小。附加阻尼力与隔震层出力比值为 15%~20%, 阻尼器布置于结构顶部时, 水平向加速度最小约为无附加阻尼结构的 80%, 此时隔震层位移可减小约 30%。水平隔震层位移主要与附加阻尼力比值相关, 最大可减小为无附加阻尼的 40% 以下。

(3) 附加侧向阻尼装置对于摇摆角加速度的控制效果较一般, 约为无附加阻尼结构的 90%。摇摆角的控制效果显著, 随着布置位置的升高、阻尼力比值的增大, 摇摆角可降至无控结构的 35%。

(4) 基于参数分析结论, 针对公开的核电厂模型进行地震响应分析。根据最大附加阻尼力为隔震层出力的 15%, 设计附加阻尼系统阻尼系数为 500 kN·mm/s, 阻尼指数为 0.65。结构顶部节点加速度减小率约 30%, 隔震层位移减小率约 30%, 边支座位移差减小 50%, 支座受拉现象全部消除。

## 参考文献:

- [1] Paul Breeze. Nuclear Power[M]. New York, USA: Academic Press, 2017.
- [2] Rowinski M K, White T J, Zhao J. Small and medium sized reactors (SMR): a review of technology[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 643-656.
- [3] 王涛, 王飞, 丁路通. 核电厂三维隔震技术的理论和试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(增1): 238-242.  
Wang T, Wang F, Ding L. Theoretical and experimental study on three-dimensional base-isolated nuclear power plant[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Sup1): 238-242.
- [4] Morishita M, Inoue K, Fujita T. Development of three-dimensional seismic isolation systems for fast reactor application[J]. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 2004, 4(3): 305-310.
- [5] Shimada T, Fujiwaka T, Satoshi M. Study on three-di-

- mensional seismic isolation system for next-generation nuclear power plant: hydraulic three-dimensional base isolation system[C]. ASME/JSME 2004 Pressure Vessels and Piping Conference. San Diego, California, USA, 2004: 35-42.
- [6] 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, 47(3): 33-38.
- Wei L, Liu L, Liang H. Experimental study on three-dimensional seismic isolation[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 33-38.
- [7] Liu W, Tian K, Wei L, et al. Earthquake response and isolation effect analysis for separation type three-dimensional isolated structure[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16(12): 6335-6364.
- [8] Liu Wenguang, Xu Hao, He Wenfu, et al. Static test and seismic dynamic response of an innovative 3d seismic isolation system[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(12): 28-40.
- [9] 丁阳, 崔中豪, 石运东. 近场地震作用下三维隔震网壳隔震层位移响应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(4): 65-72.
- Ding Y, Cui Z, Shi Y. Study on the isolation displacement response of three-dimensional isolated reticulated shells under near-fault ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(4): 65-72.
- [10] 刘文光, 孙欣越, 何文福, 等. 旋转型三维隔震体系试验研究及动力响应分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(7): 47-55.
- Liu Wenguang, Sun Xinyue, He Wenfu, et al. Experimental study and dynamic response analysis of rotational three-dimensional seismic isolation system[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(7): 47-55.
- [11] Nagarajaiah S, Sun Xiaohong. Base-isolated FCC building: impact response in Northridge earthquake[J]. Journal of Structural Engineering, 2001; 127(9): 1063-1075.
- [12] Manish K, Whittaker A S, Constantinou M C. Extreme earthquake response of nuclear power plants isolated using sliding bearings[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017; 316: 9-25.
- [13] 杨巧荣, 李传德, 许浩, 等. 核电厂负刚度阻尼隔震结构的地震响应研究[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(4): 718-727.
- Yang Q, Li C, Xu H, et al. Seismic response analysis of isolated nuclear power plant based on negative stiffness damping[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(4): 718-727.
- [14] 田坤. 非平整曲面隔震结构动力响应理论分析与试验研究[D]. 上海: 上海大学, 2019.
- Tian Kun. Theoretical and experimental study on dynamic response for curved surface isolated structure[D]. Shanghai: Shanghai University, 2019.
- [15] 周年强, 施卫星, 单伽程. 附设侧向支撑的基础隔震建筑的抗震性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 67-72.
- Zhou N, Shi W, Shan J. Research on seismic performance of isolated building with lateral viscous damper bracing[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(1): 67-72.
- [16] 吴巧云, 何宛澄, 朱宏平. 不同频域地震动下混合被动控制体系的减隔震效果[J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(2): 121-126.
- Wu Qiaoyun, He Wancheng, Zhu Hongping. Seismic reduction-isolation effect of hybrid passive control system in case of different frequency-domain ground motion with[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, 46(2): 121-126.
- [17] 何宛澄. 与相邻结构连接阻尼器的分段隔震体系数值模拟及振动台试验研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2019.
- He Wancheng. Numerical simulation and shaking table test of segment isolation system connected with adjacent structure dampers[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2019.
- [18] 潘蓉. 核设施抗震设计中的设计地震反应谱[J]. 核安全, 2010(3): 36-41.
- Pan R. Design seismic response spectrum used in the design of nuclear facilities other than NPPs[J]. Nuclear Safety, 2010(3): 36-41.
- [19] 王飞. 核电厂整体基础隔震体系的理论与试验研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.
- Wang F. Theoretical and experimental study on base-isolated nuclear plant[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013.
- [20] 戴颖楠, 闫维明, 陈适才. 某核电站整体基础三维隔震地震反应分析[J]. 结构工程师, 2018, 34(6): 51-58.
- Dai Y, Yan W, Chen S. Seismic response analysis on three-dimensional base-isolated nuclear power plant[J]. Structural Engineers, 2018, 34(6): 51-58.
- [21] 李忠献, 李忠诚, 沈望霞. 核反应堆厂房结构楼层反应谱的敏感性分析[J]. 核动力工程, 2005, 26(1): 44-50.
- Li Z X, Li Z C, Shen W X. Sensitivity analysis for floor response spectra of nuclear reactor buildings[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(1): 44-50.



## Analysis model and damping performance of isolated structures with lateral fluid viscous damper for NPPs

FENG Yi-xin<sup>1</sup>, LIU Wen-guang<sup>1</sup>, PAN Rong<sup>2</sup>, LI Shao-ping<sup>3</sup>

(1.Department of Civil Engineering, School of Mechanics and Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2.Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100082, China;

3.Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

**Abstract:** In this paper, an isolated structure system with lateral fluid viscous damper is proposed to control horizontal acceleration, horizontal displacement and swaying response without affecting vertical isolation effect. Based on the deformation analysis of isolation layer and lateral damping system, a rigid body dynamic theoretical model is established considering the coupling effect of the translational and swaying of isolation layer and the coordinated rotation deformation of lateral fluid viscous damper. Based on RG1.60 spectrum, 30 input seismic signals are selected to carry out parameter analysis. The arrangement of damper (parameter  $f_d$ ), ratio of damping force to reaction force of isolation layer (parameter  $f_c$ ) and the damping exponent (parameter  $f_e$ ) are chosen as three main parameters, whose sensitivity is discussed through non-linear dynamic time-history method. It is found that the optimal ratio of damping force to reaction force of isolation layer is 10-20%. Under the optimal parameters, the horizontal acceleration displacement can be reduced by 20% and 40% respectively, and the maximum rocking response can be reduced by 70%. Optimal damping parameters are selected to complete the case study. The seismic response including rocking response, acceleration and displacement of isolation layer are reduced. The numerical simulation results of the case study are consistent with the parameter analysis and are consistent with theoretical analysis.

**Key words:** hybrid damping system; nuclear power plant; coupling model; parameter analysis; damping performance

**作者简介:** 冯祎鑫(1996—),女,博士研究生。电话: 18636399719; E-mail: 391187932@qq.com。

**通讯作者:** 刘文光(1968—),男,博士,教授,博士生导师。电话: (021) 66135630; E-mail: 13791980@qq.com。