

土-桩基-隔震支座-核岛地震反应试验研究

景立平^{1,2}, 吴凡¹, 李嘉瑞¹, 汪刚¹, 齐文浩¹, 周中一¹

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 防灾科技学院, 河北 三河 065201)

摘要: 通过开展大型地震模拟振动台试验, 对比研究了土-桩基-隔震支座-核岛结构和土-桩基-核岛结构的地震反应。试验采用橡胶铅锌支座作为基础隔震, 放置于桩基承台和上部核岛结构之间, 地基土采用某工程场地的均匀粉质黏土, 试验输入的地震动时程, 是由美国核电设计的 RG1.60 反应谱拟合而成。试验结果表明: 隔震支座不仅可以改变上部结构频率、减小加速度和反应谱幅值大小, 还可以减少下部桩的弯矩, 起到降低上部结构的反应的隔震作用。但隔震支座的使用会改变桩基础的弯矩分布, 核电工程采用隔震支座时应对桩基受力和变形进行特殊抗震设计, 以保证土-桩-上部结构整体系统的抗震稳定性。

关 键 词: 核电; 桩基础; 隔震技术; 结构动力响应

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2022)09-2483-10

Experimental study of seismic response of soil-pile foundation-isolation support-nuclear island

JIGN Li-ping^{1,2}, WU Fan¹, LI Jia-rui¹, WANG Gang¹, QI Wen-hao¹, ZHOU Zhong-yi¹

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

2. Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Sanhe, Hebei 065201, China)

Abstract: The seismic responses of soil-pile-isolation pedestal-nuclear island structure and soil-pile-nuclear island structure were studied by large-scale simulated shaking table test. In the test, rubber lead-zinc bearing was used as foundation isolation and placed between pile foundation cap and upper nuclear island structure. The foundation soil was uniform silty clay from an engineering site. The ground motion time history was fitted by RG1.60 response spectrum designed by Nuclear Power Corporation of the United States. The test results show that the isolation bearings can not only change the frequency of the superstructure, reduce the acceleration and the magnitude of the response spectrum, but also dwindle the bending moment of the lower pile, which can reduce the reaction isolation of the superstructure. However, the use of isolation bearings will change the bending moment distribution of pile foundation, thus special seismic design should be made for pile foundation stress and deformation in nuclear power engineering to ensure the seismic stability of the whole soil-pile-superstructure system.

Keywords: nuclear power; pile foundation; vibration isolation technology; structural dynamic response

1 引言

近些年来, 核电作为新型能源受到国家大力推广。自我国核能起步, 国家就明确要求把安全放在核能发展的首位, 始终贯彻“安全第一, 质量第一”的方针。历史上发生过多起核电站事故, 除机械问题和反应堆设计问题之外, 大多是源于地震灾害。例如, 2007 年日本本新潟县发生 6.8 级地震, 引发

柏崎刈羽核电厂的水泄露事故; 2011 年日本发生 9.0 级地震且引发海啸, 导致福岛核电站的核泄漏事故; 2011 年美国弗吉尼亚州发生 5.8 级地震, 造成 12 座核电站异常^[1-2]。因此, 要求我们在核电站设计时必须考虑地震灾害的影响。

世界范围内核电站选址大多集中在沿海地区的基岩场地, 但仅在沿海地区选择核电厂址不能满足未来核电发展的需要, 如何在内陆非基岩场地上

建设核电站，其土层场地的适应性和基础选择已成为核电建设的关键问题之一。

为解决核岛结构在内陆非基岩选址问题，拟采用桩基础改善地基，并使用隔震结构减少上部结构的动力响应，保障上部结构及精密设备在地震荷载下的安全。

在我国现有设计中，部分核电站运行安全地震动限于 $0.2g$ 以下，例如 CPR1000 堆型核电站，安全储备有限^[3]。在现有基础上引进隔震支座，可提升其抗震能力，大大提高核电厂厂址的适应性。

现有研究表明，采用合理的隔震方式可有效地减小上部结构位移、基底剪力、倾覆弯矩。对于特殊结构的隔震研究，Malhotra^[4]通过数值模拟与试验相结合的手段，证明橡胶底座作为隔震装置能有效降低上部储罐地震响应；Chen 等^[5]建立了核岛厂房有限元模型，并进行了地震动力反应分析，研究指出：在隔震条件下，核岛结构水平位移增加，加速度响应明显减少。对于叠层橡胶支座的研究，庄海洋等^[6]提出在软夹层地基上隔震层隔震效率低，桩—土—结构惯性作用明显，在设计时不可忽视。陈浩文^[7]提出隔震对竖向震动一般没有减震效果，对长周期水平震动存在共振危险，前者主要影响上部结构，后者则主要影响到隔震支座本身的安全。对于核电隔震的研究，李冬梅^[8]分析了核电站安全壳在隔震体系下的动力响应；郑志^[9]对核电站安全壳隔震可靠度进行了研究；王涛等^[10]对核电站三维隔震技术进行了研究；周志光等^[11]设计并开展了振动台试验，对比了隔震与非隔震核电厂结构的地震响应特性。对于核岛地基研究，李小军等^[12]提出在我国核电厂设计时应该对场地适宜性进行研究。

目前国内对隔震体系的研究，多集中于考虑其对上部建筑结构的影响，很少阐述隔震结构对于下部桩基础结构的影响。若在地震荷载作用下桩基础结构出现破坏，会影响上部结构的使用安全。同时因基础结构破坏的隐蔽性对震后安全评估产生迷惑性，为结构使用埋下安全隐患。美国核管制委员会（Nuclear Regulatory Commission，简称 NRC）^[13]慎重地指出：为确保安全，将隔震技术应用到核电站还有大量工作要做。

本文开展了土—桩基—隔震支座—核岛模型的大型地震模拟试验研究，对比分析了有无隔震支座两种工况在不同峰值地震动下的桩基和上部核岛结构的动力响应，讨论了隔震支座对上部结构动力响应及桩基弯矩的分布规律的影响特征。

2 隔震技术原理和隔震支座选择

隔震是用在建筑物中降低结构动力响应及相互作用的一种技术手段。传统的抗震安全是以加强结构强度为基本思想，隔震技术则是将结构分开，减少结构间相互作用，降低结构地震响应的手段^[14]。基础隔震是指在建筑物底部与结构的基础之间设置隔震装置，隔震装置的设置可以有效延长上部结构的自振周期，增加系统的阻尼。核电结构中引入基础隔震支座，给上部结构提供支撑力的同时，提供较高的水平向柔性，通过改变结构的刚度和阻尼特性，使得结构和地震的主频产生一定差异。隔震的使用还能减少地震能量向上部结构传递，有效降低上部结构的地震反应且不发生塑性变形，确保建筑在地震后依然能安全运行，并发挥其正常功能。

2.1 隔震技术原理

隔震的基本原理是在结构间设置隔震系统，在上部结构和基础之间采用柔性连接，以达到减少结构之间相互作用的目的。地震中使用基础隔震支座，可有效地降低结构之间受力变形的相互传递，消耗能量传递，使得结构具有更好的抗震安全性。

根据隔震位置不同，可以将隔震分为内部局部隔震、层间隔震、柱端隔震和基础隔震。基础隔震是指在地基基础与上部结构之间设置隔震装置，基础隔震结构能在地震作用中存在自复位功能，能有效地减小变形对上部结构的影响；对于基础结构而言，基础隔震结构能有效降低或分散上部惯性力对下部基础结构的影响，所以基础隔震是目前应用广泛的隔震形式。

为了使得隔震在结构中体现明显的效果，隔震应具备 4 项基本能力，包括承载能力、隔震性能、阻尼耗能能力和复位能力。隔震装置通常设置可变的水平刚度，在结构受到较小的外荷载作用下，结构有足够的水平刚度，保证上部结构位移较小，结构可以正常使用；在较大的地震荷载作用下，隔震可以通过自身变形将上部结构和地震作用隔离开来。为了更直观地讨论隔震在水平动力荷载下对结构的作用形式，用图 1 中绘制的简化模型为例进行说明。

图 1 中方块为结构，总质量为 M ，在水平动力荷载下，地面与结构产生位移，其相对位移为 D_H （可视为隔震体系形变）。地面的水平位移为 X_H 、水平速度为 \dot{X}_H 、水平加速度为 \ddot{X}_H 。结构的水平位移为 X_{JG} 、水平速度为 \dot{X}_{JG} 、水平加速度为 \ddot{X}_{JG} 。将隔震体系简化为弹簧与阻尼器并联体系， K 为弹簧

刚度, ζ 为阻尼器阻尼。

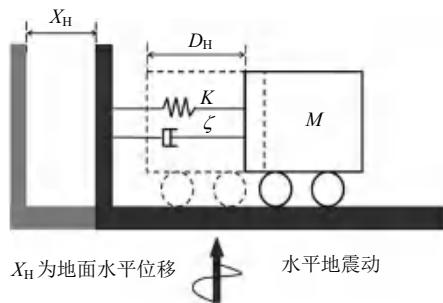


图 1 隔震模型简化示意图

Fig.1 Simplified schematic diagram of isolation model

基于刚性地基体系动力微分方程如下:

$$M\ddot{X}_{JG} + \zeta(\dot{X}_{JG} - \dot{X}_H) + K(X_{JG} - X_H) = 0 \quad (1)$$

ω_{JG} 为上部结构固有频率, 结构等效阻尼比为 ξ , 则有以下公式成立:

$$\omega_{JG}^2 = \frac{K}{M}, \quad \xi = \frac{\zeta}{2M\omega_{JG}} \quad (2)$$

将式(2)代入(1), 则有

$$\ddot{X}_{JG} + 2\omega_{JG}\dot{X}_{JG} + \omega_{JG}^2X_{JG} = 2\omega_{JG}\dot{X}_H + \omega_{JG}^2X_H \quad (3)$$

ω_H 为水平地震动特征频率, 则令

$$\ddot{X}_H = e^{i\omega_H t} \quad (4)$$

在《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[15]中引入了隔震体系加速度反应衰减比 R_a , 且有

$$\ddot{X}_{JG} = R_a e^{i\omega_H t} \quad (5)$$

由式(4)、(5)整理可得

$$R_a = \frac{\ddot{X}_{JG}}{\ddot{X}_H} = \sqrt{\frac{1 + \left(2\xi\frac{\omega_H}{\omega_{JG}}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega_H}{\omega_{JG}}\right)^2 + \left(2\xi\frac{\omega_H}{\omega_{JG}}\right)^2}} \quad (6)$$

式中: R_a 为上部结构加速度与地面水平加速度的比值, 为在隔震条件下地面水平加速度传递至上部结构时的加速度衰减比。 R_a 为评价隔震体系隔震效果的基本参数。在隔震体系设计中通过控制合理的上部结构固有频率 ω_{JG} 和选取适当的隔震阻尼 ζ 设计的有效性。选定 R_a 和上部结构固有频率 ω_{JG} 时, 可以计算出结构的等效阻尼比 ξ 。

2.2 隔震支座选择

隔震支座主要类型有橡胶隔震支座、滑动型支座和复合型支座。滑动型支座本身并没有自复位能

力, 在大震时可能发生不可控位移。复合型支座将橡胶支座和滑动型支座同时使用。核电结构中管线较多, 在日常使用中需要保证上部结构的安全和稳定, 且不能具有较大的位移, 以免发生管道破裂风险。综上考虑, 选择橡胶隔震支座。

橡胶隔震支座是由多层钢板与橡胶交替叠合而成, 钢板作为橡胶支座的加劲材料, 改变了橡胶体竖向刚度较小的特点, 使其既能降低水平地震作用, 又能承受较大竖向荷载。由于橡胶作为弹性体, 耗能性不足, 因此在支座中加入铅芯。铅芯橡胶隔震支座既能够承担整个上部结构的竖向荷载, 延长结构周期, 又能提供一定的阻尼, 隔震层的位移也不会很大, 具有很好的隔震效果。同时, 铅芯橡胶隔震支座又具备一定的初始水平刚度, 能够抵御荷载和制动荷载的作用^[16]。

铅芯橡胶支座基本参数包括第一形状系数 S_1 和第二形状系数 S_2 。第一形状系数 S_1 定义为橡胶垫中单层橡胶层的有效承压面积与单层橡胶的自由表面积之比, 第二形状系数 S_2 为橡胶垫有效承压面的直径与橡胶层总厚度之比。前者描述支座竖向变形能力, 反映支座的受压承载力及竖向刚度; 后者描述支座水平变形能力, S_2 反映支座的稳定性及水平刚度。如果形状设计值偏小, 则支座水平向剪应变及竖直压应变会较大。此时上下钢板与结构连接处较为薄弱, 则会呈现剪切与弯曲变形综合效应, 不利于结构抗震安全; 若 S_2 取值较大时, 则会限制水平变形, 同样不利于抗震安全。综上考虑, 参照《建筑抗震设计规范》^[15]取值, $S_1 \geq 15$, $S_2 \in [3, 6]$, S_1 、 S_2 计算公式为

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \frac{\pi(d_0^2 - d_1^2)/4}{\pi(d_0 + d_1)h_r} = \frac{(d_0 - d_1)}{4h_r} \\ S_2 &= \frac{d_0}{nh_r} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: d_0 为橡胶有效直径; d_1 为中间开孔的直径; n 为橡胶层的总层数; h_r 为单层橡胶的有效厚度。

2.3 隔震支座设计

本次试验上部结构荷载大小是通过单桩拟静力试验获得, 上部结构质量的改变会使桩身承载力发生变化。在后续试验中, 考虑 1/20 的结构几何相似比对试验进行设计, 缩尺后上部结构模型安全壳质量共计 10 t, 下部共布置 5 根桩。本次试验数据为后续试验的顺利进行了提供参考。在下部结构为单桩的情况下, 上部质量成比例减少至 2 t, 定性分析在大质量大刚度的情况下桩身内力变化。

隔震支座在设计时需要考虑支座的强度、竖向

刚度、水平刚度和阻尼特性等^[17]，本次试验使用 LRB200 铅芯橡胶支座。按照《建筑隔震橡胶支座》(JG 118—2000)^[18]中的规定对隔震支座性能进行检测，结果如表 1 所示。其中，隔振支座的水平刚度为剪切变形为 100% 时的试验值。计算试验所用支座长期面压为 0.2 MPa，满足《叠层橡胶支座隔震技术规程》(CECS126: 2001)^[19]规定。支座分别在结构底座 4 个角落位置布置，防止上部结构发生倾覆。

表 1 橡胶隔震支座参数

Table 1 Parameters of rubber isolation bearings

有效直径 /mm	竖向刚度 /(kN · mm ⁻¹)	屈服荷载 /kN	屈服后刚度比	屈服前刚度 /(kN · mm ⁻¹)	100%等效水平刚度 /(kN · mm ⁻¹)
200	440	7.549	0.013 3	10.289	0.315

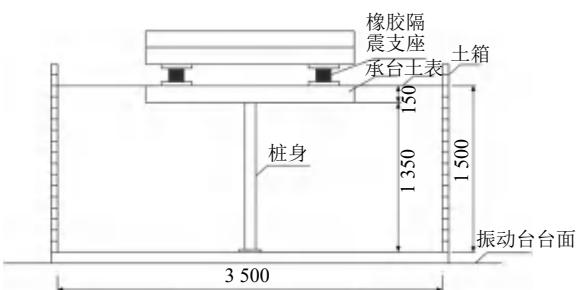
3 试验方案设计及相关参数

3.1 试验模型设计

试验通过对比无隔震体系和有隔震体系 2 种不同工况，定性分析隔震支座对上部结构和下部桩基础结构的影响。为模拟核电厂房刚度大、质量高的特点，使用钢块模拟代替，钢块尺寸为 800 mm×800 mm×50 mm，单块质量为 250 kg。上部荷载大小会对结构下部承载力以及水平承载力产生影响，根据前置试验的参考，确定上部结构质量为 2 t，共使用 8 块配重。

如图 2(a)所示，试验模型由上部结构和下部桩基础结构组成，土体外部采用中国地震局工程力学研究所景立平等^[20]设计研制的三维叠层剪切箱，尺寸为 3 700 mm×2 400 mm×1 700 mm，基础频率为 7.5 Hz。箱子由多层框架组成，每层之间可以相互移动，试验时在箱内布置橡胶膜以进一步减小边界效应。实际模型见图 2(b)，试验地基土采用某工程场地的均匀粉质黏土，土体剪切波速为 175 m/s，密度为 1.65 g/cm³；桩基础长为 1 350 mm，半径为 75 mm，内部布置 6 根 φ8 纵向钢筋，每 30 mm 布置 φ6.5 mm 箍筋，钢筋规格选用 HRB335；承台大小为 1 000 mm×1 000 mm×150 mm，内部配筋使用 HRB335φ14 钢筋，桩身以及承台均使用 C50 混凝土浇筑。

图 3 为传感器布置图。图中 A 代表加速度测点，Y 代表应变测点，LX 代表位移测点。加速度计沿着振动方向布置，随着埋深布置在桩身上，自下而上分别编号为 A1~A7；同时在自由场土体和上部结构处布置加速度计，AF1~AF3 是位于土中的加



(a) 试验模型设计图 (单位: mm)



(b) 模型照片



(c) 桩基制作图

图 2 试验模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of test model

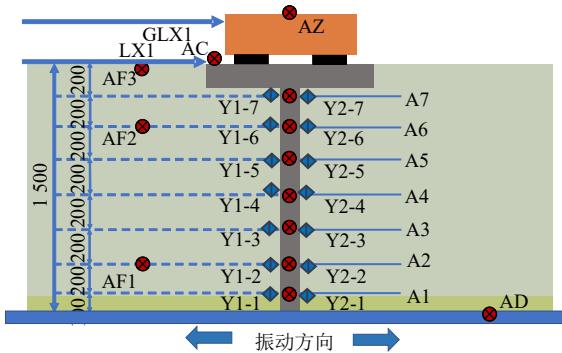


图 3 传感器布置图 (单位: mm)

Fig.3 Sensor layout(unit: mm)

速度计，AC 和 AZ 分别为承台表面和上部结构表面的传感器。应变测量使用电阻式应变片，沿振动方向，对称布置在桩身两侧，西侧用编号 Y1-1~Y1-7 表示，东侧用 Y2-1~Y2-7，沿着桩身各布置 7 个测点，通过测量两边应变值，计算桩身弯矩。在承台表面以及结构上部布置拉线位移计，分别测量动力作用下上部结构和承台位移。非隔震体系传感器布置同上。

3.2 试验工况的选取

试验使用中国地震局工程力学研究所地震模拟振动台系统，台面尺寸 5 m×5 m，承载能力为 300 kN，最大行程为 ±0.5 m，最大速度为 1.5 m/s，最大加速度达 2g，是三向六自由度大型振动台。

根据美国核电站设计中常用的 RG1.60 反应谱拟合得到的地震动, 调整幅值作为试验输入^[21], 选取白噪声用以分析结构的频率变化。如图 4 所示为输入地震动的时程图和傅里叶谱, 持时为 35 s。试验的具体工况如表 2 所示。

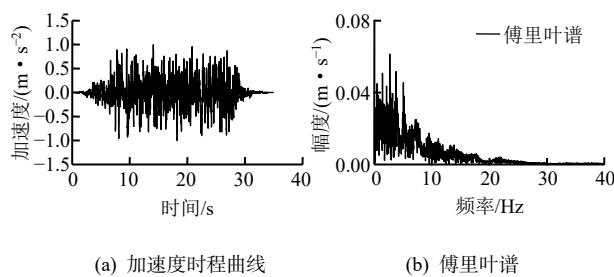


图 4 RG1.60 时程图和傅里叶谱

Fig.4 RG1.60 time history diagram and Fourier spectrum

表 2 试验工况表

Table 2 Test conditions

试验工况	输入荷载	隔震类型	加速度峰值
1	白噪声扫频	橡胶隔震	0.05g
2	人工地震动	橡胶隔震	0.10g
3	人工地震动	橡胶隔震	0.20g
4	人工地震动	橡胶隔震	0.30g
5	白噪声扫频	橡胶隔震	0.05g
6	白噪声扫频	无隔震	0.05g
7	人工地震动	无隔震	0.10g
8	人工地震动	无隔震	0.20g
9	人工地震动	无隔震	0.30g
10	白噪声扫频	无隔震	0.05g

4 试验数据及分析

试验通过对比结构的频率、上部结构和下部结构加速度以及桩身弯矩分布, 分析不同工况下隔震支座对于结构的影响。

4.1 结构频率分析

在有隔震支座和无隔震支座工况试验前, 使用白噪声对试验模型系统结构进行扫频, 根据桩身、承台和钢块顶部的加速度传感器采集到的数据得到传递函数, 计算出相应位置的频率, 计算结果见表 3。

表 3 结构自振频率

Table 3 Structure natural vibration frequency

工况	位置	自振频率/Hz	
		试验前	试验后
有隔震支座	桩身	11.1	10.0
有隔震支座	承台	11.1	10.0
有隔震支座	上部结构	3.7	3.7
无隔震支座	桩身	11.1	11.1
无隔震支座	承台	7.1	5.9
无隔震支座	上部结构	7.1	5.9

从表 3 中可以看出, 在无隔震模型系统中, 承台和上部钢块的振动频率基本相同, 而埋在土中的桩身频率稍高, 这可能是由于无隔震体系中承台与上部钢块采用 4 个螺栓紧密连接, 承台和上部结构形成紧密连接的整体, 而桩基和承台之间仅通过桩头位置连接, 因此承台和上部结构频率保持一致。而桩基和承台的运动可以视为两个质点偶联的运动体系, 下部土的存在限制了桩身位移, 因此桩身频率较大。在有隔震支座系统中, 桩基和承台的连接较承台通过支座与上部结构的连接更强, 这时桩基和承台可以看作一个整体, 因此频率基本相同, 而支座之上的钢块和支座一起振动的频率较低。从表 3 中还可以看到, 有隔震支座试验结束之后, 系统的频率变化不大, 处于基本完好状态; 在无隔震试验结束后, 承台和上部结构系统频率有一些降低, 分析原因是承台和土及承台和桩头接触部位产生了松动。

4.2 整体结构加速度数据分析

图 5 为有无隔震体系下结构不同位置的加速度时程对比图。以桩身加速度 (A6)、上部结构加速度 (AZ) 为例, 分别对比 0.2g、0.3g 工况下结构的加速度响应。可以看到在有隔震体系下, 桩身加速度幅值略微减小, 原因分析是隔震支座的出现, 减小了上部结构对下部桩基础惯性作用的影响, 从而使得其加速度幅值的减小; 对于上部结构而言, 在使用隔震支座后, 加速度幅值大幅度减小。

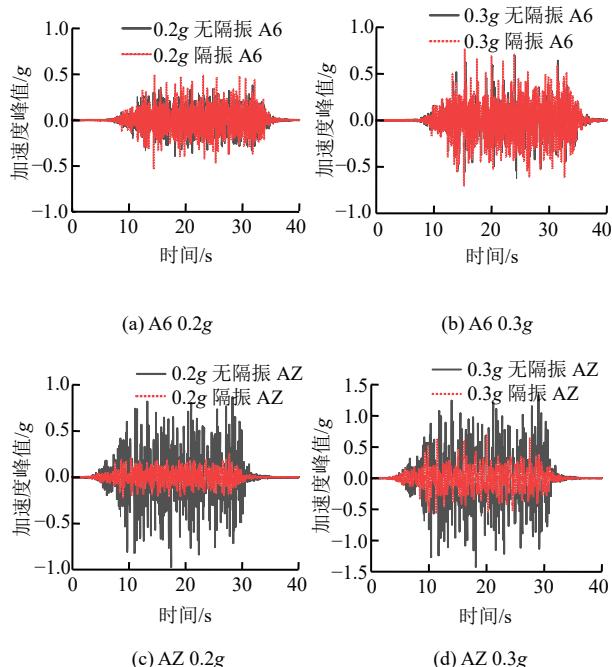


图 5 桩身、上部结构加速度时程对比

Fig.5 Time-history comparison of acceleration between pile shaft and superstructure

使用均方根的方法计算不同工况下的加速度放大系数, 将所得结果绘制成图 6。从图中可以看出, 加速度放大系数在承台表面出现明显增大, 加速度在承台上表面出现峰值且远大于桩基础结构的其他任何位置。对桩基础结构而言, 加速度放大倍数的峰值出现在桩-承台连接处, 后在桩高 1 350~900 mm 区域出现大幅降低。在 900~300 mm 呈现鼓包状态先增大后减小并有区域峰值存在。

随着输入地震动最大峰值的增大, 无隔震体系加速度放大系数变化不明显, 有隔震时加速度放大系数随幅值增大略微减小。对相互作用结构体系而

言, 在输入加速度后加速度在承台表面放大后, 在上部结构上表面进一步出现放大的情况, 呈现上部结构表面加速度峰值>承台表面加速度峰值>输入加速度峰值的情况。在引入隔震支座后, 上部加速度放大系数得到了大幅减小。为定量分析隔震效果, 将上部结构峰值和放大倍数与承台表面进行对比, 所得数据见表 4。从表中可以看到, 与非隔震工况相比, 橡胶隔震明显降低了桩顶与承台附近的加速度峰值以及放大系数, 上部加速度峰值低于承台传递的加速度大小, 隔震效率达到 47% 左右, 充分体现了隔震结构的作用。

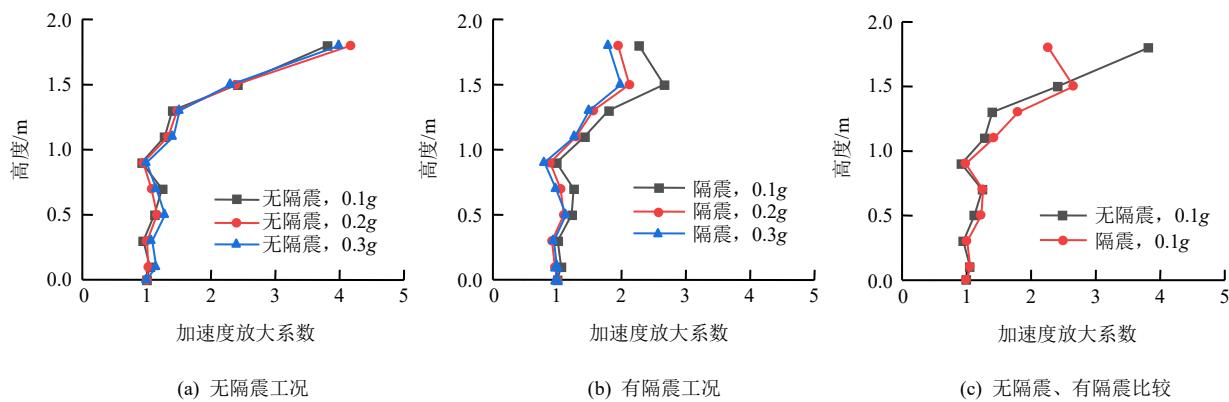


图 6 不同工况下加速度放大系数

Fig.6 Acceleration amplification coefficient under different working conditions

表 4 不同工况下上部结构加速度统计表

Table 4 Statistics of superstructure acceleration under different working conditions

工况	测量加速度峰值/g						放大倍数			隔震效率/%		
	承台 AD			结构表面 AZ			0.1g	0.2g	0.3g	0.1g	0.2g	0.3g
	0.1g	0.2g	0.3g	0.1g	0.2g	0.3g						
有隔震	0.29	0.53	0.76	0.25	0.49	0.69	0.86	0.92	0.91	46	48	47
无隔震	0.27	0.55	0.82	0.43	0.97	1.42	1.59	1.76	1.73	—	—	—

4.3 结构反应谱分析

为定性分析有无隔震体系对桩身、承台以及上部结构反应谱影响, 分别绘制不同工况、不同测点反应谱的对比图。如图 7 所示, 图 7(a)~7(c) 分别为输入 0.1g、0.2g、0.3g 三种不同幅值地震动时, 结构加速度计 A7 (桩身)、AC (承台) 以及 AZ (上部结构) 3 个测点采集数据, 计算得到的桩身加速度反应谱图。可以看出, 在不同幅值输入下反应谱整体变化趋势一致。

为分析具体变化大小和规律, 以 0.2g 输入工况为例, 绘制不同体系下桩身、承台以及上部结构的反应谱, 见图 7(d)~7(e)。从图中可以看到, 在不使用隔震支座的情况下, 上部结构和承台幅值最大值出现在相近的频率区段, 上部结构的反应谱幅值

较承台明显增大。在引入隔震体系后, 反应谱发生了很大的变化, 上部结构和承台反应谱峰值出现频段改变。隔震支座的使用使得上部结构对下部结构运动影响减小, 震动形式发生改变。

图 7(f)~7(h) 为输入 0.2g 时不同测点下有无隔振的反应谱对比图。在使用隔震支座后, 桩身反应谱在频率较小段处 (17~25 Hz) 略微减小, 隔振的使用减弱了上部结构的惯性相互作用, 降低了上部结构对承台和桩头位置的影响; 承台反应谱峰值出现小幅度右移, 承台频率增大, 低频反应谱减小, 高频段小幅增大, 设计时应注意是否因为卓越频率的增高而增大风险; 上部结构反应谱峰值对应的频率发生左移, 上部结构周期得到明显延长, 反应谱幅值大幅减小, 说明隔震支座可以很好地适用于

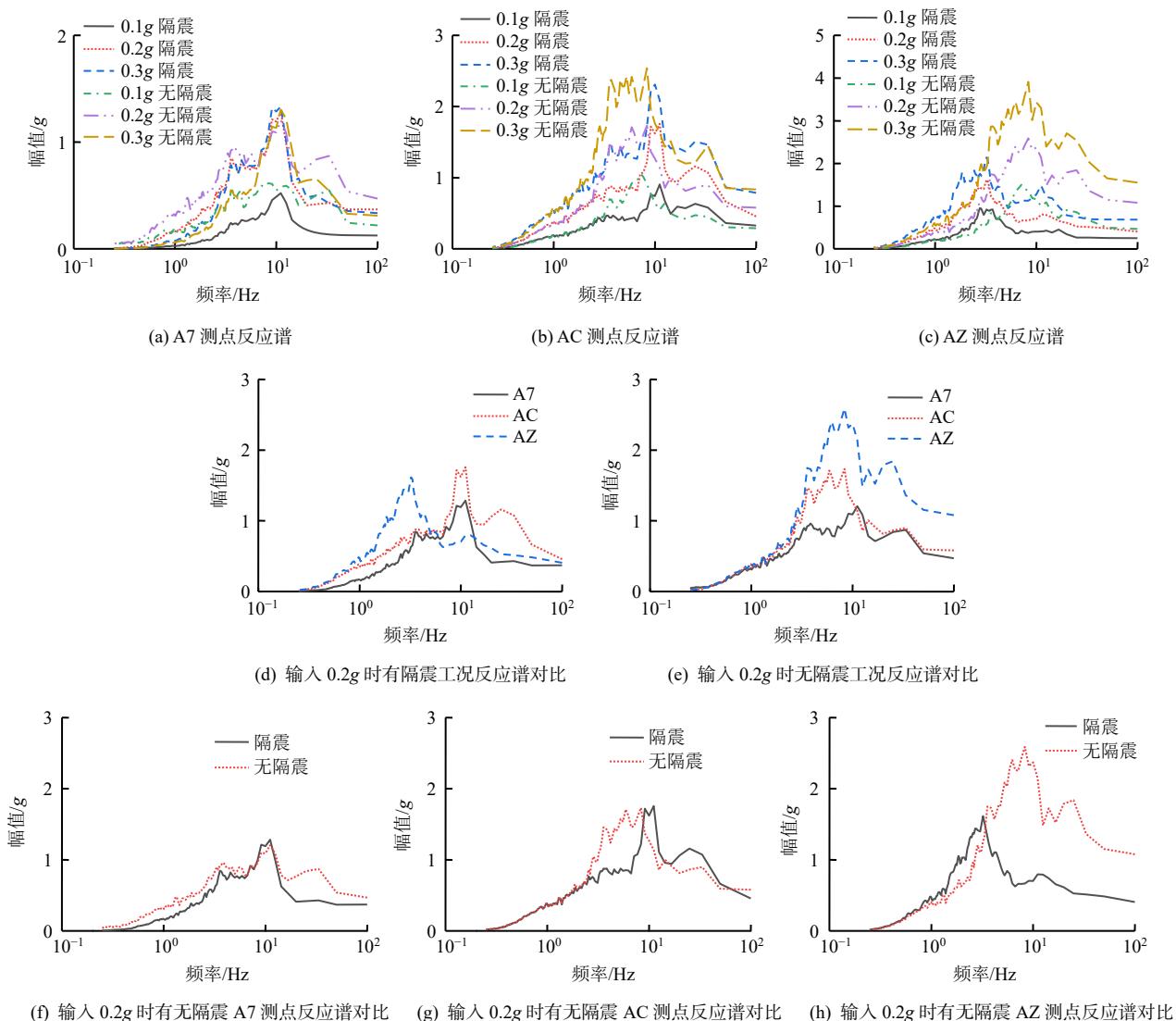


图 7 结构反应谱图
Fig.7 Structural response spectra

试验设计的结构，大大提高了结构的安全储备。

4.4 桩身内力分析

根据桩身应变测量结果可以计算出桩身的弯矩分布情况，桩身弯矩在桩基础设计中极为重要，是影响桩结构发生破坏以及桩身破坏形式的主要因素之一。弯矩的计算使用到梁单元的基本假设，可以通过如下公式将试验测量得到的微应变转化为桩身弯矩：

$$M = \frac{EI(\varepsilon_t - \varepsilon_c)}{2r} \quad (8)$$

式中： EI 为单桩抗弯刚度， E 为弹性模量， I 为截面惯性矩； r 为桩基础结构半径； ε_t 为受拉侧应变； ε_c 为受压侧应变。

不同工况、不同输入幅值下，桩身弯矩的包络图、峰值图和峰值对比图如图 8 所示。可以看到，在无隔震工况下，桩中弯矩有着明显激增，弯矩分

布呈现桩中部>桩顶部>桩底部的特点。改变输入加速度峰值，可以发现加速度峰值对弯矩的分布规律影响不大，只是使得各测点的弯矩值呈现线性增加的规律。在结构中引入隔震支座后，桩身内力分布发生了很大的变化。整体弯矩分布呈现漏斗状，表现出上大下小的规律。隔震大大减小桩身中部及底部的弯矩，但同时会加大桩顶的弯矩分布情况。将两种工况下的弯矩进行对比，发现在桩土接触深度小于 0.35 m 时，有隔震工况桩身弯矩有所增大；在桩土接触深度大于 0.35 m 时，弯矩减小；在接触深度超过 0.60 m 时，弯矩相较于非隔震工况明显降低。推测隔震的使用会减少桩身弯矩，但是会在一定程度上加大桩头附近的弯矩大小，桩-承台连接处为整个桩身的结构设计薄弱环节，需要加强设计。

4.5 上部结构位移分析

在不考虑隔震工况时，上部结构与承台上表面

之间几乎没有相对位移。所以对上部结构与承台之间的相对位移仅讨论有隔震体系。图 9、10 分别为

隔震体系下上部结构和承台的绝对位移以及上部结构相较于承台的相对位移，相关数据统计见表 5。

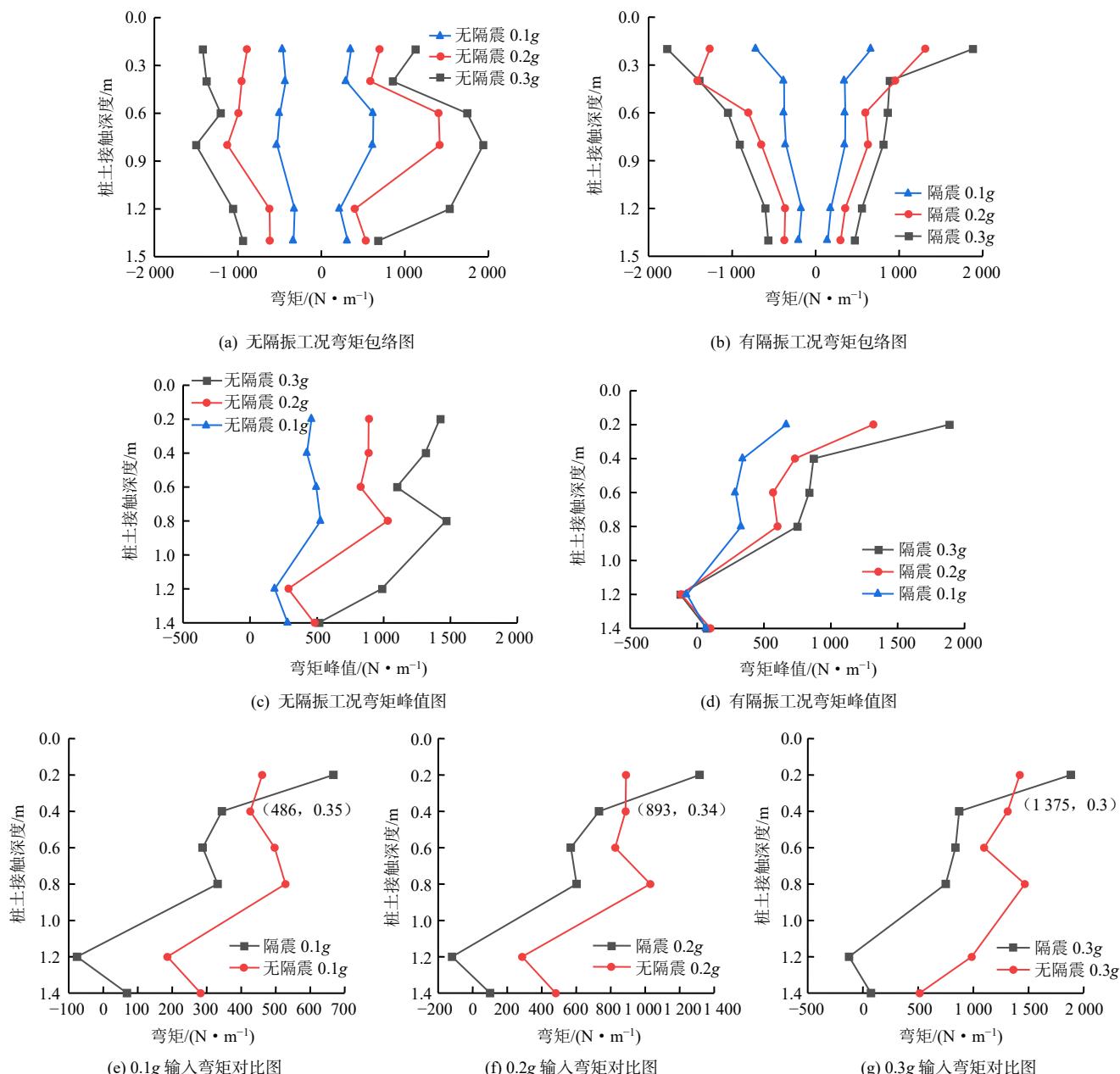


图 8 不同工况下弯矩对比图

Fig.8 Comparisons diagram of bending moment with and without isolation system

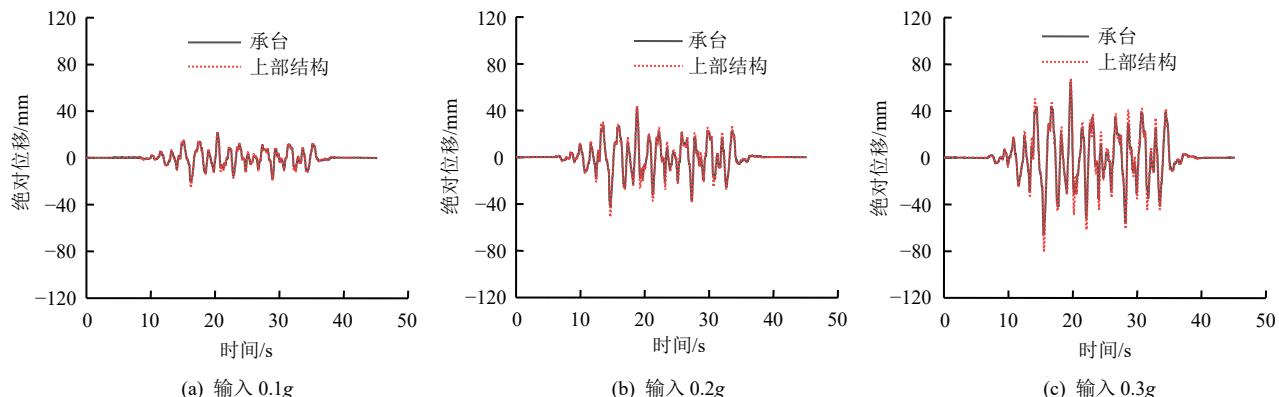


图 9 隔震工况上部结构绝对位移图

Fig.9 Absolute displacement diagrams of superstructure under isolation condition

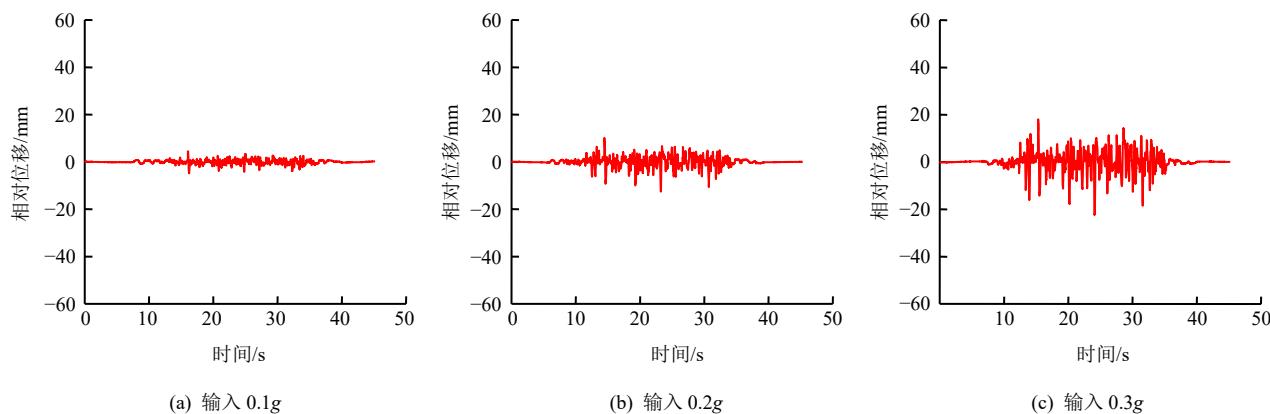


图 10 隔震工况上部结构相对位移图

Fig.10 Relative displacement diagrams of superstructure under isolation condition

表 5 隔震体系上部结构和基础位移对比

Table 5 Comparison of displacement between superstructure and foundation of isolation system

工况	承台位移峰值/mm	上部结构位移峰值/mm	相对位移峰值/mm
0.1g	21.4	25.4	4.8
0.2g	42.5	51.0	13.3
0.3g	65.7	79.5	24.6
0.4g	92.4	114.7	42.0
0.5g	105.0	137.7	63.0

相较于无隔震体系，有隔震体系上部结构位移出现了一定程度的增大，最多放大了约 1.3 倍。相对位移峰值最大为 63.0 mm，为支座直径的 0.31 倍，小于《橡胶支座第 3 部分：建筑隔震橡胶支座》(GB 20688.3—2006)^[22]中规定值，且有很大的富余值。考虑支座在大位移下失去功能，实际工程中必须对支座进行足尺或者缩尺性能测试。

5 结 论

通过开展大型振动台试验，本文讨论了有无隔震工况下上部结构和下部桩基础的动力响应，得出以下结论：

(1) 基础隔震支座主要影响承台和上部结构的自振频率。隔震支座会延长上部结构周期，减少上部结构加速度反应幅值，但会增大上部结构的反应位移。

(2) 隔震支座的使用会减少上部结构反应谱幅值,但是在某些频段区间内,会加大桩身的反应谱幅值,同时承台的反应谱特征频率有所增大。

(3) 相同荷载条件下, 设置隔震支座可以有效地减小桩基础结构的地震响应。隔震对于地震中的高频部分起到明显的抑制作用。对于低频部分, 有着一定的放大作用, 设计时需要考虑因为支座共振引发的风险。

(4) 隔震装置可以显著减小桩身中部及底部的弯矩，但会加大桩顶的弯矩。当使用隔震时桩-承台连接处为整个桩身的结构设计薄弱环节，需加强设计。

(5) 在土-桩-核电系统中进行减隔震设计时，不但需要考虑上部结构的动力特性，而且需要考虑土-桩-承台的动力特性，分析隔震对于下部基础体系的影响，避免因使用隔震支座引起桩基和承台等隐蔽性破坏。

参 考 文 献

- [1] 刘德稳, 谭平, 周福霖, 等. 核电站工程防灾减灾研究[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 149-153.
LIU De-wen, TAN Ping, ZHOU Fu-lin, et al. Research on disaster prevention and mitigation of nuclear power plants[J]. **Journal of Catastrophology**, 2014, 29(2): 149-153.
 - [2] 范世凯, 谭平, 刘德稳, 等. 核电站结构隔震研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5): 685-690.
FAN Shi-kai, TAN Ping, LIU De-wen, et al. Research on seismic-isolated nuclear power plant structure[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2015, 35(5): 685-690.
 - [3] 谭平, 范世凯, 徐凯, 等. 核电站反应堆厂房隔震研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2014, 13(6): 28-35.
TAN Ping, FAN Shi-kai, XU Kai, et al. Study on base-isolated nuclear power plant reactor structure[J]. **Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition)**, 2014, 13(6): 28-35.
 - [4] MALHOTRA P K. Method for seismic base isolation of liquid-storage tanks[J]. **Journal of Structural Engineering**, 1997, 123(1): 113-116.
 - [5] CHEN J Y, ZHAO C F, XU Q, et al. Seismic analysis and evaluation of the base isolation system in AP1000 N1 under SSE loading[J]. **Nuclear Engineering and Design**,

- 2014, 278: Doi:10.1016/j.nucengdes.2014.07.030
- [6] 庄海洋, 于旭. 土-桩-隔震结构动力相互作用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- ZHUANG Hai-yang, YU Xu. Dynamic interaction of soil-pile-isolation structures[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2016.
- [7] 陈浩文. 厚肉型橡胶隔震支座在地铁周边建筑物隔震中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- CHEN Hao-wen. Application of thick meat rubber vibration isolation bearings in vibration isolation of subway surrounding buildings[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [8] 李冬梅. 某核电站安全壳的隔震地震反应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- LI Dong-mei. Seismic response analysis of isolation of containment vessel of a nuclear power plant[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007.
- [9] 郑志. 核电站安全壳隔震可靠度分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- ZHENG Zhi. Reliability analysis of nuclear power plant containment isolation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [10] 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(增刊 1): 238-242.
- WANG Tao, WANG Fei, DING Lu-tong. Theoretical and experimental study on three-dimensional base-isolated nuclear power plant[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(Suppl.1): 238-242.
- [11] 周志光, 周龙定, 赵锦一. AP1000 核电厂模型基底隔震振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(2): 64-72.
- ZHOU Zhi-guang, ZHOU Long-ding, ZHAO Jin-yi. Shaking table test study of AP10000 base-isolated nuclear power plant[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2020, 40(2): 64-72.
- [12] 李小军, 侯春林, 戴志军, 等. 核岛结构设计地基场地及计算基底效应研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(8): 2201-2208.
- LI Xiao-jun, HOU Chun-lin, DAI Zhi-jun, et al. Research on site effects of soil layers and bedrock on designing the foundation of nuclear island structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(8): 2201-2208.
- [13] United States Nuclear Regulatory Commission. Use of seismic base isolation for nuclear structures, with participants from Bechtel[Z]. Rockville: Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, and University at Buffalo, 2004.
- [14] 倪国威, 张玉敏, 赵亚敏. 建筑结构基础隔震分析[J]. 地震工程与工程振动, 2006(3): 206-209.
- NI Guo-wei, ZHANG Yu-min, ZHAO Ya-min. Seismic isolation analysis of building foundation[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2006(3): 206-209.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Architecture Press, 2010.
- [16] 邵静, 姚菲, 徐玉华. 隔震支座技术的研究综述[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(3): 176-179.
- SHAO Jing, YAO Fei, XU Yu-hua. A review on isolation bearing technology[J]. **Sichuan Building Science Research**, 2014, 40(3): 176-179.
- [17] 李嘉瑞. 核岛结构模型桩基隔震体系振动台试验及数值模拟[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2021.
- LI Jia-rui. Shaking table test and numerical simulation of pile isolation system for nuclear island structure model[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2021.
- [18] 中国建筑科学研究院. JG 118—2000 建筑隔震橡胶支座[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- China Academy of Building Research. JG 118—2000 Rubber isolation bearings for building[S]. Beijing: China Standards Press, 2000.
- [19] 广州大学, 中国建筑科学研究院. CECS126: 2001 叠层橡胶支座隔震技术规范[S]. 北京: [出版社不详], 2001.
- Guangzhou University, China Academy of Building Research. CECS126: 2001 Technical specification for seismic-isolation with laminated rubber bearing isolators[S]. Beijing: [s. n.], 2001.
- [20] 景立平, 汪刚, 李嘉瑞, 等. 土-桩基-核岛体系动力相互作用振动台试验及数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 163-172, 207-208.
- JING Li-ping, WANG Gang, LI Jia-rui, et al. Shaking table test and numerical simulation of soil-pile-nuclear island system dynamic interaction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2022, 44(1): 163-172, 207-208.
- [21] V. S. Atomic Energy Commission. RG1.60 real design response spectra for seismic design of nuclear power Plants[S]. Washington D. C.: U. S. NRC, 1973.
- [22] 中国石油和化学工业协会. GB 20688.3—2006 橡胶支座第3部分: 建筑隔震橡胶支座[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- China Petroleum and Chemical Industry Association. GB 20688.3—2006 Rubber bearings—part 3: elastomeric seismic—protection isolators for buildings[S]. Beijing: China Standards Press, 2006.