

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2020.04.017

欢迎按以下格式引用:侯钢领,刘宇,王炳媛,等.核电站不同结构模型的比较教学研究[J].高等建筑教育,2020,29(4):117-121.

核电站不同结构模型的比较教学研究

侯钢领^{1,2},刘宇²,王炳媛²,孙梦涵²

(1. 中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 哈尔滨工程大学 航天与建筑工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:应用结构隔震减震技术减小核电站的地震响应,培养学生结构创新能力和兴趣。以某AP1000核电站屏蔽厂房为例,应用比较教学方法,比较传统非隔震模型、基础隔震模型、基础隔震—调谐质量阻尼(TMD)模型和TMD模型的地震响应,表明隔震减震技术可以大幅度提高核电站抗震安全性。本研究对结构抗震课程的隔震减震教学具有参考价值。

关键词:核电站;比较教学;基础隔震;调谐质量阻尼;基础隔震—调谐质量阻尼

中图分类号:G642.0 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2020)04-0117-05

比较教学由探究和研讨两个基本环节构成,是提高教学质量的重要方法之一。比较教学可引导学生在探究活动中获取感性认识,在研讨过程中获取理性知识。探究和研讨紧密相连,探究得越充分,研讨就越深入,研讨越深入,建立的概念就会更清晰准确^[1]。在土木工程学科领域中,伍云天等人开展了比较教学研究,给出了适合中国国情的教育改革方案^[2]。何结兵应用比较教学,进行了超静定梁的教学方法研究,取得了很好的教学效果^[3]。

建筑结构抗震学科受结构动力特性与地震响应的相互影响,涉及结构动力学,一直是土木工程教学的难点^[4]。徐赵东等应用MATLAB软件,进行了建筑结构模型的振动控制分析^[5]。陈清军和李文婷应用ANSYS软件,探讨了结构动力学的多元化教学,取得了良好的效果^[6]。马乐为等基于脉冲频响函数,进行了结构的动力响应分析,为频域分析奠定了基础^[7]。熊森等基于传递函数,进行了结构动力响应计算分析,表明了频域分析的优越性^[8]。上述教学研究成果为计算机仿真教学奠定了基础,也为应用比较教学方法开展结构抗震教学提供了工具。基于此,针对核电站特殊抗震安全要求和地震随机性的实际情况,设计比较教学模型,应用建筑结构隔振减震新技术提高核电站

修回日期:2020-06-13

基金项目:中国地震局地震工程与工程振动重点实验室开放基金“层间隔震核电站结构减震性能研究”(2020D21)

作者简介:侯钢领(1973—),男,哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院教授,博士,主要从事结构抗震和核电结构研究,(E-mail) hhhgl@sina.com。

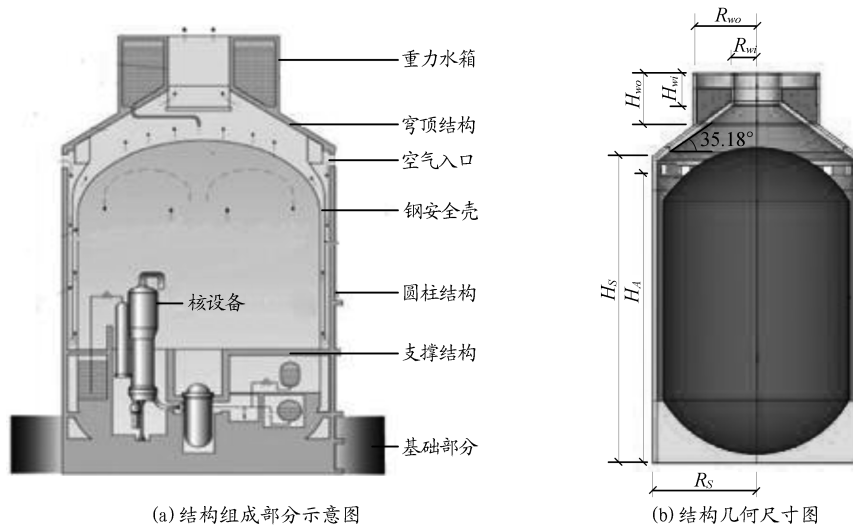
安全水平,培养学生学习兴趣和创新能力,提高建筑结构抗震课程的教学质量。

一、比较教学的模型设计

AP1000 核电站作为第三代核电站的代表^[9],是中国和美国核工业科研人员合作的结晶。以 AP1000 核电站屏蔽厂房(如图 1)为研究对象,设计比较教学模型,通过比较各个模型在时域的地震响应,提高教学质量。

基于结构抗震规范,根据教学需要,设计四个分析模型。屏蔽厂房各部分之间采用固定连接的传统结构,如图 2(a),即模型 A,称为非隔震模型。保持结构其他部分不变,仅将模型 A 基础与地基的固定支座连接修改为隔震支座连接,构建 BIS 屏蔽厂房,如图 2(b),即模型 B,称为基础隔震模型。采用陈建云等 AP1000 核岛基础隔震研究成果,BIS 屏蔽厂房的等效周期为 1.56 s,等效阻尼比为 10%^[10]。在保证重力水箱结构完整性的前提下,可以适当放大重力水箱及其液体水的地震响应。基于此,修改了重力水箱上部结构与下部结构的固定连接方式,采用可调整刚度和阻尼比的 TMD 支座连接,形成 TMD 结构,如图 2(d),即模型 D,称为 TMD 模型。将 TMD 结构与模型 B 基础隔震形式相结合,形成 BIS-TMD 结构,如图 2(c),即模型 C,称为 BIS-TMD 模型。

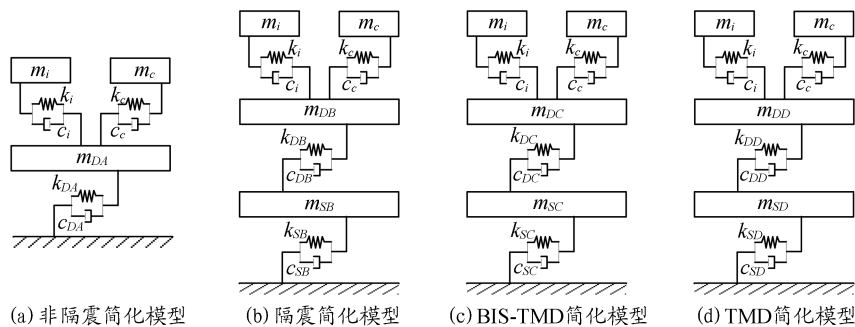
由于 AP1000 屏蔽厂房属于复杂结构,可采用集中质量简化模型和等价线性化模型,通过有限元分析给出各模型的简化分析模型和结构参数,详见图 2 和表 1^[11]。



(a) 结构组成部分示意图

(b) 结构几何尺寸图

图 1 AP1000 核电站核岛剖面图



(a) 非隔震简化模型

(b) 隔震简化模型

(c) BIS-TMD 简化模型

(d) TMD 简化模型

图 2 各个模型的简化分析模型图

表 1 屏蔽厂房不同模型的结构参数

模型	结构名称	质量(t)	等效刚度(kN/m)	等效阻尼系数(kN·s/m)
重力水箱	晃动模态 c	1.42×10^3	9.01×10^2	11.29
	冲击模态 i	1.45×10^3	3.61×10^6	2.89×10^3
模型 A	整体结构 S_{DA}	2.19×10^4	9.73×10^6	4.62×10^4
模型 B	上部结构 S_{SB}	2.19×10^4	9.74×10^6	4.62×10^4
	隔震层结构 S_{DB}	1.24×10^3	4.12×10^5	1.95×10^4
模型 C	子结构 S_{DC}	0.45×10^4	4.60×10^4	1.07×10^4
	主体结构 S_{SC}	1.87×10^4	4.12×10^5	1.95×10^4
模型 D	子结构 S_{DD}	0.45×10^4	8.29×10^5	4.03×10^4
	主体结构 S_{SD}	1.74×10^4	7.73×10^6	3.67×10^4

二、各模型的地震响应

各个模型 j 的运动方程统一表示为:

$$M\ddot{x}_j + C_j\dot{x}_j + K_jx_j = -M_j\boldsymbol{\iota}\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

式中 $j = A, B, C, D$; M_j 为质量矩阵; C_j 为阻尼矩阵; K_j 为刚度矩阵; $\boldsymbol{\iota}$ 为影响系数向量; x_j 、 \dot{x}_j 、 \ddot{x}_j 分别为模型 j 的相对位移、相对速度和相对加速度的向量; \ddot{x}_g 表示地震加速度, 选用 AP1000 地震波。

在 AP1000 地震波作用下, 应用式(1) 计算给出模型 j 的基底剪力 $F_{sj}(t)$ 、主体结构相对位移 $dis_j(t)$, 分别见图 3(a) 和图 3(b), 各个模型结构地震响应最大值见表 2。

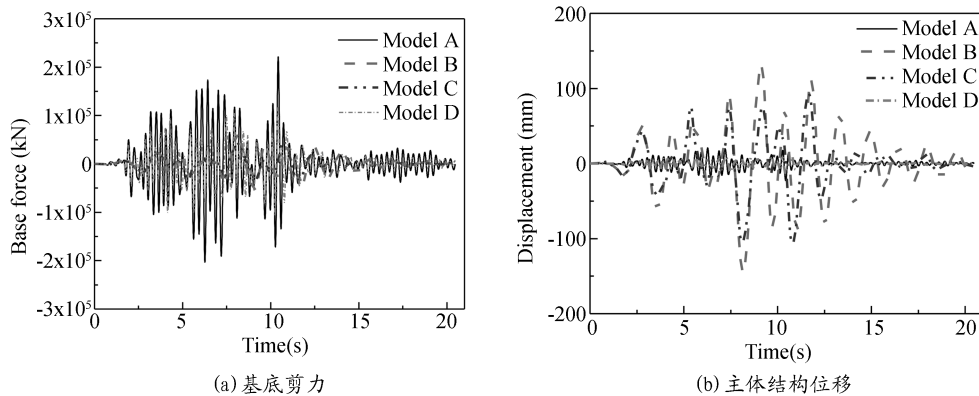


图 3 不同模型结构地震响应的时程图

表 2 不同模型地震响应最大值和地震响应比

单位: mm, KN

项目	模型 A	模型 B	模型 C	模型 D
	最大值	最大值	最大值	最大值
基底剪力	2.21×10^5	0.60×10^5	0.39×10^5	0.95×10^5
主体结构位移	22.60	144.15	90.84	12.19
主体结构层间位移	22.60	10.32	8.21	12.19
主体结构加速度	9 355.1	2 628.8	2 007.4	5 341.0

三、教学内容的比较

(一) 普通建筑与核电站的抗震比较教学

普通建筑的抗震设计方法通过结构变形和振动消耗地震输入能量,在极端地震作用下允许结构进入塑性阶段,甚至局部破坏阶段。

与普通建筑不同的是,核电站必须始终满足3项安全基本功能^[9],其中任何一项基本功能失效,都会导致安全事故:(1)具有安全停堆的基本功能,终止核裂变的发生,并且能够保持安全停堆状态;(2)具有余热导出功能,在有效时间范围内冷却系统能够安全地冷却堆芯,防止堆芯高温熔化;(3)具有包容密封功能,在任何情况下,应该将放射性物质包容在内安全壳内部,防止核辐射元素扩散。与核电站的三项安全基本功能一一对应,核电站必须满足的三项特殊抗震要求:(1)安全停堆功能要求,核设备与支撑结构不能有较大的相对位移、相对加速度和绝对加速度等地震响应;(2)余热导出功能要求,核支撑结构的地震响应应该控制在一定范围内,不允许发生结构破坏;(3)密封功能要求,保证内安全壳等结构不出现裂缝,或者较大的结构变形。

与普通建筑结构相比,核电站有更高的抗震要求,抗震设计方法和结构体系也有所不同,抗震设计还需要发展。

(二) 不同结构模型抗震响应的比较教学

比较各个模型的基底剪力,从大到小依次为模型A、模型D、模型B、模型C,模型A的基底剪力最大,模型C的最小,仅为模型A的17.7%。

比较各个模型的结构位移,从大到小依次为模型B、模型C、模型A、模型D,模型B的结构位移最大,模型D最小。这主要是由于在TMD吸振作用下,模型D在基底剪力和主体结构位移两方面都有较好的减震效果。基础隔震有效地延长了结构周期,减小了基底剪力和加速度地震响应,但放大了结构位移。比较各个模型的层间位移,模型B和模型C的层间位移很小,这是因为隔震结构的位移主要集中在隔震层。

从不同模型的地震响应分析来看,采用隔震减震技术可以大幅减小核设备及支撑结构的地震响应,特别是BIS-TMD模型即模型C,减震效果最优,更好地综合了模型B和模型D的优点。

应用比较教学,通过比较不同模型的地震响应,比较普通建筑与核电站抗震要求的不同,有利于学生理解结构抗震课程的隔震减震技术教学内容,掌握隔震减震技术在减小结构地震响应中所发挥的作用,激发土木工程专业学生的科技创新兴趣和能力。

参考文献:

- [1]李运模. 比较教学法论略[J]. 中南民族大学学报(人文社会科学版), 2000, 20(3):125-127.
- [2]伍云天,李英民,杨溥,刘立平. 中美结构类课程教学比较研究[J]. 高等建筑教育, 2012, 21(2):33-36.
- [3]何结兵. 变形比较法解简单超静定梁的教学方法设计[J]. 力学与实践, 2007, 29(2):66-67.
- [4]王振科,陈力,王晓东,赵灿,侯钢领. 应用MatLab软件探讨结构动力响应时域和频域数值模拟教学[J]. 高等建筑教育, 2017, 26(3):119-123.
- [5]徐赵东. MATLAB语言在抗震工程中的应用[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [6]陈清军,李文婷. 结构动力学课程多元化教学方法探讨[J]. 高等建筑教育, 2015, 24(2):47-52.
- [7]马乐为,吴敏哲,谢异同. 基于脉冲频响函数的MATLAB动力方程求解方法[J]. 世界地震工程, 2003, 19(2):68-71.

- [8]熊森,周桂祥,陈谋. 基于 MATLAB 和传递函数的结构动力响应计算[J]. 福建建筑, 2007(12):34-36.
- [9]Schulz TL. Westinghouse AP1000 advanced passive plant[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006,236 (14-16) :1547-1557.
- [10]Chen JY, Zhao CF, Xu Q, Yuan CY. Seismic analysis and evaluation of the base isolation system in AP1000 NI under SSE loading [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014,278 (7): 117-133.
- [11]侯钢领,王炳媛,孙海,宋天舒,潘蓉. AP1000 核电站屏蔽厂房 BIS-TMD 新型结构及其抗震性能研究[C]. 第十届全国地震工程学术会议,2018.

Comparative study on various structural models of nuclear power plants

HOU Gangling^{1,2}, LIU Yu², WANG Bingyuan², SUN Menghan²

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, P. R. China; 2. College of Aerospace & Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To cultivate students' ability and interest in structural innovation of the reduction effective of seismic response of nuclear power plants (NPPs) by base isolation and shock absorption technology is shown. Considering AP1000 NPPs shield building as an example, the seismic performance of NPPs with the different design configurations of non base isolation, BIS, BIS-TMD and TMD is simulated by comparative teaching method. And the improvement of seismic safety level of NPPs by base isolation and shock absorption technology is tested. This study has reference value for teaching structural seismic design.

Key words: nuclear power plants (NPPs); comparative teaching; base isolation; tuned mass damping (TMD); base isolation-tuned mass damping (BIS-TMD)

(责任编辑 梁远华)