doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2020.05.021

欢迎按以下格式引用:周小龙,刘章军,卢海林,等.工程案例与虚拟实验在建筑结构抗震课程教学中的应用[J].高等建筑教育,2020,29(5):149-155.

工程案例与虚拟实验在建筑结构抗震课程教学中的应用

周小龙,刘章军,卢海林,刘胜兵

(武汉工程大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉　430073)

摘要:建筑结构抗震课程是土木工程专业主干课程。针对该课程内容多、理论深奥、概念抽象,传统教学模式效果差的现状,提出工程案例与虚拟实验相结合的教学模式。分析建筑结构抗震课程教学现状和问题,阐述工程案例与虚拟实验组合教学模式的特点,介绍工程案例与虚拟实验组合教学模式教学改革策略和课程教学内容的设置,最后以反应谱理论知识讲解为例,详细介绍案例教学与虚拟仿真混合教学模式在建筑结构抗震课程教学中的实践应用。教学中以抗震设计基本理论与方法为主线,注重师生互动,引导学生从可视化的地震情境中提出问题、分析问题直至解决问题,强调启发式教学,加深学生对抗震基本概念和原理的理解,强化学生综合能力的培养。

关键词:案例教学;虚拟仿真;建筑结构抗震;教学改革

中图分类号:G642.0;TU3　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1005-2909(2020)05-0149-07

地震灾害是造成我国人员伤亡和财产损失的主要自然灾害之一。近年来,我国破坏性地震频发,平均年发生 20 余次,仅 2019 年 5 级以上地震就高达 32 次。随着国民安全防范意识的提高,国家越来越重视建筑物的抗震防灾需求。2001 年至今,我国抗震规范已进行 2 次全面修订,2 次局部修订,是土木工程领域修订最频繁的国家标准。同时,2016 版地震动区划图也全面取消了非抗震设防区,不仅设防地震动参数取值全面提高,而且设防地区由县市细化到街道和乡镇。这些强制性标准的修订均表明加强抗震设计对减轻结构地震灾害的重要意义。建筑结构抗震课程作为学习抗震设计理论和抗震设计方法的主要载体,在高等学校土木工程专业课程中具有重要地位,均被各校设置为专业必修课或限选课。因此,建筑结构抗震课程教学活动的高效开展对教学质量的提高,以及强化学生的专业能力具有重要作用。

建筑结构抗震课程理论深奥、综合实践性强,传统教学模式已难以保证教学效果,各高校结合

修回日期:2019-12-15

基金项目:武汉工程大学教学改革研究项目(X2017015)

作者简介:周小龙(1983—),男,武汉工程大学土木工程与建筑学院副教授,博士,主要从事工程结构抗震研究,(E-mail)zhouxiaolong@cqu.edu.cn。

自身实际积极开展一些教学改革实践。同济大学[1]将虚拟仿真实验引入建筑结构抗震课程教学，强调以概念设计为主线的教学理念；武汉大学[2]提出教学内容应进行合理取舍，教学过程中注重教学与规范的结合；大连理工大学[3]利用微博的在线功能开展教学改革的实践探索；东南大学[4]基于实际震害调查的系统性分析，提出了以基本概念为主导的教学方法；南京工业大学[5]创建“多媒体-工程案例-数值仿真”的教学模式，将抽象的教学内容形象化，提高课程教学效果。从上述各校的改革来看，将课程理论教学与工程实践教学紧密结合是建筑结构抗震课程教学改革的基本思路，同时，注重以提高学生兴趣为导向来改革教学方法，有助于调动学生的主观能动性，从而达到面向产出的创新人才培养目的。

一、建筑结构抗震课程教学现状与问题

建筑结构抗震课程的主要特点：

(1)理论深奥，对学生数学与力学知识要求高。地震作用与抗震设计基本理论是建筑结构抗震课程的基本教学内容，结构地震反应运动方程和反应谱分析涉及的理论知识抽象难懂，公式繁杂，要求学生具有较深厚的数学和力学功底。

(2)综合性强，课程教学内容涉及学科面广。建筑结构抗震课程涉及高等数学、线性代数、结构力学、结构动力学、混凝土结构、钢结构等数学和专业课程，知识点零碎独立。课程学习需要学生能够将独立的知识综合串联起来，并能解决复杂工程问题。

(3)实践性强，建筑结构抗震知识更新快，实用性强。例如，结构内力调整和抗震构造措施均涉及大量规范条文的应用，要求学生通过课程学习，在掌握基本分析方法和实际震害的基础上逐步积累工程经验，培养工程素质。

建筑结构抗震课程教学内容与课程属性导致在实际课程教学中存在诸多问题，主要体现在：

(1)课程实际学时远低于正常完成教学内容所需学时。目前大部分重点本科院校学时安排为32~40学时，但随着2019年新一轮培养方案修订的启动，各高校均大幅提高了人文社会学科类课程的总学分，以致建筑结构抗震课程学时被压缩到24~32学时。然而课程教学内容不管在广度还是在深度上都较难有压缩空间，课程大部分内容将应用在以建筑上部结构设计为课题的毕业设计中，因此教学内容与教学学时之间存在巨大矛盾，必须通过优化教学方法和课程内容来提高教学效率。

(2)学生知识储备不能满足课程学习对力学和数学知识的需求。课程内容涉及高等数学、线性代数、结构力学以及结构动力学等学科的知识较深奥，大部分学生在学习该课程时感觉有难度。笔者在一次随堂问卷调查中发现，“知识点多，自身基础差，数学和结构动力学知识掌握不足，导致课程内容听不懂”的学生比例占到57%。

(3)采用传统学习方法学生较难获得解决复杂工程问题的能力。建筑结构抗震课程注重结构整体设计和概念设计，学习过程中学生习惯于采用以构件设计为主的课程学习方法(如混凝土结构设计原理和钢结构设计原理等课程)，重视单根构件设计的基本理论，而忽视了知识的相互联系，造成基本理论在学生脑海中仅仅是个空洞的概念，无法用于解决实际复杂工程问题。

(4)课程教学重理论轻实践，学生难以将理论知识应用于实际工程[6-7]。大部分建筑结构抗震课程教材内容偏重基本理论的讲解，课后习题和课程考试也注重基本理论知识，传统课程教学较少涉及工程实践，以致学生对抗震相关概念缺乏认识，更不能将理论知识应用于工程实践。

上述对建筑结构抗震课程内容特点，以及当前教学存在问题的总结分析，可以看出仅采用传统教学方法不利于培养学生应用基本原理解决复杂土木工程问题的能力，也难以培养学生基于技术

标准分析、评价并提出复杂工程问题解决方案的能力,很难达成面向产出的课程教学目标。

二、工程案例与虚拟实验组合教学模式的特点

案例教学是根据教学目标将实际工程典型化处理,精心设计成学生能够系统学习的案例,培养学生“基于对案例的思考,提出问题、分析问题并解决问题的能力”的一种教学媒介[8]。案例教学法以实际工程案例为依托,从工程现象出发,通过引导学生自主学习,帮助学生发现问题、提出问题并找出解决问题的办法。案例教学法注重启发与互动,需要学生自己去发现和解决问题,能够极大地激发学生的学习兴趣,培养学生的工程素养。在学生自主探索后再由教师将探寻解决办法过程所涉及的知识点进行讲解,利用新知识解决实际问题,有助于加深学生对相关知识的理解。例如在讲授反应谱理论前,先通过展示案例和虚拟实验,激发学生学习兴趣,然后引导学生课前自学,掌握单或多自由度体系运动方程的建立方法,再顺势要求学生课前学习 Duhamel 积分过程与方法,学习效果有了明显提高。

虚拟实验能够为学生生动演示结构整体在地震作用下的动力响应和破坏特性,也能够清晰展示结构构件的损伤演变过程与破坏形态。虚拟实验能够将传统 PPT 教学中不容易描述清楚的难点问题直观清晰地展示出来,仿真性高,有助于学生融入课堂教学,更快地获取课程知识,提高教学效率。同时虚拟实验能够模拟大量整体结构在地震作用下的动力表现,满足建筑结构抗震课程注重“抗震概念设计”教学主旨的需求,避免了传统课程教学重理论轻实践的不足。

工程案例与虚拟实验组合教学模式,将课程内容根据知识模块划分为若干单元,每个知识单元精心设计工程案例,并将数值仿真和虚拟实验应用到各知识模块的学习中。对于复杂、抽象,较难通过理论讲解清楚的知识点,可借助虚拟仿真实验演示结构构件在地震作用下的真实情境,既能激发学生的学习兴趣,又能强化学生对抗震基本原理的理解和应用。

三、工程案例与虚拟实验组合教学模式的应用

(一)教学改革策略

建筑结构抗震课程理论性强,知识抽象。例如反应谱、振型分解、减震隔震、性能设计等抗震基本概念抽象难懂,学生初次接触时理解上有困难,不容易掌握和应用。为了激发学生学习兴趣,引导学生深刻理解教学内容中的抽象知识和基本理论,笔者提出工程案例与虚拟实验组合教学模式,并应用于教学实践,取得了较理想的效果。工程案例与虚拟实验组合教学模式主要内容和特点有以下几方面。

1. 合理安排教学内容,精心设计教学案例

课程教材内容编排体系一般较完整,各知识点之间的逻辑关系清晰,结构严谨,传统教学模式按照教材内容按部就班地开展教学,所有教学内容均会讲解且不重复。但采用案例教学法,如果案例未经过精心设计,可能导致课程教学逻辑关系不严谨,教学内容缺失或重复。因此,教学案例应根据建筑结构抗震课程教学目标精心设计,典型化处理,尽量做到每个案例均具有代表性,既要将课程的基本理论融入案例中,又要根据教学目标顾及不同的侧重点。可以说,案例设计质量的好坏直接影响案例教学法的应用效果。上课前教师应让学生充分理解案例的背景知识,了解解决案例问题可能需要涉及的知识,并给学生提供或让学生自主查阅相关资料和理论知识,引导学生在课前开展充分的小组讨论。在开展案例教学过程中,为处理好课程学时少与教学内容多的矛盾,应根据课程教学大纲重新优化和调整知识模块,针对各知识模块设计案例,组建案例库。

2. 震害案例贯穿始终,激发学生学习热情

传统课堂教学一般按照提出概念—讲解理论—工程应用的顺序讲解,但对于理论性强又比较抽象的工程结构抗震课程内容,如上课伊始就提出不容易理解的概念,势必会极大地打击学生的学习积极性。基于实际震害的案例教学,则从工程问题出发,逆向教学[9],按照案例描述—提出问题—给出解决方案—引入新知识—讲解新知识基本概念和基本理论—解决问题的教学路径进行,能充分发掘学生自主学习的潜能,激励学生主动思考,大大调动学生学习的热情,提高学习效率。

3. 理论与实践穿插进行,改善学生课堂学习体验

对于复杂抽象的地震工程学科知识,学生普遍存在理解困难、学习效率低的问题。如:结构构件在地震作用下的损伤演变、多自由度体系在地震作用下的动力响应、反应谱理论的实质与理论依据等内容,由于受实验条件和经费的限制,大多数高校学生无法通过真实实验系统观察这些动力学问题的演变过程或损伤结果,虚拟实验应多侧重这些无法或较难在实验室大批次重现的地震损伤现象。虚拟实验教学在开展过程中除了完整演示实验过程外,更应结合工程案例,将虚拟实验与知识理论融为一体,通过具有视觉冲击力的实验模拟,激发学生兴趣;通过及时提出工程问题,引导学生积极思考解决问题的方法;通过学生自主思考问题,顺势讲解解决问题的基本原理和方法。虚拟实验重在帮助学生深化理解理论教学内容,培养学生工程意识和解决复杂工程问题的能力。因此,如何合理编排组织虚拟实验教学活动,并将教学内容与工程案例有机结合是教学实践过程中需要重点解决的问题。同时,教学中也需要不断优化教学模式,改善学生课堂学习体验。

(二)教学内容的设置

建筑结构抗震课程内容多,学时少,只有对不同教学内容合理分配学时,才能在有限的学时内圆满完成课程教学任务。根据课程各知识模块的性质,在课堂教学活动中应重点讲解较难理解和重要的知识点,对于概念简单又容易理解的知识点,可引导学生通过对精心设计的工程案例的思考和资料的查阅来获取和掌握。

建筑结构抗震课程教学内容一般分为八章,分别为:(1)地震概论与抗震设计基本原则;(2)场地和地基;(3)地震作用与抗震验算;(4)钢筋混凝土多高层房屋抗震设计;(5)砌体房屋和底部框架砌体房屋抗震设计;(6)单层钢筋混凝土厂房抗震设计;(7)多高层建筑钢结构抗震设计;(8)结构减震控制技术。从课程培养目标和教学大纲来讲,教学内容可以分解为六大知识模块,每个知识模块均可通过精心设计的综合工程案例来进行讲解,具体为:(1)设计某次大地震各类建筑结构损伤破坏的案例,讲解地震的成因、地震基本概念、地震波和地震记录以及烈度等相关知识;(2)设计地震区某框架结构抗震策略的案例,讲解“三水准”抗震设防标准、“两阶段”抗震设计方法、建筑重要性类别等知识;(3)设计某框架结构地震反应的案例,讲解结构抗震基本参数的概念和确定方法;(4)设计地震作用计算方法的案例,讲解地震反应谱的基本理论;(5)设计典型结构的抗震设计案例(包括框架结构、剪力墙结构、砌体结构、钢结构等),讲解抗震概念设计、抗震构造措施、抗震设计方法等知识;(6)设计框架结构减、隔震控制技术的工程案例,讲解主动控制、被动控制的基本概念和减、隔震的设计方法。贯穿六大案例的教学主线为建筑抗震设计准则与方法,案例所包含的每个知识模块均围绕该主线构建。

四、教学实践与反馈

(一)教学实践

反应谱理论反映了地震激励作用的频谱特性和动力放大效应,是目前抗震研究动力响应的主

要方法[10]。其概念抽象,理解起来较困难,采用传统教学模式学生学习效果差。本文以反应谱理论的知识讲解为例,介绍工程案例与虚拟实验混合教学模式在工程结构抗震课程教学中的应用实践。

1. 设计案例,引出反应谱的概念

案例通过两组震害照片和四组虚拟仿真实验视频进行展示。两组震害照片分别为:汶川地震中北川县城某五层框架结构完全倒塌的照片;汶川地震中北川县城某十层框架剪力墙结构基本完好的照片。四组虚拟仿真实验视频包括:(1)多组同质量不同刚度单自由度体系结构在同一地震波输入条件下的动力反应;(2)多组同一框架结构在不同场地条件和震中距地震波输入条件下的动力反应;(3)多组不同框架结构同一条地震波输入条件下的动力反应;(4)同一框架结构设置隔震支座与不设置隔震支座在地震作用下的动力反应。通过震害照片和虚拟仿真实验视频给学生视觉带来强烈冲击,引发学生学习新知识的渴望,引导学生思考"为什么不同建筑在同一地震波输入下和相同建筑在不同地震波输入下地震反应不同"的现象。

在学生针对上述现象开展充分讨论后,提出问题:影响结构地震反应大小的因素有哪些?经过学生充分思考和讨论后指出,"结构的地震反应除了与结构自身动力特性有关外,还与地震动三要素有关(振幅、频谱和持时)",进而讲解影响地震动三要素的主要因素:震级、距离、场地土、土层厚度、地形以及地下水等。紧接着指出"对于工程结构的抗震设计来说,最大地震反应具有重要意义。工程中一般用相对位移、相对速度和绝对加速度来全面反映结构在地震作用下的反应状况"。

利用 Duhamel 积分详细推导单自由度体系最大相对位移、最大相对速度和最大绝对加速度响应计算公式,引出反应谱的基本概念,让学生建立"反应谱不仅可以计算结构的最大反应,还可以用来描述地震动特性"的概念。

2. 反应谱的特点与性质

根据 Duhamel 积分推导的最大相对位移、速度和最大绝对加速度响应计算公式,画出位移反应谱、速度反应谱和加速度反应谱的图形,引导学生通过观察体系最大反应与周期 T 的关系,详细了解各反应谱的特点和用途。例如:位移反应谱主要反映地面运动中长周期分量的影响;速度反应谱较好地反映了地面运动中各周期分量的影响;加速度反应谱较好地反映了地面运动中短周期分量的影响。

3. 反应谱的标准化与设计反应谱

通过前述反应谱图形,再次结合第二组虚拟仿真实验结果,引导学生理解对于不同地震动输入的反应谱形状相差很大,无法直接指导实际工程设计,需要标准化。在标准化过程中,指导学生理解纵坐标标准化可以消除地震强度不同对反应谱的影响,横坐标标准化可以消除不同场地类别对反应谱的影响,使学生深刻体会反应谱的本质:"设计反应谱代表了一个场地可能的全部地震事件,而不是一次地震。"

4. 反应谱与地震作用的关系

基于上述对反应谱的学习和理解,指出反应谱能较好地反映地震动强度对结构响应的影响。进一步给学生讲解抗震规范中单自由度体系地震作用,采用地震影响系数与重力荷载代表值乘积的形式表示,地震影响系数为加速度反应谱与重力加速度的比值、形状和含义完全等同于加速度反应谱。结合地震影响系数的概念,讲解谱曲线的分段计算公式和特征。最后,提出思考题:"弹性反应谱怎样考虑抗震设防目标中的中震可修、大震不倒?"引导学生课后积极总结和掌握反应谱的本质和工程应用。

5. 小结

反应谱给出了结构体系弹性地震响应的最大变形量,是地面运动强度的一个重要标志。反应

谱理论通过工程案例与虚拟实验混合教学模式开展教学实践,将抽象的理论知识可视化,强化了学生对基本理论的理解,同时也加深了学生对理论知识运用于解决工程实际问题的认识。

(二)教学反馈

2019 年上半年笔者在武汉工程大学 2016 级土木工程专业建筑结构抗震课程教学中开展了案例与虚拟实验组合教学模式的教学实践,为了解教学改革的实施效果,开展了两项工作:一是在课程结束时就混合教学模式学生的接受程度、学生对教学内容的掌握程度等内容组织了问卷调查。全年级 73 名学生均接受了调查并返回了问卷,部分问卷调查内容及统计结果如表 1 所示。根据问卷调查结果可知,大部分学生对案例与虚拟实验相结合的教学模式改革是认可的,对取得的效果也是肯定的。二是课程所有考核环节结束后,针对毕业要求对该门课程进行了达成情况评价分析。结果表明:该课程所支撑毕业要求达成度从传统教学模式下的 0.72 左右上升到教学模式改革后的 0.83,改革取得了明显的效果。

表 1 问卷调查部分内容与统计结果

问卷调查内容	选项(百分比)		
1. 你是否接受案例与虚拟实验组合的教学模式改革?	是(90.4%)	一般(9.6%)	不是(0%)
2. 案例与虚拟实验组合教学模式是否加深了你对课程内容的掌握?	是(84.9%)	一般(9.6%)	不是(5.5%)
3. 案例与虚拟实验组合教学是否激发了你自主学习的积极性?	是(76.7%)	一般(15.1%)	不是(8.2%)
4. 课程教学模式改革是否促进了你进一步学习相关力学与数学知识?	是(56.2%)	一般(34.2%)	不是(9.6%)
5. 你是否认为本学期的课程教学模式有必要在下一届继续开展?	是(94.5%)	一般(5.5%)	不是(0%)
6. 通过课程教学模式改革,你的收获如何?	很大(68.5%)	一般(26%)	不明显(5.5%)

(三)课程考核

传统教学模式的课程评价一般由期末考试和平时成绩组成,比重大约各占 70%和 30%。而案例教学强调学生的主动参与程度与学习过程,对知识的掌握也重点关注学生能否及时消化吸收和系统理解。因此,采用案例与虚拟仿真相结合的教学模式时,传统考核方式就存在较大局限性,应同步进行改革。笔者在建筑结构抗震课程教学改革中强调过程学习,考核也重在过程管理,故将学生平时考核成绩在总成绩中的权重提高到 40%,同时在学期初提前为学生下发综合课程题目:“某地区建筑结构抗震设计方法与准则”。每次案例教学结束后学生需完成课程综合题目中所对应的该案例授课内容的案例分析报告。教师在案例说明书中也会根据每个案例所涉及知识点的多少与难易程度,对学生每次需要完成的案例分析报告提出具体任务和要求,并给出评价标准。课程综合题目由各个案例分析报告分章节组成,其完成进度随着课堂教学的开展同步推进。同时,每个案例分析报告涉及内容均存在内在联系,学生在完成过程中能切身体会到知识学习的积累过程,更能从全局把握学习内容。

五、结语

建筑结构抗震课程理论深奥、实践性强,通过优化教学内容,精心设计教学案例,采用工程案例与虚拟实验相结合的混合教学模式,能给学生带来视觉上的冲击,激发学生学习兴趣。同时,教学内容从知识的应用出发,通过观察现象,提出问题,引出解决方法,进而讲解基本原理和设计方法,最后再将原理应用于工程实践,整个教学过程由浅至深,学生与教师、学生与学生互动性强,学习效率高,有效解决了学生不愿学的问题,对学生综合能力的培养具有重要促进作用。但同时也应注意

到,工程案例与虚拟仿真组合教学模式在实践中也存在若干问题,如优质案例库的建设、学生学习过程的准确评价和考核、如何不过度增加教师负担等问题,均需要在课程教学实践过程中逐步探索,以进一步完善工程案例与虚拟仿真组合教学模式。

参考文献:

[1]鲁正, 龚依捷, 周颖, 等. 虚拟实验在建筑结构抗震课程教学中的应用 [J]. 高等建筑教育, 2019, 28(2): 106-110.
[2]胡晓斌, 徐礼华. 建筑结构抗震设计课程教学实践的几点思考[J]. 高等建筑教育, 2015, 24(5): 120-122.
[3]霍林生, 李宏男. 新媒体视野下建筑结构抗震微博教学实践[J]. 高等建筑教育, 2014, 23(2): 126-128.
[4]冯若强. 基于实际震害的工程结构抗震与防灾课程教学改革 [J]. 教育教学论坛, 2018(7): 138-139.
[5]孙广俊, 李鸿晶. "多媒体-工程案例-数值仿真"模式结构抗震原理教学探讨[J]. 高等建筑教育, 2015, 24(6): 74-78.
[6]颜军, 王振波.《工程结构抗震设计原理》教学改革与探讨 [J]. 攀枝花学院学报, 2015, 32(2):4-6.
[7]王建强, 曾力, 赵湘育. 建筑结构抗震设计教学探索[J]. 高等建筑教育, 2010, 19(2): 122-124.
[8]熊浩. 岩土工程类课程案例教学方法探索[J]. 高等建筑教育, 2017, 26(4): 64-66.
[9]陈怡, 黎新蓉, 唐思远. 基于 CBE 理念的逆向案例教学法在土木工程专业的教学研究[J]. 教育现代化, 2018, 5(49): 78-80.
[10]张荣兰, 陈桂平. 建筑结构抗震设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

Application of engineering case and virtual experiments in teaching of seismic design of building structures

ZHOU Xiaolong, LIU Zhangjun, LU Hailin, LIU Shengbing
(*School of Civil Engineering and Architecture*, *Wuhan Institute of Technology*, *Wuhan 430073*, *P. R. China*)

Abstract: Seismic design of building structures is a major course of civil engineering. Based on its characteristics of numerous contents, deep theory, abstract conception, bad effect of traditional teaching mode, a teaching mode combining engineering case and virtual experiments is proposed. The present condition and problems of seismic design of building structures are analyzed in this paper and the modes and characteristics of "engineering case-virtual experiments" teaching model is summarized, then the teaching reform strategy and curriculum teaching content setting are stated, at last, taking reaction spectrum theory as an example, the practice application of the teaching model are introduced in detail. The teaching model takes basic theory and method of seismic design as the main line. Visualization of a seismic situation helps students submit, analyze and solve problems. Meanwhile, the teaching model emphasizes heuristic teaching, students' understanding of basic concept and principle of seismic is deepened, and students' comprehensive ability is strengthened.

Key words: case teaching; virtual simulation; seismic design of building structures; teaching reform

(责任编辑　王　宣)