doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2024.06.017

欢迎按以下格式引用:潘毅,张兰林,刘方琳,等. 教具在建筑结构抗震教学中的应用[J]. 高等建筑教育,2024,33(6):127-135.

教具在建筑结构抗震教学中的应用

潘　毅[1,2], 张兰林[1], 刘方琳[1], 张昊宇[3]

(1.西南交通大学 土木工程学院,四川 成都　610031;2.抗震工程技术四川省重点实验室,四川 成都　610031;
3.中国地震局工程力学研究所,黑龙江 哈尔滨　150010)

摘要:建筑结构抗震设计已成为土木工程专业本科阶段的一门重要课程。该课程理论内容较多,概念抽象难懂,传统教学方法难以将复杂原理进行具象化演示。针对抗震教学中的问题和难点,将可操作的教具引入课程教学,丰富教学手段,帮助学生理解教学内容中抽象的概念和理论。以单自由度体系的地震反应分析、杜哈梅积分、地震反应谱3个知识点为例,给出了教具在抗震教学中的应用案例,通过地震响应现象的展示,引导学生主动思考,让枯燥难理解的理论易懂。根据问卷调查的反馈信息,并与未采用教具教学的年级进行了对比,采用教具教学的年级取得了良好的教学效果,学生的学习兴趣得到激发,自主学习的能力得到增强,学习成绩得到提升,课堂教学的交互体验感更好。

关键词:建筑结构抗震;自制教具;专业软件;教学实践;教学改革

中图分类号:G420;TU352.1　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1005-2909(2024)06-0127-09

我国是地震多发国家,尤其近年来四川省地震频发。2008—2022年,四川省先后发生了29次5.0级及以上的地震[1-2]。建筑结构抗震是减轻地震灾害的有效技术手段之一,而建筑结构抗震设计是土木工程专业本科阶段的一门重要课程。该课程对培养掌握抗震设计理论和方法的专门人才有重要作用,这也有助于2021年国务院颁布的《建设工程抗震管理条例》[3]顺利实施。

建筑结构抗震课程需要有理论力学、结构动力学、地震工程学、工程荷载与可靠度设计原理、混凝土结构设计原理、钢结构设计原理等理论基础,涉及的抗震概念比较抽象,抗震计算方法不易理解[4]。传统的抗震教学模式主要以课堂教授为主、学生讨论为辅。但随着“压缩课时、提高效率”的教学改革迫使专业课程的理论教学课时减少,如何在有限的教学时间内牢牢吸引学生的注意力,让学生掌握抗震课程的精髓,并培养自主和终身学习能力,成为当前理论课程教学改革面临的紧迫问题。对此,一些高校对建筑结构抗震课程进行了教学改革。哈尔滨工业大学[5]比较各国抗震设计方法,加强了课程间的联系以增强学生课程知识的系统性,提升建筑结构抗震设计课程的教学质量。

修回日期:2023-06-12

基金项目:西南交通大学一流本科课程建设项目(YK20211005)

作者简介:潘毅(1977—),男,西南交通大学土木工程学院教授,博士生导师,主要从事工程结构抗震与加固的教学与研究,(E-mail)panyi@swjtu.edu.cn。

东南大学[6]结合典型工程案例，加强课程实践教学，促进学生对工程结构抗震的理解与思考，丰富了教学素材，提升了课堂活跃度。同济大学[7-8]将多媒体技术、有限元软件和虚拟实验等引入建筑结构抗震教学，弥补了真实实验操作困难的遗憾，帮助学生理解课堂知识，激发学生学习兴趣。武汉工程大学[9]采用工程案例与虚拟实验相结合的混合教学模式，将原理应用于工程实践，激发学生学习兴趣。重庆大学[10]提出工程实验与理论教学结合的教学方法，优化教学内容、选取实验项目、建立实验考核方式及教研实验平台进行改革，取得良好效果。西南交通大学[4]基于“以学生为中心”的理念，从教学内容、教学方法、实践环节和评价体系几方面调整教学模式和教学手段，改革后增强了学生自主学习能力，提高了教学水平。

针对目前建筑结构抗震教学中存在的问题和难点，采用自制的工具，选择合适的软件，对教学方式进行改革，帮助学生理解教学内容中的难点，激发本科生的学习兴趣，提高学生的自主学习能力，培养符合《华盛顿协议》工程认证的高层次土木工程专业人才要求。

一、教学中存在的问题

（一）课程学习难度大

建筑结构抗震是一门建立在震害调查基础上的理论性和实践性都很强的课程。授课内容包括地震工程的基础知识、场地地基基础、建筑结构抗震概念设计、地震作用和结构抗震验算、地震作用计算方法、混凝土结构抗震设计、砌体结构抗震设计、钢结构抗震设计，以及减隔震的基本概念等。课程知识点前后关联性较强，仅靠教师板书及口头讲述，学生难以将知识点串联，形成知识体系。对2020级156名学生进行了调查，有2/3的学生认为该课程较难，见表1。其中，37.23%的学生表示不具备自学的能力，仅有6.38%的学生表示有自学该课程的能力。

表1 课程难度统计

总体课程难度	占比/%	是否能自学	占比/%
比较难	66.67	不能自学	37.23
一般	33.33	部分能自学	56.38
简单	0.00	基本能自学	6.38

（二）教学内容抽象

建筑结构抗震内容中一些知识点较为抽象难懂，教学难度教大。例如：自由度及多自由度体系的地震反应、杜哈梅积分、地震反应谱等理论知识。在对2020级学生的调查中发现，学生认为难以理解的是抗震概念，如表2所示。这是由于一些概念比较抽象，需要学生有良好的理论基础。

（三）学习兴趣不足

建筑结构抗震课程难度大、比较抽象，传统填鸭式教学难以吸引学生的注意力，也会因为教学内容的枯燥引起学生的反感，从而不利于培养学生的学习兴趣和专业能力。以兴趣为学习的驱动力，注重学思结合，才能调动学生的学习积极性和主动性，从而提高教学的效率和效果。

表2 课程难点统计（多选）

建筑结构抗震课程的难点	占比/%
概念理解	88.89
公式推演	62.22
规范查找	73.33
参数计算	75.56

二、教具在教学中的优势

为了帮助学生理解教学难点，需要将抽象问题具象化。因此，采用可操作、可演示的教具（文中将自制的工具、编写的程序和合适的软件统称为教具）在课程教学中十分必要。

（一）丰富教学手段，有助于理解教学难点

建筑结构抗震是一门实践性很强的学科。面对复杂抽象的抗震结构设计内容，如建筑结构地震反应分析、地震反应谱理论等教学难点，学生通常会有畏难心理。采用自制教具辅助教学，既丰富了教学手段，贴合教学内容，将抽象的概念和原理呈现出来，又能帮助学生深入浅出地理解枯燥乏味的知识点，改善了学生的课堂学习体验，提升了课堂教学效果；因此，如何设计和使用教具非常重要，建议根据建筑结构抗震课程的教学难点有针对性地设计或选择教具。

（二）有利于教学实践，便于串联各知识点

建筑结构抗震课程的各知识点联系紧密，前后互相衔接。学生往往学了后面的知识点，而模糊了前面的知识点，没有主动思考前后知识点的关联。多数学校的抗震课程缺乏教学实践环节，或者实践课程与理论课程分别开设，二者未紧密联系。通过教具的具体展示，给学生留下深刻印象，引导学生动手、动脑去思考抗震现象背后的原理和方法。从而弥补教学实践环节的不足，改变教学中“重理论、轻实践”的弊病。同时，通过不同教具之间的衔接，经教师引导，帮助学生串联不同的知识点，有利于巩固抗震知识，并为解决复杂工程问题打下基础。

（三）增强教学互动，激发学生专业兴趣

教具不仅可以由教师来演示，而且可以让学生自己来操作，提高学生课程的参与度。在这个过程中，教师和学生形成良好的互动关系，让学生在操作教具、观摩现象中发现、思考和解决抗震问题。这样既抓住了学生的关注点，又提升了学生的学习热情。通过教具激发学生对专业的兴趣，不断积累对抗震的感性认识，加深对抗震问题的认识和思考。以教具为抓手，促进形成“观察现象、提出问题、思考问题、讲解知识、解决问题”的良性循环教学模式。

三、教具在教学中的应用

地震反应谱是认识地震动特性的重要途径，也是建筑结构抗震设计的重要基础。但概念较为抽象，学生初次学习时，理解存在一定困难。以地震反应谱为例，讲解教具在课堂教学中的实际应用。

（一）单自由度体系的水平地震反应

根据达朗贝尔（D′Alembert）原理，单质点要处于力的平衡，从而建立单自由度体系的运动微分方程

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega\dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = -\ddot{x}_g(t)。 \quad (1)$$

要理解式（1），一方面需要引导学生复习理论力学的基础知识；另一方面采用教具演示，观察现象和采集加速度数据，引导学生思考。为此，自制了由8个不同高度的质量球和1个振动台组成的教具。其中，每个质量球内置加速度传感器，由数据线连接到数据采集仪器获取加速度数据，并通过编制的软件将加速度时程曲线实时展示，如图1所示。

教学中，可让学生每3~4人组成一个小组。其中，1~2名学生随机选择任一质量球，对其施加初位移，并观察其自由振动情况，如图2所示。其余学生打开软件，采集加速度时程曲线，并计算自振周期，如图3所示。通过动手操作，将抽象的数学公式用实物、曲线等以可视化方式呈现，加深学生

的认识和理解，极大地调动了学生的学习兴趣。

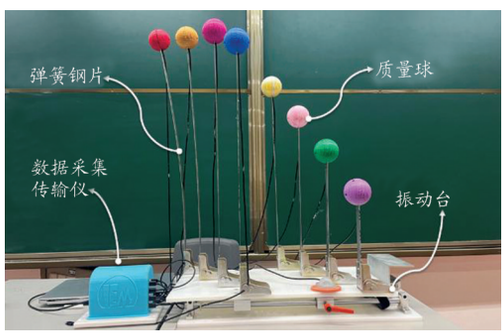


图1　单自由度体系教学展示模型

图2　学生动手操作教具

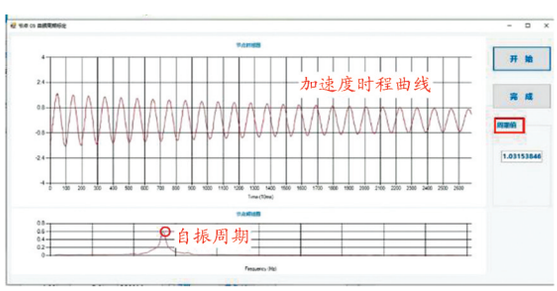


图3 实测质量球的自由振动加速度时程曲线

由于8个质量球连接的弹簧钢片高度不同，从低到高，其自振周期T由小变大。教学中，邀请学生以不同速度往复推振动台，模拟不同的地震动，观察这一组自振周期各不相同的单自由度体系反应，并引导学生思考不同频率下的单个质量球不同反应，采取分组讨论的模式，让学生分析“同一次地震，不同建筑对地震的反应不同”及“同一个建筑，在不同地震作用下的反应不同”的原因。

在此基础上，通过单自由度体系教学展示模型，帮助学生建立8个质量球的自振周期T与一次地震模拟下的最大加速度反应$\ddot{x}_{max}$之间的关系（图4）。

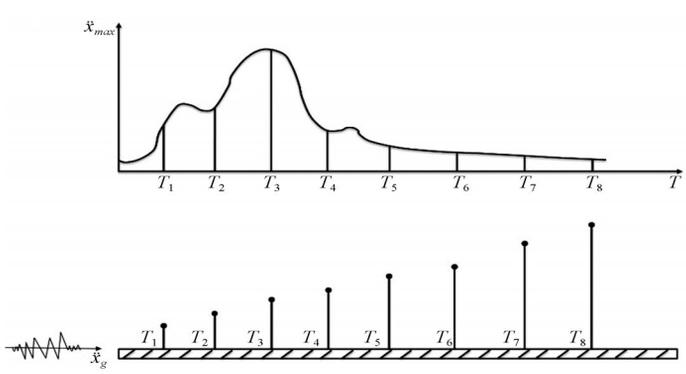


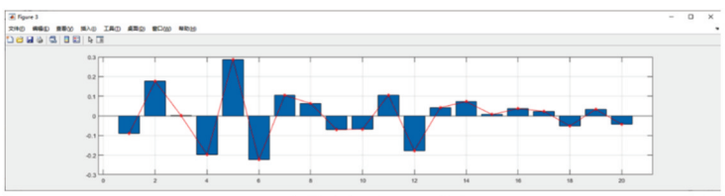
图4　单自由度体系的自振周期与最大加速度反应

（二）杜哈梅积分

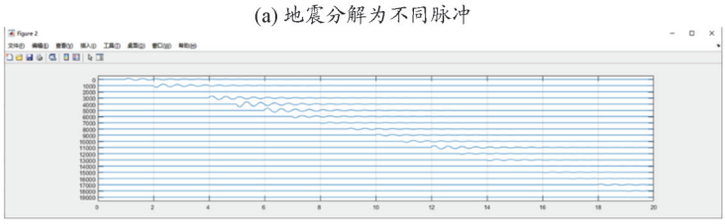
杜哈梅积分也是建筑结构抗震设计中的一个重要方法。在单自由度体系的弹性地震反应分析中，常用杜哈梅积分计算单自由度体系的地震位移反应

$$x(t)=\int_0^t \mathrm{d}x(t)=-\frac{1}{\omega_{\mathrm{D}}}\int_0^t \ddot{x}_g(\tau)e^{-\xi\omega(t-\tau)}\sin\omega_{\mathrm{D}}(t-\tau)\mathrm{d}\tau。\tag{2}$$

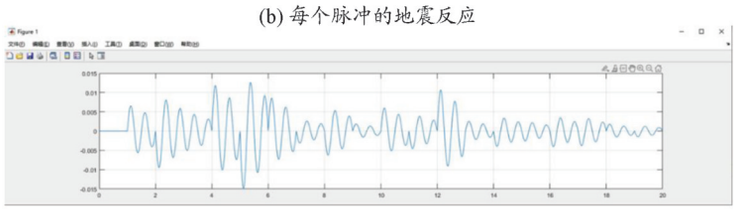
教学中，板书或PPT难以很好讲述公式(2)，多数学生也不会主动计算。针对此，引导学生采用MATLAB进行编程来模拟，并展示出来，如图5所示。这样可以直观展示在受振动过程中，单自由度体系任意时刻t的地震反应是由0~t时段的地面运动脉冲反应积分叠加而来，让学生对杜哈梅积分有更直观的认识，并增强了学生的编程能力。



(a) 地震分解为不同脉冲



(b) 每个脉冲的地震反应



(c) 叠加之后的地震反应

图5　杜哈梅积分MATLAB编程示意

(三) 地震反应谱

在单自由度体系的水平地震作用反应、杜哈梅积分的讲解基础上，引出地震反应谱的概念。为方便求解结构的最大地震作用，将单自由度体系的地震最大绝对加速度反应与其自振周期的关系直观表示出来。而这种关系就是地震加速度反应谱，简称地震反应谱。学生联系之前的单自由度体系教学展示模型，就很容易形成这种基本概念。但这还不够，毕竟和实际地震动有一定区别。为此，借助地震反应谱生成程序进一步认识地震反应谱的概念。地震反应谱生成程序可将地震动加速度记录输入，设定好加速度单位、步长、结构阻尼比等参数后，生成加速度反应谱，如图6所示。

考虑不同场地类别，选取汶川地震卧龙台站、鲁甸地震龙头山镇台站和阪神地震加古川台站等3种典型地震动，将其东西向的加速度时程曲线展示给学生，如图7(a)所示，并通过傅里叶变换得到傅里叶谱，如图7(b)所示。重点讲解地震动的振幅、频谱和持时，让学生对地震动特性的三要素有清晰认识。

在地震反应谱生成程序中，输入选取的典型地震动，形成3条地震反应谱，如图8所示。在讲解中，结合单自由度体系教学展示模型，引导学生思考和理解地震反应谱的影响因素，如场地条件、震中距、地震震级等。采用该软件进行辅助教学，把一个比较抽象的概念变得具象化和可操作，加深了学生对地震反应谱的理解。

地震反应谱一直是建筑结构抗震教学中的一个重点，也是难点。它是后续抗震教学内容的基础，克服这个难点有助于对建筑结构抗震的理解。自制工具的硬件和程序的软件相结合，将抽象的抗震概念变得具象化，也可把不同知识点串联起来，加深了学生的理解，激发了学生的学习兴趣，活

跃了课堂气氛。

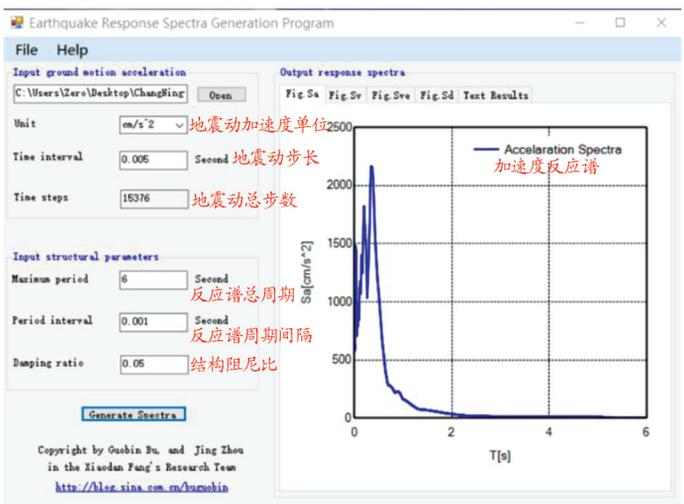


图 6　地震反应谱生成程序

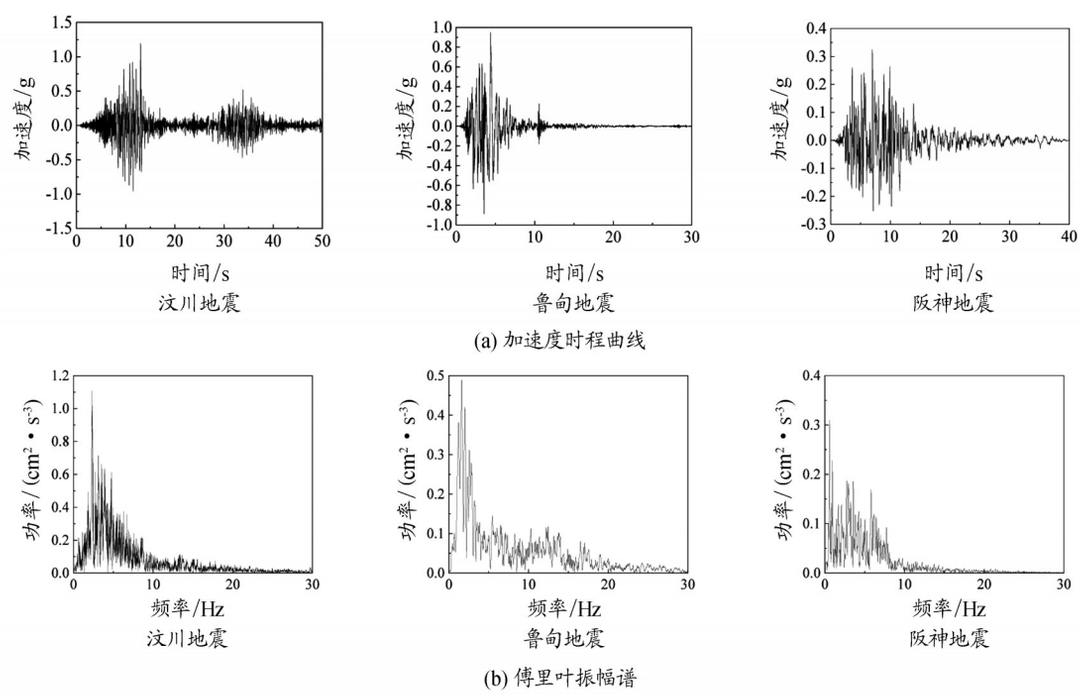


图 7　典型地震动的加速度时程曲线和傅里叶振幅谱

四、反馈和分析

对 2021 级土木工程专业建筑工程方向的本科生进行了教学实践。为了解实际教学效果，在学期末对授课学生进行了问卷调查。此次调查共发放问卷 106 份，收回 94 份，回收率为 88.67%。从接受程度、讲解效果和学习成绩等 3 个方面，与未使用教具的 2020 级进行对比，以分析教具使用前后的变化。

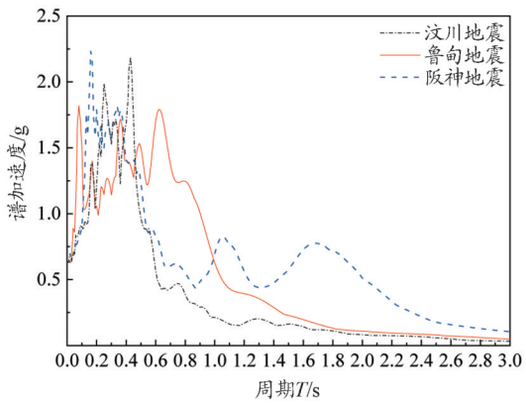


图8　典型地震动的反应谱

（一）接受程度

根据问卷调查结果看，超过90%的学生接受使用教具进行辅助教学，且87.76%的学生认为教具能帮助其理解教学内容，说明教具对课堂教学起到了积极作用；81.63%的学生认为教具增加了他们对建筑结构抗震设计课程的兴趣，证明教具确实能提高学生在课堂上的学习兴趣；接近90%的学生支持在下一届教学中使用教具辅助教学（表3），这说明学生在教学中的收获良多，对教具的反馈是积极的，对教学效果是肯定的。

表3　学生对教具的接受程度

关于教具的问卷调查内容	选项（百分比/%）		
是否接受教具辅助教学	接受（93.88）	一般（6.12）	不接受（0.00）
教具是否有帮助理解学习内容	有帮助（87.76）	一般（12.24）	无效果（0.00）
教具是否增加对课程的兴趣	是（81.63）	一般（14.29）	否（4.08）
是否支持在下一届教学中使用教具	是（89.8）	一般（10.2）	否（0.00）

（二）讲解效果

有关教师的课堂讲解效果，对比了2020级和2021级的问卷调查结果，如图9所示。相比无教具的2020级，有教具的课堂讲解通俗易懂的程度高出10.73%，中规中矩的评价是之前的1/2。这说明教具加深了多数学生对教学内容的理解，解决了大部分学生的学习难点，课堂教学效果整体提升明显。

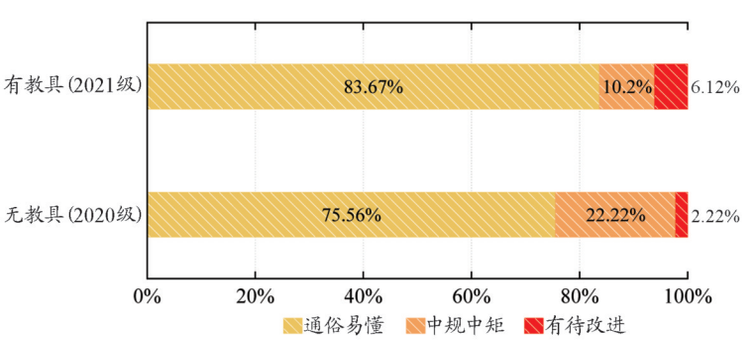


图9　教师的教具讲解效果

（三）学习成绩

学习成绩是教学效果的重要指标之一。将成绩分为5个分数段，对比2020级和2021级的学习成绩，所有成绩均取整数，如图10所示。两届学生的成绩主要集中在70~79分和80~89分，这两个分数段占总人数的70%左右。但2021级的80~89分和90~100分的占比更高，分别比2020级高了约5%和9%，合计提升了约14%。这也意味着，70~79分和60~69分的人数相应下降了14%。这说明教具辅助教学发挥了积极的作用，显著提升了大多数学生的学习成绩，教学效果得到了明显增强。

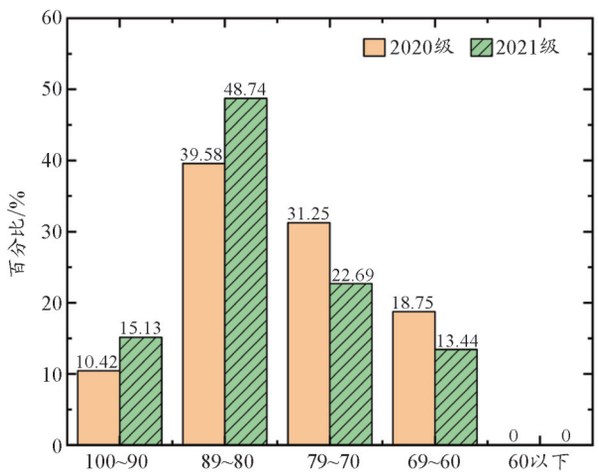


图10 2020级和2021级学习成绩对比

五、结语

在建筑结构抗震课程取得的教学改革成果基础上，顺应新的教学大纲，积极面对教学改革的挑战。从解决存在的问题入手，结合抗震课程的特点，引入教具辅助课堂教学，丰富了教学手段，将抽象问题具象化、可操作，强化了学生的感性认识，帮助学生理解教学难点。教学实践表明，教具吸引了学生的注意力，启发了学生主动思考，极大地调动了学生的积极性和好奇心，也活跃了课堂氛围。从学生反馈来看，对教具的接受度和认可度均比较高，课堂讲解效果较好，学习成绩进一步提高，教学效果明显增强。这对于培养学生的综合能力和创新能力有积极作用。

然而，教具并不能替代抗震理论知识的讲解，而是应与其互补。并非教具越多越好，不是所有的教学内容都适合使用教具辅助，而应选择适当的教学环节引入恰当的教具。因此，必须仔细梳理和分析教学难点，精心设计教具，使其发挥最佳效果。

参考文献：

[1] 谢贤鑫，潘毅，寇创琦，等. 泸定6.8级地震学校建筑典型震害调查与分析[J]. 地震工程与工程振动，2022，42(6)：12-24.

[2] 潘毅，易督航，游文龙，等. 泸县6.0级地震村镇建筑震害调查与分析[J]. 土木工程学报，2023，56(5)：47-59.

[3] 建设工程抗震管理条例[S]. 北京：中国法制出版社，2021.

[4] 潘毅，刘豪，林拥军，等. 基于SC教学理念的土木工程专业课程教学改革——以建筑结构抗震设计课程为例[J]. 高等建筑教育，2020，29(2)：101-108.

[5] 王建. 建筑结构抗震设计课程教学方法探索[J]. 高等建筑教育，2018，27(2)：80-83.

[6] 王浩，张志强，徐明，等. 工程结构抗震与防灾课程教学改革及疫情期教学实践分析[J]. 高等建筑教育，2021，30(3)：120-127.

[7] 陈俊岭,徐夷青. 学时压缩后建筑结构抗震设计教学方法探讨[J]. 教育教学论坛, 2019(37): 183-184.
[8] 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):106-111.
[9] 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.
[10] 杨溥,贾传果,刘立平,等. 工程实验与理论教学的融合方法研究[J]. 高等建筑教育, 2020, 29(1):140-147.

Application of teaching aids in the teaching of seismic design of building structures

PAN Yi[1,2], ZHANG Lanlin[1], LIU Fanglin[1], ZHANG Haoyu[3]

(*1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China*; *2. Key Laboratory of Seismic Engineering Technology of Sichuan Province, Chengdu 610031, P. R. China*; *3. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150010, P. R. China*)

Abstract: Seismic design of building structures has become an important course in the undergraduate stage of civil engineering. This course includes complicated theoretical contents and abstract concepts, which is difficult for visualizing the complex principles by the traditional teaching methods. In view of these problems, the operable teaching aids are introduced into the course to enrich the teaching methods and help students understand it. Three knowledge points, that is, seismic response analysis of single degree of freedom system, Duhamel integral, seismic response spectrum, are taken as the case of teaching aids application in the course. Based on this, the students are guided to think actively, so that the boring and difficult theory is easy to be understood. According to the feedback information of the questionnaire survey, better teaching results are achieved by teaching aids application, the learning interest of students is stimulated, the autonomous learning ability of students is enhanced, the academic performance of students is improved, and the interactive experience of classroom teaching is better.

Key words: seismic design of building structures; self-made teaching aids; professional software; teaching practice; teaching reform

（责任编辑　梁远华）