

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2023.01.024

欢迎按以下格式引用:鲁亮,苏磊,葛雪,等.工程结构抗震课程实验教学内容探讨[J].高等建筑教育,2023,32(1):198-203.

工程结构抗震课程实验 教学内容探讨

鲁亮,苏磊,葛雪,许沛东,曹文清

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:工程结构抗震类课程是土木工程专业本科生的综合性课程,教学对象为土木工程专业本科高年级学生,课程理论知识点较多,涉及结构抗震技术最新发展。受学时和教学经费限制,实验教学一般限于梁、柱构件在拉、压、弯、扭等荷载作用下的力学性能试验,很少进行如结构动力特性测试、构件耗能能力测试、结构地震响应等结构动力荷载试验。介绍了工程结构抗震类课程实验教学现状,分析了现有配套的实验教学内容存在的不足,提出了开设结构抗震性能相关实验课程、建筑和桥梁减隔震装置力学性能实验课程的建议,并从编写教学大纲、实验指导书、教学讲义,编制实验报告模版,以及教学实践等方面进行了课程建设。通过三年的教学实践,结合最新工程实践和课堂教学的实验教学内容改革取得了良好的教学效果,学生充分了解了各类减隔震装置、最新结构设计理念和新型结构体系,得到了规范化的试验操作技能训练,对学生就业后快速理解工程建设程序和标准,或继续深造打下了良好的基础。

关键词:本科教育;工程结构抗震课程;抗震实验;实验教学改革

中图分类号:G642.0;TU317 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2023)01-0198-06

工程结构抗震类课程教学对象为土木工程专业本科高年级学生,课程内容理论性较强,综合了较多的基础专业知识。以同济大学为例,开设的工程结构抗震类课程有建筑结构抗震、工程结构抗震、建筑隔震与减震等^[1-2],在课堂教学中,教师通常会介绍工程抗震领域的最新研究成果,这类课对学生今后工作或进入研究生阶段的学习将会起到非常重要的作用。目前工程结构抗震类课程缺乏实验教学配套,虽然有些实验室开设了部分抗震类实验项目^[3-4],但是尚不能构成完整的实验教学课程体系。

土木工程专业实验教学教材^[5-6]对各种基本实验方法均有所介绍,但是受限于学时和教学经费,在整个本科教学环节中,学生参与的实验项目数量少、内容简单,一般限于梁、柱构件在拉、压、

修回日期:2021-03-12

基金项目:同济大学第十五期实验教学改革专项基金项目(0200104459)

作者简介:鲁亮(1969—),男,同济大学土木工程学院结构防灾减灾工程系副教授,博士,主要从事工程结构抗震、试验技术研究,(E-mail)95010@tongji.edu.cn。

弯、扭等荷载作用下的力学性能试验,很少进行结构的动力荷载试验,如结构动力特性测试、构件耗能能力测试、结构地震响应等试验。

近年来,结构设计理念和新型结构体系得到了很大发展,有些方法和技术的工程应用已比较成熟,如基于性能的抗震设计方法、减隔震结构和震后可恢复功能的韧性结构体系等^[7]。新型振动可控制的建筑和桥梁结构大量使用减隔震装置,如橡胶支座、阻尼器等,这些新型结构与传统结构的抗震理念有本质区别,需要学生在本科阶段有充分的了解和认识。

土木工程专业本科毕业后分流至设计、施工等单位或进入研究生学习阶段,进入土建工程相关单位的学生必定会接触工程质量控制问题,工程质量控制与材料性能测试和产品质量检测密切相关,需要满足CMA(China Inspection Body and Laboratory Mandatory Approval,中国检测机构和实验室强制认证)、CNAS(China National Accreditation Service for Conformity Assessment,中国合格评定国家认可委员会)等质控要求,而现阶段各高校本科生缺乏这方面的训练。在研究生学习阶段,相当比例论文课题需要进行试验研究,这就需要学生在本科阶段培养好试验技能,为将来的深造打好基础。

根据工程结构抗震类课程的教学内容,结合教学计划、实验成本和教学效果,分析结构实验教学现状,建议开设结构抗震性能相关实验课程、建筑和桥梁减隔震装置力学性能实验课程。

一、结构实验教学现状

(一) 动力荷载实验项目数量不足

土木工程类专业本科阶段配合课堂教学设置了相应的实验教学内容,如配合材料力学、结构力学、混凝土结构基本原理、钢结构基本原理等课程,设置了等强度梁实验、钢桁架静载试验项目,以及混凝土结构基本原理实验、钢结构基本原理实验和结构防灾实验等实验课程,有的高校在本科阶段还专门开设了建筑结构试验或工程结构试验等实验课程。

根据加载方式或荷载性质,试验方法分为单调静载试验、低周反复加载试验、拟动力试验、振动台试验和结构动力特性测试等^[5],给本科生演示或操作的实验项目多数为单调静载试验,地震作用为动力荷载,试验加载方法应为低周反复加载试验、拟动力试验、振动台试验、结构动力特性测试等,现有的实验教学内容与工程结构抗震类课程脱节,急需补充^[8]。

(二) 缺乏整体结构抗震性能实验项目

结构实验对象包括构件、节点、多节点组合和整体结构等,但是工程结构抗震研究的最终对象还是整体结构。目前本科阶段的实验对象多为构件,如梁、柱、板、墙等构件在拉、压、弯、扭等荷载作用下的力学性能试验,限于实验条件,多数实验室仅开展了梁的抗弯、抗剪、抗扭,以及柱的竖向承压、钢构件稳定性等实验项目,为配合混凝土结构基本原理实验、钢结构基本原理实验课堂教学,某实验室所开设的构件类实验项目^[9]如表1所示。由此可以看出,以构件为对象的静载或稳定性实验项目比较完备,但是本科阶段很少开展与抗震性能相关的柱、墙等抗侧力承载性能试验。

整体结构抗震试验的内容主要包括结构动力特性测试和地震作用下结构动力响应,其中地震作用下结构动力响应试验的加载设备一般为模拟地震振动台,由于试件制作、试验实施成本较高,故没有为本科生开设。

表1 两门课所开设的实验项目

混凝土结构基本原理实验	钢结构基本原理实验
适筋梁抗弯承载力	H型截面轴心受压构件整体稳定性
超筋梁抗弯承载力	T形截面轴心受压构件整体稳定性
少筋梁抗弯承载力	十字形截面轴心受压构件整体稳定性
梁剪压破坏	L形截面轴心受压构件整体稳定性
梁斜拉破坏	H型截面梁的整体稳定性
梁斜压破坏	薄壁矩形管受压构件局部稳定性
适筋梁抗扭承载力	摩擦型高强螺栓抗剪连接
超筋梁抗扭承载力	普通螺栓抗剪连接
少筋梁抗扭承载力	焊缝连接
柱大偏心受压	H型截面偏压构件整体稳定性(平面内失稳)
柱小偏心受压	H型截面偏压构件整体稳定性(平面外失稳)

(三) 实验教学内容与工程实践及科研试验脱节

材料力学、结构力学、混凝土结构基本原理等课程属于经典课程,教学内容长期不变,而随着抗震设计理念、技术的发展,以及各种新型控制类结构体系的出现,成熟的设计方法会被引入工程结构抗震类课程教材,即使教材中没有,部分教师也会在课堂中予以介绍。抗震新技术将会引起学生的极大学习兴趣,但是教学中予以深入探讨、现场观摩或实物展示的机会不多,增加一些反映学科前沿领域研究成果的实验项目,可以使学生及时了解本门学科的最新动态和发展方向。

目前,各大高校都在开展卓越工程师培养,大学生走上工作岗位后能否快速进入角色,很大程度上取决本科学习阶段的培训。现在较多的建筑工程和桥梁工程采用减隔震装置来控制结构在地震作用和风荷载下的振动响应,比如超高层结构抗风用的TMD和阻尼器装置、桥梁的减隔震橡胶支座、隔震建筑的隔震橡胶支座和阻尼器的联合应用等。结构振动控制分为主动控制、被动控制和混合控制等,其中被动控制技术已比较成熟,各种类型阻尼器和橡胶支座已在工程中成熟应用,比如黏滞阻尼器、黏弹性阻尼器、金属屈曲阻尼器、防屈曲约束支撑等,并形成了一系列的设计规范、产品标准和应用技术规程^[10-11]。这些新技术和新产品需要通过实物实验的方式灌输给本科生。此外,在土建过程中,需要进行大量的材料和产品性能检测,包括现场测试和实验室试验,这些检测工作要符合国际通行规则及国家规范要求,甚至美国、欧盟等一些标准要求,比如CMA、CNAS测试要求等。对于这些规范性的管理要求,需要对本科生进行这方面的基础训练。

本科毕业后,部分学生会进入研究生阶段的学习,硕士论文和博士论文的课题研究需要进行试验,试验课题来自于科研课题或实际工程,研究过程具有一定的难度,很多学生缺乏基本的试验技能和动手能力。能在本科阶段通过实验教学为学生提供锻炼机会,这将对研究生阶段的学习大有帮助。

(四) 实体实验与虚拟仿真实验的教学配合尚不紧密

近年来,国家提出建设虚拟仿真实验教学工程,根据《教育部办公厅关于2017—2020年开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知》(教高厅〔2017〕4号),到2020年全国认定1000余项示范性虚

拟仿真实验教学项目,目的是将实验教学信息化作为高等教育系统性变革的内生变量,以高质量实验教学助推教学质量,助力高等教育强国建设^[12]。借助计算机信息技术等发展虚拟仿真实验无疑是土木工程实验教学改革的重要内容。

实物实验教学和虚拟仿真实验教学各自的优缺点很明显,但通过教学规划,两者之间可以密切配合,实现优势互补,达到最佳的教学效果。虚拟仿真实验在安全性、经济性、时间性、复杂性等方面比实物实验有很大优势,但是实物实验具有的真实体验感是虚拟仿真实验无法具备的,同时实物实验可发挥团队协作精神,在实验结果与理论分析结果有较大误差或实验失败时能增强学生的思辨分析能力。

大力发展虚拟仿真实验的同时,坚持“能实不虚、虚实互补和虚实结合”的原则,对实验项目统筹规划,合理安排虚拟仿真实验和实物实验的具体项目,进行实验虚拟化需求论证和与实体实验之间的关系论证^[13]。

二、新增抗震类实验教学内容建议

增加土木工程抗震类课程的实验教学内容非常必要,但是新增实验教学内容需要进行顶层设计:(1)整体教学计划安排,包括学时、教学大纲等;(2)理论教学章节与实验项目的衔接;(3)实验室资源配套,包括实验设备、实验技术人员、教学经费等。根据作者实验教学经验,建议按照先试点后落实、先简单后复杂的原则循序渐进地完善实验教学内容,优化试验过程。建议开设结构抗震性能相关实验、建筑和桥梁减隔震装置力学性能实验两大类与工程结构抗震类课程相关的实验课程,并分别设置实验子项目。

(一) 结构抗震性能相关实验

与结构抗震性能相关的实验一般包括构件的力学性能试验、结构地震响应实验和结构动力特性测试等内容。这里所述的构件,指的是在地震作用下的抗侧力构件,构件受到的荷载为有竖向轴压的水平反复荷载,常规试件为框架柱和抗震墙。结构动力特性测试方法一般采用:(1)原型结构采用地脉动法;(2)振动台模型采用白噪声激励法;(3)简单演示模型可采用“张拉突卸法”,即初位移法。

多数高校土木院系还没有装备大型模拟地震振动台,大型振动台实验成本高、准备时间长,不适合本科生教学,可采用小型教学用振动台进行实验,试件可采用重复使用的钢结构。如果配置小型减隔震装置,还可以采用振动台进行结构振动控制实验。一般小型教学用振动台实验如图1。

考虑实验成本、课时安排等因素,建议结构抗震性能相关实验的教学内容如表2所示。

以上项目的实验报告还应包括实验数据处理、与理论分析结果的对比、课后思考题等内容。有条件的实验室可针对有兴趣和有需求的学生,开出拟动力实验或混合模拟实验项目。

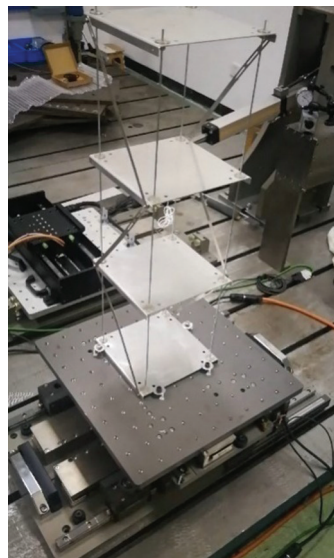


图1 小型教学用振动台

(来源:百度图片)

表2 结构抗震性能相关实验

实验子项目	测试力学参数	备注
框架柱抗震性能测试	承载力、位移、滞回曲线	低周反复实验,钢混柱或型钢柱
结构动力特性测试	频率、振型和阻尼比	校园内原型建筑,地脉动法
结构地震响应	位移和加速度动力响应曲线	
结构振动控制实验	位移和加速度动力响应曲线	对比实验

(二) 建筑和桥梁减隔震装置力学性能实验

减隔震装置在工程中的应用越来越多,包括各种橡胶支座、圆形黏滞阻尼器、黏滞阻尼墙、黏弹性阻尼器、防屈曲约束支撑、金属摩擦阻尼器、摩擦摆隔震支座、软钢弯曲阻尼器、软钢剪切阻尼器等,这些装置均有产品性能标准及应用技术规程,工程应用时所需测试的力学参数比较多。实验教学无需也无法对所有产品、所有力学参数进行实验,依据实验室设备条件,可选择能重复使用或加工成本低的试件进行教学实验,表3列出了四种减隔震装置力学性能实验项目。

表3 减隔震装置力学性能实验

实验子项目	测试力学参数
板式橡胶支座力学性能	抗压弹性模量、抗剪弹性模量
软钢屈曲阻尼器力学性能	初始刚度、第二刚度、屈服荷载和屈服位移、阻尼比
金属摩擦阻尼器力学性能	动摩擦系数、不同位移下的阻尼比
黏滞阻尼器力学性能	最大阻尼力、阻尼力-速度规律曲线、滞回耗能

以上项目的实验报告还应包括实验数据处理、与理论分析结果的对比分析、装置力学性能的评判等内容。实验教学中需要着重介绍各类减隔震装置的力学参数,以及各类减隔震装置改变结构动力特性和消耗地震能量的方式。

减隔震装置力学性能实验一般需要采用电液伺服加载系统和专门的加载装置,可依据实验室资源选择实验对象和测试参数,有条件的实验室可在实验教学的同时展示各类减隔震装置。对未列入实物实验的减隔震装置,也可以通过虚拟仿真实验的演示来介绍其力学性能。

(三) 教学计划安排建议

实验教学需要配合具体的课堂教学来安排教学计划,表4为某高校建筑结构抗震设计课程教学计划,以及建议配合的实验教学内容和学时。

表4 建筑结构抗震设计课堂教学及实验配套

课堂教学内容	学时	实验教学内容	学时
第一章地震及结构抗震的基本知识 第二章场地、地基和基础	6		
第三章单自由度体系结构的地震反应	8	①	2
第四章结构抗震设计要点	2		
第五章~第八章各类结构抗震设计	8	②③④	6
第九章非结构构件抗震设计 第十章隔震及消能减震	4	⑤⑥⑦⑧	4

注:①为结构抗震性能相关实验子项目“结构动力特性测试”;②③④为结构抗震性能相关实验其他子项目;⑤⑥⑦⑧为减隔震装置力学性能实验的四个子项目

三、结语

为配合工程结构抗震类本科生课程的课堂教学,需要增加实验教学内容与之配套,有益之处在

于:(1)有利于学生对课本知识的理解;(2)加深了解专业发展前沿,避免与工程实践脱节;(3)提升实验技能,为研究生阶段的科研试验打好基础。

实验教学内容的设置需要满足培养计划的整体安排,需要教学管理人员进行顶层设计,实验技术人员有责任推动此项工作,可以先行先试。

成熟有效的教学内容和手段需要在教学实践中不断提升,作者所在实验室积极进行实验课程框架的搭建,如编写实验大纲、实验指导书、实验报告等,并积极付诸教学实践,不断与同行展开交流探讨,以期提升工程结构抗震课程实验教学效果。

参考文献:

- [1] 吕西林,周德源,李思明,等. 建筑结构抗震设计理论与实例[M]. 第4版. 上海:同济大学出版社,2015.
- [2] 周颖,鲁正,戴靠山,等. 建筑结构抗震设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [3] 黄丽婷,熊世树,金康宁. 土木工程结构试验动载教学实验的改革与实践[J]. 高等建筑教育,2005,14(2):93-95.
- [4] 李黎,熊世树,叶昆. 土木工程实验教学体系与实验项目改革探索[J]. 高等建筑教育,2010,19(6):141-143.
- [5] 姚振纲,刘祖华. 建筑结构试验[M]. 上海:同济大学出版社,1996.
- [6] 马永欣,郑山锁. 结构试验[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [7] 吕西林,陈云,毛苑君. 结构抗震设计的新概念—可恢复功能结构[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(7):941-948.
- [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] 郭小农,王伟,蒋首超,等. 钢结构基本原理实验教学探索[J]. 高等建筑教育,2011,20(1):149-154.
- [10] 中华人民共和国建筑工业行业标准. JG/T 209-2012 建筑消能阻尼器[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [11] 中华人民共和国建筑工业行业标准. JGJ 297-2013 建筑消能减震技术规程[S]. 北京:中国标准出版社,2013.
- [12] 徐伟杰,徐明,郭彤,等. “金课”背景下土木类虚拟仿真实验教学发展趋势—基于2018年国家虚拟仿真实验教学项目共享平台公示数据[J]. 高等建筑教育,2020,29(1):74-85.
- [13] 王淑婧,贺行洋,邹贻权,等. 土建类虚拟仿真实验教学资源持续建设与实践[J]. 高等建筑教育,2018,27(5):159-165.

Discussion on experiment teaching content of engineering structure seismic courses

LU Liang, SU Lei, GE Xue, XU Peidong, CAO Wenqing

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: The seismic courses of engineering structure are comprehensive professional courses of civil engineering. The teaching object is the senior undergraduate students majoring in civil engineering. There are many theoretical points in these courses, involving the latest development of structural seismic technology. Limited to class hours and teaching funds, experimental teaching is generally limited to the mechanical property experiment of beam and column members under tension, compression, bending, torsion and other loads. Structural dynamic experiments are rarely conducted, such as structural dynamic characteristics test, component energy dissipation capacity test, structural seismic responses, and other experiments. This paper introduces the present situation of the experimental teaching of engineering structure seismic courses, analyzes on the shortcomings of the existing experimental teaching contents, puts forward some suggestions on setting up the experimental courses related to structural seismic performance, and the experimental courses of mechanical properties of building and bridge seismic isolation devices, and carries out the course building from the aspects of compiling the teaching syllabus, experimental instructions, teaching handouts, preparing the template of experimental reports, and teaching practice. Through three years of teaching practice, combined with the latest engineering practice and classroom teaching, reform of the experimental teaching has achieved good teaching effect. Students have fully understood all kinds of seismic reduction and isolation devices, the newest structural design concepts and new structural systems, and have received standardized experimental operation skills training. This has laid a good foundation for students to quickly understand engineering construction procedures and standards after employment, or to continue their further study.

Key words: undergraduate education; engineering structure seismic course; seismic experiment; experiment teaching reform

(责任编辑 梁远华)