

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2023.06.015

欢迎按以下格式引用:方成,王伟,郭煜斌.钢-混凝土组合梁受弯稳定承载力教学实验的探讨与实践[J].高等建筑教育,2023,32(6):120-127.

# 钢-混凝土组合梁受弯稳定承载力 教学实验的探讨与实践

方成,王伟,郭煜斌

(同济大学土木工程学院,上海200092)

**摘要:**钢-混凝土组合结构在土木工程领域已被广泛应用,但在目前的本科教学实践中组合结构的教学实验仍然存在一定的缺失。针对这种现状,同济大学土木工程学院在既有钢结构基本原理实验课程的基础上新增了钢-混凝土组合构件教学实验项目,开发了适用于钢-混凝土组合构件教学实验的加载设备、量测设备和试验构件,明确了关键知识点涵盖范围,制定了课程考核评价标准。课程改革力求使学生理解组合结构的基本概念,掌握组合构件实验的基本方法,培养实验操作和数据处理能力,认识组合结构在工程应用中的性能优势,增强学生的工程实践能力和综合分析能力,弥补现有钢结构实验教学内容的不足。

**关键词:**教学实验;教学改革;组合结构;轴压稳定实验;钢-混凝土组合构件

中图分类号:G642.0

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2023)06-0120-08

组合结构通常是指由两种或两种以上材料组成并共同工作的结构形式,其中最典型的代表当属钢-混凝土组合结构。该类结构构件充分发挥了钢材强度高、塑性好,以及混凝土抗压性能强等优势,有效弥补了两种材料彼此力学性能的不足。以部分填充混凝土构件为例,钢板可部分充当浇筑模板,同时对混凝土起到一定的约束作用,而混凝土又可以延缓钢板的局部失稳,在工程建设中往往有更好的技术经济效益。钢-混凝土组合结构由于其特有的工程优势近年来在国内外工程界得到广泛应用。

虽然组合结构的相关专业课程在本科教学中得到越来越多的重视,但仍然无法满足学生深入了解和掌握组合结构工程实践的需求。在理论教学上,钢-混凝土组合结构通常在钢结构的相关课程中引入,或者作为专业选修课供学生学习。部分学者对组合结构的理论教学工作提出了独到见解,例如刘占科等<sup>[1]</sup>对钢-混凝土组合结构课程的特点进行了探讨,高福聚等<sup>[2]</sup>讨论了网络逻辑方法在组合结构教学实践中的应用,部分学者对桥梁组合结构的教学改革进行了探索<sup>[3-5]</sup>。然而,在

修回日期:2021-09-13

基金项目:同济大学实验教学改革项目“钢-混凝土组合构件稳定教学实验研发”

作者简介:方成(1985—),男,同济大学土木工程学院研究员、建筑工程系副主任,主要从事钢结构研究,(E-mail)chengfang@tongji.edu.cn。

实验教学方面,学生对钢-混凝土组合结构的了解往往只能依托大学生创新项目、导师制科研项目或者第二课堂,很少有单独实践环节。例如:同济大学土木工程学院开设的钢结构基本原理实验课程,虽然包含多种截面形式钢构件的整体稳定实验、局部稳定实验和连接实验等,但尚缺乏与钢-混凝土组合结构相关的实验教学安排。因此,学生无法通过实验课程形象地了解钢-混凝土组合结构的特性、优势与工作机理,更缺乏在实验中观察、分析钢-混凝土组合结构特有的行为与设计问题的能力。钢-混凝土组合构件教学实验的缺失,不仅使得相关知识的输入不够系统,还可能造成工程教育与工程实践的脱节。

为适应我国土木工程建设的快速发展,提高专业课程教学质量,在钢结构基本原理实验原有项目的基础上进行教学实验内容改革,以部分填充混凝土组合梁(Partially-encased composite beam,即PEC梁)为切入点,增设了钢-混凝土构件整体稳定教学实验内容,旨在进一步完善土木工程实验教学体系,发挥结构实验教学在土木工程专业人才培养中的重要作用,实现实验教学与学生职业发展的衔接。

## 一、实验改革目标

同济大学土木工程学院现有钢结构实验教学内容包括认知实验、演示性实验和自主设计实验三大部分<sup>[6-7]</sup>,具体包含H型、十字形、T形截面形式的轴心受压构件整体稳定实验,矩形管受压柱的局部稳定实验,工字形钢梁的整体稳定实验,压弯构件整体稳定性实验,以及高强度螺栓连接实验(2019年之后该项目改成VR实验教学项目)。

在原有钢结构基本原理实验课程的基础上,结合钢-混凝土组合结构的教学要求和该类构件的力学特点,选取目前在工程上应用较多、具有一定代表性的PEC梁作为新设钢-混凝土组合梁整体稳定实验教学的内容。通过对比普通钢构件实验项目与组合构件实验项目,加深学生对理论知识的理解,突出钢、混凝土两种材料相互组合作用的优势,具体教学目标如下。

### (一) 了解组合构件的构造

通过实验教学增强对典型钢-混凝土组合构件的基本认识,了解钢-混凝土组合构件的基本组成部分,熟悉不同类型的组合构件形式,除PEC梁外,还包括钢管混凝土组合构件、压型钢板组合梁等;理解各个主要组成部分的受力特性、结构功能和不同组成部分之间的相互影响;熟悉钢-混凝土组合构件的基本设计要求,包括构件含钢率、长细比等指标的限制,以及材料强度等级、骨料粒径、钢筋间距等构造要求,分析组合结构中板件宽厚比的规定与普通钢构件的异同及背后的原因。

### (二) 熟悉PEC梁的受力性能

通过观察PEC梁受弯变形以及最终破坏过程,掌握该类构件在弯矩作用下的形变特征、损伤机理、极限承载力及失稳破坏模式,了解PEC梁长细比对构件失稳行为的影响,对构件整体弯扭失稳行为进行清晰的观察,掌握钢板局部鼓曲、混凝土压碎脱落和整体失稳变形等组合受弯构件的典型破坏特征。

### (三) 掌握组合构件实验的分析方法

通过试验掌握基本试验方法,包括试件设计、加载装置设计、测点布置、试验结果整理等。绘制PEC梁加载全过程中的荷载-平面内挠度曲线、荷载-侧向挠度曲线,以及关键位置应变发展曲线,理解不同受力阶段荷载-位移和应变发展曲线的力学意义,分析弹性阶段、弹塑性阶段和下降(失稳)段各自的特点,了解各阶段钢材、混凝土材料的力学性能;通过将规范公式计算结果与实验结果进行对比,分析既有公式的合理性、适用性以及结果差异产生的原因。

#### (四) 分析组合构件在工程中的优势

通过实验教学内容的扩展,对比组合构件和普通钢构件的行为,掌握钢材、混凝土共同工作对构件承载力和稳定性能的提升作用,以及对变形、破坏模式的影响规律;分析钢构件、混凝土、栓钉等重要组成部分协同工作的机理,加深学生对组合构件性能优势的认识,掌握钢-混凝土组合构件规范公式中所体现的组合效应思想与原理,理解设计规范中所规定的不同设计参数背后的物理意义,讨论钢-混凝土组合构件的延性、变形能力等关键性能提升的原因,针对耐火、耐腐蚀、施工速度、设计效率等讨论组合结构的成本效益和技术优势。

## 二、教学准备工作

为了保障新增实验项目的顺利实施,对实验方案、实验材料、实验设备、实验构件等进行了设计规划,完成了实验方案设计及构件、连接件的设计,对教学实验课程大纲、实验测试和学生实验手册进行了调整与完善。

#### (一) 增补与实验项目相关的教学大纲

明确实验教学的具体内容,根据新增实验内容调整教学大纲,包括课程性质与目的、课程基本要求、课程基本内容、能力培养内容、前修课程、评价与考核、学时分配、教材与主要参考书列表等。进一步完善学生实验指导手册,完善实验目的、实验方法和实验结果处理分析等内容。

#### (二) 开发适用于教学目标的实验设备

(1)加载设备。完成全套教学实验构件与连接件的设计图纸,估算最大承载力需求,在原有实验装置基础上进行升级,更换原有15吨作动器,采用50吨新作动器。

(2)设备标定。需要标定的设备有千斤顶、传感器、位移计、应变片、数据采集板等。

(3)试验安全。为了避免内填混凝土压溃、破碎引起的飞溅,采用玻璃隔板对试件进行安全阻隔(图1)。



图1 玻璃安全阻隔

#### (三) 实验构件及其加载装置的设计

(1)实验构件的设计。构件中的H型钢采用标准的Q235钢材。根据《Eurocode4: Design of Composite Steel and Concrete Structures》<sup>[8]</sup>(BS EN 1994-1-1:2004)第6.7节的内容对H型钢进行截面布置,填充混凝土,并按构造配筋,形成组合截面(图2)。构件的长细比、翼缘宽厚比、含钢率等指标均满足构造要求,根据规范公式对其受压承载力进行验算,保证作动器承载力满足要求。此外,长柱试件配有合理的侧向支撑,确保其沿预设方向发生失稳。

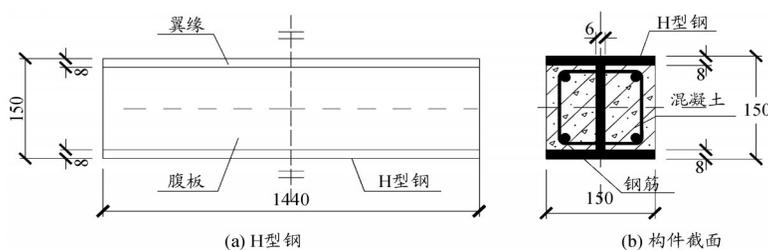


图2 PEC梁构件及截面(非比例)

(2) 支座的设计。支座应实现对构件端部水平、垂直方向以及轴向扭转的约束,还应保证构件端部能够自由翘曲,其设计结果如图3所示。支座底部为底板,通过外部连接固定在刚性的加载底座上。支座竖直方向通过条形支座对构件进行支撑,水平方向则通过固定立杆和滑动立杆对构件进行安装和夹持。滑动立杆通过固定挡板上的螺栓和螺杆进行加持宽度的调整和锁定。支座各组件及连接的设计均满足强度、刚度等设计要求,确保实验安全、可靠。

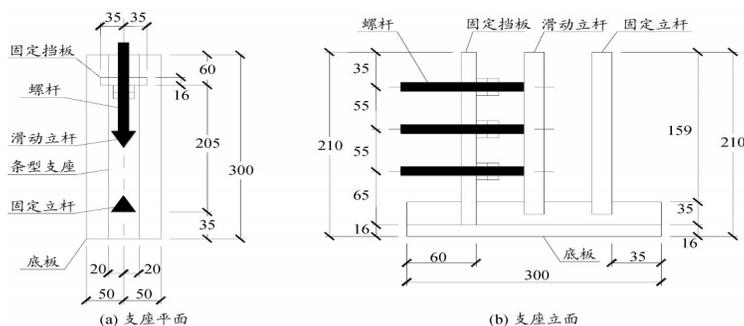


图3 支座设计图示(非比例)

(3) 加载装置的设计。实验采用吊装的方式,以保证外力能够以集中荷载的方式作用于组合构件。吊篮通过螺栓和螺栓杆组成的连接装置安装于实验构件的跨中位置。在跨中同时放置一台直线位移传感器LVDT(Linear Variable Differential Transformer,线性可变差动变压器),以此确定构件跨中的位移值。在构件两端的支座处各放置一台直线位移传感器LVDT,以消除支座位移对构件跨中位移读值的影响。

#### (四) 编制实验报告并确定考核方式

(1) 编制实验报告手册。实验报告手册的主要内容包括背景知识、实验目的、实验方法,以及钢-混凝土组合梁设计规范中的相关设计公式,以便与实验结果比较。手册还提供实验现象记录表,要求学生记录实验过程中的关键现象,包括可能的弹性阶段、弹塑性阶段、塑性强化段、下降段中构件的力学行为,以及最终失效模式。

(2) 确定课程考核方式。课程最终以实验报告的完成质量,参考学生在教学活动中的总体表现及分工,设定权重,给出成绩等级。

### 三、实验教学安排

教学实验过程主要分为现场理论教学、试件与设备介绍、完成实验和提交实验报告等环节。要求学生掌握组合结构的基本知识(重点掌握构件承载力的规范设计方法)和实验的基本方法与流程,包括试件、加载装置的设计和选用,加载过程的控制,数据的测量,实验结果的整理和分析讨论等。

### (一) 构件承载力规范设计方法

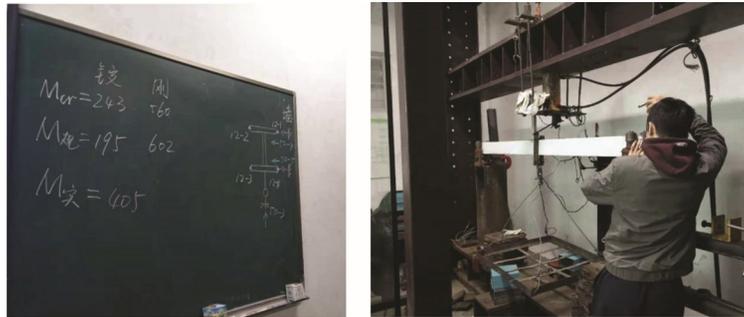
学生首先需要了解相关规范设计公式的基本原理,正确、灵活运用规范公式对实验构件的承载力进行预测。由于PEC梁的弯扭失稳承载力理论值较难推导,因此仅要求准确计算不考虑混凝土贡献的钢梁的理论极限承载力,包括通过弹性理论计算得出的承载力(公式1)和根据《钢结构设计标准》<sup>[9]</sup>计算得出的承载力(公式2)。计算结果和实测纯钢梁以及PEC梁的承载力进行对比,定量与定性相结合,思考混凝土对构件稳定承载力的影响。

$$M_{crx} = \beta_1 \frac{\pi^2 EI_y}{l^2} \left[ \beta_2 a + \beta_3 B_y + \sqrt{(\beta_2 a + \beta_3 B_y)^2 + \frac{I_\omega}{I_y} \left( 1 + \frac{GI_z l^2}{\pi^2 EI_\omega} \right)} \right] \quad (1)$$

$$\phi_b = \beta_b \frac{4320 Ah}{\lambda_y^2 W_x} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda_y t_1}{4.4h} \right)^2} + \eta_b \right] \frac{235}{f_y} \quad (2)$$

### (二) 实验构件与设备介绍

介绍构件的基本情况,强调要实现的约束条件,即端部可绕强轴自由转动、端部可绕弱轴自由转动、端部不可扭转、端部可以自由翘曲。介绍各个测点的物理意义与相对应的通道(图4),阐明数据之间的相互印证关系。介绍加载设计装置(吊载方法),阐述力控制和位移控制各自的特征。



(a)测点布置讲解

(b)试件尺寸量测

图4 试验准备工作

### (三) 学生任务及实验指导

(1)选择实验试件。实验分为若干小组,每8~10位学生一组,每组学生在给定的构件(不同长度)中随机选择,现场测量构件关键尺寸(图5)。

(2)逐个检查测点是否工作正常,确定加载制度。其中,加载制度采用单调竖向加载,要求对构件承载力进行估算,选定合理的加载步骤和每级荷载的大小。

(3)预加载。预加载荷载为极限承载力的20%,检测设备是否正常工作,检测应变片和位移计的读数是否正常,同时应压紧试件,消除空隙。

(4)正式加载和读数。实验过程中要求学生及时判断构件所处的状态,在接近极限承载力80%时应适当调整加载方案,合理控制加载速率,以获得完整的加载曲线。对构件最终的破坏形式进行记录(图5),判断极限承载力(荷载不继续增加,而试件的变形明显增大),关键过程拍照,最后卸载实验构件。

(5)提交实验报告。实验完成后,要求学生对实验数据进行汇总、整理,绘制应力-应变曲线和荷载-位移曲线,分析实验结果的合理性,将所得承载力与规范公式<sup>[10-11]</sup>进行对比,比较普通钢构件与钢-混凝土组合构件的极限承载力,作出讨论与总结,完成并提交实验报告。

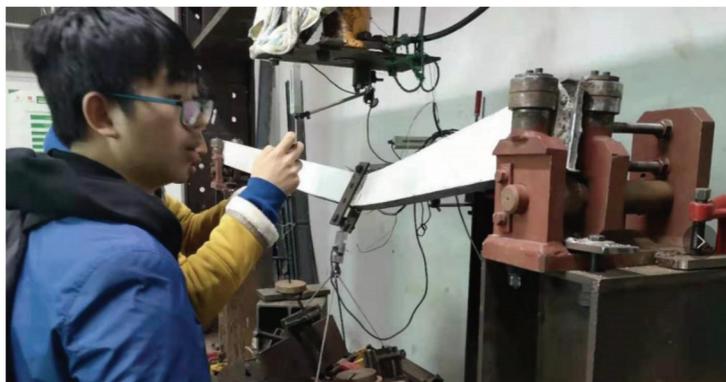


图5 试验结果观察

#### 四、教学效果分析

本教学项目于2020—2021学年秋首次加入钢结构基本原理实验大纲,在年级400余名学生中有70余位学生选择了PEC梁的试验(另有其他钢构件试验可供选择),得到了参与学生的高度认可,有效提升了钢结构教学实验的宽度和广度,激发了学有余力的学生对新型结构构件的探索兴趣。通过追踪PEC梁整体失稳的全过程,学生对钢梁弯扭失稳的机理有了更加深刻的认识,对于混凝土对钢梁承载能力与稳定性能的提升有了更加深入的理解。

从试验报告(图6)可以发现,95%以上的学生可以熟练采用理论公式推导H型钢梁的整体稳定承载力,并发现内填混凝土可有效延迟弯扭失稳,显著提升承载力;80%以上的学生能够定性地评价内填混凝土对构件整体稳定承载力提升的基本力学机理,虽然并不完全准确,但基本反映了学生的思考能力。典型的回答包括:(1)填充的混凝土能有效约束平面外变形,起到提高平面外稳定性的作用,使得承载力得到大幅的提升;(2)混凝土的加入使构件截面的惯性矩有了较大的提高,让构件在几何层次上的抗弯性能有了增强;(3)混凝土对H型钢的腹板和翼板有黏结作用,制约了在弯曲的过程中腹板和翼板可能产生的局部失稳变形,进而提高了整体的稳定性;(4)混凝土的抗压性能优异,对钢构件容易产生失稳的受压区有较好的辅助作用。部分学生从经济效应的角度阐述了PEC梁的优越性,还有部分学生提出了可能存在的问题,包括合理的浇筑方式、混凝土与钢构件协同作用,以及长时间作用、外界侵蚀等条件下混凝土耐久性等问题。代表性学生报告如图7所示。

本教学的另外一个重要意义是培养学生查阅文献、自主学习的能力。有部分学生通过知网等数据库搜索钢-混凝土组合结构的相关知识。图7摘自一位学生的报告,从知网上搜索“部分填充混凝土”,可以得到60篇检索结果(截至2020年12月14日)。其中,发表相关文章最多的是同济大学陈以一教授,4篇。总体而言,通过本实验学生主观能动性得到充分发挥,开阔了学生的工程视野,进一步巩固专业理论知识,增强教学的实践性与应用性。学生通过分析工程问题、思考解决方法,思维能力和解决实际工程问题的能力得到提升。

#### 五、结语

近年来,中国土木工程建设发展迅速,工程建设规模日益扩大,难度不断加大,现代新型结构与构件形式的涌现对土木工程专业学生的专业素质和专业实验教学提出了更高要求。为了适应土木工程建设快速发展,提高相关课程的教学质量,发挥结构实验教学在土木工程专业人才培养中的重要作用,同济大学在既有钢结构实验教学体系的基础上拓展了全新的实验项目,以PEC梁为切入

点,增设组合结构教学实验课程,使学生充分了解该类构件的局部稳定、整体稳定等关键知识,并且与普通非组合构件进行对比,明确钢-混凝土相互作用的优势,拓展实验项目的同时服务钢结构理论教学,起到验证理论、深化理解理论的作用。为了落实教学目标、确保课程的顺利开展,进行了一系列规划和设计工作,包括增补钢结构实验教学大纲、开发配套实验设备和构件、编制学生实验手册等内容,完成了教学实验的总体设计,在弥补组合结构教学实验缺失方面取得了一定的成效。

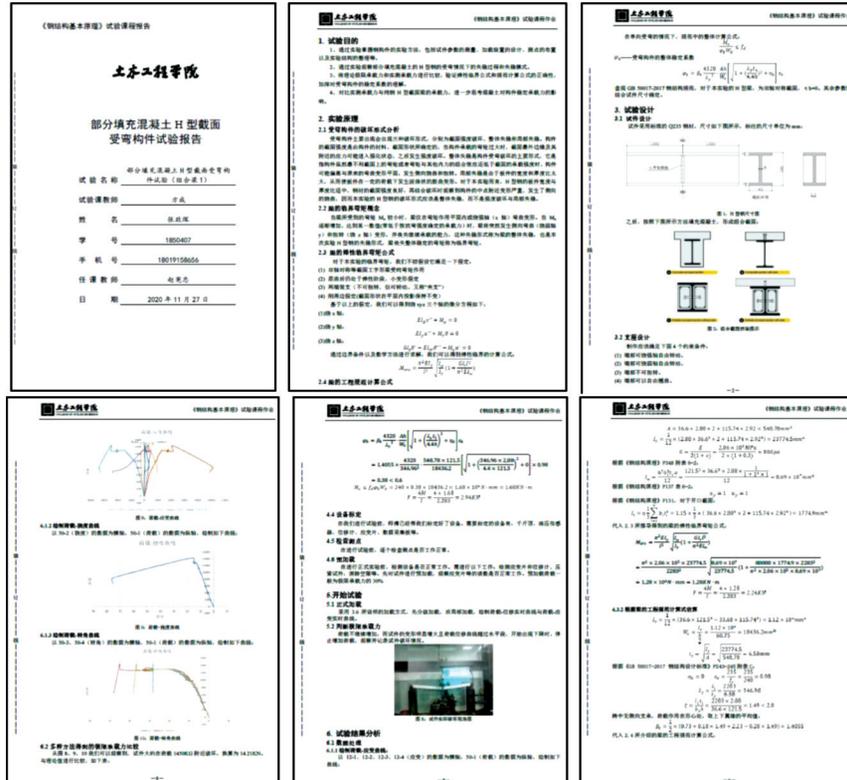


图6 学生试验报告摘要

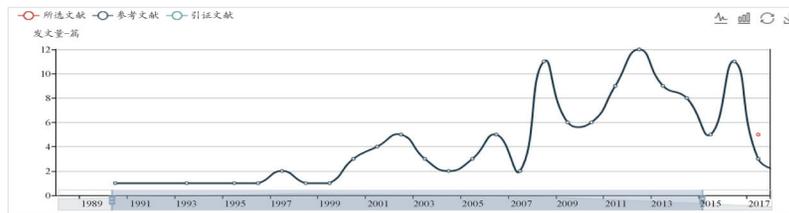


图7 抽取学生试验报告中对部分填充混凝土相关论文发表的统计

参考文献:

[1] 刘占科,何子奇,杨远龙. 钢-混凝土组合结构课程的特点及教学探讨[J]. 高等建筑教育,2016,25(1):92-95.  
 [2] 高福聚,张如林,颜庆智,等. 网络逻辑在组合结构设计教学中的应用[J]. 山西建筑,2019,45(16):5-7.  
 [3] 薛东炎. 组合结构桥梁课程理论教学与工程实践探讨[J]. 教育现代化,2019(105):198-199.  
 [4] 苏庆田,吴冲. 钢与组合结构桥梁课程教学改革探讨[J]. 高等建筑教育,2013,22(4):37-40.  
 [5] 刘玉擎,辛灏辉. 钢与组合结构桥梁课程设计的教学实践[J]. 教育教学论坛,2013(10):241-242.  
 [6] 王伟,陈以一,赵宪忠,等. 钢结构教学实验平台建设与教学方法探索:同济大学的实践[J]. 钢结构工程研究,2012,27(S1):853-859.  
 [7] 任翠玲,王恒华. 钢结构本科教学实验课的改革探索[J]. 山西建筑,2015,41(34):238-239.

- [8] BS EN 1994-1-1:2004, Eurocode4: Design of Composite Steel and Concrete Structures[S]. London: British Standards Institution, 2005.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 组合结构设计规范: JGJ 138—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [11] 陈世鸣. 钢-混凝土组合结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.

## Teaching experiment on stability bearing capacity of steel and concrete composite beams under bending: exploration and practice

FANG Cheng, WANG Wei, GUO Yubin

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

**Abstract:** Steel and concrete composite structures have been widely used in civil engineering, but there are still gaps in the teaching practice of composite structure experiments for undergraduates. In response to this situation, School of Civil Engineering of Tongji University sets up a teaching reform project involves steel and concrete composite members based on the existing basic principles of steel structures experimental course. In this project, testing equipment and instrumentations are developed, the specimens of steel and concrete composite beams are designed, the scope of the key knowledge points is clarified, and the standards for curriculum assessment are proposed. The course reform strives to enable students to master the concept of composite structural members and the method of experiment, improve the experimental operation and data processing abilities, recognize the performance advantages of composite structures in engineering applications, strengthen the engineering practice and comprehensive analysis abilities, and compensate the deficiencies of the existing steel structure experimental teaching content.

**Key words:** teaching experiment; teaching reform; composite structure; axial compression test; steel and concrete composite member

(责任编辑 梁远华)