



钢筋与混凝土粘结力学性能实验教学设计

杨 翌^{1,2}, 肖良丽¹

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 武汉 430065; 2. 城市更新湖北省工程研究中心, 武汉 430065)

摘要: 该文以增强大学生创新实践能力培养为目标, 开展了混凝土结构基本原理课程综合性实验教学研究, 设计并实施了钢筋与混凝土的粘结力学性能综合性实验。通过混凝土抗压强度实验、钢筋与混凝土拉拔实验、粘结强度影响因素及钢筋滑移分析等教学内容增强学生对专业知识的理解、掌握及灵活应用, 同时提升学生的实践能力及创新能力。实验教学实践表明, 该综合性实验教学有效提升了教学效果, 学生反馈良好, 为高校新工科建设及学生的创新实践能力培养提供了有益参考。

关键词: 创新实践能力; 混凝土结构; 综合性实验; 粘结性能

中图分类号: G642.0

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230366

Experimental Teaching Design on Bond Behavior of Reinforcement and Concrete

YANG Zhao^{1,2}, XIAO Liangli¹

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Urban Regeneration, Wuhan 430065, China)

Abstract: The paper aims to enhance the cultivation of innovative practical skills in university students and conducts a comprehensive experimental research on the course of Basic Principles of Concrete Structures. The study designs and implements a comprehensive experiment on the bond behavior of reinforcement and concrete, covering concrete compressive strength, pull-out test of reinforcement from concrete, analysis of factors affecting bond strength, and examination of reinforcement slip. Through these teaching contents, students' understanding, mastery, and flexible application of professional knowledge are reinforced, while their practical and innovative abilities are elevated. The practical application of experimental teaching demonstrates that this comprehensive approach effectively improves the teaching outcomes, and students have provided positive feedback. This research offers valuable insights for the construction of new engineering disciplines in universities and the cultivation of students' innovative practical skills.

Key words: innovative practical skills; concrete structures; comprehensive experiment; bond behavior

我国正在实施创新驱动发展战略, 大数据、云计算、互联网+、人工智能、智能制造等新技术、新经济、新业态发展迅速。在此背景下, 高等教育改革发展已经站在了新的历史起点, 培养具有扎实理论基础和创新实践能力的高层次工程科技人才, 成为中国高等工程教育的责任和任务^[1-2]。近年来, 随着土建行业快速发展, 新材料、新技术不断应用, 以及“绿色”“低碳”“城市更新”“韧性城市”“智能建造”等新理

念、新要求不断涌现^[3-4], 培养高素质、复合型土木工程技术人才也成为土木工程专业高等教育的重要使命^[5-6]。

混凝土结构基本原理是土木工程的重要专业核心课程, 也是后续学习混凝土结构设计、建筑结构抗震等课程, 以及开展混凝土结构课程设计及毕业设计的基础, 在土木工程专业课程体系中占有重要地位, 对人才培养及毕业要求目标达成起着重要支撑作用^[7-8]。由于该课程中各类构件的

收稿日期: 2023-08-13; 修回日期: 2023-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(52178158); 湖北省教育厅中青年创新群体项目(Zy2022e004); 武汉科技大学重点教研项目(2021Z016); 武汉科技大学教研项目(2023X066)。

作者简介: 杨翌(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事混凝土结构方面的科研及教学研究。E-mail: yzwh77@163.com

力学性能及设计理论等均来源于实验分析, 因此, 开展典型构件的实验教学, 对于学生深入理解结构设计理论具有重要作用; 此外, 还可以通过合理的实验设计, 有效提升学生的实践能力、工程应用能力以及创新能力。

根据不同教学层次, 实验可分为演示性、验证性、综合性、设计性及研究性等多种类型实验。但当前很多高校为混凝土结构基本原理课程开设的实验, 大都以演示性、验证性为主, 综合性、设计性及研究性实验偏少, 没有体现“以学生为中心”的基于成果导向教育(outcomes-based education, OBE)的教育理念, 学生对实验的兴趣不足、参与感不高, 而实验教学对学生的实践能力、创新能力培养也缺乏应有的支撑作用。因此, 亟须对该课程的实验教学进行改革与探索。

1 实验教学设计思路及目的

1.1 实验设计思路

实验设计应依据人才培养目标及课程教学目标开展教学设计。武汉科技大学土木工程专业以培养高素质应用型人才为目标, 努力为社会输送具有良好理论基础及创新实践能力的工程及管理人才。混凝土结构基本原理课程的教学目标设定为: 通过课堂教学、实验教学及项目研究等途径, 使学生掌握混凝土结构的基本理论体系与构件的设计方法, 培养学生创新意识及工程实践能力, 为后续课程以及毕业后在土木工程领域继续学习、从事技术工作、科学研究等提供坚实的专业基础。依据上述目标, 实验设计应体现出对学生理论知识、实践能力及创新能力方面的培养作用。

钢筋与混凝土之间具备良好的粘结性能, 是保障两种材料协同工作的前提, 对钢筋混凝土结构的力学性能有着重要影响, 因此, 掌握粘结性能是学习结构力学性能及设计理论的基础。然而, 粘结性能一直是混凝土结构基本原理课程教学的一个重点和难点内容。一方面, 粘结性能涉及复杂的材料力学和化学原理, 对于学生来说, 相关概念可能相对抽象和难以理解; 另一方面, 粘结性能受多种因素的综合影响, 包括混凝土的材料力学性能、钢筋的表面状态、钢筋直径和布置方式等, 要充分理解这些因素之间的相互关系和影响机制也具有一定的难度^[9-11]。

学校“混凝土结构”教学团队设计了一个综合性实验项目——钢筋与混凝土的粘结力学性能实验, 包括混凝土材料抗压强度性能实验和钢筋与混凝土中心拔出实验, 通过验证性、综合性及设计性实验相结合的方式, 强化学生专业知识, 提升学生实践及创新能力。该实验共计2学时, 安排在理论课“混凝土结构材料的物理性能”教学结束后进行。

1.2 实验目的及任务

1) 学习混凝土材料的基本力学性能的测试及理论分析方法, 掌握万能试验机、荷载传感器、应变片、应变仪等仪器设备的测量原理及使用方

2) 学习采用中心拔出实验测量钢筋与混凝土粘结力学性能的实验方法, 掌握粘结破坏模式、钢筋与混凝土粘结强度的基本理论及分析方法;

3) 学习针对不同影响因素开展粘结力学性能分析, 掌握不同因素对粘结力学性能的影响规律及提升粘结力学性能的方法;

4) 学习自行设计应变片测量方案, 测量钢筋与混凝土基体的滑移, 掌握研究粘结应力-滑移关系的基本原理及分析方法;

5) 提交实验报告, 内容包括: 实验目的、实验仪器、实验原理、实验内容与步骤、数据处理、结论与问题讨论。要求提供原始数据, 误差、不确定度分析需提供完整计算过程。

2 实验内容

2.1 混凝土抗压强度实验

2.1.1 实验方法

按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》GB/T 50080—2016^[12]的有关规定制作 150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土立方体试块, 在温度为 20±5 ℃、相对湿度大于 50% 的室内静置养护 1~2 d 后, 拆模放入温度为 20±2 ℃、相对湿度为 95% 以上的标准养护室中养护; 试件到达实验龄期时, 从养护地点取出, 检查其尺寸及形状, 尺寸公差应满足《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2019^[13]第 3.3 节的规定, 试件取出后应尽快进行实验。

采用压力试验机开展混凝土试块抗压强度实验, 如图 1 所示。将试块表面与上、下承压板面擦拭干净, 以试块成型时的侧面为承压面, 将试

件安放在试验机的下压板上, 试件的中心应与试验机下压板中心对准; 启动试验机, 试件表面与上、下承压板应均匀接触; 试验过程中应连续均匀加荷, 加荷速度取 0.3~1.0 MPa/s。加载至试块破坏, 并记录破坏荷载。



图1 压力试验机

2.1.2 实验数据分析

混凝土立方体抗压强度为:

$$f_{cu} = P/A \quad (1)$$

式中: f_{cu} 为抗压强度, 单位 N/mm^2 ; P 为试验破坏荷载, 单位 N ; A 为混凝土试块的截面面积, 单位 mm^2 。取 3 个试件测值的算术平均值作为该组试件的强度值, 精确至 0.1 MPa。混凝土的轴心抗压强度 f_c 、轴心抗拉强度 f_t 、弹性模量 E_c 均由实测立方体抗压强度平均值经计算得到, 计算公式分别为^[14]:

$$f_c = 0.79f_{cu} \quad (2)$$

$$f_t = \frac{1}{8}f_{cu} \quad (3)$$

$$E_c = \frac{10^2}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}}} \quad (4)$$

2.2 钢筋与混凝土的粘结强度实验

2.2.1 实验方法

采用中心拔出实验测量钢筋与混凝土的粘结强度, 制作拉拔试件如图 2 所示^[15], 其中, 混凝土基体尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm; 钢筋沿立方体中心线布置, 加载端长度为 300 mm, 自由端长度为 50 mm。在混凝土立方体区域设置粘结区与非粘结区, 非粘结区采用 PVC 套管将钢筋与基体隔开, 以减少应力集中现象。选取钢筋直径分别为 12、14、16 mm 和粘结长度分别为 50、70、90 mm, 设计制作试件, 每组试件制作 3 个样本, 分析钢筋直径及粘结长度对粘结强度的影

响; 利用应变测量方法, 自行设计钢筋滑移量测量方案, 分析粘结应力-滑移关系。其中, 钢筋均为带肋钢筋, 钢筋属性如表 1 所示, 钢筋示意图如图 3 所示。

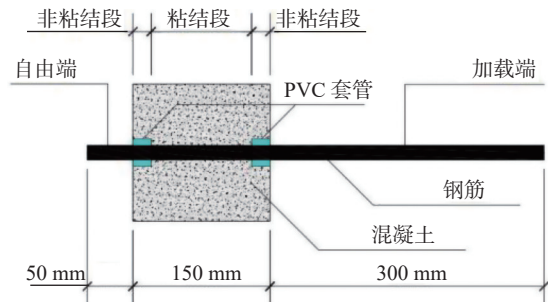


图2 拉拔试件设计示意图

表 1 钢筋属性

直径 d/mm	肋间距 b/mm	肋高 a/mm	肋宽 L/mm
12	8	1.2	1.5
14	9	1.4	1.8
16	10	1.5	1.8

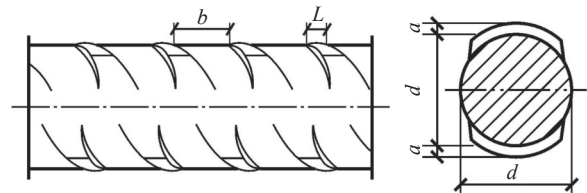
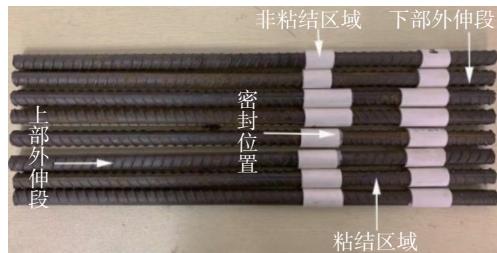


图3 钢筋示意图

试件制作时, 先将钢筋非粘结段区域缠绕双面胶带, 再将 PVC 套管固定在双面胶带上, 在 PVC 两端用密封胶密封, 如图 4(a) 所示; 将钢筋插入模具固定好, 然后浇筑混凝土, 振捣密实, 如图 4(b) 所示; 将浇筑完毕后的拉拔试件表面用刮刀刮平后覆盖保鲜膜浇水养护, 试件在室温下保存 24 h 后进行脱模, 最后在标准环境(温度为 20 ± 2 °C 和湿度为 95% 以上)中养护 28 d, 如图 4(c) 所示。

拉拔实验装置如图 5 所示。采用 WAW-1000 微机控制电液伺服万能试验机对试件施加拉拔荷载, 加载大小通过位移控制, 加载速率为 0.2 mm/min, 荷载数据由万能试验机自动采集。当加载过程中发生基体破坏、钢筋拉断或拔出时, 结束加载。在钢筋加载端对称布置应变片量测钢筋应变, 应变片规格为 BE120-3AA, 尺寸为 2.8 mm×2.0 mm, 通过 BZ2205C 程控静态电阻应

变仪记录应变片数据, 通过百分表测量钢筋加载端的位移。



(a) 钢筋



(b) 模具



(c) 拉拔试件

图4 拉拔试件制作图



(a) 万能试验机



(b) 拉拔试件安装及测量

图5 拉拔实验装置图

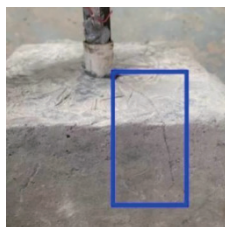
2.2.2 实验结果分析

1) 破坏形式

试件破坏形式主要为拔出破坏和拔出劈裂破坏, 如图6所示。其中, 发生拔出破坏的试件, 钢筋被拔出而基体未见明显破坏; 而发生拔出劈裂破坏的试件, 当试件达到极限荷载时, 裂缝同步出现, 基体粘结力不断下降。实验中还需观察裂缝开展情况, 结合粘结受力机理分析破坏过程。



(a) 拔出破坏



(b) 拔出劈裂破坏

图6 破坏形式图

2) 粘结强度

将实验中粘结段钢筋简化为一个圆柱体, 钢筋与混凝土基体界面的平均粘结应力为^[16]:

$$\tau = \frac{P}{\pi d L_a} \quad (5)$$

式中: τ 为平均粘结应力, 单位 MPa; d 为钢筋直径, 单位 mm; L_a 为粘结长度, 单位 mm。当试验拉拔荷载达到峰值荷载 P_u 时, 对应的峰值粘结应力即为粘结强度 τ_u 。

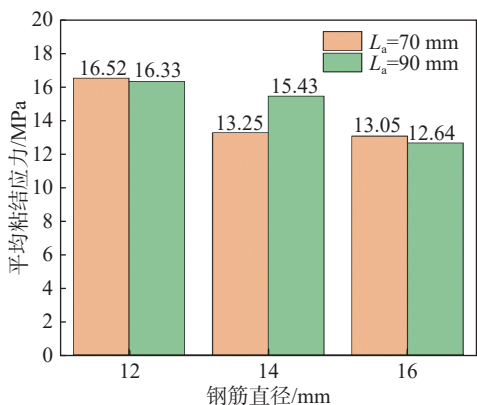
3) 影响因素

① 钢筋直径

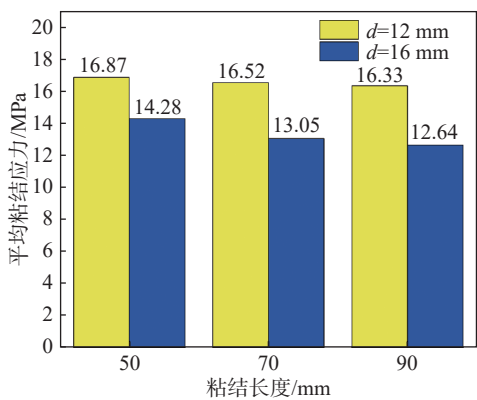
以粘结长度分别为 70 mm 和 90 mm 的拉拔试件为例, 分析不同钢筋直径对粘结强度的影响。如图7(a)所示, 钢筋与混凝土粘结强度随着钢筋直径的增大略有下降。当粘结长度为 70 mm 时, 相较于钢筋直径 12 mm 的试件, 钢筋直径 14 mm 和 16 mm 试件的粘结强度分别降低 19.8% 和 21.0%。当粘结长度为 90 mm 时, 相较于钢筋直径 12 mm 的试件, 钢筋直径 14 mm 和 16 mm 试件的粘结强度分别降低 5.5% 和 22.6%。从粘结力组成方面分析造成这种规律的主要原因, 如随着钢筋直径增大, 钢筋肋高相对减小, 肋距相对增大, 钢筋与混凝土机械咬合力下降, 造成粘结强度下降。

② 粘结长度

以钢筋直径分别为 12 mm 和 16 mm 的拉拔试件为例, 分析不同粘结长度对粘结强度的影响。如图7(b)所示, 钢筋与混凝土粘结强度随着粘结长度的增加出现不同幅度下降。当钢筋直径为 12 mm 时, 相较于粘结长度 50 mm 的试件, 粘结长度 70 mm 和 90 mm 试件的粘结强度分别降低 2.1% 和 3.2%; 当钢筋直径为 16 mm 时, 相较于粘结长度 50 mm 的试件, 粘结长度 70 mm 和 90 mm 试件的粘结强度分别降低 8.6% 和 11.5%。从粘结应力分布及钢筋变形等方面分析造成这种规律的主要原因, 如在拉拔过程中, 钢筋与基体间的粘结应力在粘结长度上是不均匀分布的, 而且粘结长度越大, 粘结应力的分布越不均匀, 平均粘结应力也会随着粘结长度的增大而减小。此外, 随着粘结长度增加, 峰值荷载提高, 钢筋加载端拉应变增大, 因泊松效应导致钢筋产生径向收缩, 减小了基体对钢筋的约束力, 因此粘结强度下降。



(a) 不同钢筋直径对粘结强度的影响



(b) 不同粘结长度对粘结强度的影响

图 7 粘结强度影响因素

4) 粘结应力-滑移关系

通过在钢筋加载段设置应变片，测量钢筋拉应变，结合加载段的实测位移，可计算粘结区域的钢筋滑移量。如图 8 所示，BC 段为钢筋与基体的实际粘结段；CD 段为自由段，该段钢筋在加载过程中无变形；AB 段为直接承受拉拔荷载段，其中，A 点为百分表测点，应变片设于 AB 段中点处，测量钢筋的平均应变 ε 。则加载过程中加载端实际滑移由式(6)和式(7)得出。

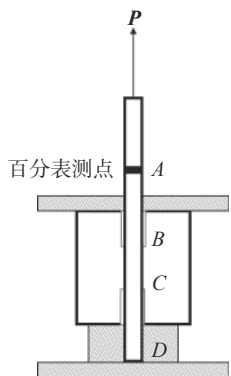


图 8 钢筋滑移测量示意图

$$S_f = S_m - S_d \quad (6)$$

$$S_d = \varepsilon \times L_{AB} \quad (7)$$

式中： S_f 为加载端实际滑移，单位 mm； S_m 为加载端实测位移，单位 mm； S_d 为 AB 段钢筋的弹性变形，单位 mm； L_{AB} 为 AB 段钢筋长度，单位 mm。

由实测的钢筋加载端位移和相应的荷载，分别依据式(3)、式(4)计算钢筋平均粘结应力和滑移，可获得平均粘结应力和钢筋滑移的对应关系曲线，即粘结应力-滑移曲线，如图 9 所示。

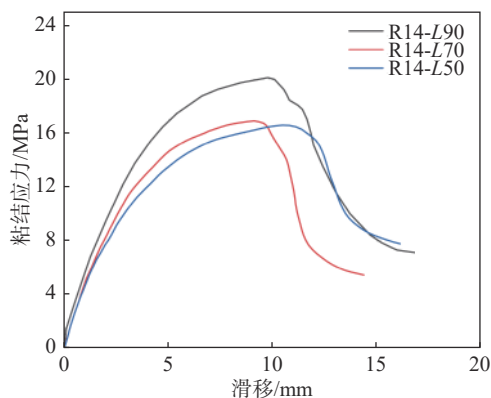


图 9 粘结应力-滑移关系曲线

3 实验教学效果

通过钢筋与混凝土的粘结力学性能综合性实验教学，有效提升了学生对混凝土结构基本原理课程相关专业知识的理解和应用能力。首先，混凝土抗压强度实验使学生深入了解了各类强度指标之间的相互关系和计算方法；其次，粘结强度实验使学生深入了解钢筋与混凝土的粘结作用原理及计算理论；此外，通过研究不同影响因素，学生对粘结作用机理和提升粘结强度的方法有了更深刻的认识；最后，自行设计钢筋滑移测试方法的过程，提升了学生对粘结受力过程及滑移产生原因的理解，培养了学生灵活应用理论知识进行研究分析的能力。课堂反馈表明，该实验教学效果良好，学生学习积极性显著提高，实验课堂氛围明显改善；学生普遍反映该实验有效提升了其理论实践及创新能力。2022 年开设该实验后，混凝土结构基本原理课程的学生评教分数达到 93.46 分，相较于 2021 年的 91.96 分提高了 1.63%。

4 结束语

综合性实验教学使学生不仅掌握了混凝土结

构基本原理课程相关的专业理论知识, 更加深了对混凝土结构与施工的认识, 充分体现对学生理论知识、实践能力及创新能力方面的培养作用, 为新工科背景下的专业课程教学改革, 以及高素质综合性专业人才培养提供了有力支持。因此, 在新工科建设及国家、行业发展需求背景下, 高校应加强对工科专业核心课程建设, 因地制宜开设综合性实验教学, 以提升学生的实践、创新能力。

参考文献

- [1] 王武东, 李小文, 夏建国. 工程教育改革发展和新工科建设的若干问题思考[J]. 高等工程教育研究, 2020(1): 52-55.
- [2] 周绪红. 凝聚高校优势 回归工程实践: 写在《高等建筑教育》一流课程建设专刊发刊之际[J]. 高等建筑教育, 2020, 29(1): 1-2.
- [3] YAN J K, ZHENG Z, ZHOU Y C, et al. Recent research progress in intelligent construction: A comparison between China and developed countries[J]. Buildings, 2023, 13(5): 1329.
- [4] XIANG Y, CHEN Y H, SU Y Y, et al. Research on the evaluation and spatial-temporal evolution of safe and resilient cities based on catastrophe theory: A case study of ten regions in Western China[J]. Sustainability, 2023, 15(12): 9698.
- [5] 孙阳. 基于产教融合 GIS 赋能“BIM+”复合型技术技能人才培养的研究[J]. 高教学刊, 2020(28): 159-162.
- [6] 赵丽敏, 岳建伟, 孔庆梅. 以社会发展为导向的土木工程专业创新型人才培养[J]. 教育教学论坛, 2020(10): 164-165.
- [7] 郭琦, 尹海军, 闫雯, 等. 工程教育专业认证中核心理念驱动下的“混凝土结构设计原理”课程建设研究[J]. 教育教学论坛, 2020(20): 223-225.
- [8] 高乐, 刘玲华, 马亚妮. 基于应用能力培养的混凝土结构设计课程实践研究[J]. 四川建材, 2022, 48(11): 235-236.
- [9] 胡春红, 赵宇, 秦本东, 等. 新工科背景下“理论+实践”课程体系改革研究: 以混凝土结构设计基本原理课程为例[J]. 大学教育, 2022, 11(8): 93-95.
- [10] 霍兵勇, 王俊, 杨毅哲. 案例教学提升应用能力的探讨: 以混凝土结构设计课程为例[J]. 创新创业理论研究与实践, 2022, 5(14): 31-34.
- [11] 杨勇, 史庆轩, 师琳, 等. 土木工程专业课程体系改革与优化实践探索[J]. 高等建筑教育, 2020, 29(1): 31-37.
- [12] GB/T 5008—2016, 普通混凝土拌合物性能试验方法标准[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2016.
- [13] GB/T 50081—2019, 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019.
- [14] 李爱群, 程文灏, 王铁成, 等. 混凝土结构-上册-混凝土结构设计原理[M]. 7版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [15] LI X R, WU Z M, ZHENG J J, et al. Bond performance of ribbed bars in concrete: Effects of loading rate and lateral tension[J]. Magazine of Concrete Research, 2023, 75(8): 402-416.
- [16] WANG X L, LI W J, LIU Y Q, et al. Bond performance of reinforcing bars in SFRC: Experiments and meso-mechanical model[J]. Composite Structures, 2023, 318: 117092.

编辑 葛晋