

工程证据链驱动的混凝土梁四点受弯探究性实验教学模式

夏立鹏¹

(1. 东莞理工学院生态环境与建筑工程学院, 广东东莞 523808)

摘要: 混凝土梁四点受弯实验能够同步呈现荷载、挠度、钢筋与混凝土应变以及裂缝发展, 是联系正截面受弯理论与工程现象的重要实验。但教学实践中容易出现“课中操作积极、课后分析薄弱”的反差: 统一电子表格提高了计算和绘图效率, 也使“共用数据—套用模板—复述结论”成为低成本完成路径。针对数据后处理、理论联系和报告同质化问题, 文章提出工程证据链驱动的探究性实验教学模式。以真实实验数据为基础, 将原始记录依次转化为数据质量判断、特征状态识别、规范理论对照、偏差解释和工程结论; 采用“共享真实数据+个人证据任务”形成差异化分析责任; 虚拟仿真用于单因素对照模拟, 人工智能(Artificial Intelligence, AI)仅承担质询、校核与表达反馈, 不替代原始数据判读和最终工程判断。进一步构建“课前预测—课中取证—课后论证—个人答辩”的实施流程和以工程论证为核心的评价方案, 为提升混凝土结构实验课程的数据分析能力与理论—实践迁移提供可实施路径。

关键词: 混凝土梁; 实验教学; 工程证据链; 虚拟仿真; 人工智能

1. 引言

混凝土结构是土木工程中应用最为广泛的结构形式之一, 其受弯性能直接关系到结构的安全性与耐久性。在“混凝土结构设计原理”等核心课程的教学体系中, 钢筋混凝土梁的抗弯试验始终是连接理论与实践的枢纽环节。通过四点弯曲加载试验, 学生能够直观观察适筋梁从弹性工作阶段、带裂缝工作阶段直至破坏的全过程, 理解平截面假定、开裂荷载、屈服荷载和极限荷载等核心概念, 为后续结构设计学习奠定坚实的实验基础。然而, 随着新工科建设的深入推进和工程教育认证对人才培养质量提出的更高要求, 传统混凝土

作者简介: 夏立鹏, 东莞理工学院生态环境与建筑工程学院教师。

基金项目: 东莞理工学院高等教育教学改革项目“数智赋能: 融合 AI 分析与虚拟仿真的《混凝土结构设计原理》探究性实验教学模式”。

梁受弯实验教学模式正面临深刻的转型压力。钢筋混凝土梁受弯实验是《混凝土结构设计原理》中联系截面计算、材料响应和构件破坏的典型实践环节。近年来,相关教学改革已从单一验证性实验拓展到综合性梁试验、混凝土构件虚拟实验以及 AI 与虚拟仿真融合等方向^[1-5]。这些研究改善了实验资源、操作训练和参数拓展条件,但“能够完成实验”并不等于“能够解释实验”。工程实验教育研究指出,实验学习目标除仪器操作外,还应覆盖理解、分析、建模、工程判断和独立性等维度;既有研究对学习体验和工具效果关注较多,对学生分析能力的直接证据仍显不足^[6-8]。国内土木工程实践教学改革也强调工程认证、实践能力和虚实融合对人才培养的支撑作用^[9-12]。

随着新工科建设持续深化,土木工程教学愈发强调证据导向、逻辑闭环、工程溯源的核心育人理念,要求实验教学打破固化范式,构建“过程可追溯、数据可验证、结论可论证”的探究式教学体系。工程证据链以实验现象、监测数据、力学原理、规范标准、工程案例为核心要素,形成完整的逻辑溯源链条,能够有效破解传统实验教学重结果、轻过程的痛点,引导学生以实证思维开展实验探究,重塑工程实验的认知逻辑与学习范式。本课程历年实验报告中较突出的问题并非不会使用电子表格软件,而是学生往往把数据处理等同于“输入公式和生成曲线”:同组共用原始数据后,图表、计算过程和结论高度趋同;理论值与实测值的差异常被归结为固定的“仪器误差、操作误差”,却缺少针对本次试件的证据。已有实验报告研究发现,固定格式容易使写作退化为填充栏目和复述预设结论,而引入不确定性和多证据论证有助于促进学生呈现真实推理过程^[13]。因此,文章把改革重点由“再增加一种数字工具”转向“如何要求学生对工程结论提供可追溯证据”。

2. 教学问题的工程化重构

2.1 从“绘出曲线”转向“判读数据”

实体加载形成的是多源、连续且可能含有噪声的数据。学生首先应核对单位、零点、缺失值、采样同步和明显跳点,再讨论结构特征。开裂荷载不能仅由软件自动标记;钢筋屈服应结合材料屈服应变、应变增长趋势及荷载—挠度响应判断;极限荷载后的数据是否用于分析,也应结合试件破坏和采集稳定性说明。数据筛选的目的不是得到“更平滑”的曲线,而是保证后续结论建立在可解释的数据基础上。

2.2 从“误差罗列”转向“偏差解释”

理论计算与实测结果不完全一致是实验教学的重要资源。混凝土抗拉性能离散、实际有效高度与设计值偏差、钢筋材料性能、裂缝位置、支座及加载点接触、传感器安装等因素均可能影响响应。报告不应只列出因素名称，而应回答三个问题：该因素影响哪个量；可能使结果向何方向变化；本次实验是否存在支持这一解释的证据。由此将“误差分析”转化为具有方向性和证据约束的工程解释。

2.3 明确正截面理论的观察边界

在理想对称三分点加载且忽略梁自重等分布荷载时，两加载点之间剪力为零、弯矩保持常值，适合观察纯弯段竖向裂缝、受拉钢筋应变和受压区混凝土响应，并与正截面受弯理论对应。剪跨区可能出现的弯剪斜裂缝属于整体受力和破坏边界的重要现象，但不宜直接作为正截面理论验证的主要证据。教学中明确这一边界，可避免“看到裂缝即套用同一理论”的概念混淆。

3. 工程证据链驱动的教学模式

3.1 工程证据链的操作性定义

文章所称“工程证据链”是面向本课程的数据分析框架，而非另立一种通用教育理论。其基本路径为“物理现象—原始数据—数据质量—关键状态—理论基准—偏差机理—工程判断”。荷载、跨中挠度、受拉钢筋应变、受压混凝土应变、裂缝位置与宽度属于直接证据；开裂荷载、屈服荷载、极限荷载及阶段刚度等属于由数据提取的导出指标；规范计算得到的承载力、受压区高度和材料控制条件构成理论基准。

该设计借鉴论证驱动探究（Argument-Driven Inquiry, ADI）中“以数据支持主张、通过论证和复核修正解释”的思想^[14-16]，但聚焦结构工程实验后处理：强调原始数据可追溯、规范条件映射和偏差方向解释。评价也不以答案是否一致为唯一标准，而看学生能否说明“为什么这样判”。这种将评价任务与工程决策过程对齐的思路，与真实性评价强调在不确定条件下形成并论证工程判断的理念一致^[17]。

3.2 “预测—取证—分析—论证”四阶段实施

课前预测：教师给出梁的截面、材料、配筋和加载信息。学生独立计算正截面承载力，预测开裂、屈服和极限阶段的相对顺序、破坏类型及荷载—挠度曲线基本形态。预测不是追求与实测完全相同，而是为课中观察建立理论参照。

课中取证：学生轮换完成传感器检查、加载控制、裂缝观测和数据记录，并在个人观察卡中记录至少一项“与预测不一致或需要解释”的现象。原始数据、照片和关键加载节点统一归档，保证后续分析可追溯。

课后分析：全班共享同一套真实数据，但不直接提供完整结论模板。学生先完成数据质量检查，再确定开裂、屈服和极限状态，并将理论值与实测值进行对照。每个关键判断至少给出一项数据证据，同时说明理论条件或现场现象。

工程论证：报告结论采用“判断—证据—解释—边界”的结构。例如判断某梁呈适筋破坏，应同时说明受拉钢筋屈服、挠度增长、受压区最终破坏等证据，并指出剪跨区现象与正截面判断的关系，而非仅写“与理论相符”。

3.3 “共享真实数据+个人证据任务”降低报告同质化

为保持实体实验真实性，不通过人为扰动原始数据制造个人差异，而由教师分配不同分析责任。个人任务可设置为：某一加载区段的刚度变化、某一应变通道的数据质量、理论与实测极限荷载偏差、不同配筋参数对裂缝特征的影响，或对同伴结论提出有数据依据的边界条件。学生可以获得相同的总体破坏结论，但必须提交与本人任务相匹配的数据处理记录、参数来源和证据说明。这样，评价对象由“最后写了什么”转向“如何得到结论”。

4. 虚拟仿真与 AI 的辅助边界

虚拟仿真已有较成熟的课程建设路径，可用于流程训练、参数扩展和虚实互补^[18-22]。国内外综述表明，实体、虚拟和远程实验各有优势；虚拟环境便于重复操作和参数控制，但其学习效果取决于教学目标与评价设计，因而更适合与实体实验形成互补^[23-26]。针对钢筋混凝土结构，已有虚拟实验支持学生改变配筋等参数，观察构件行为和设计要求^[27-28]。据此，文章不把虚拟仿真作为实体试验的重复，而用于单因素对照模拟：在真实实验出现某种现象后，仅改变配筋率、钢筋直径、混凝土强度或有效高度中的一个因素，观察响应趋势是否支持学生提出的机理解释。

生成式 AI 同样限定为辅助工具。AI 时代的力学教育已提出保留“人在回路”的学习责任^[29]；基于模拟与视频的远程探究实验表明，数字工具可以嵌入以认知冲突和探究活动为核心的学习流程，而不只是用于结果展示^[30]。因此，本课程允许 AI 进行三类工作：质询证据是否充分，检查论证中是否缺少理论条件，辅助整理表达。学生对 AI 建议必须标记“采纳、修改或驳回”并说明理由；开裂点、屈服点、异常数据处理和最终破坏判断仍由学生负责。

5. 评价与实施方案

评价重点由格式规范转向工程论证。建议总分 100 分，具体维度见表 1。个人答辩随机抽取本人任务中的一个判断，要求在原始曲线、理论计算和现场记录之间完成快速追溯，以检验报告是否真正由本人完成。

表 1 工程证据链实验报告评价建议

评价维度	权重	主要评价证据
原始数据与参数可追溯	15%	数据来源、单位、参数取值及处理记录
数据质量判断	15%	零点、缺失、跳点、同步及异常点说明
关键状态识别	15%	开裂、屈服、极限状态的判定依据
理论—实测联系	20%	规范计算、理论条件与实测响应对应
偏差机理与工程论证	20%	偏差方向、证据链完整性及适用边界
个人答辩	10%	对本人任务的现场追溯与解释
图表规范	5%	坐标、单位、图例和数据表达规范

项目实施可采用行动研究。改革前先抽取历年报告建立基线，编码“只绘图不解释、理论实测无对应、偏差解释模板化、关键状态无依据”等问题；试点阶段保持实体梁和加载条件一致，对经常规统一模板与工程证据链任务；效果评价除问卷外，应增加未知梁数据迁移任务，考察学生能否独立完成数据检查、关键状态判断和偏差解释。文章目前提出的是模式与评价方案，后续应以真实试点数据报告评分者一致性、迁移任务表现及实验报告结构变化。

6. 结论

文章以工程证据链为理论支点，对混凝土梁四点受弯实验的教学模式展开系统性重构，旨在回应传统实验教学中长期存在的能力培养短板。教学难点已不再局限于让学生通过肉眼观察“看到破坏”这一表象，而是要求其能够在真实数据的基础上，完成从现象识别到机理阐释、从数值处理到工程判断的完整认知闭环。为此，文章提出以“直接证据—数据质量核查—关键状态判定—理论基准比对—偏差机理分析—工程结论形成”为链路的后处

理框架，旨在将碎片化的数据处理环节串联为具有逻辑递进关系的推理过程，从而强化学生对实验全过程的掌控力与解释力。

在教学设计层面，该模式引入“共享真实数据+个人证据任务”的协作机制，既保留了真实实验数据的客观性与完整性，又通过个性化的任务设定有效规避了统一模板所造成的报告同质化倾向。与此同时，虚拟仿真被明确限定为单因素对照模拟工具，仅用于辅助验证理论假设或解释特定现象，而非替代实体实验；人工智能则被定位为质询、校核与表达辅助角色，旨在提升学生论证的严谨性与表达的规范性，而非削弱其独立分析的能力。该模式的核心目标并非提高数据处理或实验操作的自动化水平，而是通过系统性的证据链训练，使学生能够自主回答“结论依据什么、理论为何有偏差、判断适用到哪里”这三个关键问题，从而将实验报告从结果记录提升为工程推理训练的有效载体。

参考文献

- [1] 曹瑞东, 陈鹏程, 任毅敏. 探索型人才培养的钢筋混凝土梁受弯综合性实验设计[J]. 黑龙江教育(理论与实践), 2024(11):75-79.
- [2] 宋晓滨, 张伟平, 黄庆华, 等. 混凝土构件受力性能虚拟实验教学平台建设[J]. 高等建筑教育, 2021,30(3):158-164.
- [3] 刘泰玉, 孙铖, 罗东雨. 混凝土结构实验教学“虚拟仿真+人工智能”教学模式的构建与实践[J]. 黑龙江教育(理论与实践), 2026(7):82-85.
- [4] 缪玉松, 张欣刚, 张颖, 等. 人工智能与虚拟仿真赋能基础力学实验教学改革初探[J]. 实验室研究与探索, 2025,44(8):155-160. DOI:10.19927/j.cnki.syyt.2025.08.027.
- [5] 郭恒宁, 贺志启, 刘艳, 宗周红. 土木工程实验教学的虚拟仿真平台设计[J]. 实验技术与管理, 2019,36(3):143-145.
- [6] FEISEL L D, ROSA A J. The role of the laboratory in undergraduate engineering education[J]. Journal of Engineering Education, 2005,94(1):121-130. DOI:10.1002/j.2168-9830.2005.tb00833.x.
- [7] NIKOLIC S, ROS M, JOVANOVIĆ K, et al. Remote, simulation or traditional engineering teaching laboratory: a systematic literature review of assessment implementations to measure student achievement or learning[J]. European Journal of Engineering Education, 2021,46(6):1141-1162. DOI:10.1080/03043797.2021.1990864.
- [8] NIKOLIC S, SUESSE T F, GRUNDY S, et al. Laboratory learning objectives: ranking objectives across the cognitive, psychomotor and affective domains within engineering[J]. European Journal of Engineering Education, 2024,49(3):454-473. DOI:10.1080/03043797.2023.2248042.
- [9] 黄正均, 苗胜军, 张磊, 等. 基于工程教育认证的土木工程专业实验教学改革与实践[J]. 实验技术与管理, 2019,36(1):209-212,237. DOI:10.16791/j.cnki.sjg.2019.01.049.
- [10] 苏原, 郑俊杰. 土木工程专业工程实践模式的探索与实践[J]. 高等工程教育研究, 2019(4):107-112.
- [11] 赵晓霞, 王卫东, 蒋琦玮, 等. 新工科视角下土木工程核心能力实践教育体系建设[J]. 高等工程教育研究, 2020(1):31-36.

- [12] 白泉, 边晶梅, 于贺, 盛国华. 虚实结合的土木工程专业实践教学体系构建研究[J]. 高等工程教育研究, 2018(4):67-71.
- [13] GOUVEA J, APPLEBY L, FU L, WAGH A. Motivating and shaping scientific argumentation in lab reports[J]. CBE—Life Sciences Education, 2022,21(4):ar71. DOI:10.1187/cbe.21-11-0316.
- [14] SAMPSON V, GROOMS J, WALKER J P. Argument-Driven Inquiry as a way to help students learn how to participate in scientific argumentation and craft written arguments: an exploratory study[J]. Science Education, 2011,95(2):217-257. DOI:10.1002/sce.20421.
- [15] SAMPSON V, WALKER J P. Argument-Driven Inquiry as a way to help undergraduate students write to learn by learning to write in chemistry[J]. International Journal of Science Education, 2012,34(10):1443-1485. DOI:10.1080/09500693.2012.667581.
- [16] GROOMS J. A comparison of argument quality and students' conceptions of data and evidence for undergraduates experiencing two types of laboratory instruction[J]. Journal of Chemical Education, 2020,97(8):2057-2064. DOI:10.1021/acs.jchemed.0c00026.
- [17] KORETSKY M D, MCCOLLEY C J, GUGEL J L, EKSTEDT T W. Aligning classroom assessment with engineering practice: a design-based research study of a two-stage exam with authentic assessment[J]. Journal of Engineering Education, 2022,111(1):185-213. DOI:10.1002/jee.20436.
- [18] 熊宏齐. 虚拟仿真实验教学助推理论教学与实验教学的融合改革与创新[J]. 实验技术与管理, 2020,37(5):1-4,16. DOI:10.16791/j.cnki.sjg.2020.05.001.
- [19] 熊宏齐. 基于虚拟仿真的线上线下融合专业实验教学体系构建[J]. 实验技术与管理, 2022,39(3):5-10,25. DOI:10.16791/j.cnki.sjg.2022.03.002.
- [20] 刘金库, 葛云晓, 黄婕, 张浩然. 虚拟仿真实验教学课程:数字赋能工程能力培养新模式[J]. 高等工程教育研究, 2023(3):85-88,113.
- [21] 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.
- [22] 徐明, 熊宏齐, 吴刚, 等. 土木工程虚拟仿真实验教学中心建设[J]. 实验室研究与探索, 2016,35(2):139-142,216. DOI:10.3969/j.issn.1006-7167.2016.02.034.
- [23] MA J, NICKERSON J V. Hands-on, simulated, and remote laboratories: a comparative literature review[J]. ACM Computing Surveys, 2006,38(3):Article 7. DOI:10.1145/1132960.1132961.
- [24] DE JONG T, LINN M C, ZACHARIA Z C. Physical and virtual laboratories in science and engineering education[J]. Science, 2013,340(6130):305-308. DOI:10.1126/science.1230579.
- [25] BRINSON J R. Learning outcome achievement in non-traditional (virtual and remote) versus traditional (hands-on) laboratories: a review of the empirical research[J]. Computers & Education, 2015,87:218-237. DOI:10.1016/j.compedu.2015.07.003.
- [26] REEVES S M, CRIPPEN K J. Virtual laboratories in undergraduate science and engineering courses: a systematic review, 2009-2019[J]. Journal of Science Education and Technology, 2021,30(1):16-30. DOI:10.1007/s10956-020-09866-0.
- [27] JIANG H, KURAMA Y C, FANELLA D A. WWW-based virtual laboratories for reinforced concrete education[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2002,10(4):167-181. DOI:10.1002/cae.10030.
- [28] PARK S H, ADEBA A D, HWANG Y K, et al. A built-up virtual laboratory to enhance understanding of concrete structure design requirement[J]. International Journal of Online and Biomedical Engineering, 2016,12(3):48-52. DOI:10.3991/ijoe.v12i03.5462.

- [29] 赵沛, 杨卫. AI 时代的力学教学[J]. 力学与实践, 2025,47(1):9-14. DOI:10.6052/1000-0879-24-453.
- [30] COOK J, EKSTEDT T, SELF B, KORETSKY M. Bridging the gap: computer simulations and video recordings for remote inquiry-based laboratory activities in mechanics[J]. Advances in Engineering Education, 2022,10(2):1-22.

Inquiry-Based Experimental Teaching Model for Four-Point Bending of Concrete Beams Driven by Engineering Evidence Chain

Xia Lipeng

(1. School of Ecological Environment and Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, Guangdong, China)

Abstract: The four-point bending test of concrete beams can simultaneously present load, deflection, strain of reinforcement and concrete, as well as crack development, making it an important experiment that connects the theory of normal section flexural behavior with engineering phenomena. However, in teaching practice, there tends to be a notable contrast where "students are active during the experiment but weak in post-experiment analysis." While unified spreadsheets have improved the efficiency of calculation and plotting, they have also made "data sharing—template application—conclusion repetition" a low-cost pathway to task completion. To address the issues of post-processing, theoretical connection, and homogenized reports, this paper proposes an inquiry-based experimental teaching model driven by an engineering evidence chain. Based on authentic experimental data, the model transforms raw records stepwise into data quality judgment, characteristic state identification, normative theory comparison, deviation interpretation, and engineering conclusions. The strategy of "sharing real data + assigning individualized evidence tasks" is adopted to create differentiated analytical responsibilities. Virtual simulation is utilized for single-factor comparative simulation, while Artificial Intelligence (AI) is employed only for questioning, verification, and presentation feedback, without replacing the interpretation of raw data or final engineering judgment. Furthermore, an implementation process of "pre-experiment prediction—in-experiment evidence collection—post-experiment reasoning—individual defense" is established, along with an assessment scheme centered on engineering reasoning. This provides a feasible pathway for enhancing data analysis capabilities and the theory-to-practice transfer in concrete structure laboratory courses.

Keywords: concrete beam; experimental teaching; engineering evidence chain; virtual simulation; artificial intelligence