

《土木工程材料》课程科研反哺教学研究

——以桥面铺装用超高韧性混凝土创新性实验研究为例

崔圣爱^{*#}, 柏竟玮, 贾 卓, 张书豪

西南交通大学土木工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年12月25日; 录用日期: 2026年1月22日; 发布日期: 2026年1月27日

摘要

以桥面铺装用超高韧性混凝土的创新性科研为案例, 探讨如何将科研成果融入《土木工程材料》课程教学中。结合授课教材, 梳理科研反哺教学所对应的章节及知识点, 并给出了具体的科研反哺教学的实施及推广方式, 旨在提高学生的实践能力和科研意识, 促进教学与科研的有机结合, 为土木工程类课程的教学改革提供借鉴。

关键词

土木工程材料, 科研反哺教学, 桥面铺装, 超高韧性混凝土

Scientific Research Back Feeding Teaching in “Civil Engineering Materials” Course

—Taking the Innovative Experimental Research on Super Toughness Concrete for Bridge Deck Pavement as an Example

Sheng'ai Cui^{*#}, Jingwei Bai, Zhuo Jia, Shuhao Zhang

School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: December 25, 2025; accepted: January 22, 2026; published: January 27, 2026

Abstract

Taking the innovative scientific research of super toughness concrete for bridge deck pavement as

^{*}第一作者。

[#]通讯作者。

a case, we discuss how to integrate the scientific research results into the course teaching of "Civil Engineering Materials". Combined with the teaching materials, the corresponding chapters and knowledge points of scientific research feeding teaching are sorted out, and the specific implementation and promotion methods of scientific research feeding teaching are given, aiming to improve students' practical ability and scientific research awareness, promote the organic combination of teaching and scientific research, and provide reference for the teaching reform of civil engineering courses.

Keywords

Civil Engineering Materials, Research Back Feeding Teaching, Bridge Deck Pavement, Super Toughness Concrete

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国高等教育的快速发展，科研与教学的深度融合已成为教育改革的重要方向。教育部在《关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见》[1]中明确提出，应推动科研与教学的有机协同，鼓励教师将前沿科研成果融入课程教学，以科研反哺教学，从而增强课程内容的创新性与实践性，激发学生的专业学习兴趣。研究表明[2]-[8]，这种融合模式对提升教育质量和学术水平具有显著作用，因而受到高等教育界的广泛关注与探讨。

近年来，随着城市化进程趋缓与基础设施日趋完善，土木行业需求渐趋饱和，发展重心正从建筑结构形式向新材料研发方向转型。这一转型趋势在“十五五”期间进一步凸显：为实现《2030 年前碳达峰行动方案》的建筑业减排目标，绿色低碳材料已成为行业核心关切。中国工程院唐明述院士强调：“延长建筑物使用寿命即是最有效的节能减排”，而材料耐久性直接决定建筑寿命，这使得耐久性材料研究具有双重价值——既满足低碳要求，又契合行业转型需求。岳清瑞院士在第十届钢结构进展国际会议上更明确指出：“土木工程的重大突破必将源于工程材料的革新”。在此背景下，纳米改性混凝土作为前沿研究方向，已连续两年入选全球土木工程领域 Top10 研究前沿。可见，在“双碳”目标与行业升级的双重驱动下，新材料研究正成为推动土木工程学科交叉创新与绿色转型的关键突破口。

土木工程材料作为土木工程专业核心的必修课之一，旨在让学生了解有关土木工程中常用材料的基本知识和实际应用场景。而为响应国家对于建筑材料耐久性以及低碳环保的号召，大量土木工程新型材料应运而生。以正交异性组合钢桥面铺装为例，传统的沥青混凝土铺装层由于其自身力学性能相对较差，且易受气候环境影响，在使用过程中易出现开裂等病害问题，造成后期运营维护成本较大，而超高韧性混凝土(STC, Super Toughness Concrete)作为一种新型超高性能混凝土，可以有效解决桥面铺装层开裂的问题。

基于此，本文围绕“桥面铺装用超高韧性混凝土性能研究”科研案例展开，并以《土木工程材料》教学为研究对象，探讨科研反哺教学的意义、作用以及实施方法。

2. 桥面铺装用超高韧性混凝土性能科研反哺

2.1. 研究背景

近年来，我国桥梁建设不断向着大跨径方向发展，使得组合桥面板结构在钢桥梁上的研究和应用受

到广泛的关注。目前，正交异性钢桥面板因其自重轻、承载力高、施工方便等特点，已逐步成为大跨度桥梁的主要应用结构形式之一。下图为成都大件路扩容改造工程绕城高速上跨桥工程，钢桥面铺装采用了 50 mm 厚超高韧性混凝土结构层，其地理位置及 STC 的摊铺工艺见图 1。



Figure 1. STC engineering cases and paving process
图 1. STC 工程实例及摊铺过程

但是，传统的钢桥面铺装材料通常为沥青混凝土，其力学性能和温度稳定性较差，在使用的过程中容易出现开裂等病害问题。其中的一个关键的原因是正交异性钢桥面板局部刚度不足，由于其结构复杂，焊缝数量多，在车辆反复荷载作用下，焊接点处应力幅较大，易产生疲劳开裂，同时也将使得沥青混凝土路面中产生较大的应力和变形，造成铺装层开裂、结层破坏等病害问题。

超高韧性混凝土是由水泥、石英砂、矿物掺合料、钢纤维、减水剂等原材料组成，经凝结硬化后具有高强度、高韧性、优异耐久性，其不仅具备超高强度，还具有超高抗变形能力，可以适应钢桥面板局部应力集中、变形较大的情况，是一种可以用于钢梁桥面铺装层的新型超高性能混凝土材料[9]-[12]，详见图 2。然而作为一种新型的铺装材料，目前仅有团体标准和湖南省、四川省地方标准，尚没有国家标准和行业标准。而由于超高韧性混凝土为满足其超高强度的要求，对原材料要求较为苛刻，在施工时大多采用现场锅炉蒸汽养护，导致养护成本提高，养护工艺较复杂，且目前已经使用的组合桥面结构服役期还较短，综合性能验证尚需时间和环境的检验。因此，为了提升超高韧性混凝土应用于桥梁铺装层的适用性，本文所介绍的科研案例从原材料配合比、成型工艺以及养护方式三个方面对超高韧性混凝土进行改性优化。

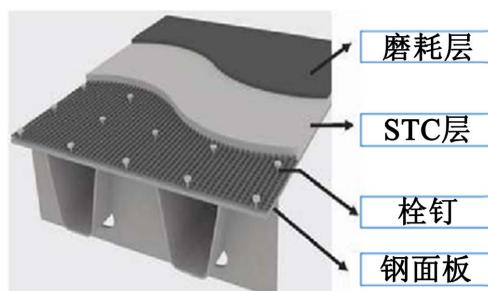


Figure 2. Steel-STC composite bridge deck
图 2. 钢-STC 组合桥面板

2.2. 超高韧性混凝土配合比优化研究

超高韧性混凝土的原材料一般包括普通硅酸盐水泥、石英砂、矿物掺合料、微丝镀铜钢纤维、高性

能聚羧酸减水剂和水。其中，矿物掺合料替代部分水泥加入混凝土中能够提高混凝土结构的力学性能和耐久性，但仅掺入单一矿物掺合料时这种提高程度有限，而掺加多元矿物掺合料时，通过不断优化及调整矿物掺合料的种类和比例能够极大程度的发挥掺合料的作用，从而更好地提高混凝土材料的各项性能 [13]-[15]。不同胶凝体系下超高韧性混凝土的抗压强度以及微观扫描图见图 3 和图 4。

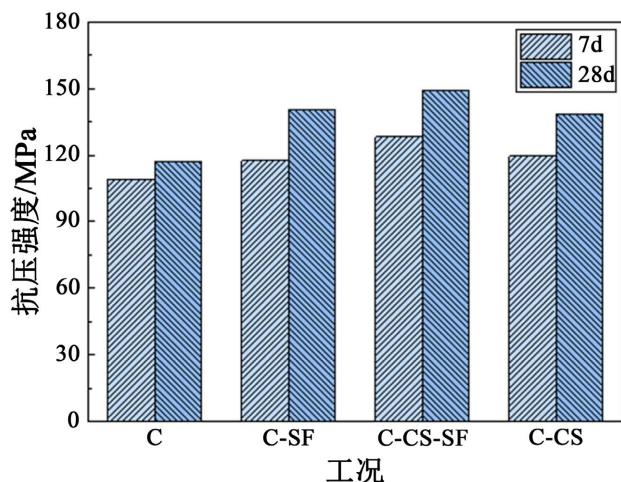


Figure 3. Compressive strength of STC under different cementitious systems
图 3. 不同胶凝体系下超高韧性混凝土的抗压强度

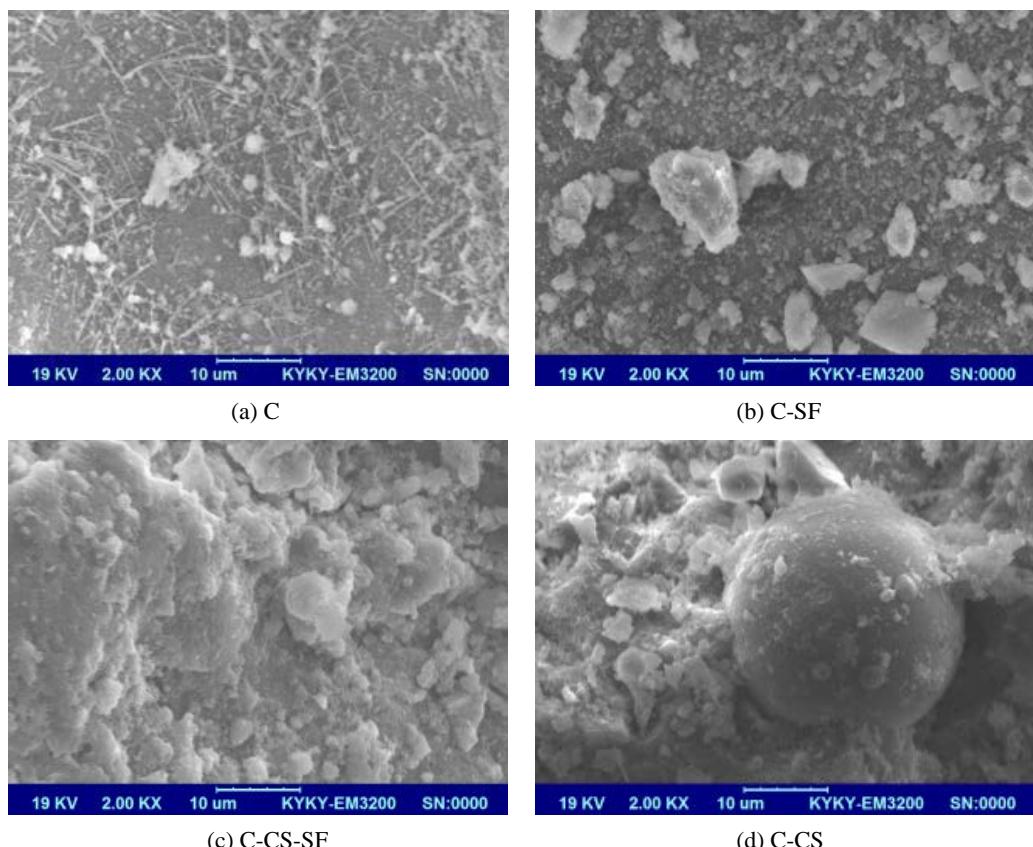


Figure 4. SEM images of STC under different cementitious systems
图 4. 不同胶凝体系下超高韧性混凝土电镜扫描图

图 3 表明, 矿物掺合料的加入可以显著提高混凝土的抗压强度, 且多元胶凝体系(水泥 + 硅灰 + 微珠)下的力学性能更优。结合图 4 的微观图可知, 与仅掺水泥的 C 组相比, 掺入矿物掺合料之后, 其余各工况的界面均产生了更多的水化产物, 且填充更为致密。

此外, 随着纳米技术的飞速发展, 水泥基材料的纳米改性也受到了广泛关注。鉴于此, 本文的科研案例同步探索了纳米 SiO_2 对于超高韧性混凝土性能的影响。不同纳米 SiO_2 掺量下的超高韧性混凝土的力学性能以及水化放热量分别见图 5。

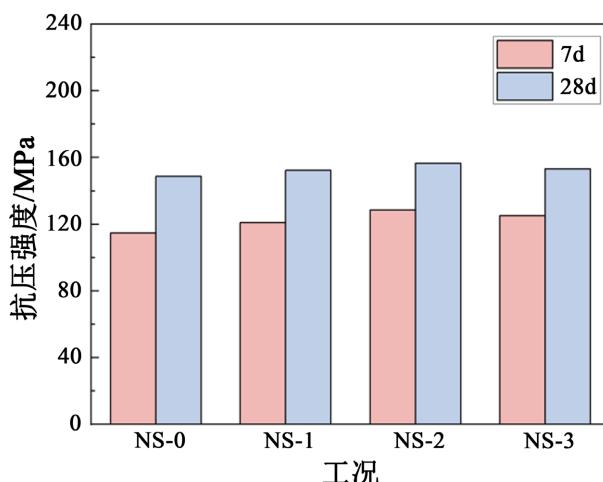


Figure 5. Compressive strength of STC with different nano-dosages
图 5. 不同纳米掺量下超高韧性混凝土的抗压强度

图 5 表明, 纳米 SiO_2 的掺入可以改善混凝土的力学性能, 其中, 纳米 SiO_2 的掺量为 2% 时, 效果最优; 但当纳米 SiO_2 的掺量过多时, 会因其自身的团聚效应, 反而会降低混凝土的抗压强度。

科研反哺教学的内容: ① 超高韧性混凝土的原材料组成及配合比设计; ② 矿物掺合料的概念以及其在混凝土中发挥的作用; ③ 纳米材料的预处理方法以及对混凝土产生的作用效益; ④ 常见的混凝土微观测试方法及应用; ⑤ 混凝土微观结构和宏观性能之间的关系。

2.3. 超高韧性混凝土成型工艺优化

钢纤维对超高韧性混凝土力学性能的改善作用主要来源于粘结强度, 而粘结强度主要受钢纤维取向性的影响, 良好的取向分布能够更好地提高钢纤维混凝土力学性能和延性[16][17]。该科研案例通过探索两种不同的成型工艺(常规浇筑与薄层夯捣)对超高韧性混凝土纤维分布影响。

基于 CT 图像的分析得到了不同成型工艺下混凝土内部的纤维分布平面图以及纤维分布概率密度图, 分别见图 6 和图 7。

图 7 表明, 常规浇筑下, 钢纤维呈现乱向分布, 而薄层夯倒下, 钢纤维朝向基本一致, 分布较为均匀。结合图 7 可知, 薄层夯捣工艺下纤维取向角比常规浇筑要小, 主要分布在 40° 以内, 分布范围更为集中, 平行于受力方向的取向性更大, 而常规工艺下的乱向钢纤维角度分布范围较广, 纤维取向性较差, 分布特征不明显。出现这种现象的原因可能是在薄层夯捣下, 由于外力的介入, 使得大多数钢纤维呈二维分布, 平行于受力方向, 而对于常规工艺下的试件, 纤维与浆体之间的聚团状态不易打破, 使得纤维与水平向的浆体粘聚力不够, 易成三维乱向分布, 因此取向性较差。

科研反哺教学的内容: ① 超高韧性混凝土的成型工艺; ② 钢纤维在混凝土中的作用机理; ③ 成型工艺对于混凝土纤维分布以及性能的影响; ④ 基于 CT 扫描的图像处理分析。

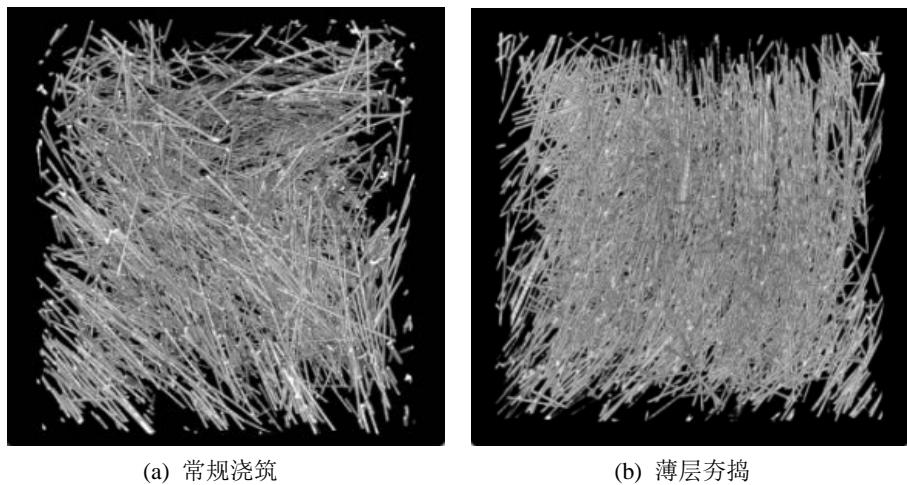


Figure 6. Plane graphs of fiber distribution in concrete under different molding processes
图 6. 不同成型工艺下混凝土纤维分布平面图

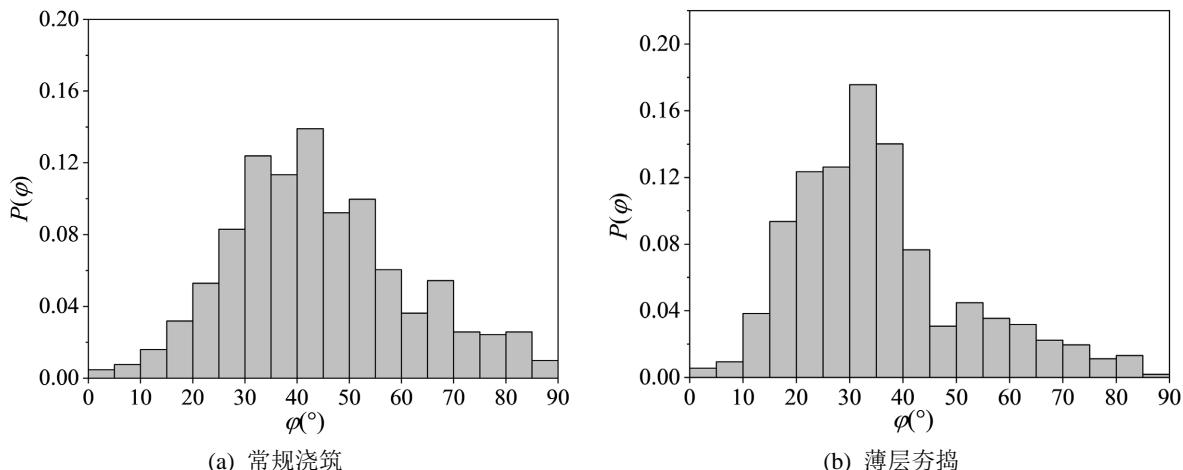


Figure 7. Probability plots of fiber distribution in concrete under different molding processes
图 7. 不同成型工艺下混凝土纤维分布概率图

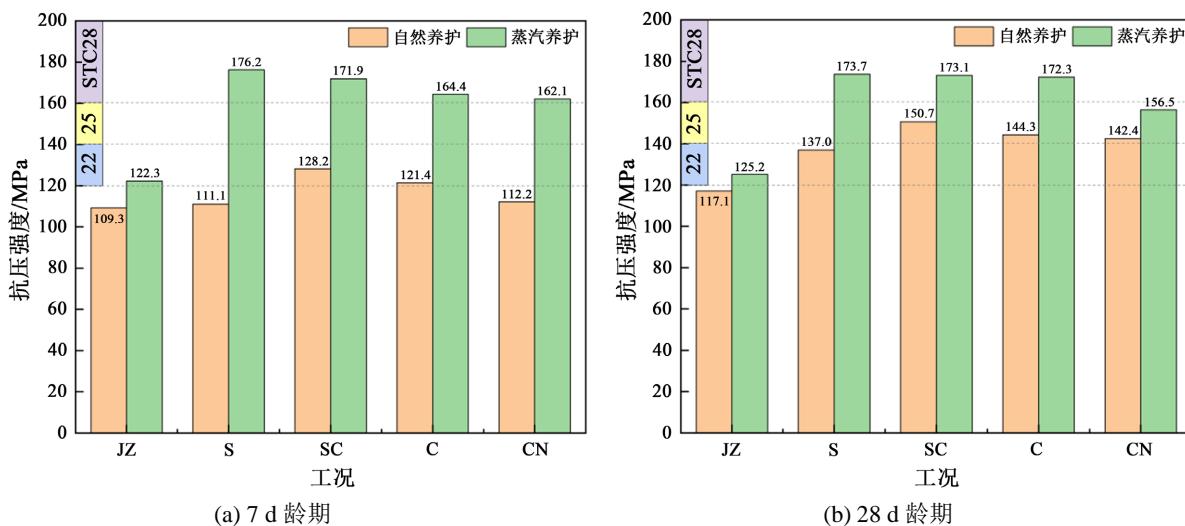
2.4. 超高韧性混凝土养护方式优化

为了降低超高韧性混凝土蒸汽养护所带来的成本和能耗，该科研案例在配合比优化的基础上，对超高韧性混凝土采用自然养护的方式，以期达到规范要求的强度值。

不同养护方式下超高韧性混凝土的抗压强度见图 8。

图 8 表明，蒸养养护条件下 JZ 组、S 组、SC 组、C 组、CN 组相对自然养护条件下 7 d 与 28 d 抗压强度均有所提高。可以发现，随着龄期的增长，自然养护下各工况抗压强度与蒸养养护下的差距逐渐减小，表明蒸汽养护条件下混凝土试件强度虽然更高，但后期强度发展优于蒸汽养护，JZ 组和 S 组 28 d 抗压强度可达 120 MPa 以上，实现 STC22 的要求，SC 组、C 组、CN 组 28 d 抗压强度可达 140 MPa 以上，实现 STC25 的要求，自然养护简化了工艺流程，降低了养护成本，仍能满足部分工程对混凝土强度要求，促进了 STC 的推广和应用。

科研反哺教学的内容：① 混凝土养护方式的种类及适用性；② 养护条件对混凝土强度发展的影响规律；③ 养护方式对工程项目经济性的影响。



注: JZ: 对照组, S 组: 掺入硅灰代替部分水泥; SC: 掺入微珠和硅灰代替部分水泥; C: 掺入微珠代替部分水泥; CN: 掺入微珠和纳米 SiO_2 代替部分水泥。

Figure 8. Compressive strength of STC under different curing methods
图 8. 不同养护方式下超高韧性混凝土的抗压强度

3. 科研反哺教学——归纳、推广及实施

3.1. 反哺教学课本实例

将上述科研成果反哺于西南交通大学出版的土木工程材料教材《建筑材料(第四版)》, 相应反哺的章节及对应知识点见图 9。

由图 9 可知, 创新试验研究成果可以精准对应课程章节中的具体知识点, 这种对应关系有助于学生构建清晰、系统的知识框架, 将抽象的理论知识与具体的工程实践紧密结合。通过这种方式, 不仅能够增强学生们学习的兴趣和积极性, 更能帮助学生深入理解和掌握所学内容。此外, 这种方式不仅有助于学生全面理解理论知识, 还能培养其在实际工程中的应用能力和创新思维, 科研成果的引入可以促使学生思考和解决具有启发性的问题, 拓展了其思维深度, 例如:

- (1) 不同的纳米材料对于混凝土会产生不同的作用效益, 那么, 选择纳米材料时需要考虑哪些因素?
- (2) 为了响应国家低碳的号召, 市面上大多混凝土都会掺入多种矿物掺合料去代替部分水泥, 那么这种复合胶凝体系对混凝土的性能会造成怎样的影响?
- (3) 纤维常常作为增强增韧材料掺入到混凝土中, 那么是否可以考虑多种不同尺度的纤维材料复掺入混凝土中, 它们在混凝土中依次起到怎样的作用呢?

通过科研反哺的方式使得科研成果得以迅速且高效地融入教学过程, 最大限度地实现科研与教学的紧密结合。这不仅推动了课程内容的实时更新, 还使学生能够在学习过程中直接接触到最新的研究进展, 提升教学的前沿性和工程应用性。

3.2. 科研反哺教学的推广及实施

上述科研反哺教学的实例只是科研项目中一小部分成果的体现, 但却涉及了土木工程材料教学环节中的多个知识点。这足以证明科研与教学是相辅相成的。为此, 各高校应该重视将科研成果有机地融合于教学当中, 通过将最新科学的研究成果和实际探索过程直接引入课堂, 教师能够有效提升教学质量, 并激发学生的科研兴趣与创新能力。具体的推广和实施方案如下。

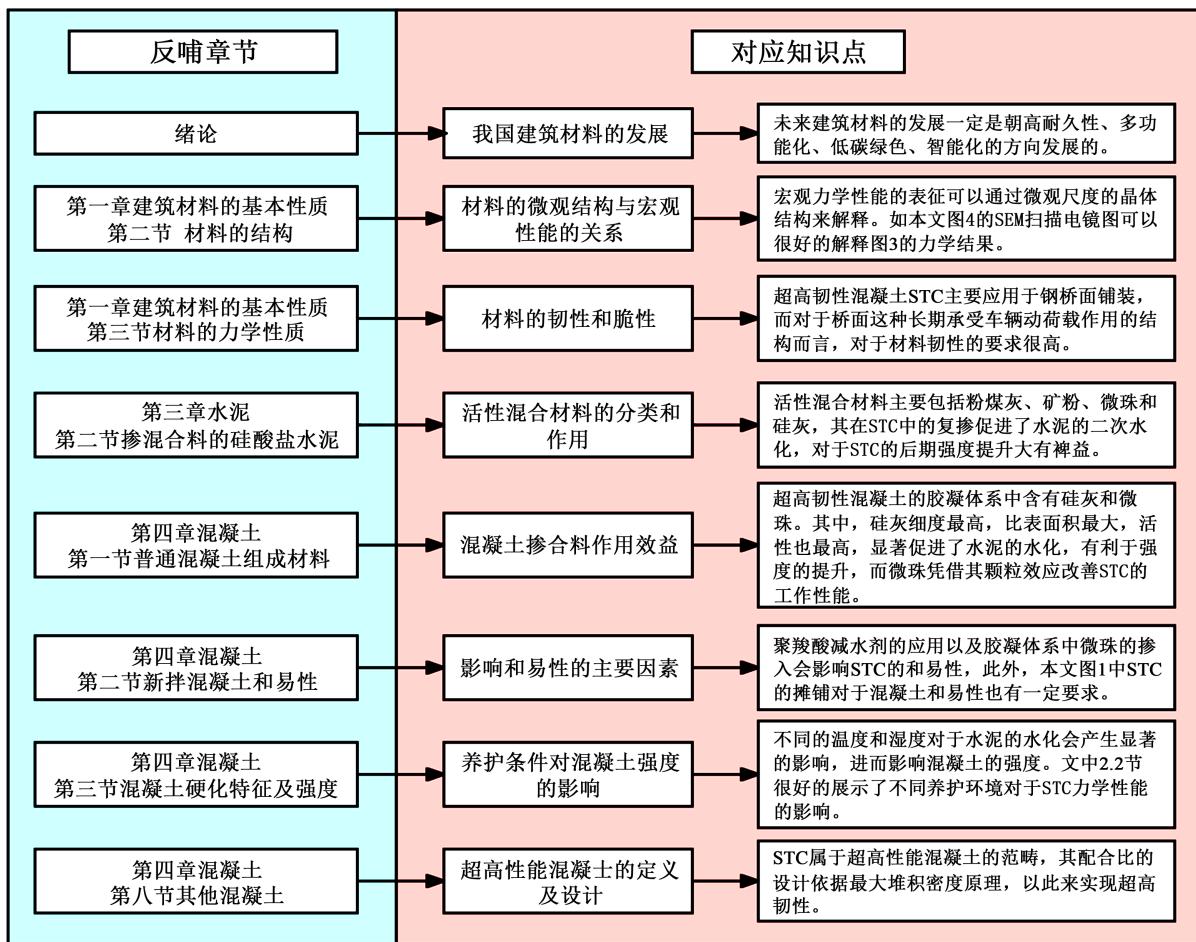


Figure 9. Feedback to chapters and corresponding knowledge points
图 9. 反哺章节及对应知识点

3.2.1. 构建多元化科研与教学融合机制

科研与教学的深度融合需打破场景壁垒，搭建多维度、全链条的联动平台：开设科研导向型选修课程，课程设计紧密联系学科前沿与行业需求，内容上系统覆盖文献检索、实验设计、数据处理等科研基础方法，同时聚焦领域内最新研究成果、技术突破及应用前景，采用理论讲解、案例拆解与小组研讨的授课模式，让学生在沉浸式学习中掌握科研逻辑与实操技巧；邀请高校资深科研导师、科研项目负责人、行业顶尖科研团队核心成员等科研人员走进课堂，通过专题讲座、学术研讨会、科研经验分享会等形式，结合具体项目从选题立意、难点突破、成果转化进行全环节的展开与分享，同时进行科研人员答疑环节，鼓励科研人员深度参与课堂互动、实时解答学生科研疑问，让学生直观感受科研的艰辛与魅力；推进实验室开放共享，制定常态化开放计划，明确开放时段、参与条件及安全规范，既允许学生参观核心实验设备、观摩科研实验全过程，也选拔学有余力、兴趣浓厚的学生加入科研项目小组，在科研人员指导下参与基础实验操作以及数据记录分析这些辅助工作，让学生在实践中深化对理论知识的理解。

3.2.2. 强化科研与教学复合型师资队伍建设

师资队伍是科研反哺教学的核心支撑，打造兼具科研能力与教学水平的复合型团队是核心要素：围绕学科特点与教学需求，打破科研人员与教学人员的身份壁垒，进行跨职能教学科研专项团队的组建，科研人员发挥专业优势，提供前沿科研素材、实验技术支持及科研逻辑指导，教学人员凭借丰富教学经

验，将科研内容转化为适配学生认知水平的教学资源，双方共同完成课程大纲设计、教学方案制定、教学活动实施及教学效果评估等全流程工作；搭建师资能力提升平台，定期组织教学人员参与科研技能培训、科研项目观摩、学术会议等活动，拓宽前沿视野、提升科研素养；同时鼓励科研人员参与教学方法培训，学习把科研成果转化成生动易懂的教学内容，实现科研与教学的双向赋能；建立团队协作激励机制，将科研反哺教学成果纳入师资考核评价体系，充分激发团队成员的协作积极性与创造性。

3.2.3. 聚焦学生科研核心能力系统培养

学生科研能力的培养要遵循“兴趣引导－实践锻炼－能力提升”的逻辑，搭建多层次、阶梯式培养平台。围绕学科核心领域及社会热点问题举办高水平科研竞赛，鼓励学生跨专业、跨年级组建团队，自主提出创新性科研选题并开展实践探索，竞赛中设置开题答辩、中期检查、成果展示等完整环节，邀请专家导师全程指导，对优秀科研项目给予资金支持、成果孵化等奖励，充分激发学生的科研创新热情。开设论文写作专项课程，系统覆盖选题技巧、文献综述撰写、论文结构设计、学术规范、查重与修改等核心内容，同时推行导师一对一的指导模式，鼓励学生结合课程学习、实验实践或竞赛项目开展论文创作，从理论梳理、数据支撑、逻辑架构等方面细致打磨，培养学生的学术表达能力与严谨科研态度。支持学生深度参与校级、省级乃至国家级科研项目，让学生在真实科研场景中直面问题、协作攻关，逐步提升问题解决能力、团队协作能力与创新思维。

3.2.4. 建立科学完善的评估与反馈机制

构建闭环式评估与反馈体系是要让科研反哺教学始终保持优化态势的核心。明确多维度评估指标与固定周期，指标既涵盖教学质量、学生能力提升、科研成果转化等核心方向，也细化到课程内容前沿性、教学方法适用性、学生科研兴趣激发度、科研技能掌握程度，以及论文、竞赛奖项等具体科研成果产出；评估每学期开展一次，采用定量与定性相结合的方式，定量层面依托课程成绩、科研成果数据等客观呈现，定性层面通过课堂观察、师生访谈等深入了解实际效果。拓宽反馈渠道，搭建线上线下联动的多元平台，线上借助问卷系统、教学管理系统收集学生匿名反馈，线下组织学生代表座谈会、教师教学研讨会交流想法；同时引入“教学督导与行业专家”第三方评估机制，邀请专业人士对课程实施效果进行客观评判，提出针对性改进建议。强化评估结果落地应用，建立专门的评估反馈台账，对收集到的问题分类梳理、精准施策，明确整改责任主体与时间节点，及时调整课程内容、优化教学方法、完善实践安排，让科研反哺教学方案在动态调整中持续完善、提质增效。

3.2.5. 开展多渠道推广与宣传

构建全方位、立体化的宣传矩阵能够有效扩大科研反哺教学的影响力，营造良好的育人氛围。在校内宣传时，可系统整合各类宣传资源，充分利用校园官网、校报、广播站、宣传栏等平台，持续展示科研反哺教学的具体实行方案、特色课程以及成果，包括学生的科研作品、教师的教学创新案例等。同时可借助校园学术节、开放日等活动契机，设立科研反哺教学专题展区，通过成果展示、现场演示与互动体验等方式，使师生、家长及社会各界直观感受其成效；在对外宣传时，可积极拓展传播渠道：与教育类媒体及行业媒体建立合作，推出深度报道与专题访谈；灵活运用新媒体平台，制作发布短视频、图文推送、直播互动等生动活泼的内容，讲述学生参与科研的成长经历、教师开展教学创新的实践过程。

在教学过程中，教师可有机融入前沿科研案例，实现教学内容的动态更新与深化：在讲解传统建材性能局限时，引入科研项目中新型复合材料的研发过程，完整呈现从问题发现、方案设计到实验验证的研究过程。这样不仅有助于教师突破既定教材框架，能够用真实的科研情境丰富授课内容、创新教学方法，也能使学生领悟到科研背后的逻辑与价值，消解学生对学术研究的距离感。通过跟随教师剖析科研逻辑、参与模拟实验，学生的独立思考能力与动手实践能力将得到切实提升，从而激发其内在的科研兴

趣与创新潜能，最终培养出既具备扎实专业基础，又拥有创新思维与实践能力的复合型人才，为土木工程行业的可持续发展输送优质后备力量。

4. 结语

为贯彻落实《中国教育现代化 2035》，本文基于教高(2019) 6 号《教育部关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见》“推动科研反哺教学”，以《土木工程材料》教学为研究对象，结合桥面铺装用超高韧性混凝土科研为案例，探讨了科研反哺教学的实际应用以及推广实施方式，得到以下结论：

- (1) 以桥面铺装用超高韧性混凝土科研为案例，探索了配合比、成型工艺以及养护方式对超高韧性混凝土的影响规律，并引导科研反哺土木工程材料教学当中的知识点。
- (2) 通过科研反哺教学的推广及实施，呼吁各高校加强学生理论和实际的结合，发挥学生的主观能动性，实现科研和教学的相辅相成。

基金项目

国家自然科学基金(52278277); 四川省国际合作项目(2023YF0061); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2682024JX002); 西南交通大学学位与研究生教育教学改革项目(YJG6-2025-Y062)。

参考文献

- [1] 教育部关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见(教高(2019) 6 号) [J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(2): 78-82.
- [2] 蒋俊华, 吴永辉, 候卫周. “双一流”背景下科研反哺教学的思考[J]. 商丘师范学院学报, 2024, 40(3): 92-94.
- [3] 陈光宋, 张弘钧. “双一流”背景下科研反哺教学的困境、对策与实践[J]. 南京理工大学学报: 社会科学版, 2019, 32(5): 67-71.
- [4] 李荣辉, 樊沁娜. 科研反哺教学模式的探索与实践[J]. 广东化工, 2023, 50(21): 175-177, 171.
- [5] 秦海鸿, 陈杰, 王世山, 等. 科研反哺教学的理念贯穿和实施方法[J]. 教育教学论坛, 2019(10): 233-235.
- [6] 郭彦朋, 高明雪. 高职院校教师科研反哺教学的有效路径[J]. 新疆职业大学学报, 2023, 31(3): 40-43.
- [7] 徐晓娟, 丁勇, 单晶. 科研反哺教学在本科教学的应用初探[J]. 科技创新导报, 2017, 14(23): 204-205.
- [8] 刘品. 科研反哺教学在建筑材料实验课程中的实践[J]. 山西建筑, 2023, 49(20): 100-103, 108.
- [9] 邵旭东, 周环宇, 曹君辉. 钢-薄层 RPC 组合桥面结构栓钉的抗剪性能[J]. 公路交通科技, 2013, 30(4): 34-39, 64.
- [10] 邵旭东, 曹君辉, 易笃韬, 等. 正交异性钢板-薄层 RPC 组合桥面基本性能研究[J]. 中国公路学报, 2012, 25(2): 40-45.
- [11] 陈斌, 邵旭东, 曹君辉. 正交异性钢桥面疲劳开裂研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 170-174.
- [12] 曹君辉. 钢-薄层超高性能混凝土轻型组合桥面结构基本性能研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [13] 胡亚飞, 李克庆, 韩斌, 等. 复合胶凝体系对尾砂湿喷混凝土强度的影响及其配比优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 3999-4009.
- [14] 吴岳峻, 任申瑞, 章皓, 等. 多元胶凝体系泡沫混凝土性能研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(5): 101-104, 165.
- [15] 肖力光, 林侠. 复合胶凝体系对透水混凝土强度的影响[J]. 混凝土, 2019(7): 74-75, 78.
- [16] 任祥坤. 定向分布钢纤维对高性能混凝土性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.
- [17] 宋秋磊. 钢纤维分布对高性能混凝土性能影响及调控研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.