第十五届中国创造学会创造成果奖

理论创新奖

一、项目名称

极端环境下超高韧性混凝土组合结构服役性能演化机理与强韧化设计理论

二、主要完成人

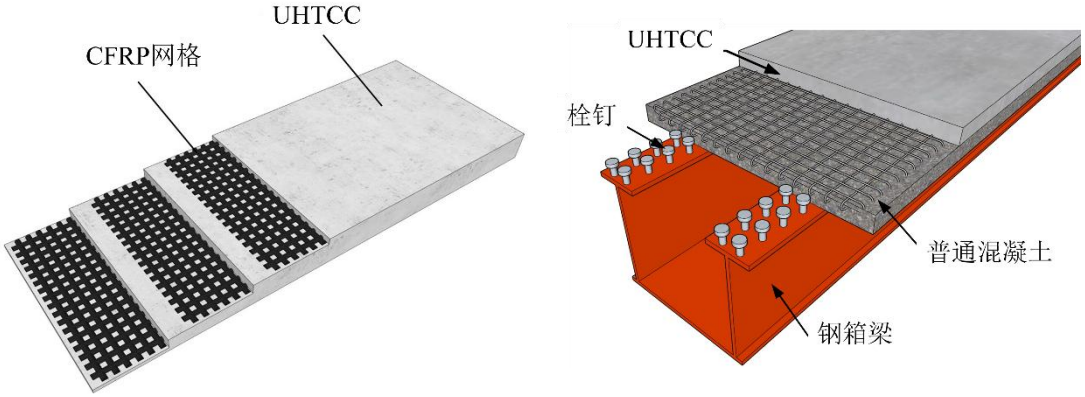
武芳文，曹锦承，薛成凤，杨雨厚，毕伟涛，贺润斌，张景峰，雷海鹏，刘政豪，陈永瑞，王文蕊，何岚清，李滋润，陈澳，周燕妮

三、主要完成单位

长安大学，西京学院，广西北投低空经济投资有限公司，陕西交控新材料有限公司，陕西交控凯达路桥工程建设有限公司，西安交通大学

四、项目背景（200 字以内，1-3 张照片，10MB 以内）

现役混凝土结构在荷载与环境的耦合作用下，普遍出现裂缝扩展、耐久性劣化等问题，严重威胁服役安全。超高韧性混凝土（UHTCC）作为一种高性能水泥基材料，具有高强度、高延性、优异裂缝控制能力和良好耐久性，可显著提升结构的韧性、抗裂性和服役寿命。研究团队提出“钢-UHTCC”及“UHTCC-NC”等新型组合结构（图 1），构建多尺度研究体系，揭示界面损伤机理，建立极端环境下韧化与长寿化设计方法，为混凝土结构的强韧化与长效维护提供了关键技术支撑。



（a）UHTCC 拉伸应力应变曲线　　（b）钢-ECC 叠合板组合梁

图 1　超高韧性混凝土组合结构

五、关键技术（300 字以内、列出支撑成果及评价水平）

UHTCC 材料性能调控与理论创新与 UHTCC 组合结构韧性强化机制与理论体系，具体内容如下：

（1）盐冻融循环作用下 UHTCC 宏-微观表征及力学性能损伤演化规律；

（2）盐冻融循环作用下 UHTCC 耐久性损伤机理及理论模型；

（3）FRP 网格增强 UHTCC-NC 界面粘结损伤演化机理；

（4）盐冻融循环作用下 UHTCC-NC 界面力学行为损伤机理研究；

（5）CFRP 网格/高强钢绞线增强 UHTCC-NC 叠合梁抗弯性能及承载力设计方法；

（6）盐冻循环-疲劳荷载耦合作用下钢-UHTCC 连接件性能退化机理及疲劳寿命评估模型；

（7）钢-UHTCC 组合梁高温后损伤演化机理分析及剩余承载力评估；

（8）盐冻融循环作用下 UHTCC-NC 组合柱轴压力学行为及耐久性设计方法；

（9）钢-UHTCC 组合梁负弯矩区力学性能及抗裂设计方法。

支撑成果（论文）

序号	论文名称	期刊名称	年卷页码	收录情况
1	ECC-NC 复合梁抗弯性能试验研究	中国公路学报	2025,38(01):158-172.	EI
2	波纹腹板钢-ECC 组合梁负弯矩区抗弯性能试验	工程力学	2025,42(05):241-251.	EI
3	纤维/钢绞线网格增强 ECC-RC 复合梁抗弯性能试验	复合材料学报	2025,42(01):441-452.	EI
4	Bonding performance between ECC repair layer and salt freeze-thaw damaged NC: Experimental study and theoretical analysis	Construction and Building Materials	2025, 475:141268.	SCI（中科院 1 区 TOP）
5	Experimental study and analytical model for the bond-critical failure of the CFRP-ECC-NC composite interfaces	Engineering Structures	2025, 335:120303.	SCI（中科院 1 区 TOP）
6	Experimental research and theoretical calculation of the shear performance of the MPCC-NC interface	Construction and Building Materials	2025, 472:140789.	SCI（中科院 1 区 TOP）
7	Experimental investigation on shear behavior of PVA-ECC keyed joints	Engineering Structures	2024, 309:118071.	SCI（中科院 1 区 TOP）
8	Comparative study of the negative bending behavior of corrugated web steel-concrete composite beams using NC, ECC and UHPC	Engineering Structures	2023, 283:115925.	SCI（中科院 1 区 TOP）
9	Experimental study on the bond behavior of CFRP-grid-reinforced ECC and NC interface	Construction and Building Materials	2023, 392:131947.	SCI（中科院 1 区 TOP）
10	Durability evaluation of engineered cementitious composite subjected to salt freeze-thaw cycles	Construction and Building Materials	2025, 481:141954.	SCI（中科院 1 区 TOP）

支撑成果（发明专利）

序号	专利类别	专利名称	专利号	授权日期	专利权人	发明人	专利有效状态
1	发明专利	一种全预制桥墩和承台的组合构造及制造和装配方法	ZL201910045692.4	2023	长安大学	**武芳文**;罗建飞;张亚军;高源;郑伟;吴志达;温雅军;戴君	有效
2	发明专利	抗倾覆防落梁的独柱墩桥梁加固装置及其安装方法	ZL201911222989.X	2024	长安大学	**武芳文**;唐文龙;罗建飞;冯彦鹏;刘硕;赵洋洋;周静雯;王广倩	有效
3	发明专利	基于位移和转角的梁结构初始状态识别方法	ZL2020102526233	2022	广西交科集团有限公司	**杨雨厚**;郝天之;王海华	有效
4	发明专利	纤维编织网增强 ECC 联合单面增大截面加固箱拱拱脚段方法	ZL2020108040093	2022	广西交科集团有限公司	**杨雨厚**;刘宇飞;宁怡豪	有效
5	发明专利	连续梁分段抗弯刚度识别方法	ZL2020102407075	2022	广西交科集团有限公司	**杨雨厚**;马娴	有效
6	发明专利	未知状态下基于转角的简支梁最大挠度测定方法	ZL2020102405351	2022	广西交科集团有限公司	**杨雨厚**;周冬明;张潭	有效
7	发明专利	不确定荷载下简支梁损伤静力识别方法	ZL2020102405756	2022	广西交科集团有限公司	**杨雨厚**;马娴	有效
8	发明专利	锈蚀钢筋混凝土梁损伤定位与量化评估方法	ZL2020102526214	2022	广西交科集团有限公司	**杨雨厚**;杨绿峰;彭曦	有效
9	发明专利	基于静载试验竖向位移的单梁损伤识别方法	ZL2020102526178	2022	广西交科集团有限公司	**杨雨厚**;罗克文;蔡宇鹏	有效
10	发明专利	一种芳纶纤维改性的聚合物水泥防水涂料及其制备方法	ZL202111253090.1	2022	陕西交控新材料有限公司	**马瑞杰**;**毕伟涛**;杨欣;白嘉龙;**山颖获**	有效

支撑成果（软件著作权）

序号	软件名称	证书号	登记批准日期	著作权人	软件著作权有效状态
1	土木工程材料智能配比与管理系统	2025R11L1432385	2025	长安大学	有效
2	土木工程结构智能分析与优化系统	2025R11L1432528	2025	长安大学	有效
3	桥梁健康监测与安全预警云平台	2025R11L1432919	2025	长安大学	有效
4	建筑工程质量 AI 检测评估平台	2025R11L1433124	2025	长安大学	有效
5	智慧工地施工进度实时监控管理系统	2025R11L1433501	2025	长安大学	有效
6	桥梁结构健康监测系统 V1.0	2025SR1351823	2025	长安大学	有效

评价水平

1. 本项目已委托**中国科学院上海科技查新咨询中心**完成科技查新，查新项目名称为**“极端环境下超高韧性混凝土组合结构服役性能演化机理与强韧化设计理论”**，查新结论如下：

综上所述，由项目方委托查新的课题，该项目构建面向极端服役条件的 UHTCC 材料性能定向调控与力学评估体系，提出单轴损伤本构模型与剩余寿命预测方法。建立基于微细观结构演化的界面失效判据与粘结退化模型，揭示极端环境下 UHTCC 组合界面多尺度损伤演化机制。构建基于“材料性能-界面特性-构件行为-结构响应”多层级协同的 UHTCC 组合结构强韧化设计理论体系，提出面向复杂工况的组合结构寿命预测模型与耐久性设计准则。**经检索，未发现在国内外公开文献中与该项目技术特点相同的具体描述。因此，该项目具有新颖性。**

2. 2025 年 11 月 8 日，**中国创造学会**主持召开了**“极端环境下超高韧性混凝土组合结构服役性能演化机理与强韧化设计理论”**项目成果评价会。评价委员会听取了项目组的汇报，审阅了相关技术资料，经质询讨论，形成评价意见如下：

（1）项目组提供的资料齐全、内容完整、数据翔实，符合科技成果评价要求。

（2）项目组对高温、冻融盐蚀等极端环境下超高韧性混凝土组合结构服役性能演化机理与强韧化设计理论进行了研究，取得了如下主要创新性成果：

1）构建了 UHTCC 材料性能定向调控体系，提出了 UHTCC 开裂演化行为与韧性储备的多指标定量表征模型，建立了 UHTCC 损伤本构及寿命预测方法；

2）揭示了 UHTCC 组合结构界面多尺度损伤演化机理，提出了基于微细观结构演化的界面失效判据与粘结退化模型，探明了界面特性-构件性能-结构行为的耦合响应机制；

3）揭示了 UHTCC 组合结构延性调控机制与韧性演化规律，构建了材料性能-界面特性-构件行为-结构响应多层级的协同 UHTCC 组合结构强韧化设计理论体系，提出了 UHTCC 组合结构寿命预测模型、超高韧性与耐久性设计准则。

（3）项目成果发表学术论文 64 篇（其中：中科院 TOP 期刊论文 15 篇，中文 EI 期刊论文 18 篇），获得授权发明专利 20 件、软件著作权 6 件，参编行业、团体标准 5 部。成果已在陕西、西藏等省份多项重大工程项目中得到成功应用，经济和社会效益显著，推广应用前景广阔。

综上所述，**该项目研究成果总体达到国际先进水平，其中材料性能-界面特性-构件行为-结构响应多层级的协同 UHTCC 组合结构强韧化设计理论体系达到国际领先水平。**

六、综合效益（200 字以内、列出代表性工程、并注明工程特色）

本项目成果已在陕西禹门口黄河大桥、宁夏宝中铁路立交桥、西藏 G4218 雅叶高速桥梁修复及西安太合基地等多个工程中成功应用，有效提升了结构在极端环境下的抗裂性、耐久性与抗震性。该技术可降低结构自重、减少维护成本并缩短工期，经济效益显著，仅陕西交控凯达路桥与中国化学工程重型机械化公司 2024 年即分别实现新增利润 23.04 万元与 26.31 万元。同时，其优异的抗裂韧性延长了结构服役寿命，为基础设施的长寿安全运维提供了关键技术支撑，具备突出的推广价值与社会效益。

代表性工程

序号	工程名称	应用单位名称	成果应用起止时间	工程特色
1	宁夏中卫宝中铁路立交大桥维修加固工程	陕西交控凯达路桥工程建设有限公司	2024 年 12 月-2025 年 6 月	本工程成功克服了宁夏夏季高温干燥大风等极端施工环境与紧迫工期的挑战，通过创新性地应用具备应变硬化、多点细裂特性的超高韧性混凝土材料，不仅显著提升了桥墩的承载力，更大幅增强了其延性与抗震性能，高效优质地完成了加固目标，为类似恶劣条件下的桥梁维修与抗震延性提升工程提供了可靠的解决方案。
2	临汾市迎宾大道与规划三街立交桥工程	陕西交控凯达路桥工程建设有限公司	2023 年 2 月-2023 年 4 月	本工程面临工期紧迫、需昼夜连续施工及环境温度较低等多重挑战。通过选用超高韧性混凝土材料，其在低温条件下仍表现出良好的工作性、稳定的强度发展与便捷的施工工艺，保障了工程进度与成型质量。该材料显著提升了修补区域的抗裂能力与结构延性，取得了优良的加固效果，验证了其在复杂条件与紧急工期下桥梁维修工程中的可靠性与推广应用价值。
3	西藏自治区 G4218 雅叶高速林芝至拉萨段高等级公路桥梁伸缩缝专项处置工程	陕西交控凯达路桥工程建设有限公司	2022 年 9 月-2022 年 10 月	在西藏高原低温、强冻融循环的极端环境下，本工程面临工期紧迫与施工条件恶劣的双重挑战。通过采用超高韧性混凝土，其优异的低温工作性与简便工艺保障了工程进度与成型质量。该材料特有的高延性与韧性，使伸缩缝部位能有效适应变形并抑制开裂，为高原严苛环境下的桥梁关键部位修复提供了可靠的技术解决方案。

序号	工程名称	应用单位名称	成果应用起止时间	工程特色
4	宋康新苑施工二标段（DK4-A）	中国化学工程重型机械化有限公司	2024 年 9 月-2025 年 4 月	本工程为涵盖住宅、商业及大面积地下空间的复杂综合体，结构耐久性与抗裂要求高。项目创新应用了 UHTCC 组合结构强韧化设计理论，将超高韧性混凝土用于地下车库顶板、剪力墙关键部位及外墙转角等易裂区域。该材料凭借优异的多缝控制与高延性，有效分散了微裂纹，显著提升了结构在沉降、温度及荷载下的抗裂能力与整体韧性。应用结果表明，UHTCC 切实增强了结构耐久性与服役寿命，成功验证了其在大型复杂民用建筑中的适用性与推广价值。
5	海圣丰商务大厦	中国化学工程重型机械化有限公司	2024 年 6 月-2025 年 5 月	在结构高度超 139 米、工况复杂的海圣丰商务大厦项目中，针对高层钢-混组合结构对延性、耐久性的严苛要求，创新应用了 UHTCC 多尺度协同强韧化设计。该材料显著提升了钢-混关键节点的粘结性能与界面协同工作能力，有效抑制了应力集中与界面滑移，增强了结构整体韧性、抗震性能及长期服役稳定性，为同类高层复杂建筑的韧性提升提供了成功范例，具有重要的工程推广价值。
6	太合高端智能钻探装备基地项目	中国化学工程重型机械化有限公司	2023 年 10 月-2024 年 6 月	在结构形式多样、界面复杂的太合基地项目中，为满足大跨度厂房振动频繁、装配式节点连接等严苛要求，首次采用了 UHTCC 性能调控与界面韧性强化技术。该材料应用于钢-混关键节点及构件加强区，表现出优异的裂缝控制、延性和界面协同能力，有效抑制了荷载与温度作用下的界面劣化，显著提升了结构整体抗疲劳性能与韧性，为复杂工业建筑的长寿命韧性保障提供了可靠解决方案，具备良好的推广价值。