

项目合同编号：25-26K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究

承担单位：长安大学

项目负责人：王春生

通讯邮编、地址：710064 陕西省西安市碑林区南二环中段 126 号

传真、电话：029-82334830

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

项目合同编号：25-26K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究

承担单位：长安大学

项目负责人：王春生

通讯邮编、地址：710064 陕西省西安市碑林区南二环中段 126 号

传真、电话：029-82334830

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

本项目开展基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究，研究内容包括：

(1) 研制高性价比绿色免蒸养混杂纤维 UHPFRC

研制适用于桥梁强韧性防灾抗灾技术要求的绿色免蒸养混杂纤维 UHPFRC，采用自然河砂、机制砂替代石英砂，用共聚甲醛纤维+钢纤维的混杂纤维替代单一钢纤维，优化 UHPFRC 配合比设计，开展 UHPFRC 延性、冲击韧性试验，提出满足抗震、抗冲击性能要求的免蒸养混杂纤维 UHPFRC 强韧性设计指标，达到“物美价廉、可靠实用、绿色低碳”材料研制目标，实现 UHPFRC 建安费低于国内平均价格的 1/2。

(2) UHPFRC 桥面板与主梁抗冲击性能与强韧性设计准则研究

研发抗落石冲击等能力强的免蒸养混杂纤维 UHPFRC 桥面板、UHPFRC-普通混凝土组合桥面板，以及免蒸养混杂纤维 UHPFRC 主梁、钢-UHPFRC 组合主梁、UHPFRC-普通混凝土组合主梁。通过物理试验与数字试验，系统探究上述 UHPFRC 桥面板和主梁在冲击荷载作用下的受力行为、失效机制与能量耗散规律，揭示 UHPFRC 材料特性对结构抗冲击性能的提升机理，建立适用于 UHPFRC 桥面板和主梁抵抗冲击作用的强韧性设计准则。

(3) UHPFRC、钢-UHPFRC、UHPFRC-普通混凝土组合墩柱抗震、抗冲击性能与强韧性设计准则研究

研发延性与抗冲击能力双强的 UHPFRC、钢-UHPFRC、UHPFRC-普通混凝土组合墩柱，通过物理-数字-原位试验，探究三种 UHPFRC 组合墩柱在地震和水平冲击荷载作用下的受力行为与失效机制，建立新型 UHPFRC 墩柱的抗震、抗冲击强韧性设计准则，提升墩柱抵御地震作用、落石冲击、漂流物撞击、车辆撞击的能力。

(4) UHPFRC 桥面板、主梁与墩柱的质量控制标准研究和工程示范

通过免蒸养混杂纤维 UHPFRC 制备工艺试验，以及 UHPFRC 桥面板、主梁与墩柱模型制作和工程应用，提出 UHPFRC 桥面板、主梁和墩柱施工质量控制标准；将 UHPFRC 制备工艺、组合界面构造设计准则，以及 UHPFRC 桥面板、主梁和墩柱强韧性设计准则等研究成果在 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目中进行示范应用，验证并完善项目研究成果。

2. 技术关键

2.1 拟解决的关键问题

本项目拟解决的关键问题包括：

(1) 缺乏兼顾强韧防灾、绿色节能、免蒸养要求的混杂纤维 UHPFRC 材料，混杂纤维 UHPFRC 材料在多灾害荷载下的强韧性设计指标缺失。

(2) UHPFRC 组合桥面板、组合主梁的抗冲击工作机理不清，抗冲击、抗震的强韧性设计依据缺乏。

(3) UHPFRC 组合墩柱抗震、抗冲击的强韧性设计依据缺乏。

2.2 技术路线

采用物理试验、数字试验、原位试验、理论分析与工程示范相结合的研究方式，开展基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究，制定研究方案如下：

(1) UHPFRC 材料性能提升

针对超高性能水泥基复合材料（UHPFRC）的性能优化，研究通过优化配合比设计、引入混杂纤维和绿色免蒸养工艺，开展系统的物理试验和理论分析。研究对象包括新开发的免蒸养 UHPFRC 材料，重点测试其延性、冲击韧性和抗震性能，旨在提升材料的综合性能并满足工程应用要求。

(2) 抗冲击强韧性设计准则与抗震强韧性设计准则

为建立 UHPFRC 结构的抗冲击和抗震设计准则，研究结合物理试验、数字模拟和理论分析，针对桥面板、主梁和墩柱等关键构件，分析在冲击荷载和地震作用下的受力行为与失效机制。通过试验数据验证，提出适用于 UHPFRC 结构的强韧性设计准则，以确保结构的安全性和耐久性。

(3) 新型 UHPFRC 桥面板、主梁与墩柱

针对新型 UHPFRC 桥面板、主梁和墩柱的开发，研究采用物理试验、数字试验和原位试验相结合的方法。研究对象包括 UHPFRC 单独构件及与普通混凝土的组合结构，通过模拟实际荷载条件（如冲击和地震），评估其力学性能和破坏模式，为工程应用提供理论依据。

(4) 研制高性价比绿色免蒸养混杂纤维 UHPFRC

在研制绿色免蒸养混杂纤维 UHPFRC 方面,研究通过优化材料配合比,进行延性和冲击韧性试验。手段包括物理试验和理论分析,重点关注材料的成本效益、环保性能和可靠性,旨在开发出物美价廉、绿色低碳的 UHPFRC 材料。

(5) UHPFRC 桥面板及主梁组合结构抗冲击性能及强韧性设计准则研究

针对 UHPFRC 桥面板、组合桥面板及多种形式组合主梁的抗冲击性能,开展系统的物理试验、数字模拟与理论分析。研究对象涵盖免蒸养混杂纤维 UHPFRC 桥面板、UHPFRC-普通混凝土组合桥面板,以及 UHPFRC 主梁、钢-UHPFRC 组合主梁、UHPFRC-普通混凝土组合主梁。通过分析各类构件在冲击荷载作用下的受力行为与失效机制,建立适用于桥面板与主梁抵抗冲击作用的强韧性设计准则。其中,桥面板部分的研究成果可为非结构构件的应用提供指导;主梁部分的研究则综合考虑抗震与抗冲击的协同要求,确保结构在多灾害作用下的综合性能。

(6) UHPFRC-普通混凝土组合墩柱

在 UHPFRC-普通混凝土组合墩柱的研究中,研究结合物理试验、数字试验和原位试验,针对地震和水平冲击荷载作用,分析墩柱的受力行为与失效机制。通过综合测试,建立墩柱的抗震和抗冲击强韧性设计准则,并提出施工质量控制标准。

(7) UHPFRC 桥面板、主梁与墩柱的质量控制标准研究和工程示

范

为制定 UHPFRC 结构的质量控制标准，研究通过工程示范（G210 国道西安过境段项目）和原位试验，验证桥面板、主梁和墩柱的施工质量，确保 UHPFRC 结构在实际工程中的可靠性和耐久性。

3. 依托工程（依托工作）

依托 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目开展工程示范与应用。该公路工程采用双向六车道一级公路标准，设计速度 80 公里/小时，路基宽度 28/33 米。

依托工程桥梁一：桥址位于 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目主线与新咀路的交叉处，该桥为主线上跨地方路及灌溉渠所设的主线桥。桥梁设计荷载等级为公路 I 级，桥面宽度为：0.525 米(护栏)+15.225 米(行车道)+0.525 米（护栏）+0.45（中间空隙）+0.525 米(护栏)+15.225 米(行车道)+0.525 米（护栏）；全桥共 1 联，跨径为 4x30 米，上部结构采用预应力混凝土简支变连续小箱梁，下部结构采用柱式墩、肋板台及桩基础。

依托工程桥梁二：桥址位于 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目主线与水安路的交叉处，该桥为地方路上跨主线所设的分离式立交桥。桥梁设计荷载等级为公路 II 级，桥面宽度为：1.5 米(人行道)+11.5 米(行车道)+1.5 米（人行道）；全桥共 1 联，跨径为 28 米+43 米+28 米，上部结构采用预应力混凝土连续现浇箱梁，下部结构采用柱式墩、柱式台、肋板台及桩基础。

二、考核指标

1. 预期目标

通过项目研究，研制高性价比绿色免蒸养混杂纤维超高性能水泥基复合材料，提出 UHPFRC 制备技术、施工工艺和强韧性设计指标；采用绿色超高性能水泥基复合材料提升桥面板、主梁和桥墩抵御灾害作用的能力，建立新型 UHPFRC 桥面板与主梁抗冲击强韧性设计准则，构建 UHPFRC 组合墩柱抗震、抗冲击强韧性设计准则，增强桥梁在灾害作用下的性能保持与抗灾能力，解决灾后抢险保通难、损伤修复难等技术难题，并依托 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目进行示范应用。项目成果不仅可为依托工程防灾减灾设计与高质量建造提供技术支撑，也可为全国类似工程提供借鉴，促进行业科技进步。

2. 主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

项目成果的推广应用可提高桥梁抗冲击能力 50%，桥梁墩柱抗震能力提升 30%，节约防灾抗灾建设与维护成本 10%。

3. 经济和社会效益

（1）经济效益方面

本项目研究成果可显著提高陕西省桥梁防灾抗灾设计与建造技术水平，降低建养成本，实现安全长寿的服役目标。

（2）社会效益方面

本项目针对依托工程和陕西省类似工程项目的建设运维边界条件，基于绿色低碳、安全长寿的设计理念，研制高性价比绿色免

蒸养混杂纤维超高性能水泥基复合材料，研发新型 UHPFRC 桥面板、主梁和墩柱，提出其抗冲击、抗震的强韧性设计准则，着重提升桥梁在灾害作用下的性能保持与抗灾能力。项目研究成果的成功应用，可提高陕西省桥梁的社会美誉度，促进行业科技进步，应用前景广阔。

（3）环境效益

利用绿色水泥基材料，减少钢材用量及水泥熟料比例，降低桥梁建设过程中的碳排放，响应双碳目标。

4. 成果提供形式

- （1）研制绿色免蒸养混杂纤维 UHPFRC，提出制备技术 1 项；
- （2）研发 UHPFRC 桥面板、UHPFRC-普通混凝土组合桥面板，提出抗冲击强韧性设计准则；
- （3）研发 UHPFRC、钢-UHPFRC、UHPFRC-普通混凝土组合主梁，构建抗冲击强韧性设计准则；
- （4）研发 UHPFRC、钢-UHPFRC、UHPFRC-普通混凝土组合墩柱，建立抗震、抗冲击强韧性设计准则；
- （5）提出 UHPFRC 桥面板、主梁与墩柱的质量控制标准；
- （6）发表高水平期刊与国际学术会议论文 4 篇，申请专利 2 项；
- （7）培养桥梁技术人员 4 名。

5. 其他考核指标

培养桥梁技术人员 4 名；开展的媒体宣传报道 3 次；技术交流 1 次。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
第一年度	第一季度：收集资料，广泛调研 UHPFRC 和桥梁防灾减灾相关的最新研究进展，制定研究大纲； 第二季度：免蒸养混杂纤维 UHPFRC 配合比设计、制备工艺和力学性能试验，提出 UHPFRC 强韧性设计指标，投稿论文 1-2 篇； 第三季度：开展 UHPFRC 桥面板和 UHPFRC-普通混凝土组合桥面板的物理试验与数字试验，探究其在冲击荷载作用下的受力行为，完成桥面板冲击试验阶段性报告。 第四季度：完成桥面板冲击受力行为研究，建立新型 UHPFRC 桥面板抵抗冲击作用的强韧性设计准则；申请专利 1-2 项；同时启动 UHPFRC 组合主梁的模型试验准备工作。
第二年度	第一季度：通过模型与数字冲击试验，系统探究 UHPFRC 主梁、钢-UHPFRC 组合主梁及 UHPFRC-普通混凝土组合主梁在冲击荷载作用下的受力行为与失效机制，建立新型 UHPFRC 组合主梁抵抗冲击作用的强韧性设计准则；投稿论文 2-3 篇； 第二季度：通过物理试验、数字模拟与原位试验相

	结合的方法,探究 UHPFRC 组合墩柱、钢-UHPFRC 组合墩柱及 UHPFRC-普通混凝土组合墩柱在地震和水平冲击荷载作用下的受力行为与失效机制;完成墩柱抗震抗冲击试验阶段性报告; 第三季度:完成墩柱抗震抗冲击性能研究,建立新型 UHPFRC 墩柱的抗震、抗冲击强韧性设计准则;申请地方标准 1 部,发表论文 1 篇,推进工程应用示范; 第四季度:撰写项目研究报告,整理项目成果,完成项目结题验收。
--	---

四、项目经费

项目总经费：214.8 万元
交通运输厅补助：19.8 万元
自筹资金：195 万元

经费支出预算表

科 目	总经费 (单位：万元)	厅补经费 (单位：万元)
(一) 直接费用	166.891	16.216
1. 设备费	5	0
(1) 购置设备费	0	0
(2) 试制设备费	0	0
(3) 设备改造与租赁费	5	0
2. 业务费	127.891	13.216
(4) 材料支出	44.975	3.3
(5) 测试化验实验加工支出	54	4
(6) 燃料及动力支出	4	0
(7) 差旅支出	10	2
(8) 会议支出	3	1
(9) 国际合作与交流支出	2.116	0.116
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	7.8	2.8
(11) 其他支出	2	0
3. 劳务费	34	3
(12) 劳务性支出	29	2
(13) 咨询专家支出	5	1
(二) 间接费用	47.909	3.584
4. 管理费	27.909	1.584
5. 绩效支出	20	2
合 计	214.8	19.8

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	2
		（1）授权发明专利	
		（2）实用新型	2
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	
		3.发表论文（篇）	4
		（1）其中 SCI 索引收录数	1
		（2）其中 EI 索引收录数	1
		（3）其他	2
		4.著作（部）	0
		5.制订标准数（项）	0
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	1
	其他成果	1.填补技术空白数	0
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	0
		2.获奖项数	0
		（1）国家奖项	0
		（2）部、省奖项	0
		（3）地市级奖项	0
		3.其他科技成果产出	1
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	0
		（3）新材料	1
		（4）新装备（装置）	0
		（5）平台/基地/示范点	0
		（6）中试线	0
		（7）生产线	0

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	/
		(1) 小试	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1. 引进高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2. 培养高层次人才	2
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	2
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	2
		4. 是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等）	0
		2. 科研仪器设备利用率（%）	0
		3. 孵化科技型企业（个）	0
		4. 转化科技成果（个）	0
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	无
		2. 新增销售（万元）	无
		3. 新增出口创汇（万美元）	无
		4. 新增利润（万元）	无
	社会效益	1. 新增税收（万元）	无
		2. 新增就业人数	无
		3. 就业培训（人次）	无
		4. 带动农民增收（万元）	无
		5. 培训和指导科技服务（人次）	无
		6. 新增产业带动情况	无
		7. 技术集成示范（项）	1
		8. 建立示范基地（亩数）	无
		9. 节约资源能源	降低运营阶段维护成本不低于10%。
		10. 环保效益	降低不可再生资源消耗不低于20%。
其他需要说明的情况	无		

六、承担单位或研究人员分工

1. 参与单位

(1) 长安大学

长安大学直属国家教育部，是世界一流学科、“985 工程”优势学科创新平台建设高校。长安大学拥有公路与桥梁高效养护及安全耐久国家工程研究中心，以及交通部旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室、公路大型结构安全教育部工程研究中心、桥梁与隧道陕西省重点实验室等 4 个省部级重点实验室（工程研究中心），并具有一支稳定的科研和试验队伍，试验条件有 200 吨大型电液伺服疲劳试验机，以及各种先进静动态测试设备和配套试验人员，这些先进的试验设备可以确保本项目试验研究工作的顺利完成。长安大学拥有正版 ANSYS、MIDAS 等大型有限元分析软件，为课题开展数值分析研究提供了有力支持。长安大学图书馆拥有国内外丰富的图书资料资源，可为本课题的研究提供充分的文献资料信息。

(2) 西安市公路工程管理处是西安市交通运输局

西安市公路工程管理处是西安市交通运输局下属事业单位，主要职责是负责组织实施西安市交通运输局安排的境内国道、省道公路工程（包括高速公路、一级公路和二级公路）建设项目、组建建设项目法人、对建设项目进行管理。履行建设项目法人的职责，负责项目招标的日常工作；承担工程的征迁、拆迁并办理有关手续；承担建设项目的质量、进度、投资、安全生产和文明工地建设；依据权限负责工程变更的审查、上报以及监督实施工作。承担工程款项的结算及工程

竣工决算的编制；协助市交通运输局组织工程项目的交工验收，负责检查交工验收提出的缺陷及有关问题的落实情况，协助市交通局组织工程的竣工验收等。2023 年预算总额达 21.7 亿元，其中专项业务经费占比 97.6%，重点投向公路建设与养护领域。该处设有 5 个职能科室，统筹推进 210 国道西安过境公路等重大项目建设，2023 年完成西户路改造提升等重点工程。

（3）陕西省交通规划设计研究院有限公司

陕西省交通规划设计研究院有限公司隶属陕西交控科技发展集团，是陕西交通战线上家集勘察、设计、施工、科研于一体的大型综合性勘察设计国有企业公司。2009 年被认定为陕西省高新技术企业，2014 年被交通运输部指定为国家重点公路工程设计审查咨询单位，被交通运输部评为“全国交通运输行业文明单位”；被陕西省委、省政府命名为“文明单位”“文明单位标兵”，为陕西乃至全国公路交通基础设施建设做出了积极贡献。

2. 各自承担的主要工作

长安大学在本研究中作为牵头单位，主要承担理论架构搭建、材料研发及强韧性设计准则构建等核心攻关工作。具体包括：研制满足防灾抗灾需求的高性价比绿色免蒸养 UHPFRC 材料，并测定其多尺度力学性能；依托大型实验室与高性能计算平台，开展 UHPFRC 桥面板、组合主梁及墩柱的物理模型试验与数字仿真，揭示结构在冲击与地震荷载下的损伤机理；最终建立涵盖抗震、抗冲击的结构强韧性设计准则，为技术落地提供核心理论支撑与数据基础。

西安市公路工程管理处在本研究中重点承担工程应用与示范及现场原位测试组织工作。该单位将依托 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目，协调提供中试与现场试验场地；负责制定 UHPFRC 结构施工质量控制标准，全过程把控示范工程的材料制备、浇筑与养护质量；同时，组织并配合科研团队开展实桥原位静动载测试与长期健康监测，为新材料与新结构在复杂工程环境下的适用性与防灾实效提供实证检验。

陕西省交通规划设计研究院有限公司主要负责示范工程的结构设计与计算分析转化工作。该单位将依据科研团队提出的强韧性设计指标，系统开展施工图深化；重点攻关 UHPFRC 组合桥面板湿接缝、负弯矩区抗裂构造及桥墩防撞复合结构的细节设计；通过精细化数值计算验证设计方案的安全性，实现科研成果向工程设计图纸的有效转化与落地应用。

七、项目参加人员表

项目承担单位：长安大学							
参与单位：西安市公路工程管理处；陕西省交通规划设计研究院有限公司							
项目负责人							
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作	签名
1	王春生	1972-02-10	长安大学	正高级	桥梁工程	项目负责人	王春生
2	司飞展	1981-02-03	西安市公路工程管理处	副高级	道路工程（路线）	工程应用与示范	司飞展
3	成锋	1985-06-06	西安市交通运输局	副高级	桥梁工程	原位测试与分析	成锋
4	段兰	1985-03-10	长安大学	副高级	桥梁工程	桥面板强韧设计准则	段兰
5	刘建梅	1975-03-23	陕西省交通规划设计研究院有限公司	正高级	桥梁工程	示范工程设计	刘建梅
6	邵东野	1973-02-06	西安市公路工程管理处	副高级	道路工程（路线）	原位测试	邵东野
7	高震	1979-03-18	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	道路工程（路线）	示范工程计算分析	高震
8	任更锋	1976-07-14	长安大学	副高级	桥梁工程	主梁强韧设计准则	任更锋

9	周婧	1981-09-25	西安市公路工程管理处	副高级	道路工程（路线）	原位测试与分析	周婧
10	李宇翔	1992-07-20	陕西省交通规划设计研究院有限公司	中级	桥梁工程	示范工程构造设计	李宇翔
11	张维国	1977-07-16	西安市公路工程管理处	副高级	道路工程（路线）	示范工程质量控制	张维国
12	王永宽	1982-07-25	西安市公路工程管理处	副高级	道路工程（路线）	示范工程质量控制	王永宽
13	冉孟强	1981-02-15	陕西省交通规划设计研究院有限公司	副高级	道路工程（路线）	示范工程设计与分析	冉孟强
14	王茜	1981-09-03	长安大学	中级	桥梁工程	墩柱强韧设计准则	王茜
15	李璞玉	1997-05-22	长安大学	技术员级	桥梁工程	数字试验	李璞玉
16	李子昂	2000-09-27	长安大学	技术员级	桥梁工程	模型设计与分析	李子昂
17	李柏萱	2002-12-23	长安大学	技术员级	桥梁工程	设计构造分析	李柏萱
18	纪仁杰	2001-02-19	长安大学	技术员级	桥梁工程	模型试验	纪仁杰

八、信息表

项目合同编号	25-26K	密级	无	A: 机密 B: 秘密 C: 内部					
项目名称	基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究								
项目实施所在地	西安市		起止年限		2026 年 月至 2028 年 月				
总 经 费	214.8 万元		厅 拨		19.8 万元				
第一承担单位	单位名称	长安大学							
	所在地	陕西省西安市					代码	610100	
	通讯地址	陕西省西安市碑林区南二环中段 126 号					邮编	710064	
	单位性质	(1) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	10710	
参与单位	序号	单 位 名 称							
	1	长安大学							
	2	西安市公路工程管理处							
	3	陕西省交通规划设计研究院有限公司							
项目负责人	姓 名	王春生		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1972	
	学 历	(1) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其他							
	职 称	(1) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其他							
	联系电话	13991288994 029-82334830		电子邮箱		wcs2000wcs@163.com			
项目联系人	姓名	王春生		性别		男			
	联系电话	13991288994		电子邮箱		wcs2000wcs@163.com			
项目组人数	24	高级	12	中级	2	初级	0	其他	10
主要研究内容 (100 字以内)	研制高性价比绿色免蒸养混杂纤维 UHPFRC; UHPFRC 桥面板、UHPFRC-普通混凝土组合桥面板抗冲击性能与强韧性设计准则研究; UHPFRC、钢-UHPFRC、UHPFRC-普通混凝土组合主梁抗冲击性能与强韧性设计准则研究; UHPFRC、钢-UHPFRC、UHPFRC-普通混凝土组合墩柱抗震、抗冲击性能与强韧性设计准则研究; UHPFRC 桥面板、主梁与墩柱的质量控制标准研究和工程示范								
成果属性	A、C	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他							
成果形式	A、D	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他							

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

1.合同执行过程中，乙方如需修改合同某项条款，应向甲方提出变更内容及理由的申请报告，经甲方审核同意后实施。未接到正式批准以前，双方仍须按原合同条款履行，否则后果由自行修改条款的一方负责。

2.乙方因任何主观或客观原因（如：与大纲评审内容有出入，挪用经费、技术措施或某种条件不落实等）致使计划无法执行而要求解除合同的，需取得甲方书面同意且应视不同情况，部分或全部退还所拨经费；出现上述情况的，甲方有权单方解除本合同且视不同情况要求乙方部分或全部退还所拨经费。

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

5.项目完成后，乙方必须按要求向甲方提交一套真实、完整、详细的技术资料及样机，并提出项目验收申请报告，由甲方审查后组织验收。

6.合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：

陕西省交通运输厅

负责人：（签字）

李海峰

2024年3月27日

联系人：（签字）

张皓

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）

长安大学

单位负责人：（签字）

陈建

2024年3月27日

项目负责人：（签字）

科研项目专用章

（公章）

电 话：029-82334830

2024年03月24日

财务负责人：（签字）

师艺彤

账 户 名：长安大学

开户银行：中国银行西安翠华路支行

账 号：102007335073

陕西省交通运输厅科研项目科研诚信 承诺书

本单位承诺在科研项目实施过程中，遵守科学道德和科研诚信要求，严格执行《陕西省交通运输厅科研项目管理办
法》的规定和科技项目合同书约定，保证所提交材料的真实性，确保专款专用。如违背以上承诺，愿意承担相关责任，并同意主管部门将相关失信信息记入公共信用信息系统。

项目承担单位：(盖章)

项目负责人：

年 月 日

项目编号：25-26K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：基于绿色超高性能水泥基复合材料的
桥梁强韧性防灾抗灾技术研究

申请单位：（盖章）长安大学、西安市公路工程
管理处、陕西省交通规划设计研究院有限公司

联系人：王春生

电 话：029-82334830

陕西省交通运输厅制

2026 年 1 月

应用技术、信息化类及软科学类

编写主要内容

一、项目研究的背景和必要性

1.1 项目背景和必要性

近年来，全球气候变化导致越来越频繁的极端天气气候事件，高温热浪、强降水、高频冻融等局部极端气候事件的作用强度和发生频度增大，强烈地震发生次数也有所增加，诱发的桥毁人亡重大灾害事故时有发生，如 2024 年 8 月 3 日四川雅康高速公路泥石流毁桥、2024 年 7 月 19 日陕西柞水丹宁高速桥梁水毁、2024 年 7 月 17 日宝鸡宝成铁路桥梁水毁、2022 年 1 月 8 日青海门源地震损毁兰新高铁硫磺沟大桥等重大灾害事故。在局部极端气候、强震和结构既有缺陷、损伤等的耦合作用下，中国大量桥梁的安全使用、寿命保持面临着重大技术挑战，亟需破解提升桥梁防灾抗灾能力的核心技术难题。

陕西省地处中国东西结合部，交通枢纽地位突出，特别是关中地区集中了大量高速公路、高铁等交通网络，城镇化进程较快，同时陕西省和关中地区也是黄河流域、秦岭生态保护核心区之一，这些工程建设边界条件对在该区域进行交通基础设施建设与运维提出了更高技术要求，特别是关中为强震带、秦岭为桥梁水毁多发区，桥梁防灾抗灾需求迫切。面向陕西和全国桥梁高品质、绿色低碳建养和防灾减灾、抢险救灾的技术需求，研发桥梁用绿色超高性能水泥基复合材料，充分发挥其在桥面板、主梁和桥墩强韧性抗灾能力提升方面的技术优势，增强桥梁在灾害作用下的性能保持能力，降低灾害损失与人员伤亡。

1.2 研究目的

项目聚焦桥梁自然灾害防治重大技术需求，通过新材料研制、关键连接构造与新型组合结构研发，提出采用绿色超高性能水泥基复合材料提升桥面板、主梁和桥墩的强韧性，增强桥梁在灾害作用下的性能保持与抗灾能力，实现桥梁高品质、绿色低碳、安全长寿建养。本项目研究目的为：

(1) 采用自然河砂、机制砂替代费用高的石英砂，用共聚甲醛纤维+钢纤维的混杂纤维替代费用高的单一钢纤维，研发“物美价廉、可靠实用、绿色低碳”

的高性价比免蒸养混杂纤维超高性能水泥基复合材料（UHPFRC）。

（2）确定 UHPFRC 的高延、高韧的材料设计指标，提升桥梁抵御灾害作用的能力。

（3）研发抵御落石冲击能力强的新型桥面板和主梁，包括抗冲击能力强的免蒸养混杂纤维 UHPFRC 桥面板和 UHPFRC-普通混凝土组合桥面板，以及 UHPFRC、钢-UHPFRC、UHPFRC-普通混凝土组合主梁，建立新型 UHPFRC 桥面板和主梁抵抗冲击作用的强韧性设计准则。

（4）普通混凝土墩柱抵御地震作用、落石冲击、漂流物撞击、车辆撞击的能力有限，灾后抢险、保通难，研发延性与抗冲击能力双强的 UHPFRC、钢-UHPFRC、UHPFRC-普通混凝土组合墩柱，建立新型 UHPFRC 墩柱的抗震、抗冲击强韧性设计准则。

1.3 研究意义

本项目聚焦桥梁自然灾害防治重大技术需求，研制“物美价廉、可靠实用、绿色低碳”的高性价比免蒸养混杂纤维超高性能水泥基复合材料（UHPFRC），提出采用绿色超高性能水泥基复合材料提升桥面板、主梁和桥墩的强韧性，建立新型 UHPFRC 桥面板、主梁、墩柱的抗冲击、抗震强韧性设计准则，增强桥梁在灾害作用下的性能保持与抗灾能力，破解灾后抢险保通难、损伤修复难等技术难题，依托 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目进行示范应用，实现桥梁高品质、绿色低碳、安全长寿建养，催生新质生产力，服务于交通强国建设。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状和发展趋势

（1）桥梁用超高性能水泥基复合材料研发

水泥基材料是土木工程结构广泛采用的主体建筑材料，随着工程需求的变化，材料性能不断提升，经历了普通混凝土、高性能混凝土（HPC）、超高性能水泥基复合材料（UHPFRC）等材料的发展。其中，UHPFRC 通过在基体中加入纤维来获得更高的弯拉、韧性、抗渗、耐久等性能，已成为工程材料发展的重要方向。相较于常规混凝土，UHPFRC 中随机分布的纤维会形成稳定的纤维骨架[1]，抑制 UHPFRC 中的裂纹扩展，大幅度提高材料韧性，转变材料的破坏

模式[2]。应用于 UHPFRC 中的纤维从材质方面可分为金属纤维（主要指钢纤维）、有机合成纤维（主要有聚乙烯醇纤维、聚乙烯纤维、聚丙烯纤维、聚甲醛纤维等）、无机合成纤维（主要有玻璃纤维、玄武岩纤维、碳纤维等）[3,4]。UHPFRC 作为一种先进的建筑材料，因其优异的力学性能和耐久性，近年来在桥梁工程领域得到了广泛关注，其在桥面板体系、主梁和桥墩加固等方面展现了显著优势，有效提升了桥梁的整体性能和使用寿命。此外通过将有机纤维等材料加入到 UHPFRC 中，有望能够在优化 UHPFRC 的整体性能的前提下，降低材料的环境负荷，促进可持续桥梁建筑材料的发展，实现材料性能和环境效益的双重优化。

UHPFRC 的性能提升主要依赖于内部纤维的增强作用，其中钢纤维和有机纤维作为最常用的增强材料，分别在抗拉强度、抗压强度、抗弯强度等方面展现出各自的优势。通过调研钢纤维与有机纤维在 UHPFRC 中的应用及其对材料性能的影响，为优化 UHPFRC 的配比设计提供理论依据和实践参考。其中，钢纤维由于优异的抗拉性能和较佳的综合性能，在 UHPFRC 中的应用早期便得到了重点研究[5]。Yoo、李传习、Wu、Liu、Chu 等[6-10]研究了不同钢纤维体积掺量对 UHPFRC 力学性能的影响。研究表明，钢纤维最佳体积掺量在 2%~3%之间，能显著提升 UHPFRC 的抗压强度和弹性模量。体积掺量为 3%时，抗压性能和弹性模量最优[6,7]。杜任远、Wille、Makita、Wang 等学者[11-14]发现，钢纤维可增强 UHPFRC 的多重开裂和应变硬化特性，并显著提高材料的抗拉强度和疲劳性能。研究表明，最佳钢纤维体积掺量为 2%~2.5%，可使极限抗拉应变平均值达到 0.389%，显著提高 UHPFRC 材料的初裂应变。邓宗才等学者[15]研究发现，随着纤维体积分数增加，UHPFRC 的弯曲抗拉强度线性增加，抗弯极限强度超过 20 MPa，表现出明显的应变硬化特征。李福海、张玉斌、El-Hassan、Dong 等学者[16-19]指出，不同长度和掺量的钢纤维对 UHPFRC 的劈裂强度和弯曲强度影响各异，纤维弯曲度越高，抗拉强度和弯曲韧性越好。与钢纤维相比，有机纤维在 UHPFRC 中的应用同样具有显著的效果。尽管有机纤维的弹性模量较低，但其耐腐蚀性和经济效益使其在抑制裂缝产生和发展方面表现优异。除了力学性能方面的提升，有机纤维在绿色环保方面也具有重要意义。

与传统的钢纤维相比，有机纤维在生产过程中能耗更低，且可再生利用，符

合当前绿色建筑的发展趋势。通过合理配比和混合不同类型的纤维,不仅能够优化 UHPFRC 的整体性能,还能降低材料的环境负荷,促进可持续建筑材料的发展。陈倩、滕晓丹、晏麓晖等学者[20-22]研究表明,聚乙烯纤维、聚丙烯纤维和超高分子量聚乙烯纤维可显著提升 UHPFRC 的抗压强度,最佳掺量和配比在 1.5vol%至 2vol%钢纤维+0.1vol%聚丙烯纤维之间。然而,超高分子量聚乙烯纤维和聚甲醛纤维对混凝土抗压强度的增强效果不明显。Meng、Ryu、Park 等学者[23]研究发现,聚乙烯醇(PVA)纤维和钢纤维混掺时,体积掺量超过 3%会导致纤维团聚现象,消极影响抗压性能。微纤维在 UHPFRC 的多重开裂和应变硬化特性中表现积极,但轴拉试件的尺寸和几何形状对抗拉强度影响较小。在弯曲性能方面,张玉斌、Abbas、El-Hassan 等学者[24-26]的研究表明,PVA 纤维和 PE 纤维可显著提高 UHPFRC 的抗弯强度和极限挠度。与长钢纤维相比,掺入较短钢纤维的 UHPFRC 表现出更好的弯曲性能。钢纤维的曲率和抗拉强度对弯曲强度有重要影响。Su、Kim、赵怡琳、邓宗才等学者[27-31]研究发现,钢纤维与合成纤维混掺使用时,能够显著提升 UHPFRC 的拉伸和弯曲性能。混掺钢纤维和 PE 纤维、BF 纤维的 UHPC 显示出更好的增强增韧效果,钢纤维与合成纤维在开裂过程中相继发生作用,有效改善了 UHPC 的断裂韧性。王春生等[32]设计了 5 组抗弯试件,包括三组单掺共聚甲醛纤维的试件和两组共聚甲醛纤维与钢纤维混掺的试件,以探讨共聚甲醛纤维在超高性能水泥基复合材料(UHPFRC)中的抗弯力学性能。研究结果表明,当共聚甲醛纤维体积掺量为 2%时,UHPFRC 试件的抗弯强度最佳,平均强度达 13.4MPa,并且这种纤维能够延缓基体开裂,提高裂前变形能力,开裂挠度最大达到 0.65mm。混掺 1.5%共聚甲醛纤维和 1.5%钢纤维的试件表现出更好的抗弯强度和韧性,抗弯强度达到 13.9MPa,韧性最优。

在 UHPFRC 的研发与应用中,细骨料的选择对材料性能至关重要。最初研究者们采用硬度较高的石英砂作为细骨料,随后越来越多的研究者开始使用低成本且环保的替代材料。N.A.Soliman 等[33]采用废弃的玻璃材料取代石英砂制备 UHPC,试验结果表明,破碎玻璃的掺入会使 UHPC 的力学性能下降。Zhao[34]等采用铁尾矿作为细骨料制备 UHPFRC,试验结果表明,尽管 100%的铁尾矿取代天然砂会降低材料的工作性能和抗压强度,但是当取代率小于 40%时,制得

的 UHPFRC 强度未有显著的下降, 90d 的力学性能与天然集料制备的混凝土性能相当。丁庆军等[35]采用河砂代替石英砂, 研究表明, 河砂制备的 UHPC 与石英砂基本相同, 抗压强度均可达到 140MPa、抗折强度达到 20MPa, 河砂的颗粒级配越均匀, UHPC 的工作性能和力学性能越优异。马正先等[36]采用机制砂取代石英砂, 研究了机制砂 UHPC 性能的影响因素, 研究表明, 当机制砂取代石英砂掺量 68%、减水剂掺量 0.3、粉煤灰掺量 15%、钢纤维掺量 2%时, UHPC 工作性能和力学性能最优。褚洪岩等[37]探究了用再生砂、机制砂、风积沙替代河砂制备 UHPC 的可行性, 研究表明用这些代替砂制得的 UHPC 具有良好的工作性能, 力学性能与采用河砂的相当。Nancy 等[38]采用平均粒径为 0.275mm 的废弃玻璃替代 50%和 100%的石英砂, 抗压强度值低于对照组 UHPC 的 4%和 11%, 但相应的制造成本降低了 8%和 15%。王春生等[39,40]研究了采用自然河砂的 UHPFRC 材料力学性能, 研究表明: UHPFRC 坍落扩展度为 590mm~750mm, 立方体抗压强度不小于 121MPa, 轴拉强度为 6.8MPa~9MPa, 极限弯拉强度为 25MPa~34MPa, 抗渗等级>P12, 所研制的 UHPFRC 制备工艺成熟、稳定, 工作性能优良, 工程适应性不断增强。

(2) 超高性能水泥基复合材料桥梁设计方法及应用

超高性能水泥基复合材料因其优异的力学性能和耐久性, 在桥梁工程领域得到了广泛应用。其在桥面板体系、主梁和桥墩加固等方面展现了显著优势, 有效提升了桥梁的整体性能和使用寿命。在桥面板体系方面, UHPFRC 作为桥面覆盖层不仅能显著减少桥面劣化和维护成本, 还能够提高桥面的疲劳性能和耐久性。通过与钢桥面板的结合, UHPFRC 桥面板的局部刚度、耐久性有效提升, 减少了疲劳开裂的发生率[41]。王春生等[42-45]提出了基于粘结钢纤维混凝土的组合钢桥面板及其铺筑方法。邵旭东等[46]提出了由开肋正交各向异性钢桥面 (OSD) 和超高性能混凝土 (UHPC) 层组成的轻型组合钢桥面板。Bunje 等[47]研究了 UHPC 方板的受力性能, 结果表明增加组合层厚度、钢纤维掺量和配筋率可提高抗冲切承载力。Buitelaar 等[48]研究了钢桥面顶板与高性能混凝土层的组合桥面系, 并应用于荷兰 Caland 桥。Dieng[49]、王春生等[50-52]研究了钢-UHPC 组合桥面板的疲劳性能, 结果表明 UHPC 组合层可以提高钢桥面板的刚度, 降低应力。Walter 等[53]以丹麦 Faro 大桥为背景, 使用 UHPFRC 改善正

交异性钢桥面板的受力,结果表明可有效降低 OSD 疲劳焊接细节处的应力。秦世强等[54]通过有限元计算对比分析了不同温度作用下的钢-UHPFRC 组合桥面与传统沥青钢桥面的抗疲劳性能,结果表明钢-UHPFRC 组合桥面能够在不增加桥梁恒载的情况下,降低疲劳细节应力幅值,提高抗疲劳性能,各疲劳细节应力降幅达 15%-46%。李传习等[55]基于某大跨径组合梁斜拉桥设计了 PBL 剪力键的平钢板-UHPC 组合桥面板试件,并开展了抗疲劳性能研究,提出应防止裂纹宽度过大引起锈蚀的设计建议。王春生等[56-58]开展 UHPFRC 组合钢桥面板设计准则与工程实践。提出了基于冷连接的 UHPFRC 组合层,研究表明该组合层可有效提高钢桥面板的刚度,降低细节疲劳应力幅,延长使用寿命。王春生等[59]编制了陕西省地方标准《高性能钢桥技术规程》,提出了免蒸养 UHPFRC 组合钢桥面板设计方法,并以某主跨 106m 的连续钢箱梁桥为依托工程,工程实践与计算分析结果证明采用冷连接剪力键界面的组合钢桥面板技术效果优良。

在主梁的应用中,UHPFRC 材料通过优化梁体结构,显著提升了桥梁的整体承载能力和抗弯性能,降低了自重和吊装难度,缩短了施工时间,提高了工程效率而不增加成本。美国 FHWA 自 2001 年开始研究装配式 UHPC 梁,开发了 23~41 米的工厂预制梁制备工艺,实现了规模化、模块化和数字化安装[60]。2006 年,弗吉尼亚州的 UHPC 桥梁项目直接采用 UHPC 梁,省略了抗剪钢筋[61]。王俊颜[62]、Habel 等[63]研究发现,UHPFRC 梁在极限荷载、刚度和抗裂性能方面优于普通梁。Yangi 等[64]指出,不同的浇注方法会影响 UHPC 梁的抗弯性能。Joh 等[65]发现配箍率和纵筋配筋率的增加可提高 UHPC 梁的扭转强度和刚度。Azad 等[66]发现 UHPC 作为受拉钢筋能承受 30MPa 的弯曲拉伸强度且无滑移现象。郑文忠等[67]建立了简化的 UHPC 梁正截面承载力计算公式。Chen 等[68]完成了 UHPC 矩形截面梁的抗弯试验并提出了理论公式。王春生等[69-71]编制了陕西省地方标准《桥梁超高性能水泥基复合材料组合加固技术规范》,并采用自主研发的 UHPFRC 对足尺混凝土空心板梁进行了钢板-UHPFRC 组合加固抗弯性能试验研究,对足尺混凝土 T 梁进行了无粘结预应力-钢板-UHPFRC 组合加固的抗弯性能、抗剪性能试验研究,建立了钢板-UHPFRC 组合加固、预应力-钢板-UHPFRC 组合加固预应力混凝土空心板桥和混凝土 T 梁桥抗弯、抗剪承载力计算图示和简化公式,采用 UHPFRC 组合加固解决了陕西省某空心板桥桥面开裂

问题，并应用钢板-UHPFRC 组合加固法加固某国道 17 孔 30m 跨预应力混凝土简支 T 梁桥，取得了较好的加固效果[72]。

在桥墩加固方面，UHPFRC 的应用表现出色，显著提高了桥墩的强度和耐久性，延长了使用寿命，并增强了桥梁结构的稳定性和安全性。H.M. Tanarslan[73]使用 50 毫米厚掺超细钢纤维 UHPFRC 层压板加固钢筋混凝土梁，承载能力最小增加 32%，最大增加 208%。Farzad M 等[74]的研究显示，UHPFRC 的钢-混凝土-钢夹层（SCSS）结构不仅加速了施工，还具有极好的延展性。刘扬等[75]的研究表明，钢-UHPC 组合装配式结构桥梁在抗裂、抗疲劳、栓钉抗剪和耐弯性能方面表现优异，非常适合装配式桥梁应用。

2.2 项目前期科研及现有工作条件

（1）前期科研基础

长安大学王春生教授团队已掌握了免蒸养超高性能水泥基复合材料（UHPFRC）制备技术，研发了每立方米建安费不足 6 千元的高性价比免蒸养 UHPFRC，开展了 UHPFRC 系列材料性能试验研究（图 1），确定了 UHPFRC 的材料性能指标，并将所制备的 UHPFRC 应用于多座危旧桥梁加固工程。已有研究与工程实践表明：所制备的 UHPFRC 性能稳定，技术经济性好，物美价廉、后期维护工作量小，工程适用性强。团队已积累了丰富的 UHPFRC 设计与施工经验，形成了关于 UHPFRC 制备工艺及应用的多项专利成果，成果已纳入王春生主编的陕西地方标准《桥梁超高性能水泥基复合材料组合加固技术规范》（DB61/T1610-2022），在中国公路学报、Journal of Constructional Steel Research 等国内外高水平学术期刊发表学术论文 5 篇。

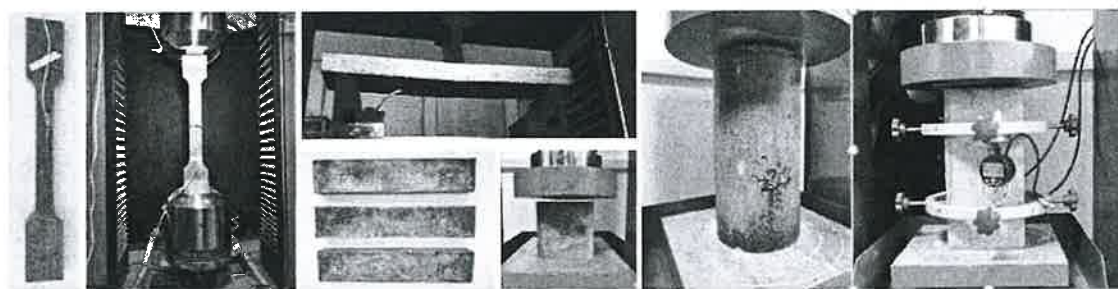


图 1 免蒸养超高性能水泥基复合材料试验研究

申请团队采用所研发的超高性能水泥基复合材料，完成了 UHPFRC 组合钢桥面板受力行为试验与计算分析、UHPFRC 组合加固混凝土主梁足尺物理试验

研究、装配式组合桥墩-基础接头抗震性能和设计准则研究，建立了高性能桥梁设计方法与施工关键技术，相关研究成果已在多座钢箱梁桥、混凝土梁桥中得到成功应用（图 2）。已有研究成果证明了本项目研究方向的技术先进性与可行性，为开展本项目研究工作的高效开展起了基础支撑作用。相关成果已纳入王春生主编的陕西地方标准《高性能钢桥技术规范》（DB61/T 1611-2022），获准发明专利 3 项，在工程力学、Composite Structure 等高水平学术期刊发表学术论文 6 篇。



图 2 UHPFRC 在组合桥面板、混凝土梁桥组合加固中的应用

（2）现有工作条件

围绕基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究目标，申报团队将积极发挥各参研单位的产学研用技术优势，高效推进项目研究工作。牵头单位长安大学拥有公路与桥梁高效养护及安全耐久国家工程研究中心，以及交通部旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室、公路大型结构安全教育部工程研究中心、桥梁与隧道陕西省重点实验室等 4 个省部级重点实验室（工程研究中心），并具有一支稳定的科研和试验队伍，试验条件有 200 吨大型电液伺服疲劳试验机，以及各种先进静动态测试设备和配套试验人员，这些先进的试验设备可以确保本项目试验研究工作的顺利完成。

2.3 参考文献

- [1] Ryu G S, Kang S T, Park J J, et al. Mechanical behavior of UHPC (ultra high performance concrete) according to hybrid use of steel fibers[J]. Advanced Materials Research, 2011, 287: 453-457.
- [2] Wu Z, Shi C, He W, et al. Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements[J]. Cement and concrete composites, 2017, 79: 148-157.
- [3] 陈宝春, 季韬, 黄卿维 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(03):1-24.

- [4] 陈宝春, 林毅竣, 杨简 等. 超高性能纤维增强混凝土中纤维作用综述[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(01):58-68.
- [5] 赵人达, 赵成功, 原元 等. UHPC 中钢纤维的应用研究进展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(08):1-22.
- [6] Yoo D Y, Lee J H, Yoon Y S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites[J]. Composite structures, 2013, 106: 742-753.
- [7] Yoo D Y, Shin H O, Yang J M, et al. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 58: 122-133.
- [8] 李传习, 石家宽, 聂洁 等. 平直型钢纤维掺量与长径比对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(09):2947-2954.
- [9] Wu Z, Shi C, Khayat K H. Investigation of mechanical properties and shrinkage of ultra-high performance concrete: Influence of steel fiber content and shape[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 174: 107021.
- [10] Liu J, Han F, Cui G, et al. Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 310-318.
- [11] 杜任远, 陈宝春, 沈秀将. 不同方法测试的超高性能混凝土抗拉强度[J]. 材料导报, 2016, 30(S2):483-486+520.
- [12] Wille K, El-Tawil S, Naaman A E. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 48: 53-66.
- [13] Makita T, Brühwiler E. Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. Materials and Structures, 2014, 47: 475-491.
- [14] Wang S, Xu L, Yin C, et al. Constitutive behavior of ultra-high-performance steel fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic tension[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 68: 105991.
- [15] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(06):1274-1280.
- [16] 李福海, 刘耕园, 刘梦辉 等. 纤维协同效应下超高性能混凝土的弯曲性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(12):1835-1844.
- [17] 张玉斌, 鲍世辉, 张聪. 混杂纤维增强超高性能透水混凝土的弯曲性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(06):1955-1962.
- [18] El-Hassan H, Elkholy S. Enhancing the performance of Alkali-Activated Slag-Fly

ash blended concrete through hybrid steel fiber reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2021, 311: 125313.

- [19] Dong S, Zhou D, Ashour A, et al. Flexural toughness and calculation model of super-fine stainless wire reinforced reactive powder concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104: 103367.
- [20] 陈倩, 徐礼华, 吴方红 等. 钢-聚丙烯混杂纤维增强超高性能混凝土强度试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(3):10.
- [21] 滕晓丹, 谭又文, 李朋原 等. 钢-高强高模量聚乙烯纤维混凝土高温后力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(4):6.
- [22] 吕锦飞. 聚甲醛纤维混凝土性能研究[D].扬州大学, 2019.
- [23] Meng W, Khayat K H. Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(4): 04018030.
- [24] 张玉斌, 鲍世辉, 张聪. 混杂纤维增强超高性能透水混凝土的弯曲性能研究[J].硅酸盐通报, 2022, 41(06):1955-1962.
- [25] Abbas S, Soliman A M, Nehdi M L. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages[J]. Construction and Building Materials, 2015, 75: 429-441.
- [26] El-Hassan H, Elkholy S. Enhancing the performance of Alkali-Activated Slag-Fly ash blended concrete through hybrid steel fiber reinforcement[J]. Construction and Building Materials, 2021, 311: 125313.
- [27] Su T K, Choi J I, Koh K T, et al. Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete[J]. Composite Structures, 2016, 14(5): 37-42.
- [28] Kim M J, Yoo D Y, Yoon Y S. Effects of geometry and hybrid ratio of steel and polyethylene fibers on the mechanical performance of ultra-high-performance fiber-reinforced cementitious composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(2): 1835-1848.
- [29] 赵怡琳. 混杂纤维对超高性能混凝土增强增韧影响的研究[D].北京交通大学, 2017.
- [30] 于跟社, 邓宗才, 王珏. 混杂纤维活性粉末混凝土的断裂与弯曲韧性[J].建筑科学, 2022, 38(01):93-98.
- [31] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法[J].复合材料学报, 2016, 33(06):1274-1280.
- [32] 王春生, 张洋, 段兰. 共聚甲醛纤维超高性能水泥基复合材料抗弯性能试验

- [J].复合材料学报, 2024,41(01):373-382.
- [33]Soliman N A, Tagnit-Hamou A. Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC[J]. Construction and Building Materials, 2017, 145: 243-252.
- [34]Zhao S, Fan J, Sun W Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50(5): 540-548.
- [35]丁庆军,胡俊,刘勇强 等.轻质超高性能混凝土的设计与研究[J].混凝土, 2019, (09):1-5.
- [36]马正先, 赵雅萌, 陈炳江 等. 机制砂超高性能混凝土(UHPC)性能影响因素试验研究[J].混凝土与水泥制品, 2022, (01):48-52+63.
- [37]褚洪岩, 蒋金洋, 李荷 等. 环保型细集料对超高性能混凝土力学性能的影响[J].材料导报, 2020, 34(12):24029-24033.
- [38]Soliman N A, Tagnit-Hamou A. Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC[J]. Construction and Building Materials, 2017, 145: 243-252.
- [39]奥利维. UHPFRC 组合钢桥面板受力行为与设计准则[D].长安大学, 2022.
- [40]李泽西. UHPFRC 冷连接组合钢桥面板受力性能研究[D].长安大学, 2021.
- [41]Sritharan S, Doiron G, Bierwagen D, et al. First application of UHPC bridge deck overlay in north American[J]. Transportation Research Record, 2018, 2672(26):40-47.
- [42]王春生,段兰等.基于粘结钢纤维混凝土的组合钢桥面板及其铺筑方法:CN201710625907.0[P]. 2019-10-11.
- [43]段兰, Houankpo T O N, 王春生 等. Orthotropic steel bridge deck study with UHPFRC cold composite overlay[M]//Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges. CRC Press, 2018: 1319-1326.
- [44]王春生,段兰等.基于粘结栓钉群的钢纤维混凝土组合钢桥面板:CN201710621402.7[P]. 2020-02-14.
- [45]段兰, 袁翊竑, 王春生 等. 长寿命 UHPFRC 组合钢桥面板研究综述[J].交通运输工程学报, 2024, 24(01):68-84.
- [46]Zhang S H, Shao X D, Cao J H, et al. Fatigue performance of a lightweight composite bridge deck with open ribs [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(7): 04016039.
- [47]Bunje K, Fehling E. About shear force and punching shear resistance of structural elements of Ultra High Performance Concrete[C]//International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany, 2004: 401-411.

- [48]Buitelaar P, Braam R, Kaptijn N. Reinforced high performance concrete overlay system for rehabilitation and strengthening of orthotropic steel bridge decks[C]//Orthotropic Bridge Conference. Sacramento, USA, 2004: 384-401.
- [49]Dieng L., Marchand P., Gomes F., et al. Use of UHPFRC Overlay to Reduce Stresses in Orthotropic Steel Decks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89(5): 30-41.
- [50]王春生, 翟慕赛, 段兰 等. Cold reinforcement and evaluation of steel bridges with fatigue cracks[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(4): 04018014.
- [51]王春生, 翟慕赛, Houankpo T N O 等. 正交异性钢桥面板冷维护技术及评价方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(8): 50-58.
- [52]翟慕赛, 王春生, 瞿天宇 等. ERS 铺装对钢桥面板疲劳应力影响的测试与分析[J]. 公路交通科技, 2017, 34(02):68-74+92.
- [53]Walter R., Olesen J. F., Stang H., et al. Analysis of an Orthotropic Deck Stiffened with a Cement-based Overlay[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(3): 350-363.
- [54]秦世强, 杨仁杰, 张忠财 等. 温度作用下钢-UHPC 轻型组合桥面疲劳性能研究[J/O L]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版): 1-11[2023-04-18].
- [55]李传习, 贺龙飞, 谭珂 等. 平钢板-UHPC 组合桥面板疲劳性能与疲劳损伤机理[J]. 土木工程学报, 2023, 56(9): 39-53.
- [56]段兰, Brühwiler E, 王春生. Cold stiffening of orthotropic steel decks by a composite UHPFRC layer[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 172: 106209.
- [57]王春生, 张洋 等. 钢箱梁冷连接组合钢桥面板受力性能监测与评价[R]. 西安: 长安大学, 2023.
- [58]王春生, 翟慕赛 等. 正交异性钢桥面板冷维护技术及评价方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(08):50-58.
- [59]王春生, 段兰 等. DB61/T 1611-2022 高性能钢桥技术规程[S]. 陕西: 陕西省市场监督管理局, 2022.
- [60]丁沙, 张国志, 游新鹏等. 现浇超高性能混凝土在桥梁工程中的应用[J]. 施工技术, 2016, 45(17): 64-66.
- [61]徐海滨, 邓宗才. 超高性能混凝土在桥梁工程中的应用[J]. 世界桥梁, 2012, 40(03):63-67.
- [62]王俊颜, 郭君渊, 肖汝诚 等. 高应变强化超高性能混凝土的裂缝控制机理和研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(11):10-17.

- [63]Habel K. Experimental Investigation of Composit Ultra high performance Fiber reinforced Concrete an Conventional Concrete Members[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(1):93 101.
- [64]Yang I H, Joh C, Kim B S. Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3478-3487.
- [65]Yang I H, Joh C, Lee J W, et al. Torsional behavior of ultra-high performance concrete squared beams[J]. Engineering Structures, 2013, 56: 372-383.
- [66]Azad A K, Hakeem I Y. Flexural Behavior of Hybrid Concrete Beams Reinforced with Ultra-high Performance Concrete Bars[J]. Construction and Building Materials ,2013,49:128-133.
- [67]郑文忠, 李莉, 卢姗姗. 钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(06): 125-134.
- [68]Chen S, Zhang R, Jia L J, et al. Flexural behaviour of rebar-reinforced ultra-high-performance concrete beams[J]. Magazine of Concrete Research, 2018, 70(19): 997-1015.
- [69]王春生, 王茜 等. B61/T 1610—2022 桥梁超高性能水泥基复合材料组合加固技术规范[S].陕西: 陕西省市场监督管理局, 2022.
- [70]王世超, 王春生 等. 组合加固足尺预应力混凝土箱梁抗弯性能试验[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(05):56-65.
- [71]段 兰, 王 春 生, Brühwiler E 等. Experiments on the flexural behavior of full-scale PC box girders with service damage strengthened by prestressed CFRP plates[J]. Composite Structures, 2023, 312: 116864.
- [72]王春生, 高珊 等. 钢板-混凝土组合加固带损伤钢筋混凝土 T 梁的抗弯性能试验[J].建筑科学与工程学报, 2010, 27(03):94-101.
- [73]Tanarslan H M. Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates[J]. Engineering Structures, 2017, 151: 337-348.
- [74]Farzad M, Shafieifar M, Azizinamini A. Experimental and numerical study on an innovative sandwich system utilizing UHPFRC in bridge applications[J]. Engineering Structures, 2019, 180: 349-356.
- [75]刘扬, 曾丹, 曹磊 等. 钢-UHPC 组合结构桥梁研究进展[J].材料导报, 2021, 35(03):3104-3113.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

本项目拟解决的关键问题包括：

- (1) 缺乏兼顾强韧防灾、绿色节能、免蒸养要求的混杂纤维 UHPFRC 材料，混杂纤维 UHPFRC 材料在多灾害荷载下的强韧性设计指标缺失。
- (2) UHPFRC 组合桥面板、组合主梁的抗冲击工作机理不清，抗冲击、抗震的强韧性设计依据缺乏。
- (3) UHPFRC 组合墩柱抗震、抗冲击的强韧性设计依据缺乏。

3.2 主要研究内容及实施方案

本项目开展基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究，研究内容包括：

(1) 研制高性价比绿色免蒸养混杂纤维 UHPFRC

研制适用于桥梁强韧性防灾抗灾技术要求的绿色免蒸养混杂纤维 UHPFRC，采用自然河砂、机制砂替代石英砂，用共聚甲醛纤维+钢纤维的混杂纤维替代单一钢纤维，优化 UHPFRC 配合比设计，开展 UHPFRC 延性、冲击韧性试验，提出满足抗震、抗冲击性能要求的免蒸养混杂纤维 UHPFRC 强韧性设计指标，达到“物美价廉、可靠实用、绿色低碳”材料研制目标，实现 UHPFRC 建安费低于国内平均价格的 1/2。

(2) UHPFRC 桥面板与主梁抗冲击性能与强韧性设计准则研究

研发抗落石冲击等能力强的免蒸养混杂纤维 UHPFRC 桥面板、UHPFRC-普通混凝土组合桥面板，以及免蒸养混杂纤维 UHPFRC 主梁、钢-UHPFRC 组合主梁、UHPFRC-普通混凝土组合主梁。通过物理试验与数字试验，系统探究上述 UHPFRC 桥面板和主梁在冲击荷载作用下的受力行为、失效机制与能量耗散规律，揭示 UHPFRC 材料特性对结构抗冲击性能的提升机理，建立适用于 UHPFRC 桥面板和主梁抵抗冲击作用的强韧性设计准则。

(3) UHPFRC、钢-UHPFRC、UHPFRC-普通混凝土组合墩柱抗震、抗冲击性能与强韧性设计准则研究

研发延性与抗冲击能力双强的 UHPFRC、钢-UHPFRC、UHPFRC-普通混凝土组合墩柱，通过物理-数字-原位试验，探究三种 UHPFRC 组合墩柱在地震和水平冲击荷载作用下的受力行为与失效机制，建立新型 UHPFRC 墩柱的抗震、抗冲击强韧性设计准则，提升墩柱抵御地震作用、落石冲击、漂流物撞击、车辆撞

击的能力。

(4) UHPFRC 桥面板、主梁与墩柱的质量控制标准研究和工程示范

通过免蒸养混杂纤维 UHPFRC 制备工艺试验,以及 UHPFRC 桥面板、主梁与墩柱模型制作和工程应用,提出 UHPFRC 桥面板、主梁和墩柱施工质量控制标准;将 UHPFRC 制备工艺、组合界面构造设计准则,以及 UHPFRC 桥面板、主梁和墩柱强韧性设计准则等研究成果在 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目中进行示范应用,验证并完善项目研究成果。

3.3 技术路线

采用物理试验、数字试验、原位试验、理论分析与工程示范相结合的研究方式,开展基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究,制定研究方案如下:

(1) UHPFRC 材料性能提升

针对超高性能水泥基复合材料(UHPFRC)的性能优化,研究通过优化配合比设计、引入混杂纤维和绿色免蒸养工艺,开展系统的物理试验和理论分析。研究对象包括新开发的免蒸养 UHPFRC 材料,重点测试其延性、冲击韧性和抗震性能,旨在提升材料的综合性能并满足工程应用要求。

(2) 抗冲击强韧性设计准则与抗震强韧性设计准则

为建立 UHPFRC 结构的抗冲击和抗震设计准则,研究结合物理试验、数字模拟和理论分析,针对桥面板、主梁和墩柱等关键构件,分析在冲击荷载和地震作用下的受力行为与失效机制。通过试验数据验证,提出适用于 UHPFRC 结构的强韧性设计准则,以确保结构的安全性和耐久性。

(3) 新型 UHPFRC 桥面板、主梁与墩柱

针对新型 UHPFRC 桥面板、主梁和墩柱的开发,研究采用物理试验、数字试验和原位试验相结合的方法。研究对象包括 UHPFRC 单独构件及与普通混凝土的组合结构,通过模拟实际荷载条件(如冲击和地震),评估其力学性能和破坏模式,为工程应用提供理论依据。

(4) 研制高性价比绿色免蒸养混杂纤维 UHPFRC

在研制绿色免蒸养混杂纤维 UHPFRC 方面,研究通过优化材料配合比,进行延性和冲击韧性试验。手段包括物理试验和理论分析,重点关注材料的成本效

益、环保性能和可靠性，旨在开发出物美价廉、绿色低碳的 UHPFRC 材料。

(5) UHPFRC 桥面板及主梁组合结构抗冲击性能及强韧性设计准则研究

针对 UHPFRC 桥面板、组合桥面板及多种形式组合主梁的抗冲击性能，开展系统的物理试验、数字模拟与理论分析。研究对象涵盖免蒸养混杂纤维 UHPFRC 桥面板、UHPFRC-普通混凝土组合桥面板，以及 UHPFRC 主梁、钢-UHPFRC 组合主梁、UHPFRC-普通混凝土组合主梁。通过分析各类构件在冲击荷载作用下的受力行为与失效机制，建立适用于桥面板与主梁抵抗冲击作用的强韧性设计准则。其中，桥面板部分的研究成果可为非结构构件的应用提供指导；主梁部分的研究则综合考虑抗震与抗冲击的协同要求，确保结构在多灾害作用下的综合性能。

(6) UHPFRC-普通混凝土组合墩柱

在 UHPFRC-普通混凝土组合墩柱的研究中，研究结合物理试验、数字试验和原位试验，针对地震和水平冲击荷载作用，分析墩柱的受力行为与失效机制。通过综合测试，建立墩柱的抗震和抗冲击强韧性设计准则，并提出施工质量控制标准。

(7) UHPFRC 桥面板、主梁与墩柱的质量控制标准研究和工程示范

为制定 UHPFRC 结构的质量控制标准，研究通过工程示范（G210 国道西安过境段项目）和原位试验，验证桥面板、主梁和墩柱的施工质量，确保 UHPFRC 结构在实际工程中的可靠性和耐久性。

本项目研究技术路线如图 6 所示。

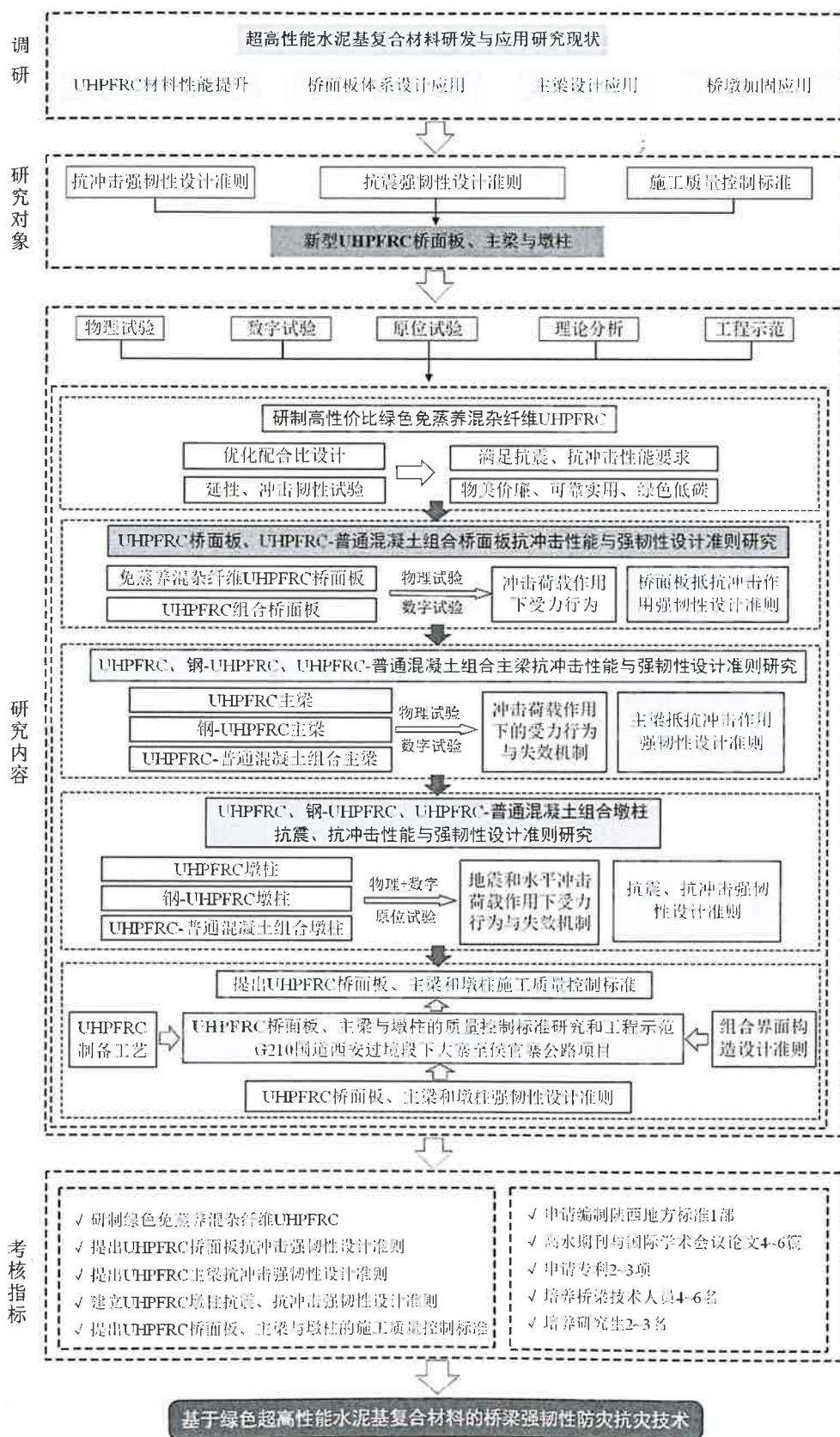


图 6 项目研究技术路线图

3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目研究成果的后续衔接，在依托工程 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目中得到直接应用与全面验证。第一个依托桥梁的桥址位于 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目主线与新咀路的交叉处，该桥为主线上跨地方路及灌溉渠所设的主线桥，上部结构采用预应力混凝土简支变连续小箱梁，下部结构采用柱式墩、肋板台及桩基础。第二个依托桥梁的桥址位于 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目主线与水安路的交叉处，该桥为地方路上跨主线所设的分离式立交桥，上部结构采用预应力混凝土连续现浇箱梁，下部结构采用柱式墩、柱式台、肋板台及桩基础。

本项目技术将推动形成“绿色材料研发、强韧性结构设计、便捷化现浇施工、高韧性防灾减灾”的现代化桥梁建养产业体系，催生新质生产力，为整个行业向资源节约、环境友好、韧性卓越的建造模式转变提供了一个可复制的技术平台。

3.5 有关技术经济指标

项目成果的推广应用可提高桥梁抗冲击能力 50%，桥梁墩柱抗震能力提升 30%，节约防灾抗灾建设与维护成本 10%。主要体现在以下方面：

（1）材料设计指标方面：明确绿色免蒸养 UHPFRC 在桥梁工程中的适用条件。通过配合比优化与混杂纤维增强增韧技术，提出关键材料性能参数，实现自然河砂与机制砂对昂贵石英砂的替代。

（2）结构强韧性指标方面：针对 UHPFRC-普通混凝土组合桥面板及主梁，研发抗冲击构造与界面连接技术，明确其在落石或车辆撞击下的极限承载力与耗能能力，实现结构抗冲击能力提升 50%以上。针对组合墩柱，提出基于位移与耗能双控的抗震设计准则，使桥梁墩柱抗震能力提升 30%以上，确保在强震作用下具备显著的残余变形恢复能力。

（3）施工工艺与质量控制指标方面：形成免蒸养 UHPFRC 现场制备与浇筑成套工法，明确纤维分散均匀性检测标准及接缝处理工艺。相比传统高温蒸汽养护工艺，消除对大型蒸养设备的依赖，施工便捷性显著提高。

（4）成本优势：通过本地化原材料替代（河砂/机制砂替代石英砂）及纤维混杂技术（共聚甲醛纤维替代部分钢纤维），显著降低防灾抗灾技术的应用门槛，符合绿色交通建设导向。

(5) 全生命周期效益：结合前期材料耐久性试验与结构抗灾模拟结果，该技术能有效抑制混凝土开裂，大幅提升结构在高频冻融、氯盐侵蚀及突发灾害下的生存能力。预计可节约防灾抗灾建设与后期维护成本 10%，全生命周期成本具有显著的比较优势。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

长安大学直属国家教育部，是世界一流学科、“985 工程”优势学科创新平台建设高校。长安大学拥有公路与桥梁高效养护及安全耐久国家工程研究中心，以及交通部旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室、公路大型结构安全教育部工程研究中心、桥梁与隧道陕西省重点实验室等 4 个省部级重点实验室（工程研究中心），并具有一支稳定的科研和试验队伍，试验条件有 200 吨大型电液伺服疲劳试验机，以及各种先进静动态测试设备和配套试验人员，这些先进的试验设备可以确保本项目试验研究工作的顺利完成。长安大学拥有正版 ANSYS、MIDAS 等大型有限元分析软件，为课题开展数值分析研究提供了有力支持。长安大学图书馆拥有国内外丰富的图书资料资源，可为本课题的研究提供充分的文献资料信息。

西安市公路工程管理处是西安市交通运输局下属事业单位，主要职责是负责组织实施西安市交通运输局安排的境内国道、省道公路工程（包括高速公路、一级公路和二级公路）建设项目、组建建设项目法人、对建设项目进行管理。履行建设项目法人的职责，负责项目招标的日常工作；承担工程的征迁、拆迁并办理有关手续；承担建设项目的质量、进度、投资、安全生产和文明工地建设；依据权限负责工程变更的审查、上报以及监督实施工作。承担工程款项的结算及工程竣工决算的编制；协助市交通运输局组织工程项目的交工验收，负责检查交工验收提出的缺陷及有关问题的落实情况，协助市交通局组织工程的竣工验收等。2023 年预算总额达 21.7 亿元，其中专项业务经费占比 97.6%，重点投向公路建设与养护领域。该处设有 5 个职能科室，统筹推进 210 国道西安过境公路等重大项目建设，2023 年完成西户路改造提升等重点工程。

陕西省交通规划设计研究院有限公司隶属陕西交控科技发展集团，是陕西交通战线上家集勘察、设计、施工、科研于一体的大型综合性勘察设计国有企业公

司。2009 年被认定为陕西省高新技术企业，2014 年被交通运输部指定为国家重点公路工程设计审查咨询单位，被交通运输部评为“全国交通运输行业文明单位”；被陕西省委、省政府命名为“文明单位”；“文明单位标兵”，为陕西乃至全国公路交通基础设施建设做出了积极贡献。

4.2 技术力量及人员构成

姓 名	单 位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
王春生	长安大学	男	1972-02-10	正高级	桥梁工程	项目负责人
司飞展	西安市公路工程管理 处	男	1981-02-03	副高级	道路工程 (路线)	工程应用与示范
成锋	西安市交通运输局	男	1985-06-06	副高级	桥梁工程	原位测试与分析
段兰	长安大学	女	1985-03-10	副高级	桥梁工程	桥面板强韧设计准则
刘建梅	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	女	1975-03-23	正高级	桥梁工程	示范工程设计
邵东野	西安市公路工程管理 处	男	1973-02-06	副高级	道路工程 (路线)	原位测试
高震	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	男	1979-03-18	副高级	道路工程 (路线)	示范工程计算分析
任更锋	长安大学	男	1976-07-14	副高级	桥梁工程	主梁强韧设计准则
周婧	西安市公路工程管理 处	女	1981-09-25	副高级	道路工程 (路线)	原位测试与分析
李宇翔	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	男	1992-07-20	中级	桥梁工程	示范工程构造设计
张维国	西安市公路工程管理 处	男	1977-07-16	副高级	道路工程 (路线)	示范工程质量控制
王永宽	西安市公路工程管理 处	男	1982-07-25	副高级	道路工程 (路线)	示范工程质量控制
冉孟强	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	男	1981-02-15	副高级	道路工程 (路线)	示范工程设计与分析
王茜	长安大学	女	1981-09-03	中级	桥梁工程	墩柱强韧设计准则
王一伟	长安大学	男	1998-08-30	技术员级	桥梁工程	模型试验
李璞玉	长安大学	男	1997-05-22	技术员级	桥梁工程	数字试验
李子昂	长安大学	男	2000-09-27	技术员级	桥梁工程	模型设计与分析
黄育亮	长安大学	男	2000-06-24	技术员级	桥梁工程	数字试验
郝秉坤	长安大学	男	2000-06-12	技术员级	桥梁工程	模型设计与分析
赵泓澈	长安大学	男	2001-03-17	技术员级	桥梁工程	原位测试
乔若曦	长安大学	女	2000-09-27	技术员级	桥梁工程	数字试验
李柏萱	长安大学	男	2002-12-23	技术员级	桥梁工程	设计构造分析

闫隆鑫	长安大学	男	2002-06-17	技术员级	桥梁工程	模型试验
纪仁杰	长安大学	男	2001-02-19	技术员级	桥梁工程	模型试验

4.3 各自承担的主要工作

长安大学在本研究中作为牵头单位，主要承担理论架构搭建、材料研发及强韧性设计准则构建等核心攻关工作。具体包括：研制满足防灾抗灾需求的高性价比绿色免蒸养 UHPFRC 材料，并测定其多尺度力学性能；依托大型实验室与高性能计算平台，开展 UHPFRC 桥面板、组合主梁及墩柱的物理模型试验与数字仿真，揭示结构在冲击与地震荷载下的损伤机理；最终建立涵盖抗震、抗冲击的结构强韧性设计准则，为技术落地提供核心理论支撑与数据基础。

西安市公路工程管理处在本研究中重点承担工程应用与示范及现场原位测试组织工作。该单位将依托 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目，协调提供中试与现场试验场地；负责制定 UHPFRC 结构施工质量控制标准，全过程把控示范工程的材料制备、浇筑与养护质量；同时，组织并配合科研团队开展实桥原位静动载测试与长期健康监测，为新材料与新结构在复杂工程环境下的适用性与防灾实效提供实证检验。

陕西省交通规划设计研究院有限公司主要负责示范工程的结构设计与计算分析转化工作。该单位将依据科研团队提出的强韧性设计指标，系统开展施工图深化；重点攻关 UHPFRC 组合桥面板湿接缝、负弯矩区抗裂构造及桥墩防撞复合结构的细节设计；通过精细化数值计算验证设计方案的安全性，实现科研成果向工程设计图纸的有效转化与落地应用。

4.4 项目主要负责人情况

项目负责人王春生是长安大学二级教授、国家级人才，交通运输部与陕西省科技创新团队带头人，获国家科技进步二等奖、中国公路学会科学技术特等奖以及陕西省科技进步一等奖等。承担 973 项目子题 2 项，国家自然科学基金 9 项，国家级人才资助项目、交通运输部标准规范项目、教育部人才项目、重大工程科技项目等近 30 项。主编国家行业标准 1 部、陕西省地方标准 2 部、国家级协会标准 6 部，参编国家行业标准 3 部。近年发表高水平中英文期刊论文 100 余篇。针对钢桥和混凝土桥梁的典型损伤病害，研发了每立方米建安费不足 6 千元的高性价比免蒸养超高性能水泥基复合材料（UHPFRC），开展了系列 UHPFRC 组

合钢桥面板和组合加固技术研究、危旧混凝土桥梁的 UHPFRC 组合加固技术研究，推动了 UHPFRC 组合加固技术在危旧混凝土梁桥中的实践应用，实桥工程的加固效果优良，积累了重要的设计与施工经验，形成了关于 UHPFRC 制备工艺及应用的多项专利成果，并主编陕西地方标准《桥梁超高性能水泥基复合材料组合加固技术规范》（DB61 T1610-2022）。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程（工作）概况

依托 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目开展工程示范与应用。该公路工程采用双向六车道一级公路标准，设计速度 80 公里/小时，路基宽度 28/33 米。

依托工程桥梁一：桥址位于 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目主线与新咀路的交叉处，该桥为主线上跨地方路及灌溉渠所设的主线桥。桥梁设计荷载等级为公路 I 级，桥面宽度为：0.525 米(护栏)+15.225 米(行车道)+0.525 米（护栏）+0.45（中间空隙）+0.525 米(护栏)+15.225 米(行车道)+0.525 米（护栏）；全桥共 1 联，跨径为 4x30 米，上部结构采用预应力混凝土简支变连续小箱梁，下部结构采用柱式墩、肋板台及桩基础。

依托工程桥梁二：桥址位于 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目主线与水安路的交叉处，该桥为地方路上跨主线所设的分离式立交桥。桥梁设计荷载等级为公路 II 级，桥面宽度为：1.5 米(人行道)+11.5 米(行车道)+1.5 米（人行道）；全桥共 1 联，跨径为 28 米+43 米+28 米，上部结构采用预应力混凝土连续现浇箱梁，下部结构采用柱式墩、柱式台、肋板台及桩基础。

5.2 投资来源

本项目研究经费总计 214.8 万元，资金构成包括陕西省交通运输厅补助资金（项目专项经费）19.8 万元及工程配套自筹经费 195.0 万元。项目组将严格遵循科研经费管理办法，实行统一管理、专款专用，确保经费使用的合规性与高效性，全力保障项目各阶段研究目标与工程示范任务的顺利实现。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

本项目科研工作将紧密围绕 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目

建设的实际进程展开。在设计阶段同步介入、与科研工作同步启动，重点开展 UHPFRC 材料配合比优化、桥梁关键构件强韧性分析，为工程的强韧性设计提供理论依据与参数优化建议。在施工阶段与技术落地阶段，项目组将关键受力构件的质量控制标准等相关技术要求应用于施工作业指导。在运营初期成效验证，持续追踪项目研究成果应用效果，为未来养护决策提供科学依据。通过这种全过程嵌入式的科研模式，确保强韧性防灾技术真正落地生根。

5.4 组织管理形式

为确保项目高效实施，将成立层级清晰、权责明确的项目组织管理体系，项目组织管理实行课题负责人制度。根据既定的研究内容分工，其中：长安大学作为牵头单位，负责项目的总体策划与基础理论研究，承担 UHPFRC 材料研发、强韧性设计准则构建等试验测试与数值仿真分析；西安市公路工程管理处作为依托工程建设单位，负责协调依托工程现场的试验条件，组织工程示范应用的实施，并提供配套经费与后勤保障；陕西省交通规划设计研究院有限公司作为设计单位，负责将科研成果转化为工程设计图纸，配合开展强韧性构件优化设计和受力分析。

各参与单位需指定子课题负责人，组建稳定的研究团队，严格按照任务书要求开展研究，并定期向项目管理办公室汇报进展。建立常态化的技术协调与数据共享机制，通过季度进度会、关键节点技术研讨会及现场办公会等形式，确保各单位间的紧密沟通与协同攻关。所有研究成果（包括试验数据、研究报告、专利、论文等）将统一归档管理，知识产权归属及成果共享方式在项目启动前通过联合申报协议明确，以保障各方权益并促进成果在行业内的有效转化与推广应用。

六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科 目	估算数	科 目	总经费	厅补经费	其他经费
省交通运输厅补助	19.8	合 计	214.8	19.8	195
工程配套研究经费	195	1.设备费	5	0	5
单位自筹	0	（1）购置设备费	0	0	0
其他经费	0	（2）设备改造与租赁费	5	0	5
		2.业务费	127.891	13.216	114.675
		（1）材料费	44.975	3.3	41.675
		（2）测试化验实验加工费	54	4	50
		（3）燃料动力费	4	0	4
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	15.116	3.116	12
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	7.8	2.8	5
		（6）其他费用	2	0	2
		3.劳务费	34	3	31
		（1）专家咨询费	5	1	4
		（2）聘用人员劳务费	29	2	27
		（3）其他劳务费	0	0	0
		（二）间接费用	47.909	3.584	44.325
		4.管理费	27.909	1.584	26.325
		5.绩效支出	20	2	18

本项目中标金额（厅拨经费）19.8 万元，配套经费 195 万元，合计 214.8 万元。项目配套经费 195 万元已落实。

项目各项支出测算说明如下：

一、设备费合计 5.0 万元，其中厅补经费 0 万元，配套经费 5.0 万元。

1.1 设备购置费（0 万元）

1.2 设备改造与租赁费（5.0 万元，其中厅补 0 万元，配套 5.0 万元）

配套：主要用于车辆租赁、试验系统改造费及数据采集系统等精密仪器租赁，合计 5.0 万元。

二、业务费合计 127.891 万元，其中厅补经费 13.216 万元，配套经费 114.675 万元。

2.1 材料费（合计：44.975 万元，其中厅补 3.3 万元，配套 41.675 万元）

厅补：用于研发免蒸养 UHPFRC 所需的特种混杂纤维、高性能外加剂、测试用传感器等，包括测点滑移计（350 元/个）、应变片（10 元/个）、位移计（450 元/个）、测试线（40 元/米）等试验耗材，合计 3.3 万元。

配套：示范工程中所用钢材、水泥，及 UHPFRC 原材料采购与配制、运输装卸等费用，合计 41.675 万元。

2.2 测试化验加工费（合计：54.0 万元，其中厅补 4.0 万元，配套 50.0 万元）

厅补：用于试件加工、材料抗压、抗弯拉等力学性能测试、模型结构性能测试分析等，合计 4.0 万元。

配套：用于原位试验中试件加工、结构性能测试分析、原位监测等，合计 55 万元。

2.3 燃料动力费（合计：4.0 万元，其中厅补 0 万元，配套 4.0 万元）

配套：用于原位监测加载设备运行电费、试件运输及现场检测车辆的燃料消耗支出，合计 4.0 万元。

2.4 差旅费/会议费/国际合作与交流费（合计：15.116 万元，其中厅补 3.116 万元，配套 12.0 万元）

厅补：用于项目组成员参加高水平学术会议、试验与监测期间的交通费、过路费等，合计 3.116 万元。

配套：用于项目组成员试验与科研期间的国内差旅费、会议费、邀请国外专家技术咨询费、学术会议注册费等，合计 12.0 万元。

2.5 出版/文献/信息传播/知识产权事务费（合计：7.8 万元，其中厅补 2.8 万元，配套 5.0 万元）

厅补：用于高水平学术论文发表（版面费）及文献检索资料费，合计 2.8 万元。

配套：用于国家专利申请、研究报告及工程图纸打印装订、文献检索与数据库使用、成果查新等，合计 5.0 万元。

2.6 其他费用（2.0 万元，其中厅补 0 万元，配套 2.0 万元）

配套：用于科研过程中无法归入上述类别的其他零星业务支出，如材料与资料邮寄等费用，合计 2.0 万元。

三、劳务费合计 34.0 万元，其中厅补经费 3.0 万元，配套经费 31.0 万元。

3.1 专家咨询费（合计：5.0 万元，其中厅补 1.0 万元，配套 4.0 万元）

厅补：用于聘请结构与防灾研究等方面专家，合计 1.0 万元。

配套：用于聘请施工技术与监测专家、现场实测技术咨询等，合计 4.0 万元。

3.2 聘用人员劳务费（合计：29.0 万元，其中厅补 2.0 万元，配套 27.0 万元）

厅补：用于参与项目基础研究的研究生、试验辅助人员等劳务支出，合计 2.0 万元。

配套：用于支付参与模型加工、现场测试及示范工程质量保障的外部科研助理及辅助人员劳务支出，合计 27.0 万元。

四、间接费用合计 47.909 万元，其中厅补经费 3.584 万元，配套经费 44.325 万元。

4.1 管理费：（合计：27.909 万元，其中厅补 1.584 万元，配套 26.325 万元）

厅补：依托单位科研管理服务费 4.584 万元。

配套：依托单位场地使用与行政服务费、单位科研管理服务费、税费等，合计 26.325 万元。

4.2 绩效支出：（合计：20.0 万元，其中厅补 2.0 万元，配套 18.0 万元）

厅补：项目研究人员绩效支出 2.0 万元。

配套：项目研究人员绩效支出，根据科研成果与示范工程实效进行考核分配，合计 18.0 万元。

七、项目绩效指标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1、专利授权数（项）	2
		（1）授权发明专利	0
		（2）实用新型	2
		（3）外观设计	0
		2、软件著作权授权数（项）	0
		3、发表论文（篇）	4
		（1）其中 SCI 索引收录数	1
		（2）其中 EI 索引收录数	1
		（3）其它	2
		4、著作（部）	0
		5、制订标准数（项）	0
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	1
	其他成果	1、填补技术空白数	0
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	0
		2、获奖项数	0
		（1）国家奖项	0
		（2）部、省奖项	0
		（3）地市级奖项	0
		3、其他科技成果产出	1
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	0
		（3）新材料	1
		（4）新装备（装置）	0
		（5）平台/基地/示范点	0
		（6）中试线	0
		（7）生产线	0
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	/

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(1) 小试	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1、引进高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2、培养高层次人才	2
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	2
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	2
		4、是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1、开放共享仪器设备数（台/套/只等）	0
		2、科研仪器设备利用率（%）	0
		3、孵化科技型企业（个）	0
		4、转化科技成果（个）	0
效果类指标	经济效益	1、新增产值（万元）	无
		2、新增销售（万元）	无
		3、新增出口创汇（万美元）	无
		4、新增利润（万元）	无
	社会效益	1、新增税收（万元）	无
		2、新增就业人数	无
		3、就业培训（人次）	无
		4、带动农民增收（万元）	无
		5、培训和指导科技服务（人次）	无
		6、新增产业带动情况	无
		7、技术集成示范（项）	1
		8、建立示范基地（亩数）	无
		9、节约资源能源	降低运营阶段维护成本不低于 10%。
		10、环保效益	降低不可再生资源消耗不低于 20%。
其他需要说明的情况	无		

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益（对应合同中的考核指标）

1.项目预期目标（项目的考核目标）

通过项目研究，研制高性价比绿色免蒸养混杂纤维超高性能水泥基复合材料，提出 UHPFRC 制备技术、施工工艺和强韧性设计指标；采用绿色超高性能水泥基复合材料提升桥面板、主梁和桥墩抵御灾害作用的能力，建立新型 UHPFRC 桥面板与主梁抗冲击强韧性设计准则，构建 UHPFRC 组合墩柱抗震、抗冲击强韧性设计准则，增强桥梁在灾害作用下的性能保持与抗灾能力，解决灾后抢险保通难、损伤修复难等技术难题，并依托 G210 国道西安过境段下大寨至侯官寨公路项目进行示范应用。项目成果不仅可为依托工程防灾减灾设计与高质量建造提供技术支撑，也可为全国类似工程提供借鉴，促进行业科技进步。

2.提交的研究成果及其形式

- （1）研制绿色免蒸养混杂纤维 UHPFRC，提出制备技术 1 项；
- （2）研发 UHPFRC 桥面板、UHPFRC-普通混凝土组合桥面板，提出抗冲击强韧性设计准则；
- （3）研发 UHPFRC、钢-UHPFRC、UHPFRC-普通混凝土组合主梁，构建抗冲击强韧性设计准则；
- （4）研发 UHPFRC、钢-UHPFRC、UHPFRC-普通混凝土组合墩柱，建立抗震、抗冲击强韧性设计准则；
- （5）提出 UHPFRC 桥面板、主梁与墩柱的质量控制标准；
- （6）发表高水平期刊与国际学术会议论文 4 篇，申请专利 2 项；
- （7）培养桥梁技术人员 4 名。

3.经济、社会、环境效益分析

（1）经济效益方面

本项目研究成果可显著提高陕西省桥梁防灾抗灾设计与建造技术水平，降低建养成本，实现安全长寿的服役目标。

（2）社会效益方面

本项目针对依托工程和陕西省类似工程项目的建设运维边界条件，基于绿

色低碳、安全长寿的设计理念，研制高性价比绿色免蒸养混杂纤维超高性能水泥基复合材料，研发新型 UHPFRC 桥面板、主梁和墩柱，提出其抗冲击、抗震的强韧性设计准则，着重提升桥梁在灾害作用下的性态保持与抗灾能力。项目研究成果的成功应用，可提高陕西省桥梁的社会美誉度，促进行业科技进步，应用前景广阔。

(3) 环境效益

利用绿色水泥基材料，减少钢材用量及水泥熟料比例，降低桥梁建设过程中的碳排放，响应双碳目标。

九、其它需要说明的问题

无。

十、申请单位意见

申报单位已落实依托工程、配套经费。



单位负责人：

(签字)

陈建东

科研项目专用章

年 月 日

基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性 防灾抗灾技术研究 大纲评审意见

2026年3月13日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托，在西安主持召开了“基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究”（项目编号：25-26K）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容全面，研究目标明确，技术路线可行。

二、项目研究人员组成合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，依托工程落实，经费预算符合规定，具备开展研究工作的条件。

三、预期成果完全覆盖研究目标。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：1.进一步细化技术经济指标；

2.进一步梳理研究内容。

主任委员：



2026年3月13日

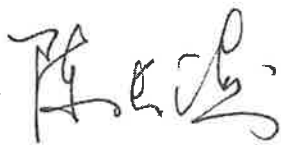
专家审查意见表

项目名称	绿色水泥基复合材料的防灾抗灾技术研				
专家姓名	陈长海	职务/职称	正高级工程师	专 业	桥梁工程
专家单位	陕西省交通规划设计研究院有限公司			联系电话	13309281155

评 审 意 见

本研究大纲体系完整、层次清晰，具有较丰富的前期研究成果，工程应用导向明确，具有较高的研究应用价值。

- 1、建议完善对 UHPFRC 材料的静力、动力性能测试，得到较完整的参数指标作为设计依据。
- 2、建议将研究内容二、三中的内容适当整合，按照直接、间接承受冲击力的情况进行内容划分，并考虑 UHPFRC 材料对结构设计的影响。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 13 日
(本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究				
专家姓名	李皓	职务/职称	正高	专 业	桥梁
专家单位	铁一院			联系电话	13609191693

评 审 意 见

技术路线可行，原则同意

建议：1.明确“增强抗震能力提升30%以上”的内涵
是位移延性还是总的耗能能力。

评审专家（签字）：李皓

年 月 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究				
专家姓名	张保元	职务/职称	正高	专 业	公路工程
专家单位	西安市市政建设（集团）有限公司			联系电话	13892818723

评 审 意 见

本项目在长安大学王春生教授团队已开展的免蒸养超高性能水泥基复合材料 UHPFRC 系列材料性能试验研究，确定 UHPFRC 的材料性能指标，掌握了免蒸养超高性能水泥基复合材料(UHPFRC)制备技术的基础上，聚焦桥梁自然灾害防治重大技术需求，通过新材料研制、关键连接构造与新型组合结构研发，提出采用绿色超高性能水泥基复合材料提升桥面板、主梁和桥墩的强韧性，增强桥梁在灾害作用下的性能保持与抗灾能力，实现桥梁高品质、绿色低碳、安全长寿建养。

本项目研究大纲内容详实，目的明确，研究内容和实施方案具体，技术路线清晰，项目绩效指标全面，同意通过评审。

项目名称中的“绿色”、“强韧性”指标在项目研究中如何体现须关注。

评审专家（签字）：



2020年3月13日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究				
专家姓名	杜进生	职务/职称	教授	专 业	桥梁
专家单位	北京交通大学			联系电话	13552795846

评 审 意 见

项目在研制高性价比免蒸养混杂纤维超高性能水泥基混凝土复合材料的基础上，研发包含此类材料制作的桥面板，桥梁主梁和墩柱，以提升桥梁的在灾害荷载作用下的性态保持与抗灾能力。

该项目的研究基础扎实，技术路线可行，依托工程落地，能够达到项目预期的研究目标及研究成果。

建议 加强所研发材料的耐久性或与既有结构或既有混凝土的粘结和结合方面的研究。

评审专家（签字）：



2026 年 3 月 13 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究				
专家姓名	惠迎新	职务/职称	副总经理/教授	专 业	桥梁工程
专家单位	宁夏交通建设股份有限公司/宁夏大学			联系电话	18100956939

评 审 意 见

项目拟研发低碳免蒸养 UHPRC 材料，并将其应用于桥梁结构，通过 UHPRC 桥面板、组合梁、结构加固等方式提升桥梁抗震、抗冲击和耐久性能，并在 G210 国道过境段大寨堡铁路立交桥进行工程示范应用。

为进一步提升项目的科学性与可操作性，提出以下建议：

（1）强化材料性能指标的科学性与实用性：建议在材料研发部分进一步明确“高性价比”和“绿色低碳”的具体量化指标，如降低的碳排放率、相比现有技术的纤维替代比例、材料制备成本等，便于后续考核和推广。UHPC 通常水泥含量较高，仅利用聚甲醛纤维替代部分钢纤维和机制砂替代石英砂可能难以实现绿色低碳的要求，是否真正低碳绿色？应充分挖掘。

（2）深化混杂纤维协同工作机制研究：建议加强微观结构分析与宏观力学性能之间的关联研究，明确纤维混杂比例优化依据，提升材料的可设计性与稳定性。

（3）加强长期耐久性性能验证工作：除短期力学性能外，建议增加对材料在冻融、氯盐侵蚀、干湿循环等复杂环境下的长期耐久性试验研究，支撑其在陕西及类似地区的推广应用。

评审专家（签字）：惠迎新

2026 年 3 月 13 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究 (项目编号: 25-26K)

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签名
1	主任委员	陈长海	陕西省公路勘察设计院	桥梁工程	桥梁工程	正高工	陈长海
2	委员	张保元	西安市市政建设集团 有限公司	公路工程 与管理	市政工程	正高工	张保元
3	委员	卢皓	中铁第一勘察设计院	桥梁工程	桥梁工程	正高工	卢皓
4	委员	杜进生	北京交通大学	桥梁工程	桥梁工程	教授	杜进生
5	委员	惠迎新	宁夏交通建设股份 有限公司	桥梁与 隧道工程	桥梁与隧道 工程	教授	惠迎新

专家意见处理表

项目名称：基于绿色超高性能水泥基复合材料的桥梁强韧性防灾抗灾技术研究（项目编号：25-26K）

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应，详细说明修改情况)
1	陈长海	完善对 UHPFRC 材料的静力、动力性能测试，得到较完整的参数指标作为设计依据。	已采纳。在研究内容中补充了 UHPFRC 材料的静力（抗压、抗拉、弹性模量）和动力（抗冲击、疲劳）性能试验，以获取完整的设计参数。
2	陈长海	将研究内容二、三中的内容适当整合，按照直接、间接承受冲击力的情况进行内容划分，并考虑 UHPFRC 材料对结构设计的影响。	已采纳。将原研究内容二（桥面板）和研究内容三（主梁）整合为一项研究内容：“UHPFRC 桥面板与主梁抗冲击性能与强韧性设计准则研究”；已考虑 UHPFRC 材料特性对结构设计方法的影响，调整了研究大纲的内容。
3	张保元	项目名称中的“绿色”、“强韧性”指标在项目研究中如何体现须关注。	已采纳。在研究大纲中说明，明确“绿色”指标通过采用免蒸养工艺、低碳原材料和可循环利用设计实现；“强韧性”指标通过结构在灾害作用下的性能保持能力（如残余承载力和延性）来体现。
4	卢皓	明确“墩柱抗震能力提升 30%以上”，到底是位移延性还是总的耗能能力。	已明确。以延性提升 30%以上为主要指标，同时确保耗能能力不降低或协同提升。将通过试验和数值分析验证延性与耗能的综合改善效果，体现桥梁强韧性目标。
5	杜进生	加强所发材料的耐久性及与既有结构或既有混凝土的粘结和结合方面的研究。	已采纳。将系统开展材料的长期耐久性试验研究，通过试验分析与理论验证，确保组合结构的整体工作性能与长期可靠性。

6	惠迎新	强化材料性能指标的科学与实用性：明确“高性价比”和“绿色低碳”的具体量化指标（如碳排放率、纤维替代比例、成本等），并回应仅用聚甲醛纤维替代部分钢纤维和机制砂替代石英砂是否真正实现绿色低碳。	已采纳。在研究大纲中明确“绿色低碳与性价比量化指标”内容，明确绿色低碳指标；采用全生命周期评价方法，以传统 UHPFRC 为基准，通过使用机制砂替代石英砂、聚甲醛纤维部分替代钢纤维等综合技术实现，能实现绿色低碳。
7	惠迎新	深化混杂纤维协同工作机制研究：加强微观结构与宏观力学性能关联，明确纤维混杂比例优化依据。	已采纳。在研究内容中增加混杂纤维协同工作机制研究，通过微观结构分析揭示不同纤维混杂比例下的增强增韧机理，建立微观特征与宏观力学性能的关联，为混杂纤维比例的优化提供理论依据。
8	惠迎新	加强长期耐久性性能验证工作：增加冻融、氯盐侵蚀、干湿循环等复杂环境下的长期耐久性试验研究。	已采纳。在研究计划中补充 UHPFRC 长期耐久性试验内容，针对不同环境作用开展系统的耐久性试验研究，评估材料在复杂服役条件下的性能演变规律，为工程推广应用提供支撑。

大纲评审委员会专家（签字）：

项目负责人（签字）：