

项目合同编号：25-46K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：面向强降雨诱发路基损毁快速修复的绿色增韧材料研发与应用

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

项目负责人：裘友强

通讯邮编、地址：710065，陕西省西安市高新区科技四路 205 号

传真、电话：029-88853000-8212

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

填写说明：

1. 此文本要求采用计算机打印，字迹清晰，字间距采用标准距离；
2. 合同甲方为陕西省交通运输厅；
3. 按照合同书正文、附件（修改后的科研项目研究大纲、专家评审意见、专家名单及意见处理表等）顺序双面打印胶装，封面、封底采用白色布纹纸张。



一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

- (1)基于纤维增强作用的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料设计与制备工艺优化
- (2)服役条件下高韧性加筋泡沫轻质土复合材料增韧机理及性能调控研究

(3) 高韧性加筋泡沫轻质土复合材料应用验证研究

2. 技术关键

- (1) 研发新型加筋泡沫轻质土韧性复合材料
- (2) 揭示加筋泡沫轻质土韧性复合材料增韧阻裂宏微观机理
- (3) 构建基于新型复合材料水毁路基快速修复技术体系

3. 依托工程（依托工作）

本项目拟选取因洪水冲刷和掏蚀作用引起路基失稳频次较高的G342 国道凤县段作为依托工程。受汛期连续强降雨影响，G342 国道凤县段路基水毁现象频发，仅 2024 年 8 月排查统计的路基水毁多达 32 处，长度约 3km，个别临河路堤甚至发生路面开裂、滑移或局部垮塌病害，导致道路中断，严重影响公路的正常运营。在进行路基水毁修复和抢通时，通常需要花费较长时间来进行排查、设计、施工等工作，将带来巨大的经济损失和恶劣的社会影响。为有效提高公路路基水毁抢修效率，尽可能减少道路中断时间，同时推动低碳环保新材料的应用，亟需结合依托工程开展本项目研究。

二、考核指标

1.预期目标

本项目聚焦持续性降雨诱发山区公路路堤整体滑移或冲毁两类典型水毁方式，通过室内外试验、理论分析、工程验证等研究方法，致力于研发具备轻质、高强、高耐久性 & 施工便捷特性的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料，通过深入研究纤维加筋对泡沫轻质土的增强效应，优化材料配比与制备工艺。在此基础上，通过力学性能与耐久性试验，揭示纤维加筋对泡沫轻质土的增韧阻裂宏细观机理，评估其在水毁路基修复中的服役适应性。最终结合水毁路基特点与复合材料性能，提出合理的修复方案与施工工艺流程，并通过现场试验验证与优化，测试其凝结时间和养生时间，形成一套高效、可行的水毁路基快速修复技术体系，并开展技术经济性能分析。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

（1）研发 1 种适用于水毁路基快速修复的新型低碳环保材料，即高韧性加筋泡沫轻质土复合材料。

（2）相比相同养护期内传统泡沫轻质土，高韧性加筋泡沫轻质土复合材料的强度预计增长 30% 以上。

（3）形成 1 套基于高韧性加筋泡沫轻质土复合材料的水毁路基快速修复技术，实现水毁路基快速抢通。

3.经济和社会效益

（1）经济效益

①为公路路基水毁快速抢修与保通“保驾护航”

项目通过形成基于高韧性加筋泡沫轻质土复合材料的水毁路基快速修复技术体系，将为路基水毁灾害快速响应以及高效处置提供技术支持，预计实现工后维护返修成本降低 50%以上，交通阻断时间减少 10%。

②提升公路路基应对洪水等突发灾害事故的处置效率

相较于传统水毁路基修复材料和工艺，项目通过研发出具备高韧性、轻质、高强特性的新型加筋泡沫轻质土韧性复合材料，创新提出合理修复方案与施工工艺，预计提升处置效率 30%以上，大幅减少人力、物力、财力。

③降低物流成本，促进旅游资源开发，推动区域经济发展

项目成果将有效提升山区等水毁频发路段的运输效率，促进区域内外物资流通和人员流动，带动地区旅游资源开发和社会发展。

(2) 社会效益

①促进区域民族团结和社会稳定

项目成果将保障水毁路段快速抢通和有效运行，确保地区货物运输、旅客出行和战略战备需求，促进区域民族团结和社会稳定。

②助力国家“双碳”目标及可持续发展战略

公路工程建设过程中建筑材料的大量消耗及施工机械的长时运作，导致能源大量耗损和温室气体巨量排放。项目研发出的适用于水毁路基快速修复的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料，本质上属于一种低碳环保材料，不仅可以消纳胶凝类固体废弃物（粉煤灰等），促进资源的循环利用，而且还减少对环境的污染以及固体废弃物运

弃过程中对周边环境带来的不利影响，对响应国家节能减排、可持续发展具有十分可观的社会环境效益。

4.成果提供形式

- (1) 研发适用于水毁路基快速修复的绿色增韧材料 1 种；
- (2) 编制研究报告、工作报告各 1 册；
- (3) 申请发明专利 2 项；
- (4) 发表学术论文 2 篇；
- (5) 开展示范工点 1 处；
- (6) 编制项目施工技术指南 1 项。

5.其他考核指标

无

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）
2026 年 3 月 -2026 年 6 月	完成项目实施方案论证，包括开展需求分析、公路路基水毁类型、相关国内外技术发展、总结已有初步成果及工程应用现状调研。
2026 年 7 月 -2026 年 9 月	开展初选复合材料设计性能和韧性指标验证试验研究，初步研发适用于水毁路基快速修复的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料，对比分析不同材料设计参数下纤维加筋对泡沫轻质土脆性破坏缺陷改善效果。
2026 年 10 月 -2026 年 12 月	通过试验对比评估高韧性加筋泡沫轻质土复合材料的力学性能和耐久性能，优化调控该材料的宏观性能。
2027 年 1 月 -2027 年 3 月	基于所得的试验结果，从宏观层面揭示纤维加筋作用对泡沫轻质土原生裂纹和表面缺陷的增韧阻裂机理，并进一步开展优化后复合材料设计性能和韧性指标验证试验研究。

2027 年 4 月 -2027 年 6 月	在优化配比的基础上，通过 CT 扫描及图像处理等技术，开展该材料微细观结构特征观测，从细观层面揭示其增韧阻裂机理，优选出适用于水毁路基快速修复的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料。
2027 年 7 月 -2027 年 9 月	结合水毁路基特点和高韧性加筋泡沫轻质土复合材料性能，提出水毁路基合理修复方案与施工工艺流程。
2027 年 10 月 -2027 年 12 月	选取典型水毁路基，开展示范工程建设，开展路段现场试验工作，验证高韧性加筋泡沫轻质土复合材料快速修复效果，分析新材料技术经济性能。
2028 年 1 月 -2028 年 3 月	结合依托工程应用，开展成果总结提炼，完成研究报告、工作报告等成果修编，申请项目验收。

四、项目经费

项目总经费:	59.87	万元
交通运输厅补助:	19.87	万元
自筹资金:	40.00	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	57.37	19.87
1. 设备费	0.00	0.00
(1) 购置设备费	0.00	0.00
(2) 试制设备费	0.00	0.00
(3) 设备改造与租赁费	0.00	0.00
2. 业务费	42.17	15.67
(4) 材料支出	8.67	3.67
(5) 测试化验实验加工支出	5.00	2.00
(6) 燃料及动力支出	3.00	0.00
(7) 差旅支出	16.00	3.00
(8) 会议支出	2.00	2.00
(9) 国际合作与交流支出	0.00	0.00
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	7.50	5.00
(11) 其他支出	0.00	0.00
3. 劳务费	15.20	4.20
(12) 劳务性支出	11.20	4.20
(13) 咨询专家支出	4.00	0.00
(二) 间接费用	2.50	0.00
4. 管理费	0.00	0.00
5. 绩效支出	2.50	0.00
合 计	59.87	19.87

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）	0
		（1）授权发明专利	0
		（2）实用新型	0
		（3）外观设计	0
		2.软件著作权授权数（项）	0
		3.发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	1
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其他	1
		4.著作（部）	0
		5.制订标准数（项）	1
		（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	/
		(1) 博士、博士后	/
		(2) 硕士	/
		2. 培养高层次人才	3
		(1) 博士、博士后	1
		(2) 硕士	2
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	0
		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）	0
		2. 新增销售（万元）	0
		3. 新增出口创汇（万美元）	0
		4. 新增利润（万元）	50
	社会效益	1. 新增税收（万元）	0
		2. 新增就业人数	0
		3. 就业培训（人次）	0
		4. 带动农民增收（万元）	0
		5. 培训和指导科技服务（人次）	0
		6. 新增产业带动情况	带动绿色低碳建筑材料产业转型升级
		7. 技术集成示范（项）	1
		8. 建立示范基地（亩数）	0
		9. 节约资源能源	促进资源循环利用
		10. 环保效益	降低施工碳排放量
其他需要说明的情况	无		

六、承担单位或研究人员分工

本项目由我国公路领域大型科研设计单位（中交第一公路勘察设计研究院有限公司）和国家“双一流”高校（安徽理工大学、合肥工业大学、北京科技大学）共同承担，各承担单位能充分发挥自身的优势，取长补短、资源互补、信息共享，能够形成有机的产学研用协同创新模式。

中交第一公路勘察设计研究院有限公司（简称“中交一公院”）是我国交通工程咨询、勘察、设计、研究领域大型骨干企业，是行业标准规范的制定者和行业科技创新的引领者。现有职工 3000 余人，各类职业注册人员近 300 人，培养包括中国工程院院士、全国工程勘察设计大师、万人计划、企业长江学者、全国创新争先奖、国务院特殊津贴专家等省部级以上人才 130 余人次，形成了一支行业影响力强、技术水平高的高层次专家团队。经过七十余年的砥砺奋进，中交一公院已发展成为资产总额逾 80 亿元，年新签合同额超过 60 亿元的世界综合交通领域的卓越技术服务商，建设项目遍布全国 30 个省、市、自治区及全球五大洲 30 多个国家，是共建“一带一路”的重要参与者和交通工程的技术贡献者。

中交一公院始终坚持以科技进步为先导，以技术创新支撑和引领企业发展，构建了具有行业和企业特色的科技创新平台与技术创新体系。拥有全国重点实验室、国家野外观测站、国家行业研发中心、博士后科研工作站等高端科技创新平台 22 个，拥有包括工程咨询甲级、工程勘察综合甲级、工程设计综合甲级在内的各类各级资质 30 余项。

依托“人才—团队—平台”的创新体系，承担各类科研项目 1000 余项，其中国家和省部级重大项目 200 余项；累计获得国家专利授权 500 余项，计算机软件著作权 200 余项，发表学术论文 5000 余篇；主编参编国家、行业标准规范制修订项目 200 余项；编译欧、美、日等国外主流标准规范 50 多部，组织编译外文版中国工程建设规范 18 部；累计获得国家级、省部级科技奖 400 余项，其中国家科技进步一等奖 3 项、二等奖 7 项、国家技术发明二等奖 1 项。

中交一公院在新材料研发、防灾减灾、数字公路、交通安全等多个领域，取得一系列重要科研成果，为我国公路行业的科技进步、工程建设和公路设计技术等作出了重要贡献，在行业有重要影响。在进一步巩固和提高已有领域传统优势的基础上，中交一公院按照国家重大科技需要、行业技术进步趋势和市场技术需求，积极拓展科研新领域，聚焦公路行业的智能化、数字化，赋能传统产业，聚焦生态环保、3D 打印、智慧交通、工程信息智能感知等领域，促进行业技术进步和引领企业发展。

基于各承担单位优势，中交一公院总体负责项目研究大纲制订、技术方案实施、项目计划进度、阶段审查与验收等工作，安徽理工大学主要负责高韧性加筋泡沫轻质土复合材料增韧细观机理与施工工艺研究，合肥工业大学主要负责服役条件下高韧性加筋泡沫轻质土复合材料增韧机理及性能调控研究，北京科技大学主要负责新材料研发与理论研究指导工作。

七、项目参加人员表

项目承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司 参与单位（排序）：安徽理工大学，合肥工业大学，北京科技大学						
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
1	裘友强	1991年9月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	副高级	道路工程	项目总体策划及组织实施
主要研究人员						
2	曹升亮	1984年2月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高级	隧道工程	项目组织协调
3	王占棋	1991年12月	安徽理工大学	中级	道路工程	项目技术负责
4	郭盼盼	1992年10月	合肥工业大学	中级	道路工程	项目技术负责
5	张留俊	1962年11月	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高级	道路工程	试验研究指导

6	刘洋	1979年 1月	北京科技大学	正高级	道路工程	理论研究指导	刘洋
7	李刚	1973年 11月	中交第一公路勘察设计院有限公司	正高级	道路工程	工程应用指导	李刚
8	赵力国	1984年 3月	中交第一公路勘察设计院有限公司	正高级	道路工程	项目组织协调	赵力国
9	董长松	1982年 9月	中交第一公路勘察设计院有限公司	正高级	隧道工程	新材料性能评估与机理研究负责	董长松
10	李震	1990年 9月	中交第一公路勘察设计院有限公司	副高级	道路工程	新材料性能评估与机理研究	李震
11	王怡珺	1995年 2月	中交第一公路勘察设计院有限公司	中级	环境保护(公路环境保护)	新材料绿色低碳及经济效益评估	王怡珺
12	王君鹭	1990年 3月	中交第一公路勘察设计院有限公司	副高级	道路工程	新材料研发	王君鹭
13	崔锦栋	1994年 5月	中交第一公路勘察设计院有限公司	中级	道路工程	新材料研发	崔锦栋
14	黄永益	1982年 10月	中交第一公路勘察设计院有限公司	副高级	信息化	技术应用示范	黄永益
15	苟超	1995年 3月	中交第一公路勘察设计院有限公司	中级	隧道工程	技术应用示范	苟超

八、信息表

项目合同编号		25-46K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部	
项目名称		面向强降雨诱发路基损毁快速修复的绿色增韧材料研发与应用							
项目实施所在地		陕西		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月			
总 经 费		59.87		厅 拨		19.87			
第一承担单位	单位名称	中交第一公路勘察设计研究院有限公司							
	所在地	陕西省西安市高新区					代码	610100	
	通讯地址	陕西省西安市高新区科技四路 205 号					邮编	710065	
	单位性质	(3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	22053333-5	
参与单位	序号	单 位 名 称							
	1	安徽理工大学							
	2	合肥工业大学							
	3	北京科技大学							
项目负责人		姓 名	裘友强		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1991
		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	15771706932 029-88853000-8212		电子邮箱		1450312182@qq.com		
项目联系人		姓名	裘友强		性别		男		
		联系电话	15771706932 029-88853000-8212		电子邮箱		1450312182@qq.com		
项目组人数		15	高级	10	中级	5	初级		其他
主要研究内容 (100 字以内)		(1) 基于纤维增强作用的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料设计与制备工艺优化 (2) 服役条件下高韧性加筋泡沫轻质土复合材料增韧机理及性能调控研究 (3) 高韧性加筋泡沫轻质土复合材料应用验证研究							
成果属性		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	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.合同正本一式九份，甲方单位伍份，承担单位四份。

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：

负责人：（签字）

联系人：（签字）

电 话：029-88869067



陕西省交通运输厅

2020年3月27日

（公 章）

合同乙方：（承担单位）中交第一公路勘察设计研究院有限公司

单位负责人：（签字）

项目负责人：（签字）

电 话：029-88853000-8212



裴长强



2020年3月27日

（公 章）

财务负责人：（签字）

董育辉

账 户 名：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

开户银行：农行西安科技二路支行

账 号：26127101040000725

陕西交通科技项目科研诚信 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：裴友强

2026 年 3 月 26 日

项目编号: 25-46K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 面向强降雨诱发路基损毁快速修复的
绿色增韧材料研发与应用

申请单位: 中交第一公路勘察设计院有限公司

联系人: 裘友强

电 话: 15771706932



陕西省交通运输厅制

2026年3月

目 录

一、项目研究的背景和必要性	1
二、前期科研及工作基础	6
三、实施方案	22
四、项目承担单位及参加单位概况	29
五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	33
六、项目经费估算及资金筹措情况	37
七、项目绩效指标	41
八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益	43
九、其它需要说明的问题	45
十、申请单位意见	46

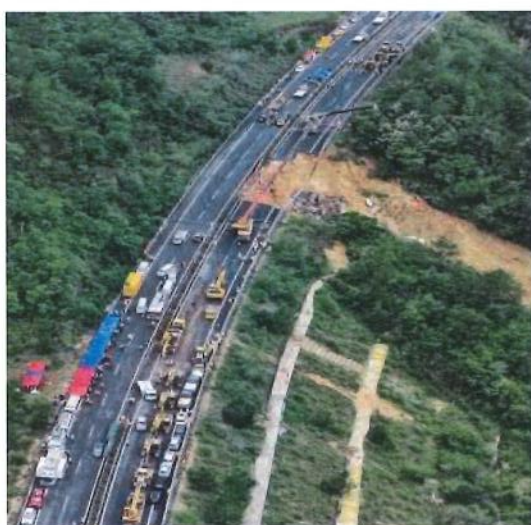
一、项目研究的背景和必要性

1.1 项目背景与意义

在全球气候变化背景下，极端天气事件频发，洪水、山洪、滑坡等自然灾害对公路交通基础设施造成了严重破坏，特别是**路基的水毁问题尤为突出**（图 1-1）。例如，2024 年 5 月 1 日，受连续强降雨影响，广东梅大高速茶阳路段发生塌方事故，造成重大人员伤亡与财产损失；2024 年 7 月 17 日，因受连续性降雨恶劣天气影响，陕西省宝鸡市凤县段管养 S219 千凤线水毁路基路面约 450m，导致 S219 千凤线交通全线中断。路基作为公路的重要组成部分，其稳定性直接关系到公路的安全运行和通行能力。水毁路基不仅会导致交通中断，给当地居民出行带来极大不便，还会严重影响地区经济的发展和社会稳定。以陕西省为例，每年因强降雨等极端天气所造成的公路水毁经济损失高达数十亿元人民币。根据陕西省交通运输年鉴记载，2021 年是近十年陕西公路水毁损失最为严重的一年，全省普通公路累计损失高达 60.1 亿元，其中普通国省道损失 17.9 亿元，损毁路基 134.9 万立方米；农村公路损失 42.2 亿元，冲毁路基 643.8 万立方米。由于历史、经济、技术等方面的原因，我国干线公路部分路段的防护设施还不完善，抗灾能力较弱，抵御自然灾害的能力较低，现有公路路基水毁防治研究还不能满足实际的防灾减灾工程需要。

路基水毁实质上是由于水的作用致使公路发生破坏的一种现象。我国许多地区，尤其是山区和沿江沿河地带，经常受到强降雨或持续降雨引发洪水等自然灾害的侵袭，汛期出现的路基水毁问题已呈常态

趋势。山区公路路基水毁的主要类型可归纳为以下四种：路面淹没水毁、路基冲刷水毁、坡面防护工程水毁与坡脚防护工程水毁。其中，路面淹没水毁多发生于洪水期间，由于水位上涨漫过路面，导致路面结构在浸泡与冲刷下受损，影响行车安全；路基冲刷水毁则源于水流对路基主体的直接冲刷与掏蚀，尤其在水流速度较快的河湾或陡坡路段，易引发路基失稳甚至坍塌；坡面防护工程水毁主要体现为路基边坡上的防护结构（如护坡、挡土墙等）因水流冲刷、降雨入渗或地质条件变化而失效，表现为剥落、滑移或整体破坏；坡脚防护工程水毁则指位于路基坡脚的防护设施（如护脚墙、石笼等）受长期水流顶冲或基础冲刷后支撑力下降，进而影响路基的整体稳定性。



(a) 广东梅大高速塌方



(b) 陕西凤县公路损毁

图 1-1 典型路基损毁事故

路基损毁后，根据线路的重要性程度，要么是不计成本的进行及时修复，以保证交通的畅通；要不就采取临时保通措施，全面修复则按正常的基本建设程序进行。这样带来的问题主要有几个方面：一是人力、物力、财力浪费极大；二是不能及时修复的道路，给百姓的出

行和沿线的经济发展带来困难，交通的中断同时也会给抢险救灾人员及物资的运输带来不便；三是水毁路基若未能及时修复，会导致破坏进一步发展。因此，如何有效地对水毁后的路基路面结构进行快速修复，保证公路安全畅通，成为了困扰公路养护维修者的难题。

目前，针对水毁路基的研究主要集中在水毁特征评估、识别及灾害防治技术方面，灾后的快速修复技术也仅侧重于抢险修复结构方面，涉及水毁路基快速修复新材料方面的研究甚少。在实际工程中，常用抛填片石、砂袋、水泥混凝土、土工布等材料临时填充加固水毁路基。然而，传统的水毁路基修复技术及材料存在修复周期长、成本高、耐久性差、碳排放高、韧性低等问题，难以满足现代社会对快速恢复交通和保障道路安全的需求，且不符合低碳交通发展实际。因此，研发一种能够快速修复水毁路基且具备绿色高韧性的复合新材料，成为当前公路养护技术的重要研究方向。

随着“双碳”目标提出，近年来我国开始大力贯彻建筑节能政策，倡导环境友好、资源节约的绿色建筑并发展低碳经济。而作为低碳环保材料的代表，泡沫轻质土材料以其自身结构独特、力学性能优异、造价低廉和环境友好等特点，从众多低碳环保材料中脱颖而出。为响应国家绿色低碳发展战略，贯彻落实陕西省“十四五”绿色低碳转型，本项目针对传统泡沫轻质土脆性变形破坏缺陷，面向强降雨等极端天气下公路快速抢通迫切需求，融合多元孕灾信息，按照“新材料性能评估-新材料优化调控-工程应用验证”的思路进行分层推进研究，致力于研发适用于水毁路基快速修复的高韧性加筋泡沫轻质土复合材

料,评估新型复合材料在水毁路基修复应用中的服役适应性以及增韧阻裂宏观机理,选取典型水毁路段开展基于新型复合材料水毁路基快速修复技术验证优化,以期大幅提升水毁路基快速修复技术水平,推动碳达峰相关科技成果转化。

本项目**聚焦持续性降雨诱发山区公路路堤整体滑移或冲毁两类典型水毁方式**,通过室内外试验、理论分析、工程验证等研究方法,致力于研发具备轻质、高强、高耐久性及施工便捷特性的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料,并构建相应的快速修复技术体系,以突破传统修复方法的局限,实现对水毁路堤的高效、经济与低碳修复。该技术预期不仅可显著缩短修复周期、保障交通快速恢复、降低因交通中断造成的经济损失与社会冲击,还能提升路基结构的抗冲刷能力与长期承载性能,有效降低未来灾害风险,具有重要的工程应用价值。研究成果将进一步完善公路路基水毁防治的理论体系,深化地质灾害防控与材料工程领域的交叉融合,为极端天气下公路路基的快速抢修与保通保畅提供关键技术支撑。同时,有力推动公路养护材料与技术的革新升级,助力山区交通向绿色低碳转型,服务区域经济社会稳步发展,为实现交通运输行业“双碳”目标贡献科学方案与实践路径。

1.2 市场需求前景和推广应用领域

路基水毁问题的影响是多方面的,交通受阻导致物资运输困难、居民出行不便,影响地方经济社会发展,同时会引发水土流失等地质灾害问题,因此研究和发展水毁路基快速修复技术不仅对填补相关技术空白具有促进作用,同时对快速恢复交通、保护环境、促进经济社

会发展和保障民生问题具有重要意义，在省内以及全国均具有较为广阔的应用前景。

此外，近年来我国开始大力贯彻建筑节能政策，倡导环境友好、资源节约的绿色建筑并发展低碳经济。而作为轻质混凝土材料的代表，泡沫轻质土材料以其自身结构独特、力学性能优异、造价低廉和环境友好等特点，从众多的新型建材中脱颖而出。特别是近年来，随着建设低碳经济以及节能减排工作的开展，泡沫轻质土材料得到了越来越多的重视和关注，并在建筑节能领域中得到了广泛应用。此外，相关部门出台的一系列政策也为泡沫轻质土材料创造了良好的发展条件。例如，《北京市推广、限制、禁止使用的建筑材料目录》中将泡沫轻质土材料列为优先推广类；国家科技部、中国建材联合会将泡沫轻质土列为国家科技支撑计划重点项目。可见，泡沫轻质土材料作为一种具有轻质高强、节能利废等特点的新型节能环保型建筑材料，在未来将有着广阔的发展空间和应用前景。

鉴于此，为响应国家绿色低碳发展战略，贯彻落实陕西省“十四五”绿色低碳转型，本项目针对传统泡沫轻质土脆性变形破坏缺陷，致力于研发新型轻质加筋高强泡沫轻质土韧性复合材料，提出高效可靠的水毁路基快速修复应用技术，为纤维加筋泡沫轻质土的高值化利用提供新材料、理论依据和数据支撑，从而为绿色交通工程发展和设计及施工方案优化提供新思路与参考。本项目选题契合当前绿色低碳筑路材料的应用需求，预期成果应用市场广阔。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

(1) 水毁路基修复材料研究与应用进展

公路路基水毁快速修复技术属于应急抢险工程,具有恢复交通时间紧迫、人力物资需求集中、施工场地狭窄、大型机械施工困难、修复原材料难以就地取材等特点^[1,2]。这就对水毁路基快速修复技术和施工工艺提出了很高的要求。针对公路路基水毁修复技术的研究,始于20世纪50年代末。通过考虑公路水毁特点、规律以及损坏的规模、类型等因素,广大研究人员从不同角度提出了行之有效的抢通方案,并在众多公路水毁整治实例中累计了丰富的实践经验。按照路基水毁破坏的类型,水毁公路抢修方案大致可分为以下几类^[3-8]:

①当水毁路基缺口处有流水时,宜采用抛填片石进行修复,方法是向缺口处抛石,逐渐缩小缺口断面,最后用大片石或石笼堵口(图2-1)。

②针对路基滑塌灾害,当在半填半挖地段的填方一侧滑塌且另一侧路肩较宽时,可限速通车然后组织力量修复;当一侧边坡滑塌且路基下有积水时,可用抛石填筑的方法抛到高于水面(图2-2),上部可继续抛石填筑或用草袋或塑料袋填土堆筑,也可用河沙或炉渣等透水材料填筑。



图 2-1 抛填石笼修复冲毁路基



图 2-2 抛石填筑修复滑塌路基

③针对路基沉陷、挡土墙被毁灾害，在维持半幅慢行的同时，应采用坡脚码砌片石或砂袋、坡体打设钢管桩等增加路基稳定性的措施；若路基已大面积垮塌，需要重新回填处理或码砌砂袋抢通。

由此可见，现有的水毁路基修复方案主要是从结构和材料两方面提出的，其中常用的水毁抢险修复结构主要涉及装配式结构、快速支挡结构等，相关研发和应用已日趋成熟；然而，**水毁路基修复材料受限于难以就地取材、施工场地狭窄等因素，仍局限于使用水泥混凝土、级配碎石、土工合成材料等常规材料。**

水泥混凝土适用于对强度要求较高的路基修复工程，通过合理的配合比设计和施工工艺控制，可以确保修复后的路基具有足够的强度和耐久性；沥青混合料在沥青路面修复中广泛应用，具有良好的粘结性和防水性能，能够有效地修复受损的路面结构层，并防止水分侵入路基；级配碎石作为一种基层修补材料，级配碎石具有良好的透水性和稳定性，适用于对路基进行加固处理；土工合成材料具有良好的隔离、排水和加筋作用，可以有效地提高路基的整体稳定性和承载能力。然而，**这些常规材料普遍存在修复周期长、成本高、碳排放高、耐久性差、韧性差等问题，难以实现道路快速抢通的目的。**据不完全统计，

在众多公路路基水毁类型中,路基冲刷掏空损坏量占公路路基水毁总量的 89.2%^[9],成为汛期影响行车安全的首要问题。因此,如何选取或研发出成本低、耐久性好、韧性高、施工便捷的水毁路基修复材料作为路基回填材料,对保证公路安全畅通具有十分重要的现实意义。

近年来,以泡沫轻质土为代表的低碳环保材料,因其水稳定性好、施工质量高、就地取材方便、施工便捷、修复工期短、无需永久性支护结构等优点,也逐渐应用于水毁路基修复工程中(图 2-3)。赵含^[10]以某高速公路水毁抢修实际工程为例,对比分析常见的因洪水冲刷导致路基填土掏空的工程措施,提出了采用浇筑泡沫轻质土作为水毁路基的快速修复方案。辜文杰^[11]设计了一种适用于山区路基边坡快速修复的泡沫轻质土与微型桩复合支护体系,并将复合支护体系用于某山区路基边坡工程设计。石磊^[12]依托某实体工程,提出了泡沫轻质土应用于路基塌方处理的技术要点,发现泡沫轻质土能高效快速处理塌方部位,消除常规修复方法的质量隐患。



图 2-3 泡沫轻质土用于水毁路基修复工程

然而,传统泡沫轻质土在用作水毁路基修复材料时,存在达到极限强度后易发生脆性破坏的固有缺陷。通过对部分实际工程的持续跟踪监测研究,发现部分采用传统现浇泡沫轻质土的路基路段容易出现

纵横向裂缝多、强度不足、韧性较差等一系列问题。这些问题不仅对施工过程的质量控制构成了挑战，也给运营维护阶段带来了较大困扰。因此，基于传统泡沫轻质土的性能，研发一种既能够快速修复水毁路基又具备高韧性的新型复合材料，显得尤为重要。

(2) 泡沫轻质土材料研究与应用进展

泡沫轻质土（foamed lightweight soil），又称为泡沫混凝土、泡沫轻质混凝土或气泡混合轻质土等，原材料十分简单，主要包括水泥、水、发泡剂等，是以水泥浆为基材与预制泡沫充分拌合后得到的多孔轻质材料^[13]（图 2-4），同时可以消纳胶凝类固体废弃物（例如：粉煤灰），是典型的绿色低碳筑路材料，其制备常用方法如图 2-5 所示。

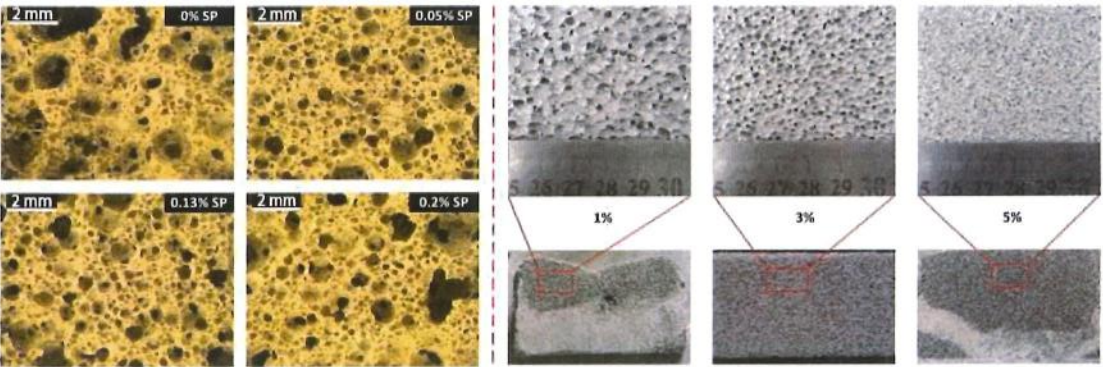
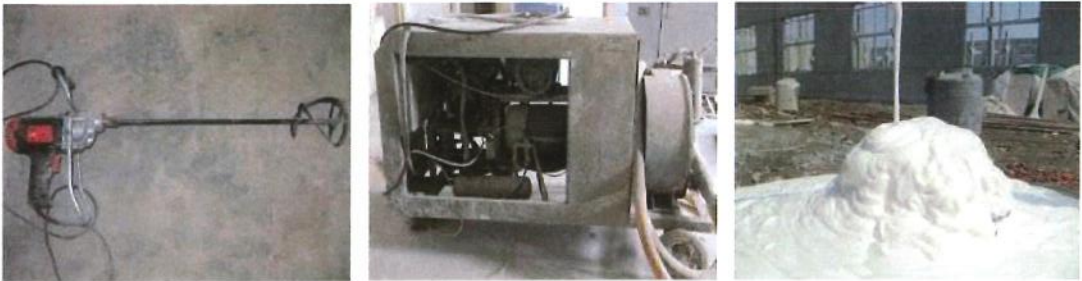


图 2-4 泡沫轻质土内部的胞孔结构



(a) 高速搅拌机 (b) 空气压缩机 (c) 泡沫

图 2-5 泡沫轻质土制备的物理发泡方法

为了探究泡沫轻质土的性能以及基体成分对其性能的影响，国内

外学者在这方面开展了大量的试验和理论研究,并取得一系列研究成果。20 世纪 30 年代起,美国、日本等国率先开始对泡沫轻质土的基本特性和物理力学性能进行研究。为了提高传统泡沫轻质土的性能,国外学者通过尝试掺加不同掺和料或外加剂的方式对该材料进行一系列改性研究^[14-19]。

国内关于传统泡沫轻质土性能及改性研究起步较晚,直至 21 世纪初陈忠平等学者^[20-22]将现浇泡沫轻质土技术引入国内,开始对泡沫轻质土的物理力学性能展开全面研究,并取得了一系列研究成果,从而为进一步应用泡沫轻质土技术奠定基础。为了进一步提高传统泡沫轻质土的性能,国内学者也通过掺加不同的掺和料或外加剂来开展泡沫轻质土的改性研究。2014 年,张鸣等^[23]对比分析了粉煤灰、矿渣和硅灰几种掺和料对泡沫轻质土性能的改性效果,发现掺加硅灰对于改善泡沫轻质土性能的效果最好。2022 年,Zhang 等^[24]通过制备 39 种泡沫轻质土材料,考察了粉煤灰、矿渣、硅灰用量对泡沫轻质土流动性、抗压强度、吸水性和抗冻融循环性的影响,对比发现硅灰对泡沫轻质土性能影响更大。

此外,已有研究还在泡沫轻质土浆体中加入了泡沫塑料颗粒^[25-27]、碳纳米管^[28,29]、各类型纤维^[30]等掺和料对其进行改性。研究表明,上述几种掺和料均能实现传统泡沫轻质土材料性能的提升,特别是纤维材料能通过刺破较大气泡来细化气孔^[31],从而起到提高材料抗拉、抗压强度和改善材料脆性、增强断裂韧性的作用^[32]。

基于泡沫轻质土材料的高流动性和吸声隔热性能,在建筑行业通

常将其作为轻质保温隔热材料。然而,该材料在交通行业中应用时间尚短,尤其是用作水毁路基修复材料。基于泡沫轻质土材料的轻质性、强度和重度可调节性、固化后的自立性及施工便捷性,在交通行业通常将其用作路基回填材料^[33-40],尤其适用于施工场地狭窄条件下路基修筑,可有效减少施工工序,加快施工速度。但泡沫轻质土自身存在达到极限强度后发生脆性破坏的缺陷,意味着在工程应用中,很小的变形产生后泡沫轻质土已经基本失去了全部的承载能力和抗冲刷能力,部分应用路段现浇泡沫轻质土路基出现了纵横向裂缝多、强度低、韧性差等诸多问题(图 2-6)。



(a) 处治前路况 (b) 泡沫轻质土材料浇筑 (c) 处治后路况(裂缝较多)

图 2-6 新疆某公路水毁路段泡沫轻质土材料处治应用情况

通过前期研究发现,对泡沫轻质土进行加筋改性,是一种提高泡沫轻质土强度同时增加材料本身韧性行之有效的方法。鉴于目前水毁路基快速修复加筋泡沫轻质土韧性复合材料研发与应用方面的研究尚属空白,因此,在传统泡沫轻质土性能的基础上,研发适用于水毁路基快速修复的新型建筑材料(即高韧性加筋泡沫轻质土复合材料),研究该新型复合材料在水毁路基快速修复中的关键应用技术,对于推动水毁路基快速修复技术水平的提高,实现快速恢复水毁路基交通功能都具有重要的指导价值和现实意义。

2.2 前期科研及现有工作条件

(1) 相关研究的工作基础

项目组主要研究人员长期从事道路工程低碳环保新材料研发及防灾减灾技术研究,并积极探索新材料、新技术、新工艺在道路工程中的应用,尤其是在泡沫轻质土材料性能与应用方面积累了一定的前期理论、试验基础及实践经验,为本项目研究奠定良好基础。研究基础及准备工作情况详细描述如下:

①公路高性能现浇泡沫轻质土及复合型发泡剂材料研发

现有稳泡剂泡沫稳定性差、泡沫轻质土抗压强度低等问题,结合现浇泡沫轻质土路堤施工一次浇筑厚度大、面积大,输送距离长等特殊要求,选用价格低廉、发泡倍数高的阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)和泡沫细腻、泡沫稳定性优异的绿色环保非离子表面活性剂月桂基葡糖苷(APG),并辅以不同类型的稳泡剂稳泡,研发出2种适用于现浇泡沫轻质土应用的 SDS-APG 阴离子-非离子表面活性剂类复合型发泡剂(图 2-7)。基于泡沫轻质土的路用性能指标要求,利用上述复合型发泡剂制备出高性能泡沫轻质土材料(图 2-8)。相关研究成果已获得授权发明专利 3 项,发表 SCI 论文 2 篇。

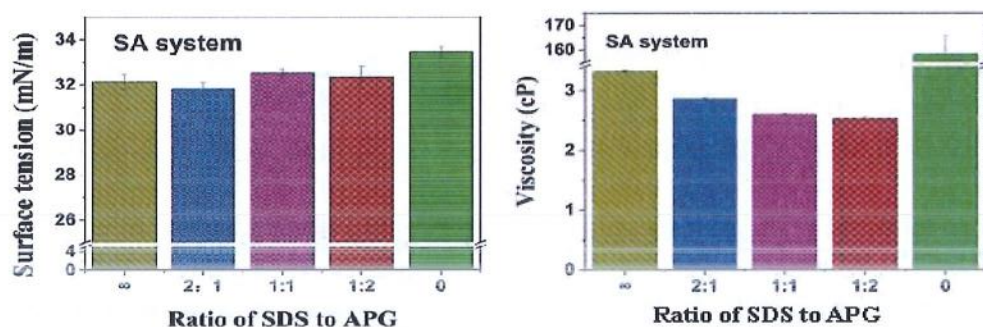


图 2-7 不同 SDS 和 APG 配比的 SDS-APG 复合发泡体系的表面张力和粘度

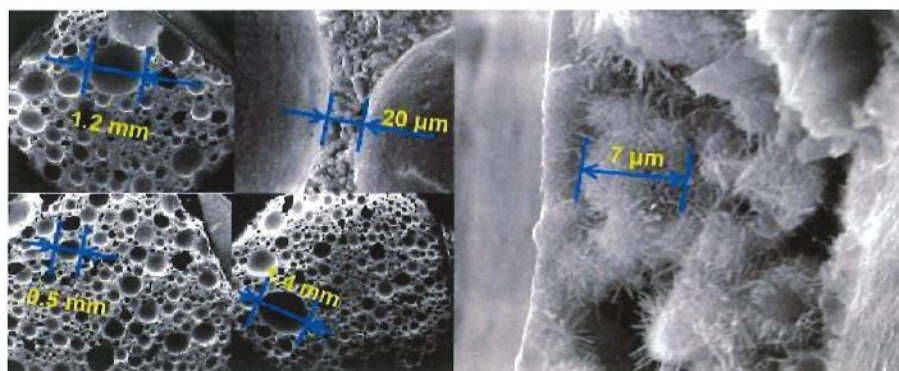


图 2-8 SDS-APG-HPAM 复合发泡剂制备的泡沫轻质土的扫描电镜图

上述研究工作积累可为本项目新型加筋泡沫轻质土韧性复合材料研发提供技术支撑。

②纤维加筋土改良方法及本构理论

聚焦于泡沫轻质土材料固有脆性破坏特点,采用随机分布离散短纤维对其加筋改良。通过开展大量的直剪和三轴压缩室内土力学试验,厘清了纤维含量、纤维长度、纤维分布形式、制样参数(干密度和含水率)对纤维加筋土抗剪强度特性的影响效应,并揭示了其作用机理(图 2-9);结合应力叠加法和能量均化技术,建立了可考虑纤维与土界面相互作用效应演化规律的纤维加筋土本构模型(图 2-10);基于等效附加应力思想,提出了一种纤维加筋土的数值分析方法(图 2-11)。相关研究成果主要发表在美国土木工程协会(ASCE)旗下的重要期刊 International Journal of Geomechanics 上(Q1, IF: 3.918),得到了国内外同行的广泛引用和高度评价,相关论文目前已合计被引 623 次(Google Scholar 数据)。

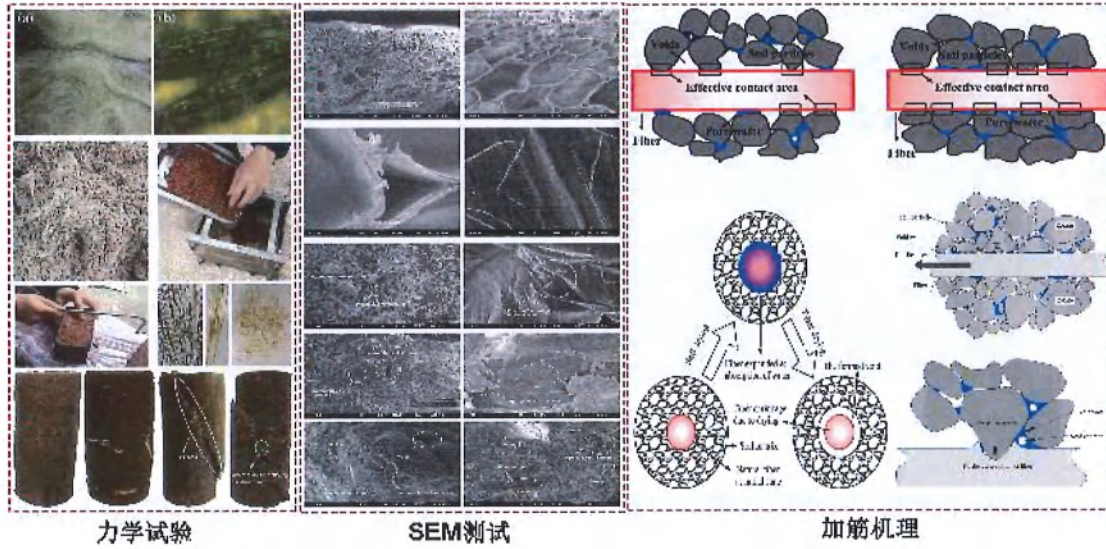


图 2-9 纤维加筋土抗剪强度影响效应及机理试验研究

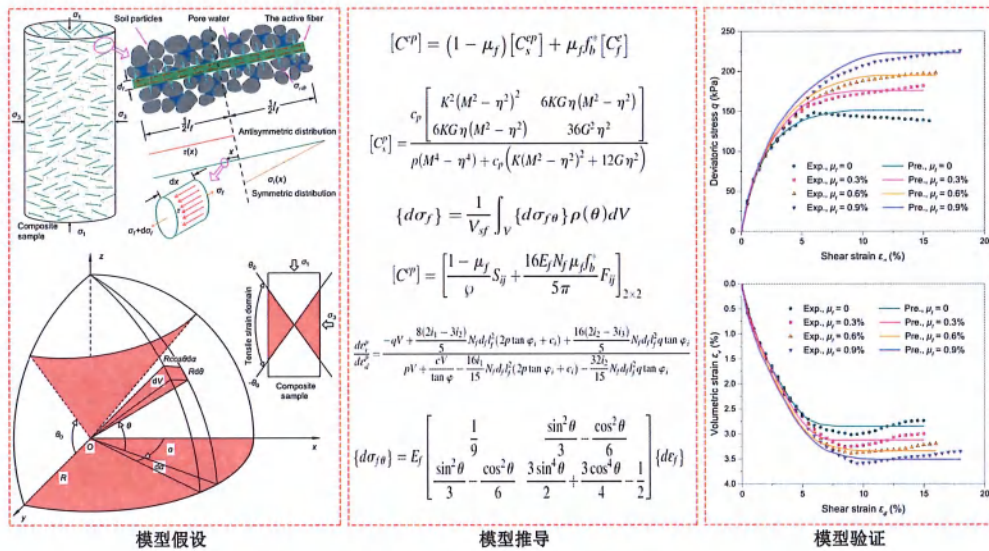


图 2-10 纤维加筋土本构模型理论研究

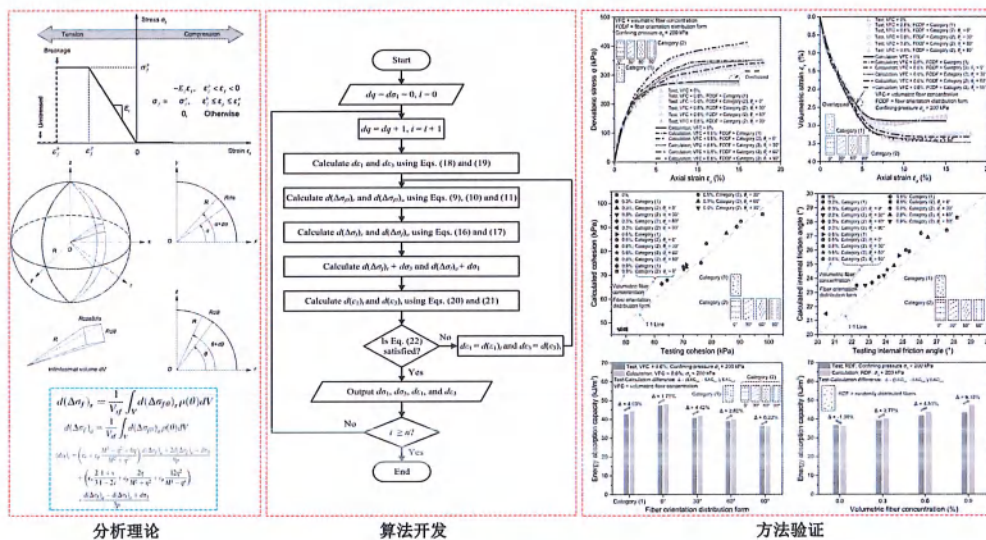


图 2-11 纤维加筋土数值分析方法研究

上述研究工作积累可为本项目新型加筋泡沫轻质土韧性复合材料物理力学试验和机理研究提供技术支撑。

③深厚软土地基泡沫轻质土路基应用关键技术

聚焦深厚软土地基高效、经济、快速处理的需求，依托广佛江快速通道江门段工程建设，提出采用减轻路基荷载的现浇泡沫轻质土换填设计新理念与技术。通过室内试验和理论分析相结合方法，揭示了循环荷载作用下泡沫轻质土的抗疲劳性能，预测了泡沫轻质土路基在行车荷载作用下的疲劳寿命，实现了对泡沫轻质土力学性能稳定性的有效评价（图 2-12），并提出了考虑地基不均匀沉降的泡沫轻质土路基路面一体化设计方法；结合模型试验和数值模拟手段，研发了一种层状泡沫轻质土路堤扶壁式挡土墙模型试验箱，揭示了泡沫轻质土高填方挡土墙的受力及变形特征，提出双层填土下挡墙土压力计算公式，实现了对泡沫轻质土扶壁式挡土墙结构的优化设计（图 2-13）；通过现场监测和应用示范，揭示了软土地基泡沫轻质土路基的“架桥”作用，提出了一种用于深厚软基路段的厚垫层泡沫轻质土新型路基结构（图 2-14），确定了厚垫层泡沫轻质土路基的设计参数和施工工艺（图 2-15）。相关研究成果先后在广佛江快速通道江门段、海南 S314 天新线改扩建公路、江门礼睦路扩建工程、厦门滨海东大道等多条道路工程中得到了成功应用（表 2-1），社会经济效益显著。

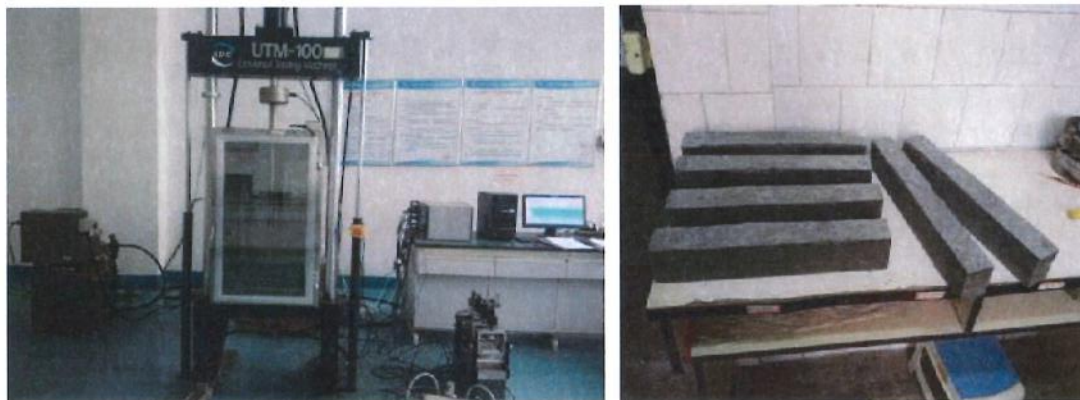


图 2-12 泡沫轻质土材料疲劳性能研究

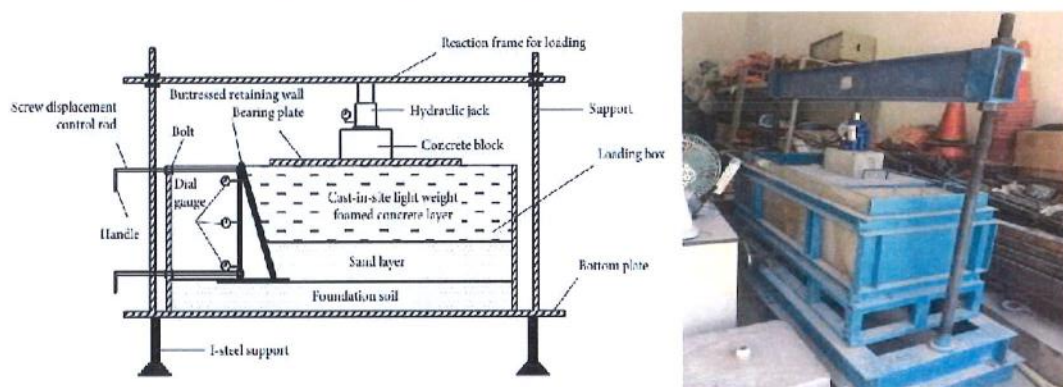
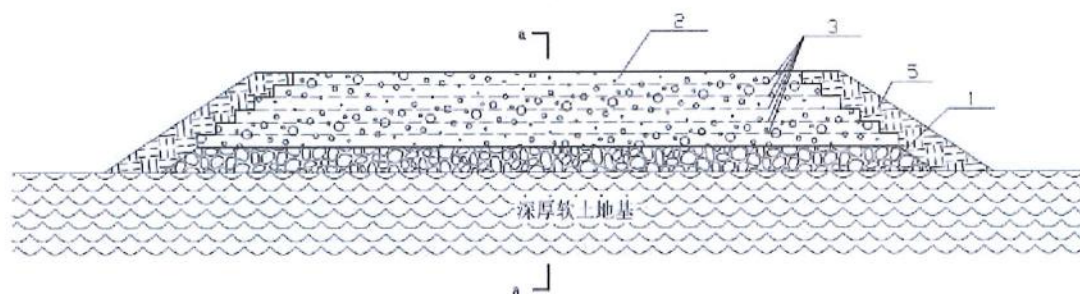


图 2-13 泡沫轻质土路堤扶壁式挡土墙模型试验研究



注：1-垫层，2-泡沫轻质土路基，3-镀锌铁丝网，4-变形缝，5-植土包边形成保护层

图 2-14 深厚软土地基厚垫层泡沫轻质土路基结构



图 2-15 深厚软土地基厚垫层泡沫轻质土路基施工技术

表 2-1 应用证明清单

编号	应用工程名称	经济效益（万元）	应用起止时间
1	广东省广佛江快速通道江门段	1100	2015 年~2017 年
2	海南 S314 天新线改扩建公路	3450	2019 年~2020 年
3	滨海东大道（东坑路~翔安隧道段）	735	2017 年~2018 年
4	万家春路（西亭路~翔安北路段）	318.5	2019 年~2020 年
5	安徽省北沿高速公路巢湖至无为段	1600	2016 年~2018 年
6	沪通铁路 V 标工程	480	2019 年~2020 年

上述研究工作积累可为本项目新型加筋泡沫轻质土韧性复合材料物理力学应用研究提供技术支撑。

综上，本项目现有研究工作基础扎实，相关研究技术条件成熟稳定，可有力确保本项目顺利开展并取得预期研究成果。关于本申请项目，项目团队结合工程需求动态，已经进行了充分的调研，查阅了大量的有关研究文献，全面掌握了当前的研究动态，充分了解存在的问题。由此，提出明确具体的研究目标和研究内容以及切实可行的研究路线。充分的前期工作及已具备的工作条件为本申请项目的顺利进行提供了坚实的保证。本项目正是基于以上工作基础和背景下提出的，是对前期工作的进一步探讨和升华。

（2）必要支撑条件

①良好的科研环境为项目研究提供充足的工作条件

本项目申请单位拥有交通部公路工程试验检测综合甲级资质和桥隧甲级专项资质，实验厂房建筑面积 7000 多平方米。现已建成集实体工程试验、室内模型试验、现场暴露试验三位一体实验研究平台，配备了完整的科研设备及模型试验系统，拥有包括大型步入式多功能模型试验箱系统、电液伺服高低温高压岩土三轴测试系统、岩土多尺

度高分辨率扫描分析系统、岩土核磁共振测试系统、GDS 三轴仪、MTS 试验机、UTM 试验机、探测雷达、公路数字综合检测车等试验设备 300 多台,可完成多尺度材料模拟试验、材料物理力学特性测试、材料细观损伤机理测试及水冰相变演化分析等 (图 2-16~图 2-19),仪器设备总值六千多万元。

同时构建了“大型路基模型试验系统、路面结构与材料试验系统、野外监测与检测系统”等工程试验研究平台,目前已建成“1 个试验中心、3 个野外基地、5 个观测站、18 个试验场”。



图 2-16 路基灾变足尺试验系统



图 2-17 低温核磁共振测试系统

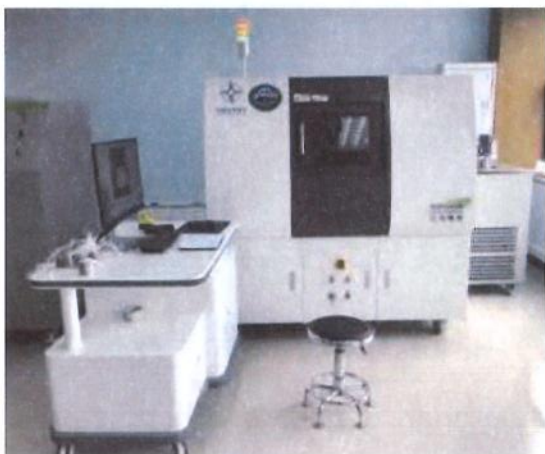


图 2-18 工业 CT 扫描仪



图 2-19 原位 CT 扫描配套装置

上述技术装备条件可为本项目研发提供充足的试验设备和试验场地,以保证本项目研究内容可以如期高质量完成。

②高层次专家团队为项目研究提供有力的技术指导

申请单位拥有国家博士后科研工作站、陕西省首批“三秦学者”岗位等多个国家级及省部级科技创新与科技人才平台，拥有中国工程院院士、全国工程勘察设计大师、国家万人计划、国家百千万人才工程、全国创新争先奖、何梁何利奖等各类高端人才 130 余人次，形成了一支行业影响力强、技术水平高的高层次专家团队，凝聚了建筑新材料、公路防灾减灾、智能交通安全、智能建造等行业和领域的优势研发力量，具有扎实的理论研究基础，丰富的工程实践经验，能够为本项目实施过程提供有力的技术指导。

③丰富的工程业绩为项目研究提供良好的应用条件

申请单位主持规划设计的工程项目遍布全国 30 个省市自治区和全球 30 多个国家和地区，拥有遍布全国及海外的依托工程，连续多年承担交通运输部“国检”、“自然灾害综合风险公路承灾体普查”项目，具备良好的应用示范条件，可以加快科研成果转化的步伐，进而形成产业化。

此外，申报单位在现有的项目实施基础和实施条件下，将根据项目的进展情况，及时增添必要的研发设备，增添必要的科研场所，配套必要的基础设施、人员、资金等，制定必要的组织管理措施，确保本申请项目全部内容的顺利实施。

参考文献:

- [1] 王子鹏. 太行山区公路水毁引发的山区公路防洪设计思考[J]. 公路, 2017, 62(8): 284-287.
- [2] 陈远川. 山区沿河公路水毁评估与减灾方法研究[D]. 重庆交通大学, 2012.
- [3] 高婷. 公路洪水灾害应急管理体系研究[D]. 长安大学, 2011.
- [4] 李小明. 沿河公路水毁断道应急修复技术研究[D]. 重庆交通大学, 2016.
- [5] 杨松久. 水毁路基快速修复相关问题研究[D]. 西南交通大学, 2013.
- [6] 齐洪亮, 田伟平, 李家春. 干线公路灾害防治试点工程灾害特征及治理——以国道 316 线陕西境安康至汉中段为例[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2011, 36(4): 611-615.
- [7] 胡建刚, 张亮, 苟睿, 等. 公路水毁的破坏型式、成因及防治对策初步研究[J]. 公路交通科技, 2005(S1): 26-29.
- [8] 黄志才, 吴国雄, 程尊兰. 川藏公路沿河路基水毁成因分析与工程防护[J]. 水土保持通报, 2003(4): 21-23+27.
- [9] 崔洪川, 赵含, 等. 公路与桥梁重点部位防洪标准、水毁防治措施及综合性分析研究[D]. 吉林: 吉林省交通规划设计院, 2011.
- [10] 赵含. 泡沫混凝土在路基水毁快速修复中的应用[J]. 路基工程, 2018(S1): 145-147+156.
- [11] 辜文杰. 气泡轻质土与微型桩复合体系快速修复山区路基边坡理论及方法研究[D]. 重庆大学, 2018.
- [12] 石磊. 泡沫混凝土在公路路基塌方事故处理中的应用技术[J]. 黑龙江科学, 2014, 5(1): 89.
- [13] 陈忠平. 气泡混合轻质填土新技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [14] Park S B, Yoon E S, Lee B I. Effects of processing and materials variations on mechanical properties of lightweight cement composites [J]. Cement and concrete research, 1999, 29(2): 193-200.
- [15] 丰福俊泰, 三嶋信雄, 田中久士. 研究気泡混合軽量土の品質管理法に関する[J]. 土木学会論文集, 2000, 48(9): 141-152.
- [16] 横田盛哉, 三嶋信雄. 気泡モルタル工法——気泡混合軽量土工法[J]. 土木技術, 1998, 51(5): 73-81.
- [17] Mindess S. Developments in the formulation and reinforcement of Concrete [M]. Elsevier, 2014.
- [18] Drenckhan W, Langevin D. Monodisperse foams in one to three dimensions [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2010, 15: 341-358.
- [19] Pasupathy K, Ramakrishnan S, Sanjayan J. Formulating eco-friendly geopolymer foam concrete by alkali-activation of ground brick waste [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 325: 129180.
- [20] 陈忠平, 王树林. 气泡混合轻质土及其应用综述[J]. 中外公路, 2003, (5): 117-120.
- [21] 陈忠平, 谢学钦. 气泡混合轻质土的主要特性及其应用[C]. 2004 年道路工程学术交流论文集, 2004: 122-132.
- [22] 蔡力, 陈忠平, 吴立坚. 气泡混合轻质土的主要力学特性及应用综述[J]. 公路交通科技, 2005, (12): 71-74.

- [23] 张鸣, 陈令坤, 张云飞. 掺和料对化学法泡沫混凝土性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2014, 41(7): 79-81.
- [24] Zhang S L, Qi X Q, Guo S Y, et al. A systematic research on foamed concrete: The effects of foam content, fly ash, slag, silica fume and water-to-binder ratio [J]. Construction and Building Materials, 2022, 339: 127683.
- [25] 胡俊. EPS 混凝土力学性能及抗爆、抗震性能研究[D]. 中国科学技术大学, 2012.
- [26] Chen B, Liu N. A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties [J]. Construction and building materials, 2013, 44: 691-698.
- [27] Remadnia A, Dheilily R M, Laidoudi B, et al. Use of animal proteins as foaming agent in cementitious concrete composites manufactured with recycled PET aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(10): 3118-3123.
- [28] Luo J, Hou D, Li Q, et al. Comprehensive performances of carbon nanotube reinforced foam concrete with tetraethyl orthosilicate impregnation [J]. Construction and Building Materials, 2017, 131: 512-516.
- [29] 张帅, 罗健林, 李秋义, 等. 碳纳米管改性泡沫混凝土物理力学与阻尼性能[J]. 混凝土, 2015 (4): 78-81.
- [30] Bing C, Zhen W, Ning L. Experimental research on properties of high-strength foamed concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 24(1): 113-118.
- [31] Laukaitis A, Kerienė J, Mikulskis D, et al. Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(9): 3034-3042.
- [32] Park S B, Yoon E S, Lee B I. Effects of processing and materials variations on mechanical properties of lightweight cement composites [J]. Cement and concrete research, 1999, 29(2): 193-200.
- [33] 肖礼经. 气泡混合轻质填土技术在解决高等级公路软基路堤桥头跳车问题中的应用[J]. 中外公路, 2003, 23(5): 121-123.
- [34] 赵全胜, 苏国柱, 张春会. 气泡混合轻质土控制软土路堤桥头沉降试验[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 260-262.
- [35] 李硕, 杨军宏. 泡沫轻质土在高速公路改扩建工程中的应用[J]. 公路交通科技, 2018, 35(S1): 1-6.
- [36] Shi X N, Huang J J, Su Q. Experimental and numerical analyses of lightweight foamed concrete as filler for widening embankment [J]. Construction and Building Materials, 2020, 250: 118897.
- [37] 吴海刚, 王宝军, 郑永红, 等. 大规模采用泡沫轻质土处理软基设计方法探讨[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(2): 28-33.
- [38] 姜云晖. 泡沫轻质土在加固深厚软土地基中的应用研究[D]. 西南交通大学, 2016.
- [39] 林乐彬, 刘寒冰, 韩硕, 等. 气泡混合轻质土在道路冻土地基保护中的试验研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(6): 55-58.
- [40] 林乐彬. 气泡混合轻质土在冻土地区路基病害防治中的研究[D]. 吉林大学, 2009.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题

(1) 纤维掺加对泡沫轻质土增强效应需精确控制，以确保既提升韧性又不影响其他关键性能如强度和密度，这需要对纤维种类、掺量、掺入方式等进行大量实验和优化；不同原材料对复合材料性能的影响复杂多变，需要通过系统实验找出最佳配比，以满足水毁路基修复的各项要求，是本项目拟解决的第一个关键问题。

(2) 通过模拟泡沫轻质土用作水毁路基修复层实际应力服役工况，从宏观和细观两个层面揭示加筋泡沫轻质土韧性复合材料增韧阻裂机理，解决该复合材料在路基修复应用中的关键技术瓶颈问题，是本项目拟解决的第二个关键问题。

(3) 运用 CT 扫描技术结合 Matlab 图像数据分析处理方法进行加筋泡沫轻质土韧性复合材料孔隙三维形态表征，提取孔隙参数，实现加筋泡沫轻质土韧性复合材料孔隙空间构型数字化和可视化表征，是本项目拟解决的第三个关键问题。

2. 主要研究内容及实施方案

项目聚焦传统泡沫轻质土服役韧性差、硬化裂缝多、耐久性差等技术瓶颈，致力于研发适用于水毁路基快速修复的高韧性加筋泡沫轻质土新型复合材料，建立新型复合材料在水毁路基快速修复中的关键应用技术，为我国交通基础设施维护与绿色低碳发展提供有力支撑。本项目主要研究内容为：

研究内容 1：基于纤维增强作用的高韧性加筋泡沫轻质土复合材

料设计与制备工艺优化

基于水毁路基快速修复材料性能要求,设计目标复合材料中基体材料组分及纤维增强材料掺量范围等关键参量,优选基于泡沫轻质土韧性和强度提升效应的纤维类型、掺量与尺寸。通过开展大量实验,研究不同材料设计参数下纤维加筋对泡沫轻质土脆性破坏缺陷改善效果,探明不同原材料对韧性复合材料性能的影响效应,确定最佳材料配比。通过调整传统泡沫轻质土制备工艺参数,优化高韧性加筋泡沫轻质土复合材料制备工艺,确保纤维在发泡过程中均匀分散,形成稳定三维网络结构。研究养生时间、搅拌工艺等因素对复合材料性能的影响,提出新型韧性复合材料制备工艺优化方案。

研究内容 2: 服役条件下高韧性加筋泡沫轻质土复合材料增韧机理及性能调控研究

考虑路基服役真实荷载与环境条件,开展加筋泡沫轻质土韧性复合材料力学性能与耐久性试验研究,探明加筋泡沫轻质土韧性复合材料的三轴剪切特性、水稳定性、抗水渗透性以及疲劳加载特性,评估加筋泡沫轻质土韧性复合材料服役性能在水毁路基修复应用中的适应性,揭示纤维加筋对泡沫轻质土增韧阻裂的宏观机理。运用 CT 扫描技术及 Matlab 图像数据处理方法,进行加筋泡沫轻质土韧性复合材料空隙三维形态重构,开展空隙结构三维参数定义与提取,实现复合材料破坏裂纹空间构型数字化和可视化表征,揭示纤维加筋增韧阻裂细观机理。基于复合材料增韧阻裂机理,结合复杂服役条件下水毁路基修复材料性能指标要求,开展基于参数调控的高韧性加筋泡沫轻

质土复合材料性能提升研究,进一步优化目标复合材料关键设计参量与制备工艺控制参数,实现符合复杂服役条件下快速修复材料综合性能指标要求的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料研发。

研究内容 3: 高韧性加筋泡沫轻质土复合材料应用验证研究

依托实体工程,结合水毁路基特点和加筋泡沫轻质土韧性复合材料性能,提出水毁路基合理修复方案与施工工艺流程,开展加筋泡沫轻质土韧性复合材料现场试验研究,测试其凝结时间和养生时间。基于现场试验反馈验证,验证加筋泡沫轻质土韧性复合材料快速修复效果,评估修复路基承载力、稳定性、耐久性等服役性能,优化施工工艺。通过优化施工流程、采用高效施工装备等,提出缩短水毁路基修复周期的技术措施和方法,建立加筋泡沫轻质土韧性复合材料修复路基施工质量控制标准,并开展技术经济性能分析。

3. 技术路线

为突破水毁路基快速修复技术瓶颈,本项目采用室内试验、CT扫描与图像识别技术、Matlab 图像处理方法等多种先进技术方法,系统开展面向强降雨诱发路基损毁快速修复的绿色增韧材料研发与应用研究,其研究技术方案和工作流程为:

(1) 需求分析与材料选型

深入分析水毁路基修复实际需求(包括修复速度、材料性能等),基于需求分析,选择泡沫轻质土作为基础材料,并确定通过加筋增强其性能的技术方向。

(2) 新型复合材料研发

开展掺入纤维对泡沫轻质土增强效应的研究,通过实验室试验确定纤维种类、掺量及掺入方式;系统研究不同原材料(水泥、纤维掺合料、泡沫剂等)对复合材料性能的影响,通过大量实验确定最佳材料配比;优化制备工艺参数(搅拌时间、养护条件等),以提升复合材料的韧性、轻质和高强特性。

(3) 性能评估与机理研究

设计并实施复杂服役条件下的力学性能与耐久性试验,包括三轴剪切、水稳定性、抗水渗透性和疲劳加载等测试;运用 CT 扫描技术及 Matlab 图像数据处理方法,进行复合材料空隙三维形态重构,揭示纤维加筋的增韧阻裂机理;评估复合材料在水毁路基修复应用中的适应性,包括宏观与细观层面的机理研究。

(4) 工程应用技术研究 with 示范

结合水毁路基特点和复合材料性能,提出合理修复方案与施工工艺流程;通过现场试验验证并优化施工工艺,采用高效施工装备缩短修复周期;建立复合材料修复路基施工质量控制标准,并进行严格施工质量控制;选取典型水毁路基开展示范工程建设,验证复合材料的快速修复效果,评估修复路基的承载力等服役性能,并开展技术经济性能分析。

(5) 技术体系形成与优化

基于示范工程的建设经验和技术反馈,对复合材料、施工工艺和质量控制标准进一步优化,形成一套完整、高效、可行的基于加筋泡沫轻质土韧性复合材料的水毁路基快速修复技术体系。

综上，如图 3-1 所示，本项目总体思路与技术路线从需求分析出发，经过新型复合材料的研发、性能评估与机理研究，再到工程应用技术的研究与示范，最终形成一套完善的技术体系，为水毁路基快速修复提供科学解决方案。

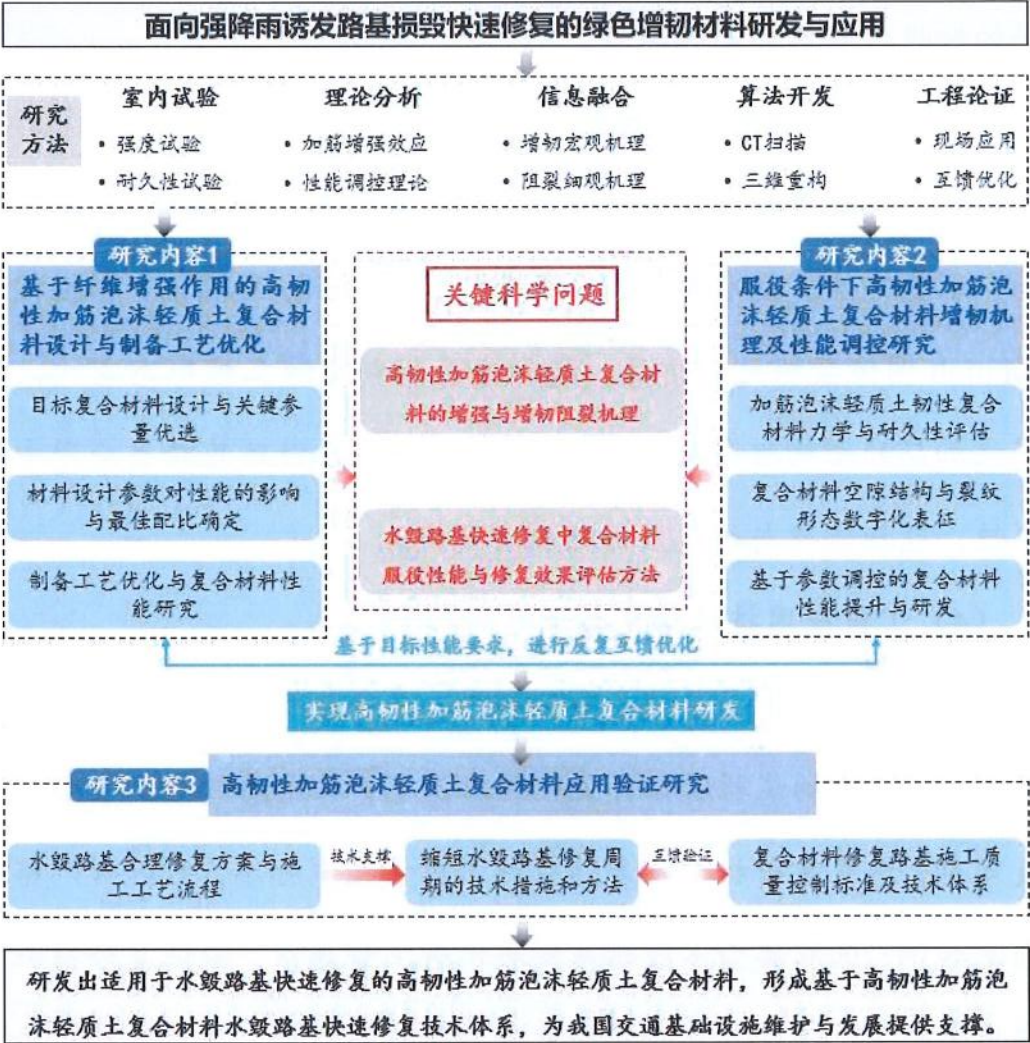


图 3-1 项目技术路线

4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接

我国公路水毁形势十分严峻，尤其是区域性强降雨引发的洪水，常常对公路交通基础设施造成严重破坏，汛期出现的路基水毁现象已呈常态趋势，使当地经济建设和人民群众的生命财产遭受巨大损失。

多年统计结果表明，我国公路每年因水毁灾害造成的损失严重，直接经济损失多达数百亿元，且有逐年增长趋势。以陕西省公路水毁灾害为例，有关统计数据表明，近二十多年来水毁损失虽上下波动，但总体趋势是增加的。陕西省每年汛期公路交通基础设施都面临着暴雨、洪水的严重威胁，公路、桥梁损毁严重，部分路段交通中断，经济损失巨大。由此可见，公路路基水毁问题长期存在且十分严重，提升水毁路基快速修复与保通技术能力具有重要的现实意义和市场需求。

针对路基水毁快速抢通问题，目前装配式结构、快速支挡结构等修复结构在水毁路基修复工程中应用日趋成熟，而水毁路基快速修复材料发展相对较慢。寻求绿色低碳、耐久性好、轻质高强的新型筑路材料是实现公路交通可持续发展和水毁路基快速修复材料产业化升级的重要路径。本项目致力于研发力学性能、耐久性及韧性满足水毁路基快速修复要求的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料，不仅具备传统泡沫轻质土轻质性、高流动性、强度和重度可调节性、固化后的自立性、水稳定性好及施工便捷性等一系列优点，而且还弥补了现浇泡沫轻质土硬化过程中存在脆性大、强度低、韧性差、裂缝多等问题，可有效降低工后维护返修成本，缩短施工工期，实现水毁路基快速抢通的目的，推广应用前景广阔。

此外，基于高韧性加筋泡沫轻质土复合材料，通过现场试验验证与优化，构建形成一套高效、可行的水毁路基快速修复技术体系，为我国公路路基水毁快速修复产业发展提供了方向和契机，将有力推动路基水毁应急抢通产业的转型升级。该项目具有较高的产业化可行

性，通过不断优化技术、拓展市场、完善产业链等环节，有望在未来实现规模化应用，为交通基础设施维护与发展提供有力支持。

5. 有关技术经济指标

(1) 研发 1 种适用于水毁路基快速修复的新型低碳环保材料，即高韧性加筋泡沫轻质土复合材料。

(2) 相比相同养护期内传统泡沫轻质土，高韧性加筋泡沫轻质土复合材料的强度预计增长 30% 以上。

(3) 形成 1 套基于高韧性加筋泡沫轻质土复合材料的水毁路基快速修复技术，实现水毁路基快速抢通。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

中交第一公路勘察设计研究院有限公司（简称“中交一公院”）是我国交通工程咨询、勘察、设计、研究领域大型骨干企业，是行业标准规范的制定者和行业科技创新的引领者。现有职工 3000 余人，各类职业注册人员近 300 人，培养包括中国工程院院士、全国工程勘察设计大师、万人计划、企业长江学者、全国创新争先奖、国务院特殊津贴专家等省部级以上人才 130 余人次，形成了一支行业影响力强、技术水平高的高层次专家团队。经过七十余年的砥砺奋进，中交一公院已发展成为资产总额逾 80 亿元，年新签合同额超过 60 亿元的世界综合交通领域的卓越技术服务商，建设项目遍布全国 30 个省、市、自治区及全球五大洲 30 多个国家，是共建“一带一路”的重要参与者和交通工程的技术贡献者。

中交一公院始终坚持以科技进步为先导，以技术创新支撑和引领企业发展，构建了具有行业和企业特色的科技创新平台与技术创新体系。拥有全国重点实验室、国家野外观测站、国家行业研发中心、博士后科研工作站等高端科技创新平台 22 个，拥有包括工程咨询甲级、工程勘察综合甲级、工程设计综合甲级在内的各类各级资质 30 余项。依托“人才—团队—平台”的创新体系，承担各类科研项目 1000 余项，其中国家和省部级重大项目 200 余项；累计获得国家专利授权 500 余项，计算机软件著作权 200 余项，发表学术论文 5000 余篇；主编参编国家、行业标准规范制修订项目 200 余项；编译欧、美、日

等国外主流标准规范 50 多部，组织编译外文版中国工程建设规范 18 部；累计获得国家级、省部级科技奖 400 余项，其中国家科技进步一等奖 3 项、二等奖 7 项、国家技术发明二等奖 1 项。

中交一公院在新材料研发、防灾减灾、数字公路、交通安全等多个领域，取得一系列重要科研成果，为我国公路行业的科技进步、工程建设和公路设计技术等作出了重要贡献，在行业有重要影响。在进一步巩固和提高已有领域传统优势的基础上，中交一公院按照国家重大科技需要、行业技术进步趋势和市场技术需求，积极拓展科研新领域，聚焦公路行业的智能化、数字化，赋能传统产业，聚焦生态环保、3D 打印、智慧交通、工程信息智能感知等领域，促进行业技术进步和引领企业发展。

2. 技术力量及人员构成

本项目由我国公路领域大型科研设计单位和国家“双一流”高校共同承担，各参与单位能充分发挥自身的优势，取长补短、资源互补、信息共享，能够形成有机的产学研用协同创新模式；并组建了一支知识结构层次合理、梯度稳定、富有朝气的攻关团队，团队研发人员均长期从事于公路交通领域新材料研发、防灾减灾勘察设计与科研工作，具有较好的研究基础和实践经验，能胜任项目的研究工作。

姓 名	单 位	性别	年龄	技术 职称	专业	在项目中担任 具体工作
裘友强	中交第一公路勘察设 计研究院有限公司	男	34	副高级	道路工程 (路基)	项目总体策划 及组织实施
曹升亮	中交第一公路勘察设 计研究院有限公司	男	41	正高级	隧道工程	项目组织协调

王占棋	安徽理工大学	男	34	中级	道路工程 (路基)	技术负责
郭盼盼	合肥工业大学	男	33	中级	道路工程 (路基)	技术负责
张留俊	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	63	正高级	道路工程 (路基)	试验研究指导
刘 洋	北京科技大学	男	46	正高级	道路工程 (路基)	理论研究指导
李 刚	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	52	正高级	道路工程 (路面)	工程应用指导
赵力国	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	41	正高级	桥梁工程	项目组织协调
董长松	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	43	正高级	隧道工程	新材料性能评估与机理研究 负责
李 震	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	35	副高级	道路工程 (路基)	新材料性能评估与机理研究
王怡珺	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	女	30	中级	环境保护 (公路环境保护)	新材料绿色低碳及经济效益 评估
王君鹭	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	女	35	副高级	道路工程 (路基)	新材料研发
崔锦栋	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	31	中级	道路工程 (路基)	新材料研发
黄永益	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	43	副高级	信息化	技术应用示范
苟 超	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	30	中级	隧道工程	技术应用示范

3. 项目主要负责人情况

袁友强，男，在职博士研究生，高级工程师，长期从事道路工程新材料研发和防灾减灾技术研究。工作以来，主持省部级科研项目 3 项，参与各类科研项目、设计与技术服务项目、标准编制项目 20 余项，其中作为技术骨干参与了“十三五”和“十四五”国家重点研发计划项目 3 项；多项科研成果经中国公路学会等行业协会评价均达到

国际领先或国际先进水平，直接服务和支撑了 30 余项国内外重大工程建设，产生了较好的经济社会效益。结合技术成果和工程实践，出版学术专著 3 部，发表 SCI/EI 等论文 40 余篇，获授权发明专利 8 项、实用新型专利 5 项，并担任 Constr Build Mater 等国际知名 SCI 期刊审稿专家；参编行业标准和团体标准 4 部；获得中国公路学会等各类科学技术奖 8 项；先后入选“陕西省科协青年人才托举计划”、“中国公路学会优秀青年岩土工程师”、“陕西省岩土力学与工程优秀青年工程师”等荣誉，为推动公路行业岩土工程新材料、新技术和新工艺发展与成果转化做出了积极贡献。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

1. 依托工程（工作）概况

为深入贯彻习近平总书记关于梅大高速茶阳路段塌方灾害的重要指示精神，基于 2024 年 8 月开展的陕西省高速公路及普通国省干线公路汛期安全隐患排查整治情况，**本项目拟选取因洪水冲刷和掏蚀作用引起路基失稳频次较高的 G342 国道凤县段作为依托工程。**G342 国道凤县段作为 G342 国道终点段落，路线全长 14.253km，设计速度 40km/h，路基宽度 8.5m，不仅是连接山东日照和陕西凤县的重要交通枢纽，还对促进区域内产业经济的快速发展，加速区域城镇化建设的步伐、优势产业的开发利用、人民生活水平普遍提高及区域内的脱贫致富具有重要意义。项目所在区域总体属秦岭构造侵蚀低中山地貌，地貌单元可划分为构造侵蚀低中山区和山间河谷区，区域气候特点表现为垂直变化明显，小气候差异大，光热条件不足；降水集中，分布不均；气温日差较大。年平均降水 613.2mm，雨水充沛。

受汛期连续强降雨影响，G342 国道凤县段路基水毁现象频发（图 5-1），仅 2024 年 8 月排查统计的路基水毁多达 32 处（表 5-1），长度约 3km，个别临河路堤甚至发生路面开裂、滑移或局部垮塌病害，导致道路中断，严重影响公路的正常运营。

在进行路基水毁修复和抢通时，通常需要花费较长时间来进行排查、设计、施工等工作，将带来巨大的经济损失和恶劣的社会影响。为有效提高公路路基水毁抢修效率，尽可能减少道路中断时间，同时推动低碳环保新材料的应用，亟需结合依托工程开展本项目研究。

表 5-1 G342 国道凤县段路基水毁排查统计表

序号	起点桩号	终点桩号	长度 (m)	隐患描述
1	K1963+450	K1963+500	50	路基、路面、波形护栏水毁，交通中断
2	K1690+450	K1690+533	83	路基冲毁，路面悬空，交通中断
3	K1690+900M	K1690+930M	30	路基路面水毁
4	K1689+750M	K1689+800M	50	下挡墙垮塌，路基掏空
5	K1649+154M	K1649+214M	60	路基全毁，交通中断
6	K1647+325M	K1647+725M	400	路基全毁，交通中断
7	1657+470	1656+490	20	路基局部水毁
8	1657+980	1658+010	30	路基局部水毁
9	1656+120	1658+140	20	路基局部水毁
10	1658+930	1658+980	50	路基局部水毁
11	1661+150	1658+170	20	路基坍塌
12	1654+800	1654+820	20	路基坍塌
13	1670+400	1670+600	200	路基坍塌
14	1671+400	1671+500	100	路基坍塌
15	1671+997	1672+057	60	路基局部水毁
16	1672+190	1672+290	100	路基局部水毁
17	1654+600	1654+620	20	路基局部水毁
18	1688+855	1688+905	50	路基局部水毁
19	1687+700	1687+730	30	路基局部水毁
20	1704+900	1705+000	100	路基全毁
21	1711+777	1711+857	80	路基局部水毁
22	1677+600	1678+100	500	路基坍塌
23	1677+750	1677+790	40	路基坍塌
24	1677+750	1677+790	40	路基坍塌
25	1678+800	1678+830	30	路基局部水毁
26	1678+300	1678+330	30	路基坍塌
27	1678+240	1678+270	30	路基坍塌
28	1674+540	1674+740	200	路基局部水毁
29	1674+750	1675+000	150	路基局部水毁
30	1674+860	1674+880	20	路基局部水毁
31	1700+955	1700+960	50	路基局部水毁
32	1706+110	1706+140	30	路基局部水毁



图 5-1 强降雨诱发路基水毁现象

2. 投资来源

项目经费估算为 59.87 万元，其中，省交通运输厅补助 19.87 万元，承担单位自筹 40.00 万元。

3. 工程进度与项目科研进度的配合

本项目研究内容与依托工程可起到相辅相成的作用，研究成果不仅对于陕西省公路路基水毁快速修复和应急抢通具有重要应用价值，而且充分响应了国家“双碳”目标，助力低碳环保新材料成果转化；而依托工程高质量的实施也是检验项目研究成果的关键途径，有利于研究成果的落地。

4. 组织管理形式

为了确保本项目的高效实施和管理，拟采取的具体、可落地的措施包括：

①定期跟踪项目情况，每月组织召开项目进度交流会，全面跟踪掌握项目的最新情况，梳理进度滞后的任务清单，及时了解滞后的原因，发出预警信息，确保所有任务按计划推进。

②制定合理的项目进度计划，根据合同内容和试验条件综合制定合理可行的项目总进度计划和专项进度计划，对综合执行过程中的具体问题采取必要的补救和调整，实现合同规定的研究目标，并确保研究质量。

③加强项目研究过程的控制，并根据具体情况及时、科学地调整项目计划，确保质量满足要求。

六、项目经费估算及资金筹措情况

项目经费估算为 59.87 万元，其中，省交通运输厅补助 19.87 万元，承担单位自筹经费 40.00 万元。

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	19.87	合 计	59.87	19.87	40.00
工程配套研究经费		1.设备费	0.00	0.00	0.00
单位自筹	40.00	（1）购置设备费	0.00	0.00	0.00
其他经费		（2）设备改造与租赁费	0.00	0.00	0.00
		2.业务费	42.17	15.67	26.50
		（1）材料费	8.67	3.67	5.00
		（2）测试化验实验加工费	5.00	2.00	3.00
		（3）燃料动力费	3.00	0.00	3.00
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	18.00	5.00	13.00
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	7.50	5.00	2.50
		（6）其他费用	0.00	0.00	0.00
		3.劳务费	15.20	4.20	11.00
		（1）专家咨询费	4.00	0.00	4.00
		（2）聘用人员劳务费	11.20	4.20	7.00
		（3）其他劳务费	0.00	0.00	0.00
		（二）间接费用	2.50	0.00	2.50
		4.管理费	0.00	0.00	0.00
		5.绩效支出	2.50	0.00	2.50

注：预算编制按照《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发[2022]3 号）文件执行，详见附件《科研经费预算编制说明》。项目验收将组织财务专项验收或审计。

经费预算详细测算说明

一、直接费用

1. 设备费：无。

2. 业务费

(1) 材料费：

主要用于室内实验和实体工程应用验证中加筋泡沫轻质土原材料（发泡剂、水泥、纤维）、装置改造耗材等采购、运输和装卸费用，共计 8.67 万元。

(2) 测试化验实验加工费

主要用于加筋泡沫轻质土材料试件的 CT 扫描、核磁共振、电镜扫描等测试化验实验加工，共计 5.00 万元。

(3) 燃料动力费

主要用于为实体工程调研、现场试验及测试等提供动力。野外考察及试验所用油价按照 10 元/升计算。实体工程调研按照 20 天计，现场试验及测试按照 30 天计，合计 50 天。合计项目执行期间现场试验发电机燃油动力费： $50 \text{ 天} \times 60 \text{ 升/天} \times 10 \text{ 元/升} = 3.00 \text{ 万元}$ 。

(4) 差旅费/会议费/国际合作与交流费

差旅费：主要包含依托工程现场调研、测试、工作等所发生的食宿、交通、补贴等费用。预计每次出差人数 4 人，出差平均天数 4 天，出差次数预计 10 次，食宿费 300 元/天/人，补贴 200 元/人/天。交通费按 2000 元/次/人（含往返机票/高铁、市内交通费和省内长途交通费）。费用合计： $4 \text{ 天} \times 4 \text{ 人} \times (300 \text{ 元/人/天} + 200 \text{ 元/人/天}) \times 10 \text{ 次} + 4 \text{ 人} \times 2000 \text{ 元/次/人} \times 10 \text{ 次} = 16.00 \text{ 万元}$ 。

会议费：根据项目需要，组织举行立项评审、研究大纲评审、中期审查、验收鉴定等会议共 4 次，每次会议为期 1 天。按 5000 元/天计算，共计 $5000 \text{ 元/天} \times 1 \text{ 天} \times 4 \text{ 次} = 2.00 \text{ 万元}$ 。

国际合作与交流费：无

差旅费/会议费/国际合作与交流费合计 18.00 万元。

（5）出版/文献/信息传播/知识产权事务费/印刷费

主要包括 2 篇论文发表（版面费按 1 万元/篇计）、2 项专利申请（代理费+官费按 1.5 万元/项计）、1 次科技查新（按 0.5 万元/次计）以及各阶段成果报告印刷费（按 2 万元计），共计 7.50 万元。

（6）其他费用

无。

3. 劳务费

（1）专家咨询费

为保证项目研究过程的顺利进行以及研究成果的先进性，历次会议邀请行业内知名专家对课题研究进行咨询，会议计划召开 4 次，每次会议计划邀请 5 名专家，每次会议为期 1 天，咨询费用标准按照 2000 元/人/天计算。 $(2000 \text{ 元/人/天}) \times 5 \text{ 人/次} \times 4 \text{ 次} \times 1 \text{ 天} = 4.00 \text{ 万元}$ 。

（2）聘用人员劳务费

根据项目需要，投入临时聘用人员协助项目的开展，临时工聘用人员主要服务于现场试验协助和车辆驾驶等，博士或硕士研究生主要用于加筋泡沫轻质土材料室内试验工作。

计划聘用临时工 2 人、硕士研究生 2 人、博士研究生 1 人，临时工劳务费标准为 5000 元/人/月，临时工每人累计工作 4 个月；博士或硕士研究生劳务费标准分别为 3000 元/人/月、1500 元/人/月，研究生

每人累计工作 12 个月。共计 2 人 $\times$ 5000 元/人/月 $\times$ 4 月+1 人 $\times$ 3000 元/人/月 $\times$ 12 月+2 人 $\times$ 1500 元/人/月 $\times$ 12 月=11.20 万元。

(3) 其他劳务费

无。

二、间接费用

(1) 管理费

无。

(2) 绩效支出

用于科研技术开发人员的绩效支出，按不超过直接费 5%计，费用为 2.5 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）	0
		（1）授权发明专利	0
		（2）实用新型	0
		（3）外观设计	0
		2、软件著作权授权数（项）	0
		3、发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	1
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其它	1
		4、著作（部）	0
		5、制订标准数（项）	1
		（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	/
		(1) 博士、博士后	/
		(2) 硕士	/
		2、培养高层次人才	3
		(1) 博士、博士后	1
		(2) 硕士	2
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	0
		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）	0
		2、新增销售（万元）	0
		3、新增出口创汇（万美元）	0
		4、新增利润（万元）	50
	社会效益	1、新增税收（万元）	0
		2、新增就业人数	0
		3、就业培训（人次）	0
		4、带动农民增收（万元）	0
		5、培训和指导科技服务（人次）	0
		6、新增产业带动情况	带动绿色低碳建筑材料产业转型升级
		7、技术集成示范（项）	1
		8、建立示范基地（亩数）	0
		9、节约资源能源	促进资源循环利用
		10、环保效益	降低施工碳排放量
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

1.项目预期目标（项目的考核目标）

本项目预期研发一种适用于水毁路基快速修复的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料，通过深入研究纤维加筋对泡沫轻质土的增强效应，优化材料配比与制备工艺，获得兼具高韧性、轻质高强和低碳环保特性的新型复合材料；在此基础上，通过力学性能与耐久性试验，揭示纤维加筋对泡沫轻质土的增韧阻裂宏细观机理，评估其在水毁路基修复中的服役适应性；最终结合水毁路基特点与复合材料性能，提出合理的修复方案与施工工艺流程，并通过现场试验验证与优化，形成一套高效、可行的水毁路基快速修复技术体系。

2.提交的研究成果及其形式

- (1) 研发适用于水毁路基快速修复的绿色增韧材料 1 种；
- (2) 编制研究报告、工作报告各 1 册；
- (3) 申请发明专利 2 项；
- (4) 发表学术论文 2 篇；
- (5) 开展示范工点 1 处；
- (6) 编制项目施工技术指南 1 项。

3.经济、社会、环境效益分析

(1) 经济效益

①为公路路基水毁快速抢修与保通“保驾护航”

受全球极端环境的影响，我国汛期出现的路基水毁问题已呈常态趋势，交通阻断频发，通道保通需求巨大。项目通过形成基于高韧性

加筋泡沫轻质土复合材料的水毁路基快速修复技术体系，将为路基水毁灾害快速响应以及高效处置提供技术支持，预计实现工后维护返修成本降低 50%以上，交通阻断时间减少 10%。

②提升公路路基应对洪水等突发灾害事故的处置效率

公路路基是路面交通荷载作用的承受体，其强度与稳定性直接影响路面的使用寿命和道路的使用品质。相较于传统水毁路基修复材料和工艺，项目通过研发出具备高韧性、轻质、高强特性的新型加筋泡沫轻质土韧性复合材料，创新提出合理修复方案与施工工艺，预计提升处置效率 30%以上，大幅减少人力、物力、财力。

③降低物流成本，促进旅游资源开发，推动区域经济发展

受地形和极端气象的影响，路基水毁多发生在山区、沿江沿河地带，交通阻断下物流运输和人员流动困难，物流和旅客运输效率低下、成本高昂，大量的旅游资源亟待开发，区域经济发展缓慢。项目成果将有效提升山区等水毁频发路段的运输效率，促进区域内外物资流通和人员流动，带动地区旅游资源开发和社会经济发展。

(2) 社会和环境效益

①促进区域民族团结和社会稳定

我国路基水毁频发区域主要集中在陕西、四川、重庆、新疆、西藏等省份和自治区，少数民族聚集相对较多，交通的正常出行牵动着党和人民的心。项目成果将保障水毁路段快速抢通和有效运行，确保地区货物运输、旅客出行和战略战备需求，促进区域民族团结和社会稳定。

②助力国家“双碳”目标及可持续发展战略

公路工程建设过程中建筑材料的大量消耗及施工机械的长时运作，导致能源大量耗损和温室气体巨量排放。项目研发出的适用于水毁路基快速修复的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料，本质上属于一种低碳环保材料，不仅可以消纳胶凝类固体废弃物（粉煤灰等），促进资源的循环利用，而且还减少对环境的污染以及固体废弃物运弃过程中对周边环境带来的不利影响，对响应国家节能减排、可持续发展具有十分可观的社会环境效益。

九、其它需要说明的问题

无。



十、申请单位意见

为积极响应国家绿色低碳发展战略及陕西省“十四五”绿色低碳转型规划，本项目紧扣传统泡沫轻质土脆性易裂的共性难题，致力于研发一种新型轻质高强加筋泡沫轻质土韧性复合材料，并提出高效可靠的水毁路基快速修复技术。项目通过深入揭示纤维增韧阻裂机理，旨在为纤维加筋泡沫轻质土的高值化利用提供新材料支撑与理论依据，赋能绿色交通工程发展及施工方案优化。该选题精准契合低碳筑路材料的应用趋势，预期市场前景广阔。目前，项目已落实依托工程与配套经费，具备开展系统科技攻关的条件！



单位负责人：（签字）



2026 年 3 月 23 日

面向强降雨诱发路基损毁快速修复的绿色 增韧材料研发与应用 大纲评审意见

2026年3月19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“面向强降雨诱发路基损毁快速修复的绿色增韧材料研发与应用”（项目编号：25-46K）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、预期成果覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

- 1.进一步聚焦研究重点，凝练研究内容。
- 2.应结合工程实际，编制项目施工技术指南。

主任委员： 

2026年3月19日

专家审查意见表

项目名称	面向强降雨诱发路基损毁快速修复的绿色增韧材料研发与应用				
专家姓名	景宏君	职务/职称	教授	专业	道路工程
专家单位	西安科技大学			联系电话	13689101111

评审意见

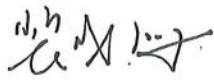
路基快速修复技术,近年来开展研究较多。本项目基于相关研究现状,开展相关研究,立论正确,同意研究大纲评审。建议如下:

1. 以不同强降雨诱发路基损毁的研究内容,机理,迫切性、分类等;
2. 重新梳理研究内容,应与招标文件相关研究内容一致;明确研究内容和研究内容;
3. 成本核算及材料供应实施材料指南;
4. 完善经济、环境效益评价方法,评价指标。

评审专家(签字): 景宏君

2026 年 3 月 19 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	《面向强降雨诱发路基损毁快速修复的绿色增韧材料研发与应用》				
专家姓名	裴晓梅	职务/职称	高工	专 业	公路工程
专家单位	西安市公路局			联系电话	18681872850
评 审 意 见 25-46K 项目《面向强降雨诱发路基损毁快速修复的绿色增韧材料研发与应用》，研究内容实用，研究大纲内容较全面。 建议：一、技术路线中应补充完善路段现场试验工作，对新材料现场应用性能情况深入研究。 二、项目研究路基快速修复技术，应测试材料的凝结时间和养生时间。 三、在研究中应做经济技术性能分析。将本课题的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料和当地普遍使用的砂砾填筑路基进行经济性能对比，研究新材料的应用场景。 评审专家（签字）： 2026 年 3 月 19 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	面向强降雨诱发路基损毁快速修复的绿色增韧材料研发与应用				
专家姓名	任国良	职务/职称	正高工	专 业	材料学
专家单位	陕西高速公路工程试验检测有限公司			联系电话	18334082801

评 审 意 见

- 项目内容完整，目标明确有针对性。建议完善以下内容：
1. 告知剂 SDS 与 APC 如何确定？因与碱反应材料是否副反应？
因如何解释？
 2. 纤维如何选择？已有基础中提到，但是内容又有了。
 3. 水毁项目应用案例。但是具体方案，如何应用均未提到。时间上予以显示？
 4. 施工应用技术指南应在成果中体现。

评审专家（签字）：

任国良

2016 年 3 月 19 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

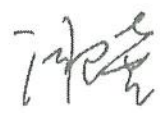
项目名称	面向强降雨诱发路基损毁快速修复的绿色增韧材料研发与应用				
专家姓名	闫世喜	职务/职称	副总经理/正高级	专 业	公路桥梁
专家单位	天津高速公路集团有限公司			联系电话	18502239132

评 审 意 见

该大纲编制格式规范，内容完整，技术路线和研究方法清晰，预期成果和经费预算合理，满足大纲编制要求，同意通过审查。

相关建议如下：

- 1、建议增加整体性实验室模拟试验，以验证整体性指标；
- 2、建议针对强险快速修复施工工艺进行研究，形成相关工法。

评审专家（签字）： 

2026年3月19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	面向强降雨诱发地基损毁快速修复的绿色建材研发				
专家姓名	郭忠印	职务/职称	教授	专业	交通运输工程
专家单位	同济大学			联系电话	13918266820

评审意见

1. 项目以制定的研究大纲内容全面, 按照计划可行, 目标明确。
同意通过研究大纲评审。
2. 建议:
 - (1) 项目属于研究的是轻质泡沫土的应用问题, 若题目不符变更, 在研究阶段应及时申报。
 - (2) 研究阶段应针对具体的地基损毁模式和快速修复的具体要求(如修复时间等)对泡沫轻质土提出具体要求。
 - (3) 除考虑修复时间外, 还应考虑修复成本和施工工艺可行性, 不宜过高地追求高韧性。

评审专家(签字):

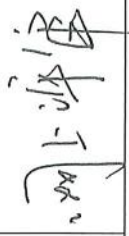
郭忠印

2026年3月19日

(本意见入档, 应填写工整, 纸面不敷, 可另加纸)

面向强降雨透发路基损毁快速修复的绿色增韧材料研发与应用 (项目编号: 25-46K)

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	景宏君	西安科技大学	道路工程	道路工程材料	教授	
2	委员	张国宏	陕西高速公路工程试验检测有限公司	材料学	道路工程	正高工	
3	委员	裴晓梅	西安市公路局	公路与城市道路工程	公路工程	正高工	
4	委员	闫卫喜	天津高速集团	土木工程	道桥工程	正高工	
5	委员	郭忠印	同济大学	交通运输工程	交通运输工程	教授	

专家意见处理表

项目名称：面向强降雨诱发路基损毁快速修复的绿色增韧材料研发与应用（项目编号：25-46K）

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	景宏君	①明确强降雨时诱发路基损毁的研究方法，梳理迫切性、分类等。 ②重新梳理研究内容，应与投标文件相应研究内容一致；明确研究成果的应用场合与场景。 ③成果提交形式应补充施工技术指南。 ④完善经济、环境效益评价方法、评价指标。	①采纳专家意见，已在研究大纲项目背景与意义中，补充完善了公路路基水毁类型、研究方法、研究迫切性等前置条件。 ②采纳专家意见，已核实项目研究内容与投标文件相应研究内容一致，将研究成果的应用场景界定为持续性降雨诱发的山区公路路堤整体滑坡或冲毁情形。 明确了研究成果适用于持续性降雨诱发山区公路路堤整体滑坡或冲毁应用场景。 ③采纳专家意见，已在成果提供形式中补充施工技术指南。 ④采纳专家意见，已在研究内容3中，补充了技术经济性能分析。
2	张国宏	①发泡剂 SDS 与 APG 如何确定？是否与减水剂等材料发生副反应？ ②纤维如何选择？团聚如何解决？已有基础中提及，但内容是内容又有了。 ③水毁项目应用案例，但是具体方案，如何应用均未提及，时间上来得及不？ ④施工应用技术指南应在成果中体现。	①作为项目前期研究成果的发泡组分 SDS 与 APG 的确定，不在本项目的具体研究范畴之内。 ②基于前期研究成果，已对比分析了纤维含量、纤维长度、纤维分布形式、制样参数对纤维加筋土抗剪强度特性的影响。本项目将进一步对比分析纤维类型、掺量、长度等参数对泡沫轻质土物理力学性能的影响，其中纤维的优选以材料性能提升效果为依据，纤维团聚现象则主要通过调整制备工艺加以改善。 ③在水毁路基修复工程中，拟采用研发的新材料对水毁路基进行换填处理，并据此提出相应的施工工艺流程。其中，泡沫轻质土材料施工便捷，

			就地取材方便, 无需设置永久性支护结构, 作为一种快速修复材料, 可满足工期紧迫的修复需求。 ④采纳专家意见, 已在成果提供形式中补充施工技术指南。
3	裴晓梅	①技术路线中应补充完善路段现场试验工作, 对新材料现场应用性能情况深入研究。 ②项目研究路基快速修复技术, 应测试材料的凝结时间和养生时间。 ③在研究中应做经济技术性能分析。将本课题的高韧性加筋泡沫轻质土复合材料和当地普遍使用的砂砾填筑路基进行经济性能对比, 研究新材料的应用场景。	①采纳专家意见, 已在研究内容3中, 补充了路段现场试验工作。 ②采纳专家意见, 在室内外试验中, 补充测试材料的凝结时间和养生时间。 ③采纳专家意见, 已在研究内容3中, 补充了技术经济性能分析。
4	闫卫喜	①建议增加整体性实验室模拟实验, 以验证整体性指标。 ②建议针对危险快速修复施工工艺进行研究, 形成相关工法。	①考虑到项目研究周期和经费限制, 暂不增加整体性实验室模拟实验, 转而通过补充完善路段现场试验, 对新材料的现场应用性能进行研究。 ②采纳专家意见, 已在成果提供形式中补充施工技术指南。
5	郭忠印	①项目实施研究的是轻质泡沫土的应用问题, 若题目不能变更, 在研究阶段应尽快切题。 ②研究阶段应针对具体的路基损毁模式 and 快速修复具体要求(如修复时间等)对泡沫轻质土提出具体要求。 ③除考虑修复时间外, 还应考虑修复成本和施工工艺复杂性, 不宜过高地追求高韧性。	①感谢专家意见, 目前项目题目不能变更, 在研究阶段尽快切题。 ②采纳专家意见, 针对持续性降雨诱发的山区公路路堤整体滑移或冲毁情形, 在研究阶段中通过补充测试新材料强度以及养生时间, 对高韧性加筋泡沫轻质土复合材料的强度及增长速率提出要求。 ③采纳专家意见, 已在研究内容3中, 补充了技术经济性能分析, 并在成果提供形式中补充施工技术指南。

大纲评审委员会专家(签字):



项目负责人(签字): 裴友强