

项目合同编号：25-82K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术研究

承担单位：西安科技大学

项目负责人：邹晓龙

通讯邮编、地址：710054、雁塔区雁塔中路 58 号西安科技大学

传真、电话：13474032318

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：25-82K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术研究

承担单位：西安科技大学

项目负责人：邹晓龙

通讯邮编、地址：710054、雁塔区雁塔中路 58 号西安科技大学

传真、电话：13474032318

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

本项目以 G307 国道改扩建工程中低矮路堤为研究对象，通过改良路基设计、计算机模拟仿真、埋设传感器检测等手段，研究严寒地区低矮路堤的灾变机理与防治技术。

(1) 冻融循环作用下低矮路堤力学响应研究

聚焦季冻气候下低矮路堤浅埋强耦合特有服役环境，开展冻融循环下的路基力学响应研究。依托现场试验与室内模型箱，量化分析黄土在冬胀、春融、夏固结交替中的变形规律与强度衰减特征。重点提取黏聚力折减、动模量下降及残余塑性应变等核心指标，揭示路床浅层受温度梯度与相变扰动导致的刚度退化轨迹，为多场耦合灾变模型提供本构参数与物理边界约束。

(2) 行车荷载作用下低矮路堤工作区应力分布规律研究

针对低矮路堤病害的突发性，深入剖析水分迁移、相变、动载正反馈恶化闭环机理。突破单一物理场叠加假定，引入微结构损伤与相变放大机制，探明重载车辆瞬态超孔压泵吸效应对黄土骨架的疲劳扩容作用。结合 PINN-COMSOL 架构，推导动态渗透张量与有效导热系数，实现宏微观的定量映射，精准锁定春融期承载力丧失的核心致灾因子，为建立评价体系夯实基础。

(3)水-热-应力-应变多因素耦合作用下低矮路堤稳定性劣化机理研究

开发适合本工况的智慧监测平台系统，进行季冻区低矮路堤中

关于温湿度、应力应变、沉降位移等数据的实时监测，实现路堤服役状态的实时采集与可视化融合。平台内嵌基于多源异构算法的多场耦合稳定性总指标（STHM）评估模型，通过精准设定环境波动与结构响应阈值，实现对路基灾变的自动靶向预警，为公路运维管理提供智能化数字闭环支撑。

（4）冬寒地区公路低矮路堤病害防治技术研究

基于前期多场劣化机理与预警体系，提出兼顾工程可行性与经济性的靶向强度提升综合对策。摒弃传统大深度换填的盲目性，确立设计原则。针对核心软弱层位，制定黄土改良、保温阻水层与柔性加筋相协同的结构优化方案。结合交通错峰管控与基于 STHM 指标的预防性养护策略，从根源切断病害诱发路径，有效控制长期刚度退化，实现降本增效。

2. 技术关键

（1）研发一种用于实时监测路基健康状态的智慧监测系统；

（2）结合监测数据，使用计算机进行仿真模拟，根据结果提出冬寒地区低矮路堤稳定性的劣化机理；

（3）总结各类环境因素影响低矮路堤稳定性的方式和特点，提出冬寒地区低矮路堤的设计思路和养护措施

3. 依托工程（依托工作）

本研究依托国道 G307 靖边东坑至定边彭斜段改建工程开展，在本标段内布设现场试验路段和低矮路堤长期监测区，既具代表性，又便于结合建设期与运营期数据开展系统研究，完全能满足课题。

二、考核指标

1. 预期目标

(1) 提出低矮路堤在行车荷载作用下的应力分布特征及其设计方法、施工参数；

(2) 提出极端冻融作用下低矮路堤强度劣化演变机理和规律；

(3) 提出提高低矮路堤稳定性的防治措施。

2. 主要技术经济指标

(1) 开发智慧监测系统，进行季冻区低矮路堤中关于温湿度、应力应变、沉降位移等数据的实时监测，得到实时综合数据，研发判别及预测算法进行灾变数据演化分析；

(2) 研究不同环境因素对冻融损伤条件下低矮路堤各项性能的影响，量化单场及交互场的影响，进行灾变规律总结，为设计施工提供建议。

3. 经济和社会效益

(1) 经济效益分析

① 延长低矮路堤服役寿命，降低养护和抢险成本；

② 降低道路灾害风险，减少交通中断和社会间接损失；

③ 形成可推广技术体系，优化建设投资并带动区域综合收益。

(2) 社会效益分析

① 改善通行条件，支撑区域经济与国家能源战略通道发展；

② 提升道路安全水平与极端气候适应能力；

③ 推动绿色低碳与资源节约型基础设施建设。

4. 成果提供形式

(1) 《冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术》研究报告；

(2) 《冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术指南》；

(3) 智能健康监测平台 1 套（含源代码）；

(4) 申报专利 1 项；

(5) 发表论文 1 篇。

5. 其他考核指标

开展的媒体宣传报道不少于 3 次，技术交流不少于 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）
2026.3-2026.6	检索并收集国内外关于季冻区低矮路堤稳定性及多场耦合方面的最新文献，明确核心创新点；前往榆林地区 G307 改扩建试验路段进行现场踏勘；对接施工节点，准备温湿度计、土压力盒、阵列式位移计等试验所需传感器及采集仪器。
2026.7-2026.9	实地调研试验段的气候特征和水文地质特点，识别诱发低矮路堤劣化的关键环境因子；敲定针对性的传感器分层布设方案；协助施工单位在路堤填筑过程中完成现场传感器的规范化埋设与防雨防破坏保护。
2026.10-2026.12	采集秋季至初冬降雨及降温期间的路基水、热、力场变化数据；同步开展室内填料基本物性测试；利用前期数据，初步搭建反映真实几何边界与交通荷载条件的多场耦合数值仿真基础模型。
2027.1-2027.3	重点跟踪榆林地区冬季冻结发展期的水分迁移、温度梯度演化及冻胀变形数据；将实测稀疏数据导入计算机仿真系统，开展冰水相变等关键模型参数的闭环反演与修正，打破计算黑箱。

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2027.4-2027.6	捕捉春融期低矮路堤承载力衰减与融沉翻浆数据；结合室内外试验及修正后的仿真模型，系统剖析动荷载与冻融、渗流强耦合作用下的微结构损伤与相变放大效应，全面揭示强度劣化机理。
2027.7-2027.9	基于确明的劣化机理与仿真结果，构建涵盖多维参数的低矮路堤稳定性综合评价指标体系；凝练前期研究资料与核心发现，撰写高水平学术论文，针对关键技术申请发明或实用新型专利。
2027.10-2027.12	针对提炼出的机理与薄弱部位，提出靶向调控的结构优化或水热阻隔等强度提升措施；结合 G307 实体工程进度开展产业化应用，并利用监测平台持续跟踪新措施的实际防灾减灾效能。
2028.1-2028.3	全面汇总两年来室内外试验、仿真模型及现场应用的所有数据；对比传统措施，量化评估新技术的经济社会效益；系统编写《研究报告》与《工作报告》，梳理核心创新点，统筹准备验收答辩材料。

四、项目经费

项目总经费：44.973 万元

交通运输厅补助：19.973 万元

配套资金：25 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	42.723	18.973
1. 设备费	0.0	0.0
(1) 购置设备费	0.0	0.0
(2) 试制设备费	0.0	0.0
(3) 设备改造与租赁费	0.0	0.0
2. 业务费	39.423	17.473
(4) 材料支出	0.0	0.0
(5) 测试化验实验加工支出	30.523	13.5
(6) 燃料及动力支出	0	0
(7) 差旅支出	2.25	1.00
(8) 会议支出	1.75	1.25
(9) 国际合作与交流支出	0.0	0.0
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	2.25	1.00
(11) 其他支出	2.65	0.723
3. 劳务费	3.3	1.50
(12) 劳务性支出	2.0	1.0
(13) 咨询专家支出	1.3	0.50
(二) 间接费用	2.25	1.0
4. 管理费	2.25	1.0
5. 绩效支出	0.0	0.0
合 计	44.973	19.973

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

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）	
		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）	
		2. 科研仪器设备利用率（%）	
		3. 孵化科技型企业（个）	
		4. 转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	
		2. 新增销售（万元）	
		3. 新增出口创汇（万美元）	
		4. 新增利润（万元）	
	社会效益	1. 新增税收（万元）	
		2. 新增就业人数	
		3. 就业培训（人次）	
		4. 带动农民增收（万元）	
		5. 培训和指导科技服务（人次）	
		6. 新增产业带动情况	
		7. 技术集成示范（项）	
		8. 建立示范基地（亩数）	
		9. 节约资源能源	
		10. 环保效益	
其他需要说明的情况			

六、承担单位或研究人员分工

本项目构建了“高校+工程单位”协同攻关团队，16名核心成员涵盖正高级、副高级、中级及技术员级职称，专业覆盖道路工程（路面/路基）等领域，分工明确且紧密衔接。邹晓龙作为项目总负责统筹全局，景宏君作为项目总协调及技术指导，牛龙牵头项目总协调及大纲制定；张国平担任技术负责，任斌慧主导项目实施；李志刚负责理论推导，赵启飞开展试验路检测；王海东、薛菲、李骄杨负责资料收集整理，郑彩丽、杨登科、闫湘晨、余铮承担室内外试验，张志鹏负责现场工作，形成全流程技术支撑体系。

各成员依托西安科技大学、榆林市交通运输局 G307 靖边至定边改建工程管理处等单位的技术资源与工程实践基础，通过定期沟通协作实现优势互补。高校成员聚焦理论研究、试验设计与报告撰写，工程单位成员深耕现场实施、检测监测与协调保障，确保室内试验数据、现场监测结果与理论推导无缝对接，高效推进多场耦合机理研究、防治技术研发及工程验证等核心任务。

七、项目参加人员表

项目承担单位：西安科技大学							
参与单位（排序）：榆林市交通运输局 G307 靖边至定边段改建工程管理处							
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	邹晓龙	1988-11	西安科技大学	副高级	道路工程	项目总负责	邹晓龙
主要研究人员							
2	景宏君	1974-06	西安科技大学	正高级	道路工程	项目总协调及技术指导	景宏君
3	牛 龙	1969-12	榆林市交通运输局 G307 靖边至定边段 改建工程管理处	正高级	道路工程	项目总协调 及大纲制定	牛龙
4	张国平	1976.06	榆阳区农村 公路养护中心	中 级	道路工程	项目技术负责	张国平
5	任斌慧	1983-05	榆林市公路局	中 级	道路工程	项目实施	任斌慧
6	李志刚	1988-05	西安科技大学	副高级	道路工程	理论推导	李志刚
7	赵启飞	1982-10	榆林市公路局	副高级	道路工程	试验路检测	赵启飞
8	李克南	1996-09	西安科技大学	中 级	道路工程	理论推导	李克南
9	王海东	1975-07	榆林市公路局	中 级	道路工程	资料收集整理	王海东
10	郑彩丽	1984-10	子洲县农村 公路养护中心	中 级	道路工程	室内外试验	郑彩丽
11	杨登科	1997-10	西安科技大学	技术员级	道路工程	室内外试验	杨登科
12	闫湘晨	1999-12	西安科技大学	技术员级	道路工程	室内外试验	闫湘晨
13	余 铮	1979-12	榆林市公路局	中 级	道路工程	室内外试验	余铮
14	张志鹏	1977-10	榆林市公路局	中 级	道路工程	现场工作	张志鹏
15	薛 菲	2002-12	西安科技大学	技术员级	道路工程	资料收集整理	薛菲
16	李骄杨	2003-10	西安科技大学	技术员级	道路工程	资料收集整理	李骄杨

八、信息表

项目合同编号		25-82K		密级	/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部				
项目名称		冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术研究									
项目实施所在地		陕西省榆林市		起止年限	2026 年 3 月至 2028 年 3 月						
总 经 费（万元）		44.973		厅 拨		19.973					
第一承担单位	单位名称	西安科技大学									
	所在地	陕西省西安市碑林区						代码	610103		
	通讯地址	西安市碑林区雁塔中路 58 号						邮编	710054		
	单位性质	(1) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他						代码	10704		
参与单位	序号	单 位 名 称									
	1	西安科技大学									
	2	榆林市交通运输局 G307 靖边至定边段改建工程管理处									
	3										
项目负责人		姓 名	邹晓龙		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份	1988			
		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	13474032318		电子邮箱		424689213@qq.com				
项目联系人		姓 名	邹晓龙		性别		男				
		联系电话	13474032318		电子邮箱		424689213@qq.com				
项目组人数		16	高级	4	中级	8	初级	0	其他	4	
主要研究内容 (100 字以内)		(1) 冻融环境下低矮路堤试验性能研究 (2) 多场耦合条件下低矮路堤强度劣化机理研究 (3) 季冻区低矮路堤劣化防治技术研究									
成果属性		A	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. 合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位壹份。

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）

2020年3月27日

联系人：（签字）

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）

单位负责人：（签字）

西安科技大学

项目负责人：（签字）

邹晓龙

（公章）

电 话：13689101111

财务负责人：（签字）

账 户 名：西安科技大学

开户银行：中国银行股份有限公司西安大雁塔北广场支行

账 号：102492014123

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：邹晓龙

2026年3月27日

项目编号：25-82K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术

研究

申请单位：西安科技大学（盖章）

联系人：邹晓龙

电话：13474032318



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	3
1. 研究现状	3
2. 项目前期科研及现有工作条件	10
三、实施方案	14
1. 拟解决的关键问题	14
2. 主要研究内容及实施方案	14
3. 技术路线	15
4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接	17
5. 有关技术经济指标	17
四、项目承担单位及参加单位概况	18
1. 单位概况	18
2. 技术力量及人员构成	19
3. 各自承担的主要工作	19
4. 项目主要负责人情况	20
五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	20
1. 依托工程（工作）概况	21
2. 投资来源	21
3. 工程进度与项目科研进度的配合	22
4. 组织管理形式	24

六、项目经费估算及资金筹措情况 25

七、项目绩效指标26

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益 28

 1. 项目预期目标28

 2. 提交的研究成果及其形式 28

 3. 经济、社会、环境效益分析 28

九、其它需要说明的问题 31

十、申请单位意见31

一、项目研究的背景和必要性

榆林市位于陕西省最北部，是 21 世纪中国的能源接续地，是正在建设的国家能源化工基地，是西气东输、西电东送、西煤东运的重要源头之地。近年来随着榆林经济的不断发展，公路运输网络的不断完善、公路运输量也在迅猛增长，作为国家能源化工基地的核心组成部分，其经济区域经济发展对交通基础设施的依赖性极强。G307 国道作为国连接东西部的关键交通干线，在区域经济发展中具有重要地位。然而，在 G307 国道靖边至定边段公路改建工程推进过程中，冬寒地区独特的气候与地质条件给工程建设带来了严峻挑战，尤其是低矮路堤的稳定性问题日益凸显。

受设计标准限制与施工条件制约，低矮路堤的受力特性、变形规律及灾变机理与高路堤存在显著差异，但其在冬寒地区面临的冻融循环、行车荷载及水文地质作用的综合影响更为复杂。目前，学术界与工程界对冬寒地区低矮路堤的专项研究相对匮乏，现有技术成果难以直接适配该类路基的设计、施工与养护需求，亟需开展针对性研究以解决工程实际问题。

G307 靖边至定边段改建工程途经靖边、定边县等冬寒区域，该区域冬季昼夜温差大、冰冻期长，极端降雪、低温天气频发；同时工程穿越耕、苗圃、林地等多种农用地，水文地质条件复杂。其中，桩号 K33+500~K36+800 路段为潮湿水地路段，扣除路面结构层后平均填土高度约 1m，属于典型的低矮路堤。低矮路堤在施工阶段受场地条件限制，大型压实机械作业空间不足，易导致路基压实质量控制难

度大；运营阶段受冬寒地区特殊环境影响，易面临多重挑战。

冻融循环破坏：冬季土体冻结体积膨胀导致路基不均匀抬升，春季融化后土体软化，体积收缩引发不均匀沉降，反复冻融循环会破坏黄土路基的颗粒结构，降低其抗剪强度与承载能力。

水侵蚀作用：低矮路堤因填筑高度受限，受周边农用地等复杂水文环境影响大，普遍存在排水不畅的缺陷。在降雨或春季融雪期，极易造成地表积水滞留，加之地下水的毛细上升与浸泡，导致路基内部含水率持续且快速升高。这一方面激活了黄土的水敏性与湿陷性，造成路基土体大面积软化、承载力骤降；另一方面，在此高含水状态下，翻浆冒泥极易爆发，这是冬寒地区低矮路堤最具破坏性的典型病害之一。

在重载交通动荷载与冻融循环的反复耦合作用下，饱水软化的路基细粒土被不断泵吸、挤压至路表面，导致路基内部骨架彻底失稳、路面出现大面积龟裂与坑槽，对道路的整体结构与服役寿命造成毁灭性打击。

当前，国内外针对高路堤的研究已较为成熟，但低矮路堤因“设计关注度低、病害隐蔽性强、多因素耦合影响显著”等特点，相关研究仍存在短板。尤其是在冬寒地区水-热-应力-应变多场耦合作用下，低矮路堤强度劣化机理尚未明确，缺乏针对性的设计方法与防治技术，亟需通过相关研究，为 G307 国道改建工程及同类地区公路建设提供技术支撑。因此，开展冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术研究，是解决 G307 改建工程实际问题的迫切需求。

二、前期科研及工作基础

1. 研究现状

至今为止，国内外学者针对季冻区低矮路堤在水热力多场耦合作用下的变形与破坏机理，开展了大量的理论分析和室内及现场试验研究，并且根据对主控机理的不同认识形成了多种研究路径与理论框架。目前学者们普遍认同，季冻区低矮路堤的稳定性演化是一个由温度场、含水状态场与应力变形场共同驱动的复杂物理过程，其核心在于冻融循环过程中土体内部温度梯度引起的水分迁移、冰水相变、孔隙水压力重分布以及由此诱发的体积冻胀与融沉等效应。现有研究的主要方向集中在：路堤浅层与路面附近温度场的时空变化规律，液态水、冰和水汽在非饱和多相介质中的迁移特征，冻融过程中孔隙结构与骨架接触关系的演化，以及水热变化所诱导的有效应力重分布和累积变形发展过程等。在理论体系方面，逐步形成了以水-热-力耦合本构理论、临界含水率与冻胀势能理论、冰水相变渗流与渗压演化理论、非饱和多相多场耦合框架以及基于多场耦合的冻胀-沉降协同演化模型等为代表的若干理论流派。国内外众多学者也结合不同气候带与不同路堤形式，对季冻区低矮路堤的水热力多场耦合响应提出了各具侧重的认识与模型假设，为揭示其长期稳定性与变形发展机理提供了重要参考^[1-5]。

（1）国外研究现状

最为经典的多场耦合研究可追溯到 Harlan 于 1973 年提出的部分冻结土中热-流体耦合传输模型，他将未饱和渗流理论引入冻结土问

题,通过统一的控制方程描述温度场与水分场的联合作用,给出了水分在冻结锋附近“向冷迁移”的基本机理^[6]。在此基础上,Taylor 和 Luthin 进一步发展了耦合控制方程及数值格式,提出了土体冻结过程中热量与水分迁移的经典一维数值模型,为后续冻结-融化过程下“水-热耦合”的定量分析奠定了基础^[7]。这类早期模型能够合理刻画季冻区路基内部的温度梯度与水分再分配过程,但普遍忽略了骨架应力与变形响应,对低矮路堤在交通荷载和约束条件作用下的沉降与稳定性难以给出完整解释。

随后,研究重心逐渐从单纯“水-热耦合”拓展到考虑冰晶生成与冻胀应力的“水-热-力”统一理论框架。Konrad 和 Morgenstern 基于分离冰晶理论,将水分迁移、冰透镜生长与有效应力联系起来,提出了以“分离势”为核心的冻胀机理模型,使得季冻区路基冻胀-融沉量可以通过热-水-力综合参数进行预测^[8]。在此基础上,Nishimura 等构建了完全耦合的 THM (Thermo-Hydro-Mechanical) 有限元公式,将能量守恒、质量守恒与平衡方程统一离散,首次在数值层面系统考虑了饱和冻结土的相变潜热、孔隙水压力与骨架应力的协同演化。该工作被普遍视为冻结土多场耦合数值分析的里程碑,为后续季冻区路基与土工结构的多场耦合模拟提供了标准化的理论与算法框架^[9]。

针对工程实际中路堤与边坡的冻胀问题,Ishikawa 等将 THM 耦合分析直接应用于土工结构的冻胀响应,建立了考虑温度梯度、水力边界及结构约束条件的冻胀分析模型,并通过物理模型试验验证了计算结果的合理性^[10]。该类研究表明,在季冻区低矮路堤中,坡面辐射、

降雪/融雪补给以及排水条件的细微变化,均可通过“水-热-力”路径放大为路堤表层隆起、局部拉裂和融沉不均的宏观失稳模式^[9-10]。然而,早期工作多以理想均质土体和规则边界为前提,对实际公路、铁路路堤在复杂气候-荷载条件下的长期演化关注有限。

进入 21 世纪以后,国外学者开始将多场耦合理论与季冻区交通基础设施监测数据深度融合,逐步形成面向路堤-道床体系的 THM 计算-试验一体化研究路线。Zhang 等基于统一土水特征曲线与弹性理论,构建了适用于季冻区高铁路基的水-热-力数学模型,并结合哈大高铁典型断面的实测数据,对晴坡-阴坡作用下路基温度场、含水率场及应力-变形场的季节性演化进行了系统数值模拟,指出季冻区路基内部的水-热再分配是诱发低矮路堤差异冻胀与循环融沉的关键控制因素之一^[11]。Ren 等在此基础上进一步将轨道不平顺引入分析框架,定量揭示了路基 THM 响应与轨道几何形位之间的耦合关系,为从“多场响应-结构性能-运营安全”角度认识季冻区路堤服役行为提供了新视角^[12]。

面向公路季冻区低矮路堤,Deng 等提出了基于热-水-力耦合模型的冻融损伤表征方法,将冻结深度、含冰量时程及应力-应变响应综合为“冻融损伤度”指标,并用于评估典型季冻区公路路基的年循环劣化规律^[13]。近年来,Jia 等构建了考虑温度梯度与渗透系数演化的多年冻土路基水-热耦合模型,将其用于分析不同气候情景下路基温度场和水分迁移的长期变化趋势,为深入理解气候变暖背景下季冻区乃至多年冻土区公路低矮路堤的热稳定性和水文响应提供了新的思

路^[14]。另一方面, Tai 等通过室内试验与数值计算相结合的方式, 系统研究了新型抗冻路基床结构在深季冻区高铁路基中的应用, 结果表明, 优化垫层与保温层组合可以有效削弱水-热-力耦合效应所引起的路堤差异冻胀, 为季冻区低矮路堤结构型式与构造措施的优化设计提供了可借鉴的技术路径^[15]。

总体来看, 国外在季冻区低矮路堤水-热-力多场耦合方面已形成由基础理论-数值模型-工程应用逐级演进的研究体系, 从早期的“热-水耦合”连续介质模型发展到面向交通基础设施的全耦合 THM 有限元分析与长期监测-反演一体化框架。但现有研究多聚焦于高铁路基或多年冻土高路堤, 对典型季冻区低矮路堤在强交通荷载、复杂地表水补给以及局部非均质填料条件下的细观-宏观响应机制仍认识有限, 特别是缺乏针对低矮路堤高度尺度效应与“浅层季冻-深层常温”交界带水-热-力协同作用的系统定量评价, 这也为后续研究提供了重要拓展空间。

(2) 国内研究现状

季冻区低矮路堤在冻融循环过程中, 其温度场、水分场与应力场高度耦合, 水-热-力多场相互作用贯穿于冻胀、融沉及强度劣化的全过程。从微细观层面看, 土体骨架结构在温度梯度驱动下经历未冻水迁移、孔隙冰生成与消融, 孔压与有效应力不断重分配; 从宏观层面看, 则表现为路堤冻胀抬升、融沉不均、侧向变形和承载力降低等工程病害。宋存牛^[16]系统综述了冻融过程中土体水-热-力耦合作用理论与模型, 指出季冻区路基问题的本质在于温度场、水分场与应力场的

共同演化, 并强调在多场耦合框架下研究路基冻胀融沉机理及控制措施的重要性。

在多年冻土及季冻区路基水-热过程基础理论方面, 王铁行、胡长顺^[17]基于能量守恒与质量守恒方程, 建立了多年冻土地地区路基温度场与水分迁移场耦合的控制方程, 并通过数值分析表明, 上覆结构层导热性能与路表热边界条件是控制冻土上限及冻深变化的关键因素。

随后, 王铁行等^[18]将冻土强度与变形特性引入路基分析中, 构建了包含温度场、水分场和应力场的数值计算模型, 为多场耦合条件下路基变形预测提供了理论基础。孙增奎等^[19]结合青藏铁路现场监测资料, 对多年冻土路基温度场进行了长期模拟与预测, 揭示了年际气候波动对活动层厚度和路基热稳定性的影响规律。田亚护等^[20]进一步考虑保温层设置对路基温度场的影响, 通过数值模拟指出合理布置保温结构可显著降低路基内部负温持续时间与冻胀风险。王俊智等^[21]则针对高寒多年冻土区活动层, 开展温度场数值模拟研究, 给出了活动层厚度和温度年循环的典型分布特征, 为季冻区路基水热边界与参数选取提供了重要参考。

在水-热耦合数学模型与数值求解方面, 白青波等^[22]基于非饱和土渗流与热传导理论, 建立了考虑未冻水含量-负温平衡关系的冻土水热耦合控制方程, 并利用 COMSOL Multiphysics 二次开发实现了温度场与水分场的全耦合数值模拟。算例表明, 模型能够较好再现土柱冻结-融化试验中温度与含水率演化过程, 并进一步用于多年冻土地地区公路路基的水热场预测, 获得了聚冰带厚度、冻融界面迁移与路基

冻胀-融沉变形之间的定量关系。在此基础上，黄志军等^[23]将交通动荷载引入冻土路基分析框架，建立了考虑孔隙水压力、温度与应力场共同作用的动力响应方程组，分析结果表明，车辆荷载重复作用下的振动孔压累积与温度相关刚度退化是诱发季冻区路堤翻浆、车辙等病害的重要机制。

针对季节冻土区公路工程中广泛存在的低填、浅埋路堤问题，国内学者逐步将研究重心由多年冻土向季冻区低矮路堤拓展。宋存牛、王选仓^[24]以风积沙土路基为对象，基于 Harlan 模型与 Darcy 定律，建立了完全依赖气象资料和水热参数的季冻区风积沙土路基冻结过程中水热迁移二维数值模型，研究表明温度梯度驱动下水分沿冻结锋由下向上迁移并在亚稳聚冰带富集，是引起季冻区路堤冻胀与开裂的主要原因之一。海东第等^[25]利用非饱和正冻土水热耦合模型，对国道季冻区某段低填路堤在冻结期内部水热场演化进行了数值分析，并据此计算冻胀量，结果表明，低矮路堤中路床顶面与坡脚附近的含水率-温度耦合响应最为敏感，土工格栅与保温层联用可显著削弱冻胀变形，提出了“控水+保温”协同的低填路堤抗冻设计思路。张宏伟等^[26]依托深季冻区高速公路原位监测试验段，获取了多年温度、含水率与水通量实测数据，分析表明亚基层在冻-融交替期的水通量最为活跃，解冻初期出现明显向上迁移峰值，与温度梯度变化高度一致，是诱发路堤内部水-热-力失衡及早期病害的重要阶段。

在更高层次的水-热-力多场完全耦合研究方面，任娟娟等^[27]基于冻土力学与固结理论，建立了考虑热-水-力耦合效应的高速铁路冻土

路基三维 THM 数值模型,重点分析晴坡-阴坡辐射差异引起的温度场非对称对轨道板不均匀冻胀和不平顺演化的影响,指出线路走向与坡向组合是控制季冻区路基变形与轨道不平顺的重要设计参数。熊春宝等^[28]从饱和多孔介质出发,推导了考虑热-水-力耦合效应的地基动力响应控制方程,数值算例表明,温度变化通过影响孔隙水压力与刚度参数,显著改变地基在周期荷载作用下的动态位移与应力分布,为理解季冻区路堤在热-水-力多场扰动下的动力稳定性提供了理论支持。

马崇武等^[29]利用极限分析上限定理,对寒区路堤边坡在复杂荷载作用与非线性强度准则下的稳定性开展研究,提出了兼顾计算简便性与精度要求的寒区路堤边坡稳定性评价方法。近年来,徐建平^[30]在此基础上进一步尝试将温度-水分-应力全耦合模型引入高速公路路基长期数值模拟,结合多年现场监测资料开展 THM 参数反演与敏感性分析,初步构建了“监测-反演-预测”一体化的公路路基多场耦合分析流程,为工程应用层面的寿命期性能评估提供了新思路。

总体来看,国内关于季冻区路基水热力多场耦合的研究已经形成了从基础理论、水-热数学模型到多年冻土与季冻区路基工程应用的较完整技术链条,但现有成果仍存在明显不足:一是多数工作聚焦于多年冻土高路堤或高速铁路大填方路基,对广泛分布于黄土高原及风积沙区的季冻区低矮路堤、低填浅埋结构关注不足;二是现有模型多以水-热两场耦合为主,力学场往往通过线弹性本构或后处理方式间接考虑,尚缺乏面向低矮路堤稳定性与变形控制的系统 THM 判据与灾变判识指标;三是在外荷载与边界条件方面,已有研究多考虑标准

交通荷载及理想化气象边界，对强交通作用、降雨/融雪补给及气候变暖背景下多年冻融-干湿交替共同作用的复杂工况考虑不足，缺乏结合长期监测数据对模型进行系统校核的研究。因此，围绕季冻区低矮路堤开展以多源监测数据为基础的水热力多场耦合机理研究，构建适用于低矮路堤的 THM 多场分析模型与稳定性评价体系，并提出针对性的防治对策，具有重要的工程应用价值和理论意义。

2. 项目前期科研及现有工作条件

（1）项目前期科研

本项目拟定的主要研究人员均为长期从事公路工程研究和工程质量管理等工作的高层次人才，为了本项目的顺利实施，项目组成员于 2024 年 10 月起对国内外有关现状进行调研，这些为项目的开展提供了可靠的理论和经验依据。已查阅了大量国内外有关公路低矮路堤多场耦合冻融病害防治技术研究资料，落实了室内试验和现场试验段测试所需的一系列相关仪器，并拥有依托工程项目所在地的气候、水文和地质条件的第一手资料。

（2）支撑条件

1) 技术支撑条件

①已查阅了大量国内外有关路基灾变的研究资料，落实了进行室内试验和现场试验段测试所需的一系列相关仪器，并拥有依托工程项目所在地的气候、水文和地质条件的第一手资料。

②对课题研究工作进行了协作分工，确定了课题研究人员。

③依托工程项目管理单位拥有经验丰富的高级工程技术人员和

特定监测装置,数据采集、实时反馈和动态调整做了大量的准备工作。

④项目研究单位拥有一系列先进的试验仪器与检测设备,如cpu集群、万能试验机、快速冻融机、场耦合试验仪、动三轴剪力仪、粘韧性试验机,且具备本项目开展基于所需的分析试验设备,如SEM电镜扫描仪、红外光谱分析仪、热分析仪、X射线衍射仪、低场核磁共振仪等,为顺利开展路基水冰相变观测、盐分结晶生成、路基稳定性分析以及算法调试试验提供了良好的试验工作条件。

⑤项目承担单位具有较强的学术影响和科研实力,拥有资深的现场检测、算法与材料等理论和实践的分析人才,并具备有利的室内试验条件,确保现场检测、理论分析和室内分析顺利进行。

2) 项目组织支撑条件

①严格按本项目计划目标组织实施。

②项目由承担单位和第一负责人全面负责管理,联合体各方的具体内容将以分合同形式进一步明确。

③定期召开课题进展工作会议,检查前阶段的工作进度,讨论解决研究过程中各项技术问题,布置后阶段的工作重点和具体要求。

④对本项目的重点阶段性目标和成果进行重点考核和督促,以确保项目总体研究目标的实现。

(3) 技术装备条件

本项目组在前期资料调查已做了大量工作,具备课题分析理论基础和试验设备,完全可满足项目开展过程中的室内试验、分析和现场应用研究工作的需要。

项目承担单位为西安科技大学，在公路维护与运营管理等方面积累了丰富的经验和数据，并且拥有大量工程实体作为项目的支撑。同时，拥有一批在领域内具有较强影响力的教授与专家学者和具有丰富工程实践经验、工作勤恳踏实的工程技术人员。参加本课题研究的人员为以高级工程师为首的学术梯队，研究人员具有很强的科研能力和很高的科研水平。实力雄厚的研究队伍和先进完善的试验设备，为该项目的顺利实施提供了强有力的保障。本项目组在前期资料调查已做了大量工作，具备课题分析理论基础和试验设备，完全可满足项目开展过程中的室内试验、分析和现场应用研究工作的需要。

（4）研究人员情况及协作条件

项目成员包括正高级、副高级、中级以及外聘教授等研究人员组成。

项目组学术氛围浓厚，工作扎实，人员搭配结构合理，团结协作精神强。项目负责人长期从事公路养护及安全运营的相关工作积累了丰富的经验。项目组主要成员有多年从事冻土检测、道路材料试验研究和工程质量管理等工作经验，具有坚实的理论基础、丰富的工程实践经验和充足的科研时间。研究人员均主持或参与近年的多项省部级科研项目，具有扎实的理论分析研究能力和丰富的工程实践经验。

因此，理论基础、技术路线、研究方案、试验设备及技术力量的配备均表明申请人和申请单位具备完成此项目的各种条件，可如期完成预定的研究内容，并取得预期的研究效果。

3.参考文献

- [1] Hansson K, Šimůnek J, Mizoguchi M, et al. Water flow and heat transport in frozen soil: Numerical solution and freeze–thaw applications[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(2): 693–704.
- [2] Saito H, Šimůnek J, Mohanty B P. Numerical analysis of coupled water, vapor, and heat transport in the vadose zone[J]. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5(2): 784–800.
- [3] Lai Y, Pei W, Zhang M, et al. Study on theory model of hydro-thermal–mechanical interaction process in saturated freezing silty soil[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 78: 805–819.
- [4] 路建国, 张明义, 张熙胤, 等. 冻土水热力耦合研究现状及进展[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(1): 102–111.
- [5] Wang C, Ma Z. Mathematical model and numerical simulation of hydrothermal coupling for unsaturated soil subgrade in the seasonal frozen zone[C]//*IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 719: 032042.
- [6] Harlan R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. *Water Resources Research*, 1973, 9(5): 1314–1323.
- [7] Taylor G S, Luthin J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 15(4): 548–555.
- [8] Konrad J M, Morgenstern N R. A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1980, 17(4): 473–486; and related works on segregation potential.
- [9] Nishimura S, Gens A, Olivella S, et al. THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application[J]. *Géotechnique*, 2009, 59(3): 159–171.
- [10] Ishikawa T, Kijiya I, Tokoro T, et al. Application of coupled thermo-hydro-mechanical analysis to frost-heave behavior of earth structures[C]//*Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2016, 2(13): 531–536.
- [11] Zhang Y Z, Bei J H, Li P, et al. Numerical simulation of the thermal-hydro-mechanical characteristics of high-speed railway roadbeds in seasonally frozen regions[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 8849754.
- [12] Ren J J, Zhang K Y, Zheng J L, et al. Railway subgrade thermal-hydro-mechanical behavior and track irregularity under the sunny-shady slopes effect in seasonal frozen regions[J]. *Journal of Central South University*, 2022, 29(11): 3793–3810.
- [13] Deng Q, Liu X, Zeng C, et al. A freezing-thawing damage characterization method for highway subgrade in seasonally frozen regions based on thermal-hydraulic-mechanical coupling model[J]. *Sensors*, 2021, 21(18): 6251.
- [14] Jia J, He Z, Tenorio V O. A hydrothermal coupling model for permafrost subgrade considering temperature gradient and its application[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 1816.
- [15] Tai B W, Yue Z R, Sun T C, et al. Novel anti-frost subgrade bed structures a high speed railways in deep seasonally frozen ground regions: Experimental and numerical studies[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121266.

- [16] 宋存牛. 冻融过程中土体水热力耦合作用理论和模型研究进展[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 982–988.
- [17] 王铁行, 胡长顺. 多年冻土地地区路基温度场和水分迁移场耦合问题研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(12): 93–97.
- [18] 王铁行, 胡长顺, 李宁. 冻土路基应力变形数值模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 193–197.
- [19] 孙增奎, 王连军, 魏庆朝, 等. 青藏铁路多年冻土路基温度场模拟与预测[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(1): 55–59.
- [20] 田亚护, 张远燕, 欧阳立娟, 等. 具有保温结构的多年冻土地地区路基温度场数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2002, 23(2): 46–54.
- [21] 王俊智, 梁思海, 万里, 等. 高寒多年冻土活动层温度场数值模拟[J]. 黄河, 2013, 35(3): 20–23.
- [22] 白青波, 李旭, 田亚护, 房建宏. 冻土水热耦合方程及数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S2): 131–137.
- [23] 黄志军, 赖远明, 牛富俊, 张学富. 交通荷载作用下冻土路基动力响应分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 418–426.
- [24] 宋存牛, 王选仓. 季节冻土区风积沙土路基冻结过程中水热迁移数值分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 997–1003.
- [25] 海东第, 许发荣, 吴谦, 黄万俊. 季冻区低填路基的水——热耦合分析[J]. 工程技术研究, 2020, 2(10): 17–21.
- [26] Zhang H W, Wang X Y, Xin Z, et al. In-situ experiment investigations of hydrothermal process of highway in deep seasonal frozen soil region[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(9): 2687–2699.
- [27] Ren J J, Xu X W, Xiao J X, et al. Railway subgrade thermal–hydro–mechanical behavior and track irregularity under the sunny–shady slopes effect[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(1): 272–288.
- [28] 熊春宝, 陈国华, 黄云, 等. 考虑热–水–力耦合效应的饱和多孔地基动力响应分析[J]. 应用数学和力学, 2018, 39(8): 913–924.
- [29] 马崇武, 慕青松, 刘忠玉, 苗天德. 寒区路堤边坡稳定性的力学分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(6): 1045–1051.
- [30] 徐建平. 高速公路路基长期 THM 耦合模拟性能研究[J]. 土木工程与力学, 2024, 13(2): 123–133.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题

(1) 研发一种用于实时监测路基健康状态的智慧监测系统;

(2) 结合监测数据, 使用计算机进行仿真模拟, 根据结果提出
冬寒地区低矮路堤稳定性的劣化机理;

(3) 总结各类环境因素影响低矮路堤稳定性的方式和特点, 提

出冬寒地区低矮路堤的设计思路和养护措施。

2. 主要研究内容及实施方案

课题以 G307 国道改扩建工程中低矮路堤为研究对象，通过改良路基设计、计算机模拟仿真、埋设传感器检测等手段，研究冬寒地区低矮路堤的灾变机理与防治技术。

(1) 冻融循环作用下低矮路堤力学响应研究

聚焦季冻气候下低矮路堤浅埋强耦合特有服役环境，开展冻融循环下的路基力学响应研究。依托现场试验与室内模型箱，量化分析黄土在冬胀、春融、夏固结交替中的变形规律与强度衰减特征。重点提取黏聚力折减、动模量下降及残余塑性应变等核心指标，揭示路床浅层受温度梯度与相变扰动导致的刚度退化轨迹，为多场耦合灾变模型提供本构参数与物理边界约束。

(2) 行车荷载作用下低矮路堤工作区应力分布规律研究

针对低矮路堤病害的突发性，深入剖析水分迁移、相变、动载正反馈恶化闭环机理。突破单一物理场叠加假定，引入微结构损伤与相变放大机制，探明重载车辆瞬态超孔压泵吸效应对黄土骨架的疲劳扩容作用。结合 PINN-COMSOL 架构，推导动态渗透张量与有效导热系数，实现宏微观的定量映射，精准锁定春融期承载力丧失的核心致灾因子，为建立评价体系夯实基础。

(3) 水-热-应力-应变多因素耦合作用下低矮路堤稳定性劣化机理研究

开发适合本工况的智慧监测平台系统，进行季冻区低矮路堤中关

于温湿度、应力应变、沉降位移等数据的实时监测，实现路堤服役状态的实时采集与可视化融合。平台内嵌基于多源异构算法的多场耦合稳定性总指标（STHM）评估模型，通过精准设定环境波动与结构响应阈值，实现对路基灾变的自动靶向预警，为公路运维管理提供智能化数字闭环支撑。

（4）冬寒地区公路低矮路堤强度提高措施研究

基于前期多场劣化机理与预警体系，提出兼顾工程可行性与经济性的靶向强度提升综合对策。摒弃传统大深度换填的盲目性，确立设计原则。针对核心软弱层位，制定黄土改良、保温阻水层与柔性加筋相协同的结构优化方案。结合交通错峰管控与基于 STHM 指标的预防性养护策略，从根源切断病害诱发路径，有效控制长期刚度退化，实现降本增效。

3. 技术路线

本项目以“多场致灾机理探究-虚实迭代反演仿真-防灾技术工程应用”为主线。首先，基于水-热-力多场耦合理论，同步开展室内模型试验与现场监测，构建多源实测数据集；其次，将实测数据与 Comsol 仿真深度融合，引入 PINN 算法驱动边界参数迭代反演以修正模型，打通“理论机理-物理实测-数字孪生”技术闭环；再次，依托高精度模型开展多场景数值推演，编制低矮路堤灾害分级及处治措施库；最后，将研究成果转化为工程防治技术指南，并形成论文、专利等体系化成果。本项目技术工作流程如图 1 所示。

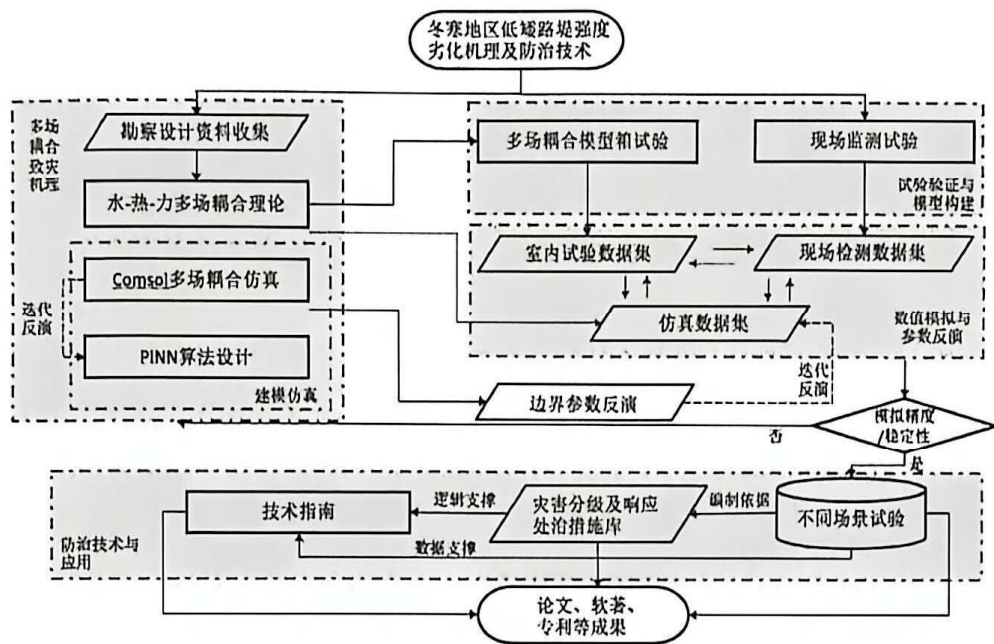


图1 技术路线

4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目针对季冻区路基的稳定性问题，进行了水-热-力场耦合下的灾变机理研究，更进一步的梳理了低矮路堤的灾变演化过程，从灾变演化机制方面透视了低矮路堤的灾变过程。接下来，将考虑氯盐渍土对于季冻区土体水冰相变及渗流路径的影响，以及动荷载作用下低矮路堤的力学响应特征，为设计施工养护等工程提供了参数化的建议。在此基础上，梳理已有成果形成成套技术方案，在同类低矮路堤病害集中路段复制推广，维护低矮路堤工作性能，延长服役年限，为陕西省交通运输养护形成安全便捷、畅通高效、绿色智能的现代综合交通运输体系提供强有力的支撑。

5. 有关技术经济指标

(1) 开发智慧监测系统，进行季冻区低矮路堤中关于温湿度、应力应变、沉降位移等数据的实时监测，得到实时综合数据，研发判

别及预测算法进行灾变数据演化分析；

(2) 研究不同环境因素对冻融损伤条件下低矮路堤各项性能的影响，量化单场及交互场的影响，进行灾变规律总结，为设计施工提供建议。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

(1) 西安科技大学

西安科技大学为应急管理部与陕西省人民政府共建高校，其土木工程、矿业工程、安全工程专业为国家级特色专业建设点，具有土木工程专业一级学科博士学位和硕士学位授予权，岩土工程学科为陕西省重点学科，设有土木工程博士后科研流动站；科研基地涵盖陕西省高速公路建设集团公司、陕西建工集团、西安地铁建设公司等 11 家单位。道路工程研究中心具备试验测试能力与设备研发基础，并具有很强的设备开发能力；混凝土材料微细观分析及力学性能试验系统，其中 SEM 电镜扫描仪、差热分析仪、热重分析仪、X-衍射仪、红外光谱分析仪、电子探针、扫描电镜等设备在国内相同学科处于先进水平。近五年来共承担科研项目 120 项，累计到款 8000 余万，其中承担国家攻关项目 2 项，部委联合攻关项目 14 项，陕西科技项目 12 项，交通厅项目 12 项。获得国家科技进步二等奖 1 项，部级二等奖 16 项，三等奖 12 项，获陕西省科技进步一等奖 2 项，二等奖 5 项。技术力量雄厚，能满足本研究需要。

(2) G307 靖边至定边改建工程管理处

作为榆林市国省干线公路建设与管理的核心单位，拥有经验丰富的高级工程技术人员与道路检测设备，熟悉 G307 改建工程的地质条件、施工难点与运营需求，可提供试验路段的现场条件与施工协调支持；负责项目整体组织实施，包括研究大纲制定、现场调研、成果转化与工程验证，确保研究与实际工程需求紧密衔接。

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
邹晓龙	西安科技大学	男	1988-11	中级	道路工程（路面）	项目总协调及技术指导
景宏君	西安科技大学	男	1974-05	正高级	道路工程（路面）	项目总协调及技术指导
牛龙	榆林市交通运输局 G307 靖边至定边段 改建工程管理处	男	1969-12	正高级	道路工程（路面）	项目总协调及大纲制定
张国平	榆阳区农村公路养护中心	男	1976.06	中级	其他	项目技术负责
任斌慧	榆林市公路局	男	1983-05	中级	其他	项目实施
李志刚	西安科技大学	男	1988-05	副高级	道路工程（路面）	理论推导
赵启飞	榆林市公路局	男	1982-10	副高级	其他	试验路检测
王海东	榆林市公路局	男	1975-07	中级	其他	资料收集整理
郑彩丽	子洲县农村公路养护中心	女	1985-02	中级	其他	室内外试验
杨登科	西安科技大学	男	1997-10	技术员级	道路工程（路基）	室内外试验
闫湘晨	西安科技大学	男	1999-12	技术员级	道路工程（路基）	室内外试验
余铮	榆林市公路局	男	1979-12	中级	其他	室内外试验
张志鹏	榆林市公路局	男	1977-10	中级	其他	现场工作
薛菲	西安科技大学	女	2002-12	技术员级	道路工程（路基）	资料收集整理
李骄杨	西安科技大学	女	2003-10	技术员级	道路工程（路基）	资料收集整理

3. 各自承担的主要工作

(1) 西安科技大学:

- ①负责制定室内试验研究大纲和具体实施方案;
- ②负责室内外试验方案的制定与实施;
- ③参与试验路的铺筑;
- ④负责项目研究报告的撰写;
- ⑤负责项目的验收。

(2) 榆林市交通运输局 G307 靖边至定边改建工程管理处:

- ①负责制定项目总体研究大纲和总体方案;
- ②负责试验段的落实及铺筑;
- ③参与项目的验收。

4. 项目主要负责人情况

邹晓龙, 副教授, 硕士生导师, 长安大学与美国德克萨斯大学奥斯汀分校联合培养博士, 现为西安科技大学建筑与土木工程学院专任教师。近年先后发表国家级核心期刊论文、专利数十篇, 获陕西省科技进步一等奖 1 项, 主持省级课题 2 项, 教育厅课题 2 项及数项横向科研项目。

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



图 2 项目地理位置示意图

根据设计总说明，本标段在既有公路基础上实施升等改建，技术标准采用国家现行《公路工程技术标准》（JTGB01-2014）中一级公路相关指标，线路平纵组合以安全、舒适与经济合理为原则，在满足最小曲线半径、最大纵坡、视距等控制指标的前提下，尽量顺应原有地形，减少大规模土石方开挖和高填方路段，兼顾沿线生态保护和用地控制。

在交通功能定位上，改建后路线承担区域能源运输、地方交通集散和沿线乡镇通勤等多重任务，对提升靖边-定边通道等级、提高抗灾能力和服务水平具有关键作用。因此，在本标段内布设现场试验路段和低矮路堤长期监测区，既具代表性，又便于结合建设期与运营期数据开展系统研究。

2. 投资来源

经详细调研预算，本着成本节约、经济适用的原则，本课题研发

总投入 44.973 万元，经费来源为配套资金及交通厅资助，确保本项目各项工作的顺利开展。

3. 工程进度与项目科研进度的配合

项目负责人及团队围绕冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理已开展系统的前期研究，对低矮路堤在冻融、渗流与交通荷载耦合作用下的响应特性形成了初步认识。目前，已在室内构建水-热-力多场耦合模型箱试验系统，并依托 G307 靖边至定边段典型低矮路堤开展了现场监测体系布设，实现了室内外试验的同步推进与数据互验。

项目组核心成员来自西安科技大学与榆林市交通运输局等单位，形成了“高校-工程单位”协同攻关团队。团队成员长期从事寒区路基工程、岩土力学、智慧监测等领域研究，主持或参与过多项相关科研与工程项目，具有扎实的理论基础、丰富的工程实践经验与充足的科研时间保障，为项目创新性研究与技术落地提供了有力支撑。

项目所需试验条件完备，室内试验依托西安科技大学道路工程研究中心，拥有多场耦合模型箱、温控系统、传感器标定设备及数据采集分析平台；现场试验段位于 G307 靖边至定边段 K33+930、K34+030 等典型断面，监测设备（温度、含水率、应力、位移传感器）已布设并正常运行。既有研究资料、人员配备、实验条件与现场试验段的有机结合，有效保障了本项目科研进度与工程实施的协同推进，为项目顺利完成并取得预期成果奠定了坚实基础。

本项目研究周期为 2026 年 3 月-2028 年 3 月，分四个阶段推进整体进展如下：

(1) 2026 年 3 月至 2026 年 6 月

检索并收集国内外关于季冻区低矮路堤稳定性及多场耦合方面的最新文献，明确核心创新点；前往榆林地区 G307 改扩建试验路段进行现场踏勘；对接施工节点，准备温湿度计、土压力盒、阵列式位移计等试验所需传感器及采集仪器。

(2) 2026 年 7 月至 2026 年 9 月

实地调研试验段的气候特征和水文地质特点，识别诱发低矮路堤劣化的关键环境因子；敲定针对性的传感器分层布设方案；协助施工单位在路堤填筑过程中完成现场传感器的规范化埋设与防雨防破坏保护。

(3) 2026 年 10 月至 2026 年 12 月

采集秋季至初冬降雨及降温期间的路基水、热、力场变化数据；同步开展室内填料基本物性测试；利用前期数据，初步搭建反映真实几何边界与交通荷载条件的多场耦合（THM）数值仿真基础模型。

(4) 2027 年 1 月至 2027 年 3 月

重点跟踪榆林地区冬季冻结发展期的水分迁移、温度梯度演化及冻胀变形数据；将实测稀疏数据导入计算机仿真系统，开展冰水相变等关键模型参数的闭环反演与修正，打破计算黑箱。

(5) 2027 年 4 月至 2027 年 6 月

捕捉春融期低矮路堤承载力衰减与融沉翻浆数据；结合室内外试验及修正后的仿真模型，系统剖析动荷载与冻融、渗流强耦合作用下的微结构损伤与相变放大效应，全面揭示强度劣化机理。

(6) 2027 年 7 月至 2027 年 9 月

基于确明的劣化机理与仿真结果，构建涵盖多维参数的低矮路堤稳定性综合评价指标体系；凝练前期研究资料与核心发现，撰写高水平学术论文，针对关键技术申请发明或实用新型专利。

(7) 2027 年 10 月至 2027 年 12 月

针对提炼出的机理与薄弱部位，提出靶向调控的结构优化或水热阻隔等强度提升措施；结合 G307 实体工程进度开展产业化应用，并利用监测平台持续跟踪新措施的实际防灾减灾效能。

(8) 2028 年 1 月至 2028 年 3 月

全面汇总两年来室内外试验、仿真模型及现场应用的所有数据；对比传统措施，量化评估新技术的经济社会效益；系统编写《研究报告》与《工作报告》，梳理核心创新点，统筹准备验收答辩材料。

4. 组织管理形式

(1) 本项目各项研究内容和计划严格按本项目计划目标组织实施。

(2) 项目由负责单位和第一负责人全面负责管理，明确分工协作、经费拨付、考核目标和责任要求等具体内容。

(3) 每 3 个月定期召开项目工作会议，检查前阶段的具体工作研究进展和实施深度，讨论解决研究过程中的各项技术问题和其他事宜，布置后阶段的工作重点和具体要求。对不能按时、保质完成研究任务的人员及时予以更换。

(4) 对本项目的重点阶段性目标和成果进行重点考核和督促，以确保项目总体研究目标的实现。

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
省交通运输厅补助	19.973	合 计	44.973	19.973
工程配套研究经费	25.0	1.设备费	0	0
单位自筹		（1）购置设备费	0	0
其他经费		（2）设备改造与租赁费	0	0
		2.业务费	39.423	17.473
		（1）材料费	0	0
		（2）测试化验实验加工费	30.523	13.5
		（3）燃料动力费	0	0.00
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	4.0	2.25
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权费	2.25	1.00
		（6）其他费用	2.65	0.723
		3.劳务费	3.3	1.50
		（1）专家咨询费	2.0	1.0
		（2）聘用人员劳务费	1.3	0.50
		（3）其他劳务费	0	0
		（二）间接费用	2.25	1.0
		4.管理费	2.25	1.0
		5.绩效支出	0	0

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。项目验收将组织财务专项验收或审计。

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

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）	
		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）	
		2、科研仪器设备利用率（%）	
		3、孵化科技型企业（个）	
		4、转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1、新增产值（万元）	
		2、新增销售（万元）	
		3、新增出口创汇（万美元）	
		4、新增利润（万元）	
	社会效益	1、新增税收（万元）	
		2、新增就业人数	
		3、就业培训（人次）	
		4、带动农民增收（万元）	
		5、培训和指导科技服务（人次）	
		6、新增产业带动情况	
		7、技术集成示范（项）	
		8、建立示范基地（亩数）	
		9、节约资源能源	
		10、环保效益	
其他需要说明的情况			

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

(1) 提出低矮路堤在行车荷载作用下的应力分布特征及其设计方法、施工参数；

(2) 提出极端冻融作用下低矮路堤的强度劣化演变机理和规律；

(3) 提出提高低矮路堤稳定性的防治措施。

2. 提交的研究成果及其形式

(1) 《冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术》研究报告；

(2) 《冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术指南》；

(3) 智能健康监测平台一套（含源代码）；

(4) 申报专利 1 项；

(5) 发表论文 1 篇。

3. 经济、社会、环境效益分析

经济效益分析：

(1) 延长低矮路堤服役寿命，降低养护和抢险成本

本项目通过优化冬寒地区低矮路堤的排水、保温、加固等结构设计，提出针对冻融循环、水毁和重载交通作用的成套防治技术，可显著减缓黄土及煤矸石填料的强度劣化和变形累积。依托现场监测与多场耦合分析形成的参数化设计方法，有望减少因冻胀开裂、翻浆冒泥、边坡浅层失稳引起的中大修频次，延长路基和路面的整体服役年限。与传统被动抢修+经验加固模式相比，按照全寿命周期成本测算，预

计可以节约 20%~30%的路基病害处治和年度养护支出，明显降低养护单位的资金压力。

（2）降低道路灾害风险，减少交通中断和社会间接损失

冬寒地区路基一旦发生滑塌、沉陷或路面结构破坏，往往需要长时间交通管制甚至封闭绕行，对能源运输通道和区域经济运行影响巨大。本项目建设的多参数监测系统与稳定性评价模型，可实现对典型低矮路堤危险工况的提前识别和分级预警，指导养护部门实施有针对性的预加固和局部处治，减少突发性险情和二次灾害发生概率。通过降低交通事故率、缩短管制时长、减少车辆绕行燃料消耗和货运延误，能够有效降低社会运营成本和时间成本，对保障能源运输通道安全畅通具有显著的间接经济效益。

（3）形成可推广技术体系，优化建设投资并带动区域综合收益

本项目在典型试验路段上验证的设计参数、构造措施和监测预警方法，可归纳形成适用于榆林及类似冬寒地区的低矮路堤改建技术指南，为后续公路改扩建工程提供可直接引用的成套方案。通过基于机理的优化设计，预计可节约 5%~10%的初始建设投资。同时，项目形成的经验模式可在区域路网内复制推广，带动本地材料、检测监测设备、信息化平台等相关产业发展，形成“工程建设效益+产业链带动效益”的叠加效应，整体提升冬寒地区公路基础设施的投资回报水平。

社会、环境效益分析：

①改善通行条件，支撑区域经济与国家能源战略通道发展

本项目面向榆林季冻区 G307 靖边-定边段等典型路段，通过系统提升低矮路堤的稳定性和耐久性，可有效缓解因冻融、翻浆、水毁等引起的车辙、坑槽和不均匀沉降问题，显著改善道路平整度和通行舒适性。道路通行条件的持续改善，将缩短车辆运行时间、提高运输时效和可靠性，为区域煤炭、天然气等大宗能源外运提供更加稳固的交通保障，对支撑“西煤东运、能源北上”通道安全畅通和带动沿线县域产业集聚发展具有重要意义。

②提升道路安全水平与极端气候适应能力

冬寒地区路基一旦发生边坡滑塌、路面断裂或沉陷，不仅直接威胁行车安全，还可能导致大范围交通中断和次生灾害。本项目通过构建水-热-荷多场耦合的稳定性评价体系，结合在线监测与预警技术，能够实现对路堤潜在失稳风险的提前识别和分级处置，减少突发性道路灾害的发生频率与影响范围。路基防冻、防水、防滑等综合性能的提升，将明显降低恶劣天气条件下的交通事故风险，增强道路基础设施对极端低温、强降雪、强降雨等气候事件的适应能力，为公众安全出行提供更加可靠的保障。

③推动绿色低碳与资源节约型基础设施建设

通过多场耦合机理研究指导精细化设计，本项目可在满足安全与稳定性要求的前提下实现“适度设计、精准加固”，有利于减少土石方开挖和建材消耗，从源头降低建设过程中能耗与碳排放。依托长期监测与寿命评估开展的预防性养护，可减少大修频次和大面积病害处治，降低施工对沿线生态环境和居民生产生活的扰动。配套的数字化

监测平台和智能分析手段，将逐步替代高强度的人工巡查，实现“少扰动、高效率”的运维方式，契合国家绿色低碳交通发展方向，具有良好的环境效益和社会示范效应。

九、其它需要说明的问题

无。

十、申请单位意见

同意申报，依托工程和配套经费已落实。

(公章)



单位负责人：(签字)

2026年3月27日



冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术研究 大纲评审意见

2026年3月24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“冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术研究”（项目编号：25-82K）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：进一步聚焦研究内容，优化研究目标，突出研究重点及处治措施。

主任委员： 

2026年3月24日

专家审查意见表

项目名称	冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及其在干线公路的应用研究				
专家姓名	梁武星	职务/职称	正高	专业	公路工程
专家单位	西安公路研究院			联系电话	13609110361

评审意见

建议:

1. 进一步明确成果应用场景。

2. 补充配套费用。

因课题研究为进阶三个阶段测试，建议为增加试验。

3. 聚焦研究内容，明确处治措施。

评审专家（签字）：

梁武星

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	冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术研究				
专家姓名	路鑫	职务/职称	正高级工程师	专 业	公路工程
专家单位	陕西高速公路工程试验检测有限公司			联系电话	15091850063
评 审 意 见 项目聚焦低矮路堤冻融劣化、水毁、重载耦合病害难题，开展防治技术研究，具有一定的应用价值。 项目依托工程落实，同意立项。 建议如下： （1）研究内容过于简单，进一步细化研究内容和实施方案，详细描述实验方案，监测方案以及与防治技术的关联性； （2）重新梳理技术路线，明确研究内容之间的逻辑关系。 评审专家（签字）： 2026年3月24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	冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及其在干线公路的应用研究				
专家姓名	赵亚东	职务/职称	正高工	专 业	公路工程
专家单位	铜川市交通运输局			联系电话	13909190090

评 审 意 见

项目研究内容合理，技术路线基本可行，研究团队结构合理，依托工程落实，具备开展研究工作的条件。建议：

1. 针对不同土质、地下水位及冻害条件下的差异性，建议增加试验桩范围，采用各种不同代表性场景进行现场试验。
2. 建议建立矮路堤冻害风险等级划分标准及对应处治措施库，便于推广应用。
3. 经费估算缺少配套研究经费。

评审专家（签字）：

赵亚东

2026 年 3 月 24 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	冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术研究				
专家姓名	罗 强	职务/职称	教授	专 业	道路与铁道工程
专家单位	西南交通大学			联系电话	1390823860

评 审 意 见

受设计标准限制与施工条件制约，低矮路堤的工程特性、环境效应及病害特征与一般路基存在显著差异，尤其在冬寒矿区面临的冻融循环、重载作用及低湿环境的综合影响更为复杂。开展冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术研究，符合公路工程高品质发展要求，具有良好技术价值。

季冻区低矮路堤的病变劣化是一个由温度场、含水状态场与应力变形场共同驱动的复杂物理过程，其核心在于冻融循环过程中土体内部温度梯度引起的水分迁移、冰水相变、孔隙水压力重分布以及由此诱发的体积冻胀与融沉等效应。尤其是在冬寒地区水-热-应力-应变多场耦合作用下，低矮路堤强度劣化机理尚未明确，缺乏针对性的设计方法与防治技术，亟需通过相关研究，为此，课题的主要研究内容包括：1) 冻融环境下低矮路堤试验性能研究；2) 多场耦合条件下低矮路堤强度劣化机理研究；3) 季冻区低矮路堤劣化防治技术研究。其中，季冻区低矮路堤强度劣化机理，多场耦合仿真及算法迭代优化策略，冬寒地区低矮路堤劣化防治技术养护措施等是拟解决的关键技术问题。

项目研究内容完整，目标明确，技术路线可行；课题组具备良好研究基础和实验条件，承担单位有较强技术研发能力，人员组成合理，依托工程落实；预期研究成果覆盖意见目标，与研究内容的逻辑框架契合，拟提出的研究成果形式有技术报告、专利论文、技术指南、监测平台和传感器及配套电源等，同意研究大纲通过评审。

建议：加强研究区路基病害调查及分类，针对性开展旧路病害整治技术措施适应性的研究。

评审专家（签字）：

2026 年 03 月 24 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

研究

项目名称	冬奥地区公路救援救援是应急救援和与防防			
专家姓名	1 申子书	职务/职称	正高	专业
专家单位	山西交通科研集团			公路工程
				联系电话
				13803469957

评审意见

项目研究内容重要，技术路线基本可行。
研究内容和基础扎实，同意大纲通过
评审。

建议：

1. 继续研究内容，重点开展救援救援是应急救援和与防防和应急救援措施研究
2. 若标准标准取消智慧道路系统内容。

评审专家（签字）：

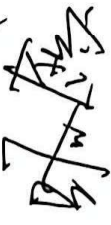
1 申子书

2026 年 3 月 2 日

（本意见入档，填写工整，纸面不敷，可另加纸）

冬寒地区低矮路堤强度劣化机理及防治技术研究（项目编号：25-82K）

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	梁武星	西安公路研究院	公路工程	公路工程	正高工	
2	委员	路鑫	陕西高速公路工程试验检测有限公司	公路工程	公路工程	正高工	
3	委员	赵卫东	铜川市交通运输局	公路工程	公路工程	正高工	
4	委员	罗强	西南交通大学	道路与铁道工程	路基工程	教授	网上评审
5	委员	申俊敏	山西交通科学研究院集团	公路工程	公路工程	正高工	网上评审

专家意见处理表

项目名称：冬寒地区公路低矮路堤强度劣化机理及防治技术研究（项目编号： 25-82K ）

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	梁武星	1.进一步明确成果应用场景； 2.补充配套研究经费。	1.已在研究大纲第 18 页明确应用场景； 2.已在研究大纲第 29 页经费估算及资金筹措情况表中增加了配套研究经费。
2	路鑫	1.研究内容过于简单，进一步细化研究内容和实施方案，详细描述试验方案，监测方案以及与防治技术的关联性； 2.重新梳理技术路线，明确研究内容之间的逻辑关系。	1.已在研究大纲第 18~20 页进行了研究内容的细化和试验方案的扩充，并在后续技术路线等对应体现关联性； 2.已修正研究大纲第 21 页技术路线图。
3.	赵卫东	1.针对不同土质、地下水位计冻深条件下的差异性，增加试验段范围，采用条件不同代表性场景进行现场试验； 2.建议建立低矮路堤冻深风险等级划分标准及对应处治措施率，便于推广应用； 3.经费估算缺少配套研究经费。	1.已在研究大纲第 18~20 页进行了内容的补充； 2.已在研究大纲第 30 页下面预期目标中完善风险等级划分处治措施等内容； 3.已在研究大纲第 29 页经费估算及资金筹措情况表中增加了配套研究经费。
4.	罗强	1.强调环境积水导致的病害，尤其是翻浆等； 2.强调换填等内容，例如换填材料和换填深度，同时加入经济性的考虑。	1.已在研究大纲第 2 页详细论述了水侵蚀的病害； 2.已在研究大纲第 32 页预期目标部分增加了换填材料、深度及经济性等考虑。

