

项目合同编号: 25-21K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称: 公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究

承担单位: 西安公路研究院有限公司、陕西省公路局、长安大学

项目负责人: 许冰

通讯邮编、地址: 710061、陕西省西安市高新区高新六路 60 号

传真、电话: 029-87827248

起止年限: 2026 年 3 月 至 2029 年 3 月

陕西省交通运输厅制



项目合同编号: 25-21K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称: 公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究

承担单位: 西安公路研究院有限公司、陕西省公路局、长安大学

项目负责人: 许冰

通讯邮编、地址: 710061、陕西省西安市高新区高新六路 60 号

传真、电话: 029-87827248

起止年限: 2026 年 3 月 至 2029 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

- (1) 公路隧道排水系统失效影响因素及致灾机制研究;
- (2) 基于排水系统失效的隧道检测项目及检测方法研究;
- (3) 公路隧道排水系统防治方法及关键材料研究;
- (4) 公路隧道排水系统防治设计标准化研究。

2. 技术关键

- (1) 解决“公路隧道排水系统失效致灾机制”关键科学问题;
- (2) 解决“隧道排水系统失效检测技术问题;
- (3) 攻克排水系统失效防治技术的技术难题。

3. 依托工程（依托工作）

项目一：温家山隧道为国道 342 线眉县公路管理段管辖的双向两车道中隧道，隧道中心桩号为 K1566+590，长度为 500m，隧道限界净宽 8.5m，净高为 5m，隧道内路面为水泥混凝土路面，进、出口洞门形式均为端墙式，于 2005 年建成通车。该隧道中部段喷射混凝土套拱处渗水严重，呈流水状，造成检修道与路面积水，影响行车、行人安全。

项目二：宽坪梁隧道为国道 345 线商洛市镇安公路管理段管辖的双向两车道长隧道，隧道中心桩号为 K1782+666，长度 1582m，隧道限界净宽 10m，净高为 5m。进、出口洞门形式均为端墙式，隧道内路面为水泥混凝土路面，于 2020 年建成通车。该隧道洞壁返潮，衬砌开裂处渗水（白色结晶、返碱）比较严重，局部积水影响行车

安全。

项目三：小岭梁隧道为省道 313 线商洛市柞水公路管理段管辖的双向两车道长隧道，隧道中心桩号为 K188+434，长度 2119m，隧道限界净宽 10m，净高为 6.93m，进、出口洞门形式均为端墙式，洞内路面为水泥混凝土路面，于 2017 年建成通车。该隧道中间段衬砌渗水较严重，造成检修道与路面积水，影响行车、行人安全。

二、考核指标

1. 预期目标

(1) 揭示晶体成核发生条件及“成核-生长-沉积”规律，提出晶体成长速率计算方法，构建多因素耦合的排水系统堵塞模型。

(2) 探明排水系统失效与降雨耦合作用下衬砌水压分布的时空演变规律，揭示脉动荷载下的公路隧道结构力学行为特性及灾病模式。

(3) 形成完善的排水系统失效引起的隧道检测项目，建立完整的检测方法、数据采集、后端处理和分析的检测体系。

(4) 研发公路隧道排水系统防治关键材料，形成隧道排水系统结晶失效全方位快速疏通与防治关键技术。

(5) 形成隧道排水系统运行参数优化方案，形成隧道排水系统防治标准化设计。

2. 主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

(1) 形成 1 套公路隧道排水系统失效快速检测技术方法，并在不少于 2 座典型运营隧道开展现场应用验证。

(2) 形成 1 套公路隧道排水系统失效快速疏通与防治关键技术，并完成不少于 2 处典型病害点的工程应用验证。

(3) 依托工程应用结果表明，所形成技术可显著提升排水系统堵塞识别效率和处治针对性，并为后续降低重复开挖处治频次、延长排水系统有效服役周期提供技术支撑。

3. 经济和社会效益

(1) 经济效益

以陕西省运营的多条高速公路隧道为依托，系统开展“隧道排水系统结晶失效灾病演化机制及智能检测与疏通关键技术”，形成的系列研究成果将对隧道运营过程中出现的排水系统失效难题提供有效的技术突破，有望节约运营管理成本数千万元。

(2) 社会效益

通过本项目研究，能有效解决隧道排水系统堵塞失效问题，也可使得隧道的维护时间缩短和服役时间增长，从而带动地区社会、经济、文化等多方位的交流。此外，本项目的系列研究成果将对我国类似隧道工程的建设与运营管理提供重要的技术参考，具有显著的社会效益。

4. 成果提供形式

(1) 公路隧道排水系统失效灾病机理及综合治理关键技术研究
研究报告 1 份。

(2) 隧道排水系统失效检测与防治指南 1 套。

(3) 发表相关学术论文 3~5 篇。

(4) 申请国家专利 2~4 项。

5. 其他考核指标

开展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 年度	第 2 季度：调研公路隧道排水系统失效情况，划分失效类型。 第 3、4 季度：开展排水系统晶体生长室内试验，获得隧道排水系统晶体的“成核-生长-沉积”规律。
2027 年度	第 1、2 季度：进行公路隧道衬砌水压时空演变现场试验，获得脉动荷载下结构破坏模式机制。 第 3、4 季度：开展排水系统失效的检测试验，确定排水系统网络及洞内关联度灾病检测项目。
2028 年度	第 1、2 季度：探究在不同排水系统失效状态下的排水系统设计、隧道结构设计以及暴雨灾害防治设计的适应性，提出综合整合与优化方案。 第 3、4 季度：开展隧道排水系统失效化学处治融通试验，研发新型疏通处治化学材料。
2029 年度	第 1 季度：整理项目相关资料，完成结题验收。

四、项目经费

项目总经费：79.965 万元
 交通运输厅补助：19.965 万元
 自筹资金：60.00 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	65.2	16
1. 设备费	8.5	1.4
(1) 购置设备费	2.2	0
(2) 试制设备费	0	0
(3) 设备改造与租赁费	6.3	1.4
2. 业务费	45.5	10.1
(4) 材料支出	16.4	1.1
(5) 测试化验实验加工支出	15.6	5
(6) 燃料及动力支出	1.2	0
(7) 差旅支出	4.8	2.3
(8) 会议支出	0.8	0.4
(9) 国际合作与交流支出	0.3	0
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	4.5	1.3
(11) 其他支出 2026/3/30	1.9	0
3. 劳务费	11.2	4.5
(12) 劳务性支出	9.3	3
(13) 咨询专家支出	1.9	1.5
(二) 间接费用	14.765	3.965
4. 管理费	6.5	0
5. 绩效支出	8.265	3.965
合 计	79.965	19.965

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。可参考《陕西省交通运输厅科研项目经费决算报告参考格式说明》

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）	2~4
		（1）授权发明专利	1
		（2）实用新型	1~3
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	
		3.发表论文（篇）	3~5
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其他	3~5
		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	
		（1）博士、博士后	
		（2）硕士	
		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

西安公路研究院有限公司作为项目牵头总负责单位,全面统筹项目整体组织协调、全过程实施管理与质量进度管控,主导编制项目总体研究框架、实施方案与全周期工作计划,负责各参研单位协同调度、经费统筹管控与研究过程质量把关;统一汇总凝练全套研究成果,承担项目总体技术统筹与综合管理工作。

陕西省公路局作为项目重要依托协作单位,提供区域典型公路隧道依托工程场景与现场实施保障条件,协调现场作业对接、安全管控及多方资源调配;协助开展现场基础调研、工程运维资料归集与实测配套工作。

长安大学作为技术支撑单位,依托隧道排水系统失效机理及综合治理相关技术积累,提供核心技术咨询与理论支持,参与失效影响因素耦合分析等关键环节的试验验证与数据论证,协助完善技术体系。

七、项目参加人员表

项目承担单位：西安公路研究院有限公司							
参与单位（排序）：陕西省公路局、长安大学							
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	签名
1	许冰	1980.12	西安公路研究院有限公司	正高级工程师	桥梁与隧道工程	项目负责人	许冰
主要研究人员							
2	涂静	1979.11	陕西省公路局	高级工程师	隧道工程	技术适用性研究	涂静
3	石雄伟	1976.09	西安公路研究院有限公司	正高级工程师	隧道工程	新型材料研究	石雄伟
4	叶飞	1977.05	长安大学	教授	隧道工程	技术负责人	叶飞
5	苏臣宏	1976.11	西安公路研究院有限公司	正高级工程师	隧道工程	工艺研究	苏臣宏
6	张海宝	1983.01	长安大学	教授	隧道工程	理论分析	张海宝
7	张林	1979.01	西安公路研究院有限公司	中级工程师	隧道工程	依托工程试验	张林
8	刘平录	1976.08	西安公路研究院有限公司	高级工程师	隧道工程	施工质量控制研究	刘平录

9	苗建宝	1987.01	西安公路研究院有限公司	正高级工程师	隧道工程	隧道测试	苗建宝
10	田崇明	1994.10	长安大学	中级工程师	隧道工程	技术研究	田崇明
11	袁龙	1985.05	西安公路研究院有限公司	高级工程师	隧道工程	隧道养护设计	袁龙
12	韩兴博	1991.05	长安大学	高级工程师	隧道工程	新型结构研究	韩兴博
13	弋珂源	1982.06	西安公路研究院有限公司	高级工程师	隧道工程	结构受力分析	弋珂源
14	王 涵	2000.10	长安大学	中级工程师	隧道工程	数值模拟	王涵
15	刘颜滔	1994.05	西安公路研究院有限公司	中级工程师	隧道工程	依托工程设计	刘颜滔
16	张 涛	1989.02	西安公路研究院有限公司	中级工程师	隧道工程	结构受力分析	张涛
17	李 遥	1995.12	西安公路研究院有限公司	中级工程师	隧道工程	隧道应用	李遥
18	陈佳瑶	1998.08	西安公路研究院有限公司	中级工程师	隧道工程	试验研究	陈佳瑶
19	白彦涛	1999.10	西安公路研究院有限公司	中级工程师	隧道工程	依托工程设计	白彦涛
20	李建华	1999.09	西安公路研究院有限公司	中级工程师	隧道工程	隧道监测	李建华
21	雷蔚雯	1999.12	西安公路研究院有限公司	助理工程师	隧道工程	实验分析	雷蔚雯

八、信息表

项目合同编号		25-21K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部		
项目名称		公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究								
项目实施所在地		陕西省		起止年限		2026 年 3 月至 2029 年 3 月				
总 经 费		79.965		斤 拨		19.965				
第一承担单位	单位名称	西安公路研究院有限公司								
	所在地	陕西省西安市					代码	610100		
	通讯地址	陕西省西安市高新区高新六路 60 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	3		
参与单位	序号	单 位 名 称								
	1	陕西省公路局								
	2	长安大学								
	3									
项目负责人		姓 名	许冰		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份	1980		
		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	13991291392		电子邮箱		1050074020@qq.com			
项目联系人		姓名	刘颜滔		性别		男			
		联系电话	13629299320 029-87827248		电子邮箱		377383240@qq.com			
项目组人数		21	高级	11	中级	9	初级	1	其他	
主要研究内容 (100 字以内)		(1) 公路隧道排水系统失效影响因素及致灾机制研究; (2) 基于排水系统失效的隧道检测项目及检测方法研究; (3) 公路隧道排水系统防治方法及关键材料研究; (4) 公路隧道排水系统防治设计标准化研究。								
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:

负责人: (签字)

联系人: (签字)

电 话: 029-88869067



(公 章)

合同乙方: (承担单位)

单位负责人: (签字)

项目负责人: (签字)

电 话:



(公 章)

财务负责人: (签字)

账 户 名:

开户银行:

账 号:

西安公路研究院有限公司

工 商 行 南 关 支 行

3700021509014434288

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：425283

年 月 日

项目编号: 25-21K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 公路隧道排水系统失效机理及综合
治理关键技术研究

申请单位: (盖章) 陕西省公路局, 西安公路研究院有
限公司, 长安大学

联系人: 刘颜滔

电 话: 13629299320

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
1.1 研究背景	1
1.2 项目必要性	4
二、 前期科研及工作基础	5
2.1 国内外研究现状	5
2.2 存在的问题	9
2.3 前期成果及现有工作条件	9
2.4 参考文献	13
三、 实施方案	17
3.1 拟解决的关键问题	17
3.2 主要研究内容及实施方案	17
3.3 技术路线	20
3.4 后续技术改造	22
3.5 有关技术经济指标	22
四、 项目承担单位及参加单位概况	23
4.1 单位概况	23
4.1.1 承担单位	23
4.1.2 参与单位	24
4.2 技术力量及人员构成	25
4.3 各自承担的主要工作	25
4.4 项目主要负责人情况	27
五、 项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	29
5.1 依托工程情况	29
5.2 投资来源	30
5.3 工程进度与项目科研进度的配合	30
5.4 组织管理形式	30

六、 项目经费估算及资金筹措情况	33
七、 项目绩效指标	34
八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益	36
8.1 项目预期目标	36
8.2 提交的研究成果及其形式	36
8.3 经济、社会、环境效益分析	36
九、 其它需要说明的问题	38
十、 申请单位意见	39

一、项目研究的背景和必要性

1.1 研究背景

(1) 排水系统失效已成为影响全国隧道运营的主要隐患。随着我国“交通强国”战略的稳步推进,我国公路隧道建设规模已达到了一个崭新的高度,与此同时养护任务也日益繁重。公路隧道多建在山岭或地下,其防排水系统对隧道安全运营有着极为重要的作用。然而,随着运营年限增长,我国越来越多的隧道出现了排水系统失效的问题,呈现出数量众多、分布范围广的特征(图1)。针对这一病害处治,我国已投入大量人力、物力和财力,但目前仍然缺乏有效的处治方法和完善的防治体系,如针对云南藤蔑山、浙江六弓山等隧道的排水系统失效问题,相关单位已耗资上千万元更换排水系统。此外,大量隧道投入运营后,每隔3-5年就需要对排水系统进行处治,否则隧道将出现路面隆起、衬砌开裂等病害,导致隧道无法正常运行,如广东走马岗隧道、观音山隧道、贵州杨柳塘隧道、鹅岭关隧道等,单次专项检测和处治费用高达数百万元。

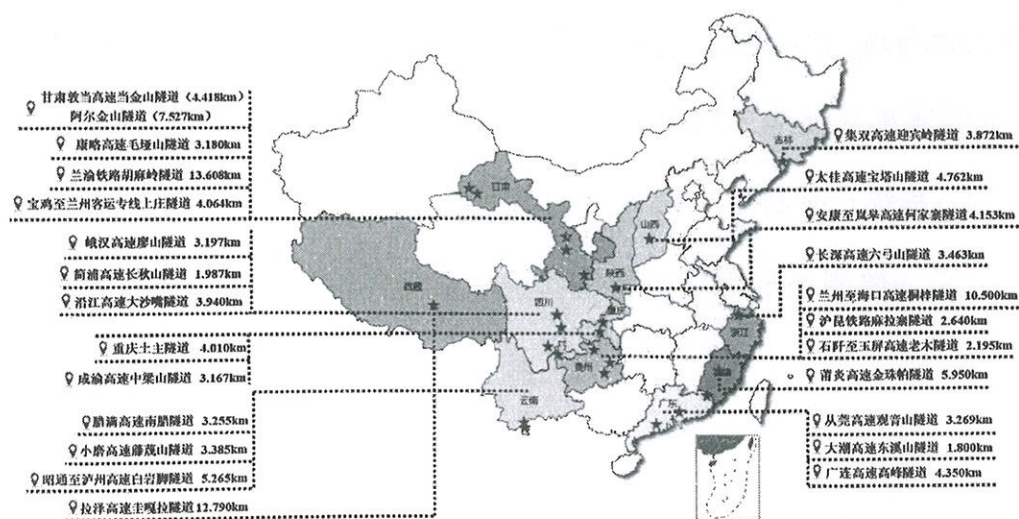


图1 我国部分排水系统失效隧道案例分布

(2) 陕西省高速公路隧道研究需求迫切。在陕西省地理位置及隧道结构设计风格的影响下,全省大量隧道已受到排水系统失效灾病的困扰。如柞山高速公路中领隧道、安岚高速何家寨隧道、安塞过境线牛头疙瘩隧道、五枣园隧道、新茂台隧道,国道 108 上的槐树关隧道,国道 210 上的栓马岭隧道,省道 212 上的峰山隧道、千阳岭隧道,等等大量隧道均出现了不同程度地出现了排水管结晶堵塞、路面渗涌水、衬砌墙面开裂结晶等病害,灾病影响并非个例。同时,隧道内诸多病害的发展与排水系统失效有着密切的关联,若不及时处治,受极端降雨天气的影响,在排水系统失效后,山体内地下水无法及时排出,衬砌结构背后水压增大,进而导致衬砌开裂、路面隆起等结构性破坏的发生,甚至发生隧道内涌水、衬砌被击穿等灾难性病害,使隧道运维环境、结构安全受到严重威胁(图 2)。此外,陕西省既有公路隧道建设年代跨度大,不同时代隧道在防排水设计理念、支护与排水材料、施工工艺及运营养护条件等方面存在明显差异,导致排水系统失效类型、堵塞部位及致灾表现具有较强的时代特征。为提高研究结论的代表性与适用性,项目将进一步加强对不同建设时期、不同结构型式、不同地质环境和不同运营年限公路隧道排水系统的现场调研与分类统计,系统识别排水系统失效的典型模式及演化特征,为后续致灾机制研究、检测体系构建和防治设计提供工程依据。

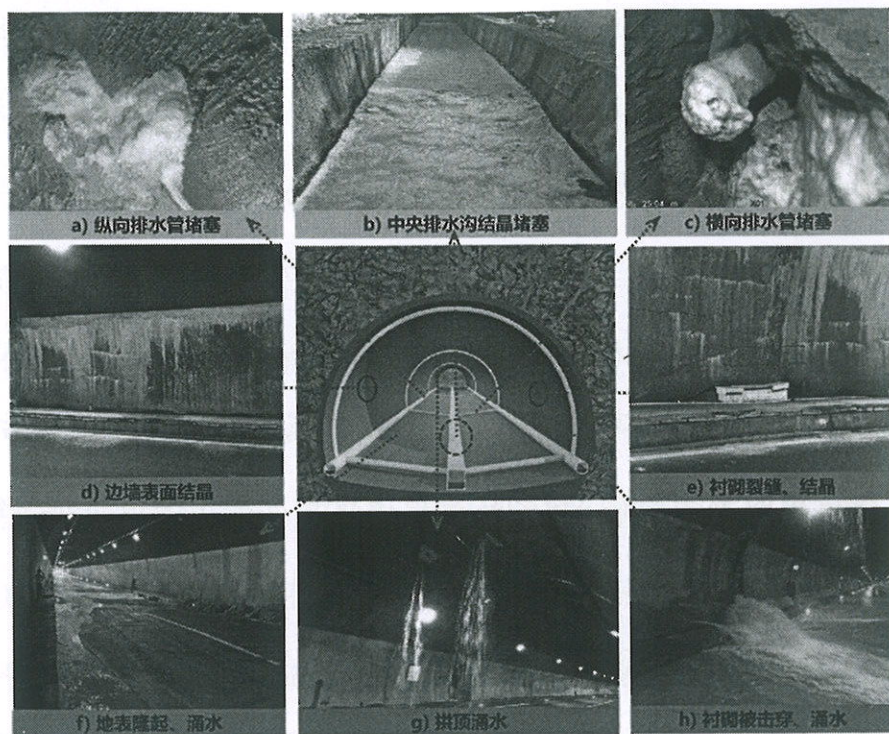


图2 隧道排水系统失效类型及灾病

(3) 研究深度不足, 隧道排水系统灾病处治维修技术亟待解决。

目前针对排水系统失效灾病的研究多集中于宏观影响因素, 而对排水系统晶体沉积机理、结构裂损破坏脉络、隧道灾病演化机制仍不明晰。很多仅研究通过某单一隧道案例定义其规律, 但不同地区隧道排水系统失效灾病影响因素差异性较大, 影响程度也有所不同, 其他地区的研究结论无法套用至陕西省隧道。同时, 在灾病处治策略及病害预防手段方面, 前期应对方案以埋管引排、注浆堵漏、破路重修方案为主, 存在普适性差、经济成本高、环境影响大的问题, 缺少一套经济绿色高效的多要素全过程排水系统失效应对方案, 亟待在灾病检测、处治及灾病结构维修方面进行创新突破。

根据以上研究需求分析, 本项目拟攻克“公路隧道排水系统失效致灾机制”“隧道排水系统失效智能检测技术”、“排水系统失效

快速疏通技术”、“隧道灾病结构修复技术”关键技术，形成经济、绿色、高效的多要素全过程排水系统失效应对策略，为陕西省隧道结构稳定及营运环境提供保障。

1.2 项目必要性

(1) 现有理论深度不足

既有研究多根据特定案例研究排水系统失效状态下衬砌背后水压对衬砌结构的影响规律，缺乏从细观微观角度揭示隧道排水系统失效演化机制、衬砌-路面病害发展灾变机制，缺乏普适性。

(2) 存在检测盲区

传统检测方法在排水系统问题诊断中存在速率慢、无法进入管道等问题，同时，无法精准定位堵塞位置、量化堵塞程度、评估结构损伤。

(3) 难处治、处治不彻底

针对陕西地域性水质与地质特点，研发新型疏通处治材料，从材料层面破解堵塞与损伤难题，实现防治过程的绿色化与长效化；改进现有排水系统设计和优化参数。

根据公路隧道独特的结构和环境特点，迫切需要建立完善的公路隧道排水系统失效检测方法、处治策略及灾病结构修复体系。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

(1) 公路隧道排水系统失效影响因素及致灾机制研究

隧道排水系统失效可能导致二次衬砌背后水压增大,从而加剧衬砌结构破坏^[1],而影响衬砌背后水压大小的因素主要包括水位高度、排水盲管堵塞程度以及堵塞长度等^[2]。刘坤^[3]通过数值模拟对隧道周边渗流场的分布规律加以研究,指出非对称堵塞长度越长,进入稳态渗流后的水压力越大。徐金华等^[4-5]通过模型试验和数值模拟,表明排水管堵塞率分别为0%~20%和80%~100%区间内,隧道结构背后水压变化平缓,并提出40%堵塞率为衬砌安全性控制阈值。Xu^[6]、Zhang^[7]等通过设置一定梯度的地下水头,对衬砌的应力变化和破坏过程进行了分析,发现随着排水系统的恶化,隧道底部结构首先受到破坏。此外,强降雨对隧道衬砌结构的影响不可忽视,当雨水回灌量远远超过隧道排水能力,隧道衬砌背后地下水压急剧增大,隧道结构存在开裂甚至被击穿的风险^[8-11]。王维^[12]、Fang^[13]等采用现场检测、数值模拟及模型试验等方法研究了不同降雨量的强降雨条件衬砌弯矩随外水压变化的规律,表明最大弯矩和偏心距一般位于衬砌拱脚或侧壁处。Fan^[8]、李林毅^[14]、Liu^[15]等研究了频繁降雨等不良降雨条件下,隧道衬砌的开裂、渗漏和屈曲破坏事故,确定了在地表降雨补给和隧道排水条件下衬砌结构的破坏特性。

同时,学者们对隧道排水系统失效这一问题进行了广泛研究,探讨了具体失效原因、失效过程等重要方面。Dietzel^[16]、Galan^[17]、叶

飞^[18]、郭小雄^[19]等学者指出,隧道喷射混凝土长期受周围地下水侵蚀,易发生钙溶蚀现象,导致排水系统堵塞失效。其中含钙水泥水化产物溶解流入排水系统,造成大量碳酸钙晶体析出。Zhang^[20]、Ye^[21]等研究表明隧道喷射混凝土速凝剂的种类和掺量会影响钙溶出过程,进而影响排水系统结晶堵塞程度。Chen^[22]指出隧道所处周围围岩特性也是造成排水系统失效的重要原因之一,土壤中碳酸钙的溶解作用^[23]、土壤结晶和水泥中氢氧化钙与土壤的火山灰反应等导致排水系统溶液中含有过量的碳酸钙颗粒^[24]。此外,叶飞^[25]、向坤^[26]、Chen^[27]、Eichinger^[28]等发现地下水类型、pH值、微生物种类等隧道排水系统溶液特点也是影响其失效的原因。碳酸钙结晶生长机制研究成果主要集中在水处理、石油运输等领域^[29], Hasson^[30]基于碳酸钙晶体析出机理,建立了碳酸钙结垢沉积的经典模型,而后, Brahimi^[31]则通过引入垢颗粒的剥蚀理论对其进行了改进,为排水系统内晶体堵塞机理提供了理论参考。

以上学者的研究成果为本项目提供了重要借鉴,但现有研究多聚焦于单一排水构件堵塞或特定案例条件下的衬砌受力响应,对运营公路隧道复杂工程场景下“纵向盲管—横向盲管—中心排水管”组成的排水系统整体失效过程、不同构件间的水力联系及其对衬砌—路面结构灾变的传递机制研究仍显不足。尤其针对不同地质环境、埋深条件、地形地貌及降雨补给作用下排水系统失效程度与结构安全风险之间的耦合关系,尚缺乏系统性的理论分析与工程验证。

(2) 隧道排水系统失效设计优化、智能检测、处治、结构修复

研究概况

在土木工程领域,常借用红外成像、无人机技术、检测机器人等手段检测表面缺陷^[32-33]。然而,由于排水系统是暗埋结构,内部型式复杂,红外成像、无人机、检测机器人等技术存在一定局限性。相比之下,探地雷达检测方法具有无损、高精度、高效率等优点,常用于隧道超前地质探测和质量检测^[34-35],也有学者结合机器学习方法预测隧道裂缝、隧道沉降等病害^[36-37]。探地雷达在地下管网检测方面也有广泛的应用,如黄肇刚^[38]、Ocana^[39]、滕坤阳^[40]、Sossa^[41]、张明昊^[42]等通过雷达完成了地下管线的渗漏病害、管材材质、管线直径、裂损、位置等检测任务。为了进一步提高探地雷达检测精度,常需借助图像处理及机器学习等手段对波形进行二次处理,如吴畏^[43]、Tang^[44]、Jin^[45]、Ni^[46]等通过小波变换对图像进行降噪处理,提高了雷达图谱的清晰度;米宏涛^[47]、Khudoyarov^[48]、Kang^[49]等通过卷积神经网络提高了地下管线目标检测率以及目标分类、管道材质的精确度;Demirci^[50]通过BP算法提高了准确定位地下管线泄漏源的能力。

隧道排水系统结晶堵塞病害的处治多借助于石油、水处理等领域管道除垢方法。Filloux^[51]发现NFA新型清洗剂在pH为3.0情况下可高效去除渗透膜中碳酸钙垢;叶友东^[52]基于煤矿井下排水管道结垢特点,采用一种便捷新型除垢工艺,设计了一种结构简单、成本低廉、除垢效率高的刮削式除垢装置。针对隧道结晶病害,相关学者们也提出了一系列的处治方法。如胡家玮^[53]、Xu^[54]、蒋雅君^[55]等研发了新型酸基清洗剂,且表现出了一定的处治能力。此外,Dietzel^[16]研究发

现,高速旋转喷头、链条及刮刀在处治排水系统堵塞情况时,有损坏排水管的风险。

针对隧道排水系统监测,现多通过结合给水排水、物联网和自动化控制等专业技术,建立在线监测系统,对排水管内液位进行智能实时监测。如周午阳^[56]等基于实际工程设计构建了一套实时、准确、稳定的排水管网液位在线监测系统。赵冬泉^[57]等基于物联网技术开发了 Smart Water 智能在线液位监测预警系统,提高了城市隧道对内涝事件的抵御能力。王明磊^[58]基于物联网技术设计了积水水位在线监测和自动排水系统,为解决隧道电缆沟积水隐患提供了一种可行方案。薛敏^[59]等结合物联网技术针对性地提出了智慧排水系统发展中所面临的在线监测设备的研发、系统的安全机制以及标准化体系等关键问题。此外, Wedenig M^[60]等通过对相关环境参数(pH、氧化还原电位(pe)、电导率(EC)和水温(T))的自动化、连续和高时间分辨率的原位监测还可实现对隧道排水系统结垢过程的评估。

当前用于混凝土快速修补的材料主要为无机类和有机类材料,无机类传统水泥基材料存在修复时间过长问题,有机类修复材料存在易老化、与基层混凝土膨胀系数相差大的不足。寿柳嫣^[61]等利用脱硫粉煤灰、凝灰岩机制砂制备磷酸盐快速修复材料(MKPC),具有优异的早期力学性能。刘上春^[62]从修复材料与修复工艺两方面,对隧道二次衬砌混凝土缺损及色差修复技术进行研究,提出针对性修复方案。Yaqoob^[63]等提出预制混凝土技术进行路面快速施工和修复。Zhang^[64]等改进了 C-S 材料,通过测试获得了适当的比例,提出了一种用于地

下混凝土结构混凝土裂缝处理的新灌浆技术。Kim^[65]等多种修复材料使用韩国标准和美国测试材料协会提出的各种测试方法进行评估,用于结构保护、结构修复和裂纹修复,并对结果进行了分析和比较。

综合上述分析可见,国内外针对排水系统失效检测、处治等方面的研究尚处于初期探索阶段,所面临的检测反演效果差、处治效率低、监测手段不足的缺陷较为严重。因此,在现有研究基础上,根据公路隧道独特的结构和环境特点,迫切需要建立完善的公路隧道排水系统失效检测方法、处治策略及灾病结构修复体系。

2.2 存在的问题

迄今为止,我国隧道因排水管堵塞已直接和间接造成了巨大的经济损失,当前公路隧道排水系统研究及工程实践中,仍面临以下突出短板:

排水系统受结晶影响大:隧道结晶的产生具有隐秘性、持续性,结晶体具有顽固性,某些地区(如云南、浙江等地)的隧道已存在排水系统失效的现象,排水系统堵塞瘫痪进一步导致了结晶处治困难。

治理、维护成本高:西南等地区隧道运营3-5年内即需频繁处治维护,现有技术未充分适配区域水文地质、环境介质等特性,缺乏针对性的长效防控方案,导致维护成本高、运营安全风险大。

2.3 前期成果及现有工作条件

项目组围绕公路隧道衬砌结构灾病机制、隧道排水系统结晶失效机理、隧道排水系统结晶预防措施、隧道排水系统堵塞处治等方面内容进行了持续性基础研究。初步形成了一系列阶段性成果,可为本项

目顺利开展提供良好保障。

(1) 公路隧道衬砌结构灾病机制方面

项目组致力于隧道工程围岩及结构力学行为演变机理方面的研究,揭示了服役隧道衬砌结构的病害形成机理,构建了隧道衬砌结构劣化承载力计算模型,实现了隧道灾病处治及管养策略的自主决策。在正常使用工况力学模型的基础上,考虑隧道服役过程中受环境的侵蚀特性,建立了隧道衬砌承载能力劣化计算模型。根据隧道的灾病特点,形成了隧道水害、冻害等关键灾病数据远程自动检测方法,基于隧道病害及维修统计大数据,分析了隧道病害之间的关联性与递进性,形成了隧道灾害预防性养护处治方法,并通过现场试验对其进行检验。基于数字孪生平台,实现了隧道养护的智能化决策(图3)。多年的相关研究积累了丰富的试验经验及相应理论知识储备,可为实现预期目标提供坚实基础;畅通的合作渠道可及时获得全国多地公路隧道相关基础数据,可有效保证相关研究顺利开展。

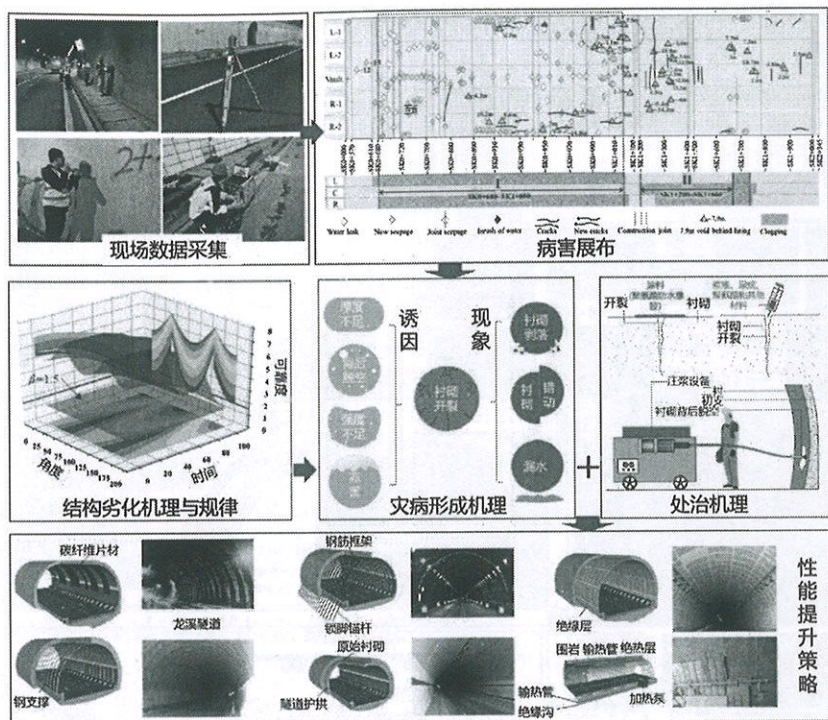


图3 隧道灾病机理及性能提升策略

(2) 公路隧道排水系统失效机理

项目组在前期研究中通过现场测试、理论数值分析和室内模型试验等多种方式(图4),深入探究了公路隧道排水系统结晶失效过程及部分影响因素。通过建立的大尺寸室内模型试验系统,包含初支喷射混凝土装置、渗流系统和排水系统等关键要素,成功模拟了富水公路隧道排水系统中的渗流结晶全过程。实验室再现了实际隧道中快速结晶和大量结晶的过程,发现地下水在喷射混凝土中的渗流是导致排水管快速堵塞的关键步骤。进一步研究表明,地下水中富含碳酸氢根和高碱性溶液是导致快速结晶的主要因素。研究结论强调了地下水与喷射混凝土之间的相互作用在隧道排水系统结晶失效中的重要性,提出了关于化学反应过程、混凝土侵蚀过程、晶体析出和沉积堵塞等四个关键过程的观点。这些研究成果为后续相关研究提供了重要参考。

此外,进一步研究了现场速凝剂种类和掺量对结晶的影响,并基于水泥基材料的钙溶蚀模型,对喷射混凝土的钙溶蚀演变规律进行了理论求解。

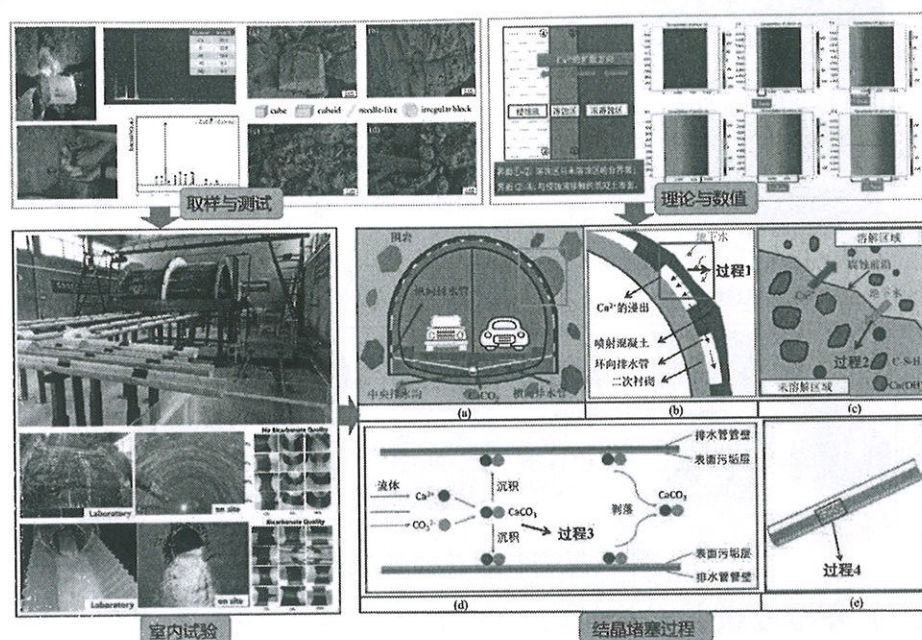


图4 隧道排水系统结晶病害堵塞过程

(3) 公路隧道排水系统结晶预防措施

通过正交试验对喷射混凝土组成成分进行研究,成功实现了从源头抑制钙离子从喷射混凝土内的溶出,并确定了可最大降低钙溶出的配合比。随后,对抗碱剂、纳米二氧化硅、粉煤灰、纳米碳酸钙、防水剂等材料的防结晶效果展开探究,采用响应面法研究了复合掺和料的防结晶效果(图5)。

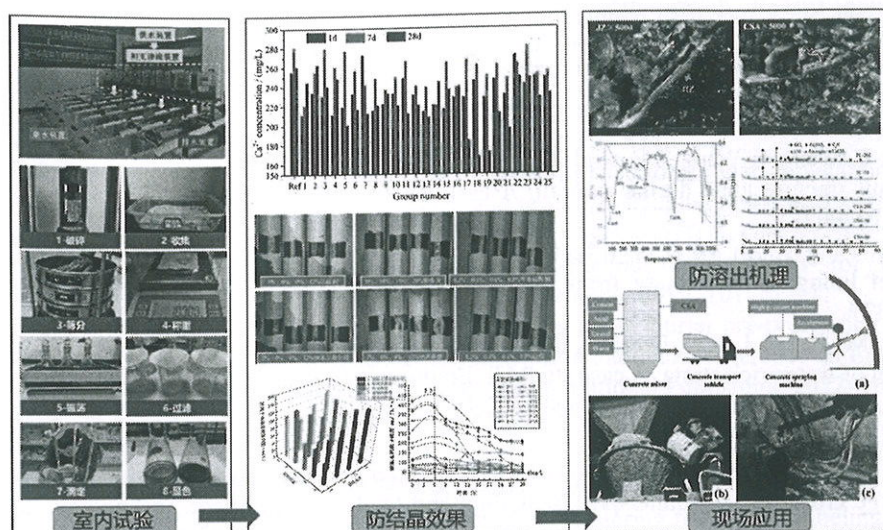


图5 “固钙剂”研发与应用

(4) 公路隧道排水系统堵塞处治

项目组长期致力于隧道结构灾病的治理工作,提出的隧道结构灾病检测及处治方法支持了中国工程建设标准化协会标准《公路隧道衬砌结构地质雷达检测技术规程(征求意见稿)》以及云南省地标《公路隧道隐蔽工程无损检测技术规程》(DB53/T 1034—2021)的编制,研究成果“在役公路隧道衬砌结构健康评价理论与成套技术及其应用”获评中国公路学会科学技术二等奖。科研团队一直非常重视科研成果转化能力,致力于将科研成果和专利真正落实到实际应用中。

2.4 参考文献

- [1]. He B G, Zhang Y, Zhang Z Q, et al. Model test on the behavior of tunnel linings under earth pressure conditions and external water pressure[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 26: 100457.
- [2]. 常凯, 郭小雄, 马伟斌, 等. 铁路隧道排水盲管堵塞引起的外侧水压及衬砌应力变化规律研究[J/OL]. 铁道标准设计, 1-10[2024-03-09].
- [3]. 刘坤, 刘新荣, 钟祖良, 等. 隧道排水系统非对称堵塞对衬砌外水压力的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(02): 369-378.
- [4]. 徐金华, 周华求, 熊文威, 等. 岩溶隧道排水系统不同堵塞条件下衬砌结构力学特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(01):91-104.
- [5]. 刘坤. 隧道排水系统局部堵塞后的衬砌外水压力及其受力特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [6]. Xu Q, Zhang S, Li P, et al. Lining failure performance of highway tunnels induced by the drainage system deterioration[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 149: 107236.
- [7]. Zhang S, Xu Q, Yoo C, et al. Lining cracking mechanism of old highway tunnels caused by

- drainage system deterioration: A case study of Liwaiao Tunnel, Ningbo, China[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 137: 106270.
- [8]. Fan H, Zhu Z, Song Y, et al. Water pressure evolution and structural failure characteristics of tunnel lining under hydrodynamic pressure[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 130: 105747.
 - [9]. Chen L, Wang Y, Wang Z F, et al. Characteristics and treatment measures of tunnel collapse in fault fracture zone during rainfall: A case study[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 145: 107002.
 - [10]. Liu Y, Feng Y, Xu M, et al. Effect of an incremental change in external water pressure on tunnel lining: a case study from the Tongxi karst tunnel[J]. *Natural Hazards*, 2019, 98: 343-377.
 - [11]. Xu S, Ma E, Lai J, et al. Diseases failures characteristics and countermeasures of expressway tunnel of water-rich strata: A case study[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 134: 106056.
 - [12]. 王维. 极端降雨条件下隧道衬砌外水压力及其受力特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
 - [13]. Fang Y, Guo J, Grasmick J, et al. The effect of external water pressure on the liner behavior of large cross-section tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 60: 80-95.
 - [14]. 李林毅, 阳军生, 王立川, 等. 强降雨作用下高速铁路隧道仰拱隆起原因分析及整治[J]. *现代隧道技术*, 2021, 58(01): 27-36.
 - [15]. Liu Y, Lai H, Xie Y, et al. Cracks analysis of highway tunnel lining in flooded loess[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2017, 170(1): 62-72.
 - [16]. Dietzel M, Rinder T, Leis A, et al. Koralm tunnel as a case study for sinter formation in drainage systems—precipitation mechanisms and retaliatory action[J]. *Geomechanik und Tunnelbau: Geomechanik und Tunnelbau*, 2008, 1(4): 271-278.
 - [17]. Galan I, Baldermann A, Kusterle W, et al. Durability of shotcrete for underground support – Review and update[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 202: 465-493.
 - [18]. 叶飞, 田崇明, 赵猛, 等. 云南某在建隧道排水管结晶堵塞病害初步探析[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(S1): 336-341.
 - [19]. 郭小雄. 铁路隧道排水系统结晶机理及应对措施研究[J]. *中国铁道科学*, 2020, 41(01): 71-77.
 - [20]. Zhang Z, Li G, Zhang G, et al. Influence of liquid accelerators on shotcrete in karst area tunnels[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16: e01002.
 - [21]. Ye F, He B, Tian C, et al. Influence of sodium aluminate on calcium leaching of shotcrete in tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 117: 104156.
 - [22]. Chen Y, Cui Y, Barrett A G, et al. Investigation of calcite precipitation in the drainage system of railway tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 84: 45-55.
 - [23]. Wu Z, Cui Y, Barrett A G, et al. Role of surrounding soils and pore water in calcium carbonate precipitation in railway tunnel drainage system[J]. *Transportation Geotechnics*, 2019, 21: 100257.
 - [24]. Jung H, Han Y, Chung S, et al. Evaluation of advanced drainage treatment for old tunnel drainage system in Korea[J]. *Tunnelling and underground space technology*, 2013, 38: 476-486.
 - [25]. 叶飞, 田崇明, 何彪, 等. 在建隧道排水系统结晶堵塞试验[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(03): 159-170.
 - [26]. 向坤, 周杰, 张学富, 等. 碱性环境隧道排水管结晶规律室内试验研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(S2): 207-212.
 - [27]. Chen X, Zhou J, Zhang X, et al. Molecular dynamics study on crystallization patterns in tunnel drainage pipes in alkaline geological environments[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 2022.
 - [28]. Eichinger S, Boch R, Leis A, et al. Scale deposits in tunnel drainage systems—A study on fabrics and formation mechanisms[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 718: 137140.
 - [29]. Wei H, Shen Q, Zhao Y, et al. Crystallization habit of calcium carbonate in presence of sodium dodecyl sulfate and/or polypyrrolidone[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 260(3-4): 545-550.

- [30]. Hasson D, Avriel M, Resnick W, et al. Mechanism of calcium carbonate scale deposition on heat-transfer surfaces[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1968, 7(1): 59-65.
- [31]. Brahim F, Augustin W, Bohnet M. Numerical simulation of the fouling process[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2003, 42(3): 323-334.
- [32]. Lai W W, Derobert X, Annan P. A review of ground penetrating radar application in civil engineering: A 30-year journey from locating and testing to imaging and diagnosis[J]. *Ndt & E International*, 2018, 96: 58-78.
- [33]. Jia Yu, Tang Lei, Ming Pan, et al. Ultrasound-excited thermography for detecting microcracks in concrete materials[J]. *NDT & E International*, 2019, 101: 62-71.
- [34]. Marasco G, Rosso M M, Aiello S. Ground penetrating radar fourier pre-processing for deep learning tunnel defects' automated classification[C]. *International Conference on Engineering Applications of Neural Networks*. Cham: Springer International Publishing, 2022: 165-176.
- [35]. 黄宏伟, 杜军, 谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆的探地雷达探测模拟试验[J]. *岩土工程学报*, 2007, (02): 243-248.
- [36]. 江珊珊. 基于深度学习的地铁隧道裂缝病害图像检测[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- [37]. Zhou C, Kong T, Zhou Y, et al. Unsupervised spectral clustering for shield tunneling machine monitoring data with complex network theory[J]. *Automation in Construction*, 2019, 107: 102924.
- [38]. 黄肇刚. 地下管线渗漏的探地雷达信号分析和定位方法研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- [39]. Ocana-Levario, Silvia J, Ayala-Cabrera, et al. 3D model evolution of a leak based on GPR image interpretation[J]. *Water science & technology: Water supply*, 2015, 15(6): 1312-1319.
- [40]. 滕坤阳. 基于探地雷达的地下管线病害正演模拟及回波解译研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
- [41]. Sossa V, Pérez-Gracia V, González-Drigo R. Lab non destructive test to analyze the effect of corrosion on ground penetrating radar scans[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2814.-2829.
- [42]. 张明昊. 基于探地雷达的地下管线智能辨识技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [43]. 吴畏, 郭华, 张井, 等. 小波变换在探地雷达探测地下管线信号处理中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2003, (03): 493-496.
- [44]. Tang X, Liu Y, Zheng L, et al. Leak detection of water pipeline using wavelet transform method[C]. *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*. IEEE, 2009, 2: 217-220.
- [45]. Jin Y, Duan Y. 2D wavelet decomposition and F-K migration for identifying fractured rock areas using ground penetrating radar[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(12): 2280-2299.
- [46]. Ni S H, Huang Y H, Lo K F, et al. Buried pipe detection by ground penetrating radar using the discrete wavelet transform[J]. *Computers and Geotechnics*, 2010, 37(4): 440-448.
- [47]. 米宏涛. 基于探地雷达的地下管线正演模拟及探测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [48]. Khudoyarov S, Kim N, Lee J J, et al. Three-dimensional convolutional neural network-based underground object classification using three-dimensional ground penetrating radar data[J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 19(6): 1884-1893.
- [49]. Kang M S, Kim N, Lee J J, et al. Deep learning-based automated underground cavity detection using three-dimensional ground penetrating radar[J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 19(1): 173-185.
- [50]. Demirci S, Yigit E, Eskidemir I H, et al. Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method[J]. *Ndt & E International*, 2012, 47: 35-42.
- [51]. Filloux E, Wang J, Pidou M, et al. Biofouling and scaling control of reverse osmosis membrane using one-step cleaning-potential of acidified nitrite solution as an agent[J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 495: 276-283.
- [52]. 叶友东, 汪凯, 周哲波. 煤矿井下排水管道除垢清理装置的设计[J]. *煤矿机械*, 2016, 37(04): 106-107.
- [53]. 胡家玮, 王聪, 雷广军, 等. 一种控制隧道排水系统结晶堵塞的新型除垢剂研发与性能研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2023, 43(11): 1973-1983.
- [54]. Xu Z, Wang X, Zhang C, et al. Scaling and clogging treatment of aging tunnel drainage pipes

- in karst areas using eco-friendly acid agent[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(4): 896-910.
- [55]. 蒋雅君, 杜坤, 魏晨茜, 等. 铁路隧道排水盲管结晶沉积疏通清洗技术[J]. *隧道与轨道交通*, 2020, (04): 9-13.
- [56]. 周午阳, 孙志民, 汤舒. 深层隧道排水区域液位在线监测系统研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(01): 1-6.
- [57]. 赵冬泉, 李雪森, 唐兰贵, 等. SmartWater 智能在线液位监测预警系统介绍及应用[J]. *给水排水*, 2015, 51(09): 95-100.
- [58]. 王明磊. 基于物联网技术的电力电缆隧道积水水位在线监测和主动排水系统[J]. *物联网技术*, 2019, 9(08): 28-30.
- [59]. 薛敏, 李大成, 沈晓铃. 基于物联网技术的智慧排水系统构建[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(06): 62-64.
- [60]. Wedenig M, Eichinger S, Boch R, et al. Understanding of tunnel drainage scale formation by in-situ monitoring[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 131: 104853.
- [61]. 寿柳嫣, 温小栋, 陈立, 等. 磷酸盐基隧道快速修复材料的长期性能与耐久性[J]. *北京工业大学学报*, 2018, 44(10): 1321-1326.
- [62]. 刘上春, 林展鹏, 龚涛, 等. 高速铁路隧道二次衬砌混凝土缺损及色差修复技术研究[J]. *现代隧道技术*, 2019, 56(S1): 190-195.
- [63]. Yaqoob S, Silfwerbrand J, Strömberg L. Evaluation of rapid repair of concrete pavements using precast concrete technology: a sustainable and cost-effective solution[J]. *Nordic Concrete Research*, 2021, 65(2): 107-128.
- [64]. Zhang B, Gao F, Zhang X, et al. Modified cement-sodium silicate material and grouting technology for repairing underground concrete structure cracks[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, 12(22): 680.
- [65]. Kim T K, Park J S. Comparative analysis of domestic and international test guidelines for various concrete repair materials[J]. *Materials*, 2022, 15(9): 3267.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

该项目旨在攻克“公路隧道排水系统失效致灾机制”关键科学问题,解决“隧道排水系统失效检测技术”、“排水系统失效防治技术”两大技术难题,形成隧道排水系统防治标准化设计。研究成果可用于完善公路排水系统堵塞失效及灾变理论,可实际解决隧道排水系统失效问题,使隧道排水系统失效病害检测有依据、处治有效率、养护有时效。有望大幅度节约隧道渗漏水病害防治综合成本,降低因排水系统结晶失效导致的隧道灾病发生概率。

3.2 主要研究内容及实施方案

专题一 公路隧道排水系统失效影响因素及致灾机制研究

(1) 隧道排水系统失效影响因素及堵塞模型研究

针对结晶堵塞导致的排水系统失效情况,基于不同建设年代、不同地质环境及不同运营状态隧道的现场调研结果,研究地下水水化学特征、喷射混凝土溶蚀供钙行为、排水管材与结构形式、排水路径转换及服役环境等因素单独及耦合作用对排水系统堵塞演化的影响,明确晶体成核发生条件及“成核-生长-沉积”规律,提出适用于工程场景的晶体生长速率计算方法,构建多因素耦合的排水系统堵塞模型。

(2) 脉动荷载作用下衬砌结构及路面灾变机理研究

揭示脉动荷载下的公路隧道结构及路面的局部裂损渗漏与整体击穿隆起力学行为特性,分析公路隧道排水系统失效的结构病害特征,厘清隧道病害向灾害演化的机理。

(3) 排水系统失效程度与降雨强度耦合作用结构安全风险研究

依据揭示的排水系统不同堵塞程度下隧道衬砌力学行为特点,结合典型公路隧道的工程地质环境、埋深条件、地形地貌特征、地下水补给条件及降雨入渗模式,分析隧道排水系统不同堵塞程度及极端降雨时衬砌结构的安全性,提出隧道排水系统处治的临界堵塞程度指标。

专题二 基于排水系统失效的隧道检测项目及检测方法研究

(1) 基于排水系统失效的隧道检测项目研究

结合专题一研究成果,从排水系统失效影响因素出发,确定隧道地下排水系统网络检测项目。同时,分析排水系统失效与隧道结构病害的相关性,包括衬砌渗漏、裂缝、击穿等病害以及路面隆起、裂缝、涌水等病害,进而确定排水系统失效引起的隧道洞内病害检测项目。

(2) 基于排水系统失效的隧道检测体系研究

根据确定的检测项目,对比分析传统检测方法和先进技术在排水系统失效检测中的优缺点,进一步改进或开发检测设备并应用于多个隧道现场,建立完整的检测方法、数据采集、后端处理和分析的检测体系。

专题三 公路隧道排水系统防治方法及关键材料研究

(1) 隧道排水系统防治关键材料研发

开展隧道排水系统失效化学处治融通试验,测定试验材料溶解效率、绿色环保性及其他材料特性,研发新型疏通处治化学材料;以绿色、高效、耐久为优选原则,全面系统开展材料抗压强度、抗折强度、界面粘结强度、抗蚀性、耐老化性等基本参数测试,制备新型养护修

复材料。

(2) 隧道排水系统失效防治关键技术研究

为克服管内作业空间小、无法“直角转弯”、一次开窗处治距离短、超强硬质堵塞物难以处治等技术难题,拟在传统切削式机械设备和高压水处治方式基础上,增加化学溶解、吸淤、定向钻进、导向机构、探测等功能。基于上述成果,研发集成式物理-化学智能疏通设备,形成公路隧道排水系统结晶失效全方位快速疏通关键技术。

专题四 公路隧道排水系统防治设计标准化研究

(1) 隧道排水系统运行参数优化研究

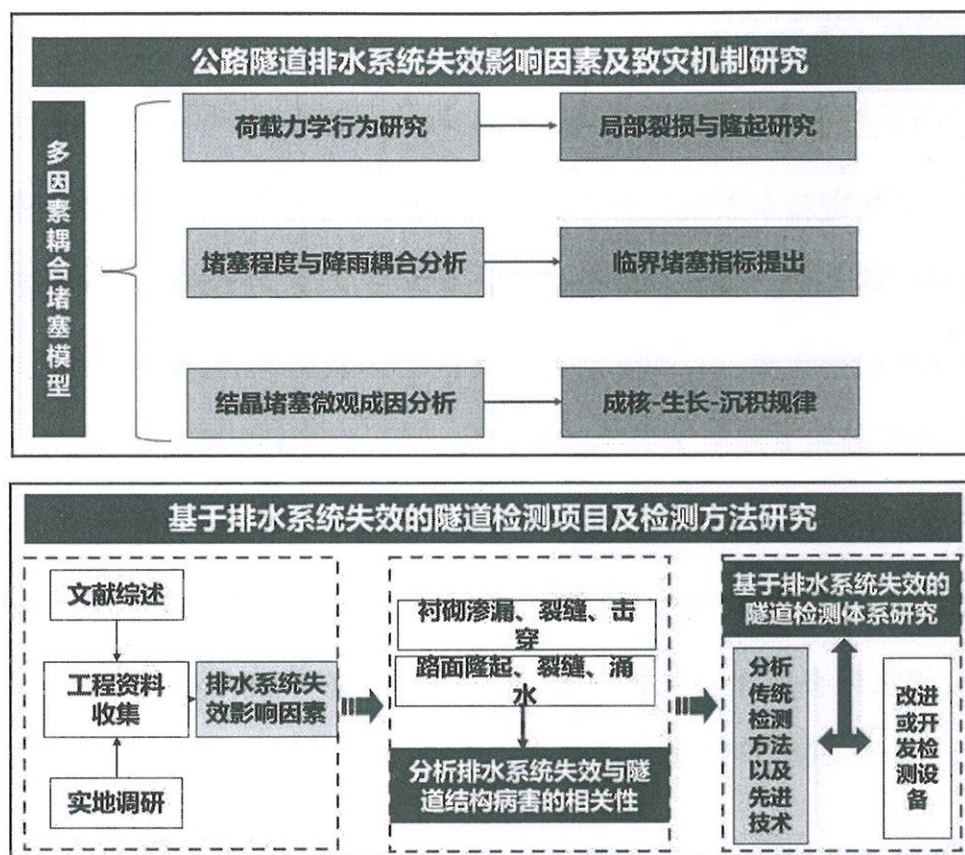
探究隧道排水系统运行参数与排水系统失效状态关联度,包括水流速度、排水量、水压等关键参数的调整和优化,形成隧道排水系统运行参数优化方案,以提高排水系统的排水效率和长期耐久性。

(2) 排水系统失效状态下的隧道结构设计优化研究

基于专题一和专题二的研究成果,进一步探究在不同排水系统失效状态下的排水系统设计、隧道结构设计以及暴雨灾害防治设计的适应性,提出综合整合与优化方案,形成隧道排水系统防治标准化设计。

3.3 技术路线

项目总体按照典型隧道现场调研与分类、排水系统失效机理与堵塞模型构建、检测项目与检测体系建立、防治材料与疏通装备研发、排水系统运行参数及结构设计优化的总体路线展开。各专题之间不是独立并行关系，而是以前期现场调研与机理研究为基础，以检测与防治技术研发为核心，以依托工程验证和标准化设计为目标，形成贯通“调查—机理—检测—防治—设计”的整体研究路线图。



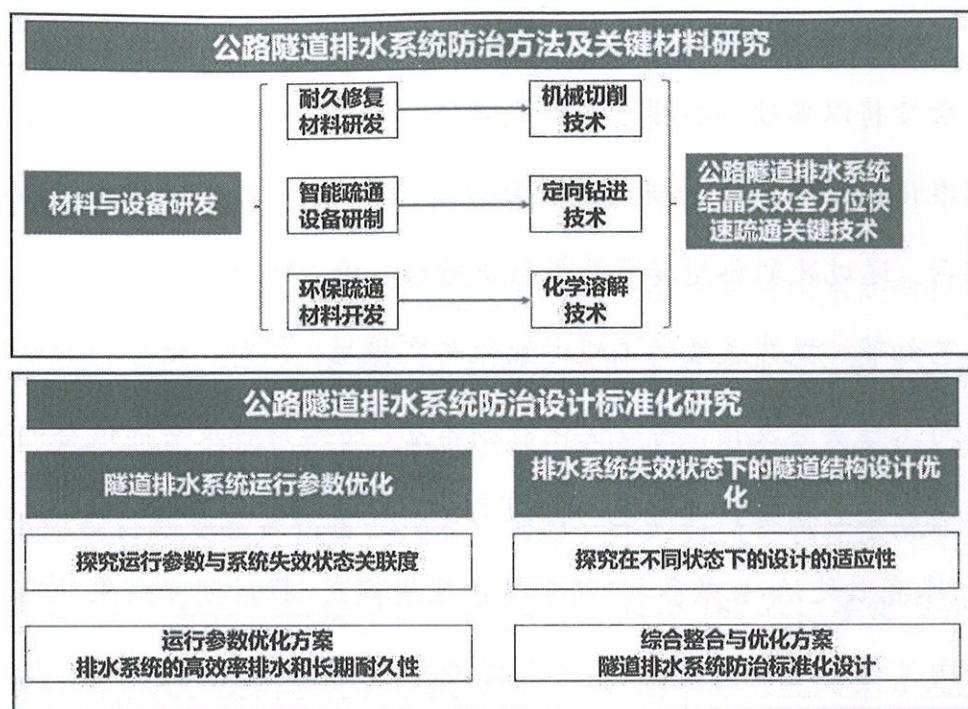


图 6 技术路线

3.4 后续技术改造

后续将以本项目在排水系统失效致灾机制、检测技术、防治方法及标准化设计等方面的研究成果为核心,稳步推进技术迭代优化与转化应用。通过选取典型场景开展试点验证,进一步磨合技术参数、完善工艺细节,提升成果的工程适配性与实操性。同时,结合行业发展需求与工程实际反馈,持续优化检测体系、防治材料及智能设备的核心性能,健全相关技术规范与指引文件。逐步构建覆盖“风险预警-精准检测-高效处治-长效养护”的全链条应用模式,推动研究成果从理论层面向工程实践深度延伸,为公路隧道排水系统的安全稳定运行提供技术支撑,助力公路隧道养护向精细化、智能化升级,全面提升公路隧道工程的安全保障能力与长期服役水平。

3.5 有关技术经济指标

(1) 形成 1 套公路隧道排水系统失效快速检测技术方法,并在不少于 2 座典型运营隧道开展现场应用验证。

(2) 形成 1 套公路隧道排水系统失效快速疏通与防治关键技术,并完成不少于 2 处典型病害点的工程应用验证。

(3) 依托工程应用结果表明,所形成技术可显著提升排水系统堵塞识别效率和处治针对性,并为后续降低重复开挖处治频次、延长排水系统有效服役周期提供技术支撑。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

4.1.1 承担单位

西安公路研究院有限公司是陕西交控集团直管的国家高新技术企业。西安公路研究院有限公司目前是国内交通行业规模较大,集科研、交通规划、勘察设计、试验检测、软件开发、监理、施工、仪器和道路材料研发生产销售、技术咨询为一体的科研机构。全院职工 337 人,其中正高级工程师 30 人,高级工程师 185 人,享受国务院特殊津贴 1 人,陕西省突出贡献专家 2 人,陕西省三五人才 4 人。博士学位 11 人,硕士学位 157 人。自“七五”以来,西安公路研究院共承担交通科技项目 400 余项,其中获国家科技进步奖 10 余项、中国公路学会科技进步奖 10 余项、陕西省科技进步奖 70 余项的优异成绩。

西安公路研究院现拥有交通运输部颁发的公路工程甲级监理资质、交通工程机电专项监理资质、公路工程试验检测综合甲级资质、交通运输行业环境监测资质、住房和城乡建设部颁发的公路行业(公路、特大桥梁、特长隧道、交通工程)专业甲级设计资质、公路工程勘察综合甲级资质、建筑业承包通信、监控、收费等综合系统工程施工资质、国家发改委甲级工程咨询资质(2 个甲级资质和 1 个丙级资质)、陕西省住房和城乡建设厅颁发的园林绿化施工二级资质,省发改委批准的陕西省首批“固定资产投资项目节能评估文件编制机构和评审机构”。并于 2004 年通过了中国方圆标准认证中心的审核,获

GB/T 19001-2008 质量管理体系认证证书。

4.1.2 参与单位

(1) 陕西省公路局

陕西省公路局是省交通厅领导下的全省公路管理专业机构,负责全省公路的规划、建设、养护、路政以及收费公路等的行业管理,建制为副厅级事业单位,局机关、事业机构共有职工 196 人。1997 年至 2001 年,省公路局连续 5 年被省委、省政府命名为“创佳评差”竞赛活动“最佳单位”;近 10 年来,4 次受到陕西省人民政府通令嘉奖;“九五”以来,有 49 个单位(集体)、31 名个人受到省部级以上单位的表彰奖励;“十五”期间,有 65 个单位(集体)、42 名个人受到省部级以上单位的表彰奖励。2001 年,全省公路系统荣获全国交通系统部级文明行业称号。2005 年,陕西省公路局机关荣获全国文明单位称号。

(2) 长安大学

项目组自 2009 年起就开始了公路隧道相关课题研究,完成了陕西省交通科研项目《公路隧道衬砌渗水裂缝修复材料及技术研究》项目针对衬砌裂缝渗漏水这一隧道工程顽疾,经过多年的科技攻关,系统的对隧道衬砌裂缝形成机理、渗漏水新型修复材料、配套检验设备等方面进行了深入研究,建立了一整套隧道衬砌渗水裂缝修复材料和技术,解决了隧道衬砌裂缝渗漏水这一隧道工程顽疾。项目成果已在陕西十天高速、国道 210、广东汕湛高速惠清段、甘肃 S38 王夏高速公路等多个省份多座隧道中进行了应用。

工程实践方面,项目组承担了大量高速公路及国省干线公路隧道整治工程,项目组拥有多名具有丰富设计经验的正高级、高级工程师和长期从事桥梁结构分析和科研的优秀科研骨干,项目组不仅仅有多座隧道的设计、咨询、施工和监控工作经历,且承担并完成了多项研究项目,有丰富的项目研究经验。为项目顺利完成提供技术人才保障。

4.2 技术力量及人员构成

项目名称	公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究					
项目总投资	79.965 万元		申请资助金额		19.965 万元	
申请项目负责人	姓名	许冰	性别	男	年龄	46
	职务	副总工程师兼桥梁工程研究院副院长	职称	正高级工程师	专业	桥梁与隧道工程
项目研究主要成员情况						
姓 名	单 位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
许冰	西安公路研究院有限公司	男	45	正高级工程师	桥梁与隧道工程	项目负责人
涂静	陕西省公路局	女	46	副高级工程师	隧道工程	工艺研究
石雄伟	西安公路研究院有限公司	男	50	正高级工程师	桥梁与隧道工程	新型材料研究
叶飞	长安大学	男	48	正高级工程师	隧道工程	技术负责人
苏巨宏	西安公路研究院有限公司	男	49	正高级工程师	隧道工程	技术适用性研究
张海宝	长安大学	男	42	正高级工程师	隧道工程	理论分析
苗建宝	西安公路研究院有限公司	男	38	正高级工程师	桥梁与隧道工程	隧道测试

张林	西安公路研究院有限公司	男	46	中级工程师	隧道工程	依托工程试验
袁龙	西安公路研究院有限公司	男	41	高级工程师	隧道工程	隧道养护设计
田崇明	长安大学	男	31	中级工程师	隧道工程	技术研究
刘平录	西安公路研究院有限公司	男	49	副高级工程师	隧道工程	施工质量控制研究
韩兴博	长安大学	男	34	高级工程师	隧道工程	新型结构研究
弋珂源	西安公路研究院有限公司	男	43	高级工程师	隧道工程	结构受力分析
王涵	长安大学	男	25	中级工程师	隧道工程	数值模拟
刘颜滔	西安公路研究院有限公司	男	31	中级工程师	桥梁工程	依托工程设计
张涛	西安公路研究院有限公司	男	36	中级工程师	隧道工程	结构受力分析
李遥	西安公路研究院有限公司	男	29	中级工程师	隧道工程	隧道应用
陈佳瑶	西安公路研究院有限公司	男	27	中级工程师	隧道工程	试验研究
白彦涛	西安公路研究院有限公司	男	26	中级工程师	隧道工程	依托工程设计
李建华	西安公路研究院有限公司	男	26	中级工程师	隧道工程	隧道监测
雷蔚雯	西安公路研究院有限公司	女	26	助理工程师	隧道工程	实验分析

4.3 各自承担的主要工作

(1) 西安公路研究院有限公司

全面负责项目整体组织协调与实施管理,主持编制研究工作大纲、实施细则及全周期工作计划。牵头开展核心技术研发,涵盖隧道排水

系统失效致灾机制分析、检测体系构建、标准化设计等关键内容；组织现场试验、数据采集与分析验证，编制研究报告、技术指南等成果资料；牵头完成成果验证、评价及转化应用，统筹协调各参与单位协同推进项目，确保研究目标如期达成。

（2）陕西省公路局

提供典型公路隧道依托工程及现场调研便利条件，协助开展工程现状调查与数据收集。梳理行业内隧道排水系统失效治理的宏观需求、政策导向及标准规范要求，协助推动研究成果的行业推广应用；参与研究成果各阶段验收工作，保障项目研究与工程实践、行业需求高效衔接，为项目实施提供政策支持与资源保障。

（3）长安大学

作为技术支撑单位，依托隧道排水系统失效机理及综合治理相关技术积累，提供核心技术咨询与理论支持，参与失效影响因素耦合分析、检测方法优化及防治技术研发等关键环节的试验验证与数据论证，协助完善技术体系，为项目研究提供坚实的理论与技术支撑。

4.4 项目主要负责人情况

许冰，男，1980年12月生人，工学硕士，正高级工程师，现任西安公路研究院副总工程师兼桥梁工程研究院副院长，主要从事桥梁结构方面的科研、设计、及旧桥评估加固工作，工作以来负责主持加固改造危旧桥300余座，获陕西省优秀设计二等奖2项；担任省公路学会专家委员会委员、桥梁工程委员会委员、秦创原首批科技专家库成员、省土木建筑学会桥梁专业委员会委员、陕西交控科技专业委员

会专家库成员、陕西省科协科技评审专家库成员、长安大学校外研究生导师。

近十年来主持和参与 10 余项省级重点科研项目，参编地方规程 3 部，获准授权国家专利 20 余项，发表核心期刊论文 10 余篇；获陕西省科技进步二等奖 1 项、科技进步三等奖 2 项；获中国公路学会特等奖 1 项、省交通厅科技一等奖 3 项等。

可以满足本项目负责人要求。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程情况

本项目依托为国道 342 温家山隧道、国道 345 宽坪梁隧道、省道 313 小岭梁隧道开展公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术应用。同时，项目将结合陕西省内不同建设年代、不同埋深条件、不同地质环境及不同病害表现的运营隧道，补充开展对比性现场调研，进一步提高研究对不同历史时期公路隧道排水系统特征的覆盖度。

项目一：温家山隧道为国道 342 线眉县公路管理段管辖的双向两车道中隧道，隧道中心桩号为 K1566+590，长度为 500m，隧道限界净宽 8.5m，净高为 5m，隧道内路面为水泥混凝土路面，进、出口洞门形式均为端墙式，于 2005 年建成通车。该隧道中部段喷射混凝土套拱处渗水严重，呈流水状，造成检修道与路面积水，影响行车、行人安全。

项目二：宽坪梁隧道为国道 345 线商洛市镇安公路管理段管辖的双向两车道长隧道，隧道中心桩号为 K1782+666，长度 1582m，隧道限界净宽 10m，净高为 5m。进、出口洞门形式均为端墙式，隧道内路面为水泥混凝土路面，于 2020 年建成通车。该隧道洞壁返潮，衬砌开裂处渗水（白色结晶、返碱）比较严重，局部积水影响行车安全。

项目三：小岭梁隧道为省道 313 线商洛市柞水公路管理段管辖的双向两车道长隧道，隧道中心桩号为 K188+434，长度 2119m，隧道限界净宽 10m，净高为 6.93m，进、出口洞门形式均为端墙式，洞内路面为水泥混凝土路面，于 2017 年建成通车。该隧道中间段衬砌渗

水较严重,造成检修道与路面积水,影响行车、行人安全。

依托以上三座隧道开展排水系统失效机理及综合治理关键技术应用研究,验证项目成果并为后期隧道排水系统综合治理技术大范围推广应用奠定基础。

5.2 投资来源

本项目资金预算 80 万元,其中省厅专项资金 20 万,其他经费 60 万元。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

2026.3~2026.11: 调研公路隧道排水系统失效情况,划分失效类型;开展排水系统晶体生长室内试验,获得隧道排水系统晶体的“成核-生长-沉积”规律。

2026.12~2027.8: 进行公路隧道衬砌水压时空演变现场试验,获得脉动荷载下结构破坏模式机制;开展排水系统失效的检测试验,确定排水系统网络及洞内关联度灾病检测项目。

2027.9~2028.5: 探究在不同排水系统失效状态下的排水系统设计、隧道结构设计以及暴雨灾害防治设计的适应性,提出综合整合与优化方案;开展隧道排水系统失效化学处治融通试验,研发新型疏通处治化学材料。

2028.6~2029.3: 整理项目相关资料,完成结题验收。

5.4 组织管理形式

项目组织实施机制,认真执行试点项目相关管理办法的基础上,加强项目的规范化、科学化管理,建立科学、合理的组织管理体系,

建立、健全各项管理制度，以保证项目的顺利完成。

（1）项目组织管理方式

项目负责人负责管理项目总体进度、总体质量、财务进度等，保证在规定时间内和预算范围内高质量地完成项目任务，实现基于目标管理的全过程监控与评估，回避风险和不确定性。项目设立科研财务助理，为预算编制和调剂、经费支出、财务决算和验收等方面提供专业化服务。建立年度和中期进展监控和评估制度，健全各任务人员的日常交流制度。

（2）制度化措施

通过项目管理责任制建立起层层责任约束机制，使项目建设全过程的管理责任得到落实，有利于保证项目各项管理目标的实现。包括以下内容：进退场管理制度；工作例会制度；质量管理制度；进度管理制度；环保管理制度；安全管理制度；技术资料管理制度；总平面管理制度；成品保护制度；后期保修服务制度等。

（3）项目实施管理措施

在进行项目管理过程中，制定出总目标及阶段性目标，目标包括质量、进度、安全、文明实施等，在目标明确的前提下对项目软硬件进行管理、监控、协调和考评。对各目标进行逐步分析和层层分解，细化为一个个子目标和阶段性目标，据此进行资源筹措、配置和协调，以各级子目标和各阶段性目标的如期实现来保证总体目标的最终实现。在此基础上划定工作范围、工作内容和工作量，确定项目各阶段的关键控制点，并制定相应的、可量化的、逐步实现各项总目标的控

制计划。根据目标分解，建立健全相应的内部管理机构与制度，确立行为规范，使各部室、各级各类人员努力有方向，工作有标准，办事有依据。各项目标将具体落实到各部室，落实到各负责小组。

（4）进度管理措施

建立完善的进度计划分级管理体系，按照合理的工序和工作流段划分，制定综合进度计划，安排好小组成员、作业面、软硬件设施等相关因素。应用先进、成熟的计划管理软件，对实际进度与计划进度作即时比较分析，及时纠正偏差，控制整体进度计划的实施。

（5）协同攻关机制

项目团队通过不断整合内部优势，建立研发平台，集中力量进行联合攻关。在解决关键问题、突破关键技术时凸显个体优势，实现创新；在软件完善集成、系统并行优化时凸显联合优势，实现突破。该协调攻关机制为项目创新提供保障，实现稳定的科技创新。

（6）质量控制等制度

定期召开项目协商会议，对项目实施中出现的问题，及时提出问题的解决方案，并督促相关任务负责人纠正、改进。对系统开发过程中产生的技术文件建立技术档案，保证系统研发过程的可追溯性；系统研发将严格遵循步骤要求，对系统进行测试，保障系统的可应用性。

六、项目经费估算及资金筹措情况

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	19.965	合 计	79.965	19.965	60
工程配套研究经费	0	（一）直接费用	65.2	16	49.2
单位自筹	60	1.设备费	8.5	1.4	7.1
其他经费	0	（1）购置设备费	2.2	0	2.2
		（2）设备改造与租赁费	6.3	1.4	4.9
		2.业务费	45.5	10.1	35.4
		（1）材料费	16.4	2.1	14.3
		（2）测试化验实验加工费	15.6	1.5	14.1
		（3）燃料动力费	1.2	0	1.2
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	5.9	3.2	2.7
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	4.5	3.3	1.2
		（6）其他费用	1.9	0	1.9
		3.劳务费	11.2	4.5	6.7
		（1）专家咨询费	1.9	1.5	0.4
		（2）聘用人员劳务费	9.3	3	6.3
		（3）其他劳务费	0	0	0
		（二）间接费用	14.765	3.965	10.8
		4.管理费	6.5	0	6.5
		5.绩效支出	8.265	3.965	4.3

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）	2~4
		（1）授权发明专利	1
		（2）实用新型	1~3
		（3）外观设计	
		2、软件著作权授权数（项）	
		3、发表论文（篇）	3~5
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其它	3~5
		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	
		(2) 中试（样品样机）	
		(3) 小批量	
		(4) 规模化生产	
	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	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		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	
	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

8.1 项目预期目标

(1) 揭示晶体成核发生条件及“成核-生长-沉积”规律, 提出晶体成长速率计算方法, 构建多因素耦合的排水系统堵塞模型。

(2) 探明排水系统失效与降雨耦合作用下衬砌水压分布的时空演变规律, 揭示脉动荷载下的公路隧道结构力学行为特性及灾病模式。

(3) 形成完善的排水系统失效引起的隧道检测项目, 建立完整的检测方法、数据采集、后端处理和分析的检测体系。

(4) 研发公路隧道排水系统防治关键材料, 形成隧道排水系统结晶失效全方位快速疏通与防治关键技术。

(5) 形成隧道排水系统运行参数优化方案, 形成隧道排水系统防治标准化设计。

(6) 项目成果首先应用于依托工程, 随后在陕西甚至全国隧道推广。

8.2 提交的研究成果及其形式

(1) 公路隧道排水系统失效灾病机理及综合治理关键技术研究
研究报告 1 份。

(2) 隧道排水系统失效检测与防治指南 1 套。

(3) 发表相关学术论文 3~5 篇。

(4) 申请国家专利 2~4 项。

8.3 经济、社会、环境效益分析

(1) 经济效益

本项目以陕西省运营的多条高速公路隧道为依托，系统开展“隧道排水系统结晶失效灾病演化机制及智能检测与疏通关键技术”，形成的系列研究成果将对隧道运营过程中出现的排水系统失效难题提供有效的技术突破，有望节约营运管理成本数千万元，将有力地保障多座隧道“快速、安全、经济”运营，显著提升陕西省高速公路隧道的营运管理水平，经济效益显著。

（2）社会效益

本项目充分借鉴国际上最新研究成果，同时结合陕西省实际的交通、环境、经济情况，开展隧道排水系统失效灾病演化机制及智能检测与疏通关键技术研究，其成果具有重要的工程实用价值，并可为修订有关规范标准提供依据。通过本项目研究，能有效解决隧道排水系统堵塞失效问题，也可使得隧道的维护时间缩短和服役时间增长，从而带动地区社会、经济、文化等多方位的交流。此外，本项目的系列研究成果将对我国类似隧道工程的建设与营运管理提供重要的技术参考，具有显著的社会效益。

九、其它需要说明的问题

十、申请单位意见

本单位支持“公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究”项目的立项申报，并将为该项目的实施提供必要的依托工程和经费保障。



单位负责人 (签字)

年 月 日

公路隧道排水系统失效机理及综合治理

关键技术研究

大纲评审意见

2026年3月18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“公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究”（项目编号：25-21K）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、项目研究内容比较全面，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.加强调研资料的收集和梳理，进一步研究技术的适用范围；

2.聚焦研究内容，优化经济技术指标，明确量化方法；

3.项目名称调整为“公路隧道排水系统结晶堵塞失效机理及综合治理关键技术研究”。

主任委员： 

2026年3月18日

专家审查意见表

项目名称	公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究				
专家姓名	韦虎	职务/职称	正高级工程师	专 业	隧道与地下工程
专家单位	陕西省交通规划设计研究院有限公司			联系电话	13909260723

评 审 意 见

该项目研究大纲选题具有重要的理论意义和应用价值，研究目标明确，内容完整，重点突出，技术路线清晰可行，研究方法科学合理，进度安排与预期成果符合项目要求。

同意通过大纲评审

意见与建议

1. 充分吸收前期科研成果，重点研究多因素条件下的治理技术；
2. 本项目重点研究的是隧道排水系统结晶堵塞失效，是排水系统失效的重要原因。项目名称可重点聚焦于结晶堵塞；
3. 根据研究成果，形成隧道排水系统防堵塞的设计标准；
4. 建议编制地方标准或中建标公路分会行业标准。

评审专家（签字）：



2026年3月18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	公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究				
专家姓名	李宗华	职务/职称	正高工	专 业	交通运输
专家单位	陕西西韩城际铁路有限公司			联系电话	15029929222

评 审 意 见

本课题通过攻克“公路隧道排水系统失效致灾机制”关键问题研究，拟解决“隧道排水系统失效检测技术”、“排水系统失效防治技术”两大技术难题，最终形成隧道排水系统防治标准化设计。该研究成果对完善公路隧道排水系统堵塞失效及灾变理论分析，以及解决隧道排水系统失效问题具有一定的意义，研究的必要性强。课题组前期调研比较充分，工作基础扎实，研究内容全面，技术路线清晰，方案合理可行。人员结构合理，依托工程结合较好，计划进度安排合理，预期目标明确，社会经济效益显著。

建议：

- 1、在前期可研及工作基础中，充分调研我省陕南地区典型隧道排水系统失效致灾案例及相关处置技术，为开展下部研究提供实践支撑；
- 2、在前期可研及工作基础中，补充排水系统不规范施工及质量检测不到位或缺项等方面问题研究；
- 3、针对隧道排水系统病害研究，进一步明晰功能性病害和结构性病害类别以及因果关系，实现有目的性的开展病害形成机理研究和有针对性的解决致灾病害源头。

评审专家（签字）：



2026年3月18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	公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究（项目编号：25-21K）				
专家姓名	卜东平	职务/职称	正高级工程师	专 业	土木工程
专家单位	中铁一局集团有限公司			联系电话	18991319680

评 审 意 见

一、总体评价

项目选题紧扣陕西省公路隧道养护痛点，符合交通强国及省“十四五”科创规划方向。研究团队产学研用结构合理，依托工程明确、研究团队具备相关技术积累，技术路线总体可行，综合评定为基本合格。

二、存在主要问题

1. 绩效指标体系不完整，效果类指标未量化，人才引育、产业化等指标为空白；
2. 成果转化与推广方案无具体步骤、应用单位及转化模式；
3. 标准化设计未明确与现行国/省标衔接要求及验证评审计划；
4. 经费预算部分明细无量化依据，计提标准不明确；
5. 缺失风险分析与应对措施模块，违反资料完整性要求；
6. 未明确科研诚信承诺，监督可追溯节点及方式不足；
7. 隧道排水系统失效检测与防治指南编制要求、核心框架未明确，

评审专家（签字）：

2026年3月18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	25-21K 公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究				
专家姓名	许崇帮	职务/职称	正高	专 业	隧道工程
专家单位	交通运输部公路科学研究院			联系电话	15120081075

评 审 意 见

项目大纲编制详细，研究内容设置全面，技术路线基本可行。主要问题与建议：

（1）应进一步明确专题一 公路隧道排水系统失效影响因素及致灾机制研究中“隧道排水系统失效影响因素及堵塞模型研究”与已有研究成果的差异性，聚焦研究工程场景。

（2）进一步明确研究中所指排水系统是指 中心排水管还是包括纵向盲管、横向盲管的所有排水系统，并分析在工程环境下的可行性。

（3）排水系统失效程度与降雨强度耦合作用结构安全风险研究，研究点十分好，研究需要进一步结合隧道工程地质环境、埋深及地形地貌等因素综合分析。

（4）基于排水系统失效的隧道检测体系研究，该部分的内容应进一步细化，现有阐述内容较为笼统。

（5）技术路线应给出整个研究项目的路线图，不宜单个研究点给出。

评审专家（签字）：许崇帮

2026 年 3 月 18 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	公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究				
专家姓名	王明年	职务/职称	教授	专 业	隧道工程
专家单位	西南交通大学			联系电话	13808029798

评 审 意 见

一、总体评价

项目研究内容全面，思路清晰，方法正确。达到了评审要求。

二、建议

1. 进一步加强不同时代运营隧道排水系统现场调研？

2. 明确有关技术经济指标的可考核性？

评审专家（签字）： 王明年

2026 年 3 月 18 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究 (项目编号: 25-21K)

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	韦虎	陕西省交通规划设计院有限公司	桥梁工程	隧道与地下工程	正高级工程师	韦虎
2	委员	李宗华	陕西西韩城际铁路集团公司	交通运输	公路工程 铁路工程	正高级工程师	李宗华
3	委员	卜东平	西安建工集团	桥梁工程	桥梁工程	正高级工程师	卜东平
4	委员	许崇帮	交通运输部公路科学研究所	隧道工程	隧道工程	正高级工程师	许崇帮
5	委员	王明年	西南交通大学	隧道工程	隧道工程	教授	王明年

专家意见处理表

项目名称：公路隧道排水系统失效机理及综合治理关键技术研究（项目编号：25-21K）

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	韦虎	1、充分吸收前期科研成果, 重点研究多因素条件下的治理技术; 2、本项目重点研究的是隧道排水系统结晶堵塞失效, 是排水系统失效的重要原因。项目名称可重点聚焦于结晶堵塞; 3、根据研究成果, 形成隧道排水系统防堵塞的设计标准; 4、建议编制地方标准或中建标公路分会行业标准。	项目组已充分吸纳前期相关科研成果。鉴于本项目通过政府公开采购程序立项, 项目名称无法调整; 后续将结合研究大纲, 进一步聚焦隧道排水系统结晶堵塞失效这一核心问题, 重点开展多因素耦合条件下的治理技术研究; 同时, 依据研究成果凝练形成隧道排水系统防堵塞设计标准, 并积极推进地方标准或中建标公路分会行业标准编制。
2	李宗华	1、在前期可研及工作基础上, 充分调研我省陕南地区典型隧道排水系统失效致灾案例及相关处置技术, 为开展下部研究提供实践支撑; 2、在前期可研及工作基础上, 补充排水系统不规范施工及质量检测不到位或缺项等方面问题研究; 3、针对隧道排水系统病害研究, 进一步明晰功能性病害和结构性病害类别以及因果关系, 实现有目的性的开展病害形成机理研究和有针对性的解决致灾病害源头。	项目组将充分吸收专家意见, 在前期可研及既有工作基础上, 进一步加强我省陕南地区典型隧道排水系统失效致灾案例及相关处置技术的调研分析, 为后续研究提供工程实践支撑; 同时, 补充排水系统不规范施工、质量检测不到位及关键检测项目缺陷等问题研究, 进一步完善对排水系统失效成因的认识; 在此基础上, 围绕隧道排水系统病害, 进一步厘清功能性病害与结构性病害的类别划分、演化过程及因果关系, 从而有针对性地开展病害形成机理研究, 并为致灾病害源头识别与精准防控提供依据。
3	卜东平	1、绩效指标体系不完整, 效果类指标未量化, 人才引进、产业化等指标为空白; 2、成果转化与推广方案无具体步骤、应用单位及转化模式; 3、标准化设计未明确与现行国/省标衔接要求及验证评价。	项目组已充分吸收上述意见, 后续将对项目申报内容系统完善: 一是进一步健全绩效指标体系, 补充并量化效果类指标, 同时完善人才引进、成果转化、产业化应用等相关考核内容; 二是细化成果转化与推广方案, 明确实施步骤、应用依托单位及成

		审计划; 4、经费预算部分明细无量化依据, 计提标准不明确; 5、缺失风险分析与应对措施模块, 违反资料完整性要求; 6.未明确科研诚信承诺, 监督可追溯节点及方式不足; 7.隧道排水系统失效检测与防治指南编制要求、核心框架未明确。	果转化模式, 增强成果落地路径的可操作性; 三是围绕隧道排水系统防堵塞标准化设计, 进一步明确与现行国家标准、行业标准及省级标准的衔接关系, 并补充验证、评审及完善计划; 四是完善经费预算编制依据, 细化相关费用明细, 明确计提标准与测算基础; 五是补充项目风险分析与应对措施, 完善全过程风险识别、预警与管控内容; 六是补充科研诚信承诺, 明确项目实施过程中关键节点的监督机制、记录方式及责任追溯路径; 七是进一步明确《隧道排水系统失效检测与防治指南》的编制要求、适用范围和核心框架, 使项目成果形式与研究内容保持一致并具备实施支撑。
5	许崇帮	1.应进一步明确专题一 公路隧道排水系统失效影响因素及致灾机制研究中“隧道排水系统失效影响因素及堵塞模型研究”与已有研究成果的差异性, 聚焦研究工程场景。 2.进一步明确明确研究中所指排水系统是指 中心排水管还是包括纵向盲管、横向盲管的所有排水系统, 并分析在工程环境下的可行性。 3.排水系统失效程度与降雨强度耦合作用结构安全风险分析, 研究点十分好, 研究需要进一步结合隧道工程地质环境、埋深及地形地貌等因素综合分析。 4.基于排水系统失效的隧道检测体系研究, 该部分的内容应进一步细化, 现有阐述内容较为笼统。 5.技术路线应给出整个研究项目的路线图, 不宜单个研究点给出。	项目组已充分吸收专家意见, 后续将进一步优化研究内容与技术路线: 一是针对“隧道排水系统失效影响因素及堵塞模型研究”, 进一步梳理其与已有研究成果的差异性, 突出本项目面向运营公路隧道实际工程场景开展研究的特点, 增强研究对象、方法和成果的工程针对性; 二是进一步明确本项目所指排水系统的具体范围, 重点界定中心排水管、纵向盲管、横向盲管等不同排水构件之间的研究边界及相互关系, 并结合工程应用条件分析其研究与实施的可行性; 三是对排水系统失效程度与降雨强度耦合作用下的结构安全风险研究, 进一步纳入隧道工程地质环境、埋深条件、地形地貌及地下水补给等因素进行综合分析, 提高风险研究的工程适用性; 四是对基于排水系统失效的隧道检测体系研究内容作进一步细化, 明确检测对象、检测项目、检测方法、数据分析与评价流程, 提升体系构建的完整性和可实施性。

5	王明年	1. 进一步加强不同时代运营隧道排水系统现场调研? 2. 明确有关技术经济指标的可考核性?	项目组将进一步加强不同时代运营公路隧道排水系统现场调研, 补充典型案例与工程数据支撑; 同时完善技术经济指标体系, 明确量化考核内容、成果形式及验证方式, 提升项目考核指标的可操作性和可检验性。
---	-----	---	--

大纲评审委员会专家 (签字): 李虎

李崇

项目负责人 (签字): 王波