

项目合同编号：25-32K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究

承担单位：长安大学

项目负责人：周志军

通讯邮编、地址：西安市碑林区文艺南路长安大学

传真、电话：13572501221

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：25-32K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究

承担单位：长安大学

项目负责人：周志军

通讯邮编、地址：西安市碑林区文艺南路长安大学

传真、电话：13572501221

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

(1) 渭河流域公路桥梁裸露桩基病害检测及耐久性评估

研究内容：渭河流域裸露桩基检测方法、病害类别、病害程度、评估指标权重、耐久性评估方法等。

(2) 渭河流域在役公路桥梁桩基竖向剩余承载力研究

研究内容：河床下切后桩基竖向剩余承载力、桩身有效截面（缩径或扩径）对桩基竖向承载力的影响、桩身倾斜对桩基竖向承载力的影响、桩顶偏心荷载对桩基竖向承载力的影响。

(3) 渭河流域在役公路桥梁桩基水平剩余承载力研究

研究内容：裸露部分桩基（系梁）水平作用力；不同病害条件下裸露桩基水平承载力。

(4) 沙王渭河大桥桩基础加固措施

研究内容：渭河流域内桩基结构形式；桩基加固措施；新建桥梁桩基设计建议。

2.技术关键

(1)考虑冲刷条件下桩侧土体应力变化桩基竖向剩余承载力计算方法

冲刷作用会显著改变桩周土体的应力分布，尤其是侧摩阻力的衰减。冲刷深度与桩侧摩阻力呈非线性关系：随着冲刷深度增加，侧压力对摩阻力的主导作用逐渐减弱，且敏感性降低，改变桩侧摩阻力分布，从而影响竖向承载力。因此开展考虑冲刷条件下桩侧土

体应力变化桩基竖向剩余承载力计算方法研究有很大意义。

(2)考虑冲刷深度及桩基耐久性损伤等因素时桩基水平剩余承载力计算方法

桩基在冲刷作用下导致的耐久性损伤会进一步削弱桩基性能，尤其是在冲刷加剧的环境下，混凝土保护层脱落及钢筋锈蚀等因素都会不同程度的降低桩身强度，如何建立冲刷深度—保护层脱落—钢筋锈蚀—水平承载力演化模型，得到综合耦合剩余水平承载力计算方法。

3.依托工程（依托工作）

G108 国道 K1231+586 沙王渭河大特桥位于渭清公路(渭南—固市)渭南市境内(图 6-1)，桥梁全长 2294 米，上部结构采用 $5 \times (7 \times 30) + (6 \times 30) + 5 \times (7 \times 30)$ 米连续箱梁(见图 6-2)，下部结构采用双柱式桥墩、北岸桥台采用锚杆双柱式框架桥台、南岸桥台为钢筋混凝土柱式框架 与加筋土挡墙组合式桥台、钻孔灌注桩基础。该桥建成于 1994 年，桥面宽度为：0.5 米(防撞护栏)+11.0 米(桥面净宽)+0.5 米(防撞护栏)=12.0 米，桥梁设计荷载等级为汽车-超 20 级，挂车-120。

项目组将针对该桥桩基进行系统调查，统计桩基病害类型，建立桥梁桩基耐久性评估模型，提出不同病害组合条件下剩余承载力计算方法，指导沙王渭河大桥桩基加固设计。

二、考核指标

1.预期目标

(1) 根据沙王渭河大桥桩基病害调查结果,利用变权理论修正权重指标,基于层次分析法建立沙王渭河大桥桩基耐久性评估模型;

(2) 针对沙王渭河大桥河床地面线高于设计最大冲刷线的在役公路桥梁桩基,提出不同病害组合条件下桩基剩余承载力计算方法。

2.主要技术经济指标(具体的技术经济参数)

(1) 针对沙王渭河大桥不同冲刷深度及桩身损伤条件下钻孔灌注桩,按照相似比开展至少 6 根模型桩承载力试验;

(2) 基于校准后的数值模型,设计至少 30 组竖向及水平受力仿真工况,全面覆盖沙王渭河大桥实际可能出现的冲刷与病害组合场景;

(3) 结合沙王渭河大桥桩基典型病害,引入针对性修正系数,对传统桩基竖向及水平承载力计算公式进行优化,构建沙王渭河大桥裸露桩基剩余承载力估算模型。

3.经济和社会效益

渭河流域公路桥梁桩基普遍存在河床下切、混凝土侵蚀及钢筋锈蚀等病害,为保证桥梁的正常运营,养护部门针对不同冲刷条件下的桥梁桩基进行了加固与维修。由于渭河河床不断迁移及降水带北移等原因,渭河流域桥梁部分桩基冲刷深度加大,加固工作重复持续开展。通过本课题研究,可从建设和运营两个阶段提出设计建议:

(1) 新建公路桥梁桩基设计与施工时,应采用经济有效的措施提高最大冲刷线以上灌注桩钢筋保护层混凝土强度,以抵抗长期的水流冲刷破坏作用,从而降低运营过程桥梁桩基的加固维修费用。其次,考虑渭河流域河床的持续迁移,按照最大冲刷线开展桥梁桩基的承载力及抗震性能设计,提高桥梁桩基安全储备,减少加固维修工作,降低了桥梁结构全寿命周期内工程造价,保持了交通运输的顺畅,经济和社会效益显著。

(2) 针对渭河在役桥梁已经存在病害的桩基,开展剩余承载力研究,提出考虑不同冲刷条件时灌注桩剩余承载力计算方法,根据剩余承载力给出相应的加固措施建议,指导该地区公路桥梁桩基加固设计。

4.成果提供形式

(1) 调研报告——沙王渭河大桥桩基病害现状及耐久性评价报告

(2) 研究报告——在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究

(3) 技术指南——沙王渭河大桥桩基设计与加固技术指南

(4) 研究成果达到国内领先水平,在国内外核心学术期刊上发表论文 1~2 篇,申请国家专利 1 项。

5.其他考核指标

(1) 培养工程技术人员 3-5 名;

(2) 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 3 月 至 2026 年 8 月	对沙王渭河大桥桩基进行现场考察，并开展桩基耐久性评估，完成沙王渭河大桥附近的勘探取样工作， 阶段目标：沙王渭河大桥大桥桩基耐久性评估报告
2026 年 9 月 至 2027 年 2 月	考虑冲刷深度、保护层混凝土侵蚀及钢筋锈蚀程度等主要因素，开展桩基竖向及水平承载力模型试验及数值分析。 阶段目标：不同病害组合下模型试验及数值分析报告
2027 年 3 月 至 2027 年 8 月	结合渭河流域公路桥梁桩基损伤的主要影响因素，开展桩基竖向及水平剩余承载力理论研究，提出竖向和水平剩余承载力计算方法，并对依托工程进行算例分析。 阶段目标：考虑不同病害组合条件下桩基剩余承载力计算方法
2027 年 9 月 至 2028 年 2 月	结合沙王渭河大桥桩基，开展剩余承载力评估，并提出相应的防治对策；整理研究资料，申请课题验收。 阶段目标：项目研究报告及沙王渭河大桥桩基设计与加固技术指南

四、项目经费

项目总经费:	40.00 万元
交通运输厅补助:	19.70 万元
自筹资金:	20.30 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	37	16.7
1. 设备费	2	2
(1) 购置设备费	1	1
(2) 试制设备费	0	0
(3) 设备改造与租赁费	1	1
2. 业务费	30	9.7
(4) 材料支出	1	1
(5) 测试化验实验加工支出	2	2
(6) 燃料及动力支出	2	2
(7) 差旅支出	1	1
(8) 会议支出	1.7	1.7
(9) 国际合作与交流支出	1	1
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	1	1
(11) 其他支出 (依托工程设计与加固)	20.3	0
3. 劳务费	5	5
(12) 劳务性支出	3	3
(13) 咨询专家支出	2	2
(二) 间接费用	3	3
4. 管理费	2	2
5. 绩效支出	1	1
合 计	40	19.7

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）	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	1
	其他成果	1.填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	1
		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	
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		(1) 小试	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	是
		(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	带动在役桥梁桩基养护行业高质量发展
		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

(1) 长安大学负责课题研究大纲的制定及可行性报告编制工作，开展渭河流域桥梁桩基病害调查及耐久性评估、模型试验、数值分析及理论计算等方面的研究工作，整理研究成果，编制研究报告及技术指南，组织完成各个阶段项目评审工作。

(2) 西安公路研究院有限公司负责依托工程协调管理工作，参与渭河流域桥桩基病害调查及耐久性评估等现场测试工作，指导室内外试验及理论研究，审查课题研究成果，组织项目评审工作。

(3) 陕西交通建设养护工程有限公司参与研究大纲制定，落实依托工程，协调施工环节及机械组合，协助编制施工技术指南，审查研究成果，协助课题验收。

七、项目参加人员表

项目承担单位：长安大学 参与单位（排序）：陕西交通建设养护工程有限公司 西安公路研究院有限公司						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作
1	周志军	1975-01-06	长安大学	正高级	岩土工程	编制研究大纲，制定试验方案，负责项目进度及阶段成果审核，组织课题验收。
主要研究人员						
2	唐春	1976-01-07	陕西交通建设养护工程有限公司	高工	公路工程	研究方案审核，指导现场依托工程施工，编制技术指南
3	苗建宝	1987-10-05	西安公路研究院有限公司	正高	桥梁工程	协助制定研究方案，指导依托工程加固方案设计，审核技术指南
4	柯亮亮	1983-11-23	西安公路研究院有限公司	高工	桥梁工程	协助制定研究方案，指导依托工程加固方案设计，审核技术指南
5	王旭	1987-08-19	西安公路研究院有限公司	高工	桥梁工程	协助制定研究方案，指导依托工程加固方案设计，审核技术指南

6	魏进	1972-06-11	长安大学	副教授	岩土工程	编制研究方案及指导室内外试验，整理研究报告	魏进
7	王苗苗	1986-10-05	长安大学	副高级	岩土工程	研究大纲及试验方案编制，组织涂层材料开发及室内外试验，编制研究报告及技术指南。	王苗苗
8	任钊铎	2001-10-26	长安大学	助理级	岩土工程	参与现场调查及桩基耐久性测试	任钊铎
9	任展腾	2000-05-04	长安大学	助理级	岩土工程	参与现场调查及桩基耐久性测试	任展腾
10	李路	2002-04-27	长安大学	助理级	岩土工程	负责竖向承载力模型试验及数据处理	李路
11	赵袁	2002-02-27	长安大学	助理级	岩土工程	负责竖向承载力模型试验及数据处理	赵袁
12	陈伊喆	2002-08-20	长安大学	助理级	岩土工程	负责水平承载力模型试验及数据处理	陈伊喆
13	许慧	2000-05-20	长安大学	助理级	岩土工程	负责水平承载力模型试验及数据处理	许慧

八、信息表

项目合同编号		25-32K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部	
项目名称		在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究							
项目实施所在地		西安		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月			
总 经 费		40		厅 拨		19.70			
第一承担单位	单位名称	长安大学							
	所在地	陕西省西安市雁塔区					代码	610112	
	通讯地址	陕西省西安市碑林区文艺南路长安大学					邮编	710064	
	单位性质	(1) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	10710	
参与单位	序号	单 位 名 称							
	1	陕西交通建设养护工程有限公司							
	2	西安公路研究院有限公司							
	3								
项目负责人	姓 名	周志军		性 别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1975	
	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	13572501221		电子邮箱		5974100@qq.com			
项目联系人	姓名	王苗苗		性 别		女			
	联系电话	15202934216		电子邮箱		wmmcugb@163.com			
项目组人数	13	高级	7	中级		初级	6	其他	
主要研究内容 (100 字以内)	(1) 渭河流域公路桥梁裸露桩基病害检测及耐久性评估 (2) 渭河流域在役公路桥梁桩基竖向剩余承载力研究 (3) 渭河流域在役公路桥梁桩基水平剩余承载力研究 (4)) 渭河流域在役公路桥梁桩基础加固措施								
成果属性	E	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他							
成果形式	A、D	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他							

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

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

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

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

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

6.合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：陕西省交通运输厅

负责人：（签字）

联系人：（签字）

电 话：029-88869067

合同乙方：长安大学

单位负责人：（签字）

项目负责人：（签字）

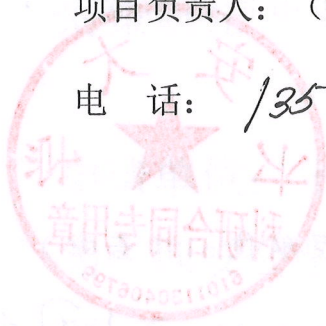
电 话：

财务负责人：（签字）

账 户 名：长安大学

开户银行：中国银行西安翠华路支行

账 号：102007335073



科研项目专用章

2026年 03月 31日

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：

周生

2026年 03月 31日

项目编号：25-32K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治
对策研究

申请单位：长安大学，陕西交通建设养护工程有限公司，
西安公路研究院有限公司

联系人：周志军

电 话：13572501221

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 项目研究背景	1
1.2 项目研究必要性	1
二、前期科研及工作基础	3
2.1 国内外研究现状	3
2.1.1 桩基耐久性评估研究现状	3
2.1.2 桩基竖向承载力研究现状	6
2.1.3 桩基水平承载力研究现状	10
2.1.4 桩基加固措施研究现状	11
2.2 工作基础	13
2.3 参考文献	18
三、实施方案	26
3.1 拟解决的关键问题	26
3.2 主要研究内容及实施方案	26
3.3 技术路线	41
3.4 后续技术改造	43
3.5 有关技术经济指标	43
四、项目承担单位及参加单位概况	44
4.1 单位概况	45
4.2 技术力量及人员构成	47
4.3 承担的主要工作	48
4.4 项目主要负责人情况	49
五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	49
5.1 依托工程概况	50
5.2 投资来源	51
5.3 工程进度与项目科研进度的配合	51
5.4 组织管理形式	51
六、项目经费估算及资金筹措情况	53

七、预期目标、成果提供形式及经济社会效益	54
7.1 项目预期目标	54
7.2 最终提交的研究成果及其形式	54
7.3 经济、社会、环境效益分析	54
八、申请单位意见	56

在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究

一、项目研究的背景和必要性

1.1 项目研究背景

截至 2023 年底，陕西省公路总里程达 187666.691 公里，其中等级公路里程 180094.845 公里，占总里程的 95.97%，公路桥梁 36098 座。其中跨越渭河桥梁有近四十余座，包括公路和铁路桥，消除了渭河的天然阻碍，促进了区域经济发展。

新构造运动及渭河南北两岸地质条件等因素导致渭河河道不断北移，其次河道内存在非法采砂活动，多种因素造成渭河河床持续下切、桩基裸露、承台抬高等现象，导致桥梁桩基出现保护层脱落、钢筋锈蚀、有效桩长减小、阻水面积增大等病害，从而影响桩基竖向、水平承载力及抗震性能。因此，为了保障桥梁的安全运行，维护交通网络的稳定运行，亟需对渭河流域在役桥梁进行桩基病害调查、剩余承载力评估及防治对策研究。



图 1.1 河床下切



图 1.2 钢筋外露

1.2 项目研究必要性

渭河发源于甘肃省定西市渭源县鸟鼠山，主要流经今甘肃天水、

陕西省关中平原的宝鸡、咸阳、西安、渭南等地，至渭南市潼关县汇入黄河，干流全长 818 公里。新构造运动及渭河南北两岸地质条件等因素导致渭河河道不断北移，其次河道内存在非法采砂活动，多种因素造成渭河河床持续下切、桩基裸露、承台抬高等现象，导致桥梁桩基出现保护层脱落、钢筋锈蚀、有效桩长减小、阻水面积增大等病害，从而影响桩基竖向、水平承载力及抗震性能。

课题组对陕西境内渭河桥梁进行了调研，部分桥梁基础形式采用单桩单柱，横向采用系梁连接。桩基主要普遍存在钢筋锈蚀、混凝土侵蚀及河床下切等病害，这些病害一定程度上影响到桥梁桩基结构的耐久性和安全性能。因此，为了保障桥梁的安全运行，维护交通网络的稳定运行，亟需对渭河流域在役桥梁进行桩基病害调查、剩余承载力评估及防治对策研究。

课题组将采用现场调研、数值模拟、模型试验及理论分析等手段针对渭河流域在役公路桥梁桩基进行系统研究，得出沙王渭河大桥桩基主要病害特征及耐久性现状，提出河床地面线高于设计最大冲刷线的在役公路桥梁桩基剩余承载力计算方法，从而为沙王渭河大桥改建或加固设计等方面给出切实有效的建议，确保沙王渭河大桥桩基耐久性得到进一步提升。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

2.1.1 桩基耐久性评估研究现状

上世纪八九十年代修建的桥梁已开始进入衰退期,水中桥梁桩基病害逐渐显露,水中桥梁桩基病害因其较隐蔽、危害性强、劣化速度快成为桥梁工程界关注的焦点,桥梁管养单位对水中桩基的健康状况日益重视,因此在桥梁状况分析过程中需要重点对桩基部分的耐久性进行评估。此前已有许多国内外学者针对研究桩基耐久性问题的重要性进行了探讨,杜斌(2006)在针对城市当中的旧桩基问题进行了探讨,分析了既有桩基问题产生的原因以及既有桩基评估的主要方面是耐久性问题^[1]。早在上个世纪 Ramey G E (1997) 就认为在桥梁工程中应该在桥梁规划和设计阶段的开始考虑耐久性的时间,并且通过查看各个桥梁子组件的耐久性性能可以更好地对重点领域进行更改和改进^[2]。此外 P.Kumar Mehta (2008) 回顾了上个世纪混凝土耐久性研究的历程与成果,也指出 21 世纪混凝土结构建设的重点不在强度上,而应该着眼于耐久性研究^[3]。桩基耐久性问题很大一部分原因与其所处的环境因素有关, Armaghani, Jamshid M(1993)则是通过介绍影响混凝土结构耐久性的自然环境影响因素,从而对桩基混凝土结构的耐久性开展研究^[4]。Miller.Maurice D (1995) 则是通过影响桥梁桩基的有关侵蚀因素,再基于对桥梁的全寿命调查分析的结果及桥梁的全寿命周期,对桩基耐久性开展研究^[5]。研究桩基耐久性的相关因素固然重要,但是桩基耐久性评估方法也是耐久性问题中的一大不可或

缺的关键点，王龙胜（2016）通过现场试验和室内试验的方法，对进行桩基进行检测，再基于检测得出的性能参数，结合数值分析采用相应的评估方法对既有桩基进行耐久性评估^[6]。Biondini F（2006）提出了一种对结构使用寿命的概率预测的一般方法，用于评估外部侵略性物质扩散攻击下的时变结构性能^[7]。Shao W（2018）提出了一种概率方法来评估钢筋混凝土管桩在氯化物环境下的寿命，并建立了一种预测模型，以估算管桩在氯化物环境下的概率寿命^[8]。

在对桥梁桩基耐久性开始评估之前，找出与之相对应的影响因素至关重要。与桥梁桩基耐久性相关的一个是桩基所处的环境因素，一个是桩基材料的物理性能因素。Ramey G E（1997）通过邮寄调查问卷以及采访实地考察的方式对阿拉巴马州公路桥梁恶化的性质、程度进行了分析，结果表明桥梁劣化的主要类型和原因是桥面接缝故障、排水不良、混凝土开裂/剥落、结构钢腐蚀、结构钢疲劳、桥台侵蚀、地基冲刷等等^[9]。Ko Y Y（2010）通过使用振动测量来评估桥梁基础冲刷的方式，从而评估桩基耐久性能^[10]。Reddy D V（2013）指出腐蚀损伤是混凝土海洋结构劣化的主要原因^[11]。张璐等（2009）针对在役混凝土结构的主要特征、损伤状况、破坏情形及其耐久性的基本特点，将混凝土构件耐久性评定指标分为定性指标和定量指标两大类，分析定性指标中的环境条件、钢筋锈蚀程度以及定量指标中混凝土碳化深度、混凝土保护层厚度、裂缝宽度、钢筋锈蚀量等影响混凝土构件耐久性的因数设计各指标的评定方法^[12]。

近年来,桥梁结构状态评估在桥梁领域逐渐成为一大研究热点,现在普遍采用的评估方法有层次分析法、模糊评价法、遗传算法和神经网络法。进入 21 世纪后,交通运输部相继颁布了相关的标准和规范,引导桥梁检测与评估朝着专业化、标准化的方向发展,如《公路桥涵养护技术规范》(JTG H11-2004)、《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/T H21-2011)、《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21-2011)。姜旭(2016)运用模糊层次综合评价的方法以及有限元软件法,建立了黄土沟谷地区桥梁桩基功能在水流冲刷作用下影响的安全评价体系,并对黄土沟谷地区桥梁桩基进行了安全评价,提出了与桩基损伤相对应的防护措施^[13]。叶培伦等(2000)通过分析混凝土桥梁的特点,基于层次分析法建立了混凝土桥梁的综合评估模型^[14]。郭红仙等(2002)通过对 30 座在役桥梁的现场调查、检测,建立了评估在役桥梁状态的多层次模型和方法,并对在役桥梁的耐久性进行了评估^[15]。项贻强等(2005)通过层次分析法,对各种影响在役桥梁安全评估的因素进行了划分,通过研究大跨度预应力混凝土斜拉桥,建立了进行安全性评估的多层次关系模型^[16]。黄侨等(2008)对在役混凝土桥梁进行耐久性评估时,通过引入不确定性型层次分析法,削弱了人的主观意识对评估指标权重的影响^[17]。庞丹丹(2011)在进行在役混凝土桥梁耐久性评估时,通过变权理论的引入,充分体现了评估指标权重修正对耐久性评估结果的影响^[18]。任更锋、徐岳等(2008)将层次分析法(AHP)应用于评估中以在役钢筋混凝土桥梁耐久性为评估目标确定以钢筋锈蚀、混凝土碳化、氯离子侵蚀、混

凝土最大裂缝宽度、混凝土质量和混凝土损伤为评估指标建立了评估模型^[19]。

对于已有桥梁桩基耐久性状态的评估问题，现代材料测试手段目前已取得长足进步，材料内部结构的 CT 透视、红外辐射成像技术、钢筋混凝土保护层检测仪等测试手段已开始得到应用通过实验手段观测在环境因素作用下桥梁桩基内部的缺陷已不困难^[20]。孙红艳

(2016) 也指出随着材料科学的进步，现有的检测水平不断提高因此通过这些先进的检测手段来寻找桩基内部的侵害和损伤已经不成问题，还可以将这些测试所得的数据整合统计，从不同影响因素的角度分析桩基耐久性能的相关规律，从而为既有桩基耐久性能的评估提供可靠依据^[21]。

综上所述，目前国内针对桥梁总体结构的评估较多，且具有完整、准确的评估进行预测。但针对桥梁桩基方面的耐久性评估内容不足，国内相关工作研究较少。根据现阶段已有的研究，已经掌握桥梁桩基耐久性能相关的影响因素，且对于已有桩基耐久性状态的评估问题，目前能够采用充足、高效的测试技术手段来获取桩基内部损伤参数，以此通过数据整合，结合桥梁结构现有的耐久性评估方法，总结出一套具有针对性、可行性的评估方案，对既有损伤桥梁桩基进行耐久性评估研究。

2.1.2 桩基竖向承载力研究现状

由于埋藏于水下地下公路桥梁桩基位置较为隐蔽，导致其不容易被人重视而容易被忽略，且桥梁桩基位置其服役环境远比一般环境要

恶劣得多,主要原因是受到硫酸盐及氯离子侵蚀、河流冲刷及物理受力因素的影响,导致桩基直径在一定范围内的减小,进而影响了桩基的竖向承载性能,对于桥梁安全性造成很大的危害。因此,主要从桩基耐久性方面对桩基竖向承载性能展开研究,这对今后既有损伤桥梁桩基的加固及承载力研究有很大意义。

(1) 试验研究

姚贤华^[43]以腐蚀环境下的公路桩基为背景,通过现场侵蚀试验、室内模型试验等手段,研究桩基处于盐环境下的力学特征变化。在微观层面,通过浸泡、干湿冻融等试验,得到不同侵蚀环境下的混凝土抗腐蚀参数。在宏观层面,通过桩身侵蚀深度、混凝土剥落厚度、钢筋锈蚀率等评价指标,对不同锈蚀程度的桩基承载特性进行估计。

李荣翔^[45]选择 5 倍的海水浓度进行耐久性试验,并对浸泡后的 CFRP 复合桩进行室内模型试验,研究钢筋混凝土桩和 CFRP 复合桩受氯离子侵蚀后的承载性能及耐久性变化。

崔延卫^[49]进行了室内透明土模型加载试验,得到了桩荷载-沉降曲线。通过数据处理,得到承台沉降 4mm(极限承载力)时的桩周土体位移场。研究了缩径轴向尺寸和径向尺寸对承载力和桩周土体变形的影响规律,给出了承载力的变化原因。

孙宗训^[50]进行了室内单桩模型试验,并结合有限元数值模拟方法,来研究缩径桩的竖向承载特性,分析缩径桩的受力机理。

尹双越^[60]通过分析实际工程中嵌岩桩的桩基竖向承载力,研究了河床下切对桥梁承载能力的影响,分析得出河床下切后,对于嵌岩桩

的竖向承载力和轴向抗压承载力影响不大,并提出沉井加固法可以有效防止桩基受冲刷侵蚀,增大桩基承载截面面积,提高其稳定性。

(2) 数值分析研究

姜旭^[41] (2016) 运用有限元软件 MIDAS/GTS, 对水流冲刷的过程进行数值模拟, 比较不同冲刷深度下桩基位移、轴力、桩侧摩阻力、桩身弯矩及转身剪力的变化规律, 并分析得出了不同桩长、不同桩径、不同坡度下, 水流冲刷深度的变化对桩基竖向极限承载力的影响规律。

韩星^[42] (2018) 通过透明土室内模型试验, 对 2 组完整 (承台) 单桩和 54 组缩径 (承台) 单桩进行竖向分级加载, 试验结果表明: 缩径会改变桩的承载力, 且增大桩顶沉降值; 随着缩径径向尺寸减小, 承载力随之减小; 随着缩径轴向尺寸增大, 承载力随之减小; 缩径位置对无承台单桩和带承台单桩承载力的影响存在明显差异, 对于无承台单桩, 缩径位置对承载力影响程度为中部缩径>浅部缩径>深部缩径, 而对于承台单桩, 影响程度为浅部缩径>中部缩径>深部缩径。

王富春^[44]等以有限元软件为主要研究手段, 采用一种新方式来评价桩基腐蚀问题, 将腐蚀试验中的材料参数 (混凝土剥落厚度) 输入有限元软件, 以此来模拟不同锈蚀程度对桩基的承载特性影响。

樊亚龙^[46]利用 ABAQUS 有限元分析软件, 对不同通电时间后的桩基承载特性进行模拟, 同时对不同含盐量对桩基竖向承载力的影响程度进行模拟, 在有限元模型建立时, 选取不同腐蚀时期后的桩身参数以及不同盐含量土体的物理力学性质作为模拟依据。

马希和等^[47]以海水环境中钢筋混凝土桥桩基为例,利用结构分析软件 ANSYS 中模块先进的非线性功能进行钢筋混凝土桥梁桩基的非线性有限元分析,模拟了保护层混凝土剥蚀、钢筋锈蚀现象下桩基竖向极限承载力的变化规律。

吴少峰^[48]采用 Midas Civil 有限元软件对河床冲刷和混凝土冲蚀病害对桩基承载力的影响进行数值分析,结果表明河床冲刷线及混凝土冲蚀对桩基竖向承载力影响较小,水平承载力影响较大,桩基仍处在安全状态。

郑扬^[51]基于有限元仿真方法对腐蚀前、后桥梁桩基础进行建模,分析相关盐类腐蚀桩身混凝土,剥落厚度与桩身受腐深度的变化情况下,桥梁桩基础的竖向承载力特性及其变化规律。

王鼎在《沟谷地形桩基竖向极限承载力评价方法研究》^[61]中,研究了沟谷地形桥梁桩基的受力机理,运用 FLAC3D 建立了水流冲刷有限元模型,分析了水流冲刷对桩基竖向极限承载力的影响。

王楠等^[62]通过利用改变单元的生死属性的方法,建立了桩基周围土体水流冲刷过程的有限元模型,研究了在水动力条件变化的情况下,水流冲刷作用对桩基竖向承载力的影响。结果表明:当桩靴设置在表层粉土较厚的位置时,水流冲刷作用下桩基的承载能力降低得比较明显。

张帆^[63]通过计算和数值模拟,分析了山洪冲刷桩基周围土体后桩基竖向极限承载力的变化规律,建立山洪发生后桩基竖向承载特性的计算公式,分析了在不同工况下山洪冲刷对陡坡桥梁桩基竖向承载特

性的影响。

目前针对一般桥梁桩基础在河床下切影响下的竖向承载力研究缺乏,大部分研究方向是针对桩体在收到外部侵蚀环境下导致的缩径问题。随着越来越多的桥梁桩基础由于河床下切导致出现了很多安全性问题,为此不得不更加注重这一影响因素的研究。

2.1.3 桩基水平承载力研究现状

姚贤华^[56]通过分析高寒盐沼泽区干湿循环、冻融循环下的桥梁桩基因桩体腐蚀长度、腐蚀厚度、脱落厚度和纵向钢筋面积损失率等因素对公路桥梁桩基承载力的影响程度,提出了桩体脱落的厚度是公路桥梁桩基水平向承载力的主要影响因素,当桩体脱落厚度大于 16cm 时,公路桥梁水平向极限承载力将大幅降低。

李荣翔^[57]通过室内大型模型试验对 CFRP 复合桩基及钢筋混凝土桩基在不同腐蚀时间下,开展水平承载力特性的变化规律研究,试验表明随着腐蚀时间的增加,两类桩基础的水平承载力都出现了明显的降低。

王明明^[58]针对开口管桩开展了室内单桩水平循环加载试验及颗粒流 PFC 软件数值模拟研究,模拟了海上风电单桩基础在收到波浪、水流等动荷载作用下的承载力变化过程,试验和数值模拟研究结果均表明桩基的水平割线刚度和水平极限承载力随着加载周期的增加而减小。

汤虎在《冲刷对海洋平台桩基水平承载性能影响的研究》^[59]中,以文克尔地基梁理论的 P-Y 曲线法为依据,对水平荷载作用下的单桩

变形进行了探讨；并运用有限元软件 FLAC3D 建立了桩基水流冲刷过程的模型，分析了桩基在冲刷的初始阶段和冲刷的极限阶段两种情况下水平承载性能的变化规律，说明了冲刷对桩基的水平极限承载力有着非常大的影响。

目前，针对桥梁桩基在病害损伤条件下的研究分析较少，对于河床冲刷下的桩基水平承载力研究更少，且大部分为数值模拟研究，缺乏现场试验研究成果。

2.1.4 桩基加固措施研究现状

桥梁基础是桥梁下部结构的重要组成部分，其与地基相连，将桥梁上部的恒载及活载直接传递到地基，一旦基础发生病害，将直接影响桥梁安全。及时了解桥梁基础工作状态，探明桥梁基础病害类型、位置及损伤程度，并进行维修加固，保障桥梁工程安全运营，具有重要意义。桩基加固技术近年来在国内外已取得长足发展，一些新型实用的加固技术日趋成熟，已应用在实际的工程中，并取得了理想的效果^{【42-44】}。

针对群桩有效桩长缩短的问题 Cunha.Renato P (2010)，通过将不同桩长、直径、刚度的补强桩的特性和初始未损伤的桩进行对比，找出最优的参数，达到加固的目的，并分析了加固后的群桩土体作用机理^{【45】}。魏洪昌（2006）采用增补桩基加固法通过在原有桩基础的周围补加钻孔灌注桩或打入预制桩并扩大原有承台，从而提高地基承载力、增强基础稳定性。有效的解决由于水蚀、水流冲刷等原因引起的桩基外露或倾斜这一类问题^{【46】}。丘伟（2003）通过采用钢板护筒

明挖方式对广韶线流溪河大桥桩基进行加固补强,这种方式有效解决了由于河床水流冲刷而引起的桩头漏筋和锈蚀等问题,桩身补强加固后受力合理,桩基的稳定性和承载力得到大幅度提高,有效的防止水流对桩基的进一步侵蚀^[47]。相同的加固方式还有刘国生(2023)依托某现役公路桥梁工程,采用新增桩基加承台、桩基及立柱增大截面的措施进行加固,提高了桩基承载能力的安全储备,优化了群桩基础的受力状态,确保了结构受力安全。该桥梁桩基加固技术安全可靠,可为同类型工程提供一定参考^[52]。对于桥墩倾斜开裂、桩基不均匀沉降等问题,杨勇(2010)采用高压旋喷钢管桩技术进行桩基加固,此技术的显著优点在于能够很好的改善土体的受力性能,从而有效地提高桩基承载能力,解决了倾斜开裂和不均匀沉降等桩基病害。此法对于同类桥梁桩基加固具有借鉴意义^[48]。陈友杰(2013)以工程背景为某大桥双柱式桥墩受损桩基补强加固,在文中提出了几种桩基加固非对称布置方案,并采用空间非线性有限元分析了各方案的受力特性。在非对称加固方案中,构件计算长度、桥墩内力重分布、偏心距增大系数与桥墩纵向水平刚度的变化有关,进行了重点分析,在分析过程中考虑刚度折减,该研究成果对于类似加固设计工程提供参考^[49]。练广龙(2014)以实际工程为例,分析桩基病害,通过验算判断桩基状况,并运用外包混凝土加固法对冲刷受损的桩基进行加固,使桩基承载力重新满足要求^[50]。针对一些比较复杂的桩基环境条件下,加固措施的实施比较困难且成本高昂,玻纤套筒加固技术能够有效解决这一问题,玻纤材料可以在水下施工且无须拆除,施工方便、

施工工期短。钟明（2023）就以钦东高速公路西江大桥水下桩基耐久性病害修复工程为例，研究了玻纤套筒加固技术在桥梁水下桩基耐久性病害修复中的优势，且结果表明通过该技术可以有效提升水下桩基混凝土被冲刷腐蚀缩颈后桩基承载能力^[51]。

综上所述，现阶段有关桥梁桩基加固方面的研究内容比较充分，主要关键技术包括桩身补强加固法、静压注浆加固法、高压喷射注浆加固法、增补桩基加固法这几种。在实际工程当中，应该对具体工程实例展开分析研究，因地制宜，按照桩基加固原则设计相对应的加固方案，从而应对桩基耐久性及承载力病害，有效提高桩基使用寿命年限。

2.2 工作基础

课题组由长安大学、陕西交通建设养护工程有限公司、西安公路研究院有限公司等单位组成，项目组成员共计 26 名，其中正高工 2 名，高级工程师 4 名，具有丰富的桥梁设计、科研及施工等方面的工作经验，能够保障本课题的顺利实施。项目组通过前期研究，已经开展过桩基损伤与剩余承载力评估及防治相关研究工作。主要工作基础如下：

（1）渭河流域陕西境内公路桥梁桩基现状调查

主要包括沙王渭河大桥（图 2.1）、乐天大街渭河大桥（图 2.2）、阎新路渭河大桥（图 2.3）、渭河河堤路石川河桥（图 2.4）四座渭河大桥，检测指标包括钢筋锈蚀（图 2.5）、保护层厚度（图 2.6）、混凝土强度（图 2.7）、混凝土碳化深度（图 2.8）、桩基外露长度

(图 2.9) 等。根据调查结果, 针对渭河在役损伤桥梁桩基础耐久性进行评估工作, 采用定性和定量相结合的层次分析评估体系, 对桩基础结构的材料和损伤程度进行评估, 从而来判断其在指定的目标使用年限之内能否继续满足耐久性和安全性的要求。

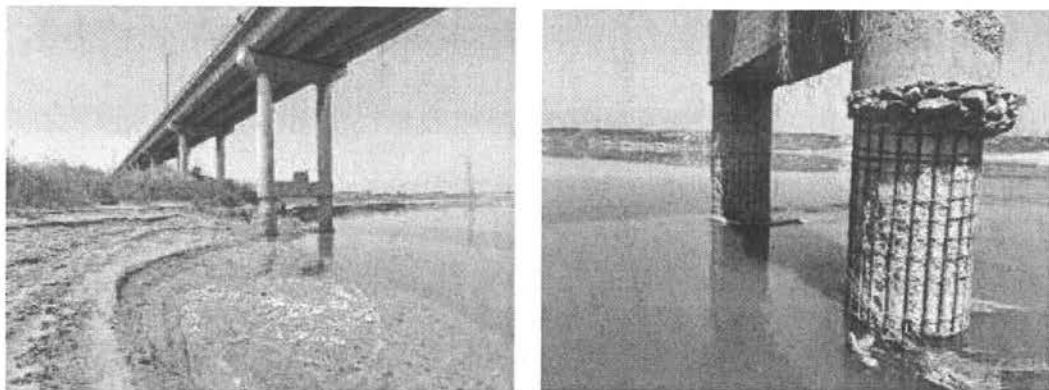


图 2.1 沙王渭河大桥

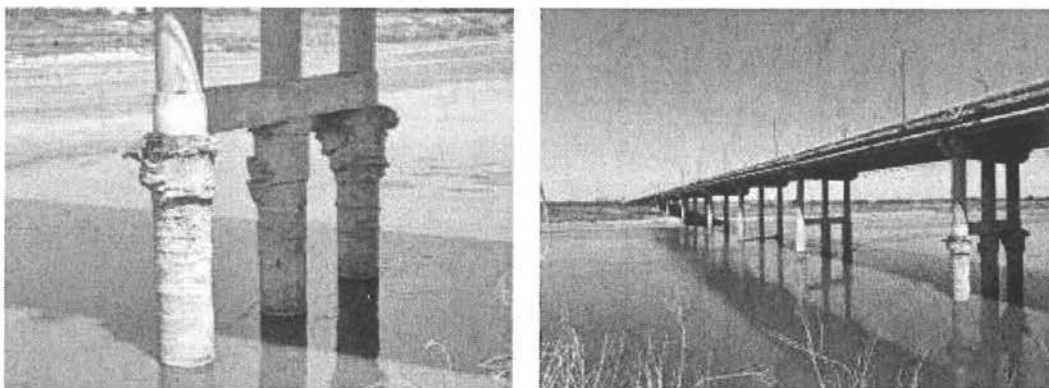


图 2.2 乐天大街渭河大桥

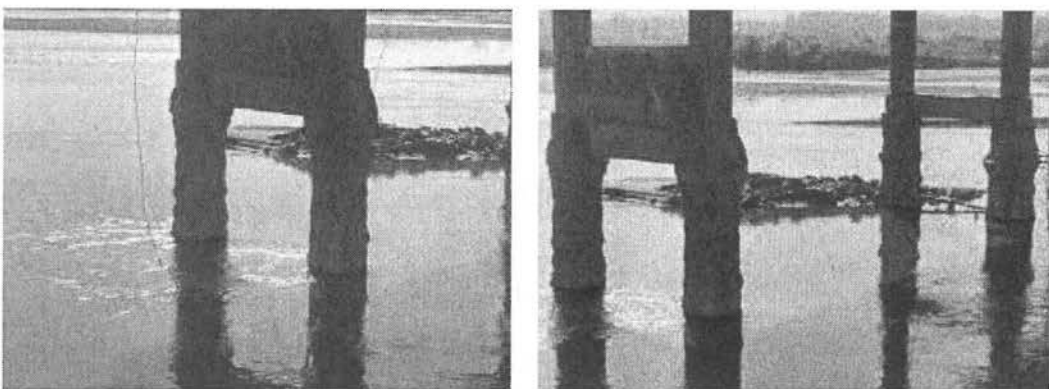


图 2.3 阎新路渭河大桥



图 2.4 石川渭河大桥



图 2.5 钢筋锈蚀



图 2.6 保护层厚度

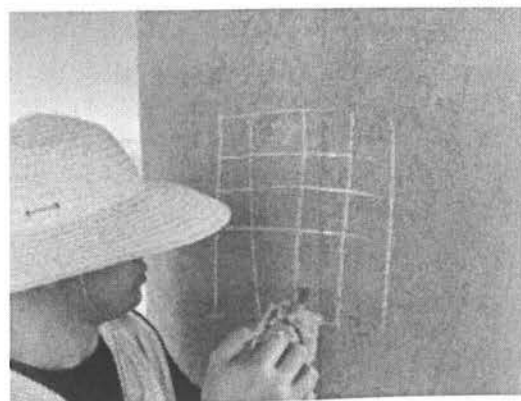


图 2.7 混凝土强度

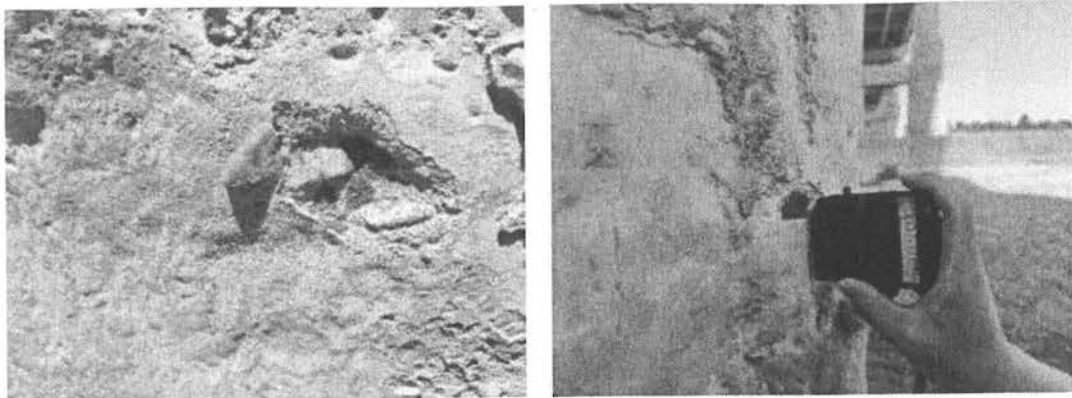


图 2.8 混凝土碳化深度

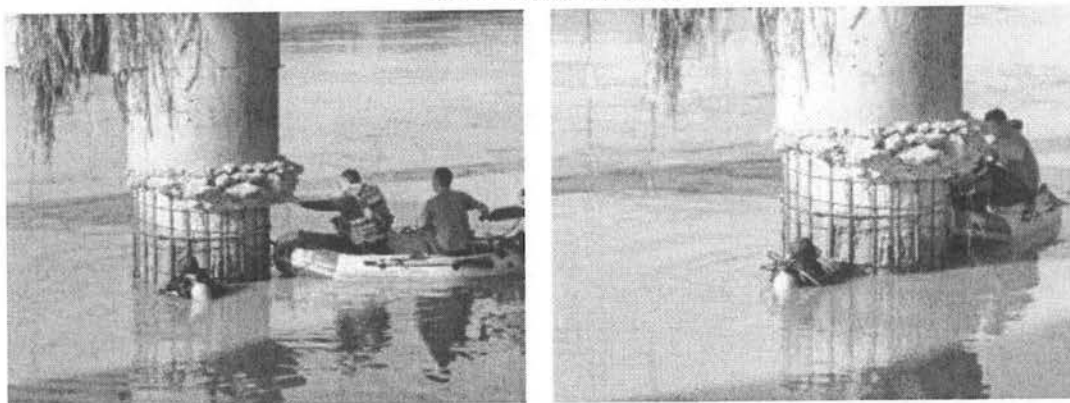


图 2.9 桩基外露

(2) 在役桥梁裸露段桩基三维建模

采用 Trimble SX10 扫描仪对目标结构进行三维扫描，得到高精度的点云数据，借助后处理软件和逆向建模软件对病害桩的点云数据进行重构，得到三维实体模型；采用有限元软件分析不同桩身结构参数和病害参数对裸露段桩基竖向剩余承载力的影响规律，建立了剩余承载力预测模型。



图 2.10 SX10 三维激光扫描仪现场扫描

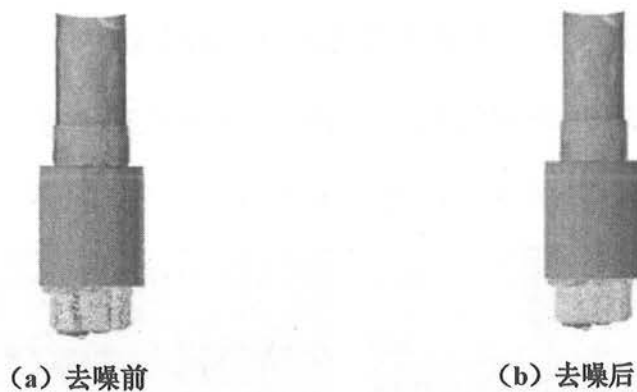


图 2.11 桩点云去噪前后对比图

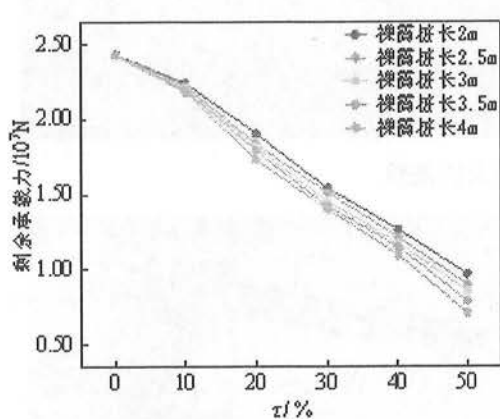


图 2.12 缩径比对桩身剩余承载力的影响

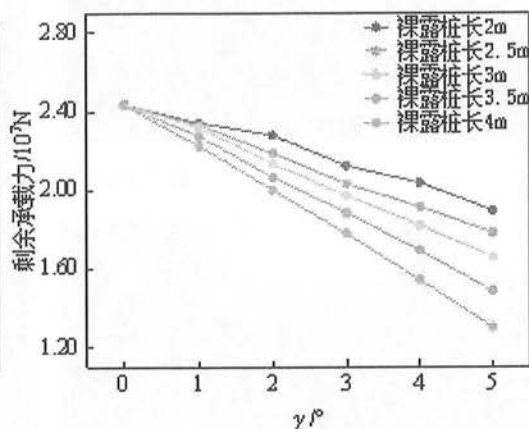


图 2.13 桩身倾斜对桩身剩余承载力的影响

(3) 在役桥梁裸露桩基加固设计

2014 年课题组针对 K1231+586 沙王渭河大桥开展了加固设计工作，沙王渭河大桥建于 1994 年，桥梁全长 2294 米，上部结构采用 $5 \times (7 \times 30) + (6 \times 30) + 5 \times (7 \times 30)$ 米连续箱梁（图 2.14），下部结构采用双柱式桥墩、北岸桥台采用锚杆双柱式框架桥台、南岸桥台为钢筋混凝土柱式框架与加筋土挡墙组合式桥台、钻孔灌注桩基础。该桥 2-44 号墩桩基外露，虽未达到原设计最大冲刷线高程，但部分桩基桩身钢筋锈蚀、倾斜、偏位等，严重影响基础耐久性（图 2.15）。

经与业主充分沟通，分别对桩基外包混凝土防护、桩基采用水下玻纤套箍防护、桩基外包混凝土+新增桩基防护三种方案论证后，选取桩基外包混凝土防护进行加固（图 2.16）。

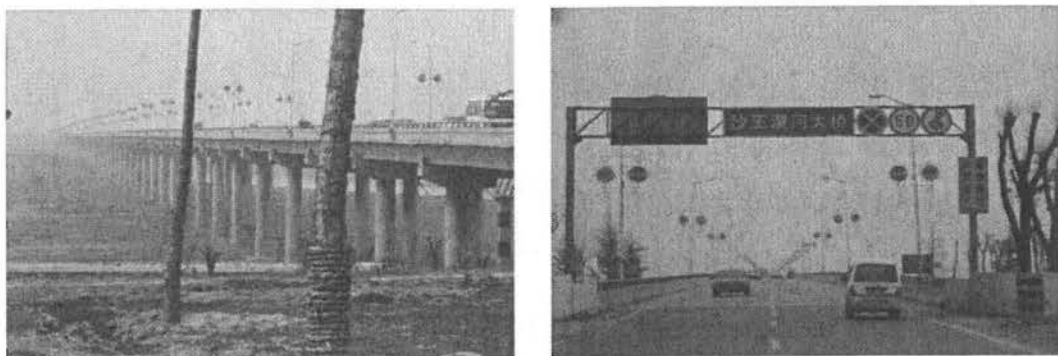
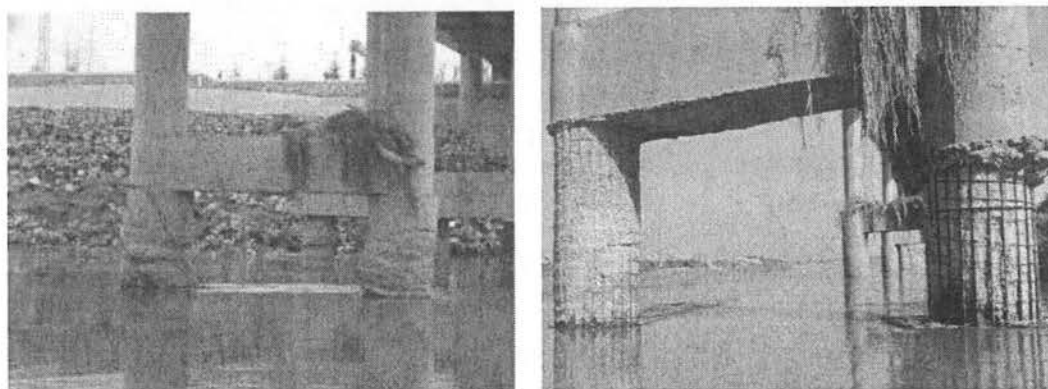


图 2.14 沙王渭河大桥概貌



(a) 桩身倾斜

(b) 钢筋锈蚀

图 2.15 桩基典型病害

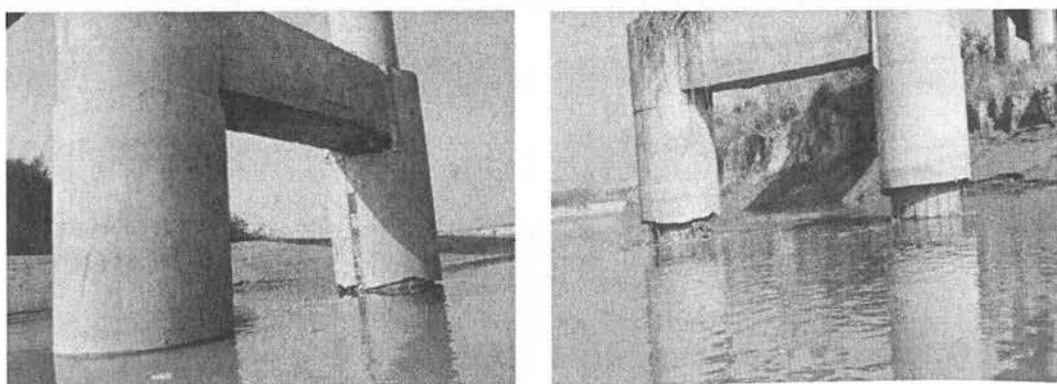


图 2.16 桩基加固后照片（2024 年）

2.3 参考文献

[1] 杜斌，刘祖德，聂向珍城市中的旧桩基问题及处理方法探讨[A].

中国岩石力学与工程学会,第二届全国岩土与工程学术大会论文集
(下册)[C].武汉大学土木建筑工程学院;武汉大学土木建筑工程学院;
武汉大学土木建筑工程学院;;2006: 29-35.

[2] Ramey G E, Wright R L. Bridge deterioration rates and durability/longevity performance[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 1997, 2(3): 98-104.

[3] 库玛.梅塔, 保罗 JM 蒙特罗.混凝土微观结构、性能和材料[M].北京:中国电力出版社, 2008.

[4] Armaghani, Jamshid M. Testing of Concrete Permeability for Durability Evaluation. Structural Engineering in Natural Hazards Mitigation[J], 1993: 989-999.

[5] Miller, Maurice D. Durability Survey of Segmental Concrete Bridges[J]. PCI Journal, 1995, 40(3): 110—114.

[6] 王龙胜.海洋环境下既有桩基耐久性评估研究[D].青岛理工大学, 2017.

[7] Biondini F, Bontempi F, Frangopol D M, et al. Probabilistic service life assessment and maintenance planning of concrete structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(5): 810-825.

[8] Shao W, Shi D, Tang P. Probabilistic lifetime assessment of RC pipe piles subjected to chloride environments[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(11): 04018297.

[9] Ramey G E, Wright R L. Results of bridge durability/longevity

- survey[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 1997, 2(3): 105-117.
- [10] Ko Y Y, Lee W F, Chang W K, et al. Scour evaluation of bridge foundations using vibration measurement[M]//Scour and Erosion. 2010: 884-893.
- [11] Reddy D V, Bolivar J C, Sobhan K. Durability-based ranking of typical structural repairs for corrosion-damaged marine piles[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2013, 18(4): 225-237.
- [12] 张璐,施养杭.在役混凝土构件耐久性的评判准则[J].华侨大学学报(自然科学版),2009,30(03):315-320.
- [13] 姜旭. 水流冲刷对黄土沟谷地区桥梁桩基功能的影响及其安全评价[D].长安大学,2017.
- [14] 叶培伦, 俞亚南.应用层次分析法评判混凝土桥梁综合性能[J].华东公路, 2000, (5):18-20.
- [15] 郭红仙, 任宝双, 钱稼茹.北京地区钢筋混凝土简支梁桥结构综合评估系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(6):825-831.
- [16] 项贻强, 伍华成, 翁沙羚, 汪劲丰.大跨度预应力混凝土斜拉桥的状态评估体系研究[J].中外公路, 2005, 25(5):73-76.
- [17] 黄侨, 任远, 林阳子.大跨径桥梁综合评估中的不确定型层次分析法[J].公路交通科技, 2008, 25(3):79-83.
- [18] 庞丹丹.基于模糊综合评价法的斜拉桥耐久性评估[D]. 上海: 上海交通大学, 2011

- [19] 任更锋,徐岳,石利强等.基于层次分析法的在役 RC 桥梁耐久性评估[J].长安大学学报(自然科学版),2008,28(06):41-45+50.
- [20] 何斌.对桥梁桩基耐久性问题的探讨[J].公路交通技术,2003,(02):40-43.
- [21] 孙红艳.桥梁桩基耐久性问题的探讨[J].建筑技术开发,2016,43(11):133-134.
- [22] 金伟良,夏普.汶川地震中混凝土结构的耐久性思考[C].//汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告委员会.汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告.北京:中国建筑业出版社,2008:326-334.
- [23] 何益斌,张超,邓鹏,等.锈蚀钢筋混凝土桥梁结构地震易损性分析[J].北京工业大学学报.2014,40(08):1144-1150.
- [24] 张永亮,陈兴冲,孙建飞.桥梁群桩基础非线性静力计算模型及拟静力试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(09):1799-1806.
- [25] Guan J, Zhang X, Chen X, et al. Influence of seasonal freezing-thawing soils on seismic performance of high-rise cap pile foundation in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 199: 103581.
- [26] 冯忠居,张聪,何静斌等.强震作用下嵌岩单桩时程响应振动台试验[J].岩土力学,2021,42(12):3227-3237.
- [27] 吴志坚,王平,霍元坤,等.多年冻土区桥梁桩基础地震响应的模型振动试验研究[J].西北地震学报,2009,31(4):319-326.
- [28] Ying M,Yi C, Gong J.Behavior of corrosion damaged circular r

- reinforced concrete columns under cyclic loading[J].Construction & Building Material, 2012,29:548-556.
- [29] Meda A, Mostosi S, Rinaldi Z, et al. Experimental evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns [J]. Engineering Structures,2014,76(oct.1):112-123.
- [30] 牛荻涛, 陈新孝, 王学民. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件抗震性能试验研究[J]. 建筑结构. 2004(10): 36-38.
- [31] 颜桂云, 孙炳楠, 王泽军, 等. 锈蚀钢筋混凝土压弯构件抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构. 2003(02):16-18.
- [32] 张振拴, 杨树标, 张涛等. 预应力管桩抗震性能试验研究[J]. 岩土力学, 2012,33(S1):79-84.
- [33] 李天宝. 高桩承台基础桥墩抗震性能研究[D]. 兰州交通大学, 2015.
- [34] 吴志伟. 考虑基础冲刷的高桩承台混凝土桥梁时变抗震性能研究[D]. 湘潭大学, 2022.
- [35] 孙剑平. 桩自由长度对高桩承台桥墩地震反应的影响[J]. 北方交通大学学报, 1999(01):5-9.
- [36] Simon J, Bracci J M, Gardoni P. Seismic Response and Fragility of Deteriorated Reinforced Concrete Bridges[J]. Journal of structural engineering, 2010,136(10):1273-1281.
- [37] 张伟. 钢筋锈蚀对混凝土桥墩抗震能力影响的研究[D]. 石家庄铁道大学, 2018.

- [38] 陈昉健, 易伟建. 锈蚀钢筋混凝土柱抗震性能的非线性分析[J]. 地震工程与工程振动. 2014, 34(03): 77-83.
- [39] 班亚云. 考虑近海耐久性损伤的混凝土梁桥时变地震易损性分析[D]. 郑州大学, 2018.
- [40] 李立峰, 吴文朋, 胡思聪, 等. 考虑氯离子侵蚀的高墩桥梁时变地震易损性分析[J]. 工程力学 2016, 33(1) 163-170.
- [41] 于生生. 冻土层对桩基础桥梁地震响应的影响研究[D]. 兰州交通大学, 2023.
- [42] 王礼蒙, 许亚平, 张华彬. 水中桩基加固维修方法[J]. 交通世界, 2021(26): 101-103+106.
- [43] 席红光. 桥梁桩基外露处治及加固措施[J]. 工程建设与设计, 2019(04): 137-138.
- [44] 赵兵伟. 桥梁桩基加固施工技术研究[J]. 交通世界, 2020(13): 106-107.
- [45] Cunha R P C A. Cordeiro, Ary F.b. Soils and Rocks, May-August 2010 Numerical assessment of an imperfect pile group with defective pile both at initial and reinforced conditions[J].
- [46] 魏洪昌. 增补桩基加固法系统研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(4).
- [47] 丘伟, 曾红华. 广韶线流溪河大桥的桥梁桩基加固补强方法[J]. 广西交通科技, 2003, 28(4): 90-92.
- [48] 杨勇, 廖原. 高压旋喷钢管桩在桥梁桩基加固中的应用[J]. 广东建材, 2010, 26(6): 101-103.

- [49] 陈友杰.双柱式桥墩桩基非对称加固受力特性研究[J].福建建筑,2013(02):70-73.
- [50] 练广龙,吴泳铤.桥梁水中桩桩基加固应用研究[J].低温建筑技术,2014,36(05):133-134.
- [51] 钟明.玻纤套筒加固技术在桥梁水下桩基耐久性病害修复中的应用[J].西部交通科技,2023(05):145-146+159.
- [52] 刘国生.某现役公路桥梁桩基加固技术研究[J].价值工程,2023,42(19):109-111.
- [53] 姚贤华.高寒盐沼泽区公路桥梁桩基的力学特性及其安全评价[D].长安大学,2019.
- [54] 李荣翔.海洋环境下 CFRP 复合桩水平承载特性研究[D].河南大学,2020.
- [55] 崔延卫,徐志军,邢军等.缩径承台基桩竖向承载力及桩周土体变形[J].河南科技大学学报(自然科学版),2023,44(02):73-79+9.
- [56] 孙宗训.缩径单桩竖向承载性状的室内模型试验研究及数值分析[D].天津大学,2012.
- [57] 姜旭.水流冲刷对黄土沟谷地区桥梁桩基功能的影响及其安全评价[D].长安大学,2017.
- [58] 韩星.缩径(承台)单桩竖向承载力可靠度及抗力分项系数研究[D].河南工业大学,2022.
- [59] 王富春,姚贤华,冯忠居等.盐沼泽腐蚀对公路桥梁桩基础竖向极限承载力影响的数值模拟研究[J].公路,2017,62(01):60-66.

- [60] 樊亚龙. 盐渍土环境下 GFRP 复合桩竖向承载性能及耐久性研究[D].河南大学,2023.
- [61] 马希和,平树江,蔡长松等.海水环境中钢筋混凝土桥桩耐久性数值模拟研究[J].混凝土,2004(07):19-23.
- [62] 吴少峰.河床冲刷对桥梁桩基承载力影响及安全评价分析[J].福建建设科技,2023(02):104-108.
- [63] 郑扬. 盐沼泽腐蚀区桥梁桩基竖向承载特性分析及其防腐技术研究[D].长安大学,2016.
- [64] 王成.桩基计算理论与实例[M].西南交通大学出版社, 2010.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

本项目拟着重研究解决以下关键问题：

(1) 考虑冲刷条件下桩侧土体应力变化桩基竖向剩余承载力计算方法

冲刷作用会显著改变桩周土体的应力分布，尤其是侧摩阻力的衰减。冲刷深度与桩侧摩阻力呈非线性关系：随着冲刷深度增加，侧压力对摩阻力的主导作用逐渐减弱，且敏感性降低，改变桩侧摩阻力分布，从而影响竖向承载力。因此开展考虑冲刷条件下桩侧土体应力变化桩基竖向剩余承载力计算方法研究有很大意义。

(2) 考虑冲刷深度及桩基耐久性损伤等因素时桩基水平剩余承载力计算方法

桩基在冲刷作用下导致的耐久性损伤会进一步削弱桩基性能，尤其是在冲刷加剧的环境下，混凝土保护层脱落及钢筋锈蚀等因素都会不同程度的降低桩身强度，如何建立冲刷深度—保护层脱落—钢筋锈蚀—水平承载力演化模型，得到综合耦合剩余水平承载力计算方法。

3.2 主要研究内容及实施方案

3.2.1 渭河流域公路桥梁裸露桩基病害检测及耐久性评估

研究内容：渭河流域裸露桩基检测方法、病害类别、病害程度、评估指标权重、耐久性评估方法等。

实施方案：

(1) 前期准备阶段

基础资料收集：全面搜集渭河流域水文气象资料（枯水期时长、水位变化、水质参数、冻融周期、风沙强度）、区域桥梁台账（桥梁数量、桥型、跨径、建设年限、设计图纸、养护记录）、相关规范标准（桩基检测规范、混凝土耐久性评估标准）、现有研究成果，梳理流域桩基典型病害类型与成因。

检测设备校准与方案细化：对 Trimble SX10 扫描仪、混凝土强度检测仪、钢筋保护层测定仪、裂缝测宽仪等设备进行计量校准，确保检测精度；结合流域河道地形、桩基分布，细化枯水期检测实施方案，明确检测点位、扫描路径、人员分工、安全保障措施。

（2）现场检测与三维建模阶段

①常规指标现场检测

严格遵循《公路桥梁技术状况评定标准》《混凝土结构现场检测技术标准》，开展三大指标检测：外观检测，采用人工巡检结合高清拍照，记录混凝土剥落、露筋、裂缝、蜂窝、麻面、腐蚀等病害的位置、长度、宽度、深度，填写病害台账；混凝土强度检测，采用回弹法、超声回弹综合法，按规范布设测区，检测桩基混凝土抗压强度，分析强度衰减规律；钢筋保护层厚度检测，采用无损检测仪，沿桩基桩身均匀布设测点，测定保护层厚度，统计厚度不足、偏差超标点位占比。同步检测桩基裂缝宽度、深度、碳化深度等辅助指标，完善检测数据。

②三维激光扫描与建模

依托 Trimble SX10 扫描仪开展高精度扫描作业，提前布设扫描基准点与控制点，保证扫描精度与坐标统一；对每根裸露桩基进行多角度、全覆盖扫描，采集完整点云数据，实时核查数据完整性，避免漏扫、缺扫；将扫描数据导入 Trimble Business Center、Geomagic 等专业软件，进行点云去噪、拼接、配准、滤波处理，剔除河床杂物、风沙等干扰数据，重构桩基三维实体模型，精准映射桩基外观形态与病害细节；基于三维模型提取病害量化数据，生成病害三维影像图、剖面图，实现病害的可视化、数字化呈现，解决传统检测病害记录模糊、定位不准的问题。

（3）耐久性评估体系构建阶段

①评估方法筛选

对比分析现有耐久性评估方法，包括模糊综合评价法、层次分析法、灰色关联度法、物元可拓法、神经网络法等，结合渭河流域裸露桩基特点：隐蔽性强，内部病害难以直接检测；结构关键，为桥梁上部结构核心承重构件；部分指标（如病害严重程度、环境侵蚀程度）难以精准量化，存在模糊性；筛选出模糊层次综合评价法作为核心评估方法，该方法可兼顾定量与定性指标，适配桩基隐蔽性、指标模糊性特点，同时优化评估流程，提升实操性。

②评估指标体系搭建

围绕桩基耐久性核心影响因素，构建“目标层-准则层-指标层”三级评估指标体系：目标层为在役桥梁裸露桩基耐久性；准则层分为桩

基外观病害、混凝土性能、钢筋保护层状况、环境侵蚀影响、桥梁运营条件 5 大类；指标层细化为混凝土剥落面积、露筋程度、裂缝参数、混凝土强度、碳化深度、保护层厚度及偏差、冻融损伤程度、水质侵蚀等级、运营年限、交通荷载等级等 12-15 项具体指标，兼顾可量化指标与定性描述指标，贴合实际检测情况。

③评估指标权重确定

采用德尔菲法结合层次分析法开展专家征询：筛选桥梁设计、施工、检测、养护、科研院所等不同领域专家 20-30 名，设计专家征询表，明确各指标含义、评分标准，征求指标重要性排序与权重赋值建议；回收征询结果后，进行数据统计分析，剔除偏离度较大的异常意见，计算专家意见协调系数，验证意见一致性；最终确定各评估指标的权重范围，明确核心指标、次要指标权重占比，保证权重赋值客观公正。

(4) 实桥评估与标准制定阶段

将样本桥梁检测数据、三维建模病害数据代入构建的耐久性评估体系，结合指标权重，计算各桩基耐久性综合评分；对照评分结果与桩基现场实际病害、运营状况，分析评估结果的合理性，优化评估体系与权重参数；依据综合评分区间，结合工程养护实操需求，将沙王渭河大桥裸露桩基耐久性划分为优良、合格、较差、差四个等级，明确各等级对应的评分范围、病害特征、结构安全状态，针对性给出日常养护、重点监测、加固维修、限期处置等养护建议。

3.2.2 渭河流域在役公路桥梁桩基竖向剩余承载力研究

研究内容：河床下切后桩基竖向剩余承载力、桩身有效截面（缩径或扩径）对桩基竖向承载力的影响、桩身倾斜对桩基竖向承载力的影响、桩顶偏心荷载对桩基竖向承载力的影响。

实施方案：

（1）模型试验研究方案

①试验工况与参数标定

调研沙王渭河大桥基础资料，精准提取试验核心参数：桩基设计参数选取大桥主流灌注桩参数，明确桩径、桩长、混凝土强度、配筋率等实测值；水文冲刷参数结合流域水文站实测数据，划定冲刷深度梯度（无冲刷、轻度冲刷 3m、中度冲刷 6m、重度冲刷 9m，贴合沙王渭河大桥河段历年最大冲刷深度）；病害参数结合大桥桩基巡检病害实情，设定桩身缩径梯度（无缩径、轻度缩径 5%、中度缩径 10%、重度缩径 15%，按桩径缩减比例）、桩身倾斜梯度（无倾斜、小角度倾斜 1°、中角度倾斜 2°、大角度倾斜 3°）、桩基偏位梯度（无偏位、轻度偏位 5cm、中度偏位 10cm、重度偏位 15cm），设计多组单一变量与多参数耦合工况，同步设置完好桩基对照组。

选取沙王渭河大桥河床原位土体（粉质黏土、细砂混合土层）作为试验填料，按 1:18 的合理缩尺比例制作桩基缩尺模型，模拟不同缩径、倾斜、偏位病害形态，保证模型与实桥病害特征高度契合。

②试验系统安装与测点布设

定制桩基冲刷-加载模型试验槽，分层填筑原位土体并严格控制

密实度，还原现场土体初始应力与密实状态；沿桩身不同深度（冲刷段、覆土段）布设微型土压力盒、桩身应变片，桩端布设土压力传感器，桩顶安装高精度位移计与竖向静力加载装置，连接全自动数据采集仪，提前调试设备精度，对传感器进行率定，规避试验误差。

③试验实施与数据采集

采用逐级卸荷法模拟渭河流域汛期冲刷、枯水期裸露的真实过程，按预设冲刷深度梯度逐步移除桩周土体，每完成一级冲刷模拟，采用慢速维持荷载法对桩顶施加竖向荷载，分级加载直至桩基达到极限承载力或发生破坏，同步实时采集桩侧土压力、桩端土压力、桩身应变、桩顶沉降、施加荷载值等关键数据。

针对每组冲刷+病害耦合工况，重复进行 3 组平行试验，剔除异常波动数据后取算数平均值作为最终实测结果，完整记录不同参数组合下桩基竖向极限承载力、临界荷载、荷载-沉降曲线，明确承载力随冲刷深度、缩径、倾斜、偏位的衰减规律，提炼桩基受力破坏形态。

④试验成果输出

整合试验数据，量化单一病害及冲刷-多病害耦合对沙王渭河大桥桩基竖向承载力的削弱幅度，确定不同工况下桩侧摩阻力、桩端阻力的发挥限值与取值范围，形成试验实测承载力数据库，为后续数值分析建模、理论方法构建提供精准标定数据与机理支撑。

（2）数值分析研究方案

以沙王渭河大桥桩基为原型，构建 1:1 三维数值模型，还原大桥桩基-河床土体相互作用体系，模拟流域冲刷卸荷及桩身缩径、倾斜、

偏位病害，通过多工况变参数仿真，弥补模型试验工况局限，测算裸露桩基竖向承载力，分析参数敏感性，验证试验结果，为理论研究提供海量样本数据，实现实桥桩基承载力的高效仿真。

①数值模型构建

选用 ABAQUS 有限元软件，建立沙王渭河大桥灌注桩-河床土体三维耦合数值模型，土体采用摩尔-库伦本构模型，输入沙王渭河大桥河段原位土体物理力学参数（重度、黏聚力、内摩擦角、压缩模量）；桩基采用弹塑性本构模型，参照大桥桩基实际尺寸、混凝土强度与配筋情况；设置桩土接触界面参数（摩擦系数、接触刚度），结合渭河流域水文特性，设定冲刷卸荷边界、竖向荷载约束与位移约束，模拟桩周土体冲刷流失、桩身裸露的真实工况。

针对桩身病害，在模型中精准复刻沙王渭河大桥桩基病害特征：按实测梯度设置局部/整体缩径、线性倾斜、轴线偏位，保证数值模型与实桥病害、冲刷场景相似，参照模型试验数据校准模型参数，通过完好桩基仿真结果与试验结果比对，验证模型准确性。

②多工况仿真计算与结果分析

基于校准后的数值模型，设计 40 组覆盖沙王渭河大桥全场景的仿真工况，包含单一变量工况（固定病害参数，变冲刷深度；固定冲刷参数，变缩径/倾斜/偏位程度）、多参数耦合工况（不同冲刷深度+多病害组合），全面覆盖大桥实际可能出现的冲刷与病害组合。

各组工况运行计算后，提取桩基竖向极限承载力、荷载-位移曲线、桩身应力云图、桩土相互作用受力数据、桩基位移变形数据，对

比分析冲刷深度、缩径、倾斜、偏位对承载力的影响幅度，通过参数敏感性分析，确定影响沙王渭河大桥桩基竖向承载力的主控参数；同时导入沙王渭河大桥桩基现场点云重构三维模型，开展真实病害场景下的承载力仿真测算，还原实桥桩基受力状态。

③数值分析成果输出

验证模型试验得出的承载力衰减规律，修正参数削弱系数，补齐极端冲刷、复杂病害耦合工况下的承载力数据缺口；量化各类参数对应的承载力折减系数，建立沙王渭河大桥桩基参数与竖向承载力的数值映射关系，形成实桥适配的数值仿真估算体系，为理论研究提供充足的样本数据，实现大桥裸露桩基竖向承载力的快速估算。

（3）理论研究方案

以沙王渭河大桥模型试验实测规律、数值分析仿真结果为核心依据，结合现行桩基承载力规范计算理论，针对渭河流域季节性冲刷特性及大桥桩基缩径、倾斜、偏位病害，修正传统竖向承载力计算公式，构建适配沙王渭河大桥的裸露桩基竖向承载力估算方法，明确参数取值、计算流程与精度要求，形成可直接用于实桥评定的理论成果。

①理论适配性分析

梳理现行《建筑桩基技术规范》《公路桥涵地基与基础设计规范》中桩基竖向承载力计算公式，明晰传统公式“竖向承载力=桩侧总摩阻力+桩端阻力”的核心逻辑，结合沙王渭河大桥工况，剖析传统方法的适用性短板：未考虑流域冲刷卸荷导致的桩侧摩阻力大幅衰减、未计入缩径引发的桩身有效截面折减、未考量倾斜与偏位引发的偏心受力

及应力集中，以此为核心，确定理论修正方向。

②实桥适配承载力估算方法构建

基于试验与数值分析成果，引入针对性修正系数，对传统承载力公式进行优化，构建沙王渭河大桥裸露桩基竖向承载力估算模型，核心公式逻辑如下：

$$Q = \psi_s \cdot \psi_d \cdot (\sum u_i \cdot q_{sik} \cdot l_i + \psi_p \cdot q_{pk} \cdot A_p)$$

式中：Q 为桩基竖向极限承载力； ψ_s 为冲刷影响修正系数（结合沙王渭河大桥实测冲刷深度取值，冲刷越深系数越小）； ψ_d 为桩身病害综合修正系数（整合缩径截面折减、倾斜偏心弯矩、偏位应力集中三大病害效应）； u_i 为第 i 土桩侧摩阻力修正系数； q_{sik} 为桩侧极限摩阻力标准值； l_i 桩身穿越第 i 层土长度； ψ_p 为桩端阻力冲刷修正系数； q_{pk} 为桩端极限阻力标准值； A_p 为桩端有效受力面积。

结合沙王渭河大桥试验与仿真数据，标定各修正系数取值范围，明确冲刷深度、缩径率、倾斜度、偏位量与系数的对应关系，细化系数选取规则，保证理论模型贴合实桥工况。

③理论方法验证与优化

选取沙王渭河大桥模型试验实测值、数值分析仿真值、实桥桩基现场检测数据，对构建的理论估算方法进行多维度验证，对比理论计算值与实测/仿真值的相对误差，优化修正系数取值，确保理论估算误差控制在 5% 以内，满足工程应用精度要求；细化实桥承载力估算流程，明确现场参数采集、系数选取、分步计算、结果校核的全步骤，制定沙王渭河大桥桩基竖向承载力评定等级标准，为大桥桩基病害整

治、加固维修、安全管控提供精准的理论依据与决策支撑，同时可推广至渭河流域同类跨河桥梁桩基承载力评定。

3.2.3 渭河流域在役公路桥梁桩基水平剩余承载力研究

研究内容：裸露部分桩基（系梁）水平作用力；不同病害条件下裸露桩基水平承载力。

研究方案：

（1）模型试验研究方案

以沙王渭河大桥桩基实测参数、渭河流域河床地质特性与水流侧向冲刷规律为基准，遵循几何相似、力学相似、材料相似准则，搭建桩基水平受力-冲刷卸荷缩尺模型试验平台，模拟实桥裸露工况、保护层脱落与钢筋锈蚀病害特征，通过分级水平加载试验获取水平剩余承载力实测数据，明晰冲刷与病害耦合作用下的桩基水平受力特性，为数值模型校准、理论公式修正提供实测依据，结合沙王渭河大桥工程实际，保障试验结果的针对性与可靠性。

①试验原型与核心参数标定

全面调研沙王渭河大桥基础实测资料，精准锁定试验核心参数：桩基设计参数选取大桥灌注桩实测值，明确桩径、桩长、混凝土强度等级、配筋规格、保护层设计厚度；水文冲刷参数结合流域水文站实测数据，结合大桥河段实际冲刷情况，划定冲刷深度梯度（无冲刷、轻度冲刷 3m、中度冲刷 6m、重度冲刷 9m），模拟桩周土体侧向约束缺失程度；病害参数结合大桥桩基现场巡检结果，设定混凝土保护层脱落梯度（无脱落、局部脱落 1/4 桩周长、局部脱落 1/2 桩周长、全

周脱落)、钢筋锈蚀梯度(无锈蚀、轻度锈蚀 5%、中度锈蚀 10%、重度锈蚀 15%,按钢筋截面锈蚀率划分),设计多组单一变量、冲刷-病害耦合工况,同步设置完好桩基对照组,保证试验工况全覆盖实桥常见场景。

选取沙王渭河大桥河床原位土体(粉质黏土、细砂混合土层)作为试验填料,按 1:18 缩尺比例制作桩基缩尺模型,模拟不同程度保护层脱落、钢筋锈蚀病害形态,采用与实桥钢筋锈蚀力学特性匹配的材料模拟锈蚀钢筋,确保模型与实桥病害、受力特性高度契合。

②试验系统安装与测点布设

加工桩基侧向冲刷-水平加载模型试验槽,分层填筑原位土体并严格控制密实度、含水率,还原现场土体初始应力与侧向约束状态,模拟渭河流域河床土体特性;沿桩身冲刷段、覆土段布设微型土压力盒、侧向位移传感器、桩身应变片,桩顶安装水平静力加载装置、百分表,连接全自动数据采集仪,试验前对所有传感器、采集设备进行率定调试,严控试验系统误差,保证数据采集精准度。

1.3 试验实施与数据采集

采用逐级卸荷法模拟渭河流域汛期侧向冲刷、枯水期桩基裸露的真实过程,按预设冲刷深度梯度逐步移除桩周土体,弱化桩侧土体侧向约束;每完成一级冲刷模拟,采用慢速分级水平加载法对桩顶施加水平荷载,模拟水流冲击力、车辆偏载等水平作用力,分级加载直至桩基达到水平极限承载力、桩身开裂破坏或侧向位移超标,同步实时采集桩侧侧向土压力、桩身水平位移、桩身应变、施加水平荷载值等

关键数据。

针对每组冲刷+病害耦合工况，重复开展 3 组平行试验，剔除异常波动、离散性过大的数据，取算数平均值作为最终实测结果，完整记录不同参数组合下桩基水平极限承载力、临界水平荷载、荷载-位移曲线、桩身开裂与破坏形态，明确水平剩余承载力随冲刷深度、保护层脱落程度、钢筋锈蚀率的衰减规律。

④试验成果输出

整合试验数据，量化单一病害、冲刷-多病害耦合对沙王渭河大桥桩基水平剩余承载力的削弱幅度，确定不同工况下桩侧侧向土抗力、桩基水平抗弯承载力的发挥限值与取值范围，形成试验实测水平承载力数据库，提炼桩基水平受力破坏机理，为后续数值分析建模、理论方法构建提供精准标定数据与机理支撑。

(2) 数值分析研究方案

以沙王渭河大桥桩基为原型，构建 1:1 精细化三维数值模型，还原大桥桩基-河床土体相互作用体系，精准模拟流域侧向冲刷卸荷、桩身混凝土保护层脱落、钢筋锈蚀病害，通过多工况变参数仿真分析，弥补模型试验工况局限，计算裸露桩基水平剩余承载力，分析参数敏感性，验证试验结果，为理论研究提供海量样本数据，实现实桥桩基水平承载力的精准仿真。

①实桥精细化数值模型构建

选用 ABAQUS 有限元软件，建立沙王渭河大桥灌注桩-河床土体三维耦合数值模型，土体采用摩尔-库伦本构模型，输入大桥河段原

位土体物理力学参数（重度、黏聚力、内摩擦角、侧向基床系数）；桩基采用混凝土损伤塑性本构模型，钢筋采用弹塑性本构模型，模拟大桥桩基实际尺寸、混凝土强度、配筋布局；针对核心病害精准建模：通过削减桩身混凝土单元厚度模拟保护层脱落，通过降低钢筋截面面积、弱化钢筋力学参数模拟钢筋锈蚀，贴合渭河流域水文特性，设定冲刷卸荷边界、水平荷载约束、位移约束，还原桩周土体冲刷流失、侧向约束弱化的真实工况。

设置桩土接触界面参数（摩擦系数、接触刚度、侧向约束特性），参照模型试验实测数据校准模型本构参数、接触参数，通过完好桩基水平受力仿真结果与试验结果比对，验证数值模型的准确性与适用性，确保仿真结果贴合实桥实际受力状态。

②多工况仿真计算与结果分析

基于校准后的数值模型，设计 40 组覆盖沙王渭河大桥全场景的水平受力仿真工况，包含单一变量工况（固定病害参数，变冲刷深度；固定冲刷参数，变保护层脱落/钢筋锈蚀程度）、多参数耦合工况（不同冲刷深度+保护层脱落+钢筋锈蚀组合），全面覆盖大桥实际可能出现的冲刷与病害组合场景。

各组工况运行计算后，提取桩基水平极限承载力、水平荷载-位移曲线、桩身应力云图、桩侧侧向土抗力分布、桩基侧向变形数据、钢筋应力分布数据，对比分析冲刷深度、混凝土保护层脱落、钢筋锈蚀对水平剩余承载力的影响幅度，通过参数敏感性分析，确定影响沙王渭河大桥桩基水平承载力的主控参数；同时导入沙王渭河大桥桩基

现场点云重构三维实体模型,开展真实病害场景下的水平承载力仿真测算,还原实桥桩基水平受力与变形状态。

③数值分析成果输出

验证模型试验得出的水平承载力衰减规律,修正参数折减系数,补齐极端冲刷、复杂病害耦合工况下的承载力数据缺口;量化各类参数对应的水平承载力削弱系数、桩侧土抗力折减系数,建立沙王渭河大桥桩基参数与水平剩余承载力的数值映射关系,形成实桥适配的水平承载力数值仿真估算体系,为理论研究提供充足的样本数据。

(3) 理论研究方案

本方法以沙王渭河大桥模型试验实测规律、数值分析仿真结果为核心依据,结合现行公路桥梁桩基水平承载力规范计算理论,针对渭河流域季节性冲刷特性及大桥桩基保护层脱落、钢筋锈蚀病害,修正传统水平承载力计算公式,构建适配沙王渭河大桥的裸露桩基水平剩余承载力估算方法,明确参数取值、计算流程与精度要求,形成可直接用于实桥安全评定的理论成果。

①理论适配性分析

梳理现行《公路桥涵地基与基础设计规范》《建筑桩基技术规范》中桩基水平承载力计算公式,明晰传统公式“水平承载力由桩身抗弯承载力与桩周土侧向抗力共同控制”的核心逻辑,结合沙王渭河大桥裸露桩基工况,剖析传统方法的适用性短板:未考虑流域冲刷卸荷导致桩周土侧向抗力大幅折减、未计入保护层脱落引发的桩身有效截面削弱、未考量钢筋锈蚀导致的钢筋受力性能劣化与粘结力下降,以此

为核心，确定理论修正方向。

②水平剩余承载力估算方法构建

基于试验与数值分析成果，引入针对性修正系数，对传统桩基水平承载力计算公式进行优化，构建沙王渭河大桥裸露桩基水平剩余承载力估算模型：

$$Q_h = \psi_h \cdot \psi_c \cdot \psi_r \cdot R_{H0}$$

式中： Q_h 为桩基水平剩余承载力； ψ_h 为冲刷侧向抗力修正系数（结合沙王渭河大桥实测冲刷深度取值，冲刷深度越大、桩周约束越弱，系数越小）； ψ_c 为混凝土保护层脱落修正系数（保护层脱落面积越大、桩身截面削弱越显著，系数越小）； ψ_r 为钢筋锈蚀修正系数（钢筋锈蚀率越高、受力性能越差，系数越小）； R_{H0} 为完好桩基、无冲刷工况下的水平承载力标准值。

同时结合 m 法桩基水平受力计算理论，优化桩周土水平基床系数取值，计入冲刷卸荷对土体抗力的折减效应，整合桩身有效截面、钢筋力学性能劣化参数，细化水平承载力分项计算逻辑；结合沙王渭河大桥试验与仿真数据，标定各修正系数取值范围，明确冲刷深度、保护层脱落程度、钢筋锈蚀率与系数的对应关系，保证理论模型贴合实桥工况。

③理论方法验证与优化

选取沙王渭河大桥模型试验实测值、数值分析仿真值、实桥桩基现场检测数据，对构建的水平剩余承载力理论估算方法进行多维度验证，对比理论计算值与实测/仿真值的相对误差，优化修正系数取值，

确保理论估算误差控制在 6%以内，满足工程应用精度要求；细化实桥水平承载力估算流程，明确现场参数采集、系数选取、分步计算、结果校核的全步骤，制定沙王渭河大桥桩基水平承载力安全评定等级标准。

3.2.4 沙王渭河大桥桩基础加固措施

研究内容：渭河流域内桩基结构形式；桩基加固措施。

研究方案：针对渭河流域河床变迁的特点，对冲刷深度以上部分采用预加固措施，确保河床变迁后，最大冲刷深度以上桩基保持完整；桩基采用水下混凝土灌注时，钢筋外侧保护层混凝土强度存在固有缺陷，考虑到渭河流域水流速度快、含沙量高等特点，容易导致灌注桩保护层混凝土缺失和钢筋锈蚀，采用高强混凝土预制桩作为桥梁桩基，不仅可抵御水流冲刷对混凝土保护的破坏，而且能保证桥梁桩基的完整性；针对在役桥梁桩基，考虑渭河流域河床特点，采用桩侧地基土加固、桩身补强加固法、静压注浆加固法、高压喷射注浆加固法、增补桩基加固法等综合方法进行处理，尽量避免二次加固。

3.3 技术路线

本次研究的技术路线如下：

(1) 调研收集有关资料，对依托工程和渭河地区桥梁桩基进行现场考察，明确渭河在役桥梁桩基耐久性损伤情况，制定详细的研究大纲和实施细则；

(2) 通过现场调研及检测，对裸露桩基外观、混凝土强度及钢

筋保护层厚度等指标进行检测和三维扫描，建立三维实体模型，得到裸露桩基清晰准确的病害图像；针对裸露桩基病害类型及病害程度，结合桩基的隐蔽性、结构功能的重要性、部分指标无法量化等特点，选取在役桥梁裸露桩基适宜的耐久性评估方法；针对耐久性评估方法中主要指标，征求不同行业专家建议，给出评估指标的权重范围；选取若干座在役桥梁进行耐久性评估，综合比较评估结果及桩基现状，给出在役桥梁桩基耐久性等级划分标准建议。

（3）通过进行室内模型试验和数值模拟，研究河床下切后桩基竖向剩余承载力、桩身有效截面（缩径或扩径）对桩基竖向承载力的影响、桩身倾斜对桩基竖向承载力的影响、桩顶偏心荷载对桩基竖向承载力的影响。

（4）基于现场检测和数值分析，研究裸露部分桩基（系梁）水平作用力，主要考虑河床下切深度、混凝土保护层脱落、钢筋锈蚀等因素。

（5）结合现场试验、室内模型试验及数值分析结果，提出在役公路桥梁桩基耐久性评估模型及剩余承载力计算方法。

（6）通过室内模型试验及数值分析，研究渭河流域内桩基结构形式及桩基加固措施。

（8）对渭河在役桥梁桩基继续调研评估，编制《在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究》项目报告；

（9）研究成果报告及其他有关文件，申请组织验收。

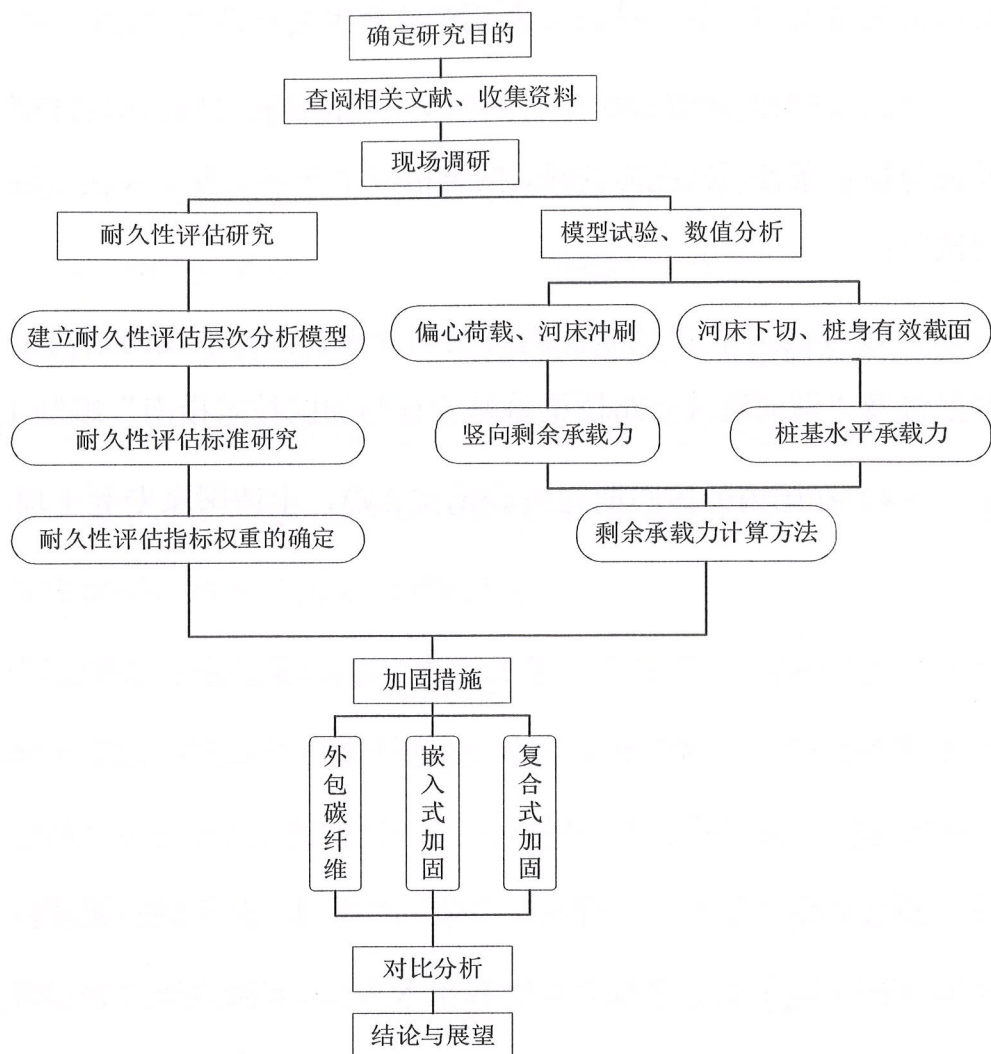


图 3.1 技术路线图

3.4 后续技术改造

依据本项研究成果，总结渭河流域在役桥梁桩基损伤现状与剩余承载力评估及防治对策，并依据室内外试验和数值模拟结果，编制渭河流域公路桥梁桩基设计与加固技术指南，促进该项技术在在渭河地区的推广应用，为渭河流域新建桥梁桩基设计及在役桥梁桩基加固等方面给出切实有效的建议，确保渭河流域公路桥梁桩基耐久性及承载性能得到进一步提升。

3.5 有关技术经济指标

(1) 针对渭河流域陕西境内公路桥梁进行系统调研，形成渭河

流域公路桥梁钻孔灌注桩病害现状调查及耐久性评估报告；

(2) 选取渭河流域典型公路桥梁下部结构，针对典型冲刷深度及桩身损伤条件下钻孔灌注桩，按照相似比开展至少 6 根模型桩承载力试验；

(3) 完成“在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策”研究报告及“渭河流域公路桥梁桩基设计与加固技术指南”编制工作；

(4) 在国内外核心期刊发表论文 2 篇，申请国家专利 1 项。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

本课题由长安大学主持,陕西交通建设养护工程有限公司、西安公路研究院有限公司等单位参与该项目的研究工作。

(1) 长安大学公路学院(公路科学研究院)是教育部直属的长安大学“211 工程”重点建设的学院。学院科研实力雄厚,近五年来,先后获得国家、省部级科技奖励 100 余项,多项科研成果达到国际或国内领先水平,填补了诸多领域的空白。

学院现有公路桥梁与隧道陕西省重点实验室,实验室拥有一批国内一流水平的实验设施和检测系统,包括美国“MTS”公司的电液伺服闭合循环试验系统,英国“ELE”公司的自动马歇尔仪,丹麦“B·K”公司的测振试验系统,日本“三荣”、“共和”等公司的超级数据采集系统和信号处理系统等,为人才培养和科学研究提供了坚实的基础平台,同时也可为公路交通规划、勘测、设计、施工等部门提供优质高效的科技服务。

(2) 陕西交通建设养护工程有限公司

陕西交通建设养护工程有限公司是陕西交控集团旗下专注公路养护、工程加固与交通科研的核心骨干企业,成立于 2007 年 6 月,深耕交通基础设施运维领域十余年,具备公路养护一类、二类甲级、桥梁养护甲级等完备资质,主营公路试验检测、养护工程设计、桥梁隧道加固维修、交通新材料与新技术研发等业务,是集工程实施、技术攻关、科研转化于一体的专业化养护科研主体,科研底蕴深厚、工

程实践经验丰富，可为各类桥梁桩基病害评估与治理项目提供全链条技术支撑。

公司聚焦桥梁结构安全、桩基病害治理等核心领域，搭建专业科研与技术攻坚团队，长期开展桥梁桩基损伤演化、承载力评估、加固修复等关键技术研究，先后完成十余项省部级、集团级交通科研课题，攻克河床冲刷、桩基锈蚀、结构劣化等多项行业技术难题，斩获多项国家专利与行业科研奖项。依托大量桥梁养护、桩基加固工程实践，公司积累了丰富的复杂地质、水环境下桩基病害处置经验，尤其擅长针对河流冲刷区裸露桩基，开展病害检测、剩余承载力验算、加固方案设计与施工落地，实现“科研攻关+工程应用”深度融合。

（3）西安公路研究院有限公司

西安公路研究院有限公司原名西安公路研究所，始建于 1960 年，原隶属于交通部，1975 年与陕西省交通科学研究所合并，2000 年底转制为国有科技型企业，2009 年经陕西省交通运输厅批准更名为西安公路研究院，2021 年 5 月改制为有限公司。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 367 人，其中正高级工程师 15 人，高级工程师 129 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 10 人，硕士学位 136 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 余项的优异成果。西安公路研究院有限公司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/T19001-2008 质量管理体系认证证书。“陕西省公路工程质量监督检验站”、“陕西省交通环境监测中心站”均挂靠在院内。

4.2 技术力量及人员构成

计划投入到本项目的主要研究人员预计有 13 人，其中，正高技术职称 2 人，副高技术职称 4 人，博士、硕士及其他技术人员若干。项目组研究人员情况见表 4.1。

表 4.1 项目组主要研究人员名单

姓 名	单 位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
周志军	长安大学	男	51	教授	岩土工程	组织方案制定、室内外试验、研究报告及指南编制等
唐 春	陕西交通建设养护工程有限公司	男	50	高工	公路工程	研究方案审核，指导现场依托工程施工，编制技术指南
苗建宝	西安公路研究院有限公司	男	39	正高	桥梁工程	协助制定研究方案，指导依托工程加固方案设计，审核技术指南
柯亮亮	西安公路研究院有限公司	男	39	副高	桥梁工程	协助制定研究方案，指导依托工程加固方案设计，审核技术指南
王 旭	西安公路研究院有	男	39	副高	桥梁工程	协助制定研究方案，指导依托工程

	限公司					加固方案设计，审核技术指南
魏 进	长安大学	男	54	副教授	桥梁工程	编制研究方案及指导室内外试验，整理研究报告
王苗苗	长安大学	女	40	副教授	岩土工程	编制试验方案及试验数据处理，承载力理论分析
任展腾	长安大学	男	24	硕士研究生	岩土工程	负责竖向承载力模型试验及数据处理
李 路	长安大学	男	22	硕士研究生	岩土工程	负责水平承载力模型试验及数据处理
赵 袁	长安大学	男	25	硕士研究生	岩土工程	负责水平承载力模型试验及数据处理
陈伊喆	长安大学	女	22	硕士研究生	岩土工程	负责水平承载力模型试验及数据处理
任钊铎	长安大学	男	25	硕士研究生	岩土工程	负责水平承载力模型试验及数据处理
许 慧	长安大学	女	25	硕士研究生	岩土工程	负责水平承载力模型试验及数据处理

4.3 承担的主要工作

(1) 长安大学负责课题研究大纲的制定及可行性报告编制工作，开展渭河流域桥梁桩基病害调查及耐久性评估、模型试验、数值分析及理论计算等方面的研究工作，整理研究成果，编制研究报告及技术指南，组织完成各个阶段项目评审工作。

(2) 西安公路研究院有限公司负责依托工程协调管理工作，参与渭河流域桥桩基病害调查及耐久性评估等现场测试工作，指导室内外试验及理论研究，审查课题研究成果，组织项目评审工作。

(3) 陕西交通建设养护工程有限公司参与研究大纲制定，落实依托工程，协调施工环节及机械组合，协助编制施工技术指南，审查研究成果，协助课题验收。

4.4 项目主要负责人情况

周志军，男，博士，教授，博士研究生导师。MTC30 全国公路专用计量器具计量技术委员会委员，陕西省公路学会试验检测鉴定分会委员会委员。1995 年 9 月至 2006 年 7 月，在长安大学获得公路与城市道路学士学位、岩土工程硕士学位及道路与铁道工程博士学位。主要研究方向：特殊土路基工程、地基基础。核心期刊发表论文 60 余篇，其中 20 余篇被 SCI、EI 检索，主编地方标准 1 项，申请国家专利 14 项，获得陕西省科技进步一等奖 1 项，陕西省科技进步三等奖 3 项，云南省公路学会三等奖 1 项。近五年，先后主持了陕西省交通运输厅、陕西省科技厅等科技项目 5 项。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程概况

G108 国道 K1231+586 沙王渭河大特桥位于渭清公路（渭南—固市）渭南市境内（图 6-1），桥梁全长 2294 米，上部结构采用 $5 \times (7 \times 30) + (6 \times 30) + 5 \times (7 \times 30)$ 米连续箱梁（见图 6-2），下部结构采用双柱式桥墩、北岸桥台采用锚杆双柱式框架桥台、南岸桥台为钢筋混凝土柱式框架 与加筋土挡墙组合式桥台、钻孔灌注桩基础。该桥建成于 1994 年，桥面宽度为：0.5 米（防撞护栏）+11.0 米（桥面净宽）+0.5 米（防撞护栏）=12.0 米，桥梁设计荷载等级为汽车-超 20 级，挂车-120。

通过系统的现场调查，该桥多数桥墩墩身存在网状裂缝，网状裂缝最大长度 1.5m；水中桥墩均存在不同程度的冲刷，其中抽查的 27-31（图 6-3）、49-55、68-72 号冲刷较为严重，系梁以下桩基混凝土保护层剥落严重，钢筋锈蚀；33 号墩临时加固基础被冲刷脱空，并出现不均匀沉降，系梁两侧有明显竖向裂缝，存在安全隐患。根据检测结果，管理部门拟对该桥梁进行维修加固。



图 5.1 沙王渭河大桥位置

5.2 投资来源

研究费用来源于交通运输厅拨款与企业自筹，交通厅拨款补助经费用于现场调查、模型试验及理论分析等研究工作；企业自筹经费用于依托工程桩基加固设计与施工工作。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

(1) 2026 年 3 月至 2026 年 8 月，完成课题可行性研究报告，对渭河流域陕西境内公路桥梁桩基进行现场考察，根据专家意见制定课题研究大纲及室内外试验方案，及时完成典型桥梁桩基附近的勘探取样工作。

(2) 2026 年 9 月至 2027 年 2 月，开展渭河流域陕西境内公路桥梁桩基耐久性评估，提出渭河流域陕西境内公路桥梁桩基耐久性评估报告；考虑冲刷深度、保护层混凝土侵蚀及钢筋锈蚀程度等主要因素，开展桩基竖向及水平承载力模型试验及数值分析。

(3) 2027 年 3 月至 2027 年 8 月，结合渭河流域公路桥梁桩基损伤的主要影响因素，开展桩基竖向及水平剩余承载力理论研究，提出竖向和水平剩余承载力计算方法，并对依托工程进行算例分析。

(4) 2027 年 9 月至 2028 年 2 月，结合渭河流域典型桥梁桩基，开展剩余承载力评估，并提出相应的防治对策；整理研究资料，申请课题验收。

5.4 组织管理形式

为保证项目顺利实施，在项目组织管理方面制定以下措施：

- 1) 严格执行合同所规定的内容，保证项目按时、保质完成；

- 2) 提交项目进度和经费使用工作报告;
- 3) 提交鉴定验收所需技术文件和经费使用报告,做好鉴定验收的准备工作;
- 4) 负责项目应用所需人才的培训及成果推广应用,加速科技成果转化成为现实生产力;
- 5) 加强项目实施过程中的检查,定期检查项目执行情况,确保项目质量;
- 6) 鼓励研究人员学术交流,支持研究人员出席国内外各种学术会议;
- 7) 加强对项目研究经费的管理,保证项目经费的合理使用;
- 8) 项目合同内容完成后,将工作总结、研究报告、技术总结及有关资料上报管理中心;
- 9) 注意知识产权的保护,实验记录、数据、图片、录像、报告等资料,按照技术档案管理办法整理归档,不得散失。

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。

经费投入估算		经费支出估算	
科 目	估算数 (万元)	科 目	金 额 (万元)
省交通运输厅补助	19.70	合 计	40
工程配套研究经费	20.30	(一) 直接费用	37
单位自筹		1.设备费	2
其他经费		(1) 购置设备费	1
		(2) 试制设备费	0
		(3) 设备改造与租赁费	1
		2.材料费	1
		3.测试化验实验加工费	2
		4.燃料动力费	2
		5.差旅费/会议费/国际合作与交流费	3.7
		6.出版/文献/信息传播/知识产权事务/印刷费	1
		7.劳务费	3
		8.专家咨询费	2
		9.其他支出	20.3
		(二) 间接费用	3
		1.管理费	2
		2.绩效支出	1

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。

七、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

7.1 项目预期目标

(1) 根据沙王渭河大桥桩基病害调查结果, 利用变权理论修正权重指标, 基于层次分析法建立沙王渭河大桥桩基耐久性评估模型;

(2) 针对沙王渭河大桥河床地面线高于设计最大冲刷线的在役公路桥梁桩基, 提出不同病害组合条件下桩基剩余承载力计算方法

7.2 最终提交的研究成果及其形式

(1) 调研报告——沙王渭河大桥桩基病害现状及耐久性评价报告

(2) 研究报告——在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究

(3) 技术指南——沙王渭河大桥桩基设计与加固技术指南

(4) 研究成果达到国内领先水平, 在国内外核心学术期刊上发表论文 1~2 篇, 其中至少 1 篇被 EI 或 SCI 检索, 申请国家专利 1 项。

7.3 经济、社会、环境效益分析

渭河流域公路桥梁桩基普遍存在河床下切、混凝土侵蚀及钢筋锈蚀等病害, 为保证桥梁的正常运营, 养护部门针对不同冲刷条件下的桥梁桩基进行了加固与维修。由于渭河河床不断迁移及降水带北移等原因, 渭河流域桥梁部分桩基冲刷深度加大, 加固工作重复持续开展。通过本课题研究, 拟从建设和运营两个阶段提出解决方案:

(1) 渭河流域桥梁桩基病害是普遍现象, 表明该水文地质条件中桥梁下部结构采用常规的水下灌注桩时存在一定的缺陷。因此, 新

建公路桥梁桩基设计与施工时,应采用经济有效的措施提高最大冲刷线以上灌注桩钢筋保护层混凝土强度,以抵抗长期的水流冲刷破坏作用,从而降低运营过程桥梁桩基的加固维修费用。其次,考虑渭河流域河床的持续迁移,按照最大冲刷线开展桥梁桩基的承载力及抗震性能设计,提高桥梁桩基安全储备,减少加固维修工作,降低了桥梁结构全寿命周期内工程造价,保持了交通运输的顺畅,经济和社会效益显著。

(2) 针对渭河在役桥梁已经存在病害的桩基,开展剩余承载力研究,提出考虑不同冲刷条件时灌注桩剩余承载力计算方法,根据剩余承载力给出相应的加固措施建议,指导该地区公路桥梁桩基加固设计。

八、申请单位意见

该项目研究目标明确，研究经费及依托工程已落实，人员配备合理，同意申报。



单位负责人：(签字)
科研项目专用章
年 月 日

在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究 大纲评审意见

2026年3月13日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究”（项目编号：25-32K）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、项目研究内容较全面，研究目标明确，技术路线可行。

二、项目研究人员组成较合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，依托工程落实，具备开展研究工作的基本条件。

三、预期成果覆盖研究目标。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：进一步明确研究内容的适用范围。

主任委员：陈长波
2026年03月13日

专家审查意见表

项目名称	在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究				
专家姓名	陈长海	职务/职称	正高级工程师	专 业	桥梁工程
专家单位	陕西省交通规划设计研究院有限公司			联系电话	13309281155

评 审 意 见

该科研大纲围绕渭河流域桥梁外露桩基剩余承载力问题展开研究，聚焦外露部分桩基的常见病害，分析不同病害类型、病害程度对桩基承载力影响程度，进而提出针对性的修复加固方案。整体框架系统完整，研究团队在该领域具备较好的理论与工程实践积累，研究方案及技术路线总体可行，具备开展研究的基本条件。建议进一步完善。

1、本课题针对渭河流域桥梁外露桩基剩余承载力问题进行研究，应说明安康汉江一桥桩基加固方案与本课题研究内容的关系。

2、课题研究的影响桩基剩余承载力因素有：外露桩身的有效截面（缩径或扩径）、倾斜度、桩顶偏心荷载、河床下切深度、混凝土保护层脱落、钢筋锈蚀等。针对既有桩基承载力，考虑这些因素的前提应该是：当前河床地面线高于设计最大冲刷线。这一点应在大纲中明确提出，限定研究范围。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 13 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究				
专家姓名	张保元	职务/职称	正高工	专 业	桥梁工程
专家单位	西安市市政建设（集团）有限公司			联系电话	138/2818/73

评 审 意 见

研究内容非常有必要性. 大纲编制
 内容全面. 技术路线清晰.
 1. 对加固处理后桩基承载力
 进行检测的程序进行预测预判.
 2. 加固范围用范围要限定.

评审专家（签字）：张保元
 2016年2月13日
 （本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究				
专家姓名	卢皓	职务/职称	正高工	专业	桥梁工程
专家单位	中铁第一勘察设计院集团有限公司			联系电话	13609191693
评审意见 1. 原则同意, 通过评审. 2. 细化 承载力 计算方法的验证试验. 3. 建明桩基研究的边界条件. b 评审专家(签字): 卢皓 2026年3月13日 (本意见入档, 应填写工整, 纸面不敷, 可另加纸)					

专家审查意见表

项目名称	在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究				
专家姓名	惠迎新	职务/职称	副总经理/教授	专 业	桥梁工程
专家单位	宁夏交通建设股份有限公司/宁夏大学			联系电话	18100956939

评 审 意 见

1. 研究内容包括桩基病害调查、剩余承载力评估、加固对策研究等，但目前实施方案没有清晰体现各研究模块之间的逻辑关系，例如：病害调查数据如何进入承载力计算及承载力评估结果如何指导加固方案设计。如果研究内容只是并列展开，后期可能出现调查数据难以用于模型及评估方法难以指导加固方案。
2. 研究方案提出开展桥梁桩基病害调查，但没有明确调查桥梁数量、调查指标体系及病害分类方法。如果调查范围和指标不明确将导致数据难以用于统计分析及难以形成具有代表性的病害特征规律。
3. 方案提出建立桩基剩余承载力计算方法，但没有说明基于什么理论模型、是否建立新的计算公式及是否采用现有规范修正方法。
4. 研究背景指出河床下切和冲刷是桩基裸露的主要原因，但实施方案中未明确冲刷深度如何进入承载力计算。如果冲刷因素没有定量化，承载力评估方法难以反映真实工况。
5. 实施方案提出研究桩基防治对策，但没有明确研究哪些加固技术以及如何评价加固效果。

评审专家（签字）：

惠迎新

2026年3月13日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究				
专家姓名	杜进生	职务/职称	教授	专 业	桥梁工程
专家单位	北京交通大学			联系电话	13552795846

评 审 意 见

项目依托渭河流域陕西境内公路桥梁桩基进行研究，形成渭河流域公路桥梁钻孔灌注桩病害现状调查及耐久性评估报告；选取渭河流域典型公路桥梁下部结构，针对典型冲刷深度及桩身损伤条件下钻孔灌注桩，按照相似比开展至少 6 根模型桩承载力试验；完成“在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策”研究报告及“渭河流域公路桥梁桩基设计与加固技术指南”编制工作。

项目以实际工程问题为导向，研究内容较合理，思路清晰，技术基本路线可行，能够达到预期研究成果和研究目标！

建议结合既有相关研究成果有针对性的开展相关研究内容。

评审专家（签字）： 

2026 年 3 月 13 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究 (项目编号: 25-32K)

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签名
1	主任委员	陈长海	陕西省交通规划设计研究院有限公司	桥梁工程	桥梁工程	正高工	陈长海
2	委员	张保元	西安市市政建设(集团)有限公司	市政工程	市政工程	正高工	张保元
3	委员	卢皓	中铁第一勘察设计院集团有限公司	桥梁工程	桥梁工程	正高工	卢皓
4	委员	杜进生	北京交通大学	桥梁工程	桥梁工程	教授	网上评审
5	委员	李立峰	湖南大学	土木工程	土木工程	教授	网上评审

专家意见处理表

项目名称： 在役桥梁裸露桩基剩余承载力评估及防治对策研究 (项目编号： 25-32K)

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应, 详细说明修改情况)
1	陈长海	1、本课题针对渭河流域外露桩基剩余承载力问题进行研究, 应说明安康汉江一桥桩基加固方案与本课题研究内容的关系。 2、课题研究的影响桩基剩余承载力因素有: 外露桩身的有效截面(缩径或扩径)、倾斜度、桩顶偏心荷载、河床下切深度、混凝土保护层脱落、钢筋锈蚀等。针对既有桩基承载力, 考虑这些因素的前提应该是: 当河床地面线高于设计最大冲刷线。这一点应在大纲中明确提出, 限定研究范围。	1、P17页修改为2014年沙王渭河大桥加固的技术资料, 为本课题研究提供对比分析资料; 2、在项目研究背景及必要性中已明确本课题研究范围, 即河床地面线高于设计最大冲刷线的在役公路桥梁桩基。
2	张保元	1、对加固处理后的桩基承载力能恢复到程度进行预测; 2、方法的适用范围要限定。	1、桩基加固包括耐久性提升及承载力恢复两个方面, 承载力恢复程度需结合加固措施讨论; 2、在论文研究背景及必要性中将计算方法的适用范围限定在沙王渭河大桥。
3	卢皓	1、细化剩余承载力计算方法的验证试验; 2、明确研究的边界条件。	1、目前不同组合病害条件下剩余承载力计算方法验证试验主要是模型试验, 后期条件允许, 可开展足尺试验; 2、将研究对象限定于沙王渭河大桥、河床水文、地质、桩基参数等均参照沙王渭河大桥。
4	惠迎新	1. 研究内容包括桩基病害调查、剩余承载力评估、加固对策研究等, 但目前实施方案没有清晰体现各研究模块之间的逻辑关系, 例如: 病害调查数据如何进入承载力计算及承载力评估结果如何指导加固方案设计。如果研究内容只是并列展开, 后期	1、病害调查给出桥梁耐久性等级及是否需要加固建议, 加固措施主要结合病害类型开展; 2、在陕西宝鸡、西安、渭南各选取三处典型桥梁进行调查, 调查体系及病害分类方法是本课题研究

陈长海

	可能出现调查数据难以用于模型及评估方法难以指导加固方案。 2. 研究方案提出开展桥梁桩基病害调查,但没有明确调查桥梁数量、调查指标体系及病害分类方法。如果调查范围和指标不明确将导致数据难以用于统计分析及难以形成具有代表性的病害特征规律。 3. 方案提出建立桩基剩余承载力计算公式及是否有说明基于什么理论模型、是否建立新的计算公式及是否采用现有规范修正方法。 4. 研究背景指出河床下切和冲刷是桩基裸露的主要原因,但实施方案中未明确冲刷深度如何进入承载力计算。如果冲刷因素没有量化,承载力评估方法难以反映真实工况。 5. 实施方案提出研究桩基防治对策,但没有明确研究哪些加固技术及如何评价加固效果。	内容之一,通过本课题研究,得出相关的研究成果; 3、3.2.2、3.2.3 中补充了实桥适配竖向及水平承载力估算方法构建理论模型; 4、3.2.2、3.2.3 中补充了实桥适配竖向及水平承载力估算方法构建理论模型中给出了由于冲刷原因产生的承载力修正系数; 5、通过本课题研究得出依托工程桩基耐久性及剩余承载力,为依托工程的加固提出建议。
5	杜进生	1、根据课题组既有成果,结合设计院及建设单位需求,主要针对桩基耐久性及不同病害组合下桩基剩余承载力方面开展研究。

陈长海

项目负责人(签字): 王立军



