

项目合同编号: 25-28K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称: 基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复

理论与技术

承担单位: 长安大学

项目负责人: 朱伟庆

通讯邮编、地址: 710018、西安市未央区长安大学北校区公路学院

传真、电话: 029-82334434、15394186255

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: 25-28K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称: 基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复

理论与技术

承担单位: 长安大学

项目负责人: 朱伟庆

通讯邮编、地址: 710018、西安市未央区长安大学北校区公路学院

传真、电话: 029-82334434、15394186255

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) 严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复技术框架

研究并统计爆炸、地震、泥石流与洪水冲击、车辆与船舶撞击、及盐冻侵蚀等各类自然或人为灾害下 RC 桥墩严重局部受损位置与范围,并探究 RC 桥墩局部受损范围与桥墩直径的关系,以及影响局部受损范围的因素。针对现有修复方法存在修复效率不高及修复效果不理想的问题,提出采用 CFST 节段替换严重局部受损 RC 桥墩的快速-永久修复技术框架,实现严重局部受损 RC 桥墩的快速-永久修复。

(2) 不同受力状态下 CFST-RC 拼接段传力机理

开展钢筋-钢管焊接接头受拉传力试验,探究钢筋纵向应力向钢管传递规律及沿钢管宽度方向扩展规律,探明搭接段拉力有效传递长度与有效分布宽度,揭示各参数对焊接接头受拉性能及破坏模式的影响,建立考虑钢筋-钢管偏心的受拉承载力计算方法。

开展 CFST-RC 拼接段轴压传力试验,分析各节段纵向与横向应力分布,探究轴向压力在拼接段的传递路径与分配规律,探明钢管对拼接薄弱部位的约束加强程度与机理,揭示各参数对拼接段轴压性能及破坏模式的影响,建立考虑钢管约束效应与新-旧节段界面折减的轴压承载力计算方法。

开展 CFST-RC 拼接段压-弯-剪复合传力试验,分析拼接段及附近区域应力分布特征,探究压力-弯矩-剪力经由拼接段的传递路径与规律,探明压-弯-剪耦合作用机制,揭示各参数对拼接段复合传力性能及破坏模式的影响,建立压-弯-剪复合传力时拼接段承载力计算方法。

(3) CFST-RC 混合桥墩破坏模式转移与转化机制

开展修复后 CFST-RC 混合桥墩拟静力试验,探究不同 CFST 段长度和钢管厚度时混合桥墩可能的破坏位置与模式、对应的塑性铰发展特征,探明不同破坏位置与模式时修复后混合桥墩性能相对原 RC 桥墩的恢复程度。揭示沿墩高方向刚度和承载力的突变导致混合桥墩集中破坏与耗能区域的转移机制;分析集中破坏区域耗能与变形特征,揭示由于耗能区域的长短导致的破坏模式转化

机制；针对不同受损位置的 RC 桥墩，探明替换受损节段后混合桥墩的理想破坏模式。

(4) 基于 CFST 节段替换的局部受损 RC 桥墩维修加固设计方法

基于修复后桥墩性能重塑目标，针对局部受损 RC 桥墩，提出“采用规格标准化 CFST 节段替换 RC 桥墩严重局部受损节段，形成 CFST-RC 混合桥墩”的节段替换策略；建立混合桥墩承载力计算方法；提出基于整体性能重塑需求的混合桥墩合理构造，包括 CFST 段长度和钢管厚度；提出相应的施工工艺流程。

2. 技术关键

(1) 单一与复合受力状态下 CFST-RC 拼接段传力机理

不同节段间的拼接段是混合构件的薄弱和关键部位，受到学者和工程师的特别重视。就本项目而言，CFST 节段与 RC 节段之间的拼接段是混合桥墩结构体系中最关键且最为薄弱的部位，其受力状态复杂，需要同时承受轴力、弯矩及剪力等多种内力作用。如何在新旧节段界面及不同结构形式之间建立安全可靠且高效的传力路径，阐明拼接段及其临近区域应力分布规律与传递特征，揭示压-弯-剪耦合作用下的内力传递机制，确保拼接段在不同受力状态下均能够实现稳定、可靠的传力，是实现严重局部受损 RC 桥墩修复后抗震性能重塑的关键技术问题。

(2) CFST-RC 混合桥墩破坏位置转移与模式转化机制

采用性能更优的 CFST 节段替换 RC 桥墩受损节段，并不能保证修复后 CFST-RC 混合桥墩的抗震性能一定优于原 RC 桥墩。节段替换后，桥墩沿墩高方向的刚度与承载力分布会发生明显变化，可能导致结构破坏位置由原 RC 桥墩塑性铰区域转移至其他部位，甚至出现不利破坏模式。因此，分析集中破坏区域耗能及变形特征，揭示由于耗能区域的长短导致的破坏模式转化机制，并合理调控混合桥墩破坏位置与耗能区域分布，使混合桥墩在地震作用下发生理想的破坏模式，阐明混合桥墩破坏位置转移与模式转化机制，是针对不同受损位置与范围的 RC 桥墩提出合理节段替换策略、实现修复后桥墩抗震性能重塑的关键技术问题。

3. 依托工程（依托工作）

K475+372.3 大黄院白河大桥位于十天高速西略段，下行（左幅）桥梁中心桩号为 K475+472.3，桥梁全长 886.6m，桥宽 10.95~22.33m；上行（右幅）桥梁中心桩号为 K475+537，桥梁全长 926.6m，桥宽 10.95~20.21m。

桥梁上部结构采用装配式预应力混凝土箱梁，下行共 11 联 44 跨，跨径组合为： $3\times 20+3\times (4\times 20)+5\times 20+4\times (4\times 20)+5\times 20+3\times 20$ m；上行共 11 联 46 跨，跨径组合为： $5\times 20+3\times (4\times 20)+5\times 20+4\times 20+3\times 20+2\times (4\times 20)+5\times 20+4\times 20$ m；桥梁下部结构为柱式墩、柱式台，桩基础。设计荷载等级为公路-I 级。该桥于 2013 年 12 月建成通车。经检查发现，多处桥墩发生受损，削弱了结构有效截面，影响桥墩的承载能力与耐久性，存在一定的安全隐患，需对其进行维修加固工作，本项目将针对局部受损 RC 桥墩开展修复技术研究。

二、考核指标

1. 预期目标

本项目针对各类自然或人为灾害下严重局部受损 RC 桥墩,通过文献收集、试验研究、数值模拟及理论分析等多种手段,开展基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复理论与技术的研究,预期达到以下目标:

(1) 提出采用 CFST 节段替换严重局部受损 RC 桥墩的快速-永久修复技术框架。

(2) 通过开展钢筋-钢管焊接接头受拉试验、CFST-RC 拼接段轴压单一传力试验、拼接段压-弯-剪复合传力试验,结合数值模拟揭示 CFST-RC 拼接段传力机理、并提出承载力计算方法。通过开展不同 CFST 段长度、钢管厚度、更换位置的修复后 CFST-RC 混合桥墩的试验与数值模拟分析,探究 CFST-RC 混合桥墩可能的破坏位置与破坏模式,揭示混合桥墩破坏模式转移与转化机制。

(3) 建立 CFST-RC 混合桥墩承载力计算方法,提出可实现替换后混合桥墩理想破坏位置与模式的 RC 桥墩局部受损节段替换策略,以及基于整体性能重塑需求的混合桥墩合理构造,提出相应的施工工艺流程,实现严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复的目标。

2. 主要技术经济指标

(1) 提出采用 CFST 节段替换的局部受损 RC 桥墩快速-永久修复技术框架;

(2) 建立不同受力状态下 CFST-RC 拼接段承载力计算方法及 CFST-RC 混合桥墩承载力计算方法;

(3) 提出可实现严重局部受损 RC 桥墩性能重塑的快速-永久修复技术,修复后 CFST-RC 混合桥墩的抗震性能指标恢复至原 RC 桥墩的 95%以上。

3. 经济和社会效益

本项目提出采用 CFST 节段替换严重局部受损 RC 桥墩的快速-永久修复技术,可以极大的缩短严重局部受损 RC 桥墩维修加固施工时间;同时,可适用于墩底、墩中、墩顶不同位置受损节段的维修加固,并确保修复后混合桥墩力学性能达到甚至超过原 RC 桥墩,实现严重局部受损 RC 桥墩修复后性能重塑

的目标，经济效益显著。

项目成果将推广应用于各类自然或人为灾害下严重局部受损 RC 桥墩，实现其性能快速重塑，确保修复后桥梁能够正常服役、抵抗地震等各类自然或人为灾害，大幅增强我国桥梁设施的全寿命韧性、保障战略和经济要道畅通，保障国家经济和人民生命财产安全，产生的社会效益明显。

4. 提交的研究成果及其形式

(1)《基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复理论与技术》研究报告 1 套；

(2) 发表高水平期刊论文 4 篇；

(3) 申请专利、软著 2 项；

(4) 应用工程实践 1 项。

5. 其他考核指标

(1) 培养正高级、副高级人员 2 人；

(2) 参加行业学术会议并作技术交流报告 2 次；

(3) 媒体宣传报道不少于 3 次。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
第一年度	第一季度：完成各类自然或人为灾害下 RC 桥墩受损情况调研、文献资料整理； 第二季度：开展钢筋-钢板焊接接头受拉传力试验，揭示受拉传力机理； 第三季度：开展 CFST-RC 拼接段轴压传力试验，揭示轴压传力机理； 第四季度：开展 CFST-RC 拼接段复合传力试验，探明压-弯-剪耦合作用机制，提出承载力计算方法。
第二年度	第一季度：开展混合桥墩拟静力试验，探明混合桥墩抗震性能与破坏模式； 第二季度：揭示混合桥墩破坏位置转移与模式转化机制，建立承载力计算方法； 第三季度：针对 RC 桥墩不同受损位置与范围提出可实现严重局部受损 RC 桥墩性能重塑的节段替换策略； 第四季度：总结研究成果，提交项目结题报告。

四、项目经费

项目总经费：50 万元
 交通运输厅补助：19.85 万元
 单位自筹：30.15 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	40.0	15.9
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	30.1	7.0
(1) 材料支出	14.1	0.0
(2) 测试化验实验加工支出	6.0	0.0
(3) 燃料及动力支出	0.0	0.0
(4) 差旅/会议/国际合作与交流支出	6.0	4.0
(5) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	4.0	3.0
(6) 其他支出	0.0	0.0
3. 劳务费	9.9	8.9
(1) 咨询专家支出	3.0	2.0
(2) 劳务性支出	6.9	6.9
(二) 间接费用	10.0	3.95
4. 管理费	4.75	1.85
5. 绩效支出	5.25	2.1
合 计	50.0	19.85

五、项目绩效目标

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

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	/
		(1) 小试	否
		(2) 中试(样品样机)	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1. 引进高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2. 培养高层次人才	3
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	3
		3. 培训从事技术创新服务人员(人次)	0
		4. 是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数(台/套/只等)	0
		2. 科研仪器设备利用率(%)	0
		3. 孵化科技型企业(个)	0
		4. 转化科技成果(个)	0
效果类指标	经济效益	1. 新增产值(万元)	0.00
		2. 新增销售(万元)	0.00
		3. 新增出口创汇(万美元)	0.00
		4. 新增利润(万元)	0.00
	社会效益	1. 新增税收(万元)	0.00
		2. 新增就业人数	0
		3. 就业培训(人次)	0
		4. 带动农民增收(万元)	0.00
		5. 培训和指导科技服务(人次)	0
		6. 新增产业带动情况	/
		7. 技术集成示范(项)	0
		8. 建立示范基地(亩数)	0.00
		9. 节约资源能源	/
		10. 环保效益	/
其他需要说明的情况	无		

六、承担单位或研究人员分工

在具体分工上：

承担单位长安大学主要承担科研项目理论架构、机理分析、数据分析、论文发表、专利申请等工作，并完成研究报告的撰写。

参与单位中交瑞通路桥养护科技有限公司主要负责提供依托工程，为本项目提出的技术进行验证；配合完成研究报告撰写，项目结题等。

七、项目参加人员表

项目承担单位：长安大学						
参与单位（排序）：中交瑞通路桥养护科技有限公司						
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	朱伟庆	1987-05-04	长安大学	正高级	桥梁工程	项目统筹
主要研究人员						
2	王技	1979-05-12	中交瑞通路桥养护科技有限公司	正高级	桥梁工程	项目组织实施
3	周敕	1977-01-23	长安大学	正高级	桥梁工程	理论指导
4	姜磊	1990-09-17	长安大学	副高级	桥梁工程	理论指导
5	刘江	1991-07-03	长安大学	副高级	桥梁工程	理论指导
6	孟俊苗	1987-09-02	长安大学	副高级	桥梁工程	理论指导
7	高小育	1973-09-08	长安大学	中级	桥梁工程	理论指导
8	闫标	1987-10-20	长安大学	中级	桥梁工程	理论指导

9	欧阳平	1981-01-11	中交瑞通路桥养护 科技有限公司	副高级	桥梁工程	技术研发	欧阳平
10	朱晓龙	1989-02-12	中交瑞通路桥养护 科技有限公司	副高级	桥梁工程	技术应用	朱晓龙
11	李京蔚	1989-09-11	中交瑞通路桥养护 科技有限公司	副高级	桥梁工程	技术应用	李京蔚
12	肖逸	1998-02-17	长安大学	技术员级	桥梁工程	试验研究	肖逸
13	杨成	1998-11-28	长安大学	技术员级	桥梁工程	试验研究	杨成
14	张亚飞	1997-06-03	长安大学	技术员级	桥梁工程	数值模拟	张亚飞
15	王尧	1995-10-14	长安大学	技术员级	桥梁工程	数值模拟	王尧
16	孙敬航	2000-04-04	长安大学	技术员级	桥梁工程	理论分析	孙敬航
17	韦李欣	1999-10-22	长安大学	技术员级	桥梁工程	试验研究	韦李欣
18	阳鑫	2000-08-01	长安大学	技术员级	桥梁工程	理论分析	阳鑫
19	韩进孝	2002-11-22	长安大学	技术员级	桥梁工程	数值模拟	韩进孝
20	郭星宏	2002-09-22	长安大学	技术员级	桥梁工程	理论分析	郭星宏

八、信息表

项目合同编号	25-28K	密级	/	A: 机密 B: 秘密 C: 内部					
项目名称	基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复理论与技术								
项目实施所在地	陕西省西安市		起止年限	2026 年 3 月至 2028 年 3 月					
总 经 费	50.0 万元		厅 拨	19.85 万元					
第一承担单位	单位名称	长安大学							
	所在地	陕西省西安市					代码	610100	
	通讯地址	西安市未央区长安大学北校区公路学院					邮编	710018	
	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	中交瑞通路桥养护科技有限公司							
	2								
	3								
项目负责人	姓 名	朱伟庆	性 别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1987		
	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	15394186255 029-82334434		电子邮箱		zhuweiqing@chd.edu.cn			
项目联系人	姓名	朱伟庆		性 别		男			
	联系电话	15394186255 029-82334434		电子邮箱		zhuweiqing@chd.edu.cn			
项目组人数	20	高级	9	中级	2	初级	0	其他	9
主要研究内容 (100 字以内)	提出严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复技术框架; 研究不同受力状态下 CFST-RC 拼接段传力机理; 研究 CFST-RC 混合桥墩破坏模式转移与转化机制; 建立基于 CFST 节段替换的局部受损 RC 桥墩维修加固设计方法。								
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.合同正本一式柒份，甲方单位伍份，承担单位贰份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：

陕西省交通运输厅

负责人：（签字）

李涛

2016年3月27日

联系人：（签字）

张喆

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）

长安大学

单位负责人：（签字）

陈建

2016年3月27日

项目负责人：（签字）

朱伟

科研项目专用章（公章）

电 话：15394186255

财务负责人：（签字）

师艺

账 户 名：长安大学

开户银行：中国银行西安翠华路支行

账 号：102007335073

陕西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：李伟庆

2026年3月19日

项目编号: 25-28K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 基于 CFST 节段替换的严重局部受损
RC 桥墩快速-永久修复理论与技术

申请单位: 长安大学 (盖章)

联系人: 朱伟庆

电 话: 15394186255

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月



目录

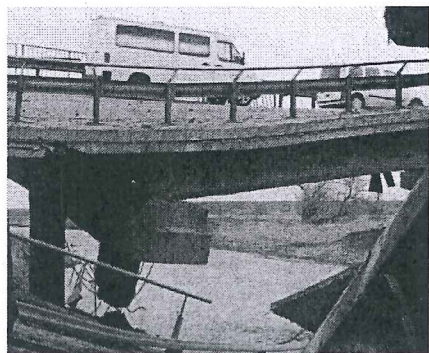
一、项目研究的背景和必要性.....	- 1 -
1.1 研究背景.....	- 1 -
1.2 研究目的.....	- 2 -
1.3 项目概况.....	- 2 -
1.4 市场需求前景或推广应用领域.....	- 2 -
1.5 达到的技术水平.....	- 3 -
1.6 在国民经济发展中的作用.....	- 3 -
二、前期科研及工作基础.....	- 4 -
2.1 对项目领域国内外（省内外）研究现状.....	- 4 -
2.2 参考文献.....	- 6 -
2.3 项目前期科研及现有工作条件.....	- 9 -
三、实施方案.....	- 20 -
3.1 拟解决的关键问题.....	- 20 -
3.2 主要研究内容及实施方案.....	- 21 -
3.3 技术路线.....	- 22 -
3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接.....	- 34 -
3.5 有关技术经济指标.....	- 34 -
四、项目承担单位及参加单位概况.....	- 34 -
4.1 单位概况.....	- 34 -
4.2 技术力量及人员构成.....	- 35 -
4.3 各自承担的主要工作.....	- 36 -
4.4 项目主要负责人情况.....	- 36 -
五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件.....	- 37 -
5.1 依托工程（工作）概况.....	- 37 -
5.2 投资来源.....	- 37 -
5.3 工程进度与项目科研进度的配合.....	- 38 -
5.4 组织管理形式.....	- 38 -
六、项目经费估算及资金筹措情况.....	- 40 -

七、项目绩效指标.....	- 41 -
八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益.....	- 43 -
8.1 项目预期目标.....	- 43 -
8.2 提交的研究成果及其形式.....	- 43 -
8.3 其他考核指标.....	- 43 -
8.4 经济、社会效益分析.....	- 44 -
九、其它需要说明的问题.....	- 45 -
十、申请单位意见.....	- 46 -

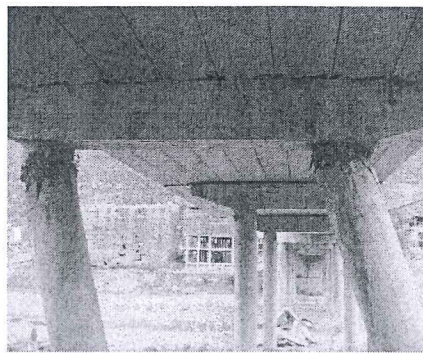
一、项目研究的背景和必要性

1.1 研究背景

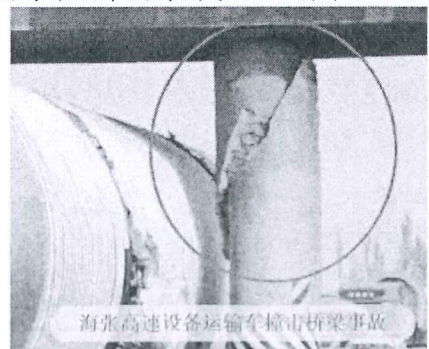
我国地震、地质灾害频发，极端气候也呈现频次暴增、强度骤变趋势；国际局势日益紧张，国际环境日趋复杂，国家战略安全受到前所未有的挑战。党的二十大报告明确指出，必须“强化重大基础设施等安全保障体系建设，维护交通等重要基础设施安全”。桥梁作为联通交通基础设施网络的关键节点与枢纽，是保障我国经济发展、救灾抢险、国防安全的重要基石，桥墩更是支撑整个桥梁结构的最关键构件。在其服役过程中，桥墩可能会遭受爆炸、地震、泥石流与洪水冲击、车辆与船舶撞击、及盐冻侵蚀等各类自然或人为灾害，并发生严重的局部损伤，导致交通事故或交通中断，严重威胁人民生命财产与国家战略安全。因此，在满足快速修复的前提下，实现严重局部受损桥墩的永久修复（即性能重塑），是确保修复后桥梁正常服役、抵抗地震等各类自然或人为灾害的基本要求，对于增强我国桥梁设施的全寿命韧性、保障战略和经济要道通畅至关重要。工程结构全寿命抗灾韧性相关主题在 2021~2023 连续三年被中国工程院研判为土木、水利与建筑工程领域 Top10 工程研究前沿，更体现这一问题的迫切性和重要性。



(a)俄乌冲突中遭爆炸袭击的桥梁和RC桥墩



(b)汶川地震北川县龙尾大桥RC桥墩破坏



(c)车辆撞击RC桥墩剪切破坏



(d)RC桥墩盐冻侵蚀破坏

图1 不同自然或人为灾害下严重局部受损RC桥墩

目前,我国在役的 100 多万座桥梁绝大多数均采用现浇钢筋混凝土 (RC) 桥墩,且其是桥梁抗震的关键构件,在快速修复前提下实现其性能重塑的难度远超主梁等其它构件。不同灾害导致 RC 桥墩的局部受损有位置随机性强且程度不一的特点。已有粘贴纤维复合材料等快速修复方法,以及“加强纵向传力”“转移破坏位置”等综合修复方法,要么修复效率不高,不能适应桥墩受损位置随机的特征;要么修复效果不理想,无法应对严重局部受损 RC 桥墩性能重塑,即难以实现“快速修复”和“性能重塑”的协同。

1.2 研究目的

本项目针对严重局部受损 RC 桥墩,提出“采用规格标准化 CFST 节段替换 RC 桥墩局部受损节段,形成 CFST-RC 混合桥墩”的快速-永久修复方法,一方面期望实现对 RC 桥墩严重局部受损区域的快速高质量替换与拼接;另一方面期望利用受力性能更优的 CFST 节段重构局部受损区域的传力路径、利用钢管约束新旧节段薄弱交界部位,最终实现严重局部受损 RC 桥墩快速修复及修复后性能重塑,即快速-永久修复的目标。项目成果将助力增强陕西乃至全国桥梁设施及整个交通基础设施网络的全寿命韧性,保障国家战略安全。

1.3 项目概况

桥梁作为联通交通基础设施网络的关键节点与枢纽,是保障我国经济发展、救灾抢险、国防安全的重要基石,桥墩更是支撑整个桥梁结构的最关键构件,在满足快速修复的前提下,实现严重局部受损桥墩的永久修复,是确保修复后桥梁正常服役的基本要求。针对各类因素导致的 RC 桥墩严重局部损伤问题,提出严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复技术框架,揭示不同受力状态下新旧节段间 CFST-RC 拼接段传力机理,探明节段替换后 CFST-RC 混合桥墩破坏模式转移与转化机制,最终建立基于 CFST 节段替换的局部受损 RC 桥墩维修加固设计方法,为工程实践提供理论支撑与技术指导。

1.4 市场需求前景或推广应用领域

我国在役百万余座桥梁中,钢筋混凝土 (RC) 桥墩作为支撑整个桥梁结构的最关键构件,在其服役过程中,可能会遭受爆炸、地震、车辆与船舶撞击、盐

冻侵蚀等各类自然或人为灾害,并发生严重的局部损伤,导致交通事故或交通中断,严重威胁人民生命财产与国家战略安全,存在大量桥墩严重局部损伤部位的快速、永久性修复需求。然而,现有修复加固技术存在修复效率低、性能恢复不足等问题,难以满足在快速修复的前提下,实现严重局部受损 RC 桥墩永久修复(即性能重塑)的工程要求。

为实现严重局部受损 RC 桥墩的快速修复与性能重塑,本项目提出的采用 CFST 节段替换严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复技术,具有显著优势:利用钢结构的可焊性可以极大的缩短严重局部受损 RC 桥墩维修加固施工时间;利用受力性能更优的 CFST 段重构受损区域的传力路径,并对新-旧节段薄弱交界部位进行约束,可以实现严重局部受损 RC 桥墩的性能重塑。该技术成果适用于灾后应急抢险,保障战略通道快速恢复,在公路、铁路及市政桥梁的维修养护领域具有广阔的推广应用前景。

1.5 达到的技术水平

本项目旨在解决严重局部受损 RC 桥墩“修复效率与效果难协同”的难题,提出了采用“规格标准化 CFST 节段替换 RC 桥墩严重局部受损节段”的节段替换策略,系统揭示了 CFST-RC 拼接段在单一与复合受力状态下的传力机理、CFST-RC 混合桥墩破坏位置转移与模式转化机制,建立了 CFST-RC 混合桥墩承载力计算方法,并提出了基于节段间安全传力需求与整体性能重塑需求的合理构造,为严重局部受损 RC 桥墩的快速永久修复提供理论指导。此本项目研究成果具有重大的创新性和实用性,填补了一项重大的技术空白。

1.6 在国民经济发展中的作用

本项目研究成果对保障国家经济发展与战略安全具有深远意义。通过为严重局部受损 RC 桥墩提供了一种快速且可靠的修复方案,能显著缩短交通中断时间,最大限度降低灾害对物流运输、经济运行的冲击,有力保障战略通道、救灾抢险及经济动脉的畅通,提升国家交通战略要道的抗灾韧性与快速恢复能力。在此基础上,通过钢结构的优异性能实现受损部位的性能重塑,可以增强其抵御未来灾害的能力,显著提升基础设施全寿命周期韧性与安全水平。此外,项目成果将产生显著的经济社会效益:快速修复可极大减少间接经济损失,永久性修复可避免

重复投资与维修养护成本,全寿命周期经济性优异;同时,其对保障人民生命财产安全、维护社会稳定具有长远的社会价值。

二、前期科研及工作基础

2.1 对项目领域国内外(省内外)研究现状

构件修复后的性能恢复程度与其损伤程度密切相关,目前已有许多学者针对不同受损程度的 RC 桥墩(柱)的修复进行了大量研究^[1-4]。在轻-中度受损 RC 桥墩(柱)的修复方面,江世永等^[5]针对有限受损 CFRP 筋高韧性纤维混凝土柱(层间位移角 1/85),在处理柱表面并缠绕碳纤维布后开展拟静力试验,结果发现柱修复后表现出弯曲破坏,承载力和变形均恢复至原水平,耗能能力明显提高。陈靖文等^[6]提出对轻-中度受损 RC 柱采用粘贴芳纶纤维薄板的方法进行修复,拟静力试验结果表明柱修复后承载力、延性和耗能能力得到较大提高。以上表明,对于发生轻-中度损伤的 RC 桥墩(柱),采用外贴(缠绕)纤维复合材料的修复方法可以获得较好的性能恢复效果。

针对中-重度受损 RC 桥墩(柱),往往需要采用置换受损区剥落混凝土甚至全部混凝土、粘贴纤维复合材料等综合修复手段。周长东等^[7]在对破损部位进行修补的基础上采用预应力纤维条带对受损 RC 圆墩进行加固,通过开展拟静力试验发现,该方法可有效恢复轻微和中度受损 RC 圆墩的抗震性能,但严重受损 RC 圆墩修复后的破坏模式仍然表现为剪切破坏,承载力、延性和耗能能力的恢复程度不足。Sun 等^[8]针对受损 RC 圆形桥墩,提出采用高流动性早强混凝土置换剥落混凝土并外包 CFRP 的快速修复方法,开展拟静力试验发现,该方法可有效将桥墩承载力、延性与耗能能力恢复至甚至超过原桥墩的水平,但桥墩修复后仍然存在初始刚度偏低、屈服位移偏大的不足。Toska 等^[9]提出采用 FRCM 复合外套修复受损 RC 柱,拟静力试验结果表明初始刚度仅恢复至原 RC 柱的 73%~86%。He 等^[10]通过拟静力试验验证了置换破损混凝土并外缠 CFRP 修复受损 RC 桥墩的效果,发现刚度和延性难以恢复至原桥墩水平;谷倩等^[11]提出采用喷射 FRP 加固受损 RC 柱,拟静力试验结果表明加固柱的承载力仅能恢复至原 RC 柱的 90%左右。Rodrigues 等^[12,13]针对受损 RC 柱,分别采用置换破坏区域全部混凝土并外贴 CFRP、以及搭焊纵筋并利用细骨料混凝土置换受损区域全部混凝土的方法进行修复,拟静力试验结果表明初始刚度和等效粘滞阻尼系数较原柱

仍偏低。Hudson 和 Darwin^[14]针对近场爆炸后发生弯剪破坏的 RC 梁,采用填补高强砂浆再包裹 CFRP 布的方法对其进行修复,通过开展三点受弯试验发现,梁修复后的承载力仅能恢复至原水平的 94%,且延性有所降低。Xu 等^[15]针对接触爆炸下发生剪切破坏的 RC 桥墩,采用聚合改性砂浆修补局部受损区并包裹 CFRP 布的方法进行修复,发现桥墩修复后的轴向承载力较未损伤桥墩低约 20%,且爆损程度越大修复后承载力越低。此外,Chen 等^[16]采用砂浆修补受损区、粘贴 CFRP 条带并利用锚固钢梁对其固定的综合方法对爆损 RC 拱进行了修复。Song 等^[17]针对接触爆炸后局部受损的 RC 直墙拱,通过复位变形钢筋、置换混凝土修补胶的方法进行修复,发现结构修复后的刚度和延性均未完全恢复至原水平。吕辰旭等^[18]针对近场爆炸后发生直剪破坏的装配式 RC 柱,采用高等级混凝土置换爆损区全部混凝土并外包 CFRP 的方法进行修复,随后的轴压试验发现,柱修复后的轴向承载力可得到完全恢复,但其最终发生脆性破坏。

为进一步提高受损(尤其是严重受损)RC 桥墩(柱)修复后的性能恢复程度,学者们提出了“加强纵向传力”、“转移破坏位置”的综合修复技术。在“加强纵向传力”方面,He 等^[19]和 Yang 等^[20]针对受损纵筋断裂 RC 桥墩,提出采用置换破碎混凝土、外贴锚固纵向 CFRP 条和缠绕 CFRP 层的方法进行修复,拟静力试验结果表明桥墩的抗弯刚度、承载力和延性可得到有效恢复,但抗扭刚度和耗能能力仍然低于原 RC 桥墩。Yang 等^[21]采用灌注高强灌浆材料修复塑性铰区、缠绕横向 CFRP 布、外贴锚固纵向 CFRP 布的方法对严重受损 RC 柱进行修复加固,拟静力试验结果表明刚度和承载力仍未能完全得到恢复。Rutledge 等^[22]针对受损且断筋 RC 桥墩,提出采用粘贴锚固纵向 CFRP 布并缠绕横向 CFRP 布的快速修复方法,试验结果表明,该方法可有效恢复桥墩承载力和变形能力。曾兴贵等^[23]提出对受损 RC 圆柱采用近表面植 BFRP 筋和外包 BFRP 布相结合的方法进行修复加固,随后的拟静力试验发现,修复后的圆柱发生弯曲破坏,延性及耗能能力均能恢复至原柱的水平,承载力较原柱有不同程度的提高。然而,此类方法的修复效果在很大程度上受到粘结材料的影响^[19,20];同时,需在承台内锚固纵向 CFRP 条带或植 BFRP 筋,故仅适用于修复墩底受损区域。

在“转移破坏位置”方面,Wu 和 Pantelides^[24]针对墩底严重受损 RC 圆柱,提出采用 CFRP 管内填无收缩混凝土扩大墩底截面、并重新植入带帽纵筋的方法对其进行快速修复,拟静力试验结果表明,由于修复后墩底塑性铰转移至截面扩

大区域以外,故其刚度、承载力、变形和耗能能力均得到有效恢复甚至提升。Krish 等^[25]采用钢管混凝土环箍并植纵筋的方法对受损 RC 桥墩进行修复,抗震性能也得到有效恢复。Zhou 等^[26]采用 UHPC 护套并植纵筋的方法对 RC 桥墩严重受损部位进行扩大截面修复,拟静力试验发现,随着 UHPC 护套厚度的增加,塑性铰位置向上转移,桥墩修复后性能均恢复至原桥墩水平。Zhang 等^[27]采用 UHPC 护套并植纵筋的方法对受损预应力预制节段桥墩进行加固,拟静力试验表明当 UHPC 护套为一个节段高度时桥墩性能得到有效恢复。Wu 等^[28]也采用 UHPC 护套并植纵筋的方法对受损 RC 桥墩进行修复,拟静力试验表明仅采用纵向植筋而不采用横向植筋时,柱修复后的变形能力和耗能能力低于原 RC 桥墩,建议在 UHPC 护套与既有 RC 节段间植横向钢筋。此外,Del Zoppo 等^[29]针对受损 RC 桥墩提出了采用纤维增强水泥基复合材料轻质护筒并植纵筋的修复方法, Ma 等^[30]针对预损伤 RC 柱提出了采用 UHPC 护套并植 NSM 筋的修复方法,也取得了较好的修复效果。综上,这些修复方法在性能恢复方面效果较好,但是需扩大受损区截面、并在承台内植筋,故仅适用于修复墩(柱)底受损区域,且难以满足快速修复的要求。

综合国内外研究现状分析,相关研究已取得了一定的研究成果。但是,针对严重局部受损 RC 桥墩的修复,已有粘贴纤维复合材料等快速修复方法,以及“加强纵向传力”“转移破坏位置”等综合修复方法,要么修复效率不高,要么修复效果不理想,无法应对严重局部受损 RC 桥墩性能重塑,难以实现“快速修复”和“性能重塑”的协同。针对以上问题,项目组提出“采用 CFST 节段替换 RC 桥墩局部受损节段,形成 CFST-RC 混合桥墩”的快速-永久修复技术。一方面利用钢结构的可焊性,实现替换节段与原节段之间高效、便捷、高质量的拼接施工。另一方面,利用受力性能更优的 CFST 段重构局部受损区域的传力路径,利用钢结构约束新-旧节段薄弱交界部位,实现严重局部受损 RC 桥墩修复后性能重塑,最终实现严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复的目标。

2.2 参考文献

- [1] Li S, Chen XY, Liu ZZ, et al. Axial behavior of pre-damaged RC columns strengthened with CFRP textile grid-reinforced ECC matrix composites [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 73: 106813.
- [2] Yan YH, Lu YY, Zhao Q, et al. Flexural behavior of pre-damaged and repaired

- reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer grid and engineered cementitious composite [J]. *Engineering Structures*, 2023, 277: 115390.
- [3] 崔冰, 王景全, 刘加平. UHPC 桥梁研究进展与规模化应用技术路径分析[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(9): 1-19.
- [4] Ma G, Wu C, Hwang HJ, et al. Behavior of pre-damaged normal-strength concrete prisms repaired with basalt FRP sheets under axial compressive monotonic and repeated loading [J]. *Engineering Structures*, 2022, 269: 114786.
- [5] 江世永, 陶帅, 飞渭, 等. 碳纤维布加固震损 CFRP 筋高韧性纤维混凝土柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(6): 109-124.
- [6] 陈靖文, 郭馨艳, 郑小红, 等. AFL 加固受损 RC 柱拟静力抗震实验研究[J]. *实验力学*, 2016, 31(3): 341-351.
- [7] 周长东, 田腾, 吕西林, 等. 预应力纤维条带加固震损混凝土圆墩抗震性能试验研究[J]. *铁道学报*, 2012, 34(10): 103-114.
- [8] Sun ZG, Li HN, Bi KM, et al. Rapid repair techniques for severely earthquake-damaged circular bridge piers with flexural failure mode [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2017, 16(2): 415-433.
- [9] Toska K, Hofer L, Faleschini F, et al. Seismic behavior of damaged RC columns repaired with FRCM composites [J]. *Engineering Structures*, 2022, 262: 114339.
- [10] He RL, Sneed LH, Belarbi A. Rapid repair of severely damaged RC columns with different damage conditions: an experimental study [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2013, 7(1): 35-50.
- [11] 谷倩, 董格, Getahun BM 等. 喷射 FRP 加固震损钢筋混凝土柱抗震性能试验 [J]. *复合材料学报*, 2016, 33(5): 1009-1019.
- [12] Rodrigues H, Furtado A, Arêde A. Experimental evaluation of energy dissipation and viscous damping of repaired and strengthened RC columns with CFRP jacketing under biaxial load [J]. *Engineering Structures*, 2017, 145: 162-175.
- [13] Rodrigues H, Furtado A, Arêde A, et al. Experimental study of repaired RC columns subjected to uniaxial and biaxial horizontal loading and variable axial load with longitudinal reinforcement welded steel bars solutions [J]. *Engineering Structures*, 2018, 155: 371-386.
- [14] Hudson JL, Darwin D. Evaluation and repair of blast damaged reinforced concrete beams [R]. University of Kansas Center for Research, Inc., 2005.
- [15] Xu JP, Wu H, Ma LL, et al. Experimental and numerical study on axial capacity of FRP-rehabilitated postblast RC bridge pier [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2023, 28(10): 04023070.
- [16] Chen HL, Xie W, Jiang MR, et al. Blast-loaded behaviors of severely damaged buried arch repaired by anchored CFRP strips [J]. *Composite Structures*, 2015, 122: 92-103.

- [17] Song DY, Tan QH, Cao YYY, et al. Experimental investigation on blast and post-blast performance of reinforced concrete straight-wall arches strengthened with polyurea coating [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 385: 131352.
- [18] 吕辰旭, 闫秋实, 李亮. 近爆荷载作用下装配式钢筋混凝土柱抗爆性能及受损加固试验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(6): 120-133.
- [19] He RL, Grelle S, Sneed LH, et al. Rapid repair of a severely damaged RC column having fractured bars using externally bonded CFRP [J]. *Composite Structures*, 2013, 101: 225-242.
- [20] Yang Y, Sneed L, Saiidi MS, et al. Emergency repair of an RC bridge column with fractured bars using externally bonded prefabricated thin CFRP laminates and CFRP strips [J]. *Composite Structures*, 2015, 133: 727-738.
- [21] Yang J, Liang ST, Zhu XJ, et al. Experimental research and finite element analysis on the seismic behavior of CFRP-strengthened severely seismic-damaged RC columns [J]. *Structures*, 2021, 34: 3968-3981.
- [22] Rutledge ST, Kowalsky MJ, Seracino R, et al. Repair of reinforced concrete bridge columns containing buckled and fractured reinforcement by plastic hinge relocation [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 19(8): A4013001.
- [23] 曾兴贵, 姜绍飞, 沈圣, 等. 基于屈服后刚度的玄武岩纤维筋-布复合快速修复震损圆柱抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(8): 58-65.
- [24] Wu RY, Pantelides CP. Rapid repair and replacement of earthquake-damaged concrete columns using plastic hinge relocation [J]. *Composite Structures*, 2017, 180: 467-483.
- [25] Krish ZF, Kowalsky MJ, Nau JM. Seismic repair of circular reinforced concrete bridge columns by plastic hinge relocation with grouted annular ring [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2021, 25(12): 2371-2405.
- [26] Zhou M, Song JW, Yin SJ, et al. Cyclic performance of severely earthquake-damaged RC bridge columns repaired using grouted UHPC jacket [J]. *Engineering Structures*, 2023, 280: 115615.
- [27] Zhang KD, Jia JF, Bai YL, et al. Design and seismic performance of precast segmental bridge columns repaired with UHPC jacket after earthquake-induced damage [J]. *Engineering Structures*, 2023, 291: 116442.
- [28] Wu DQ, Ding Y, Su JS, et al. Experimental investigation on seismic performance of severely earthquake-damaged RC bridge piers after rapid strengthening [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2023, 21(7): 3623-3646.
- [29] Del Zoppo M, Di Ludovico M, Balsamo A, et al. Repair, flexural upgrading and seismic retrofit of RC columns with reinforced FRCC light jacket [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 408: 133604.
- [30] Ma G, Wu C, Liu K. Seismic performance of lap-spliced pre-damaged and intact concrete columns strengthened or retrofitted with UHPC and NSM [J].

2.3 项目前期科研及现有工作条件

1、项目的支撑条件

首先,项目负责人致力于结构抗震、组合结构领域的研究,在本项目领域主持了国家重点研发计划子题、军委科技委基础加强计划重点研究项目子题、国家自然科学基金青年项目、陕西省自然科学基金面上与青年项目、陕西省交通运输厅科技研发项目等科研课题。通过大量模型试验、数值模拟与理论分析,系统研究了静载与地震作用下组合结构中关键界面、重要构件、复杂节点的力学性能、破坏模式与设计方法。尤其对组合节点传力机理、组合桥墩地震破坏模式及其转化规律有深刻认识。

其次,开展了充分预研究,对全部关键科学问题开展了探索、验证性试验与数值模拟。①提出了“基于规格标准化 CFST 节段替换 RC 桥墩严重局部受损节段”的成熟技术方案,完成了 CFST 节段-RC 节段间快速拼接、RC 桥墩严重局部受损节段快速替换的工厂验证。②开展了第一批次 CFST-RC 拼接段受拉传力探索性试验,初步探明了传力路径与性能影响因素;开展了第一批次 CFST-RC 拼接段轴压传力与复合传力验证性试验,验证了本项目拼接方案可保障混合桥墩不同节段间安全传力,为进一步深入探究 CFST-RC 拼接段单一以及压-弯-剪复合传力机理奠定了坚实基础。③开展了 CFST-RC 混合桥墩拟静力探索性试验,验证了本项目节段替换方法可实现受损 RC 桥墩抗震性能重塑;开展混合桥墩数值模拟参数分析,初步探明了 CFST 段位于墩底时混合桥墩的 3 类破坏模式、以及其随 CFST 节段构造与长度变化的演变规律,为进一步深入研究地震作用下混合桥墩破坏位置转移与模式转化机制奠定了坚实基础。

最后,本项目研究团队配置合理,成员包括教授级高工、副教授和讲师;项目组擅长的领域涵盖工程结构抗震、CFST 结构与钢管约束混凝土理论、组合结构设计理论与方法、桥梁下部结构高效装配化技术、桥梁加固理论与技术、以及桥梁事故处理技术等。申请人与项目成员组成了稳定的科学研究和工程技术攻关团队,拥有 10 年的产-学-研-用合作经历,依托合作的纵向科研项目 and 实际工程项目,共同发表了学术论文、申请了国家专利、编写了地方标准、研发了标准图集等。

2、获奖情况

[1] 城市钢桥景观设计与施工关键技术研究, 中国市政工程协会市政科技专业委员会, 全国市政行业市政工程科学技术奖, 技术开发类一等奖, 2020. (排名第2)

[2] 西安曲江临潼国家旅游休闲度假区烽火大道桥涵工程-王坡沟南桥, 中国勘察设计协会, 全国优秀工程勘察设计行业奖(优秀市政公用工程 道路桥隧), 二等奖, 2017. (排名第14)

[3] 西安曲江临潼国家旅游休闲度假区烽火大道桥涵工程-王坡沟南桥, 陕西省住房和城乡建设厅, 陕西省优秀工程设计奖(市政类), 一等奖, 2017. (排名第14)

[4] 城市钢桥景观设计与施工关键技术研究, 2019年12月20日西安市住房和城乡建设局组织成果鉴定会, 总体达到国际领先(排名第2);

[5] 公路桥梁合理分联长度与少缝技术研究, 2021年4月22日陕西省公路学会组织成果鉴定会, 总体达到国内领先(排名第2);

[6] 城市钢桥上部结构技术创新-功能分区设计的部分敞口钢梁设计与施工, 2023年6月4日陕西省土木学会组织成果鉴定会, 总体达到国内领先(排名第2)。

3、现有的试验手段

本项目主要依托学校重点学院公路学院、“交通运输工程”一流学科、“公路与桥梁高效养护及安全耐久国家工程研究中心(共建)”“公路大型结构安全教育部工程研究中心”和“旧桥检测与加固技术交通运输行业重点实验室”等国家和省部级重点研究平台开展研究。平台拥有与本项目相关的 MTS 拟静力加载系统、反力墙、2000t 压剪试验系统、2000t 长柱试验系统、200t 和 400t 拉-压试验系统、200t 和 300t 液压加载系统, 疲劳试验机, 且配备 64 通道 DEWE 超高速动态信号采集测试系统、128 通道 DEWE 高性能动态数据测试系统、256 通道 TDS 静态数据采集系统、远距离高清高速摄像系统、超声波测试仪、激光挠度测试系统等先进试验仪器设备, 配备 1000t、500t、300t、100t 和 50t 等多种规格的压力或拉-压力传感器。可满足内容 2 和 3 中开展 CFST-RC 拼接段单一与复合传力试验、混合桥墩拟静力试验所需的加载与数据采集要求。长安大学超算中心拥有 CPU 算力(双精度浮点运算次数)超过 800 万亿次、GPU 算力(单精度浮点运算次

数)达 2000 万亿次的高性能计算平台,并拥有多个大型商用的结构分析与数值计算软件,能够满足各类数值模拟和理论分析等大型计算需求。此外,长安大学图书馆引进了中国知网、SCI、EI、ESI 等 78 个数据库平台、130 个子库,建立了公路桥梁、交通运输、建筑工程等多学科文献资源保障体系,可确保项目组及时跟踪本项目研究领域的最新研究动态。本项目的开展具有充分的软、硬件保障,工作条件完备。

4、过去相关研究的工作基础

(1) 提出了“基于规格标准化 CFST 节段替换 RC 桥墩受损节段”的成熟技术方案,完成了 CFST 节段-RC 节段间快速拼接、RC 桥墩严重局部受损节段快速替换的工厂验证。

a) 为实现局部受损 RC 桥墩修复后抗震性能重塑,提出了“基于规格标准化 CFST 节段替换 RC 桥墩局部受损节段”的技术方案,相关技术已申请发明专利(实质审查)和实用新型专利(已授权)。

b) 验证了技术方案的快速修复特征。首先,在工厂预制了 8 组 CFST 节段与 RC 节段,并利用拼接段将两者快速拼接形成 CFST-RC 混合短墩(直径和边长为 400mm);完成了 4 组 RC 节段和 RC 承台的工厂预制,并利用拼接段将两者快速拼接形成 CFST-RC 混合桥墩(直径和边长为 400mm)。其次,在工厂完成 2 个墩底严重震损 RC 桥墩(直径和边长为 400mm)的受损节段替换。

快速修复特征表现在以下 3 个方面:①可充分利用原 RC 承台、基础、盖梁以及未严重局部受损 RC 桥墩节段;②可发挥钢结构焊接优势,并利用钢筋-钢管间焊接时定位精度要求低、拼接段钢管与 CFST 更换节段钢管间缝隙可调,实现 RC 节段、CFST 节段与 RC 承台间的高效便捷与高质量拼接;③利用新-旧节段间混凝土面直接承压以及纵筋-钢管间传力实现混合桥墩在钢结构焊接完毕便可承受正常使用荷载,利用灌浆料的早强特性实现混合桥墩在灌浆后 2 日即可承受设计荷载。

本部分密切相关研究成果:

[1] 朱伟庆, 窦通宇, 龙刚, 孙敬航. 一种桥墩节段钢管混凝土更换结构[P]. 中国: ZL 2023 2 1791974.7.

[2] 朱伟庆, 龙刚, 窦通宇, 孙敬航. 一种基于钢管混凝土连接的桥墩节段快速更换施工方法[P]. 中国(实质审查).

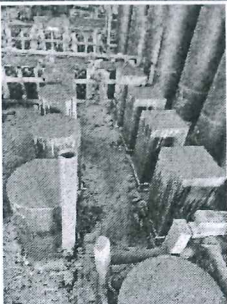
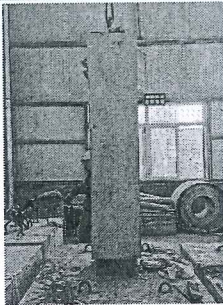
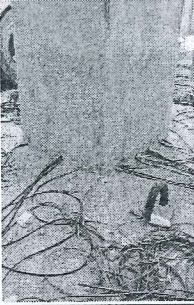
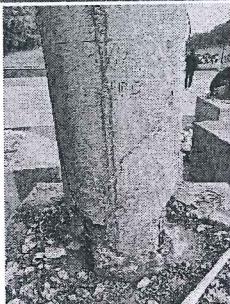
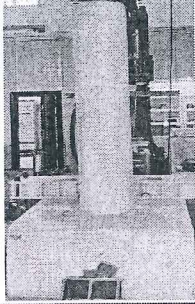
CFST 段 - RC 节段拼接			
	CFST 与 RC 节段预制	拼接段焊接	拼接段灌浆完毕
RC 节段 - RC 承台拼接			
	RC 节段与承台预制	RC 节段与承台拼接	施工完毕
RC 墩局部震损节段替换			
	震损 RC 桥墩	局部受损节段替换	施工完毕

图 2 前期研究基础 1: CFST 节段-RC 节段拼接验证与 RC 桥墩局部受损节段替换验证

(2) 开展了第一批次 CFST-RC 拼接段受拉传力探索性试验, 初步探明了传力路径与性能影响因素; 开展了第一批次 CFST-RC 拼接段轴压传力与复合传力验证性试验, 验证了本项目拼接方案可保障混合桥墩节段间安全传力, 为本项目内容 2 进一步深入探究 CFST-RC 拼接段单一与复合传力机理奠定了坚实的基础。

a) 钢筋-钢板焊接接头受拉传力探索性试验: 开展了 10 个钢筋-钢板焊接接头受拉探索性试验, 试验参数包括纵筋直径、钢板厚度、钢筋-钢板搭接长度。结合数值模拟探明了钢筋纵向应力沿搭接段向钢板的传递规律及在钢板宽度方向的扩展规律, 初步得到了钢筋屈服、钢板屈服、焊缝破坏 3 类破坏模式, 发现了钢筋-钢板偏心会改变焊接接头的受力状态并降低其承载力, 且搭接段越短影响越大。试验结果验证了本项目拼接方案可保障混合桥墩节段间安全受拉传力。

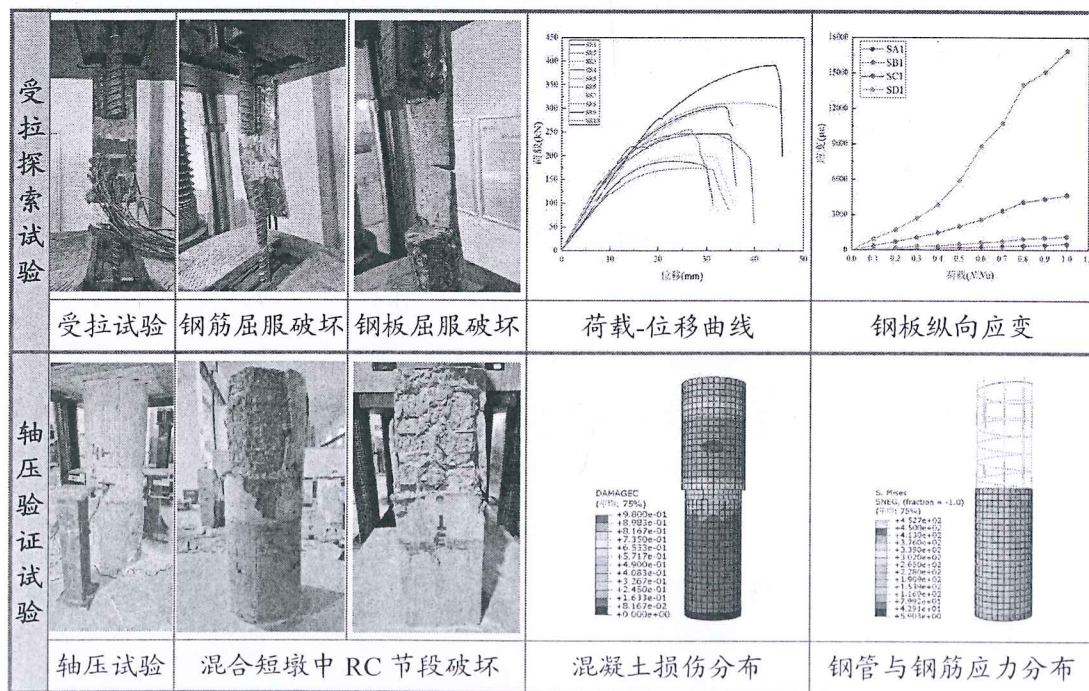
b) CFST-RC 拼接段轴压传力性能验证试验：开展了 8 个 CFST-RC 拼接段轴压传力验证试验，试验参数包括截面形式、拼接段钢管厚度与长度。结合数值模拟发现，由于拼接段钢管厚度和长度合理，两类试件均发生 RC 节段受压破坏，而拼接段破坏不明显，证实了本项目拼接方案可实现混合桥墩节段间安全受压传力。

c) CFST-RC 拼接段压-弯-剪混合传力性能验证试验：制作了 4 个 CFST-RC 混合桥墩与 4 个现浇 RC 桥墩试件。单调和拟静力加载试验结果表明，两种加载条件下混合桥墩均发生 RC 节段底部的塑性铰破坏，而墩底拼接段未发生明显破坏，证实了本项目拼接方案可以保障混合桥墩节段间安全传力。

本部分密切相关研究成果：

[1] 朱伟庆*, 窦通宇, 孙敬航, 韦李欣, 齐佳轩, 杨成. 钢板-钢筋焊接接头受拉性能试验及破坏模式[J]. *建筑科学与工程学报*, 2025, 42(03): 1-14.

[2] Yang C, Zhu WQ*, Qi JX, Zhang FS, Zhou M, Dou TY. Experimental and numerical investigation of CFST-RC hybrid short columns under axial compression[J]. *Structures*. 2025, 81: 110331.



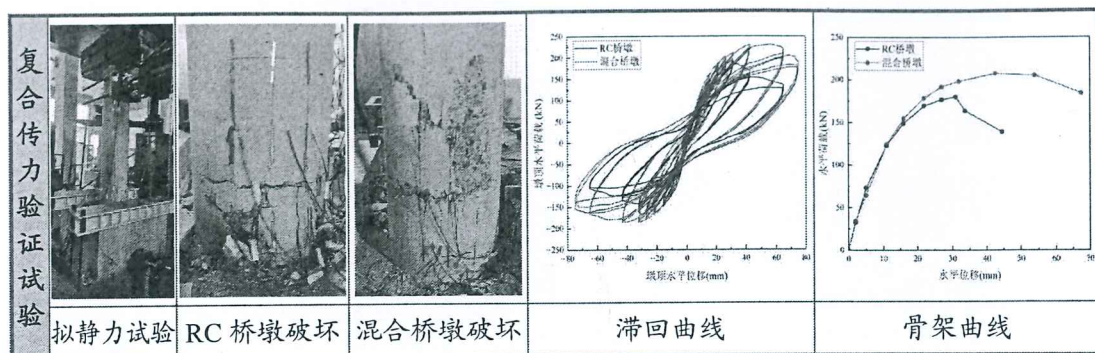


图 3 前期研究基础 2: CFST-RC 拼接段单一与复合传力探索与验证性试验

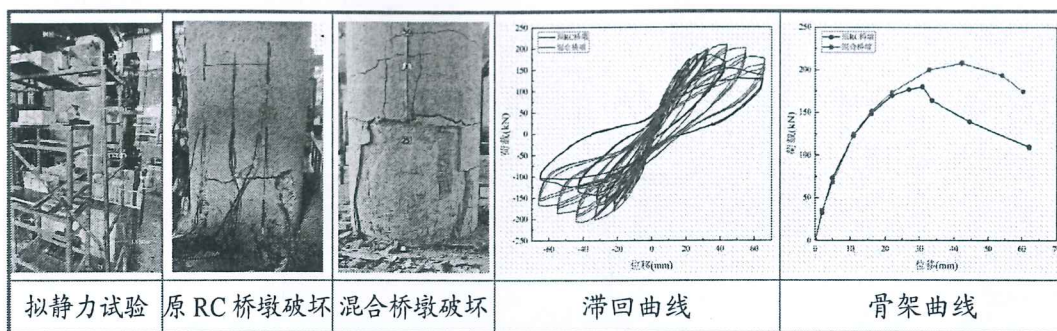
(3) 开展了混合桥墩拟静力探索试验, 验证了本项目技术方案可实现局部受损桥墩修复后抗震性能重塑; 开展数值模拟参数分析, 初步探明了 CFST 段位于墩底时混合桥墩的 3 类破坏模式及其随 CFST 段构造与长度变化的演变规律, 为内容 3 进一步研究地震下混合桥墩破坏位置转移与模式转化机制奠定了坚实基础。

a) 受损 RC 节段替换后 CFST-RC 混合桥墩拟静力探索性试验: 利用 CFST 段替换 RC 桥墩的局部震损节段, 得到 2 个 CFST-RC 混合桥墩并开展拟静力试验。结果表明, 混合桥墩均发生墩底 CFST 段-RC 节段联合破坏; 极限承载力、变形能力和耗能能力分别较原现浇 RC 桥墩提高了 21.0%、42.6%和 54.6%, 初始刚度也较后者略有提高。验证了本项目节段替换方案可以通过实现混合桥墩理想破坏模式达成严重局部受损 RC 桥墩修复后抗震性能重塑的目标。

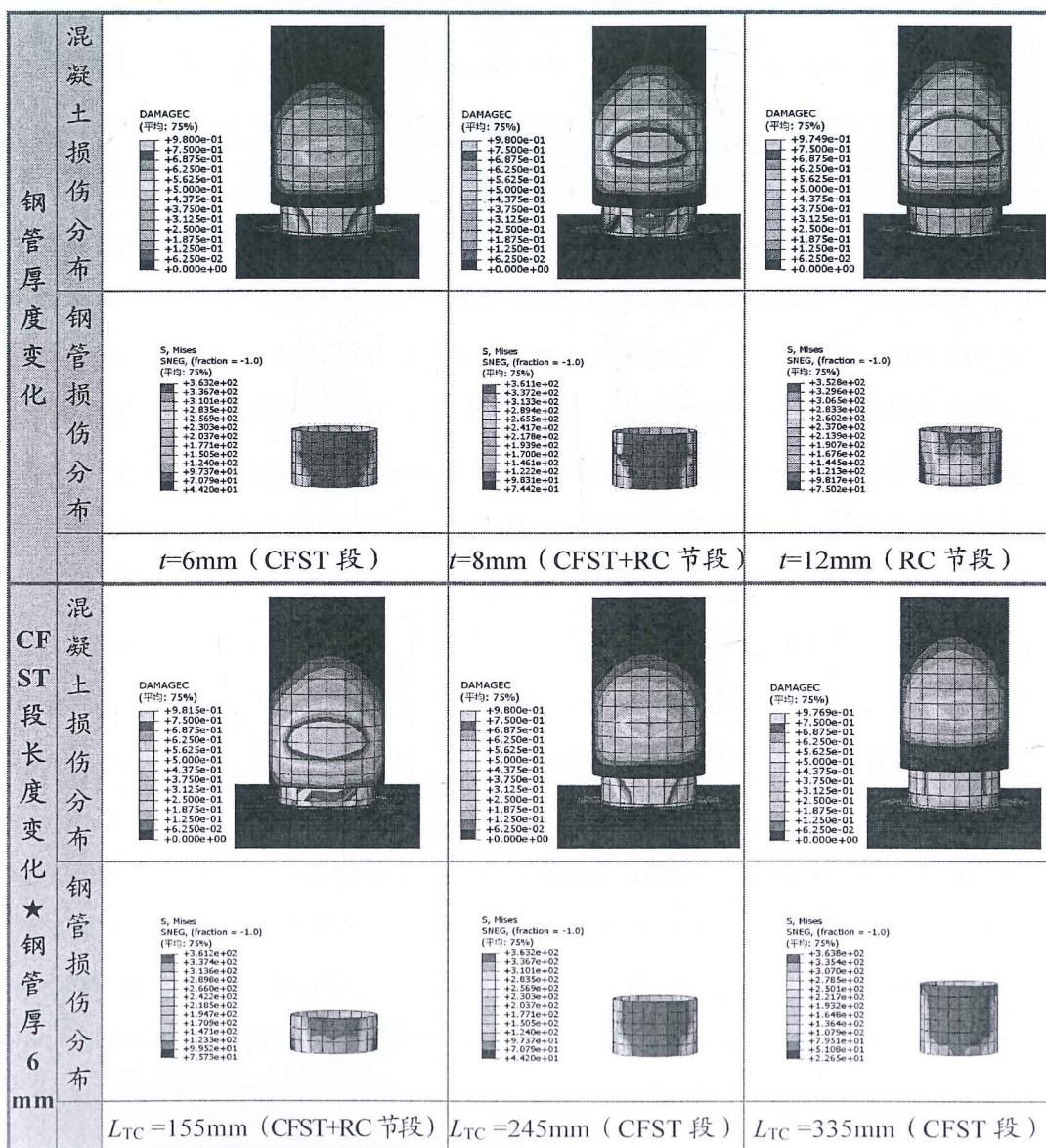
b) 混合桥墩破坏位置转移与模式转化规律探索: 针对 CFST 段位于墩底的情形, 开展数值模拟参数分析发现, 不同 CFST 段构造和长度时, 混合桥墩可能发生 CFST 段塑性铰、CFST 段-RC 节段联合塑性铰、RC 节段塑性铰 3 种破坏模式。同时发现: 随着钢管厚度变小, 混合桥墩的破坏模式由 RC 节段塑性铰破坏逐渐转变为 CFST 段塑性铰破坏; 当钢管较薄时, 随着 CFST 段长度增加, 混合桥墩的破坏模式由 CFST 段-RC 节段联合塑性铰破坏逐渐转变为 CFST 段塑性铰破坏; 当钢管较厚时, 随着 CFST 段长度增大, 混合桥墩的破坏模式始终为 RC 节段塑性铰破坏。

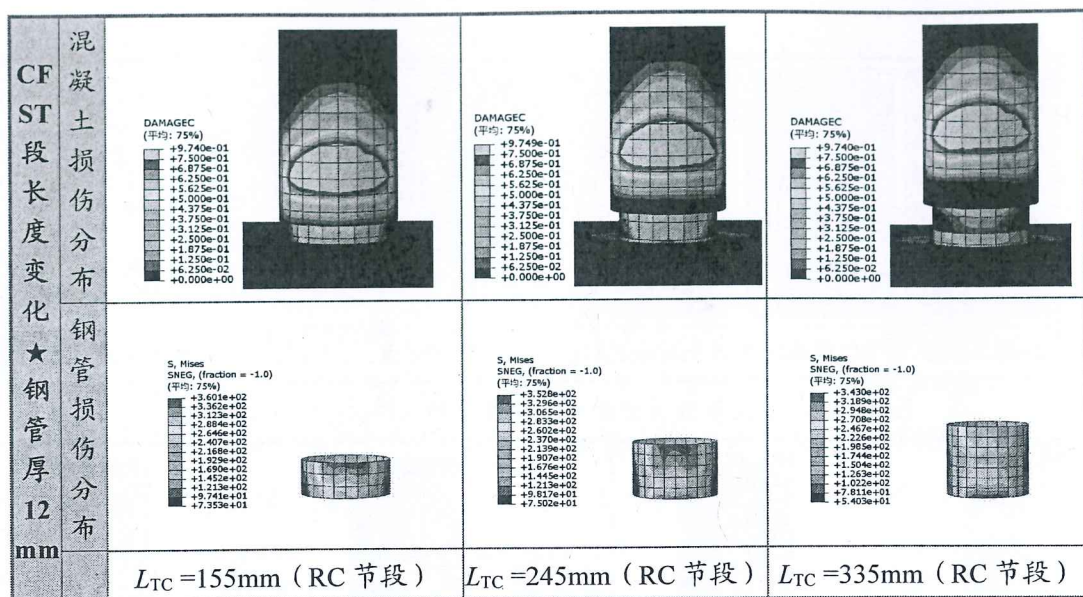
本部分密切相关研究成果:

[1] Zhu WQ*, Sun JH, Long G, Yang C, Zhou M, Dou TY. Seismic performance and failure modes of CFST-RC hybrid piers[J]. *Engineering Structures*, 2026, 348: 121792.



(a) CFST-RC 混合桥墩拟静力探索性试验 (CFST 段位于墩底)





(b) CFST 段位于墩底时混合桥墩破坏位置转移与模式转化

图 4 前期研究基础 3: CFST-RC 混合桥墩拟静力试验、破坏位置转移与模式转化规律

(4) 开展大量模型试验、数值模拟与理论分析,系统研究了组合/混合结构中关键界面、重要构件、复杂节点的力学性能、破坏模式与设计方法,对地震破坏模式及其转化规律有深刻认识,熟练掌握了组合/混合结构的模型试验、理论分析、数值模拟方法,可为本项目内容 2 与内容 3 的开展提供有益借鉴。

a) 针对 CFST 结构中钢-混界面连接件:开展了 19 个 CFST 中单孔 PBL 连接件的受剪试验,揭示了 CFST 中 PBL 连接件受剪机理与普通 PBL 连接件的差异,揭示了单孔 PBL 连接件的钢管被动约束机理,建立了 CFST 中单孔 PBL 连接件受剪承载力计算方法。开展了 11 个 CFST 中横向群孔 PBL 连接件和 10 个纵向群孔 PBL 连接件的受剪试验,揭示了横向与纵向两类群孔受力模式及群孔效应。

b) 针对 CFDTSB 和 SRHC 组合墩(柱):分别开展了 7 个和 4 个薄壁钢箱混凝土空心(CFDTSB)墩轴压试验与拟静力试验,探究了不同设计参数时的轴压与抗震性能,探明了不同设计参数对轴压和拟静力荷载作用下 CFDTSB 墩破坏模式的影响,提出了空心墩的轴压、受弯承载力计算方法与构造优化策略。分别开展了 10 个和 27 个型钢高强混凝土(SRHC)柱的轴压试验与拟静力试验,探明了设计参数对轴压性能与抗震性能的影响,建立了轴压、受弯与受剪承载力计算公式;揭示了设计参数变化导致地震下 SRHC 柱弯曲破坏、弯剪破坏和剪切破坏之间的转化规律,建立了受剪退化模型,提出了破坏模式预测与判别方法。

c) 针对 CFST 节点和钢-混凝土混合节点: 分别开展了 CFST 拱-钢柱节点、CFST 柱-钢梁节点、以及钢主梁/钢桩-混凝土桥台混合节点的受拉、受弯、拟静力试验和数值模拟分析。探明了不同受荷情况下组合/混合节点的内部传力规律与路径。发现了 CFST 拱-钢柱与 CFST 柱-钢梁组合节点的钢柱(钢梁)屈服破坏和节点区域钢管撕裂破坏, 揭示了设置 PBL 连接件对节点传力的改善机理。发现了钢梁/钢桩-混凝土桥台混合节点的主梁/钢桩屈服破坏、桥台混凝土受压破坏和混凝土冲切破坏, 探明了不同节点构造对节点传力性能和破坏模式的影响规律。提出了节点承载力计算方法、构造优化目标与方法。

以上成果在 *Engineering Structures*、*Journal of Constructional Steel Research*、土木工程学报、建筑结构学报等行业权威期刊发表学术论文 20 余篇, 授权发明专利 4 项, 部分成果被鉴定为国际领先和国内领先, 且应用于西安元朔大桥、凤凰池南桥等大型组合结构桥梁, 获得全国市政行业市政工程科学技术一等奖 1 项、全国优秀工程勘察设计行业奖二等奖和陕西省优秀工程设计奖一等奖各 1 项。

本部分密切相关研究成果:

- [1] Yang C, Zhu WQ*, Feng CR, Long G, Yan B. Seismic behavior of concrete-filled double-skin thin-walled steel box columns stiffened with PBL [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2023, 211: 108215.
- [2] Zhu WQ, Feng CR, Liu YJ*, Yan B. Seismic behavior of exterior-diaphragm CFSST connections with or without PBL [J]. *Engineering Structures*, 2022, 270: 114923.
- [3] Zhu WQ, Wang JY, Liu YJ*, Sun LP. Experimental study on axial compressive behavior of concrete-filled double-skin thin-walled steel box columns with and without PBL [J]. *Structures*, 2023, 47: 1927-1939.
- [4] Zhu WQ, Mo ZP, Liu YJ*, Cui Y. Tensile behavior and load transfer mechanism of concrete-filled square steel tube exterior-diaphragm connections stiffened with PBL [J]. *Engineering Structures*, 2021, 231: 111780.
- [5] Xu B, Yin TY, Zhu WQ*. Experiment study on flexural performance of steel concrete composite beams under salt freeze-thaw cycles in negative moment sections [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 214: 108477.
- [6] 朱伟庆, 时豪辉, 张冠华, 刘永健*, 刘佳桐. 埋入式 H 型钢桩-桥台节点受弯

性能与承载力[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(5): 184-199.

[7] 朱伟庆, 莫志鹏, 刘永健*. PBL 加劲型方钢管混凝土外隔板式节点受拉性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(10): 1-12.

[8] 朱伟庆, 邬昊怀, 刘永健, 张经统. 受钢管被动约束 PBL 连接件受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(S1): 402-410.

[9] 朱伟庆, 崔越, 刘永健, 衡江峰. 开孔板连接件受剪承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(7): 129-136.

[10] 崔越, 朱伟庆*, 刘永健. 开孔板连接件塑性阶段受剪机理及荷载-滑移曲线特征研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(S1): 315-323.

[11] Zhu WQ*, Jia JQ, Gao JC, Zhang FS. Experimental study on steel reinforced high-strength concrete columns under cyclic lateral force and constant axial load [J]. Engineering Structures, 2016, 125: 191-204.

[12] Zhu WQ, Jia JQ, Zhang JG. Experimental research on seismic behavior of steel reinforced high-strength concrete short columns [J]. Steel and Composite Structures, 2017, 25(5): 603-615.

[13] Zhu WQ, Meng G, Jia JQ. Experimental studies on axial load performance of high-strength concrete short columns [J]. ICE- Structures and Buildings, 2014, 167(9): 509-519.

[14] 朱伟庆, 贾金青. 型钢超高强混凝土柱抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(4): 57-67.

[15] 贾金青, 朱伟庆, 余芳, 张丽华. 型钢超高强混凝土柱截面曲率延性研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(1): 42-51.

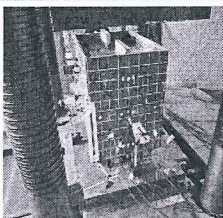
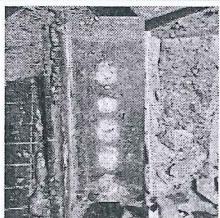
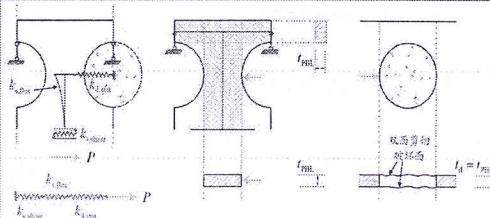
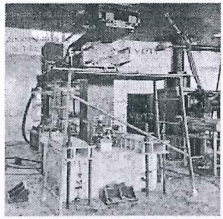
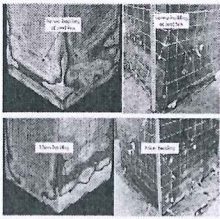
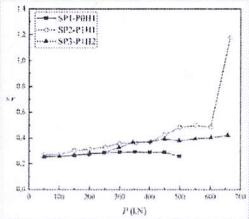
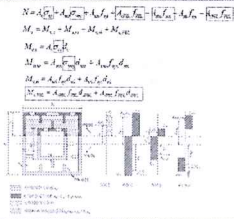
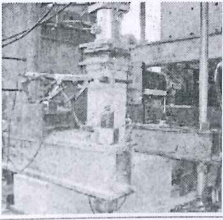
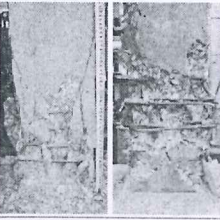
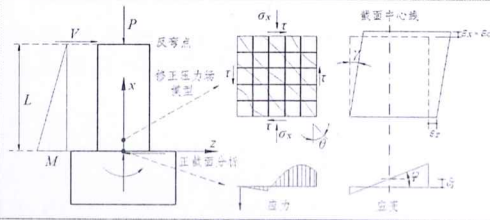
[16] 朱伟庆, 贾金青, 孟刚. 基于修正压力场理论的型钢超高强混凝土柱受剪承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(10): 101-107.

[17] 贾金青, 朱伟庆, 王吉忠. 型钢超高强混凝土框架中节点抗剪承载力研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(10): 1-8.

[18] Ma YC*, Jia JQ, Zhu WQ. Comparative analysis of the seismic behaviour of SRUHSC columns and frames under reverse cyclic loading [J]. Magazine of Concrete Research, 2017, 70(4): 189-203.

[19] 贾金青, 孟刚*, 朱伟庆. 预应力型钢超高强混凝土组合梁受弯性能试验研究及承载能力分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(9): 1-10.

- [20] 孟刚, 贾金青*, 朱伟庆. 预应力型钢超高强混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(5): 203-210.
- [21] Jia JQ, Zhu WQ, Meng G, Yao DL. Study on shear strength of SRC beam-column connections [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 255-260: 25-29.
- [22] 龙刚, 刘永健*, 朱伟庆, 等. 变截面圆钢管混凝土短柱轴心受压性能研究[J]. *建筑科学与工程学报*, 2023, 40(6): 45-57.
- [23] 龙刚, 刘永健, 朱伟庆, 封博文. PBL 加劲型矩形钢管混凝土桁架拱桥设计[J]. *公路交通科技*, 2017, 34(12): 51-58.
- [24] 朱伟庆, 刘永健, 龙刚, 张琢芳, 傅梅珍, 崔越, 衡江峰. 钢管混凝土柱-钢梁外隔板式节点结构及其施工方法[P]. 中国: ZL 2016 1 0227800.6.
- [25] 朱伟庆, 衡江峰, 刘永健, 王卫山, 崔越, 王旭. 整体式组合梁无缝桥的桥台连接构造及其施工方法[P]. 中国: ZL 2016 1 0344564.6.
- [26] 刘永健, 朱伟庆, 衡江峰, 崔越, 王卫山, 王旭. 一种钢混组合结构整体式无缝桥[P]. 中国: ZL 2016 1 0398427.0.
- [27] 朱伟庆, 崔越, 衡江峰, 刘永健, 龙刚, 张琢芳, 傅梅珍. 基于开孔纵肋的钢管混凝土柱-钢梁外隔板式节点结构[P]. 中国: ZL 2016 2 0306766.7.

钢混 界面 连接 件				
	抗剪试验	破坏模式	受剪模型	
CF DT SB 墩				
	拟静力试验	破坏模式	钢-混相互作用发展	承载力计算方法
SR HC 墩				
	拟静力试验	破坏模式	考虑压-弯-剪耦合作用的承载力计算模型	

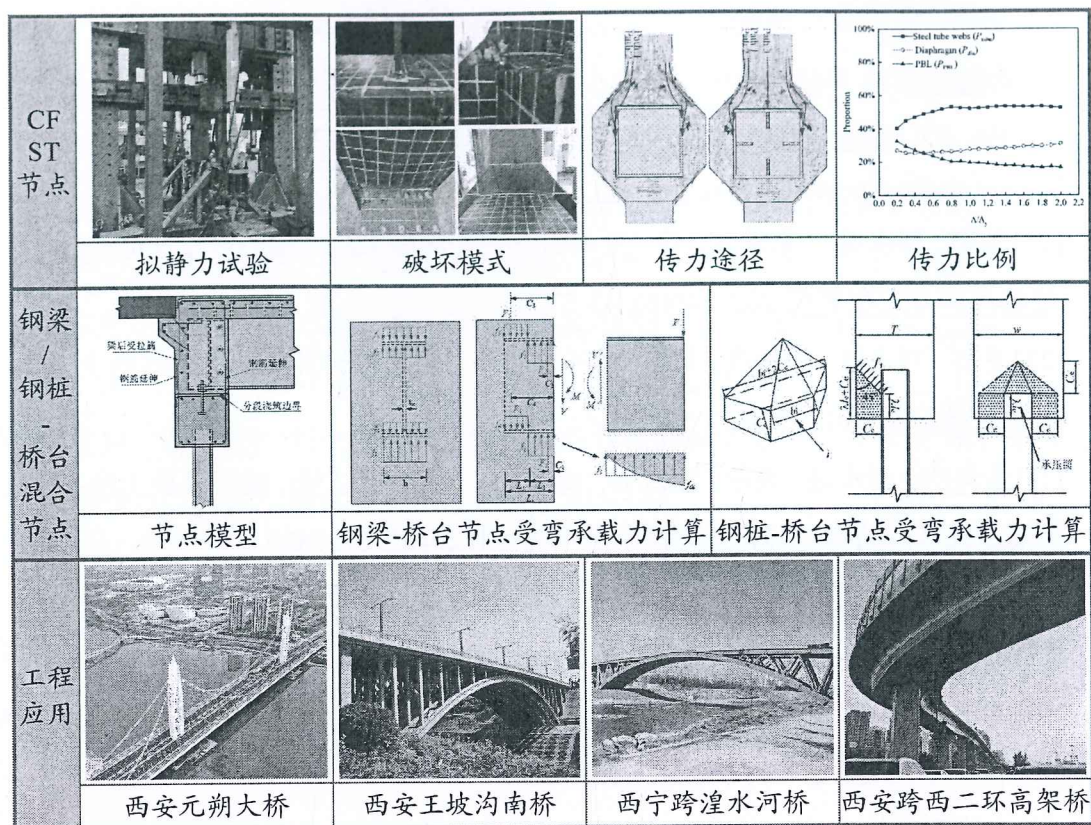


图 5 前期研究基础 4: 组合/混合结构关键界面、重要构件和复杂节点力学性能与设计方法

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

(1) 单一与复合受力状态下 CFST-RC 拼接段传力机理

不同节段间的拼接段是混合构件的薄弱和关键部位,受到学者和工程师的特别重视。就本项目而言,CFST 节段与 RC 节段之间的拼接段是混合桥墩结构体系中最关键且最为薄弱的部位,其受力状态复杂,需要同时承受轴力、弯矩及剪力等多种内力作用。如何在新旧节段界面及不同结构形式之间建立安全可靠且高效的传力路径,阐明拼接段及其临近区域应力分布规律与传递特征,揭示压-弯-剪耦合作用下的内力传递机制,确保拼接段在不同受力状态下均能够实现稳定、可靠的传力,是实现严重局部受损 RC 桥墩修复后抗震性能重塑的关键技术问题。

(2) CFST-RC 混合桥墩破坏位置转移与模式转化机制

采用性能更优的 CFST 节段替换 RC 桥墩受损节段,并不能保证修复后

CFST-RC 混合桥墩的抗震性能一定优于原 RC 桥墩。节段替换后,桥墩沿墩高方向的刚度与承载力分布会发生明显变化,可能导致结构破坏位置由原 RC 桥墩塑性铰区域转移至其他部位,甚至出现不利破坏模式。因此,分析集中破坏区域耗能变形特征,揭示由于耗能区域的长短导致的破坏模式转化机制,并合理调控混合桥墩破坏位置与耗能区域分布,使混合桥墩在地震作用下发生理想的破坏模式,阐明混合桥墩破坏位置转移与模式转化机制,是针对不同受损位置与范围的 RC 桥墩提出合理节段替换策略、实现修复后桥墩抗震性能重塑的关键技术问题。

3.2 主要研究内容及实施方案

(1) 严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复技术框架

研究并统计爆炸、地震、泥石流与洪水冲击、车辆与船舶撞击、及盐冻侵蚀等各类自然或人为灾害下 RC 桥墩严重局部受损位置与范围,并探究 RC 桥墩局部受损范围与桥墩直径的关系,以及影响局部受损范围的因素。针对现有修复方法存在修复效率不高及修复效果不理想的问题,提出采用 CFST 节段替换严重局部受损 RC 桥墩的快速-永久修复技术框架。首先利用钢结构的可焊性,完成新旧节段间高效、便捷、高质量、低精度要求的快速替换施工。然后利用受力性能优异的标准化 CFST 节段替换 RC 桥墩局部受损节段,重构局部受损区域的传力路径,同时利用钢管约束新旧节段薄弱交界部位,实现修复后混合桥墩性能达到甚至超过原 RC 桥墩,最终实现严重局部受损 RC 桥墩的快速-永久修复。

(2) 不同受力状态下 CFST-RC 拼接段传力机理

开展钢筋-钢管焊接接头受拉传力试验,探究钢筋纵向应力向钢管传递规律及沿钢管宽度方向扩展规律,探明搭接段拉力有效传递长度与有效分布宽度,揭示各参数对焊接接头受拉性能及破坏模式的影响,建立考虑钢筋-钢管偏心的受拉承载力计算方法。

开展 CFST-RC 拼接段轴压传力试验,分析各节段纵向与横向应力分布,探究轴向压力在拼接段的传递路径与分配规律,探明钢管对拼接薄弱部位的约束加强程度与机理,揭示各参数对拼接段轴压性能及破坏模式的影响,建立考虑钢管约束效应与新旧节段界面折减的轴压承载力计算方法。

开展 CFST-RC 拼接段压-弯-剪复合传力试验,分析拼接段及附近区域应力分布特征,探究压力-弯矩-剪力经由拼接段的传递路径与规律,探明压-弯-剪耦

合作用机制,揭示各参数对拼接段复合传力性能及破坏模式的影响,建立压-弯-剪复合传力时拼接段承载力计算方法。

(3) CFST-RC 混合桥墩破坏模式转移与转化机制

开展修复后 CFST-RC 混合桥墩拟静力试验,探究不同 CFST 段长度和钢管厚度时混合桥墩可能的破坏位置与模式、对应的塑性铰发展特征,探明不同破坏位置与模式时修复后混合桥墩性能相对原 RC 桥墩的恢复程度。揭示沿墩高方向刚度和承载力的突变导致混合桥墩集中破坏与耗能区域的转移机制;分析集中破坏区域耗能与变形特征,揭示由于耗能区域的长短导致的破坏模式转化机制;针对不同受损位置的 RC 桥墩,探明替换受损节段后混合桥墩的理想破坏模式。

(4) 基于 CFST 节段替换的局部受损 RC 桥墩维修加固设计方法

基于修复后桥墩性能重塑目标,针对局部受损 RC 桥墩,提出“采用规格标准化 CFST 节段替换 RC 桥墩严重局部受损节段,形成 CFST-RC 混合桥墩”的节段替换策略;建立混合桥墩承载力计算方法;提出基于整体性能重塑需求的混合桥墩合理构造,包括 CFST 段长度和钢管厚度;提出相应的施工工艺流程。

3.3 技术路线

1、总体技术路线

围绕项目研究内容和拟解决的关键科学问题,制定如下总体技术路线展开深入研究:

(1) 研究并统计在爆炸、地震、泥石流与洪水冲击、车辆与船舶撞击、及盐冻侵蚀等各类灾害作用下 RC 桥墩典型严重受损位置与范围(提供给内容 2);并探究 RC 桥墩局部受损范围与桥墩直径的关系,以及影响局部受损范围的因素(提供给内容 2),提出采用 CFST 节段替换严重局部受损 RC 桥墩的快速-永久修复技术框架。并在此基础上,研究基于预制 CFST 节段的快速修复施工工法。

(2) 分别开展钢筋-钢板焊接接头受拉试验、CFST-RC 拼接段轴压传力试验、拼接段压-弯-剪复合传力试验,结合数值模拟揭示 CFST-RC 拼接段传力机理,提出承载力计算方法,从而重构局部受损区传力路径,保障混合桥墩节段间安全传力(提供给内容 3),奠定局部受损 RC 桥墩修复后抗震性能重塑的基础。

(3) 开展不同 CFST 段构造(内容 2 支撑)、位置与长度(对应内容 1 提供的局部受损位置与范围)的修复后 CFST-RC 混合桥墩拟静力试验与数值模拟,

探究地震下混合桥墩可能的破坏位置与模式及对应的抗震性能水平,揭示混合桥墩破坏位置转移与模式转变规律与机制,提出破坏位置及模式预测方法。

(4) 基于修复后桥墩性能重塑目标,针对 RC 桥墩不同局部受损位置与范围(内容 1 提供),提出实现混合桥墩理想破坏模式的节段替换策略,并提出相应的施工工艺流程,最终实现基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩抗震性能重塑。

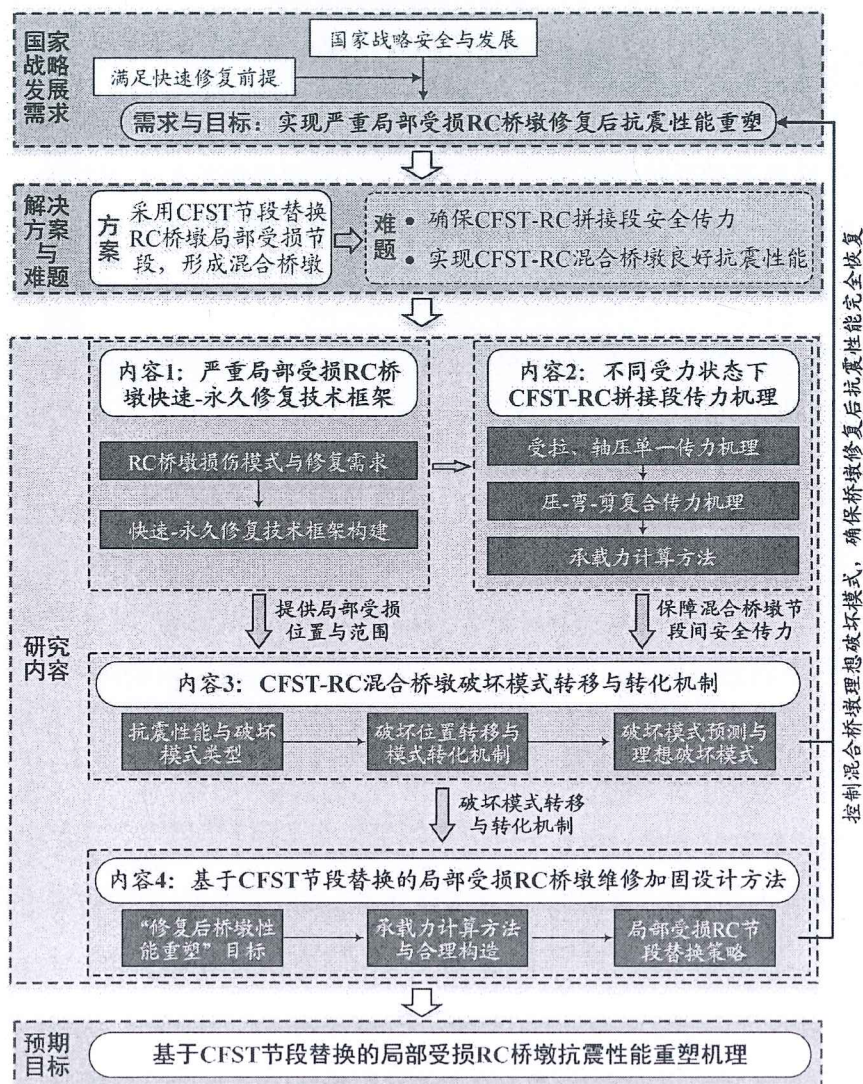


图 6 项目总体技术路线

2、严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复技术框架

(1) RC 桥墩损伤模式与修复需求

RC 桥墩在服役过程中面临爆炸、地震、泥石流与洪水冲击、车辆与船舶撞击、及盐冻侵蚀等各类自然或人为灾害的威胁,在这些灾害作用下,极易发生混

凝土压溃、剥落、钢筋屈曲等严重损伤。基于文献与案例，系统研究灾害作用下 RC 桥墩的典型损伤模式，统计分析严重局部损伤的高发位置与分布范围；深入探究 RC 桥墩局部受损范围与桥墩直径等关键设计参数间的关系，探明影响局部受损程度的主要因素。在此基础上，精准界定适用于本修复技术的“严重局部受损”特征，为确定修复范围提供理论依据。

(2) 快速-永久修复技术框架的构建

针对现有修复方法存在修复效率不高及修复效果不理想的问题，本研究提出了采用 CFST 节段替换严重局部受损 RC 桥墩的快速-永久修复技术框架。在确定 RC 桥墩严重局部受损位置与范围的基础上，首先利用钢结构的可焊性，完成新-旧节段间高效、便捷、高质量、低精度要求的快速替换施工。然后利用受力性能优异的标准化 CFST 节段替换 RC 桥墩局部受损节段，重构局部受损区域的传力路径，同时利用钢管约束新-旧节段薄弱交界部位，实现修复后混合桥墩性能达到甚至超过原 RC 桥墩，最终实现严重局部受损 RC 桥墩的快速-永久修复。

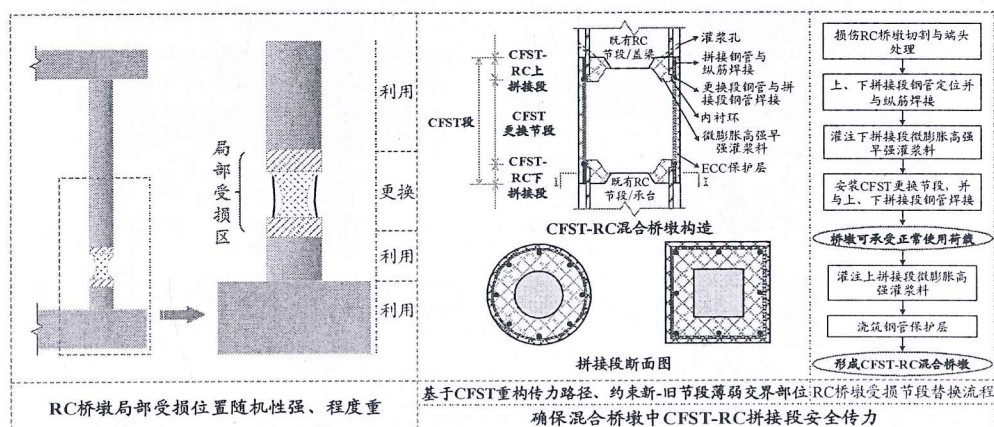


图 7 基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复技术框架

3、不同受力状态下 CFST-RC 拼接段传力机理

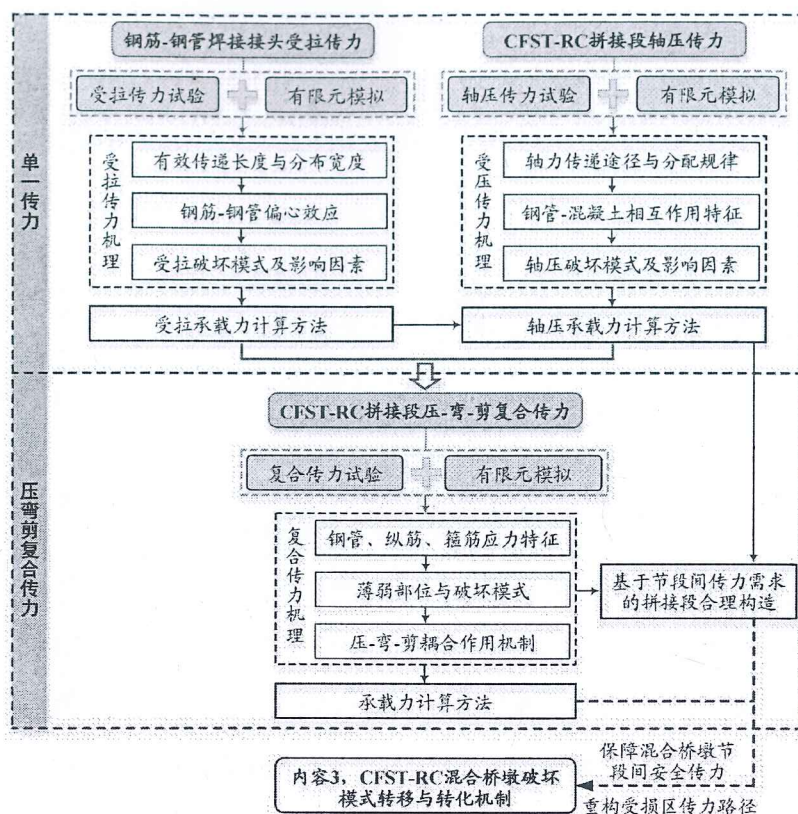


图 8 内容 2 研究思路

(1) 钢筋-钢管焊接接头受拉传力

① 钢筋-钢板接头受拉试验

在替换受损节段后形成的 CFST-RC 混合桥墩的后续服役过程中, 各类外力单独或者组合作用会在混合桥墩拼接段内产生轴向压力、弯矩、剪力等单一内力或者复合内力。当拼接段承受弯矩作用时, 受拉侧钢筋与钢管焊接接头传递拉力的能力很大程度上决定了拼接段的传力能力。因此, 拟设计并开展 12 个单根钢筋-钢板搭接接头受拉试验, 钢板宽度即为拼接段中纵筋间距, 钢筋与钢板间采用角焊缝连接 (如图 9)。

试验参数: 纵筋直径 d 、钢板宽度 w 和厚度 t 、钢筋-钢板搭接长度 L_z 与焊缝厚度 H_c 。试验参数的选取一方面应反映实际工程中 RC 桥墩纵筋直径与布置情况, 另一方面应尽量获取纵筋屈服、焊缝破坏、钢板屈服 3 类破坏形态。

试验设备: MTS 电液伺服拉-压试验机 (施加单调轴向拉力), TDS540/960 静态数据采集仪 (测试数据采集)。

测试内容: 试件破坏过程与破坏形态, 荷载-位移曲线; 钢筋、钢板纵向应变。

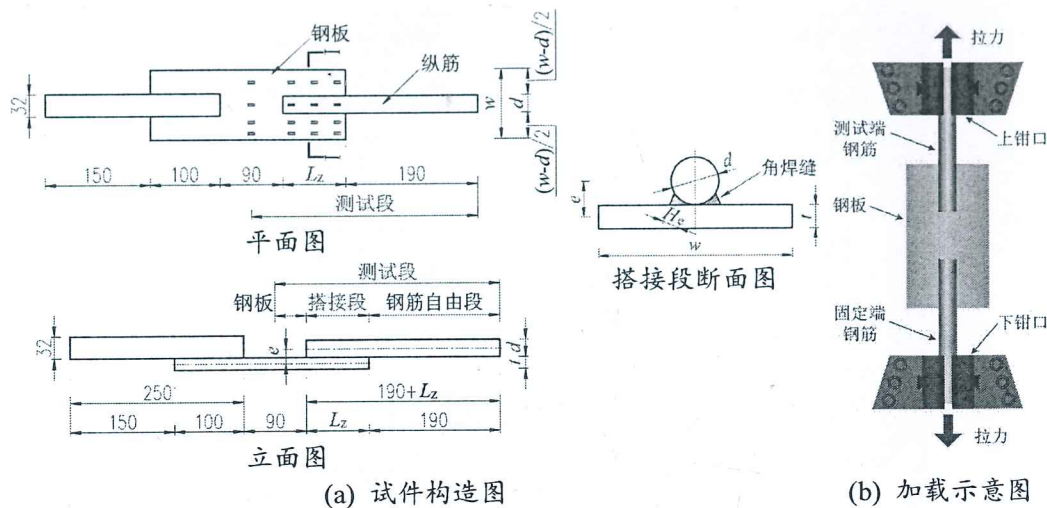


图 9 钢筋-钢板焊接接头受拉试验方案

② 钢筋-钢管焊接接头受拉传力机理、受拉承载力计算方法与构造要求

建立钢筋-钢板焊接接头有限元模型、进一步扩展试验参数类别与水平，结合试验测试数据与数值模拟结果，分析钢筋纵向应力沿纵向、钢板纵向应力沿纵向和宽度方向的分布与发展规律，探究钢筋纵向应力沿搭接段向钢管的传递规律及在钢管宽度方向的扩展规律，进而得到不同设计参数时搭接段内钢筋拉力的有效传递长度与纵向应力有效分布宽度。梳理不同设计参数试件可能的破坏模式，探明与之对应的钢筋、钢管纵向应力分布特征；分析钢筋-钢板受拉偏心对焊接接头受力与破坏模式的影响，探明钢筋直径、钢板厚度和搭接长度对受拉偏心程度的影响，建立考虑钢筋-钢管偏心的受拉承载力计算方法。在此基础上，得到基于拼接段受拉传力需求的钢筋-钢管最小搭接长度，以及不同纵筋直径与间距对应的最小钢管厚度。

(2) CFST-RC 拼接段轴压传力

① CFST-RC 拼接段轴压试验

由于 CFST-RC 拼接段内存在新-旧节段薄弱交界面，故当混合桥墩承受轴向压力时，探明拼接段轴向传力路径、确保拼接段轴压承载力不低于 RC 节段非常关键。因此，拟设计并制作 6 个 CFST-RC 混合短墩试件，包含 RC 节段、CFST-RC 拼接段与 CFST 更换节段，截面边长或直径初步拟定为 400mm（如图 10）。首先分别预制 CFST 更换节段和 RC 节段，然后施工拼接段。

试验参数：截面形式（圆形、方形），拼接段钢管厚度 t 、长度 L_P 。

试验设备：大吨位电液伺服压力机（施加单调轴向压力）、TDS540/960 静态

数据采集仪（测试数据采集）、工业 DIC 系统（拼接段及附近区域应变测试）。

测试内容：拼接段钢管鼓曲位置与形态，试件破坏过程与模式、荷载-位移曲线；拼接段和 CFST 更换节段的钢管纵向与横向应变，RC 节段钢筋与混凝土应变。

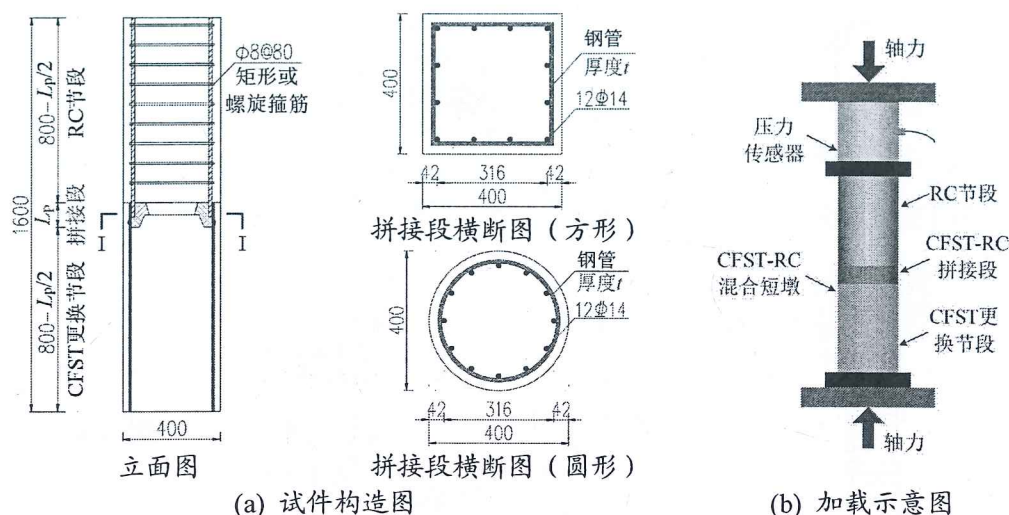


图 10 CFST-RC 拼接段轴压传力试验方案

② CFST-RC 拼接段轴压传力机理、轴压承载力计算方法与构造要求

建立 CFST-RC 混合短墩有限元模型并开展参数分析，结合试验与数值模拟结果，研究 RC 节段、拼接段与 CFST 更换节段纵向应力的分布与发展规律，探明不同受力阶段轴向压力在拼接段的传递路径与分配规律；研究拼接段及临近区域钢管横向应力的分布与发展规律，探明不同截面形式与钢管厚度时拼接段钢-混相互作用特征与程度；结合短墩破坏模式探明轴压传力时拼接段的薄弱部位，分析各参数变化对拼接段轴压传力性能与破坏模式的影响；在此基础上，建立考虑钢管约束效应与新-旧节段界面折减的轴压承载力计算方法；提出基于节段间受压传力需求的最小拼接段长度与最小钢管厚度。

(3) CFST-RC 拼接段压-弯-剪复合传力

① CFST-RC 拼接段压-弯-剪复合传力试验

CFST-RC 混合桥墩往往受到轴力、弯矩和剪力复合作用，故需基于上述成果进一步研究 CFST-RC 拼接段的压-弯-剪复合传力性能与机理。因此，拟设计并制作 4 个 CFST-RC 混合桥墩试件，拼接段设置在墩底受力最不利部位；结合本部分研究目标，适当简化试件构造，即不设置 CFST 更换节段，直接采用两个拼接段连接 RC 节段与 RC 承台（如图 11）。首先预制 RC 桥墩节段和 RC 承台，

然后用两个拼接段将其连接形成 CFST-RC 混合桥墩。

试验参数：截面形式（方形、圆形）和拼接段长度 L_p 。

实验设备：MTS 拟静力加载试验系统（对墩顶施加恒定轴力、单调或往复水平荷载）、TDS540/960 静态数据采集仪（测试数据采集）、工业 DIC 系统（拼接段及附近区域应变测试）等。

测试内容：墩底拼接段和 RC 节段底部破坏过程与破坏模式；墩顶荷载-位移曲线，拼接段与 RC 节段水平变形；不同受力阶段拼接段钢管纵向和横向应变、RC 节段底部纵筋和箍筋应变。

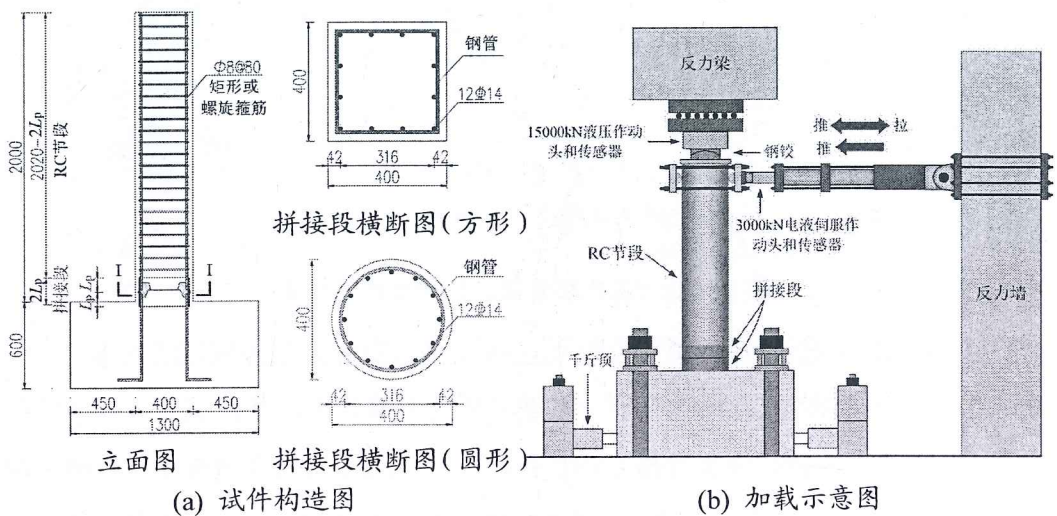


图 11 CFST-RC 拼接段压-弯-剪复合传力试验方案

② CFST-RC 拼接段压-弯-剪复合传力机理、承载力计算方法与构造要求

建立 CFST-RC 混合桥墩有限元模型、进一步扩展试验参数类别与水平，结合试验与数值模拟结果，分析墩底部区域拼接段钢管纵向和横向应力、RC 节段纵筋和箍筋应力，探究压-弯-剪复合受力时拼接段及附近区域应力分布特征，进而探明压力-弯矩-剪力由 RC 节段、经拼接段至 RC 承台的传递途径与规律；分析不同设计参数时拼接段及附近区域钢管、纵筋、箍筋和混凝土的塑性发展情况、损伤位置与特征，探究复合受力时拼接段薄弱部位及破坏模式；结合桥墩底部区域拼接段及附近 RC 节段的变形特征，揭示压-弯-剪耦合作用机制，建立复合传力时拼接段受力分析模型与承载力计算方法。最后，提出基于节段间传力需求的拼接段构造要求，包括：钢筋-钢管搭接段最小长度，拼接段最小长度以及钢管最小厚度等。

4、CFST-RC 混合桥墩破坏模式转移与转化机制

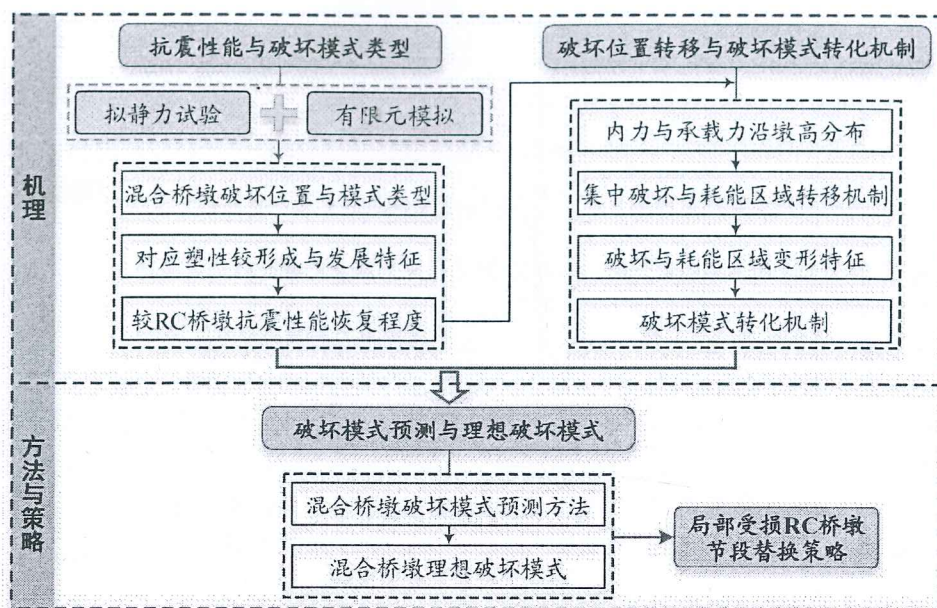


图 12 内容 3 研究思路

(1) CFST-RC 混合桥墩拟静力试验

设计并制作 8 个 CFST-RC 混合桥墩试件 (如图 13)。首先预制 CFST 更换节段, 然后通过切割和处理 2.2 节 (内容 2) 中局部受损 RC 桥墩后得到 RC 节段和 RC 承台, 最后用两个拼接段分别将 RC 桥墩节段、CFST 更换节段与 RC 承台连接成 CFST-RC 混合桥墩试件。浇筑 2 个现浇 RC 桥墩作为本部分试验的对比试件。

试验参数: 桥墩截面形式 (方形、圆形), CFST 段构造 (钢管厚度 t)、位置 (距离承台顶面距离 h) 与长度 ($L_{TC} = L_G + 2L_P$)。

加载设备: 采用悬臂梁加载方式, 利用 MTS 拟静力加载系统对墩顶施加恒定轴力与往复水平荷载, 测试系统包括 TDS540/960 静态数据采集仪、工业 DIC 系统。

测试内容: 混合桥墩破坏位置与模式, 不同破坏模式时混合桥墩塑性铰位置、形态与范围; CFST 段钢管屈曲特征、RC 节段裂缝发展与混凝土剥落特征; 墩顶水平荷载-位移滞回曲线, 墩顶和各节段交界位置水平总变形及弯曲、剪切和滑移变形分量发展; 不同受力阶段 CFST 段钢管纵向和横向应变、RC 节段底部纵筋和箍筋应变。

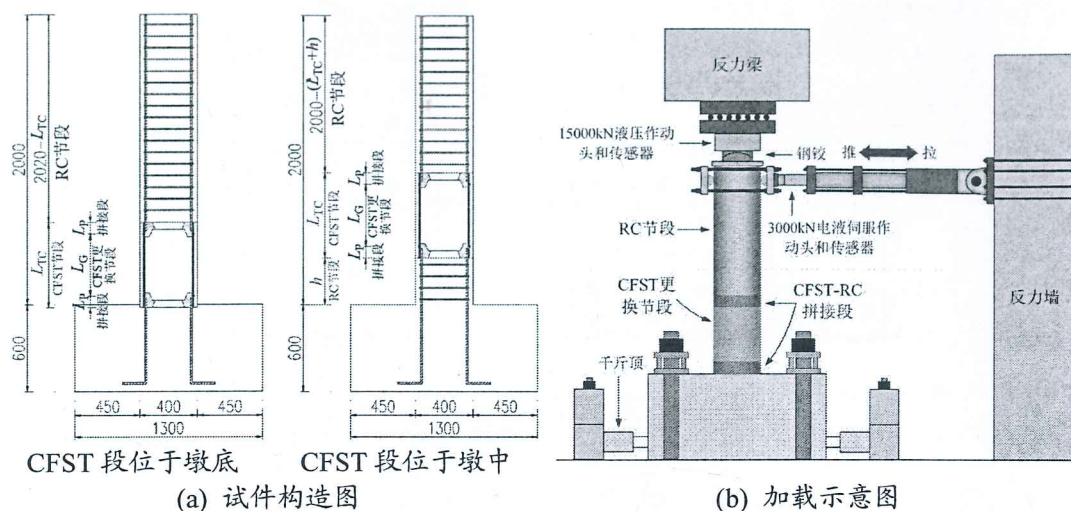


图 13 CFST-RC 混合桥墩拟静力试验方案

(2) 抗震性能与破坏模式类型

① CFST-RC 混合桥墩抗震性能、破坏位置与破坏模式

利用有限元数值模拟进一步拓展试验参数类型与参数水平,结合试验和数值模拟结果,研究不同设计参数时 CFST-RC 混合桥墩的滞回特性、强度与刚度退化、耗能能力、位移延性系数与极限位移转角等。

针对不同剪跨比、轴压比与截面形式,研究不同 CFST 段构造、位置与长度时 CFST-RC 混合桥墩可能的破坏位置与破坏模式。

a) 当 CFST 段位于桥墩底部时,混合桥墩可能发生 3 种破坏模式:

- ✧ 墩底 CFST 段塑性铰破坏;
- ✧ 墩底 CFST 段-RC 节段联合塑性铰破坏;
- ✧ RC 节段底部塑性铰破坏。

b) 当 CFST 段位于桥墩中部时,混合桥墩可能发生 3 种破坏模式:

- ✧ 墩底 RC 节段塑性铰充分发展 (弯曲破坏);
- ✧ 墩底 RC 节段塑性铰受限发展 (弯剪破坏);
- ✧ 墩底 RC 节段-CFST 段联合塑性铰破坏。

② 塑性铰形成与发展特征

结合试验与数值模拟结果,分别针对混合桥墩的上述 6 种不同破坏模式,分析混合桥墩 CFST 段钢管 Mises 应力和屈曲变形、RC 节段底部区域纵筋和箍筋应力、以及混凝土裂缝发展与剥落、有效塑性应变发展过程与先后顺序,对比混合桥墩不同节段变形发展过程与集中程度,揭示塑性铰形成与发展特征。

③ 较 RC 桥墩抗震性能恢复程度

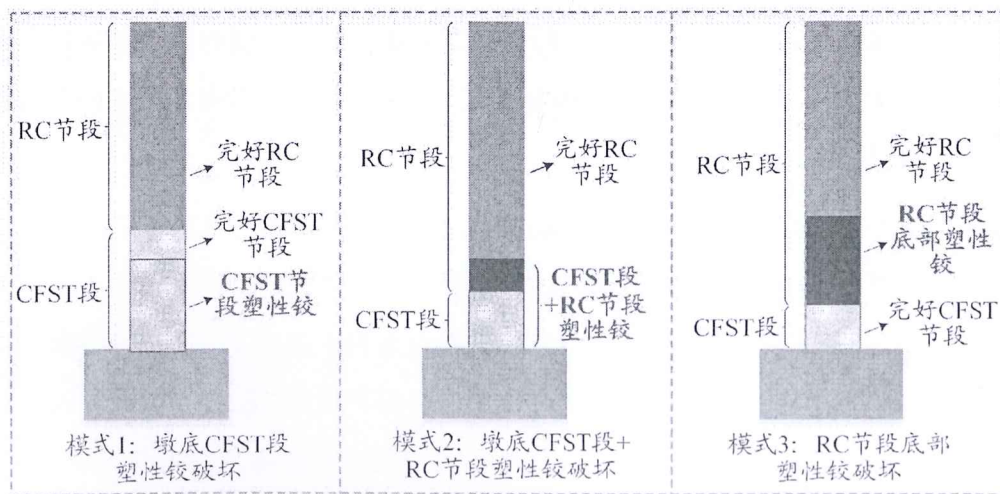
分别针对混合桥墩在地震作用下的上述 6 种破坏模式,从屈服荷载与极限承载力、强度与刚度退化、耗能能力与机制、变形特征与延性发展等方面,对比分析不同破坏模式时混合桥墩抗震性能的差异,并与 RC 桥墩进行对比。基于承载力 $P_{\max}$ 、初始刚度 K_0 、耗能能力 E_{sum} 和极限位移转角 θ_u 综合定义桥墩修复后抗震性能恢复系数 κ :

$$\kappa = \min \left(\frac{P_{\max}^{\text{CFST}}}{P_{\max}^{\text{RC}}}, \frac{K_0^{\text{CFST}}}{K_0^{\text{RC}}}, \frac{E_{\text{sum}}^{\text{CFST}}}{E_{\text{sum}}^{\text{RC}}}, \frac{\theta_u^{\text{CFST}}}{\theta_u^{\text{RC}}} \right)$$

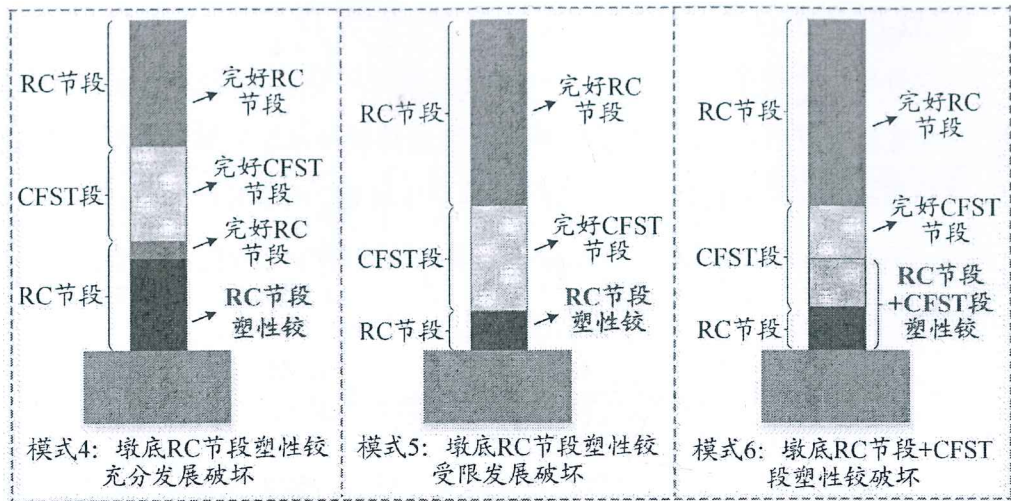
对比不同 CFST 段构造、位置与长度时混合桥墩的恢复系数 κ , 定量分析发生不同破坏模式的 CFST-RC 混合桥墩抗震性能。在此基础上, 分别得到 CFST 段位于墩底和墩中时, 抗震性能不低于对应 RC 桥墩 ($\kappa \geq 1$) 的混合桥墩破坏模式类型。

(3) 混合桥墩破坏位置转移与破坏模式转化机制

对比分析不同轴压比、剪跨比和 CFST 段构造、位置与长度时混合桥墩的内力和承载力沿墩高不同节段间的分布情况, 分别类比地震作用下 RC 墩和 CFST 墩塑性铰区长度与混合桥墩墩底 RC 节段或 CFST 段长度, 揭示沿墩高方向刚度与承载力的突变导致混合桥墩集中破坏与耗能区域在墩底 RC 节段与 CFST 段间的转移机制。在此基础上, 结合集中耗能区域的耗能特征与变形特征, 揭示由于节段间承载力突变以及各节段集中耗能区域长短导致的单塑性铰向双塑性铰、弯曲破坏向弯剪破坏的破坏模式转化机制 (如图 14)。



(a) CFST 段位于桥墩底部



(b) CFST 段位于桥墩中部

图 14 地震作用下 CFST-RC 混合桥墩破坏位置转移与模式转化

(4) 混合桥墩破坏模式预测与理想破坏模式

① 混合桥墩破坏模式预测方法

基于混合桥墩沿墩高的内力图以及受弯和受剪承载能力分布折线图,对比不同加载时刻各节段关键截面的弯矩(剪力)-变形曲线以及受弯(受剪)承载能力-变形曲线,根据各关键截面进入屈服的先后顺序判断混合桥墩损伤与破坏的发展过程。结合前述混合桥墩破坏模式类型、以及破坏位置与模式转移转化机制的研究结果,提出不同 CFST 段构造、位置与长度时混合桥墩破坏位置与模式预测方法。

② 混合桥墩理想破坏模式

针对 RC 桥墩不同受损位置与范围,探明在不同位置采用不同构造和长度的 CFST 段对受损节段进行替换后,可得到的 CFST-RC 混合桥墩的理想破坏位置与模式类型($\kappa \geq 1$),并从中提炼最优破坏模式(κ 达到最大)及对应的 CFST 段构造、位置和长度。

5、基于 CFST 节段替换的局部受损 RC 桥墩维修加固设计方法

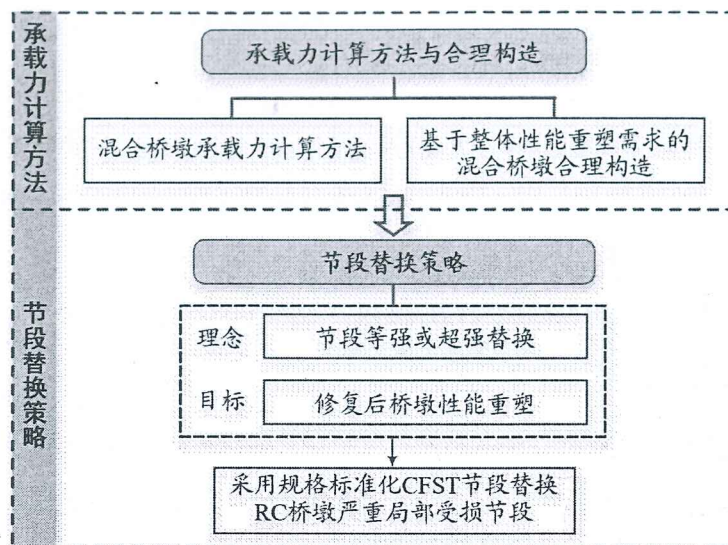


图 15 内容 4 研究思路

(1) CFST-RC 混合桥墩承载力计算方法与合理构造

基于规范及文献中 CFST 墩（柱）和 RC 墩（柱）承载力的经典计算方法与公式，以及提出的不同受力状态下拼接段承载力计算方法，建立 CFST-RC 混合桥墩承载力计算方法。提出基于整体性能重塑需求的混合桥墩合理构造，包括 CFST 段长度和钢管厚度。

(2) 局部受损 RC 桥墩节段替换策略

根据内容 2 中不同受力状态下 CFST-RC 拼接段传力机理与内容 3 中 CFST-RC 混合桥墩破坏模式转移与转化机制的研究结论，基于修复后桥墩性能重塑目标，针对受损 RC 桥墩，通过选择 CFST 段构造与长度，控制节段替换后混合桥墩理想的地震破坏模式，建立标准化 CFST 段（包括 CFST 更换节段与配套拼接段）规格，提出“采用规格标准化 CFST 节段替换 RC 桥墩严重局部受损节段，形成 CFST-RC 混合桥墩”的节段替换策略。

(3) 相应施工工艺流程

为确保节段替换策略在工程实践中的落地实施，提出配套标准化的快速修复施工工艺流程：①工厂预制 CFST 更换节段；②安装支撑底架、千斤顶并凿除既有桥墩损伤节段；③安装下拼接段钢管并灌注微膨胀灌浆料；④安装上拼接段钢管；⑤吊装预制 CFST 更换节段；⑥在上拼接段钢管处注入微膨胀灌浆料；⑦在 CFST 节段外围浇筑混凝土保护层。该施工工艺流程与设计方法共同构成完整的快速-永久修复技术体系。

3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接

将本项目研究成果推广后,可积累大量的工程数据,根据该技术对局部受损 RC 桥墩的实际修复效果,进一步分析桥墩直径与 CFST 段构造、钢管厚度之间的关系,为标准化 CFST 段规格提供数据支撑,可以在局部受损 RC 桥墩修复前,更加准确的计算出所需要的 CFST 段规格,包括 CFST 更换节段与配套拼接段,为工程的设计及建设提供参考。

3.5 有关技术经济指标

- (1)提出采用 CFST 节段替换的局部受损 RC 桥墩快速-永久修复技术框架;
- (2)建立不同受力状态下 CFST-RC 拼接段承载力计算方法及 CFST-RC 混合桥墩承载力计算方法;
- (3)提出可实现严重局部受损 RC 桥墩性能重塑的快速-永久修复技术,修复后 CFST-RC 混合桥墩的抗震性能指标恢复至原 RC 桥墩的 95%以上。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

1、长安大学

长安大学直属国家教育部,是国家首批“211 工程”重点建设大学、国家“985 优势学科创新平台”建设高校、国家“双一流”建设高校。学校现有 9 个一级学科博士点,1 个专业学位博士点,33 个一级学科硕士点,19 个硕士专业学位授权类别。有 9 个博士后科研流动站。工程学、地球科学、材料科学、环境科学与生态学、社会科学总论等 5 个学科进入 ESI 全球前 1%。学校稳居中国大学百强,土木与交通学科位列 U.S.News 全球大学第 30 名,被誉为公路交通人才培养的“黄埔军校”、科技创新的“金名片”。新时代面向国家重大战略需求,设立了现代交通研究院、秦岭生态环境研究院、黄河研究院、川藏铁路工程研究院、雄安现代产业研究院等一批实体研究院。现有中国科学院、中国工程院、新加坡工程院院士 4 人,教授、副教授 1400 余人,博士生导师 359 人、硕士生导师 1056 人。拥有承担国家重点研发计划、国家重大工程项目的各类杰出人才逾百人。学校平台条件完善,现有国家级实验教学中心 5 个、省部级实验教学中心 19 个,有国家

工程研究中心 2 个、国际联合实验室 1 个、省部级重点研究基地 89 个，联合共建陕西国家应用数学中心 1 个。学校矢志原始创新，构建“大团队、大平台、大项目、大成果、大服务、大贡献”六位一体科技创新体系，年度科研经费突破 9.6 亿元，牵头承担国家重点研发计划项目 11 项、课题 37 项。近年来获得国家科学技术进步奖一等奖、二等奖 23 项。年度授权专利 1300 余项。先后攻克了特殊地区公路建设成套科学技术难题，研发了黄土滑坡及大型崩塌临灾预警系统，解决了地铁建设中的地裂缝风险防治问题。学校注重成果推广，科研成果应用于被誉为“国之重器”的港珠澳大桥、全球空港新标杆北京大兴国际机场等超级工程建设，支撑了世界最大跨径的公铁两用斜拉桥沪通长江大桥、世界海拔最高的青藏公路、亚洲最长公路隧道秦岭终南山隧道、第一条沙漠高速公路榆靖高速等诸多有重要国际影响力的世纪工程建设。与数十家世界 500 强企业建立了深度战略合作关系。

2、中交瑞通路桥养护科技有限公司

中交瑞通路桥养护科技有限公司是经中国交通建设集团批准，由中交第一公路勘察设计研究院有限公司全资控股的综合性公路养护技术服务公司，公司注册资金 1.5 亿元。公司主要从事公路养护工程检测评估、设计、咨询、施工、监测等各业务链及道路、桥梁、桥梁等各专业链的全产业链业务，并拥有雄厚的材料、设备、工艺、技术、软件的开发研制与成果转化能力。公司现有员工四百余人，具备博士、硕士及高级职称的专业技术人员近半数，凝聚、培养了一支富有活力，勇于创新的公路养护技术服务团队，业务遍布国内、中亚和非洲多个国家，已完成道路改扩建及道路大中修勘察设计超过 7000 公里，桥隧结构检测、评估、设计超过 31000 座，高速公路桥隧专业化养护超过 2400 公里。主编或参编 20 余部交通部养护工程行业标准规范。多年连续承担交通部桥梁及隧道国检工作。拥有自主知识产权专利技术近 30 项，荣获省部级以上科技进步奖、优秀设计奖等奖励 20 余项。

4.2 技术力量及人员构成

姓 名	单 位	性 别	年 龄	技术职称	专 业	在项目中担任 具体工作
朱伟庆	长安大学	男	1987-05-04	正高级	桥梁工程	项目统筹

王技	中交瑞通路桥养护科技有限公司	男	1979-05-12	正高级	桥梁工程	项目组织实施
周敦	长安大学	男	1977-01-23	正高级	桥梁工程	理论指导
姜磊	长安大学	男	1990-09-17	副高级	桥梁工程	理论指导
刘江	长安大学	男	1991-07-03	副高级	桥梁工程	理论指导
孟俊苗	长安大学	女	1987-09-02	副高级	桥梁工程	理论指导
高小育	长安大学	男	1973-09-08	中级	桥梁工程	理论指导
闫标	长安大学	男	1987-10-20	中级	桥梁工程	理论指导
欧阳平	中交瑞通路桥养护科技有限公司	男	1981-01-11	副高级	桥梁工程	技术研发
朱晓龙	中交瑞通路桥养护科技有限公司	男	1989-02-12	副高级	桥梁工程	技术应用
李京蔚	中交瑞通路桥养护科技有限公司	男	1989-09-11	副高级	桥梁工程	技术应用
肖逸	长安大学	男	1998-02-17	技术员级	桥梁工程	试验研究
杨成	长安大学	男	1998-11-28	技术员级	桥梁工程	试验研究
张亚飞	长安大学	男	1997-06-03	技术员级	桥梁工程	数值模拟
王尧	长安大学	男	1995-10-14	技术员级	桥梁工程	数值模拟
孙敬航	长安大学	男	2000-04-04	技术员级	桥梁工程	理论分析
韦李欣	长安大学	男	1999-10-22	技术员级	桥梁工程	试验研究
阳鑫	长安大学	男	2000-08-01	技术员级	桥梁工程	理论分析
韩进孝	长安大学	男	2002-11-22	技术员级	桥梁工程	数值模拟
郭星宏	长安大学	男	2002-09-22	技术员级	桥梁工程	理论分析

4.3 各自承担的主要工作

1、长安大学：主要承担科研项目理论架构、机理分析、数据分析、论文发表、专利申请等工作，并完成研究报告的撰写。

2、中交瑞通路桥养护科技有限公司：主要负责提供依托工程，为本项目提出的技术进行验证；配合完成研究报告撰写，项目结题等。

4.4 项目主要负责人情况

朱伟庆,工学博士,教授、博士生导师,学科与专业发展中心副主任,担任《内蒙古工业大学学报(自然科学版)》等4本学报的编委或青年编委,入选陕西省高校科协青年人才托举计划。申请人一直致力于结构抗震与抗爆、组合与混合结构领域的研究。主持国家重点研发计划项目子题、国防重点研究项目子题、国家自然科学基金项目、省科技厅与交通厅科技项目等科研课题18项。发表学术论文70余篇,授权国家专利8项,主编和参编规范3部。相关成果获辽宁省技术发明一等奖1项、全国市政行业市政工程科学技术一等奖和中国钢结构协会科学技术进步一等奖2项。在与本项目密切相关的“钢-混组合桥墩抗震性能”“钢-混凝土组合结构受力性能与设计方法”“CFST结构抗震性能”等方面开展了近100组模型试件的试验研究和长期理论研究,通过大量模型试验、数值模拟与理论分析,系统研究了组合与混合结构中关键界面、重要构件、复杂节点的力学性能、破坏模式与设计方法。

五、项目依托工程(工作)情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程(工作)概况

K475+372.3 大黄院白河大桥位于十天高速西略段,下行(左幅)桥梁中心桩号为K475+472.3,桥梁全长886.6m,桥宽10.95~22.33m;上行(右幅)桥梁中心桩号为K475+537,桥梁全长926.6m,桥宽10.95~20.21m。

桥梁上部结构采用装配式预应力混凝土箱梁,下行共11联44跨,跨径组合为:3×20+3×(4×20)+5×20+4×(4×20)+5×20+3×20m;上行共11联46跨,跨径组合为:5×20+3×(4×20)+5×20+4×20+3×20+2×(4×20)+5×20+4×20m;桥梁下部结构为柱式墩、柱式台,桩基础。设计荷载等级为公路-I级。该桥于2013年12月建成通车。经检查发现,多处桥墩发生受损,削弱了结构有效截面,影响桥墩的承载能力与耐久性,存在一定的安全隐患,需对其进行维修加固工作,本项目将针对局部受损RC桥墩开展修复技术研究。

5.2 投资来源

本项目总经费预算为人民币50万元,具体构成如下:

- (1) 陕西省交通运输厅科研资助经费:19.85万元。
- (2) 单位自筹经费:30.15万元。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

项目前期开展国内外与本项目研究内容相关的研究成果和资料的收集工作，对已有研究成果认真总结，消化吸收；本项目科研计划将依托工程，拟定项目研究大纲及具体实施方案。本项目具体工作流程如下：

(1) 第一年

该阶段科研工作聚焦于修复技术的机理研究与设计方法开发，为修复工程提供关键设计依据。完成实桥调研、系统分析各类自然或人为灾害下 RC 桥墩受损情况，并进行文献资料整理；开展钢筋-钢板焊接接头受拉、CFST-RC 拼接段轴压、CFST-RC 拼接段压-弯-剪复合传力系列试验，探明荷载在 RC 段、CFST-RC 拼接段、CFST 段间的传递路径与分配规律，揭示不同受力状态下 CFST-RC 拼接段的传力机理，并提出拼接段承载力计算方法。将该阶段研究成果可转化为修复工程中拼接段的设计参数（如钢筋-钢板间最小搭接长度、拼接段长度、钢板厚度等），满足节段间的传力需求，为修复方案的设计提供坚实的理论基础。

(2) 第二年

该阶段科研工作将验证修复后混合桥墩的整体抗震性能，基于前期的科研成果，开展 CFST-RC 混合桥墩拟静力试验与数值模拟，系统揭示混合桥墩破坏位置转移与模式转化机制，建立混合桥墩承载力计算方法。该阶段研究成果可针对不同受损位置与范围的 RC 桥墩提出节段替换策略，以及实现整体性能重塑需求的拼接段合理构造，包括拼接段长度、钢管厚度等，指导严重局部受损 RC 桥墩的修复加固施工。最后，总结研究成果，完成论文投稿，专利申请，并提交项目结题报告。

5.4 组织管理形式

本项目研究内容涉及面广、难度大、任务重，为保证本项目能够高质、高效、按期达到预定目标，必须建立全面、高效的组织管理机制。

(1) 项目的各项研究内容和研究计划严格按本项目计划目标组织实施。

(2) 项目负责人按项目工作的技术目标、技术路线、系统体系与结构确定具体工作要求。工作责任包括需要完成的工作内容、工作效果、完成工作的时间、经费预算等。

(3) 项目组每 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。

(4) 严格执行课题合同，按规定的内容和进度完成任务；及时上报阶段研究成果，项目经费使用严格遵守现有的财务管理规定；项目负责人加强对重点阶段性目标和成果的考核和督促工作，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	其他经费
省交通运输厅补助	19.85	合 计	50.0	19.85	30.15
工程配套研究经费	0.0	（一）直接费用	40.0	15.9	24.1
单位自筹	30.15	1.设备费	0.0	0.0	0.0
其他经费	0.0	（1）购置设备费	0.0	0.0	0.0
		（2）设备改造与租赁费	0.0	0.0	0.0
		2.业务费	30.1	7.0	23.1
		（1）材料费	14.1	0.0	14.1
		（2）测试化验实验加工费	6.0	0.0	6.0
		（3）燃料动力费	0.0	0.0	0.0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	6.0	4.0	2.0
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	4.0	3.0	1.0
		（6）其他费用	0.0	0.0	0.0
		3.劳务费	9.9	8.9	1.0
		（1）专家咨询费	3.0	2.0	1.0
		（2）聘用人员劳务费	6.9	6.9	0.0
		（3）其他劳务费	0.0	0.0	0.0
		（二）间接费用	10.0	3.95	6.05
		4.管理费	4.75	1.85	2.9
		5.绩效支出	5.25	2.1	3.15

七、项目绩效指标

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

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	/
		(1) 小试	否
		(2) 中试(样品样机)	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1、引进高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2、培养高层次人才	3
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	3
		3、培训从事技术创新服务人员(人次)	0
		4、是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1、开放共享仪器设备数(台/套/只等)	0
		2、科研仪器设备利用率(%)	0
		3、孵化科技型企业(个)	0
		4、转化科技成果(个)	0
效果类指标	经济效益	1、新增产值(万元)	0.00
		2、新增销售(万元)	0.00
		3、新增出口创汇(万美元)	0.00
		4、新增利润(万元)	0.00
	社会效益	1、新增税收(万元)	0.00
		2、新增就业人数	0
		3、就业培训(人次)	0
		4、带动农民增收(万元)	0.00
		5、培训和指导科技服务(人次)	0
		6、新增产业带动情况	/
		7、技术集成示范(项)	0
		8、建立示范基地(亩数)	0.00
		9、节约资源能源	/
		10、环保效益	/
其他需要说明的情况	无		

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

8.1 项目预期目标

本项目针对各类自然或人为灾害下严重局部受损 RC 桥墩，通过文献收集、试验研究、数值模拟及理论分析等多种手段，开展基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复理论与技术的研究，预期达到以下目标：

(1) 基于修复后桥墩性能重塑目标，结合 CFST 结构的技术优势，提出采用 CFST 节段替换严重局部受损 RC 桥墩的快速-永久修复技术框架。

(2) 通过开展钢筋-钢管焊接接头受拉试验、CFST-RC 拼接段轴压单一传力试验、拼接段压-弯-剪复合传力试验，结合数值模拟揭示 CFST-RC 拼接段传力机理、并提出承载力计算方法。通过开展不同 CFST 段长度、钢管厚度、更换位置的修复后 CFST-RC 混合桥墩的试验与数值模拟分析，探究 CFST-RC 混合桥墩可能的破坏位置与破坏模式，揭示混合桥墩破坏模式转移与转化机制。

(3) 在以上研究基础上，建立 CFST-RC 混合桥墩承载力计算方法，提出可实现替换后混合桥墩理想破坏位置与模式的 RC 桥墩局部受损节段替换策略，以及基于整体性能重塑需求的混合桥墩合理构造，包括 CFST 段长度和钢管厚度，并提出相应的施工工艺流程，最终实现严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复的目标。

8.2 提交的研究成果及其形式

(1)《基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复理论与技术》研究报告 1 套；

(2) 发表高水平期刊论文 4 篇；

(3) 申请专利、软著 2 项；

(4) 应用工程实践 1 项。

8.3 其他考核指标

(1) 培养正高级、副高级人员 2 人；

(2) 参加行业学术会议并作技术交流报告 2 次；

(3) 媒体宣传报道不少于 3 次。

8.4 经济、社会效益分析

本项目提出采用 CFST 节段替换严重局部受损 RC 桥墩的快速-永久修复技术,可以极大的缩短严重局部受损 RC 桥墩维修加固施工时间;同时,可适用于墩底、墩中、墩顶不同位置受损节段的维修加固,并确保修复后混合桥墩力学性能达到甚至超过原 RC 桥墩,实现严重局部受损 RC 桥墩修复后性能重塑的目标,经济效益显著。

项目成果将推广应用于各类自然或人为灾害下严重局部受损 RC 桥墩,实现其性能快速重塑,确保修复后桥梁能够正常服役、抵抗地震等各类自然或人为灾害,大幅增强我国桥梁设施的全寿命韧性、保障战略和经济要道畅通,保障国家经济和人民生命财产安全,产生的社会效益明显。

九、其它需要说明的问题

无



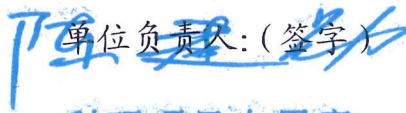
11.5.27

章田才自取押样

505 R50 22505

十、申请单位意见



单位负责人: (签字) 

科研项目专用章
年 月 日

2026年 03月 20日

基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复理论与技术

大纲评审意见

2026 年 3 月 13 日, 陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复理论与技术”(项目编号: 25-28K)项目大纲评审会。与会专家(名单附后)听取了项目组的汇报, 审阅了项目研究大纲, 经质询讨论, 形成如下评审意见。

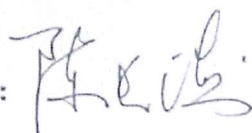
一、项目研究内容全面, 研究目标明确, 技术路线可行。

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

三、预期成果完全覆盖研究目标, 与研究内容的逻辑框架高度契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议: 细化项目现场实施方案, 根据最终设计方案增加动力试验。

主任委员: 

2026 年 3 月 13 日

专家审查意见表

项目名称	基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 墩（桩）快速-永久修复理论与技术				
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

该科研大纲围绕局部严重受损 RC 桥墩的加固修复，实现“快速修复”和“性能重塑”展开研究，选题聚焦 CFST-RC 混合桥墩的受力特性，加固方法等应用技术瓶颈，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、采用 CFST 节段替换 RC 桥墩受损节段后，替换策略应慎重选择“超强替换”策略，桥墩受损位置修复后若强度增加过大，可能导致结构破坏位置由原 RC 桥墩塑性铰区域转移至其他部位，有可能导致桥墩的整体抗震性能下降。

2、依托工程十天高速西略段白河大桥地震动峰值加速度为 0.15g，建议依照依托工程最终修复设计方案，增加动力试验，验证修复方案的抗震性能，确保实际工程建设质量。

评审专家（签字）：

陈长海

2026 年 3 月 13 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 墩（桩）快速-永久修复理论与技术				
专家姓名	张保元	职务/职称	正高	专 业	公路工程
专家单位	西安市市政建设（集团）有限公司			联系电话	13892818723

评 审 意 见

项目针对局部严重受损 RC 桥墩，提出“采用规格标准化 CFST 节段替换 RC 桥墩局部受损节段，形成 CFST-RC 混合桥墩”的快速高质量替换与拼接，利用受力性能更优的 CFST 节段重构局部受损区域的传力路径、钢管约束新-旧节段薄弱交界部位，实现严重局部受损 RC 桥墩快速修复及修复后性能重塑。

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

研究项目报告中提到的“在对安装精度要求不高的前提下实现了严重局部受损区域的快速高质量替换与拼接”，“安装精度不高”、“严重局部受损”的边界条件应进一步明确；在墩柱更换实施中考虑既有桥梁变形分析及控制要点。

评审专家（签字）：



2020年3月13日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 墩（桩）快速-永久修复理论与技术				
专家姓名	李皓	职务/职称	正高	专 业	桥梁
专家单位	铁一院			联系电话	13609191693

评 审 意 见

1. 在技术经济指标里补充可量化、可考核的指标。
2. 明确“严重局部受损”的定义，到底由损伤程度鉴别。
3. ^{明确}~~完善~~修复技术在现场怎么实施。

评审专家（签字）：李皓

2016 年 3 月 13 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 墩（桩）快速-永久修复理论与技术				
专家姓名	杜进生	职务/职称	教授	专 业	桥梁
专家单位	北京交通大学			联系电话	13552795846

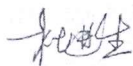
评 审 意 见

项目针对严重局部受损 RC 桥墩，提出采用规格标准化钢管混凝土节段替换 RC 桥墩局部受损节段，形成钢管混凝土-RC 混合桥墩的快速-永久修复方法，一方面在对安装精度要求不高的前提下实现了严重局部受损区域的快速高质量替换与拼接；另一方面期望利用受力性能更优的钢管混凝土节段重构局部受损区域的传力路径、利用钢管约束新-旧节段薄弱交界部位，最终实现严重局部受损 RC 桥墩快速修复及修复后性能重塑，即快速-永久修复的目标。

项目研究思路新颖，创新性强，研究基础扎实，技术路线可行，能够达到项目预期的研究目标及研究成果。

建议 加强依托工程的落地及具体实施方案。

评审专家（签字）：



2026 年 3 月 13 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 墩（桩）快速-永久修复理论与技术				
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. 实施方案中提出两个关键科学问题，但技术路线尚未清晰体现“问题-机理-模型-方法-工程应用”完整闭环，研究步骤之间的逻辑衔接不够明确。如果技术路线只是“机理研究+试验研究+数值分析”，但没有明确最终如何形成设计方法，容易导致研究成果停留在机理层面，难以转化为工程技术
2. 方案提出研究破坏位置转移与模式转化机制，但没有明确如何识别破坏模式。如果没有统一判据，研究容易停留在现象描述，难以形成规律。
3. 实施方案中提到数值分析，但没有说明使用什么本构模型及如何进行模型验证。
4. 项目目标提出要建立维修加固设计方法，但研究方案中没有明确设计方法如何形成。

评审专家（签字）：

惠迎新

2026 年 3 月 13 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

基于CFST节段替换的严重局部受损RC桥墩快速-永久修复理论与技术 (项目编号: 25-28K)

大纲评审专家委员会名单

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

专家意见处理表

项目名称：基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复理论与技术（项目编号：25-28K）

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	专家 1	目前随着一些偶然因素的作用桥墩出现了不同程度损伤，跨河桥梁的桥梁的下部结构主要受水流冲刷的影响，桩基出现大量的损伤，项目的研究是必要的。技术路线基本可行。建议： 1.课题名称能扩充到桩基部分，或者称之为桥梁下部结构墩柱及桩基受损。 2.修复技术的关键是施工工法的可行性，补充快速修复施工工法研究内容。	1.根据大纲评审规定，课题名称需与申报内容保持一致，因此课题名称暂不进行调整。 2.在研究内容中补充了快速修复施工工法的相关研究内容。
2	专家 2	1.本研究紧密契合公路桥梁的韧性提升工程，对最易受到损伤的桥梁病害严重部分研究节段置换技术，研究很有必要； 2.对技术路线进行适当的调整，加入桥墩节段置换后抗震性能的研究，特别是处于塑性较时； 3.研究成果应落地，不应只是研究报告及发表论文。	1.感谢专家的积极评价。 2.已加入修复后桥墩抗震性能的相关研究内容。 3.补充研究成果“应用工程实践 1 项”。
3	专家 3	项目针对严重局部受损 RC 桥墩，提出“采用规格标准化 CFST 节段替换 RC 桥墩局部受损节段，形成 CFST-RC 混合桥墩”的快速-永久修复方法，有一定的理论价值和实际意义。 1.图 1 中桥梁/桥墩变形严重，能根据本项目的研究方法进行修复吗？从图 2 来看，并不能解决图 1 的问题； 2.图 2 中文字过小； 3.缺少本项目的技术路线； 4.关键技术并不是研究内容，应有所差异； 5.前期研究工作和取得的成果建议以文献的形式列出，包括专利、论文等，以对所述内容提供一定支撑。	1.图 1 所示严重受损桥墩可以通过本项目提出的基于 CFST 节段替换的严重局部受损 RC 桥墩快速-永久修复方法进行修复，该方法正是针对各类自然或人为灾害下不同受损程度 RC 桥墩而研发的。通过凿除受损 RC 桥墩节段并采用预制钢管混凝土节段进行替换，重构桥墩局部受损区域的传力路径，利用钢管对新旧节段交界处的约束作用使用修复后桥墩整体力学性能达到甚至超过原桥墩。图 2 所示各试验主要用于验证 CFST 节段-RC 节段间快速拼接、RC 桥墩严重局部受损节段快速替换技术的可行性，属于本项目提出修复方法的工厂化验证与关键构造试验研究。重点是解决 CFST 节段-RC 节段

		之间的可靠连接与高效施工问题,为后续针对各类自然或人为灾害下RC桥墩严重局部受损位置与范围的差异性,提出更为完善的“基于规格标准化CFST-RC桥墩替换RC桥墩受损节段”的成熟修复技术方案提供试验依据和技术基础。 2.已对图2中字体大小进行调整。 3.在“三、研究方案”中补充了本项目的技术路线。 4.已对研究大纲中“拟解决的关键问题”一节内容进行调整。 5.已在研究基础各部分内容后面将取得的相关研究成果以文献的形式列出。
4	专家4	1.申请项目针对严重局部受损RC桥墩提出CFST-RC混合桥墩快速-永久修复方法,可大幅缩短修复时间并提升修复后性能,对减少交通中断及社会经济损失具有重要意义,符合国家“交通强国”战略对基础设施韧性的要求。 2.申请项目提出标准化CFST-RC桥墩替换技术,并对CFST-RC拼接段传力机理、破坏模式转移与转化机制等方面进行研究,具有创新性,可为工程应用提供理论支撑。 3.申请人前期已开展初步验证性试验,具有一定的研究基础,研究方案合理可行。 4.研究内容覆盖损伤统计、传力机理、破坏模式、设计方法等,较为全面,逻辑清晰,考核指标明确,计划成果符合要求。 5.建议将CFST-RC混合桥墩的长期耐久性及在复杂工况下和极端环境下的适应性作为补充考虑因素,以增强技术普适性。
		1-4.感谢专家的积极评价。 5.基于本项目的研究目标和周期,本项目研究内容主要聚焦于严重局部受损RC桥墩快速-永久修复技术框架的建立、不同受力状态下CFST-RC拼接段的传力机理、CFST-RC混合桥墩破坏模式转移与转化机制以及基于CFST-RC桥墩替换的局部受损RC桥墩维修加固设计方法。对于长期耐久性及在复杂工况和极端环境下的适应性问题,我们将在后续研究中作为重点研究方向进行考虑,系统开展CFST-RC混合桥墩在冻融循环、氯离子侵蚀、疲劳荷载及多灾害耦合作用下的长期性能演化规律研究,以进一步完善该修复技术的科学基础,拓展其在不同工程场景下的适用范围。

大纲评审委员会专家(签字):

陈红波

项目负责人(签字): 李伟庆