

项目合同编号：25-89K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：基于车辆荷载系统-重载交通下的钢-UHPC

组合结构桥梁关键构件受力性能研究

承担单位：陕西交通职业技术学院

项目负责人：白蓉蓉

通讯邮编、地址：710018、西安市文景路 19 号

传真、电话：029-86405005

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：25-89K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：基于车辆荷载系统-重载交通下的钢-UHPC

组合结构桥梁关键构件受力性能研究

承担单位：陕西交通职业技术学院

项目负责人：白蓉蓉

通讯邮编、地址：710018、西安市文景路 19 号

传真、电话：029-86405005

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) 钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件静力性能

剪力连接件破坏模式与剪力连接件型式、混凝土材料、贯穿钢筋、试件构造、环境因素等相关，针对钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件，设计模型试件并增加栓钉连接件试件和 PBL 连接件试件作为对照组，进行推出试验研究，基于加载过程中裂缝分布及发展、破坏后的试件外部和内部形态、荷载-滑移曲线类型，明确组合销剪力连接件的破坏模式，通过改变单一变量对抗剪承载力的影响程度，开展参数敏感性分析，基于试验和精细化有限元模型，对组合销剪力连接件承载机理进行理论分析。在参数敏感性分析中，着重研究高应力幅值下（模拟重载），UHPC 强度等级、环境因素、钢纤维掺量、钢销几何尺寸（尤其是根部曲率半径）对抗剪承载力的耦合影响。基于精细化有限元模型，构建 UHPC 与钢销界面-粘结-滑移本构关系，引入精细化模型模拟钢-混界面损伤，对比分析普通混凝土与 UHPC 中钢销前端“混凝土楔”的应力等值线分布差异，从细观力学角度阐明 UHPC 纤维桥接作用对推迟混凝土开裂、但加剧钢销应力集中的双重效应。

(2) 钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件疲劳损伤

基于车辆荷载系统，对神木市 337 国道锦界工业园区过境公路工程项目车辆信息进行统计，明确重载交通（轴载、车辆密度），区别于普通公路，重点捕捉煤运、化工产品运输车辆的超载、大轴重、多轴组特征，结合 WIM（动态称重）系统数据，构建能够反映重载交通“高应力幅、低周疲劳”特征的疲劳荷载谱，分析疲劳荷载下组合销剪力连接件失效机理、刚度退化和残余滑移，建立抗剪刚度计算模型。

(3) 钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件理论计算方法

以推出试验和有限元模型分析结构为基础，考虑钢销间距，椭圆孔作用、贯穿钢筋等影响因素，研究适用于钢-UHPC 组合桥梁的组合销剪力连接件承载力计算公式。以混凝土和钢板相对滑移 0.2 mm 对应的割线刚度作为剪力连接件的初期刚度，以承载力设计值 PRd 对应的割线刚度作为使用阶段的特征刚度，引入弹性地基梁理论和构造函数，研究初期刚度和特征刚度的计算方法。以极限承载力为基准，对试验和有限元模型得到的荷载-滑移曲线进行无量纲处理，根据无量纲荷载-滑移曲线的特征，通过构造函数，采用最小二乘法回归分析，研究组合销剪力连接件的荷载-滑移全曲线计算方法，基于非线性疲劳累积损伤理论，在考虑混凝土及贯穿钢筋强度退化的基础上，提出疲劳加载下组合销剪力键的剩余承载力计算公式，并建立包含试验数据验证、

文献数据验证及数值模拟扩展验证的公式适用性评价体系，确保计算公式的准确性、可靠性和普适性。

2. 技术关键

(1) 钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件传力机制

基于推出试验和数值模拟，建立有效的理论模型，明确弹性阶段、塑性阶段、破坏阶段剪力连接件受力状态，绘制受力示意图，揭示重载交通钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件的传力机制，明确从“混凝土破坏控制”向“钢材破坏控制”转变的临界条件。这是本项目拟解决的第一个技术关键问题。

(2) 钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件计算方法

剪力连接件计算公式与钢-混组合结构的构造形式、剪力连接件形式、约束状态、混凝土材料有关，而准确的计算方法是剪力连接件设计需解决的首要关键问题。本项目拟针对重载交通钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件，在“重载疲劳+冻融循环+氯盐腐蚀”多场耦合作用下，建立考虑 UHPC 被动约束增强与重载高频加载耦合影响的精细化损伤模型，并通过多场耦合试验方案，揭示环境因素对组合销疲劳寿命的折减系数，提出计算公式，进而为钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件的设计和应用提供理论依据。这是本项目拟解决的第二个技术关键问题。

3. 依托工程（依托工作）

榆林神木市是中国第一产煤大市、中国最大的兰炭基地、中国最大的聚氯乙烯基地、西部最大的火电基地、西部最大的浮法玻璃基地、电石基地，在中国国家能源安全体系中占有重要位置。337 国道锦界工业园区过境公路位于神木市具有陕西省第二大经济开发区锦界工业园区的锦界镇内，该项目采用双向四车道一级公路标准，设计速度 80 公里/小时，路基宽度 24.5 米，桥涵汽车荷载等级公路-I 级。项目的建设对完善神木市乃至榆林市的国省干线路网，增加区域交通路网密度具有重要的意义。项目中 K2+726.5 上跨高速大桥、K6+730.0 枣稍沟大桥等多座桥梁均为钢混组合结构桥梁，钢混组合桥梁主梁为工字钢结构，间距 4m，钢主梁梁高为 2550mm，混凝土桥面板厚度为 250mm，钢主梁顶面通过剪力连接件与钢筋混凝土桥面板形成组合结构。

依托工程所处的锦界工业园区是陕西省重要的能源化工基地，其交通荷载与环境条件具有显著的“重载、高频、腐蚀、严寒”四重叠加特征，对钢混组合结构桥梁的关键构件（特别是剪力连接件）提出了严峻挑战。目前工程中存在以下亟待解决的技术难点：

(1) 超常重载导致连接件疲劳损伤机制不明

该路段煤运、化工产品运输车辆比例高，普遍存在超载 30%~50%的现象，

单轴轴载远高于规范公路-I级标准(140 kN)。传统的栓钉剪力连接件在如此高应力幅作用下易发生低周疲劳破坏,而本工程采用的普通钢筋混凝土桥面板+栓钉连接方案能否满足重载交通下的长期疲劳寿命,缺乏可靠的理论依据与试验验证。

(2) 严酷环境与重载耦合作用下的耐久性隐患

陕北地区冬季严寒(最低气温-30℃),且工业园区存在工业腐蚀环境(氯盐除冰剂、化工介质)。在“冻融循环+氯盐腐蚀”与“重载反复作用”的耦合作用下,钢-混界面粘结性能退化、连接件根部应力集中区锈蚀、混凝土冻胀开裂等问题将加速结构劣化。目前设计规范缺乏针对此类多场耦合工况的抗剪连接件耐久性设计方法。

(3) 现有剪力连接件施工与受力性能的矛盾

传统栓钉连接件虽施工方便,但抗疲劳性能差;PBL连接件虽承载力高,但在本工程钢主梁(工字钢,梁高2550mm)的狭小空间内,贯穿钢筋定位困难、施工效率低,影响工程进度。亟需研发一种兼具高抗剪刚度、优抗疲劳性能且施工便捷的新型剪力连接件,并明确其在重载UHPC组合结构中的受力机理与设计方法。

(4) 钢-UHPC组合结构在重载桥梁中的设计空白

若后期采用钢-UHPC组合桥面板替代普通混凝土桥面板以提升耐久性,UHPC的高弹性模量、高韧性与钢销的相互作用机理尚不明确。在重载作用下,UHPC中连接件的破坏模式(是混凝土剪切破坏还是钢销屈服?)、传力路径及承载力计算方法与普通混凝土存在本质差异,现行规范无法直接指导设计,需开展专项研究。

二、考核指标

1.预期目标

本项目成果以论文、专利和研究报告的形式提供，成果达到省内领先。

2.主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

（1）承载力与刚度指标

基于前期普通混凝土中组合销的研究成果（承载力较 PBL 提高约 15%~20%），结合 UHPC 更高约束作用，预期在 UHPC 中性能进一步提升。

（2）疲劳指标

依托工程重载交通特征（超载 30%~50%），采用高应力幅（0.3~0.5 倍静力承载力）进行疲劳试验，200 万次循环相当于实际运营 10~15 年重车通过量。剩余承载力 ≥ 0.85 倍静力值，确保结构安全储备。

3.经济和社会效益

组合销剪力连接件由于其抗剪刚度大和半开口的结构形式，克服了传统的栓钉剪力连接件疲劳问题严重和开孔板剪力连接件贯穿钢筋困难、影响施工进度的问题。本项目以神木市 337 国道锦界工业园区过境公路工程项目为背景，重点解决传统剪力连接件施工过程中的施工困难问题和重载交通下的疲劳损伤问题，从而提高施工速度和确保桥梁质量，确保钢混组合结构可靠的连接，重载交通下的桥梁安全运维，进而取得良好的经济和社会效益。

4.成果提供形式

- （1）高水平论文 2 篇；
- （2）发明专利 2 项；
- （3）研究报告 1 份。

5.其他考核指标

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）
第一年度	第一季度：文献调研与方案设计，确定推出试验方案。 第二季度：试件制作与推出试验。 第三季度：试验数据分析。 第四季度：数值模拟，进行参数敏感性分析、承载机理分析，静力承载力等计算方法研究。 本年度完成 1 篇 sci 论文，申请 2 件发明专利
第二年度	第一季度：重载交通车辆荷载调查与统计分析。 第二季度：疲劳试验。 第三季度：试验数据分析及数值模拟，疲劳损伤机理分析，剩余承载力计算方法研究。 第四季度：成果整理，撰写研究总报告，准备项目结题答辩材料。 本年度发表 1 篇 sci 论文

四、项目经费

项目总经费：19.95 万元
交通运输厅补助：9.95 万元
自筹资金：10.00 万元

经费支出预算表

科 目	总经费 (单位：万元)	厅补经费 (单位：万元)
(一) 直接费用		
1. 设备费	0	0
(1) 购置设备费	0	0
(2) 试制设备费	0	0
(3) 设备改造与租赁费	0	0
2. 业务费	17.95	8.95
(4) 材料支出	5.95	2.95
(5) 测试化验实验加工支出	4.0	2.0
(6) 燃料及动力支出	0	0
(7) 差旅支出	1.0	0.5
(8) 会议支出	0.6	0.3
(9) 国际合作与交流支出	0	0
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	6.4	3.2
(11) 其他支出	0	0
3. 劳务费	2.0	1.0
(12) 劳务性支出	0	0
(13) 咨询专家支出	2.0	1.0
(二) 间接费用	0	0
4. 管理费	0	0
5. 绩效支出	0	0
合 计	19.95	9.95

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

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

六、承担单位或研究人员分工

本项目承担单位及研究人员分工如下：

姓 名	单 位	性别	年龄	技术 职称	专业	在项目中担任 具体工作
白蓉蓉	陕西交通职业技术学院	女	38	副教授	桥梁工程	项目负责人
孔凡磊	山东交通学院	男	38	副教授	桥梁工程	技术负责人
王占锋	陕西交通职业技术学院	男	43	副教授	结构工程	技术指导、理论分析
郭红兵	陕西交通职业技术学院	男	49	教授	道路工程	技术指导、理论分析
李明哲	山东交通学院	男	32	副教授	桥梁工程	制定及实施试验方案
黄娟	陕西交通职业技术学院	女	43	副教授	交通土建	项目驻场组织协调
郭雪莲	山东交通学院	女	29	讲师	桥梁工程	理论分析、数值模拟
张松雷	陕西交通职业技术学院	男	40	副教授	道桥工程	制定及实施试验方案
段瑞芳	陕西交通职业技术学院	女	45	副教授	桥梁工程	试验数据汇总整理
李凡	陕西交通职业技术学院	女	34	讲师	道桥工程	试验数据汇总整理
周子豪	陕西交通职业技术学院	男	32	讲师	岩土工程	数值仿真

李宁博	陕西交通职业技术学院	男	32	讲师	交通运输工程	研究报告编写
郭锐	恒万达设计咨询有限公司	男	43	高级工程师	桥梁工程	项目落地过程中施工协调
温小伟	陕西靖龙路桥建设有限公司	男	39	高级工程师	桥梁工程	项目落地过程中施工协调
侯万新	陕西永卓建设有限公司	男	38	工程师	建筑与土木工程	项目落地过程中施工协调

陕西交通职业技术学院：

（1）负责项目的整体规划、组织实施、进度控制与成果集成，具体为：项目申报、协调与管理；试验方案设计与实施；理论研究与公式推导；研究报告撰写与结题组织。

（2）开展室内模型试验、数据处理与初步理论分析，具体为：推出试验与疲劳试验；试验数据采集与处理；参数敏感性分析；初步承载机理研究。

（3）开展理论建模、计算方法研究与公式推导，具体为：弹性地基梁理论应用；荷载-滑移曲线拟合；刚度计算模型建立。

山东交通学院：

（1）提供高水平理论分析、精细化建模与破坏机理研究，具体为精细化有限元模型建立与验证；破坏模式理论分析；传力机制图解与机理揭示；承载力公式理论推导。

（2）加强理论深度，提升学术影响力，推动跨省合作，具体为：高水平论文撰写与发表；理论模型创新与方法提升；联合申报更高层次项目。

恒万达设计咨询有限公司：

将研究成果转化为实际工程设计参数与施工方案，具体为：提供工程背景与设计需求；协调施工现场与试验条件；参与设计指南与技术标准起草；工程可行性评估与经济性分析。

陕西靖龙路桥建设有限公司、陕西永卓建设有限公司：

提供施工现场协调、材料供应、工艺试验支持，具体为：现场试验条件保障；施工工艺试验与反馈；实际工程数据采集与监测配合；示范工程实施支持。

七、项目参加人员表

项目承担单位：陕西交通职业技术学院 参与单位（排序）：山东交通学院、恒万达设计咨询有限公司、陕西靖龙路桥建设有限公司、陕西永卓建设有限公司						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中所担任具体工作 签名
1	白蓉蓉	1987.03	陕西交通职业技术学院	副教授	建筑与土木工程	项目负责人 白蓉蓉
主要研究人员						
2	孔凡磊	1987.04	山东交通学院	副教授	桥梁与隧道工程	技术负责人 孔凡磊
3	王占锋	1982.03	陕西交通职业技术学院	副教授	结构工程	技术指导、理论分析 王占锋
4	郭红兵	1976.06	陕西交通职业技术学院	教授	道路工程	技术指导、理论分析 郭红兵
5	李明哲	1995.03	山东交通学院	副教授	桥梁与隧道工程	制定及实施试验方案 李明哲
6	黄娟	1982.06	陕西交通职业技术学院	副教授	交通土建	项目驻场组织协调 黄娟
7	郭雪莲	1996.03	山东交通学院	讲师	桥梁与隧道工程	理论分析、数值模拟 郭雪莲

8	张松雷	1985.03	陕西交通职业技术学院	副教授	道桥工程	制定及实施试验方案	张松雷
9	段瑞芳	1980.07	陕西交通职业技术学院	副教授	桥梁工程	试验数据汇总整理	段瑞芳
10	李凡	1991.12	陕西交通职业技术学院	讲师	道桥工程	试验数据汇总整理	李凡
11	周子豪	1993.09	陕西交通职业技术学院	讲师	岩土工程	数值仿真	周子豪
12	李宁博	1993.11	陕西交通职业技术学院	讲师	交通运输工程	研究报告编写	李宁博
13	郭锐	1982.06	恒万达设计咨询有限公司	高级工程师	桥梁工程	项目落地过程中施工协调	郭锐
14	温小伟	1986.09	陕西靖龙路桥建设有限公司	高级工程师	桥梁工程	项目落地过程中施工协调	温小伟
15	侯万新	1987.4	陕西永卓建设有限公司	工程师	建筑与土木工程	项目落地过程中施工协调	侯万新

八、信息表

项目合同编号		25-89K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部		
项目名称		基于车辆荷载系统-重载交通下的钢-UHPC 组合结构桥梁关键构件受力性能研究								
项目实施所在地		陕西省榆林市		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月				
总 经 费		19.95 万元		厅 拨		9.95 万元				
第一承担单位	单位名称	陕西交通职业技术学院								
	所在地	陕西省（西安市）					代码	8123		
	通讯地址	西安市文景路 19 号					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	1		
参与单位	序号	单 位 名 称								
	1	山东交通学院								
	2	恒万达设计咨询有限公司								
	3	陕西靖龙路桥建设有限公司								
	4	陕西永卓建设有限公司								
项目负责人		姓 名	白蓉蓉		性别（2 ）1.男 2.女		出生年份	1987.03		
		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	(13679277312、029-86405005)		电子邮箱		448945962@qq.com			
项目联系人		姓名	白蓉蓉		性别		女			
		联系电话	(13679277312、029-86405005)		电子邮箱		448945962@qq.com			
项目组人数		15	高级	10	中级	5	初级	0	其他	0
主要研究内容 (100 字以内)		本项目研究重载交通下钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件的力学行为,采用模型试验和数值模拟等手段,揭示其传力规律,阐明其破坏机理,分析影响其受力性能的主要因素,揭示刚度退化规律,提出计算方法。								
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.合同正本一式玖份，甲方单位伍份，承担单位肆份。

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15日

联系人：（签字）

张鼎

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）

陕西交通职业技术学院

单位负责人：（签字）

张时康 2016年3月15日

项目负责人：（签字）

白蓉蓉

（公章）

电 话：029-86405005

财务负责人：（签字）

王瑞良

账 户 名：陕西交通职业技术学院

开户银行：中国建设银行西安莲湖路支行

账 号：61001711100052514018

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：

白蒙蒙

2016年3月15日



项目编号: 25-89K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 基于车辆荷载系统-重载交通下的
-UHPC 组合结构桥梁关键构件受力
性能研究

申请单位: 陕西交通职业技术学院 (盖章)

联系人: 白蓉蓉

电 话: 13679277312

陕西省交通运输厅制

2025 年 12 月

一、项目研究的背景和必要性

为降低桥梁建设中全寿命周期成本，提升使用过程中耐久性，促进公路建设的转型和升级，钢结构桥梁在公路建设的过程中比例明显提高。钢混组合结构中钢结构和混凝土结构通过剪力连接件实现协同受力，其设计是组合结构设计的核心。目前国内外采用的剪力连接件主要是栓钉和开孔板（PBL）剪力连接件。栓钉剪力连接件受力性能好，施工方便，可靠性高，但在荷载的作用下变形大，容易发生疲劳破坏（图 1（a）），且施工时由于数量庞大，焊接时需要大量的人力物力；PBL 剪力连接件具有抗剪承载力大、抗剪刚度大、抗疲劳性能好和焊接简单等优点，但由于构造上的限制，应用于异型结构时，定位和贯穿开孔板中的钢筋难度大（图 1（b）），施工困难，影响施工进度。

组合销剪力连接件是在 PBL 剪力连接件基础上提出的一种新型剪力连接件，主要分为拼图（Puzzle shape, PZ）型（图 1（c））和改进螺旋线（Modified clothoid shape, MCL）型（图 1（d））2 种。组合销剪力连接件是一种半开口形式的剪力连接件，施工时只需将贯穿钢筋放入指定位置，充分克服了 PBL 剪力连接件贯穿钢筋困难的问题，而且其承载能力也均优于栓钉和 PBL 剪力连接件，同样也具有良好的抗疲劳性能。并且在加工制作时，剪力连接件采用单线切割，将钢板一分为二，生产效率高。因此具有十分广阔的应用前景。

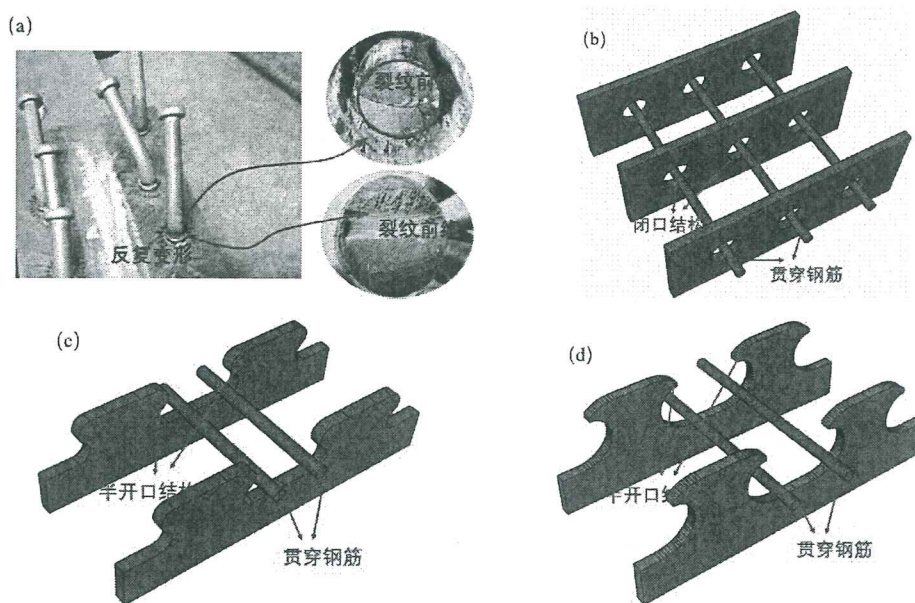


图 1 三种组合销剪力连接件。(a) 栓钉剪力连接件疲劳破坏。(b) 开孔板剪力连接件。
(c) PZ 型组合销剪力连接件。(d) MCL 型组合销剪力连接件。

针对组合销剪力连接件力学行为，国外学者基于组合梁结构开展了大量的理论和试验研究，并取得了大量的研究成果；国内仅有少量学者对组合销剪力连接件开展研究，成果相对较少，且未在工程实际中的应用。剪力连接件在不同结构、不同约束状态和不同材料中，力学行为也各不相同。基于此，课题组前期对钢-混凝土组合桥面板中小尺寸、弱约束状态的组合销剪力连接件的力学性能和承载机理进行系统和深入的研究。然而，既有研究主要基于普通混凝土材料，随着工程材料的发展，超高性能混凝土（UHPC）开始应用于桥梁结构中，采用 UHPC 时，特别是应用于重载交通场景时以及环境因素（温湿度、腐蚀性）影响下，组合销剪力连接件的破坏模式和承载机理以及计算方法等力学行为是否与普通混凝土一致等问题仍需进一步研究和解答。

基于实际需求和既有研究不足，本项目重点研究重载交通下钢

-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件的力学行为，采用模型试验、数值模拟和理论分析等手段，旨在揭示组合销剪力连接件受力全过程中传力规律，阐明破坏机理，分析影响其受力性能的主要因素和影响程度，揭示重载交通车辆荷载下刚度退化规律，提出承载力、抗剪刚度、荷载-滑移曲线、疲劳剩余承载力计算方法，并建立包含试验数据验证、文献数据验证及数值模拟扩展验证的公式适用性评价体系，确保计算公式的准确性、可靠性和普适性，进而为 UHPC 中组合销剪力连接件的设计和应用提供重要的理论依据，同时也对该类型剪力连接件在国内以及陕西省内的推广创造良好的条件，具有重要的科学意义和重大的工程应用前景。

二、前期科研及工作基础

1. 对项目领域国内外（省内外）研究现状，研究水平和发展趋势的分析和评价（应进行查新分析，主要分析本项目的技术领域发展状况和水平，有那些技术尚未解决，需要这次攻克的技术难点）

钢-混组合结构在工程中具有广泛的应用^[1-6]，剪力连接件可以抵抗水平横向和纵向剪力，同时也可以起到竖向抗拔的作用，将钢结构和混凝土结构可靠的组合在一起，实现钢混-组合结构协同受力^[7-15]。目前，组合销剪力连接件多应用于欧洲国家的钢混组合梁中，相关研究主要集中在破坏模式、抗剪性能和计算方法等方面^[16-22]。

在普通混凝土中，PZ 型和 MCL 型组合销剪力连接件在纵向剪力作用下会发生 3 种典型破坏模式^[23-25]：①当钢板过薄或者等级较低时，剪切-弯曲组合效应会使钢板产生水平裂纹，同时钢销也会产生较大

的塑性变形,此时会发生钢销失效破坏;②当组合销剪力连接件钢销间距过小或者钢板厚度较大时会发生混凝土剪切破坏;③当钢销与混凝土表面距离过小,即顶部或者底部混凝土覆盖层较薄时,发生在剪力的作用下将混凝土表面锥形撬起的破坏模式。Lorenc 等^[26-28]设计了 19 个试件进行推出试验,研究钢板厚度对破坏模式的影响,结果表明,钢板厚度 10mm 时发生钢失效破坏,30mm 时发生混凝土剪切破坏,20mm 时为混合破坏模式;Classen 等^[29-30]对组合销剪力连接件进行有限元分析,结果表明,纵向剪切力作用下,钢销前面出现一个高应力区域的混凝土楔,受到约束的混凝土楔体会产生一个剪力法线方向的撬起力,当混凝土覆盖层较薄时发生撬起破坏。组合销剪力连接件设计时应避免发生钢失效和混凝土撬起破坏。

组合销剪力连接件剪切破坏模式下全受力过程可分为 3 个阶段:①弹性阶段;②塑性阶段;③破坏阶段。Kozuch 等^[31]采用精细有限元模型,阐明了组合销剪力连接件荷载传递历程和破坏机理;黄平等^[32-33]分析了材料强度、组合销剪力连接件厚度、开孔位置及形状、贯穿钢筋等参数对承载力的影响;刘沐宇等^[34]针对钢销底部应力集中问题,提出在钢销上设置横向剪力钉,有效的减缓了应力集中现象。薛辉^[35]等通过 PBL 和 PZ 型剪力连接件抗拉拔性能对比试验,表明 PZ 型组合销剪力连接件抗拔性能优越。

不同破坏模式下、不同组合结构中,组合销剪力连接件承载力计算公式各不相同。孔凡磊等^[36-37]考虑组合销间距、混凝土强度、粘结摩擦力和椭圆孔等因素,提出了剪切破坏模式下 PZ 型和 MCL 型剪力

连接件承载力计算公式；Feldmann 等^[38]提出了引入组合销剪切区域重合影响修正系数的承载力计算公式；Kopp 等^[39]考虑剪切力和弯曲力共同作用，提出了钢失效破坏模式下的承载力计算公式；Classen 等^[40-42]结合推出试验和有限元分析，提出了纯剪和纯拉受力模式下的抗剪承载力计算公式。各学者提出的承载力计算公式均与推出试验和有限元分析结果吻合度较高。

综上所述，国内外已经对组合销剪力连接件进行了大量的试验和理论研究，对其力学行为有了较深的认识，但是这些研究均针对普通混凝土。随着工程材料的发展，UHPC 开始应用于各种桥梁结构中，UHPC 具有高抗拉压强度、高弹性模量、高韧性和高耐久性等特点，采用 UHPC 代替普通混凝土材料，能大幅减小结构尺寸，降低结构体系自重，显著提高结构的耐久性，UHPC 材料具有广阔的应用前景。

近年来，许多学者对采用 UHPC 的栓钉和 PBL 剪力连接件进行了试验和理论研究，郑玉龙等^[43]基于推出试验对粗骨料超高性能混凝土中的 PBL 剪力连接件进行了承载性能研究，结果表明贯穿钢筋和开孔板厚度对承载力均具有明显的影响；阳霞^[44]等波形钢-UHPC 组合桥面板中栓钉和 PBL 连接件抗剪性能数值模拟研究，，揭示了波形顶板-UHPC 组合结构中栓钉与 PBL 剪力连接件的协同工作机理及破坏机理；Zhao^[45]等对 UHPC 中小肋高的 PBL 剪力连接件抗剪性能进行了试验研究并提出了抗剪承载力预测模型。各学者的研究均表明随着 UHPC 的应用，对 UHPC 中的剪力连接件进行相应的研究是十分必要的。

然而，针对采用 UHPC 时的组合销剪力连接件的研究相对较少，

特别是应用于重载交通场景时以及环境因素（温湿度、腐蚀性）影响下，组合销的力学行为将发生本质变化，如破坏模式的转变与不确定性：UHPC 具有极高的抗压强度和抗拉韧性，且含有钢纤维。在重载作用下，传统组合销在普通混凝土中出现的“混凝土剪切破坏”可能会被抑制，转而可能发生钢销的提前屈服或疲劳断裂，或者出现 UHPC 局部高应力区的纤维拔出与基体碎裂的复合破坏模式。这种破坏模式的“材料主导”向“结构主导”的转变机制尚不明确；重载与高弹性模量材料的耦合效应：UHPC 的高弹性模量意味着其对钢销的“被动约束”更强，导致钢销根部的应力集中现象较普通混凝土更为显著。在重载静力作用下，这可能提高承载力；但在重载高频疲劳作用下，这种应力集中会急剧加速钢销的疲劳损伤累积，其刚度退化规律是否仍遵循普通混凝土中的经验公式，也是亟待回答的关键问题。因此，本项目拟对重载交通下 UHPC 中组合销剪力连接件破坏模式、传力机理和计算方法等力学行为开展研究，为组合销剪力连接件在重载交通 UHPC 中的应用提供理论依据。

2. 项目前期科研及现有工作条件（项目的支撑条件，过去相关研究的工作基础，获奖情况，现有的试验手段（设施、设备）、研究人员情况及协作条件等）

（1）申请人具有前期工作基础条件

申请人团队在过去 5 年中一直从事钢-混组合结构桥梁研究，具体的讲是钢-混组合桥面板和剪力连接件的研究；相关成果发表在《Engineering Structures》和《Thin-Walled Structures》等期刊

中，另外发表 EI、中文核心和专利等十余篇。本项目的研究内容和研究目标是申请人前期工作的延伸和拓展。申请人及其团队针对组合销剪力连接件力学行为已开展了大量前期研究工作，概况起来有：①开展了普通混凝土中组合销剪力连接件推出试验研究，明确了组合销剪力连接件在普通混凝土材料中的破坏模式和破坏机理；②进行了组合销剪力连接件在普通混凝土中的受力全过程理论分析，明确了组合销剪力连接件传力机理和承载机理；③提出了普通混凝土中组合销剪力连接件抗剪承载力、抗剪刚度和荷载-滑移曲线计算方法。通过上述研究厘清了项目所在的科学和技术问题，明确了本项目研究的目标和内容，保证了本项目研究的延续性和可行性，保证项目顺利开展。

本项目实验方案涉及室内模型试验、数值模拟和计算方法，申请人前期已经完成了采用普通混凝土材料中组合销剪力连接件的室内推出试验、数值模拟和计算方法的建立，并取得了可靠的实验结果。本项目的实验方案是前期普通混凝土中组合销剪力连接件实验方案的延续。

（2）工作条件

申请人所在团队单位拥有“桥梁结构安全技术国家工程实验室”、“公路桥梁与隧道陕西省重点实验室”、“省级桥梁结构重点实验室”，具备完善的科研实验条件，拥有齐全的试验设备和仪器，具备开展本项目研究所需的各项试验条件和设备基础。在数值模拟分析方面，申请者所在单位拥有 MIDAS、ANSYS、ABAQUS 等数值计算软件。

（3）支撑条件

陕西交通职业技术学院拥有国家级生产性实训基地 3 个，校企协同技术创新中心 1 个，中央财政支持建设实训基地 3 个，省级实训基地 5 个，省级校外实践教学基地 5 个，国家级职业教育示范性虚拟仿真实训基地培育项目 1 个，虚拟仿真实训中心 5 个，实验实训室 149 个，校外实训基地 589 个，大学生创新创业教育中心 1 个。近五年，教职工主持和参与各类科研项目 269 项，其中主持和参与国家级、省部级项目 96 项，主持和参与厅局级课题 83 项、横向课题 31 项，校级课题 59 项。主持和参与各类教研教改项目 271 项，其中主持和参与省部级项目 26 项，校级教研教改项目 76 项，课程思政专项课题 76 项，各类学会课题 93 项。主持国家级专业教学资源库 1 个，参与建设国家级专业教学资源库 5 个，有国家和省级精品课程 32 门，国家规划教材 2 部，省级规划教材 13 部。近五年，获国家教学成果奖 2 项，陕西省教学成果特等奖 1 项、一等奖 3 项、二等奖 2 项。教师在国家教学竞赛等活动中获特等奖 2 项、一等奖 3 项、二等奖 4 项、三等奖 1 项，在省级教学竞赛等活动中获一等奖 9 项、二等奖 11 项、三等奖 21 项。

本人所在团队一直从事钢-混组合结构桥梁、既有桥梁检测及加固技术、新型工业化装配式桥梁研发与应用等方向的研究工作，承担了十余项国家级、省部级和市厅级科研项目，以及横向服务项目若干项，荣获十余项政府和公路学会科技进步奖。已发表与本项目相关的成果包括论文、专利共计 20 余篇。

3. 参考文献

- [1] 孙璇, 邵旭东, 邹德强. 型钢开口肋-UHPC 轻型组合桥面新结构静力与疲劳性能[J]. 中国公路学报, 2024, 37(04): 252-262.
- [2] 张清华, 李俊, 崔闯, 等. 钢桥面板疲劳开裂加固处治关键问题研究进展[J]. 中国公路学报, 2024, 37(05): 246-266.
- [3] Zhongqiu Fu, Yixun Wang, Bohai Ji, et al. Effects of multiaxial fatigue on typical details of orthotropic steel bridge deck[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 135: 137-146.
- [4] Benjin Wang, Wim Nagy, Hans De Backer, et al. Fatigue process of rib-to-deck welded joints of orthotropic steel decks[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 101:113-126.
- [5] Zhenyu Cheng, Qinghu Zhang, Yi Bao, et al. Flexural behavior of corrugated steel-UHPC composite bridge decks[J]. Engineering Structures, 2021, 246(3): 113066.
- [6] Fanlei Kong, Pingming Huang, Bing Han, et al. Experimental study on behavior of corrugated steel-concrete composite bridge decks with MCL shape composite dowels[J]. Engineering Structures, 2021(227): 111399.
- [7] 刘玉擎, 周伟翔, 蒋劲松. 开孔板连接件抗剪性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2006, 6: 1-4, 43.
- [8] 石膏爽, 王清远, 欧阳雯欣, 等. PBL 剪力连接件粘结滑移性能的静载推出试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(01): 168-175.

- [9] 胡建华, 侯文崎, 叶梅新. PBL 剪力键承载力影响因素和计算公式研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(06): 12-18.
- [10] 宗周红, 车惠民. 剪力连接件静载和疲劳试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1999, 27(06): 61-66.
- [11] 周绪红, 逯文茹, 狄谨, 等. 钢锚箱栓钉剪力连接件群钉效应及抗剪承载力计算方法[J]. 中国公路学报. 2014, 27(12): 33-45.
- [12] 肖林, 黄雅茜, 卫星, 等. 钢-混组合桥梁栓钉腐蚀疲劳失效及力学性能退化机理试验研究[J]. 中国铁道科学, 2024, 45(02): 48-58.
- [13] 汪炳, 刘小玲, 伊西艳. 疲劳荷载作用下栓钉连接件全过程荷载-滑移计算模型[J]. 哈尔滨工业大学学报. 2023, 55(11): 91-98.
- [14] 杨勇, 陈阳, 蔡军伟. 开孔钢板剪力连接件静力性能试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(03): 255-263.
- [15] 狄谨, 邹杨, 秦凤江, 周绪红. 强约束状态下大尺寸 PBL 连接件力学性能研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(03): 38-48, 58.
- [16] 肖林, 卫星, 强士中. 两类 PBL 剪力键推出试验的对比研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(11): 70-80.
- [17] 郑双杰, 刘玉擎. 开孔板连接件初期抗剪刚度试验[J]. 中国公路学报, 2014, 27(11): 69-75.
- [18] 刘永健, 李慧, 张宁, 等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土界面粘结-滑移性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 55(03): 47-64.
- [19] 张清华, 李乔, 卜一之. PBL 剪力连接件群传力机理研究(I)-

理论模型[J]. 土木工程学报, 2011, 44(04): 71-77.

[20] 张清华, 李乔, 卜一之. PBL 剪力连接件群传力机理研究 II: 极限承载力[J]. 土木工程学报, 2011, 44(05): 101-108.

[21] Martin Classen, Joerg Gallwoszus. Concrete fatigue in composite dowels[J]. Structural Concrete, 2016, 17(01): 63-73.

[22] Sławomir Rowiński, Wojciech Lorenc, Maciej Kożuch. Study on fatigue cracks in steel-concrete shear connection with composite dowels[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2011, 11(4): 839-858.

[23] German Institute for Building Technology (DIBT): Technical approval for Composite Dowels, no. Z-26.4-56, Berlin; 2018.

[24] Martin Classen. Limitations on the use of partial shear connection in composite beams with steel T-sections and uniformly spaced rib shear connectors[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 142: 99-112.

[25] Martin Classen, Josef Hegger. Assessing the pry-out resistance of open rib shear connectors in cracked concrete-Engineering model with aggregate interlock[J]. Engineering Structures, 2017, 148: 254-262.

[26] Wojciech Lorenc, Maciej Kozuch, Sławomir Rowinski. The behaviour of puzzle-shaped composite dowels-Part I:

Experimental study[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101(10): 482-499.

[27] Wojciech Lorenc, Maciej Kozuch, Slawomir Rowinski. The behaviour of puzzle-shaped composite dowels-Part II: Theoretical investigations[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101(10): 500-518.

[28] Wojciech Lorenc, Ekaluk Kubica, Maciej Kozuch. Testing procedures in evaluation of resistance of innovative shear connection with composite dowels[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2010, 10(03): 51-63.

[29] Martin Classen, Josef Hegger. Shear-slip behaviour and ductility of composite dowel connectors with pry-out failure[J]. Engineering Structures, 2017, 150(11): 428-437.

[30] Martin Classen, Josef Hegger. Assessing the pry-out resistance of open rib shear connectors in cracked concrete-Engineering model with aggregate interlock[J]. Engineering Structures, 2017, 148: 254-262.

[31] Maciej Kozuch, Slawomir Rowinski. Elastic behaviour of the steel part of a shear connection with MCL composite dowels[J]. Steel Construction, 2016, 9(2): 107-114.

[32] 黄平明, 孔凡磊, 彭首冲, 等. 波形钢组合桥面板中组合销剪力连接件的力学性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021,

51(02): 249-255.

[33] Pingming Huang, Junlong He, Fanlei Kong, et al. Experimental study on the bearing capacity of PZ shape composite dowel shear connectors with elliptical holes [J]. Scientific reports, 2022, 12(01): 2457.

[34] 刘沐宇, 刘国豪, 张强. 基于剪力钉增强的组合销连接件抗剪性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(04): 80-87.

[35] 薛辉, 王志宇, 王清远, 等. PBL 与 PZ 型剪力连接件抗拉拔性能试验[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2016, 48(06): 68-76.

[36] 孔凡磊, 黄平明, 梅葵花, 等. 改进螺旋线型组合销剪力连接件承载力试验研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(02): 43-48.

[37] 孔凡磊, 黄平明, 陆由付, 等. PBL 和 PZ 组合销剪力连接件承载力试验研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(01): 79-86.

[38] Markus Feldmann, Maik Kopp, Daniel Pak. Composite dowels as shear connectors for composite beams - background to the German technical approval [J]. Steel Construction, 2016, 9(2): 80 - 88.

[39] Maik Kopp, Kevin Wolters, Martin Classen, et al. Composite dowels as shear connectors for composite beams-Background to the design concept for static loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 147(8): 488-503.

[40] Martin Classen, Georgios Christou, Josef Hegger.

Composite dowels in cracked concrete-experimental investigation[J]. Eurosteel, 2017, 9(02): 2329-2338.

[41] Martin Classen, Martin Herbrand, Viviane Adam, et al. Puzzle-shaped rib shear connectors subjected to combined shear and tension [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 145: 232-243.

[42] Martin Classen, Josef Hegger. Anchorage of composite dowels[J]. Steel Construction, 2016, 9: 138-150.

[43] 孔凡磊, 黄平明, 陆由付, 等. 钢-UHPC(CA)组合结构中 PBL 连接件抗剪性能试验[J]. 中国公路学报, 2025, 38(12): 349-360.

[44] 阳霞, 何俊杰, 户东阳, 等. 波形钢-UHPC 组合桥面板中栓钉-PBL 连接件抗剪性能数值模拟研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(02): 697-708.

[45] Qian Zhao, Guoyan Zhang, Shengwei Liao, et al. Static behavior of small-rib-height perfobond connectors embedded in UHPC: Experimental and analytical studies[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 85(15): 108750.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题（指对项目成果水平起决定作用的技术难点，或研究中能形成较强竞争力，具有自主知识产权的创新技术）

（1）钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件传力机制

基于推出试验和数值模拟，建立有效的理论模型，明确弹性阶段、

塑性阶段、破坏阶段剪力连接件受力状态，绘制受力示意图，揭示重载交通钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件的传力机制，明确从“混凝土破坏控制”向“钢材破坏控制”转变的临界条件。这是本项目拟解决的第一个技术关键问题。

（2）钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件计算方法

剪力连接件计算公式与钢-混组合结构的构造形式、剪力连接件形式、约束状态、混凝土材料有关，而准确的计算方法是剪力连接件设计需解决的首要关键问题。本项目拟针对重载交通钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件，在“重载疲劳+冻融循环+氯盐腐蚀”多场耦合作用下，建立考虑 UHPC 被动约束增强与重载高频加载耦合影响的精细化损伤模型模型，并通过多场耦合试验方案，揭示环境因素对组合销疲劳寿命的折减系数，提出计算公式，进而为钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件的设计和应用提供理论依据。这是本项目拟解决的第二个技术关键问题。

2. 主要研究内容及实施方案（根据研究目的和考核目标合理地分解确定研究专题，突出重点，各专题研究内容要具体，避免交叉重复）

（1）钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件静力性能

剪力连接件破坏模式与剪力连接件型式、混凝土材料、贯穿钢筋、试件构造、环境因素等相关，针对钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件，设计模型试件并增加栓钉连接件试件和 PBL 连接件试件作为对照组，进行推出试验研究，基于加载过程中裂缝分布及发展、破坏后

的试件外部和内部形态、荷载-滑移曲线类型，明确组合销剪力连接件的破坏模式，通过改变单一变量对抗剪承载力的影响程度，开展参数敏感性分析，基于试验和精细化有限元模型，对组合销剪力连接件承载机理进行理论分析。在参数敏感性分析中，着重研究高应力幅值下（模拟重载），UHPC 强度等级、环境因素、钢纤维掺量、钢销几何尺寸（尤其是根部曲率半径）对抗剪承载力的耦合影响。基于精细化有限元模型，构建 UHPC 与钢销界面-粘结-滑移本构关系，引入精细化模型模拟钢-混界面损伤，对比分析普通混凝土与 UHPC 中钢销前端“混凝土楔”的应力等值线分布差异，从细观力学角度阐明 UHPC 纤维桥接作用对推迟混凝土开裂、但加剧钢销应力集中的双重效应，并根据以上研究结果，对组合销剪力连接件节点进行优化设计。

（2）钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件疲劳损伤

基于车辆荷载系统，对神木市 337 国道锦界工业园区过境公路工程项目车辆信息进行统计，明确重载交通（轴载、车辆密度），区别于普通公路，重点捕捉煤运、化工产品运输车辆的超载、大轴重、多轴组特征，结合 WIM（动态称重）系统数据，构建能够反映重载交通“高应力幅、低周疲劳”特征的疲劳荷载谱，分析疲劳荷载下组合销剪力连接件失效机理、刚度退化和残余滑移，尤其是钢混组合结构节点疲劳和失效机理，建立抗剪刚度计算模型。

（3）钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件理论计算方法

以推出试验和有限元模型分析结构为基础，考虑钢销间距，椭圆孔作用、贯穿钢筋等影响因素，研究适用于钢-UHPC 组合桥梁的组合

销剪力连接件承载力计算公式。以混凝土和钢板相对滑移 0.2 mm 对应的割线刚度作为剪力连接件的初期刚度，以承载力设计值 PR_d 对应的割线刚度作为使用阶段的特征刚度，引入弹性地基梁理论和构造函数，研究初期刚度和特征刚度的计算方法。以极限承载力为基准，对试验和有限元模型得到的荷载-滑移曲线进行无量纲处理，根据无量纲荷载-滑移曲线的特征，通过构造函数，采用最小二乘法回归分析，研究组合销剪力连接件的荷载-滑移全曲线计算方法，基于非线性疲劳累积损伤理论，在考虑混凝土及贯穿钢筋强度退化的基础上，提出疲劳加载下组合销剪力键的剩余承载力计算公式，并建立包含试验数据验证、文献数据验证及数值模拟扩展验证的公式适用性评价体系，确保计算公式的准确性、可靠性和普适性。

3. 技术路线（包括研究技术方案和工作流程两部分。研究技术方案：应清楚表达拟运用的理论和方法，如调查研究，要表述调查的对象、范围、数量和调查材料（数据），取得的方法及手段；室内外试验，要拟定出试验的种类、规模、数量及相应的方案；理论研究与分析，要提出分析依据的理论和拟采用的分析方法，明确有否创新或改进的内容，要做到思路清晰，技术可行，能全面包括研究全过程的各个环节；研究工作流程反映各项研究工作之间的顺序和相互关系，可用树状框图表达）

本项目涉及波形钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件的力学性能和计算方法，通过模型试验、数值模拟和理论分析相结合的手段展开研究，项目的总体研究思路和技术路线如图 1 所示。

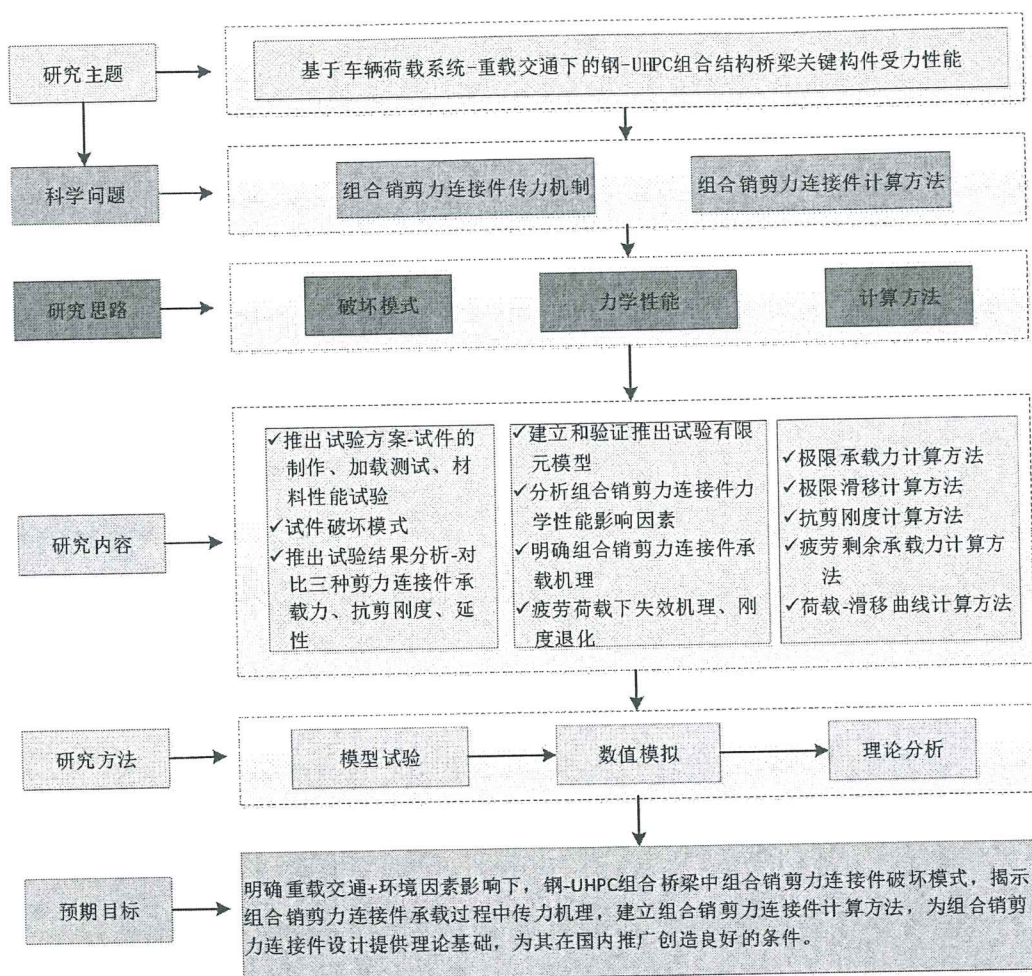


图 1 项目总体研究思路和技术路线

理论研究分析:

①波形钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件破坏模式

本项目拟通过室内模型试验研究组合销剪力连接件的破坏模式, 同时为数值模拟和理论分析奠定基础, 模型试验如图 2 所示。

数值模拟结果相结合，为计算方法理论分析奠定基础。同时增加环境因素对照组，试验分组设计：设计对照组试件，分别经历不同次数（如 0 次、50 次、100 次、200 次）的冻融循环（ $-20^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 水冻水融）与干湿交替氯盐浸泡（3.5% NaCl 溶液，模拟除冰盐环境）复合作用。具体制度为：每 24 小时为一个循环，包括 16 小时浸泡（ -20°C 冷冻 4 小时， $+20^{\circ}\text{C}$ 水融 4 小时，交替进行），将经历上述环境预损伤的试件，按照标准推出试验规程进行静力加载。对比分析环境作用后，试件的破坏模式（是否从钢材延性破坏转向脆性破坏）、极限承载力、抗剪刚度及极限滑移量的变化规律，并根据以上研究结果，对组合销剪力连接件节点进行优化设计。

②波形钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件力学性能和承载机理

本项目拟通过数值模拟结合模型试验研究组合销剪力连接件力学性能和承载机理。

1) 力学性能分析

基于推出试验，采用改变单一变量并增加栓钉连接件试件和 PBL 连接件试件作为对照组，研究 UHPC 材料强度、钢纤维掺量、组合销尺寸、贯穿钢筋、椭圆孔、销座高度、钢板厚度、钢板强度、环境因素等对抗剪承载力的影响程度，并对该结果进行理论分析，开展参数敏感性分析，明确主导力学性能的控制因素。根据参数敏感性分析结果及建立的典型组合销剪力连接件精细化有限元模型，进行承载力全过程分析，明确弹性阶段、塑性阶段、破坏阶段剪力连接件受力性能，分别分析各个阶段 PZ 型和 MCL 型组合销剪力连接件的钢销、贯穿钢

筋和混凝土销的应力、应变。基于推出试验和有限元模型分析结果，为组合销剪力连接件承载机理进行理论分析奠定基础。

2) 承载机理

基于推出试验结果和数值模拟结果，分析 PZ 型和 MCL 型组合销剪力连接件中混凝土销、椭圆孔中混凝土榫、贯穿钢筋等主要传力构件的传力顺序，分别绘制弹性阶段、塑性阶段、破坏阶段的受力模型（图 5），通过研究传力过程中各构件的受力模式和发挥的作用来揭示波形钢-UHPC 组合桥梁中的 PZ 型和 MCL 型组合销剪力连接件的传力机制。

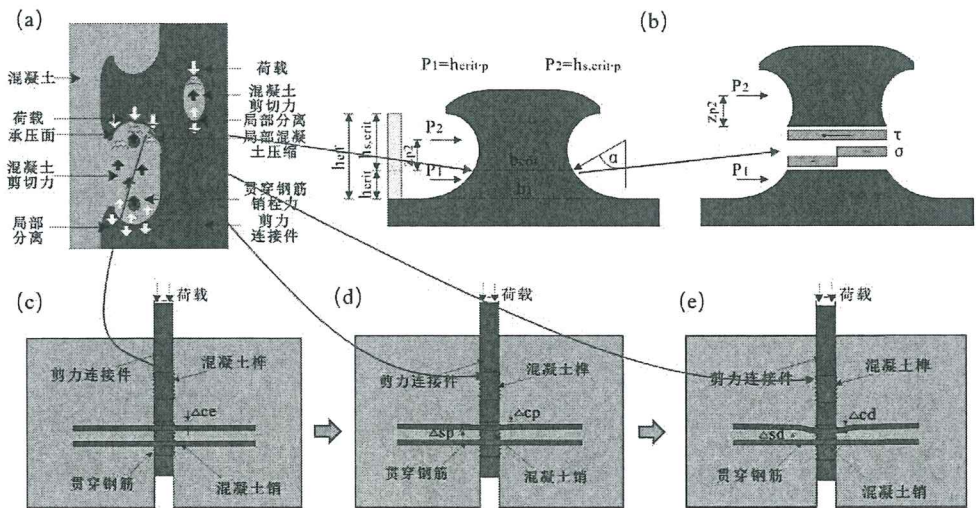


图 3 承载机理示意. (a) 传力示意. (b) 钢失效破坏. (c) 弹性阶段. (d) 塑性阶段. (e) 破坏阶段.

③ 波形钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件计算方法

钢与混凝土的组合作用可以通过剪力连接件的力学性能指标评价，剪力连接件的主要力学性能指标包括承载力、抗剪刚度和变形能力，涉及的计算包括抗剪承载力计算、抗剪刚度计算（初期刚度和特征刚度）、荷载-滑移曲线计算。

组合销抗剪承载力计算拟以研究内容一和研究内容二的结果为

基础,对已有的抗剪承载力计算公式进行修正,从而得到适用于波形钢-UHPC 组合桥梁的 PZ 型和 MCL 型组合销剪力连接件抗剪承载力计算公式。初期抗剪刚度和特征刚度引入弹性地基梁理论(图 6)和构造函数,采用最小二乘法回归分析,对试验和数值模拟结果进行拟合,分别提出各自的计算方法。对研究内容一和研究内容二得到的荷载-滑移曲线进行无量纲处理,根据无量纲荷载-滑移曲线的特征,通过构造函数,采用最小二乘法回归分析得到 PZ 型和 MCL 型组合销剪力连接件的荷载-滑移全曲线计算方法,并建立包含试验数据验证、文献数据验证及数值模拟扩展验证的公式适用性评价体系,确保计算公式的准确性、可靠性和普适性。

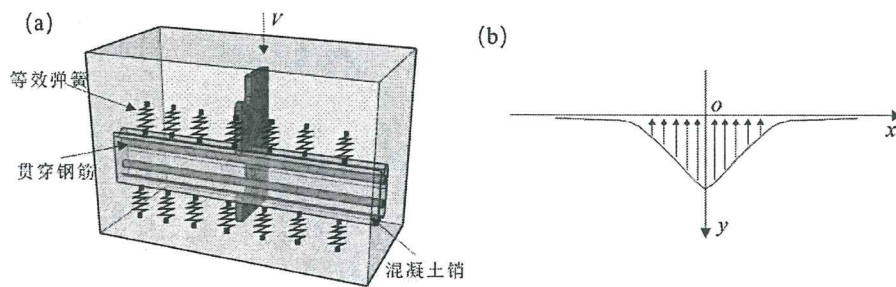


图 4 简化计算模型。(a) 理论模型。(b) 组合截面变形曲线。

④重载交通下钢-UHPC 组合桥梁中组合销剪力连接件疲劳损伤

本项目在前期静力性能研究的基础上,进一步围绕重载交通+环境因素条件下组合销剪力连接件的疲劳损伤演化规律开展系统研究:

疲劳荷载谱的构建,依托神木市 337 国道锦界工业园区过境公路工程,开展重载交通车辆荷载调查与统计分析,三个维度对“重载交通”进行科学界定:①基于实测轴载谱的界定,通过在该路段布设动态称重(WIM)系统,连续采集不少于 7 天的实时交通流数据。对获取的海量数据进行清洗与统计分析,提取煤运、化工产品运输等典型

重载车辆的实际轴重分布谱。重点关注超载现象，统计出现频次最高的超载区间（例如，轴载 140kN~180kN、180kN~220kN 及 220kN 以上），将统计得到的具有代表性的特征轴重值作为后续疲劳试验应力幅的加载依据；②基于交通量与荷载密度的界定：定义重载交通密度指标，包括：重载货车日交通量（辆/日/方向）及重载车辆比例（占总交通量的百分比）。根据锦界工业园区的物流特点，界定本项目的研究场景为“高频重载”，即重载货车日交通量 ≥ 3000 辆/日/方向，且重车比例 $\geq 30\%$ ，以区别于一般公路的随机、低频重载；③基于荷载谱特征的界定：于 WIM 系统获取的轴距谱，识别多轴组（如五轴、六轴）车辆的典型轴组布局。利用雨流计数法对实测的应力-时间历程进行处理，得到包含不同应力幅及其对应循环次数的多级应力幅谱。同时，考虑该路段普遍存在的超载系数（1.2~1.5），对荷载谱进行修正，最终构建一套能够真实反映“多场耦合材料每次循环都产生较大的塑性变形。该疲劳试验荷载谱确保试验结果能真实映射实际重载交通对连接件的损伤累积过程。获取典型车辆类型、轴重、轴距、交通流量等数据，结合现行桥梁设计规范，构建适用于钢-UHPC 组合桥梁的疲劳荷载谱，为疲劳试验加载提供依据。

基于动态承重系统，在神木市 337 国道的某个断面上，埋设了石英式动态称重传感器。假设连续监测了 7 天，记录了每一辆通行车辆的详细信息，进行车型分类统计，对轴重分布分析，转化为应力时程曲线，进行雨流计数法提取循环，外推至目标寿命周期，最后等效为恒幅荷载谱（用于试验）。

疲劳试验设计，基于静力推出试验结果，设计组合销剪力连接件疲劳推出试验方案。考虑不同应力幅、加载频率、环境因素、荷载比等参数，开展多组疲劳加载试验，观测疲劳裂纹萌生与扩展过程，记录滑移演化、刚度退化及残余滑移等关键指标。

疲劳损伤机理分析，结合试验现象与断口分析，揭示组合销剪力连接件在反复荷载作用下的疲劳损伤演化机制。重点分析钢销根部应力集中区、贯穿钢筋与 UHPC 界面、混凝土销区域等关键部位的疲劳失效模式。

精细化数值模拟，基于 ABAQUS 等有限元平台，建立考虑材料非线性、接触行为及疲劳累积损伤的精细化数值模型。引入混凝土疲劳本构模型和钢材疲劳损伤演化模型，模拟疲劳加载全过程，验证并拓展试验结果。

刚度退化与剩余承载力模型建立，基于试验与数值模拟结果，建立组合销剪力连接件在疲劳荷载作用下的刚度退化模型，提出考虑疲劳累积损伤的剩余承载力计算方法。结合非线性累积损伤理论，提出适用于重载交通条件下的疲劳寿命预测公式。

4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接（项目研究的成果提出的技术或理论可供实际对象应用的推测，在一定程度上反映成果的成熟性和市场需求情况）

（1）技术改造计划衔接

①既有桥梁加固与改造：应用于榆林、神木等重载交通频繁区域的既有钢-混凝土组合桥梁，用项目研发的新型组合销剪力连接件(PZ

型/MCL 型), 替换传统栓钉或 PBL 连接件, 提升桥面板与主梁的连接性能, 增强抗疲劳与承载能力, 结合项目提出的承载力、刚度及疲劳寿命计算公式, 进行连接件选型与布置优化, 制定施工工艺指南。

②新建桥梁设计与施工工艺优化: 应用于新建钢-UHPC 组合结构桥梁, 特别是在重载交通路段(如能源运输通道、工业园区联络线), 将项目研究成果纳入桥梁设计规范或企业标准, 推广使用组合销剪力连接件, 提升施工效率与结构耐久性, 设计单位合作, 编制《钢-UHPC 组合桥梁组合销剪力连接件设计与施工技术指南》。

③桥梁健康监测与评估系统升级: 应用于已采用组合销连接件的桥梁, 基于项目提出的疲劳损伤模型与剩余承载力计算方法, 开发配套的监测系统, 实现连接件状态实时评估与预警, 研发基于物联网的智能监测装置与数据分析平台。该系统方案包括:

感知层: 在关键连接件部位预埋光纤光栅(FBG)应变传感器(监测钢销根部应力集中区)和高精度位移传感器(监测钢-UHPC 相对滑移), 并集成温湿度传感器用于环境修正。传感器采用耐久性封装工艺, 满足重载与恶劣环境下的长期服役要求。

采集与传输层: 部署动态采集仪(采样频率不低于 100 Hz)和边缘计算单元, 对原始数据进行滤波、特征提取(如实时刚度、残余滑移), 并通过 4G/5G 网络将特征数据上传至云端服务器。

数据处理与评估层: 基于本项目建立的物理-数据融合模型——以理论公式(承载力、疲劳寿命)为物理约束, 利用实时监测数据(刚度退化、滑移累积)通过贝叶斯更新方法对模型参数进行在线修正,

实现连接件当前损伤程度和剩余寿命的动态评估。

用户交互与预警层：开发 B/S 架构的监测平台，实时显示损伤指标（相对刚度比、滑移比），并设定三级预警阈值（黄/橙/红）。当评估指标超过阈值时，系统自动发出预警信息，为养护决策提供科学依据。

（2）基本建设计划衔接

①示范工程建设项目：神木市 337 国道锦界工业园区过境公路工程中的桥梁作为示范段，全线推广使用钢-UHPC 组合桥梁与组合销剪力连接件，进行全寿命周期性能跟踪，提升桥梁在重载交通下的安全性与耐久性，形成可复制的建设模式。

②省级乃至行业标准编制计划：由陕西交通职业技术学院、山东交通学院联合陕西省交通规划设计院、省交通运输厅，依据项目试验数据与理论成果，编制《陕西省钢-UHPC 组合结构桥梁技术标准》或《组合销剪力连接件应用技术规范》，推动新材料、新结构在陕西省及全国范围内的规范化应用。

5. 有关技术经济指标（叙述项目取得的成果中研究开发的技术、产品具体的技术经济指标（如适用条件、单位耗材、单位造价等）以及性能指标（如技术参数、精度等）。定性描述与定量相结合，以定量为主）

组合销剪力连接件为新型的剪力连接件结构，由于该类型的剪力连接件抗剪刚度大和半开口的结构形式，克服了传统的栓钉剪力连接件疲劳问题严重和开孔板剪力连接件贯穿钢筋困难、影响施工进度的

问题。本项目以神木市 337 国道锦界工业园区过境公路工程项目为背景，重点解决传统剪力连接件施工过程中的施工困难问题和重载交通下的疲劳损伤问题，从而提高施工速度和确保桥梁质量，确保钢混组合结构可靠的连接，重载交通下的桥梁安全运维，进而取得良好的经济效益和社会效益。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

陕西交通职业技术学院拥有国家级生产性实训基地 3 个，校企协同技术创新中心 1 个，中央财政支持建设实训基地 3 个，省级实训基地 5 个，省级校外实践教学基地 5 个，国家级职业教育示范性虚拟仿真实训基地培育项目 1 个，虚拟仿真实训中心 5 个，实验实训室 149 个，校外实训基地 589 个，大学生创新创业教育中心 1 个。近五年，教职工主持和参与各类科研项目 269 项，其中主持和参与国家级、省部级项目 96 项，主持和参与厅局级课题 83 项、横向课题 31 项，校级课题 59 项。主持和参与各类教研教改项目 271 项，其中主持和参与省部级项目 26 项，校级教研教改项目 76 项，课程思政专项课题 76 项，各类学会课题 93 项。主持国家级专业教学资源库 1 个，参与建设国家级专业教学资源库 5 个，有国家和省级精品课程 32 门，国家规划教材 2 部，省级规划教材 13 部。近五年，获国家教学成果奖 2 项，陕西省教学成果特等奖 1 项、一等奖 3 项、二等奖 2 项。教师在国家教学竞赛等活动中获特等奖 2 项、一等奖 3 项、二等奖 4 项、三等奖 1 项，在省级教学竞赛等活动中获一等

奖 9 项、二等奖 11 项、三等奖 21 项。

山东交通学院是一所以培养综合交通人才为办学特色的全日制普通本科高校，是山东省高等教育应用型人才培养特色名校立项建设单位，山东省与交通运输部共建高校。学校拥有市厅级及以上科研平台 56 个，近五年，主持纵向课题约 700 项，纵横向科研经费累计 6.7 亿余元。出版专著 180 余部，发表 SCI、SSCI、CSSCI 等收录论文及中文核心期刊论文 1200 余篇；获授权专利 2000 余项。获国家科学技术奖、山东省科学技术奖、山东省社会科学优秀成果奖等省部级及以上科研奖励 20 余项，其中“黄河中下游地区粉土路基建造支撑技术及工程应用”获得国家科学技术进步奖二等奖、山东省科学技术进步奖一等奖，“高效智能全环境模拟道路加速加载实验系统研发”获得山东省技术发明奖一等奖，“改扩建高速公路路基差异沉降智能感知、预警与精细化控制及应用”获得山东省科学技术进步奖一等奖。

恒万达设计咨询有限公司是一家集城乡规划、综合交通运输规划、工程咨询、勘察设计、招标代理、监理、造价咨询、施工于一体的土木工程全过程咨询建设企业。公司近年来完成工程可行性研究 6500 余公里，不同等级公路勘察设计项目 4500 余公里，市政道路设计 1500 余公里，大中桥梁设计 300 余座；先后承担 200 亿/500 多个项目的招标代理工作，100 余个项目的监理工作，并荣获全国公路交通安全设施精细化提升设计竞赛决赛特等奖、“陕西省高新技术企业证书”、交通运输部公路设计企业信用评价“AA”级、陕西省公路设计企业信用评价“AA”级和国家税务总局陕西省税务局“A 级纳税

人”。

陕西靖龙路桥建设有限公司于2005年在神木县工商行政管理局登记成立，公司经营范围包括路桥工程、市政工程、水利工程等，在项目施工过程中始终秉持精益求精的态度，勇于创新，为项目的落地提供了有力的支撑。

陕西永卓建设有限公司位于榆林市靖边县张畔镇人民路北侧，公司经营范围包括房屋建筑工程施工总承包、市政公用工程施工总承包、水利水电工程和公路工程等施工，为该项目的落地提供了助力。

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
白蓉蓉	陕西交通职业技术学院	女	38	副教授	桥梁工程	项目负责人
孔凡磊	山东交通学院	男	38	副教授	桥梁工程	技术负责人
王占锋	陕西交通职业技术学院	男	43	副教授	结构工程	技术指导、理论分析
郭红兵	陕西交通职业技术学院	男	49	教授	道路工程	技术指导、理论分析
李明哲	山东交通学院	男	32	副教授	桥梁工程	制定及实施试验方案
黄娟	陕西交通职业技术学院	女	43	副教授	交通土建	项目驻场组织协调
郭雪莲	山东交通学院	女	29	讲师	桥梁工程	理论分析、数值模拟

张松雷	陕西交通职业技术学院	男	40	副教授	道桥工程	制定及实施试验方案
段瑞芳	陕西交通职业技术学院	女	45	副教授	桥梁工程	试验数据汇总整理
李凡	陕西交通职业技术学院	女	34	讲师	道桥工程	试验数据汇总整理
周子豪	陕西交通职业技术学院	男	32	讲师	岩土工程	数值仿真
李宁博	陕西交通职业技术学院	男	32	讲师	交通运输工程	研究报告编写
郭锐	恒万达设计咨询有限公司	男	43	高级工程师	桥梁工程	项目落地过程中施工协调
温小伟	陕西靖龙路桥建设有限公司	男	39	高级工程师	桥梁工程	项目落地过程中施工协调
侯万新	陕西永卓建设有限公司	男	38	工程师	建筑与土木工程	项目落地过程中施工协调

3. 各自承担的主要工作

陕西交通职业技术学院

(1) 负责项目的整体规划、组织实施、进度控制与成果集成，具体为：项目申报、协调与管理；试验方案设计与实施；理论研究与公式推导；研究报告撰写与结题组织。

(2) 开展室内模型试验、数据处理与初步理论分析，具体为：推出试验与疲劳试验；试验数据采集与处理；参数敏感性分析；初步承载机理研究。

(3) 开展理论建模、计算方法研究与公式推导，具体为：弹性

地基梁理论应用；荷载-滑移曲线拟合；刚度计算模型建立。

山东交通学院

（1）提供高水平理论分析、精细化建模与破坏机理研究，具体为精细化有限元模型建立与验证；破坏模式理论分析；传力机制图解与机理揭示；承载力公式理论推导。

（2）加强理论深度，提升学术影响力，推动跨省合作，具体为：高水平论文撰写与发表；理论模型创新与方法提升；联合申报更高层次项目。

恒万达设计咨询有限公司

将研究成果转化为实际工程设计参数与施工方案，具体为：提供工程背景与设计需求；协调施工现场与试验条件；参与设计指南与技术标准起草；工程可行性评估与经济性分析。

陕西靖龙路桥建设有限公司、陕西永卓建设有限公司

提供施工现场协调、材料供应、工艺试验支持，具体为：现场试验条件保障；施工工艺试验与反馈；实际工程数据采集与监测配合；示范工程实施支持。

4. 项目主要负责人情况

拟派项目负责人简历表

姓 名	白蓉蓉	性别	女	年龄	38
职 称	副教授	学历	硕士	毕业时间	2011.07
毕业院校	长安大学		所学专业	建筑与土木工程	
专业工作年限	13		从事项目经理年限	6	

注册执业资格	高级工程师	
担任的职务及责任	项目负责人	
主要工作经历及业绩:		
参加过的类似项目名称	担任职务	联系电话
高职道路养护与管理专业实训模块化设计与实践研究 (SGH16V030)	项目负责人	17782626531
路基路面养护技术精品资源共享课建设研究 (YJ1711)	项目参与人	18066820863
道路工程制图及CAD课程优质资源开发建设研究 (YJ1704)	项目参与人	13299103607
“沥青延度试验”信息化课堂教学竞赛三等奖	项目参与人	13909222191
工程机械课程优质资源库开发研究 (YJ1701)	项目参与人	13609160528
高职<<交通工程及安全设施>>课程项目化教学改革研究 (SGH140924)	项目参与人	18066820863
基于桥梁结构应变监测的双锥形聚合光纤传感机理及性能优化研究 (二等奖)	项目参与人	13679277312

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

1. 依托工程（工作）概况

榆林神木市是中国第一产煤大市、中国最大的兰炭基地、中国最大的聚氯乙烯基地、西部最大的火电基地、西部最大的浮法玻璃基地、电石基地，在中国国家能源安全体系中占有重要位置。337 国道锦界工业园区过境公路位于神木市具有陕西省第二大经济开发区锦界工业园区的锦界镇内，该项目采用双向四车道一级公路标准，设计速度

80 公里/小时，路基宽度 24.5 米，桥涵汽车荷载等级公路-I 级。

项目的建设对完善神木市乃至榆林市的国省干线路网，增加区域交通路网密度具有重要的意义。项目中 K2+726.5 上跨高速大桥、K6+730.0 枣稍沟大桥等多座桥梁均为钢混组合结构桥梁，钢混组合桥梁主梁为工字钢结构，间距 4m，钢主梁梁高为 2550mm，混凝土桥面板厚度为 250mm，钢主梁顶面通过剪力连接件与钢筋混凝土桥面板形成组合结构。

2. 投资来源

337 国道锦界工业园区过境公路项目的投资资金完全来源于神木市本级财政，属于 100%的国有资金项目。

3. 工程进度与项目科研进度的配合

(1) 设计阶段：提供理论支撑，研团队在工程设计初期介入，于理论研究，为连接件的选型、布置间距、构造细节提供优化建议，设计单位（如恒万达）采纳建议，优化施工图，实现“设计即优化”。

(2) 施工阶段：现场验证，实时反馈，在构件加工、桥面板安装等关键工序进行时，在工厂或现场制作足尺或大比例试验件，进行静载试验，验证设计承载力，形成《组合销剪力连接件施工技术要点》，指导靖龙路桥的工人操作，在混凝土浇筑前，将传感器预埋在关键连接件处，建立长期监测的“初始状态”。

(3) 运营初期：持续监测，完成闭环，桥梁通车后，进入重载交通考验期，分析实时监测数据，验证疲劳损伤模型，评估长期性能，最终形成设计指南、标准图集或地方标准草案。研究成果直接服务于

该桥的科学养护决策，并为后续同类桥梁建设提供标准化依据。

4. 组织管理形式

（1）定期会议制度：月度例会：各专题组汇报进展，解决一般性问题。季度/关键节点评审会：领导小组出席，对重大技术方案、阶段成果、预算调整进行评审决策。现场专题会：针对施工中突发的技术问题，由施工组临时召集，科研人员现场提供解决方案。

（2）动态信息共享平台：建立共享云盘或项目管理平台，实时上传设计变更、试验数据、施工日志、监测数据，确保所有单位信息同步。

（3）知识产权与成果管理：在协议中明确约定论文、专利、技术标准的署名权和归属权，通常遵循“谁主导、谁贡献、谁享有”的原则，并由领导小组最终裁定。

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	9.95	合 计	19.95	9.95	
工程配套研究经费	10.0	1. 设备费	0	0	
单位自筹	0	（1）购置设备费	0	0	
其他经费	0	（2）设备改造与租赁费	0	0	
		2. 业务费	17.95	8.95	
		（1）材料费	5.95	2.95	
		（2）测试化验实验加工费	4.0	2.0	
		（3）燃料动力费	0	0	
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	1.6	0.8	
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	6.4	3.2	
		（6）其他费用	0	0	
		3. 劳务费	2.0	1.0	
		（1）专家咨询费	2.0	1.0	
		（2）聘用人员劳务费	0	0	
		（3）其他劳务费	0	0	
		（二）间接费用	0	0	
		4. 管理费	0	0	
		5. 绩效支出	0	0	

七、项目绩效指标

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

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

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

1. 项目预期目标（项目的考核目标）

本项目成果以论文、专利和研究报告的形式提供。

2. 提交的研究成果及其形式

（1）高水平论文 2 篇；

（2）发明专利 2 项；

（3）研究报告 1 份

3. 经济、社会、环境效益分析

组合销剪力连接件由于其抗剪刚度大和半开口的结构形式，克服了传统的栓钉剪力连接件疲劳问题严重和开孔板剪力连接件贯穿钢筋困难、影响施工进度的问题。本项目以神木市 337 国道锦界工业园区过境公路工程项目为背景，重点解决传统剪力连接件施工过程中的施工困难问题和重载交通下的疲劳损伤问题，从而提高施工速度和确保桥梁质量，确保钢混组合结构可靠的连接，重载交通下的桥梁安全运维，进而取得良好的经济和社会效益。

九、其它需要说明的问题

无

十、申请单位意见

依托工程、配套经费等已经落实。

（公章）

单位负责人：（签字）

年 月 日

基于车辆荷载系统-重载交通下的钢-UHPC 组合结构桥梁关键构件 大纲评审意见

2026年3月12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“基于车辆荷载系统-重载交通下的钢-UHPC组合结构桥梁关键构件受力性能研究”（项目编号：25-89K）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，与研究内容的逻辑框架契合。

与会专家基本同意该项目研究大纲通过评审。

建议：落实配套经费。

主任委员：王松林

2026年03月12日

专家审查意见表

项目名称	25-89K 基于车辆荷载系统--重载交通下钢—UHPC 组合结构桥梁关键构件受力性能研究				
专家姓名	王登科	职务/职称	正高级工程师	专 业	桥梁与隧道
专家单位	陕西省铁路集团公司			联系电话	13709260508

评 审 意 见

本项目研究必要，前期研究成果和研究支撑条件满足研究，实施方案及技术路线可行，依托工程落实，预期目标成果明确，项目研究大纲编制内容齐全。

建议：

1、研究聚焦组合构件销剪连接件的节点受力和模型验证，提出节点构造优化。

2、研究重载交通下钢混组合结构节点疲劳和失效机理。

评审专家（签字）：王登科

2026 年 3 月 12 日

（本意见入档，填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	基于车辆荷载系统-重载交通下的钢-UHPC组合结构桥梁关键构件				
专家姓名	中磊	职务/职称	正高	专业	桥梁工程
专家单位	中交一院			联系电话	13991801018

评审意见

1. 建议细化钢UHPC组合结构对荷载破坏形态的影响。UHPC与钢梁界面关系-滑移率关系。
2. 建议利用市志标重级重载交通实际车辆数据,建立双轴超载、大轴重、多轴组轴重之荷载荷载谱,明确高轴重、低轴重与常规荷载之区别,为钢UHPC组合结构设计提供依据,并考虑环境因素、冻融、氯盐腐蚀与重载组合下之使用寿命研究。
3. 补充多轴组轴重之试验方案。
4. 对提出的承载力、刚度、荷载-滑移曲线计算模型之适用性应进行验证。
5. 补充研究范围与评价范围的样本数量。
6. 其他研究团队成员

评审专家(签字):

中磊

2026 年 3 月 12 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	基于车辆荷载系统-重载交通下的钢-UHPC 组合结构桥梁关键构件受力性能研究				
专家姓名	柴唐焰	职务/职称	正高	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	13991256879

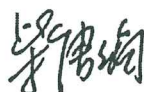
评 审 意 见

一、本项目的研究，克服了传统剪力连接件的疲劳问题和施工困难问题，保证了钢混组合结构连结的可靠性，提高了施工速度、桥梁的安全质量和重载交通下的桥梁安全运维，选题明确，研究内容针对性强，实现目标清晰，具有较好的社会、经济和工程应用价值，研究意义较高。

同意研究大纲。

二、建议

1. 建议补充重载交通条件的界定。
2. 文中提到“重载疲劳+冻融循环+氯盐腐蚀多场耦合作用下”，本项目依托工程场址在神木市，该地区是否存在氯盐腐蚀，建议核实。
3. 本项目研究基于 UHPC 超高性能混凝土下的组合销剪力连接件，对于目前常用的传统剪力连接件在 UHPC 超高性能混凝土下的应用情况的说明和对比偏少，建议补充完善。

评审专家（签字）：

2016年3月12日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	25-89K 基于车辆荷载系统-重载交通下的钢-UHPC 组合结构桥梁关键构件受力性能研究				
专家姓名	王玉银	职务/职称	党委书记 教授	专 业	结构工程
专家单位	哈尔滨工业大学土木工程学院			联系电话	13766831066

评 审 意 见

1、项目名称为“钢-UHPC 组合结构桥梁关键构件受力性能研究”，而研究大纲中“本项目重点研究 钢-UHPC 组合桥面板中组合销剪力连接件的力学行为”，三部分研究内容也都是围绕“连接件”进行的。应明确研究内容，至少要包含“钢-UHPC 组合结构梁”的力学性能。

2、“本项目以神木市 337 国道锦界工业园区过境公路工程项目为背景，重点解决传统剪力连接件施工过程中的施工困难问题和重载交通下的疲劳损伤问题，从而提高施工速度和确保桥梁质量，确保钢混组合结构可靠的连接，重载交通下的桥梁安全运维。。。”，“项目中 K2+726.5 上跨高速大桥、K6+730.0 枣稍沟大桥等多座桥梁均为钢混组合结构桥梁”。请明确这些组合结构桥梁是要采取钢-UHPC 组合梁吗？该项目的研究成果如何应用与上述依托项目中？

评审专家（签字）：王玉银

2026 年 3 月 12 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	基于车辆荷载系统-重载交通下的钢-UHPC 组合结构桥梁关键构件受力性能研究				
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

本项目针对重载交通及环境因素作用下，传统剪力连接件在钢-混组合结构中存在的易疲劳破坏、施工贯穿钢筋困难等问题，开展超高性能混凝土（UHPC）与钢结构新型组合销剪力连接件的静力性能、重载疲劳损伤机理、理论计算方法研究，揭示重载交通下钢-UHPC 组合桥面板连接构件的受力过程与刚度退化规律，完善新型剪力连接件的设计理论体系，具有重要的科学研究意义和工程价值。项目技术路线可行，实施方案明确，建议项目组根据以下意见和建议，对研究大纲做进一步的修改和完善。

1. 研究内容（2）“钢-UHPC 组合桥面板中组合销剪力连接件疲劳损伤”提到了依托 WIM 获取实测全桥车辆轮轴数据以构建重载疲劳荷载谱，并基于此开展室内试验研究，建议补充全桥至局部构件的荷载转化路径，确保室内试验加载边界条件的真实性与可靠性。

2. 研究内容（3）“钢-UHPC 组合桥面板中组合销剪力连接件理论计算方法”中采用 Miner 线性疲劳累积损伤理论建立剩余承载力公式，而 UHPC 内部产生微裂缝、钢纤维拔出以及钢销局部屈服具有非线性特征，建议结合数值模拟与试验结果，采用非线性疲劳累积损伤理论，确保理论方法的适用性与项目的可行性。

3. 项目停留在“揭示机理、提出计算公式与理论依据”的理论研究层面，对成果的工程转化路径表述宽泛，建议增设成果转化与应用示范内容，将研究形成的理论成果转化为工程实用技术，指导实际工程应用。

评审专家（签字）： 惠迎新

2026 年 3 月 12 日
(本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸)

基于车辆荷载系统-重载交通下的钢-UHPC 组合结构桥梁关键构件 (项目编号: 25-89K)

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	王登科	陕西省铁路集团 有限公司	路桥工程	路桥工程	正高工	王登科
2	委员	牛 宏	中交第一公路勘察 设计院有限公司	桥梁工程	桥梁工程	正高工	牛宏
3	委员	柴唐焰	中铁第一勘察设计院	桥梁工程	桥梁工程	正高工	柴唐焰
4	委员	王玉银	哈尔滨工业大学	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：基于车辆荷载系统-重载交通下的钢-UHPC 组合结构桥梁关键构件受力性能研究（项目编号：25-89K）

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	惠迎新	1. 研究内容（2）“钢-UHPC 组合桥面板中组合销剪力连接件疲劳损伤”提到了依托 WIM 获取实测全桥车辆轮轴数据以构建重载疲劳荷载谱，并基于此开展室内试验研究，建议补充全桥至局部构件的荷载转化路径，确保室内试验加载边界条件的真实性与可靠性。 2. 研究内容（3）“钢-UHPC 组合桥面板中组合销剪力连接件理论计算方法”中采用 Miner 线性疲劳累积损伤理论建立剩余承载力公式，而 UHPC 内部产生微裂缝、钢纤维拔出以及钢销局部屈服具有非线性特征，建议结合数值模拟与试验结果，采用非线性疲劳累积损伤理论，确保理论方法的适用性与项目的可行性。 3. 项目停留在“揭示机理、提出计算公式与理论依据”的理论研究层面，对成果的工程转化路径表述宽泛，建议增设成果转化与应用示范内容，将研究形成的理论成果转化为工程实用技术，指导实际工程应用。	回复 1：已在技术路线部分补充荷载转化疲劳荷载谱方法，基于动态称重系统，对车辆进行连续监测了，记录了每一辆通行车辆的详细信息，进行车型分类统计，对轴重分布分析，转化为应力时程曲线，进行雨流计数法提取循环，外推至目标寿命周期，最后等效为恒幅荷载谱（用于试验）。 回复 2：已对大纲中相应部分进行修改，采用非线性疲劳累积损伤理论进行疲劳剩余承载力计算方法研究。 回复 3：已经在后续技术改造或基本建设计划的衔接部分补充了成果转化内容，该研究可用于既有桥梁加固与改造，新建桥梁设计与施工工艺优化。
2	王玉银	1. 项目名称为“钢-UHPC 组合结构桥梁关键构件受力性能研究”，而研究大纲中“本项目重点研究 钢-UHPC 组合桥面板中组合销剪力连接件的力学行为”，三部分研究内容也都是围绕“连接件”进行的。应明确研究内容，至少要包含“钢-UHPC 组合结构梁”的力学性能。	回复 1：本项目主要研究基于车辆荷载系统-重载交通下的钢-UHPC 组合结构桥梁关键构件受力性能，钢混组合结构桥梁中钢结构和混凝土结构通过剪力连接件实现共同受力，其设计是组合结构设计的核心，因此剪力连接件是组合结构桥梁中最为关

		2. “本项目以神木市 337 国道锦界工业园区过境公路工程为背景，重点解决传统剪力连接件施工过程中的施工困难问题和重载交通下的疲劳损伤问题，从而提高施工进度和确保桥梁质量，确保钢混组合结构可靠的连接，重载交通下的桥梁安全运维。。。”，“项目中 K2+726.5 上跨高速大桥、K6+730.0 枣稍沟大桥等多座桥梁均为钢混组合结构桥梁”。请明确这些组合结构桥梁是要采取钢-UHPC 组合梁吗？该项目的研究成果如何应用与上述依托项目中？	键的构件，本项目名称中的组合结构桥梁中关键构件指的是剪力连接件，因此本项目的研究内容均围绕剪力连接件展开，而并没有包含组合结构桥梁，针对组合结构桥梁的研究是下一步的工作计划。 回复 2：依托项目中组合结构桥梁采用的是普通混凝土结构，项目研究成果主要用于依托工程中后期可能出现的桥面板病害或性能退化，本项目研究的钢-UHPC 组合桥面板+组合销连接件可作为高性能加固/替换方案，提升结构耐久性，同时为神木市乃至陕北能源通道后续新建桥梁，提供基于 UHPC 的轻型化、长寿命桥梁结构设计储备。
3	柴唐焰	1. 建议补充重载交通条件的界定。 2. 文中提到“重载疲劳+冻融循环+氯盐腐蚀多场耦合作用下”，本项目依托工程场址在神木市，该地区是否存在氯盐腐蚀，建议核实。 3. 本项目研究基于 UHPC 超高性能混凝土下的组合销剪力连接件，对于目前常用的传统剪力连接件在 UHPC 超高性能混凝土下的应用情况的说明和对比偏少，建议补充完善。	回复 1：已经在大纲中不同了重载交通条件的界定，从三个方面对“重载交通”进行界定，①基于实测轴载谱的界定；②基于交通量与荷载密度的界定；③基于荷载谱特征的界定。 回复 2：已核实，该地区是存在氯盐腐蚀。 回复 3：已经在第二部分前期科研及工作基础中的国内外研究现状中增加了传统剪力连接件（栓钉和 PBL）在 UHPC 超高性能混凝土下的研究概况。
4	牛宏	1. 建议细化钢纤维掺量对混凝土销破坏形态的影响，UHPC 与钢销界面粘结-滑移本构关系。 2. 建议利用动态承重系统对重载交通十级车辆数据剪力反应超载、大轴重、多轴特征的疲劳荷载谱，明确高应力、低周疲劳与常规疲劳的区别，为试验加载制度设计提供依据，并考虑环境因素冻融、氯盐腐蚀与重载耦合下的疲劳寿命折减。 3. 补充多场耦合下的试验方案。	回复 1：已在研究内容中补充了钢销为掺量为混凝土销破坏形态的影响，并根据试验和数值模拟结果，构件 UHPC 与钢销界面粘结-滑移本构关系。 回复 2：高应力幅、低周疲劳”特征的室内疲劳试验加载谱，该疲劳试验加载谱相对于常规疲劳荷载谱具有加载应力高、循环次数少的特点，相对于常规疲劳荷载主要由应力控制（应力疲劳），材料在宏观上基本处于弹性状态，该疲劳试验加载谱主要

		4. 对提出的承载力、刚度、荷载-滑移曲线计算公式的通用性应进行验证。 5. 补充智能化监测与评估的技术方案。 6. 优化研究团队人员。	由应变控制（应变疲劳），已经在技术路线部分对该内容进行补充。 回复 3：已经在静力推出试验和疲劳试验方案中增加了多场耦合部分的内容。 回复 4：对提出的计算方法建立了包含试验数据验证、文献数据验证及数值模拟扩展验证的公式适用性评价体系，确保计算公式的准确性、可靠性和普适性。已经在第二部分研究内容中增加了相关内容。 回复 5：已在后续技术改造或基本建设计划的衔接部分增加了智能化监测与评估的技术方案，该方案包括感知层、采集与传输层、数据处理与评估层、用户交互与预警层。 回复 6：已经对团队人员进行了优化。
5	王登科	1. 研究聚焦组合构件销剪连接件的节点受力和模型验证，提出节点构造优化。 2. 研究重载交通下钢混组合结构节点疲劳和失效机理。	回复 1：已在研究内容中增加了组合销剪力连接件节点受力和模型验证，并根据试验结果及数值分析，对本项目提出的组合销剪力连接件节点进行优化设计。 回复 2：已在研究内容部分补充了重载交通下钢混组合结构节点疲劳和失效机理的研究工作。

大纲评审委员会专家（签字）：



项目负责人（签字）：白慕蓉