

项目合同编号：25-65X

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发

承担单位：陕西高速机械化工程有限公司

项目负责人：薛平安

通讯邮编、地址：西安市灞桥区纺南路西段 2 号、710038

传真、电话：029-83336953

起止年限：2026 年 03 月至 2028 年 03 月

陕西省交通运输厅

一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

1.1 考虑主梁刚度差异的既有城市高墩桥梁拼宽技术

(1)不同主梁型式及连接方式的高墩主梁拼宽方法及其力学性能

(2) 多因素耦合作用下的高墩结构响应及沉降评价指标

1.2 城市高墩小半径曲线钢桥设计与施工方法研究

(1) 城市高墩小半径新型钢混组合梁结构研发与力学性能

(2) 曲线组合结构桥梁抗倾覆计算方法

1.3 现浇高墩桥梁模板支撑体系智能设计方法与软件研发

(1) 集成初始缺陷评估的模板支撑体系计算方法研究

(2) BIM 技术驱动下的模板支撑体系智能化设计软件系统研发

2. 技术关键

①高墩桥梁拼宽工程中多型式结构协同受力机制与变形智能监控研究；

②曲线钢混组合梁桥抗倾覆稳定性计算方法；

③BIM 技术驱动下的复杂大型模板支撑体系智能化图纸信息识别及三维可视化自动建模技术。

3. 依托工程（依托工作）

西安站是铁路包海主通道上的重要节点，是西安“四主一辅”重要的铁路枢纽，是含高铁、普铁、城际、地铁、公交为一体的大

型综合交通枢纽；本项目为西安站高架快速路系统及节点立交工程 EPC 项目 1 标段。本标段包括新兴南路-东绕城高速立交、新兴南路高架、规划南路高架、长鸣路-规划南路立交、长鸣路高架、长鸣路-南绕城高速立交等工程。

拟解决本工程以下问题：

- ①城市空间拥挤等既有交通和环境因素复杂。
- ②新建桥梁的沉降控制问题。
- ③确定高墩小半径曲线梁桥倒塌破坏机理。
- ④安全设计方面存在明显不足，导致设计方案偏于保守，难以充分应对实际施工中的复杂多变情况。

二、考核指标

1.预期目标

1.1 提出考虑主梁刚度差异的既有城市高墩桥梁拼宽技术

采用免标靶式数据采集,达成百米级沉降监测精度为 1mm 的高标准,以及不低于 60Hz 的高频监测频率,实现对高墩关键测点的实时、精确数据采集。

1.2 完善城市特殊荷载下高墩小半径曲线钢桥设计及施工技术

针对独柱花瓶墩的城市立交匝道桥,在梁高不受限时,选用槽型钢混组合梁比钢箱梁结构预计节省用钢量约 18%~30%。

1.3 开发现浇高墩桥梁模板支撑体系智能设计软件系统

提高设计效率和准确性,从而提升整个施工过程的质量和效率,降低模板支撑体系 5%-10%的施工成本。通过此项目,将加快模板支撑体系智能设计软件的研发,有助于智能建造在临时支架行业内的普及和深化。填补国内技术空白。

2.主要技术经济指标(具体的技术经济参数)

①考虑主梁刚度差异的既有城市高墩桥梁拼宽技术

技术指标:实现百米级沉降 1mm 高精度监测,不低于 60Hz 高频监测,确保高墩关键测点数据实时、精确采集。

经济指标:给出不同连接方式对桥梁结构混合受力性能的影响,避免工程浪费或隐患,提出新旧桥基础沉降差控制标准,从而减少工程量约 10%。

②城市高墩小半径曲线钢桥设计与施工方法

技术指标：该技术可将同曲线半径主梁抗扭刚度提高约 20%，有效保证了结构的抗倾覆稳定性。

经济指标：对于槽型钢混组合梁，其用钢量较钢箱梁结构可节省约 18%~30%。

③现浇高墩桥梁模板支撑体系智能设计方法与软件研发

技术指标：模板支撑体系智能化设计软件的设计方案满足规范要求。

经济指标：通过精确计算材料用量及优化结构设计和材料选型，该技术预计可降低模板支撑体系 5%~10%的施工成本。

3.经济和社会效益

落实好习近平总书记“在关键领域、卡脖子的地方下大功夫”的指示，响应国家交通强国战略。通过项目开展城市高墩小半径曲线钢桥设计及施工技术研究，建立考虑主梁刚度差异的既有城市高墩桥梁拼宽技术，开发现浇高墩桥梁模板支撑体系智能设计方法与软件，实现“被动防灾”到“主动防灾”的理论研究与技术提升，形成一系列具有自主知识产权的城市桥梁设计与分析技术，解决小半径曲线高墩钢结构桥梁的倾覆机理不明确、城市立交桥拼宽和施工技术落后等一系列问题，高墩沉降等方面现有设计标准的不足，保障城市桥梁建设安全与质量水平，提升设计精细化水平能力与施工效率。

4.成果提供形式

①完成《城市立交桥拼宽关键技术研究》、《城市立交小半径曲线梁桥结构设计关键技术研究》、《城市立交现浇高墩桥梁模板支撑

体系智能化设计技术研究》3 份研究报告；

②完成 1 套拼宽桥梁沉降监测和多源数据集成软件系统的研发；

③完成 1 套模板支撑体系的智能化设计软件系统的研发；

④在国内外重要学术期刊论文 2-3 篇；

⑤受理并实质性审查发明专利 4 项，实用新型专利 4 项；

⑥获得软件著作权不少于 2 项。

5. 其他考核指标

开展省内媒体报道 1 次。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2026.03-2027.6	1.搭建试验与仿真平台，构建深度学习数据集； 2.制定试验、模拟与软件研发方案； 3.提交启动报告、文献综述与第一阶段进展报告； 4.开展基础非弹性变形条件下高墩沉降特征及机理研究，开展多模态耦合作用下的高墩沉降评价指标研究； 5.进行拼宽桥梁沉降监测和精准预测系统研究； 6.开展多模态耦合作用下拼宽桥梁防沉降措施研究； 7.结构参数和荷载作用对桥梁抗倾覆的影响研究，建立桥梁的非线性数值仿真模型，探究倾覆破坏模式与非线性因素的内在联系； 8.开展桥梁整体几何特征及桥梁力学性能研究及新型曲线钢混组合箱梁桥力学性能的敏感性参数分析； 9.完成初始缺陷试验与量化分析，建立缺陷模型； 10.撰写论文 1 篇，受理并实质性审查发明专利

	利 2 项，实用新型专利 4 项。
2027.06-2027.09	1.完成 1 套智能化设计软件系统研发； 2.撰写论文 1 篇，申请软件著作权 2 项，受理并实质性审查发明专利 2 项； 3.完成《城市立交桥拼宽关键技术研究》、《城市立交小半径曲线梁桥结构设计关键技术研究》、《城市立交现浇高墩桥梁模板支撑体系智能化设计技术研究》3 份研究报告； 4.完成 1 套拼宽桥梁沉降监测和多源数据集成软件系统的研发。
2027.09-2027.12	1.课题及子课题研究成果通过验收； 2.撰写论文 1 篇，申请软件著作权 1 项； 3.课题绩效自我评价报告 1 份。
2027.12-2028.03	整理结题资料、提交结题验收

四、项目经费

项目总经费：150 万元

交通运输厅补助：19.5 万元

自筹资金：130.5 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	120.3	15.5
1. 设备费	30.5	6.5
(1) 购置设备费	27.5	5
(2) 试制设备费	3	1.5
(3) 设备改造与租赁费	0.0	
2. 业务费	37.6	3
(4) 材料支出	2.5	1
(5) 测试化验实验加工支出	17.6	
(6) 燃料及动力支出	1	0.5
(7) 差旅支出	1.2	
(8) 会议支出	4	
(9) 国际合作与交流支出	2	
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权 事务/印刷支出	9.3	1.5
(11) 其他支出	0	
3. 劳务费	52.2	6
(12) 劳务性支出	36.2	4
(13) 咨询专家支出	16.0	2
(二) 间接费用	10.2	4
4. 管理费	6.2	2
5. 绩效支出	4.0	2
合 计	130.5	19.5

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	4
		（2）实用新型	4
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	2
		3.发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（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	否
		（2）中试（样品样机）	否
		（3）小批量	否
		（4）规模化生产	否
	人才引育	1. 引进高层次人才	
		（1）博士、博士后	
		（2）硕士	
		2. 培养高层次人才	
		（1）博士、博士后	
		（2）硕士	
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4. 是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2. 科研仪器设备利用率（%）	
		3. 孵化科技型企业（个）	
		4. 转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	
		2. 新增销售（万元）	
		3. 新增出口创汇（万美元）	
		4. 新增利润（万元）	
	社会效益	1. 新增税收（万元）	
		2. 新增就业人数	
		3. 就业培训（人次）	
		4. 带动农民增收（万元）	
		5. 培训和指导科技服务（人次）	
		6. 新增产业带动情况	
		7. 技术集成示范（项）	
		8. 建立示范基地（亩数）	
		9. 节约资源能源	
		10. 环保效益	
其他需要说明的情况			

六、承担单位或研究人员分工

1、参建单位

陕西高速机械化工程有限公司、陕西省交通规划设计研究院有限公司、长安大学

2、技术力量及人员分工

项目研究主要成员情况						
姓名	单位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
薛平安	陕西高速机械化工程有限公司	男	42	副高级	桥梁工程	项目负责人
郭胜涛	陕西高速机械化工程有限公司	男	40	副高级	其他	项目现场负责
杨凯	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	46	正高级	桥梁工程	技术负责人
赵昕	陕西省交通规划设计研究院有限公司	女	43	正高级	道路工程（路基）	研发进度控制
王帅	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	33	中级	桥梁工程	子题二负责人
赵煜	长安大学	男	51	正高级	桥梁工程	子题一负责人
周勇军	长安大学	男	47	正高级	桥梁工程	子题二负责人
药天运	长安大学	男	34	中级	其他	子题三负责人
贺拴海	长安大学	男	63	正高级	桥梁工程	技术顾问
许申炜	陕西高速机械化工程有限公司	男	33	中级	桥梁工程	现场试验实施
于林涛	陕西高速机械化工程有限公司	男	42	副高级	桥梁工程	现场试验实施
仝启凡	陕西高速机械化工程有限公司	男	32	中级	桥梁工程	现场试验
相阳	陕西高速机械化工程有限公司	男	32	助理级	桥梁工程	现场试验
黄秋旭	陕西高速机械化工程有限公司	男	35	中级	桥梁工程	现场试验
姬乃川	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	30	中级	桥梁工程	数字化模拟

七、项目参加人员表

项目承担单位：陕西高速机械化工有限公司						
参与单位（排序）：1. 陕西省交通规划设计研究院有限公司						
2. 长安大学						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作
1	薛平安	1983.10	陕西高速机械化工有限公司	副高级/总工程师	桥梁工程	项目负责人
主要研究人员（注：一般项目不超过15人）						
2	郭胜涛	1985.11	陕西高速机械化工有限公司	副高级	其他	子题二项目现场负责
3	杨凯	1979.02	陕西省交通规划设计研究院有限公司	正高级	桥梁工程	子题一技术负责
4	赵昕	1982.06	陕西省交通规划设计研究院有限公司	正高级	道路工程（路基）	子题一研发进度控制

5	王帅	1992.10	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	中级	桥梁工程	子题二负责人	王帅
6	赵煜	1974.07	长安大学	正高级	桥梁工程	子题一负责人	赵煜
7	周勇军	1978.03	长安大学	正高级	桥梁工程	子题二负责人	周勇军
8	药天运	1991.09	长安大学	中级	其他	子题三负责人	药天运
9	贺拴海	1962.10	长安大学	正高级	桥梁工程	技术顾问	贺拴海
10	许申炜	1992.04	陕西高速机械化工 程有限公司	中级	桥梁工程	子题二现场试验实施	许申炜
11	于林涛	1983.08	陕西高速机械化工 程有限公司	副高级	桥梁工程	子题二现场实施	于林涛
12	全启凡	1992.04	陕西高速机械化工 程有限公司	中级	桥梁工程	子题二现场试验	全启凡
13	相阳	1994.07	陕西高速机械化工 程有限公司	助理级	桥梁工程	子题二现场试验	相阳
14	黄秋旭	1991.10	陕西高速机械化工 程有限公司	中级	桥梁工程	子题二现场试验	黄秋旭
15	姬乃川	1996.09	陕西省交通规划设计 研究院有限公司	中级	桥梁工程	数字化模拟	姬乃川

八、信息表

项目合同编号		25-65X		密级		B		A：机密 B：秘密 C：内部		
项目名称		城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发								
项目实施所在地		陕西西安		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月				
总 经 费		150 万		斤 拨		19.5 万				
第一承担单位	单位名称	陕西高速机械化工程有限公司								
	所在地	陕西省西安市灞桥区					代码	029		
	通讯地址	西安市灞桥区纺南路西段 2 号					邮编	710038		
	单位性质	(3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	74125710-2		
参与单位	序号	单 位 名 称								
	1	陕西省交通规划设计研究院有限公司								
	2	长安大学								
	3									
项目负责人		姓 名	薛平安		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份	1983.10		
		学 历	(2) 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	18966899455		电子邮箱		313933708@qq.com			
项目联系人		姓名	薛平安		性别		男			
		联系电话	18966899455		电子邮箱		313933708@qq.com			
项目组人数		15	高级	8	中级	6	初级	1	其他	
主要研究内容 (100 字以内)		1、考虑主梁刚度差异的既有城市高墩桥梁拼宽技术 2、城市高墩小半径曲线钢桥设计与施工方法研究 3、现浇高墩桥梁模板支撑体系智能设计方法与软件研发								
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、F	A：专著、论文 B：样机、样品 C：试验工程、产品 D：示范工程 E：产品 F：其他							

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

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

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

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

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

6.合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：

陕西省交通运输厅

负责人：（签字）



2020年3月31日

联系人：（签字）

张 娟

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）陕西高速机械化工程有限公司

单位负责人：（签字）

石向前



2020年3月31日

项目负责人：（签字）

薛齐安

（公章）

电 话：029-83336953

财务负责人：（签字）

申 通 元

账 户 名：陕西高速机械化工程有限公司

开户银行：上海浦东发展银行西安分行营业部

账 号：72010155100000524

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：薛安
2026 年 3 月 31 日
6101110148

项目编号：25-65X

2026 年度陕西省交通运输厅科研项目 可行性研究大纲

项目名称：城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧
建造研究与开发

申请单位：陕西高速机械化工程有限公司
陕西省交通规划设计研究院有限公司
长安大学

联系人：薛平安

电 话：18966899455

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

目录

一、 项目研究的背景和必要性	1
二、 前期科研及工作基础	4
1 对项目领域国内外研究现状,研究水平和发展趋势的分析和评价	4
2 项目前期科研及现有工作条件	14
3 参考文献	26
三、 实施方案	31
1 拟解决的关键问题	31
2 主要研究内容及实施方案	31
3 技术路线	50
4 后续技术改造或基本建设计划的衔接	51
四、 项目承担单位及参加单位概况	51
1 单位概况	51
2 技术力量及人员构成	57
3 各自承担的主要工作	58
4 项目主要负责人情况	59
五、 项目依托工程(工作)情况及其他必要支撑条件	59
1 依托工程(工作)概况	59
2 投资来源	61
3 工程进度与项目科研进度的配合	61

4 组织管理形式	63
六、 项目经费估算及资金筹措情况	64
七、 项目绩效指标	65
八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益	67
1 项目预期目标	67
2 提交的研究成果及其形式	68
3 经济、社会、环境效益分析	68
九、 其它需要说明的问题	错误！未定义书签。
十、 申请单位意见	错误！未定义书签。
附件：	72

一、项目研究的背景和必要性

西安站是铁路包海主通道上的重要节点，是西安“四主一辅”重要的铁路枢纽，是含高铁、普铁、城际、地铁、公交为一体的大型综合交通枢纽；东城片区是西安市依托站枢纽，充分发挥其交通优势，重点打造的“西安国际枢纽门户形象、西安东部绿色城市客厅”。该项目将极大缓解西安铁路枢纽客流压力，对提升西安在全国铁路网中的区位作用、服务“一带一路”建设、支撑内陆改革开放新高地建设具有重要意义。

连接西安站及主城区的快速路及节点立交等交通配套设施工程是为西安交通枢纽提供交通功能的基础保障。该工程包括北通道、南通道、北循环高架桥、南循环高架桥以及南北落客平台等五大部分，涉及众多桥梁建设项目，总体布置如图 1 所示。其中北通道包含新兴南路，新兴南路长 3.02km，涉及互通式立交两处，分别为新兴南路-东三环立交、新兴南路-东绕城高速立交；南通道包含长鸣路 and 神鹿大道，长鸣路长 3.2km，神鹿大道长 3.5km，涉及互通式立交三处，分别为长鸣路-南三环立交、长鸣路-神鹿大道立交、神鹿大道-绕城高速立交；北循环高架长 2.17km，涉及北侧进出落客平台主线高架及上下匝道；南循环高架长 2.08km，涉及南侧进出落客平台主线高架及上下匝道；南北落客平台总长约 1.11km，落客连接通道长约 0.43km。



图 1 项目总体布置图

桥梁工程作为车站项目的核心组成部分，面临着城市空间拥挤等既有交通和环境因素复杂等突出问题，对桥梁工程设计与施工构成了严峻挑战，面临的复杂挑战具体如下：首先，项目主线需要与绕城高速沪河特大桥拼宽连接，由于沪河特大桥墩高达 40 米以上，新建桥梁的沉降控制问题尤为突出。而为了解决高墩条件的施工难题，新建桥梁拟采用钢混组合结构，但原结构为混凝土箱梁，主梁之间的较大刚度差异对拼宽形式和构造也提出了较高的要求。因此，新老桥梁拼宽后结构受力复杂，不但新结构易产生较大沉降，而且对主梁拼宽后的混合结构整体受力以及接缝受力提出更高的挑战。目前，国内拼宽桥梁普遍高度较低，以同型结构拼宽为主，高墩条件下的不等刚度桥梁拼宽几乎没有先例，对拼宽设计和施工要求高。有鉴于此，探索高墩桥梁以及新老主梁较大刚度差异的桥梁拼宽技术，探索基于高墩沉降预测和沉降数字化监测的桥梁拼宽技术，是提高桥梁拼宽的适应性，保证依托工程建设和运营过程安

全推动行业进步的必然要求。

其次，高墩小半径曲线梁桥是一种具有复杂力学性能的空间结构体系，由于弯扭耦合效应，曲线桥容易出现支座脱空从而导致桥梁倾覆。目前，对于高墩小半径曲线梁桥倾覆问题的研究较少，现有规范对此没有成熟的理论规定，缺乏科学合理的理论指导。项目以高墩小半径曲线梁桥为研究对象，采用现场调研、理论分析、数值模拟和现场试验相结合的方法，开展高墩小半径曲线梁桥倒塌破坏机理的研究。研究预期成果可为桥梁抗倾覆设计和分析提供理论依据，提高城市立交桥梁的安全服役水平，促进桥梁可持续发展，为城市的长远发展和居民的便捷出行提供坚实的基础，并且具有重要的科学意义和工程应用价值。

第三，西安站配套基础设施建设工程中存在大量高墩现浇混凝土桥梁结构。然而，传统设计方法面临着多重挑战：安全设计方面存在明显不足，导致设计方案偏于保守，难以充分应对实际施工中的复杂多变情况。同时，设计与施工人员之间的沟通与合作存在障碍，设计方案难以精准对接施工现场的实际需求，影响了施工效率与安全性。结合上述几点，针对西安站配套基础设施建设工程所需复杂大型模板支撑体系的结构复杂性、方案经济性、体系安全性等特点，在设计过程中需要突破传统模板支撑体系设计方法的思维局限，针对性开发可同时兼顾设计计算的高准确性、设计方案的高经济性、设计结构的高安全性、设计过程的高效率性、设计图纸的高直观性的智能化模板支撑体系设计计算方法及软件，从而提高

高墩现浇混凝土结构的设计及施工效率,进而推动 建筑行业的数字化转型与智能化升级,为实现可持续发展目标贡献力量。

综上所述,西安站交通枢纽的建设需要克服诸多技术难题,为了应对西安站交通枢纽建设中的挑战,项目团队拟将开展利用数字化协同建造技术来优化设计、施工和管理的协同工作,减少资源浪费,以确保工程的高质量和高效率完成;研究高墩桥梁沉降机理及考虑主梁刚度差异的桥梁主动拼宽技术,解决本项目新建桥梁与高墩桥梁拼接的技术难题;揭示小半径曲线高墩钢结构桥梁特性以及倾覆机理研究,探索影响该类桥梁安全的内力动因,提高桥梁稳定性和安全性,推动我国小半径钢箱梁设计方法的进步;开发智能化的模板支撑体系技术,以提高现浇 混凝土结构的设计和施工效率。通过开展上述针对性研究的应用,突破影响西安站交通枢纽建设中的瓶颈问题,保证项目顺利实施和建设、运营过程的安全。

二、 前期科研及工作基础

1 对项目领域国内外研究现状,研究水平和发展趋势的分析和评价

1.1 考虑主梁刚度差异的既有城市高墩桥梁拼宽技术

针对桥梁拼宽技术设计与施工,国内外学者展开了大量的研究,目前的研究重点主要集中在以下几方面:

(1) 拼宽方式及其力学影响

目前,国内外学者对混凝土箱梁桥的拼宽方法及其力学性能影响已进行过大量研究,主要分为两部分:①桥梁拼宽方式研究;②拼宽

桥梁横向连接方式及其力学影响研究。

国内外调研资料表明,拼宽桥梁主要有单侧拼宽和双侧拼宽两种方式,新旧桥梁衔接主要采用连接和不连接两种方案。单侧拼宽具有桥梁整体性好、桥面只有一条纵向接缝的优点。但因调整横坡,对于板、梁桥,一般需要先拆卸加宽侧旧桥的上部结构,待墩、台盖梁顶面横坡调整完后,再重新架设板、梁;双侧拼宽缺点是新旧桥间有两道连接缝,但通过上、下部结构连接,技术上可以解决桥面纵缝问题。吴文清^[1]等分析总结现有的工程遇到设计难点及经验,提出了沪宁高速桥梁拼宽的方案,提出了上部连接下部不连接的拼宽方案。陈康明^[2]等对长联桥梁加宽分析,以12跨箱梁为例,根据长联桥横向变形特点,提出了“新、旧结构部分连接”的方法。

目前我国高速公路桥梁拼宽横向连接基本有以下两种方案:新旧桥梁不连接和新旧桥梁结构连接。若采用新旧桥梁主梁连接时,其主梁横向连接构造主要有以下四种方法:主梁之间柔性连接、半刚性连接、弱刚性连接和强刚性连接。王浩^[3]等提出了增大结构之间的连接刚度可降低旧桥分布系数,但接缝厚度达到一定时,横向分布影响变化减小。赵宝俊^[4]等对不同拼接方式下桥梁车载动力性能分析,对桥梁拼宽后的频率、震动等分析,认为铰接和刚接两种拼宽方式车载动力性能影响基本相同,但刚接对旧桥更有利。吕韶全^[5]等分析了大跨径的连续刚构桥加宽的力学性能,通过新旧结构刚接和铰接,对比不同的拼接方式下主梁内力变化,得出纵桥向应力影响较小,对桥梁整体横桥向应力和刚度影响较大,铰接加宽横向应力更大,综合考虑认

为刚接拼宽更有利于结构受力，铰接更适合于沉降较大、地震烈度较高的地方。

综上所述，虽然现有研究中的加宽方式在国内外改扩建工程中均有涉及，但总体来讲，桥梁多采用同型主梁拼宽，主梁横向刚度匹配度较好。另外，目前拼宽桥梁高度一般较小，桥墩沉降控制难度较小。而依托工程桥墩高度达 40 米以上，弹性和非弹性沉降突出，传统预压技术难以满足工期和受力要求，需要探索基于沉降变化的主动拼接控制方法。除此之外，拼宽桥梁横向连接方式的研究往往集中在理论分析和数值模拟上，缺乏足够的现场实测数据来验证理论模型的准确性，也存在拼宽方式适用范围受限、动力性能研究考虑因素不全面等问题。

（2）沉降控制

目前，国内外学者对拼宽后新旧桥基础沉降差控制的研究主要集中在以下方面：①防沉降措施研究；②高墩沉降评价指标研究。

关于防沉降措施，应考虑下部结构的沉降差对桥梁整体的影响，做好基础沉降控制方面的工作，控制新旧桥梁下部结构的沉降差在合理的范围之内。王学军^[6]利用结构力学的计算原理，初步分析了基础沉降对上部结构的影响，通过简化结构利用两次超静定结构计算方法，得出 T 梁的内力值，并给出增加配筋情况。张齐坤^[7]等分析了某高速中的板梁桥和 T 梁桥拼宽为例，分析了在基础沉降下，新旧桥梁的内力影响，提出加强内力加大位置的配筋以保证结构安全，采用桩底后压浆技术对桥墩加固，通过对比采用该技术和未采用该技术的桥

梁现场实测对比,表明桩底后压浆技术可有效减小沉降。吴文清^[8]等以空心板梁为例,通过结构试验和软件模拟相结合的方式对沉降分布研究,试验采用尺寸 1:4 的实体模型,通过改变桥墩的沉降值,然后测得上部结构各主梁的实际沉降值,进一步使用有限元模拟的结果对比,提出线性沉降假定不正确,应是主梁沉降值与二阶曲线拟合度较高。

关于评价指标,根据具体情况选择合适的拼接方式,并要求计算拼接部位所能允许的沉降差极值,要求上部连接后新旧桥梁下部结构的基础沉降差不超过拼接部位的沉降差容许值,只有这样才能保证拼接拓宽后桥梁的安全运营。温庆杰^[9]等建立简化的力学计算模型分析加宽后箱梁的由沉降差引起的结构上部的附加内力,利用纽玛克数值法计算主梁附加内力,提出新旧主梁沉降在 10mm 内可保证新旧主梁的结构安全。王伟^[10]以长邯高速公路改扩建工程某连续箱梁为例,提出通过沙袋预压的方式,消除新桥桥墩的非弹性沉降,利用有限元软件和灰色理论的方法,通过施工阶段的现场监测以及灰色理论的预测方法,给出合理的基础沉降控制标准值。

可见,虽然国内外专家在高墩沉降控制方面已经做了大量研究,但理论模型的完善、沉降预测方法的精确性还存在不足,并且现有的防沉降措施主要通过预压来消除非弹性变形,高墩的弹性变形无法消除,且对成桥之后的沉降无法控制。此外,现有的评价指标往往缺乏统一的标准和准确的量化方法,导致评估结果的可比性和可靠性受到影响。其次,高墩沉降评价涉及到多个因素的综合考量,包括地质条

件、结构设计、施工工艺等，因此需要建立多维度、多层次的评价体系，以全面准确地反映实际情况。同时，随着社会经济的发展和人们对基础设施安全性的不断提高，对高墩沉降评价的要求也日益严格，需要不断深化研究，提高评价方法的科学性和可靠性，以确保工程的安全性和可持续性。

（3）新旧桥梁不均匀收缩徐变

国内外学者已对拼宽桥梁不均匀收缩徐变进行了大量研究，主要集中在三大方面：①探究不均匀收缩徐变对最后成桥产生的影响；②建立收缩徐变模型；③研究能够减小收缩徐变引起的附加内力的拼宽方式。

拼宽桥梁中，旧桥结构的收缩徐变已基本完成，而新桥的收缩徐变才刚开始，当新旧混凝土拼接在一起时，由于旧混凝土的收缩徐变变形比新混凝土小，就会对新混凝土的收缩徐变变形产生约束，从而在连接面中产生附加应力。若附加应力过大，超出连接面的抵抗力，连接面上将出现裂缝，导致结构破坏并影响到桥梁的安全使用。为了保证拼宽桥梁使用的安全性、耐久性，需掌握收缩、徐变对新老结构影响的发展变化趋势和规律。王曦婧^[11]对沪宁高速中的陆慕大桥拼宽工程进行研究，得出收缩效应对连续箱梁主梁跨中截面影响较大，对接缝支点截面位置影响较大，徐变效应主要在结构竖向，跨中截面发展充分，新桥主梁收缩徐变影响大。方志^[12]等对混凝土箱梁研究，分析了不同方案下，混凝土收缩徐变引起的结构内力，同时考虑结构上、下部分共同工作，仅考虑上部结构时旧桥的横向内力位移不满足要

求,上下部分同时考虑时旧桥会满足验算要求,构件理论厚度影响混凝土收缩徐变计算的结果,应考虑施工中的变化影响。陈康明^[13]等对长联桥梁加宽分析,以三种跨径的箱梁为例,分析混凝土收缩徐变效应对长跨桥梁的影响,通过现场实测数据和数值计算的结果比对,得出现行的规范能够很好地模拟由收缩徐变效应引起的桥梁变形,位移最大的位置是在桥梁梁端位置,桥梁收缩效应是主要影响因素。熊正强^[14]通过对空心板加宽后混凝土收缩徐变影响分析,共选取了三种模型,分别为 JTG 模型、ACI 模型、PCA 模型,通过计算分析,三种模型的计算结果差异很大,但整体变化趋势基本一致,提出通过增加放置时间可减小接缝应力。彭可可^[15]基于收缩—徐变试验获得材料时间关联函数,据此建立有限元预测模型,根据有限元计算结果确定监测方案,研究拼宽结构的应力、应变、位移、基础沉降随时间变化的规律,发现收缩徐变差对于新旧桥拼接带的应力有较大影响,通过掺入钢纤维聚酯纤维能显著减少收缩徐变差,收缩徐变应变在拼接 1 年后趋于稳定,不再快速增加。

综上所述,现有研究成果往往基于简化的理论模型,多数未能充分考虑实际工程中多变的环境条件、施工工艺的复杂性以及材料特性的多样性。此外,现有研究成果中不同收缩徐变模型之间的计算结果存在差异,现场实测数据的不足也限制了对现有理论模型验证和修正的能力。

1.2 城市高墩小半径曲线钢桥设计与施工方法研究

(1) 曲线闭口槽型钢混组合梁结构设计及施工技术研究

钢-混组合梁是在钢结构和混凝土结构基础上发展起来的一种可装配式建造的新型结构形式。主要通过将钢梁和混凝土翼缘板之间设置剪力连接件（栓钉、槽钢、弯筋等），将钢构件和混凝土板结合起来共同受力^[16-22]。早期，钢-混组合梁主要采用双工字型组合梁形式，但这种形式的组合梁在曲线桥梁稳定性较差，而钢箱梁截面有较好的抗扭、抗倾覆等特性^[23]。张鑫^[24]等论述不同支撑形式对曲线梁桥的受力影响，得出结论墩梁固结体系下主梁刚度最大，双支座体系次之。闫安志^[25]等研究横隔板对曲线梁桥车桥耦合振动的影响，结果表明横隔板可使曲线梁桥各阶固有频率变低，尤其对竖向弯曲振动的影响较为明显。李运生^[26]等对横隔板数量 N 、跨度 L 和跨径比 L/r 进行参数分析，以畸变应力比为控制指标，给出适于使用阶段曲线组合梁横隔板间距的计算式。张莉等^[27-30]通过有限元软件进一步分析简支钢箱梁的畸变效应，并提出了横隔板的数量及箱梁的几何特征参数对钢箱梁畸变效应的影响。姜越鑫^[31]等提出抗拔不抗剪(URSP)连接件技术，通过释放组合梁负弯矩区的部分组合作用，达到降低混凝土板拉应力的目的，从而减薄混凝土桥面板厚度与钢筋用量。李政園^[32]等研究新型 T 型连接件能有效改善组合梁负弯矩区混凝土的抗裂性能，并开展钢-混凝土组合桥面系的悬吊试验研究，结果表明 T 型连接件能有效降低混凝土拉应力。施洲等^[33-35]比较了 PBL 剪力键埋入式和标准推出试验过程破坏机理及承载力影响因素。Liu^[36]等为改善 PBL 剪力键群非均匀受力状态，提出了在开孔钢板内增加橡胶环的新型 PBL 剪力键，并开展数值模拟及模型试验。

由上述研究可以看出，国内外学者对此研究颇少，为保证钢梁施工质量、缩短工期、降低造价，一般都采用工厂预制，并制定专项施工方案。桥面板不论是预制还是现浇都应考虑质量、裂缝控制、排水能力，但在现阶段的桥涵规范中并未明确规定桥面板施工工艺，在实际工程中施工工艺、组合方式和顺序都需要进一步研究。城市桥梁对于以上要求外，还要有一定的外观可塑性和施工便利性等，所以对于组合结构桥梁设计、不同施工方法和不同施工工艺的选择都提出了更高的要求。因此，需要深入开展此方面研究以构建更为科学合理的结构设计和施工技术方案。

（2）抗倾覆计算方法和理论

目前常用的抗倾覆计算理论有支座反力理论和稳定系数理论^[37]。相应的计算方法有支反力法、刚性倾覆轴法和简化柔性体法^[38]。支反力法通过控制支座不出现负反力作为桥梁抗倾覆分析的重要指标，然而，由于梁体转动过程中呈现出几何、材料和接触非线性行为，单个支座脱空未必会发生倾覆，但是倾覆现象一定会伴随着支座的脱空。因此，限制支座脱空可以防止荷载下桥梁倾覆事故的发生，却无法量化桥梁抗倾覆承载力。刚性倾覆轴法以刚性体平衡为基础，以确定最不利倾覆轴作为评估桥梁抗倾覆承载力的前提^[39]。同时，基于刚性倾覆轴的计算方法即使得到较大的安全系数，也不能防止倾覆事故的发生^[40]。简化柔性体法依据非线性有限元计算成果，综合考虑变形体转动、自重和刚体转动的影响，通过外边界支座连线后的折线轴确定桥梁的抗倾覆承载力^[41]。现行 18 规范中的特征状态 2 采用了简化柔性

体的计算方法^[42]，然而，规范中的简化柔性体的方法仅适用于直线桥梁抗倾覆分析^[43]，对于小半径曲线桥过于保守。

国内外学者在曲线桥梁抗倾覆方面也有一定研究。Lavelle. F. H^[44]等在 1965 年首次提出将梁格法运用到曲线梁桥的计算分析中，通过等效梁格去模拟桥梁上部结构，为人们对曲线梁桥的计算提供了方法和思路。Yoo^{[45][46]}等基于直线梁桥的内力-位移关系，引入曲线梁桥曲率因素后，提出了计算曲线箱梁的基础方程。薛爱新^[47]等以小曲率独柱墩匝道桥为研究对象，针对重载车进行抗倾覆研究，结合规范给出施救的范围。Ebeido^[48]等通过有限元模型和现场实验对比分析，研究了曲率半径对预应力混凝土梁桥结构稳定性的影响。童兵^[49]通过不同有限元计算软件分析了实际小半径曲线桥梁在车辆荷载作用下的力学性能以及得到其扭矩和应力分布。祁志伟^[50]利用有限元软件计算得到了桥梁在不同曲率半径下桥梁抗倾覆稳定系数变化规律。黄志诚^[51]等通过对曲线梁桥的数值分析，发现当曲线梁桥上车辆荷载偏向外侧时，曲线梁桥的最小支承反力将显著减小，从而使曲线梁桥的抗倾覆能力减弱。

综上所述，与相对成熟的强度设计理论相比，曲线桥梁的抗倾覆计算理论及方法研究略显不足。目前现行规范采用各反力对不同倾覆轴线进行简单的力矩标量求和，不符合矢量力矩平衡的基本原理。曲线钢箱梁桥因钢结构自重轻，由预应力、基础变位等作用引起的倾覆效应不容忽视。因此，需要深入研究以构建更为科学合理的曲线钢和组合结构桥梁抗倾覆计算方法。

1.3 现浇高墩桥梁模板支撑体系设计

针对现浇高墩桥梁模板支撑体系相关设计问题,国内外学者开展了以下研究,主要分为以下两方面:(1)考虑初始缺陷的模板支撑体系计算方法;(2)模板支撑体系的智能化设计系统。

(1)考虑初始缺陷的模板支撑体系计算方法。

目前,关于考虑初始缺陷的模板支撑体系计算方法的相关研究分为两部分:①考虑初始缺陷的模板支撑体系承载性能影响的定量研究;②模板支撑体系设计方法研究。

对于考虑初始缺陷的模板支撑体系承载性能影响的定量研究,郭建^[52]通过随机抽样方法建立了初始缺陷随机分布规律和概率密度函数的统计信息,探讨分析了扣件式钢管脚手架的受力性能及极限承载力。何夕平等^{[53][54]}针对施工过程中架体所受非均布荷载提出一种改进的随机缺陷模拟方法,通过模拟分析可知极限荷载分布为正态分布,并在随机缺陷模型的基础上研究了各个杆件的受力特性。姚旋^[55]对扣件式钢管支架的初始缺陷计算方法进行研究,比较了不同模拟缺陷方法对稳定承载力的影响。

对于模板支撑体系设计方法研究,舒贛平^[56]等推导了考虑初始缺陷、半刚性连接和塑性铰的 CSF 单元,并利用 NIDA 对三组半刚性钢框架进行了直接分析法分析,其分析结果与试验数据有较高的吻合度,进而验证了直接分析法对半刚性钢框架的准确可靠性。刘耀鹏^[57]等推导了考虑构件初始几何缺陷和残余应力的高性能梁柱单元,并以理论、试验、模拟结合的方式证明该单元具备了很高的精度,为直接

分析法在工程中的应用做好铺垫,并在此基础给出了直接分析法在抗震设计中应用的相关建议。Yu^[58]等针对钢管的初始缺陷较大提出需要考虑钢管的 $P-\delta$ 效应,并在 Perry 公式的基础上推导了考虑初始缺陷的计算公式并预测装配式脚手架的极限承载力。

上述研究表明,模板支撑体系的结构特性显著表现为对缺陷值的高度敏感性,这一特性构成了结构评估时不可忽视的关键因素。然而,当前学术界的探索尚处于初级阶段,主要聚焦于初始缺陷对支撑体系承载能力的初步影响分析,却未能明确界定初始缺陷的具体量化阈值范围。这一缺失导致无法全面、精确地评估初始缺陷对设计安全性的深远影响,进而可能在设计及施工阶段埋下安全隐患,影响整体施工的安全性保障。因此,未来研究亟需深入探索并量化初始缺陷的界限,以提升模板支撑体系设计的科学性与安全性。

(2) 模板支撑体系的智能化设计系统

“桥梁智能建造技术”已被列为交通运输十项重大技术方向之一,对桥梁施工中模板支撑体系设计也提出了更高的要求,国内外学者对于模板支撑体系的智能化设计系统展开了大量研究。主要研究对象为模板支撑体系智能设计技术。

吕磊^[59]等设计了一种基于有限元分析与 BIM 的模板支架模型建立与分析方法,此方法在一定程度上减少了支架模板的用量及人力成本,并提高了施工效率,符合节能、节材的要求。武竹青^[60]等发明了一种模板支架排布的处理方法、装置和电子设备,此发明针对比较复杂的平面结构,可以自动找到规律,形成各自的分区,让整体排布更

规整，减少了很多调节跨。

上述研究表明，国内外学者在模板支撑体系智能化设计软件的开发上也取得了积极进展。然而，这些智能化设计技术在实际应用中仍面临诸多挑战，主要包括精度与效率之间的平衡难题，以及在处理复杂模型时可能出现的精度损失及不准确性等问题，这些局限性限制了现有技术在工程实践中的广泛应用和深入发展。

综上所述，现浇高墩模板支撑体系的设计领域尚存诸多亟待完善的方面。具体而言，面临两大核心挑战：（1）研究人员仅仅只是初步尝试将初始缺陷作为关键参数纳入分析框架，尚未形成成熟、系统的计算方法。（2）智能化设计软件在模板支撑体系设计中的应用面临精度与效率之间的深刻矛盾，尤其是在处理复杂多变的模型时，难以兼顾高效计算与精确预测，常伴随精度下降与结果偏差，进而限制了其在设计和施工实践中的广泛应用与有效性。

为攻克上述两大难题，本课题创新性地融合理论分析、实地试验与数值模拟技术，全面纳入结构初始缺陷考量，深入探索并构建集成初始缺陷评估的模板支撑体系计算新方法。同时，依托先进的深度学习理论与智能算法，开发一套高效的模板支撑体系智能化设计软件系统。此研究不仅显著提升模板支撑设计的精准度与安全性，还引领建筑行业向数字化转型迈进，加速工程设计智能化、高效化的变革步伐。

2 项目前期科研及现有工作条件

2.1 桥梁拼宽技术研究

①本团队参与的《青兰高速公路黎城至长治段桥梁改扩建工程》

中，针对青兰高速山西境内黎城至长治段改扩建项目的实际情况，以12座预应力混凝土箱梁桥为工程依托，开展桥梁安全性评估与拓宽改造技术研究。通过新旧主梁弱刚接连接，使新旧梁满足协同受力要求的同时施工尽量简便，大大地提高了施工效率。通过基础沉降的研究结合试验数据，提出基础沉降差控制在5mm，明确了预压试验的目标，也为新旧梁主梁合理拼接时间提供了可靠的技术支持。该研究成果也可用于山西省内其他高速改扩建工程中，并且还可以为国内其余省份高等级高速公路改扩建项目提供借鉴。

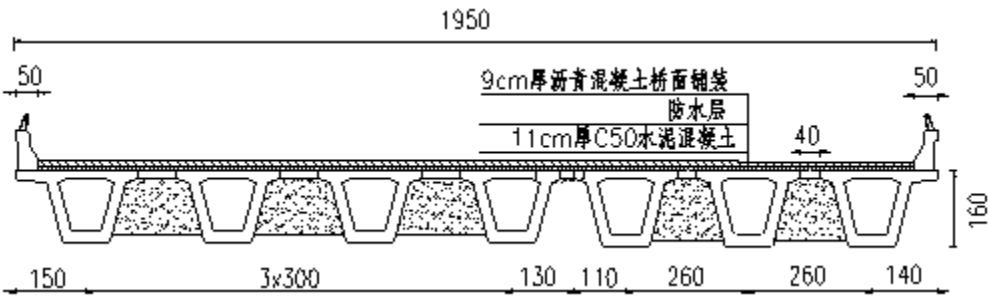


图 2 箱梁拓宽后桥梁横断面图

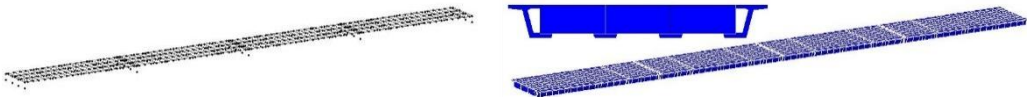


图 3 旧桥计算模型示意

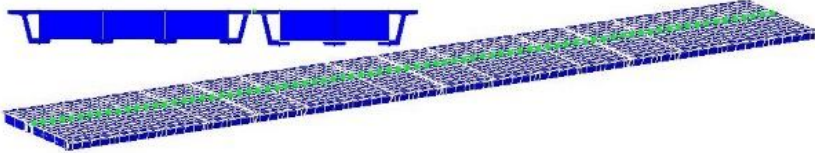


图 4 铰接计算模型示意

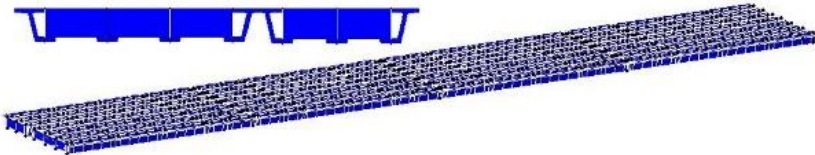


图 5 弱刚接计算模型示意

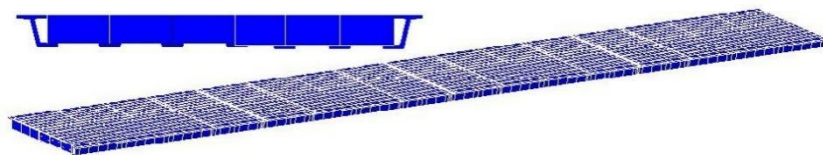


图 6 强刚接计算模型示意



图 7 盖梁上沉降测量仪器布设示意图 图 8 主梁上沉降测量仪器布设示意图

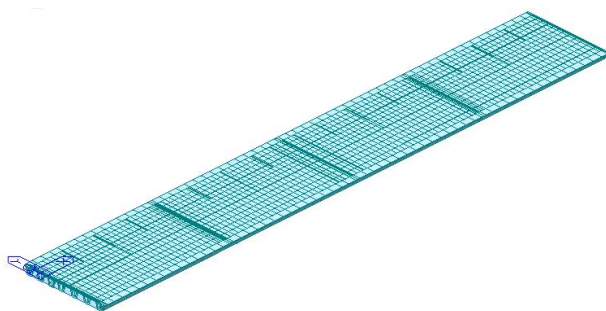


图 9 收缩徐变计算模型图

②团队参与《京藏高速公路改扩建工程》，针对京藏高速公路改扩建项目的实际情况，采用 MIDAS/Civil 有限元分析软件建立既有桥梁结构仿真模型，对既有桥梁结构进行仿真分析。在仿真分析中，对既有桥梁上部结构进行加铺后抗弯、抗剪验算、下部结构进行承载能力极限状态抗弯、压验算，正常使用极限状态裂缝宽度验算，并对拼宽桥梁上部结构整体进行验算。本团队在此次项目中的研究，使施工效率得到有效提高。

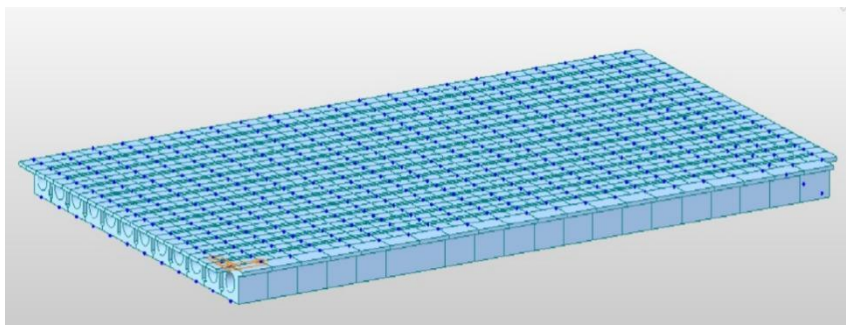


图 10 空心板梁格模型

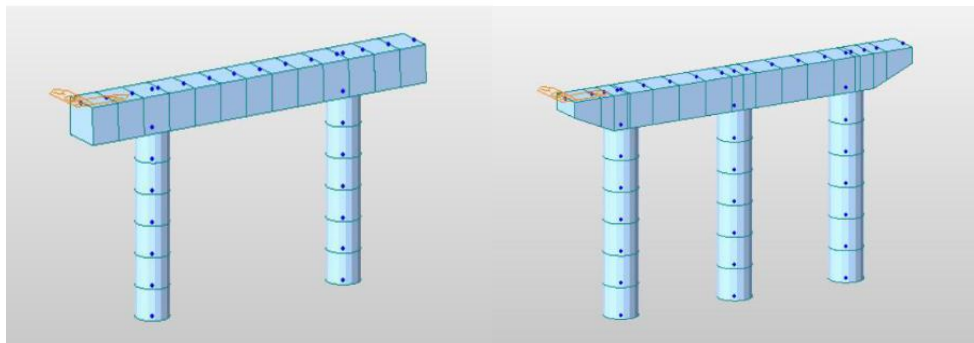


图 11 既有桥梁下部结构仿真

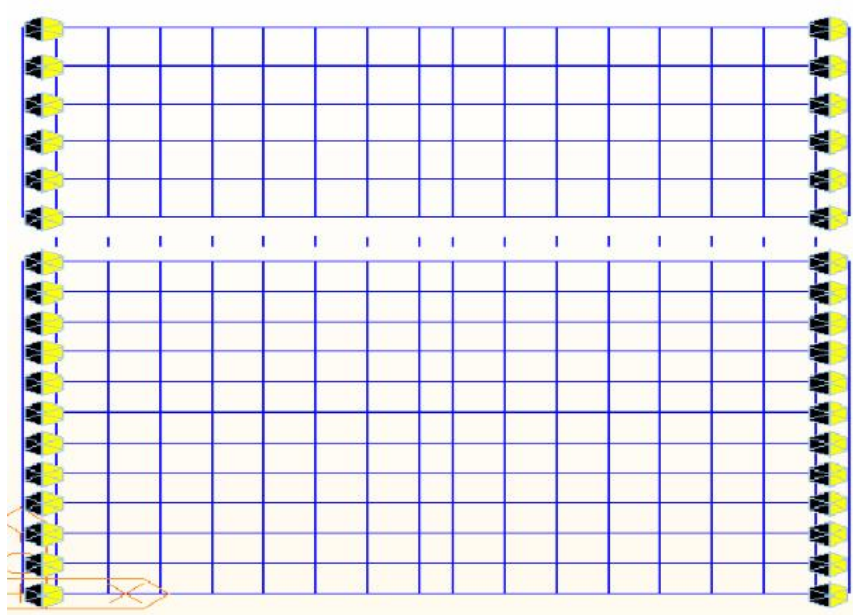


图 12 加宽桥梁全桥分析模型

③团队参与《济青高速公路预制板桥梁拓宽拼接方案工程》中，针对桥梁的加宽方式及拼宽构造及具体的地质情况，通过新旧桥沉降差、收缩徐变差的影响分析和拼宽部位的安全性验算，提出新桥的容许沉降值、新旧桥的合理拼接时间以及合理拼接构造，并从设计和施

工角度建议新旧桥沉降差及混凝土收缩徐变差的控制措施。有效指导济青高速公路桥梁加宽改建时的设计及施工,避免拼宽对既有桥梁结构产生不利影响及拼接部位的过度变形和开裂,防止施工保通及运营期间安全事故的发生,保证新旧桥梁结构的安全性和耐久性。另外,我国越来越多的高速公路已将改扩建列上日程。通过本项目的研究,为后续类似高速公路改扩建项目的桥梁拓宽改造提供一定的理论基础和实践经验。



图 13 济青高速公路地理位置

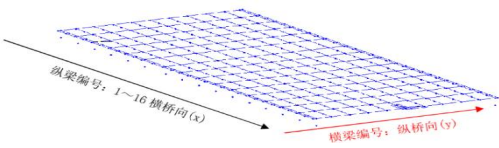


图 14 钢筋混凝土板总体计算分析模型

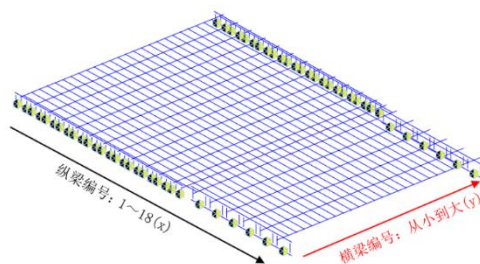


图 15 预应力混凝土空心板总体计算分析模型

④团队参与《福建省国高网厦蓉线漳州天宝至龙岩蛟洋段扩容工程》中，针对 A9 标段某连续 T 梁桥单边拼宽工程利用有限元模型和支持向量机法来进行相关的可靠度研究，为未来的拼宽桥可靠度评估提供参考。

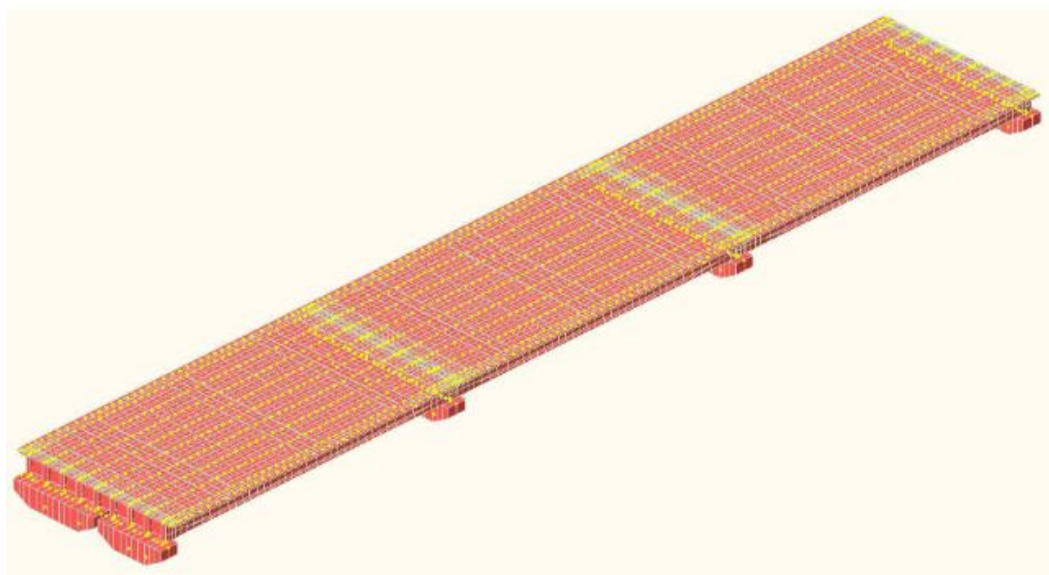


图 16 拼宽桥的有限元模型

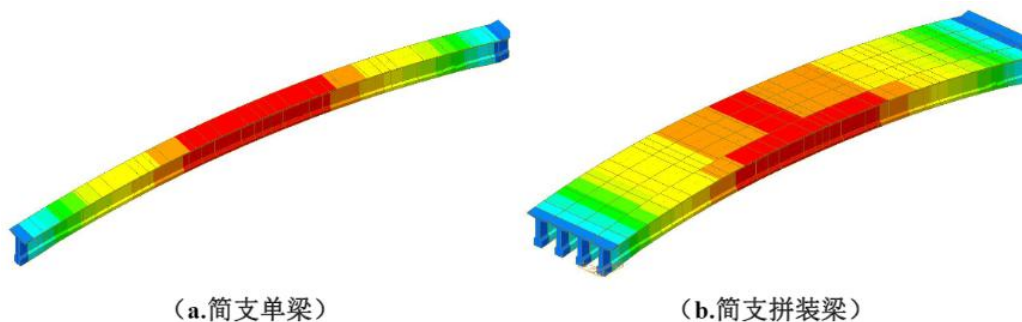


图 17 预制梁存梁期内简支拼装

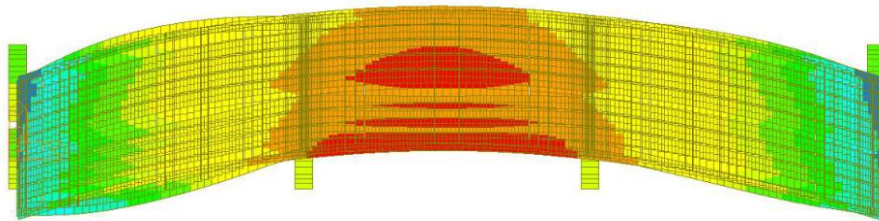


图 18 收缩徐变作用下的新旧梁横向位移分析三、实施方案

2.2 曲线钢桥设计方法研究

(1) 桥梁抗倾覆分析理论方面

①团队成员二十年来一直从事结构稳定理论、桥梁结构动力学、桥梁结构分析与设计等方面的教学和科研工作，对桥梁结构稳定、桥梁荷载、桥梁结构计算理论及试验评价有着较为深刻的认识。团队近3年主编/参编/主审了3部结构稳定与振动理论方面的教材，为本项目开展奠定了良好的理论基础。

②团队目前正在承担国家自然科学基金“多模式多致因下公路独柱墩连续梁桥倾覆倒塌机理与性态控制方法研究（项目编号：52278138）”，已经完成了独柱墩桥梁倾覆的机理研究工作，对倾覆的过程有着深刻的认识，完成了国家西部交通建设科技项目“高墩大跨径弯桥设计与施工技术的研究”（项目编号：200231822329，已结题），项目以高墩大跨径弯连续梁桥和连续刚构桥为研究对象，对弯桥合理构造、预应力效应、温度、收缩徐变、支撑布置、基础变位、整体稳定等影响因素方面开展了深入研究，为本项目桥梁多致因倾覆倒塌机理空间力学分析奠定了理论基础。

③团队针对独柱墩桥梁横向倾覆失稳问题，团队提出了一种基于减震索-钢箍组合体系的桥梁抗倾覆加固设计方法（专利申请号：

202111397870.3), 通过设置若干拉索、钢板和上下锚箱提高桥梁的横向抗倾覆承载力, 并在上锚箱中设置减震阻尼器以减小偏载车辆引起的弯扭耦合振动(图 19)。该研究成果可为独柱墩桥梁抗倾覆设计提供借鉴。

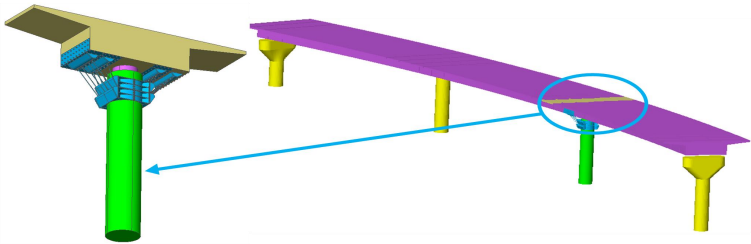


图 19 减震索-钢箍组合体系的桥梁抗倾覆加固设计方法

④团队成员前期采用简化柔性体计算方法进行箱梁桥抗倾覆设计, 该研究成果已纳入现行公路桥梁设计规范体系, 采用简化柔性体的方法相较于刚性倾覆轴法一定程度上考虑了桥梁变形转动对抗倾覆承载力的影响, 然而随着工程的应用和推广, 仍然存在一些科学问题需要进行深入研究, 需进一步完善现行桥梁抗倾覆计算方法。同时, 团队成员参与多起桥梁倾覆事故的调查与分析, 掌握了丰富的第一手资料, 可为本项目中倾覆事故桥梁反演提供依据。

(2) 桥梁抗倾覆分析的汽车荷载模型方面

①团队前期已开展了公路独柱墩桥梁倾覆汽车荷载预分析, 实现了从三维精细化汽车有限元模型到空间十七自由度简化模型的多尺度衍化(图 20)。

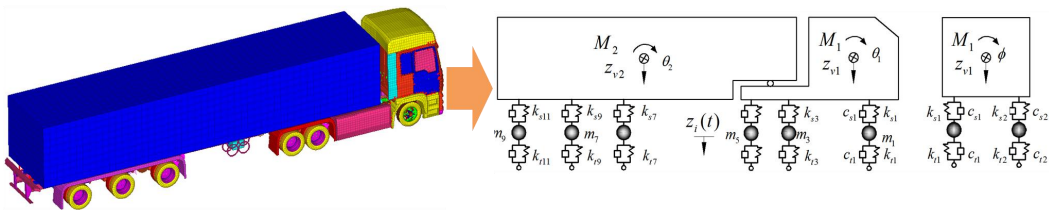


图 20 多尺度空间汽车衍化模型

②团队完成了国家西部交通建设科技项目“桥梁设计荷载与安全鉴定荷载的研究”(项目编号:200831849404,已结题),承担专题三“公路桥梁汽车荷载效应标准值取值方法研究”及专题五“常用桥梁荷载基本组合分项系数取值方法研究”工作,该专题采用概率统计法实现车型和车重的随机模拟,研究成果已经被《公路工程技术标准》(JTG B01-2014)采纳。该项目的车辆模型制定本项目的倾覆荷载研究奠定了理论基础和技术支持。

③团队完成了国家西部交通建设科技项目“高墩大跨桥梁车桥耦合振动及其影响分析研究”(项目编号:200831881232,已结题)。该项目构建了多种车辆与桥梁耦合振动的力学分析模型,实现了公路桥梁车-桥耦合振动分析(图 21),编制了具有自主知识产权的车-桥耦合振动分析程序,在此基础上,申请者开展了大量有关车-桥耦合振动的研究工作,并凝炼了一些核心思想,为本项目考虑车辆与温度等多因素耦合下的倾覆荷载研究搭建了有限元仿真分析与计算平台。

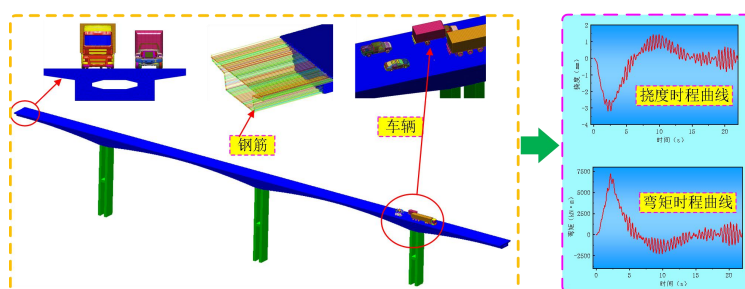


图 21 高墩大跨桥梁车桥耦合数值模型

(3) 桥梁试验方面

①团队在已完成的国家西部交通建设科技项目“高墩大跨径弯桥设计与施工技术的研究”(项目编号:200231822329,已结题)中制

作了1:20的空间缩尺模型，开展了验证分析（图 22a）；在已完成的国家西部交通建设科技项目“高墩大跨桥梁车桥耦合振动及其影响分析研究”（项目编号：200831881232，已结题）中制作了相关的桥梁模型和车辆简化模型（图 22b）；同时，申请者完成了汉中市西二环大桥的模型试验工作（图 22c），通过对三塔自锚式悬索—斜拉协作体系力学性能的研究，验证了桥梁设计和施工方案的合理性，为本项目桥梁倾覆倒塌机理分析奠定了试验基础。



图 22 室内模型试验

2.3 桥梁模板支撑体系设计

（1）危大临时工程计算流程化及标准化

课题组团队成员主持完成了“危大临时工程计算流程化及标准化”项目（项目编号：220228230462，已结题）。该项目针对现浇高墩模板支撑体系结构，开展了桥梁模板支撑体系的智能化及流程化设计技术研发和模板支撑体系的工程量统计与施工成本计算程序编写，完成了模板支撑体系智能设计软件（图 23）的初步研发，同时，该项目指导了西宁曹家堡机场环线高墩现浇桥梁的施工，节省了施工成本。

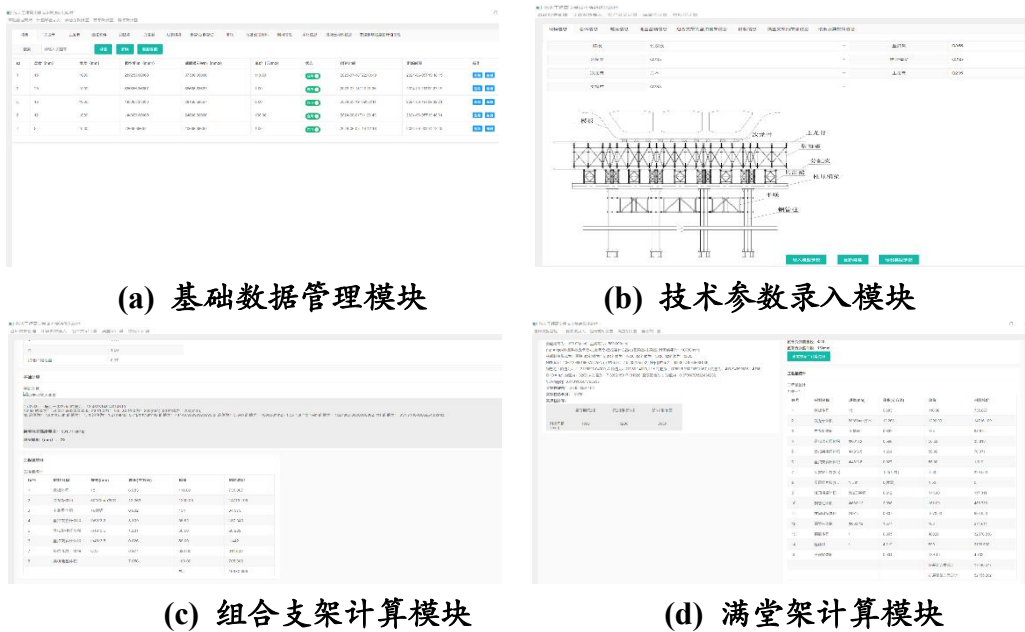


图 23 模板支撑体系优化设计软件

(2) 城市桥梁施工支架稳定监测技术研究

课题组成员主持完成了“城市桥梁施工支架稳定监测技术研究”项目（项目编号：CX1262（5），已结题）。该项目针对碗扣式钢管脚手架在桥梁施工过程中的关键稳定性问题，深入分析了碗扣式钢管脚手架的结构特点、受力机理及在不同施工条件下的稳定性表现，同时，针对脚手架初始缺陷对整体稳定性的影响进行了量化评估，并提出了相应的改进措施和优化设计方案，进一步加深了对脚手架稳定性控制机制的理解。

(3) 建筑施工脚手架强风响应的实测及抗风设计方法研究

课题组成员参与完成了“建筑施工脚手架强风响应的实测及抗风设计方法研究”项目（项目编号为 51808053，已结题）。该项目深入聚焦于桥梁结构施工过程中不可或缺脚手架系统，在复杂多变的自然环境中，特别是强风条件下，系统性地开展了脚手架的稳定性评估、

动态响应特性分析及高效抗风设计策略的探索,通过综合运用现场实测、数值模拟、风洞试验以及理论分析等多种先进技术手段,对脚手架在极端风荷载作用下的受力机理进行了全面剖析,提高了脚手架在恶劣天气条件下的安全性能。

3 参考文献

- [1] 吴文清, 叶见曙, 鞠金荧, 等. 高速公路扩建中桥梁拓宽现状与方案分析[J]. 中外公路, 2007, (06): 100-104.
- [2] 陈康明, 吴庆雄, 陈宝春, 等. 拓宽长联桥梁部分拼接方法与拼接构造试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(11): 99-107.
- [3] 王浩, 朱若溪, 张肇红. 连接刚度对加宽桥梁荷载横向分布的影响分析[J]. 公路, 2013, (07): 143-146.
- [4] 赵宝俊, 谢路, 朱郭瑞. 拓宽方式对拼接加宽桥梁动力性能的影响分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32(06): 88-91.
- [5] 吕韶全, 唐冕, 徐侠. 拼接方式对 PC 连续刚构桥力学性能的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(06): 33-39.
- [6] 王学军. 基础沉降对加宽桥梁上部构造的影响分析[J]. 中国港湾建设, 2006, (06): 11-13.
- [7] 张齐坤, 张广寅, 杨立坡. 某高速公路改扩建工程新旧桥梁基础差异沉降分析及控制[J]. 世界桥梁, 2015, 43(02): 79-84.
- [8] 吴文清, 杨松, 张立志. 梁板桥拓宽后新桥各主梁沉降变形分布模式研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(04): 75-79.
- [9] 温庆杰, 朱玉晓, 王东权. 箱梁桥横向拓宽后的基础沉降附加内力分析[J].

- 中国矿业大学学报, 2011, 40(03): 351-356.
- [10] 王伟. 装配式箱梁桥拓宽中的基础沉降控制标准研究[J]. 中外公路, 2018, 38(05): 93-99.
- [11] 王曦婧. 预应力混凝土连续箱梁拓宽结构的分析研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [12] 方志, 常红航, 阳先全, 等. 混凝土箱梁桥拓宽拼接后收缩和徐变引起的横向效应[J]. 中国公路学报, 2013, 26(06): 65-72.
- [13] 陈康明, 吴庆雄, 陈宝春, 等. 长联预应力混凝土连续梁桥拼接问题分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(04): 1238-1245.
- [14] 熊正强. 预应力混凝土空心板拼宽后纵向接缝受力研究[J]. 中外公路, 2014, 34(05): 191-196.
- [15] 彭可可. 基于混凝土收缩—徐变试验的拼宽结构受力规律研究[J]. 公路, 2022(07): 238-242.
- [16] Kim HY, Jeong YJ. Experimental investigation on behavior of steel-concrete composite bridge decks with perfobond ribs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(5): 463-471.
- [17] Jeong YJ, Kim HY, Koo HB. Longitudinal shear resistance of steel-concrete composite slabs with perfobond shear connectors[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(1): 81-88.
- [18] 聂建国, 赵洁. 钢板-混凝土组合简支梁的试验研究[J]. 土木工程学报, 2008(12): 28-34.
- [19] 杨勇, 祝刚, 周丕健等. 钢板-混凝土组合桥面板受力性能与设计方法研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 135-141.
- [20] Kong FL, Huang PM, Han B, et al. Experimental study on behavior of corrugated steel-concrete composite bridge decks with MCL shape composite dowels[J]. Engineering Structures, 2021, 227: 111399.

- [21]Zhu XX, Takimoto K, Tanaka H, et al. Properties of an innovative shear connector in a steel-concrete composite slab[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 172:106165.
- [22]Liu RY, Yang Y. Research on fatigue performance of steel-plate-concrete composite slab[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 160:107339.
- [23]李法雄. 组合梁斜拉桥空间受力行为及时变效应[D]. 清华大学, 2012.
- [24]张鑫, 范亮, 周锐. 支承方式对弯梁桥的受力影响[J]. 公路交通技术, 2009(06):88-91.
- [25]闫安志, 张迅, 王磊. 有无横隔板曲线梁桥车桥耦合振动的响应分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019, 38(01):126-133.
- [26]李运生, 薛辉, 邱爽等. 钢-混凝土曲线组合箱梁桥横隔板间距研究[J]. 钢结构, 2019, 34(03):50-58.
- [27]张莉. 横隔板及几何特征对钢箱梁畸变效应的影响[J]. 铁道工程学报, 2013(08):68-73.
- [28]江京翼, 鞠玉财, 邓小康. 独柱花瓶墩匝道桥抗倾覆稳定性影响因素分析[J]. 西部交通科技, 2023(06):109-111+178.
- [29]樊健生, 王哲, 杨松等. 钢-超高性能混凝土组合箱梁弹性弯曲性能试验研究及解析解[J]. 工程力学, 2020, 37(11):36-46.
- [30]吴文清, 叶见曙, 万水等. 波形钢腹板-混凝土组合箱梁截面变形的拟平截面假定及其应用研究[J]. 工程力学, 2005(05):177-180+198.
- [31]姜越鑫, 聂鑫, 农兴中等. 抗拔不抗剪连续组合梁受力性能试验研究[J/OL]. 工程力学:1-17.
- [32]李政圆, 樊健生, 马晓伟等. 基于悬吊系统的钢-混凝土组合桥面系试验[J]. 工程力学, 2019, 36(12):134-144.

- [33]唐茂林,李超,陶齐宇等.大跨钢桁结合梁悬索桥现浇桥面板拉应力优化研究[J].桥梁建设,2023,53(03):127-134.
- [34]聂建国,陶慕轩,吴丽丽等.钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J].土木工程学报,2012,45(06):110-122.
- [35]施洲,秦搏聪.2类PBL推出试验破坏机理及承载力影响因素研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(04):943-952.
- [36]LIU Y, XIN H, LIU Y. Experimental and Analytical Study on Shear Mechanism of Rubber-ring Perfobond Connector[J]. Engineering Structures, 2019, 197:109382.
- [37]闫林君,刘麒,张宏等.独柱墩曲线梁桥抗倾覆稳定性分析与加固研究[J].兰州交通大学学报,2023,42(06):7-13+59.
- [38]周勇军,王业路,赵煜等.公路独柱墩桥梁抗倾覆研究综述[J].交通运输工程学报,2022,22(06):46-66.
- [39]姜爱国,杨志.独柱墩曲线梁桥倾覆轴线研究[J].世界桥梁,2013,41(04):58-61.
- [40]熊文,鲁圣弟,龚玄等.独柱墩梁桥倾覆临界状态分析及规范法的适用性[J].中国公路学报,2018,31(03):49-58.
- [41]李会驰,穆少华,赵君黎,等.独柱墩箱梁桥倾覆稳定性验算方法研究[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会2013年全国桥梁学术会议论文集.2013:742-749.
- [42]李会驰,袁洪,赵君黎.《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTG D62 修编简介[C].第十七届全国混凝土及预应力混凝土学术会议暨第十三届预应力学术交流会.南京:中国土木工程学会,2015:1-8.

- [43]梁桥倾覆机理与受力特征 [EB/OL]. 2020-01-10[2020-01-10].
<https://mp.weixin.qq.com/s/ufJwkEogacKcgnb-sWWAHw>.
- [44]Lavelle. FH, Boick. JS. A program to analysis curved girder bridge[J].
Engineering Bullentin No 8 University of Rhode Island, Kingston,
1965(12):22-29.
- [45]Yoo CH. Matrix formulation of curved girders[J]. ASCE, 1979, 105(6):77-79.
- [46]Yoo CH. Flexural-torsional stability of curved beam[J]. ASCE, 1982,
108(6):221-226.
- [47]薛爱新, 李志勇, 王洁光等. 特殊荷载作用下独柱墩匝道桥抗倾覆稳定性研究[J]. 公路工程, 2018, 43(04):140-144+179.
- [48]Ebeido, Tarek I. Behavior of horizontally curved reinforced concrete
beam-and-slabbridges[J]. Alexandria Engineering Journal, 2006, 45(5):569-593.
- [49]童兵. 中墩独柱支撑小半径曲线梁桥受力特性及优化分析[D]. 长沙理工大学, 2017.
- [50]祁志伟. 城市连续箱梁桥横向抗倾覆稳定性分析[D]. 中南大学, 2014.
- [51]黄志诚, 李东洋, 郭馨艳. 大跨径简支钢箱梁弯桥抗倾覆性能研究[J]. 公路工程, 2019, 44(05):14-17+141.
- [52]郭建. 实测缺陷对扣件式钢管脚手架结构性能的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [53]何夕平, 王璜, 赵雪会. 扣件不同紧固力矩对工字钢悬挑钢管外脚手架变形影响分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(02): 196-201.
- [54]陈东, 丁克伟, 何夕平. 非均布荷载下扣件式脚手架的随机缺陷稳定分析[J].
西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(05): 661-668.
- [55]姚旋. 扣件式高大模板支架初始缺陷计算方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

- [56]舒赣平, 刘伟, 陈绍礼. 半刚性钢框架的直接分析方法理论研究[J]. 建筑学报, 2014, 35(08): 142-150.
- [57]刘耀鹏, 杜左雷, 陈绍礼. 直接分析法在抗震设计中的运用[J]. 土木工程学报, 2018, 51(11): 70-76.
- [58]Yu WK, Chung KF. Prediction on load carrying capacities of multi-storey door-type modular steel scaffolds[J]. Steel and Composite Structures, An International Journal, 2004, 4(6): 471-487.
- [59]吕磊, 张文格, 袁义华, 等. 基于有限元分析与 BIM 的模板支架模型的建立与分析方法[P]. 河南省: CN112163256A, 2021-01-01.
- [60]武竹青, 万祖勇. 模板支架排布的处理方法、装置和电子设备[P]. 北京市: CN110851901A, 2020-02-28.

三、 实施方案

1 拟解决的关键问题

在城市空间约束下, 高墩桥梁的建设与拼宽面临结构受力复杂、施工条件苛刻、安全风险高等多重挑战。为此, 本项目拟重点突破以下三项关键技术:

①高墩桥梁拼宽工程中多型式结构协同受力机制与变形智能监控研究;

②提出曲线钢混组合梁桥抗倾覆稳定性计算方法;

③BIM 技术驱动下的复杂大型模板支撑体系智能化图纸信息识别及三维可视化自动建模技术。

三项研究分别从结构受力管控、抗倾覆稳定验算、施工建模智能化维度形成了桥梁工程相关技术研究的有机整体。

2 主要研究内容及实施方案

2.1 主要研究内容

2.1.1 考虑主梁刚度差异的既有城市高墩桥梁拼宽技术

(1) 不同主梁型式及连接方式的高墩主梁拼宽方法及其力学性能

①典型拼宽方式与连接构造研究

系统梳理国内外高墩箱梁桥及钢-混组合梁桥拼宽工程案例，归纳横向连接方式、拼缝构造与施工工艺特征，形成适用于高墩桥梁的主梁型式与连接方式组合库。

②拼宽结构整体受力性能分析

采用 MIDAS/ANSYS 等建立旧桥与拼宽后新旧主梁的统一空间有限元模型，重点分析不同连接方式下的横向荷载分布、挠度协调和动力特性，并对施工阶段与成桥阶段的内力重分布和变形规律开展对比研究。

③横向拼缝构造与施工要点优化分析

针对分析中暴露出的局部应力集中和变形协调不足问题，提出简化的拼缝构造优化方案（如横隔梁设置、局部加劲等）及施工要点，并结合依托工程的有限监测数据进行合理性验证，形成工程化设计与施工建议。

(2) 多因素耦合作用下的高墩结构响应及沉降评价指标

①多因素耦合机理研究与简化分析模型构建

调研相关规范及 CEB-FIP、ACI 等常用徐变与收缩模型，梳理

不同地基条件下高墩-基础协同变形的典型特征，选取少量控制组合工况，建立高墩-基础-主梁的简化耦合分析模型。

②高墩变形对主梁受力与变形的影响分析

利用有限元程序开展阶段性与长期分析，获取高墩在弹性及非弹性变形阶段的变形演化特征，分析不同沉降情形下新老主梁连接区内力、挠度与线形变化，提炼沉降对结构响应的敏感性指标。

③高墩沉降控制指标及评价方法研究

结合依托工程有限的监测数据对简化模型进行参数修正与对比验证，在此基础上提出适用于高墩拼宽桥梁的沉降控制指标（如允许不均匀沉降差、沉降速率等）及简明可行的评价流程。

（3）桥梁拼宽全过程变形实时监测技术

①监测技术路线与系统方案研究

调研光纤传感、GNSS、全站仪、机器视觉等技术在桥梁变形监测中的应用现状与精度水平，结合高墩拼宽工程环境与成本约束，优选“图像变形监测 + 局部水准/位移计”的混合监测方案，明确测点布设原则和关键测点位置。

②二维变形实时监测系统研发与工程应用分析

利用现有工业相机及通用数据采集设备，开发简化的图像采集与处理模块，实现拼宽施工及成桥运营阶段主梁端部和高墩截面的二维变形实时监测；在依托工程中开展实桥应用，验证监测系统的精度和稳定性。

③监测数据分析与沉降预警指标研究

选取工程上成熟的沉降预测方法对监测数据进行趋势分析,结合第二项研究内容中提出的沉降控制指标,提出适用于高墩拼宽桥梁的沉降预警阈值和简易判读方法,为主动拼宽调节提供实时依据。

2.1.2 城市高墩小半径曲线钢桥设计与施工方法研究

(1) 城市高墩小半径新型钢混组合梁结构研发与力学性能

① 新型曲线钢混组合梁理论研究

通过对比新型曲线钢混组合梁与传统组合梁的差异以明确其典型特征,进而采用板壳与实体单元建立精细化模型以揭示特殊局部及界面的应力分布规律,最终基于对主要构件应力组成与控制因素的分析,提出新型梁体的设计方法。

② 主要构造参数对新型组合梁力学性能影响分析

通过理论分析建立构造参数与力学性能的定性关系,并以此为基础,采用数值仿真模拟施工与服役阶段的多种荷载工况,系统探究顶板厚度、栓钉数量、横隔板间距等关键参数对钢箱梁顶板、栓钉、结合面应变及梁体位移的影响规律。

③ 新型曲线组合梁力学性能优化

基于响应面法对新型曲线组合梁的关键构造参数进行优化设计,进而通过仿真分析对比各优选方案的结构响应,并综合考量施工便捷性,最终提出了 2-3 种最优设计参数组合,为该类结构的设计提供理论依据与技术支撑。

(2) 曲线组合结构桥梁抗倾覆计算方法

① 曲线钢混组合梁桥整体倾覆理论研究

通过建立曲线组合梁桥在倾覆临界状态下的力学模型,基于解析法对其抗弯与抗扭刚度进行修正,进而系统探究了桥梁在极限荷载作用下的力学响应与变形规律。

②曲线钢混组合梁桥倾覆有限元模型修正及理论验证

基于梁格法建立曲线钢混组合梁桥的有限元模型,并利用实桥试验数据对其进行修正,最终通过有限元分析验证了其倾覆理论。

③曲线钢混组合梁桥抗倾覆影响因素分析

通过分析不同作用对桥梁整体倾覆的影响,进而基于桥梁结构的多样性,研究倾覆模型中的关键性参数。

④曲线钢混组合梁桥抗倾覆稳定性计算方法研究

提出曲线钢混组合梁桥抗倾覆稳定性计算方法。

2.1.3 现浇高墩桥梁模板支撑体系智能设计方法与软件研发

(1) 集成初始缺陷评估的模板支撑体系计算方法研究

①初始缺陷对现浇桥梁模板支撑体系承载性能影响的精准量化分析与评估;

②考虑随机缺陷的现浇桥梁模板支撑体系设计方法研究。

(2) BIM 技术驱动下的模板支撑体系智能化设计软件系统研发

①考虑施工安全与经济的高墩现浇桥梁模板支撑体系的智能设计技术研究。

2.2 实施方案

2.2.1 考虑主梁刚度差异的既有城市高墩桥梁拼宽技术

(1) 不同主梁型式及连接方式的高墩主梁拼宽方法及其力学性

能

①典型拼宽方式与连接构造研究

为系统构建适用于高墩桥梁的主梁型式与连接方式组合库，本研究将采用理论分析、数值模拟与案例归纳相结合的研究路径。首先，全面搜集与梳理国内外高墩箱梁桥及钢-混组合梁桥的拼宽工程实例，从结构型式、横向连接方式（如上部刚性连接、铰接等）、拼缝构造细节及施工工艺等维度进行系统归纳与特征提取，建立多维特征数据库。在此基础上，基于梁格理论和空间有限元分析方法，对典型拼宽模式开展精细化数值模拟，建立能准确反映新旧主梁刚度差异及连接构造细节的参数化有限元模型，系统分析不同连接方式下的荷载横向分布规律、拼缝受力性能及长期收缩徐变效应。最终，通过案例数据与模拟结果的交叉验证与综合分析，形成一套科学合理、适用于高墩不等刚度桥梁拼宽的主梁型式与连接方式组合库，为后续拼宽设计与施工提供理论依据与技术支持。具体实施步骤如下图 24 所示：



图 24 典型拼宽方式与连接构造研究流程

②拼宽结构整体受力性能分析

首先，分别针对旧桥拼宽前以及不同横向连接方式拼宽后桥梁各自的荷载横向分布系数分布规律进行研究。其次，基于此规律通过数

值模型进行结构内力分析,计算桥梁在各个连接形式下的弯矩、剪力、轴力等内力的分布。根据结构力学理论,采用有限元方法进行挠度分析,或利用梁板理论等简化方法进行估算计算桥梁在各个连接形式下的挠度分布。最后,对桥梁横向拼宽前的旧桥、拼宽后的新旧混合桥梁进行动力分析,并对比桥梁因素参数在拼宽前后的变化和特征。开展不同连接形式的连接模型各阶竖向频率的大小关系研究。从动力分析角度来看,不同连接形式的连接模型各阶竖向频率的大小关系,从而反映不同连接模型的整体刚度,基于活载作用下的结果分析,确定拼宽桥梁采用的连接方式。具体实施步骤如下图图 25 所示:



图 25 拼宽结构整体受力性能分析研究流程

③横向拼缝构造与施工要点优化分析

针对数值模拟与案例分析中暴露出的局部应力集中与新旧结构变形协调性不足等关键问题,本研究将提出系统性的拼缝构造优化方案与施工控制对策。首先,基于结构力学原理与节点受力分析,提出以增强横向联系为核心的简化构造优化措施,包括在拼缝区域增设横隔梁以提高整体刚度、在钢混结合段设置局部加劲肋以分散应力峰值、优化后浇带布置与浇筑时序以改善收缩徐变差效应等。在此基础上,结合施工力学与过程控制理论,明确各优化方案的关键施工工艺

参数与控制要点，如横隔梁预应力张拉时机、加劲肋焊接顺序、混凝土界面处理标准等。

为验证优化方案的有效性，将依托实际工程开展现场监测试验，在拼缝关键部位布设应变传感器与位移计，实时采集施工阶段及成桥初期的应力与变形数据。通过将监测数据与优化后的有限元模拟结果进行对比分析，验证构造方案在缓解应力集中、改善变形协调方面的实际效果，并对理论模型进行修正与完善。最终，基于“问题识别-方案优化-监测验证”的全流程研究，形成一套针对高墩不等刚度桥梁拼宽的设计指南与施工控制建议，为同类工程的标准化、精细化实施提供可靠的技术支撑。具体实施步骤如下图 26 所示：

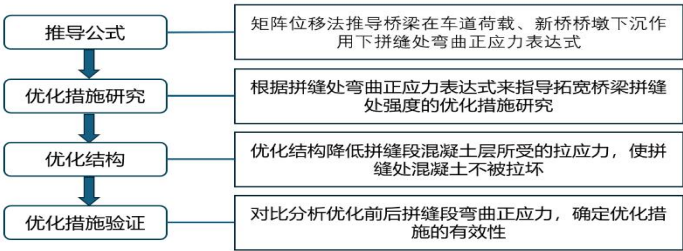


图 26 横向拼缝构造与施工要点优化分析流程

（2）多因素耦合作用下的高墩结构响应及沉降评价指标

①多因素耦合机理研究与简化分析模型构建

为系统研究长期荷载与环境耦合作用下高墩结构的时变变形机理，本项目将基于 CEB-FIP、ACI-209 等国际通用规范及混凝土收缩徐变理论，开展高墩-基础协同变形全过程分析。首先，系统梳理不同地基条件（如软土、砂卵石、岩基等）下高墩与基础的典型协同变形特征，明确沉降控制的关键影响因素。在此基础上，选取最具代表性的自重、收缩徐变、温度梯度及活载等控制工况组合，建立高墩-

基础-主梁体系的简化耦合分析模型。该模型将采用空间梁格理论与地基弹簧等效方法,通过 MIDAS Civil 等有限元平台实现新旧结构混凝土不同龄期特性的精确模拟,重点分析新建高墩在长期效应下的弹性变形发展规律及其对既有结构受力状态的累积影响。通过参数化分析与理论推导,揭示高墩在不同地基条件下的沉降机理与变形模式,为高墩桥梁的合理设计方法与拼宽方案选择提供定量化理论依据。具体实施步骤如下图 27 所示:

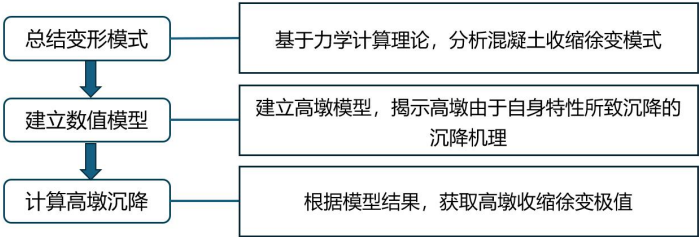


图 27 多因素耦合机理研究与简化分析模型构建流程

②高墩变形对主梁受力与变形的影响分析

通过数值模拟,建立精细化的高墩自身及基础相互作用模型,模拟桥墩自身与基础沉降耦合作用下的结构动力响应过程,研究在不同的载荷作用下(如自重、活载、温度变化、地震作用),获取高墩弹性变形和非弹性变形数值,探究高墩沉降的内在机理和主控因素;设计并进行缩尺模型试验,验证数值模型的准确性,基于前述有限元仿真结果以及缩尺试验数据,结合现有混凝土收缩徐变公式及地基承载能力计算公式,总结出适用于拼宽桥梁的桥墩承载能力半经验半理论计算公式,分析失稳的机理和条件,确定高墩沉降阈值;根据高墩变形结果计算新老主梁连接处应力、挠度与线性变化,分析数据探究弹性及非弹性变形对新老主梁连接处应力分布的影响,揭示不同变形模

式下连接处应力分布的差异和规律,从而评估连接处的受力状况和安全性能。具体实施步骤如图 28 所示:



图 28 高墩变形对主梁受力与变形的影响分析流程

③高墩沉降控制指标及评价方法研究

通过现场监测及工程案例调研,搜集并整理高墩在桥梁拼宽前后的沉降数据,研究现场高墩沉降模式及其变化趋势,明确沉降规律和关键影响因素;将沉降测试与耦合作用模型作对照,揭示多因素作用下高墩损伤及沉降机理,提出高墩沉降控制指标及评价方法,分析相关指标随桥墩变形的变化规律,并对其变化曲线进行插值,得出高墩沉降安全限值,为桥梁拼宽过程中桥墩加固与防护措施优化提供科学依据;基于上述研究及理论,揭示多元条件下高墩损伤及沉降机理,提出高墩稳定性量化指标及评价方法,基于线性插值、多项式插值及指数平滑等计算方式,对相关指标随桥墩变形的变化曲线进行插值,得出桥墩变形的安全限值,为桥梁拼宽过程中桥墩加固与防护措施优化提供科学依据。具体实施步骤如下图 29 所示:

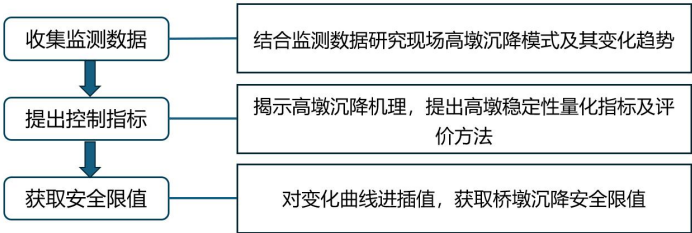


图 29 高墩沉降控制指标及评价方法流程

2.2.2 城市高墩小半径曲线钢桥设计与施工方法

(1) 城市高墩小半径新型钢混组合梁结构研发与力学性能

① 新型曲线钢混组合箱梁桥理论研究

通过分析曲线梁的静力平衡方程、几何方程、基本微分方程，得出曲线组合梁外力与内力受力关系，建立构造参数与力学性能之间的定性关系，探明各参数对结构性能的影响机制，为后续数值仿真提供指导。

针对曲线新型钢混组合结构的复杂受力特性，采用多尺度建模方法：选用板壳单元来模拟钢混组合梁主体部分以分析桥梁整体截面的力学响应；在剪力连接件区域（如栓钉、PBL 剪力键）及应力集中区域（如横隔板与腹板连接处），采用实体单元进行精细化建模，精确捕捉界面剪力传递行为及局部应力分布特征。

主梁的关键部位进行精细网格划分，考虑材料非线性、几何非线性等因素，以提高模型的精确性，确保模型能够准确反映关键部位的应力状态，研究新型曲线钢混组合梁设计方法。

② 新型曲线钢混组合箱梁桥力学性能的敏感性参数分析

基于工程经验和理论分析，确定钢顶板厚度、横隔板厚度及间距、栓钉间距等关键构造参数作为敏感性参数。

确定施工阶段（如浇筑混凝土等）、服役阶段（如恒载、活载、温度效应等）的多种荷载工况作为敏感性参数进行模拟分析，得到不同敏感性参数下的组合箱梁顶板应变、栓钉应变、结合面应变以及梁

体不同位置处竖向位移等静力响应,探明各构造参数对新结构受力特性的影响规律,得到新型结构受力性能随各种构造参数改变的内在趋势,明确各参数的变化区间,为构造优化奠定基础。

③新型曲线组合梁力学性能优化

在上述已获得的受力性能随构造参数变化规律的基础上,基于响应面优化理论,通过回归方程拟合、响应曲面等的绘制,建立各设计变量组合与优化目标的显式函数关系。采用二次多项式回归模型拟合数据,并通过方差分析验证模型的显著性,确保优化模型的可靠性与精度。

在构造参数初始值和合理取值范围的约束下,采用优化设计软件构建曲线钢混组合梁的响应面优化模型,分别以钢箱梁顶板厚度、剪力键间距、横隔板厚度为三个优化参数,以钢箱梁最大应力、混凝土拉应力、全寿命周期费用为优化目标,采用多目标优化算法(如NSGA-II、MOPSO)进行求解,确保各优化目标达到最优平衡。

通过设置多个约束条件(如应力限值、挠度限值、施工可行性)进行多目标的优化设计,分析多种较优设计参数组合方案,并结合实际施工的合理性提出 2-3 种最优设计参数组合方案,为后续该类新型结构的设计提供理论及技术支持。

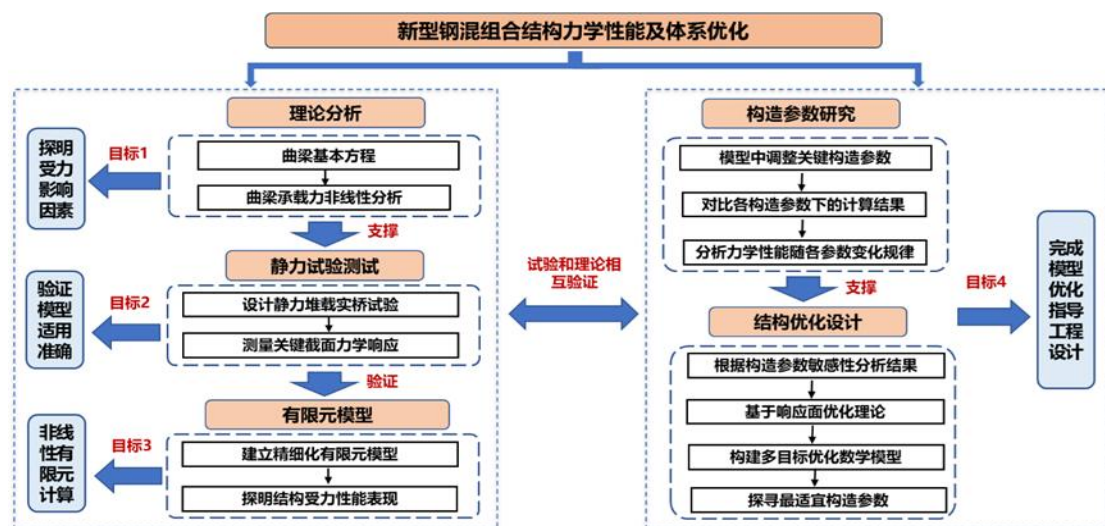


图 30 城市高墩小半径新型钢混组合梁结构研发与力学性能试验技术路线

(2) 曲线组合结构桥梁抗倾覆计算方法

本通过数值方法分析联长、约束体系和墩高等结构因素，以及恒载、活载和温度等荷载因素对曲线钢结构桥梁的倾覆稳定性的影响。在分析结果的基础上，提出适用于该类结构的简化计算方法，以便工程实践中的应用。选用一联高墩曲线大跨径连续钢箱梁结构进行试验测试，并将试验结果与数值分析结果进行对比，验证抗倾覆计算方法的准确性与可靠性。本研究将为城市立交匝道桥设计提供针对独柱花瓶墩倾覆问题的深入理解，为工程实践中相应结构的设计与施工提供科学依据和技术支持。通过对结构因素和荷载因素的综合分析，可提出合理的设计建议，从而提高城市桥梁的安全性和稳定性。各研究内容所采用的研究方法如下：

①曲线新型钢混组合箱梁桥整体倾覆理论研究

现有的文献中，曲线梁桥倾覆临界状态的力学模型，其受力特性视为空间一次超静定结构体系，类比为“简支+悬臂”的梁结构形式。

采用结构力学与弹性力学的方法，对“简支+悬臂”的梁结构形式

进行受力分析,通过力学叠加原理系统地解析恒载、活载以及空间变形之间的内在联系。

基于欧拉-伯努利梁理论确定箱梁扭转时等效竖向抗弯惯性矩,等效横向抗弯惯性矩以及等效抗扭惯性矩,本结构采用钢混组合形式,混凝土与钢结构的弯扭刚度有差异因此通过平行轴定理对曲线梁桥倾覆临界状态的力学模型中混凝土结构的弯扭刚度进行修正,将修正后的抗弯刚度与抗扭刚度,代入恒载、活载和空间变形的关系式当中,最终得出适合曲线钢混组合梁桥倾覆临界状态的力学模型。

将修正后的抗弯刚度与抗扭刚度,代入恒载、活载和空间变形的关系式当中,最终得出适合曲线钢混组合梁桥倾覆临界状态的力学模型。。

②曲线新型钢混组合箱梁桥足尺试验研究以及有限元模型修正

建立试验段桥梁有限元模型,根据规范要求进行数值仿真分析,根据计算结果确定最佳试验方案和试验工况。

对试验梁段严格按照试验方案采用分级加载工况进行试验,获得各类荷载工况下曲线钢混组合梁桥跨中位置静力响应数据以及支座处内力响应数据。在钢混组合梁各控制截面上应力较为集中的区域沿竖向布置应变计,测试静力荷载试验过程产生的应变;监测桥梁在各种加载工况下的各跨跨中的竖向位移,分析实桥测得的应变、位移数据,得到混凝土-钢箱组合梁沿竖向的应变(力)分布情况和变形情况。采用高精度激光位移传感器测得支座处竖向位移,根据支座材料的弹性模量最终得出,支座的内力变化

将测试结果与模型按相应荷载作用下的计算值作比较,验证有限元模型的准确性,并修正有限元计算模型。在有限元模型当中通过施加荷载得出桥梁的变形,与内容一中理论值进行对比,验证曲线钢混组合梁桥倾覆临界状态的力学模型的准确性,并为后续曲线钢混组合梁桥倾覆计算方法研究提供数据支撑。

③曲线钢混组合箱梁桥抗倾覆影响因素分析

基于 ANSYS/LS-DYNA 重启动模块,对模型中主梁的所有节点组施加纵桥向均匀温度作用,分析梯度温度与汽车荷载共同作用对曲线钢混组合梁连续梁桥整体抗倾覆承载能力的影响;

考虑收缩徐变对结构的影响,采用 ANSYS/LS-DYNA 建立试验梁的有限元模型,钢筋和混凝土采用分离式方法建模,分析收缩徐变效应对曲线钢混组合梁连续梁桥整体抗倾覆承载能力的影响;

基础变位现象均以支座沉降代替,依据 15 规范和 18 规范。建立桥梁精细化有限元模型,施加桥梁计算工况,分析支座沉降作用对曲线钢混组合梁连续梁桥整体抗倾覆承载能力的影响。

基于 ANSYS/LS-DYNA 分别建立不等跨钢混连续梁桥精细化有限元模型,保持跨径不变,通过改变曲率半径以及改变支座的间距,研究圆心角,支座间距对桥梁整体倾覆模式下的倾覆轴的影响。

桥梁弯曲和扭转作用通常相互联系,保持主梁抗扭刚度不变和抗弯刚度不变的条件下,分别通过调整主梁抗弯刚度和主梁抗扭刚度,分析结构因素对曲线钢混组合梁桥整体抗倾覆承载能力的影响,确定各作用因素和不同结构因素对于倾覆稳定性的影响。

④曲线钢混组合梁桥抗倾覆稳定性计算方法研究

根据研究内容（3）各作用因素和不同结构因素对于倾覆稳定性的影响规律，对原始倾覆轴的（圆心角，抗弯刚度，抗扭刚度，支座间距等）参数进行修正，从而获得更精确的倾覆稳定性分析结果，提出一种支座与原始倾覆轴之间距离变化的修正方法。

考虑了桥梁各支座在不同工况下与原始倾覆轴的相对位置，通过分析各支座与倾覆轴之间的距离及其变化趋势，得出修正倾覆轴相对于原倾覆轴的位置偏移。

根据这些变化规律，可以进一步拟合出修正倾覆轴与作用、结构参数之间的数学关系式。最终确定出适用于曲线钢混组合箱梁结构的抗倾覆稳定性计算方法。

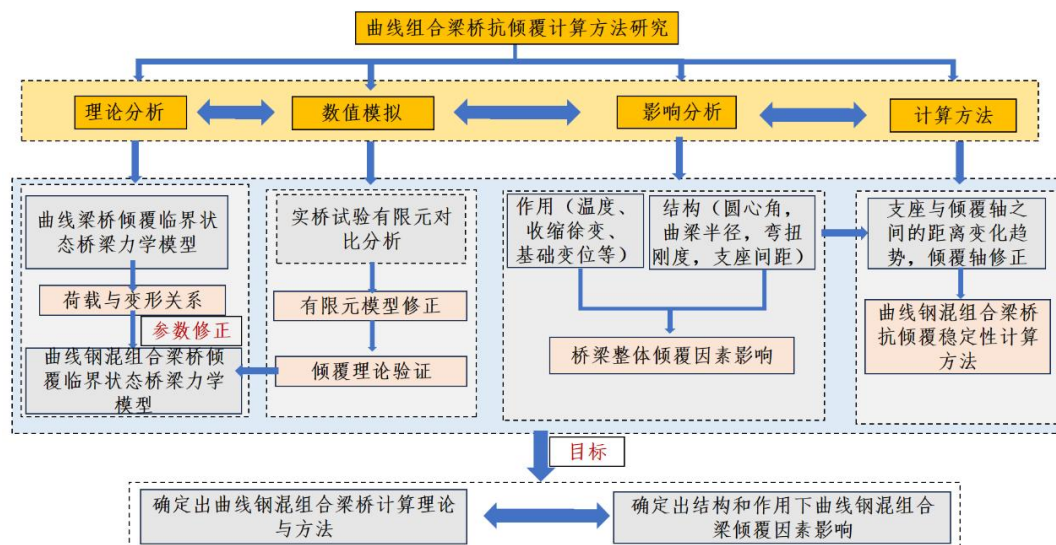


图 31 城市高墩小半径新型钢混组合梁结构研发与力学性能试验技术路线

2.2.3 现浇高墩桥梁模板支撑体系智能设计方法与软件研发

（1）集成初始缺陷评估的模板支撑体系计算方法

结合依托项目，采用理论分析、现场试验和数值模拟相结合的方法，综合考虑整体初始缺陷、构件初始缺陷对模板支撑体系的影响，

同时，进行线性屈曲分析、二阶 P- δ 弹性分析，从结构的失稳模式、最大节点位移和极限承载力的角度全面说明初始缺陷对现浇模板支撑体系的多维度影响，完成初始缺陷对现浇桥梁模板支撑体系承载性能影响的精确量化分析与评估。同时，提出一种考虑随机缺陷的现浇桥梁模板支撑体系设计方法。

①初始缺陷对现浇桥梁模板支撑体系承载性能影响的精准量化分析与评估

针对模板支撑体系构件的初始缺陷，采用理论、试验、模拟相结合的方式进行定量化研究。基于钢结构稳定理论，通过 Perry 公式，推导稳定系数、正则化长细比与等效初始缺陷的关系，并利用轴心受压稳定系数反推构件的综合初始缺陷，得到综合初始缺陷与长细比曲线，取综合初始缺陷最大值作为综合初始缺陷的建议值。在此基础上拟合出综合初始缺陷的数学模型，并给出在不同初始弯曲下的综合初始缺陷建议值。基于经典足尺试验结果和有限元分析给出结构整体初始缺陷施加方式和建议取值。具体实施步骤如图 33 所示：

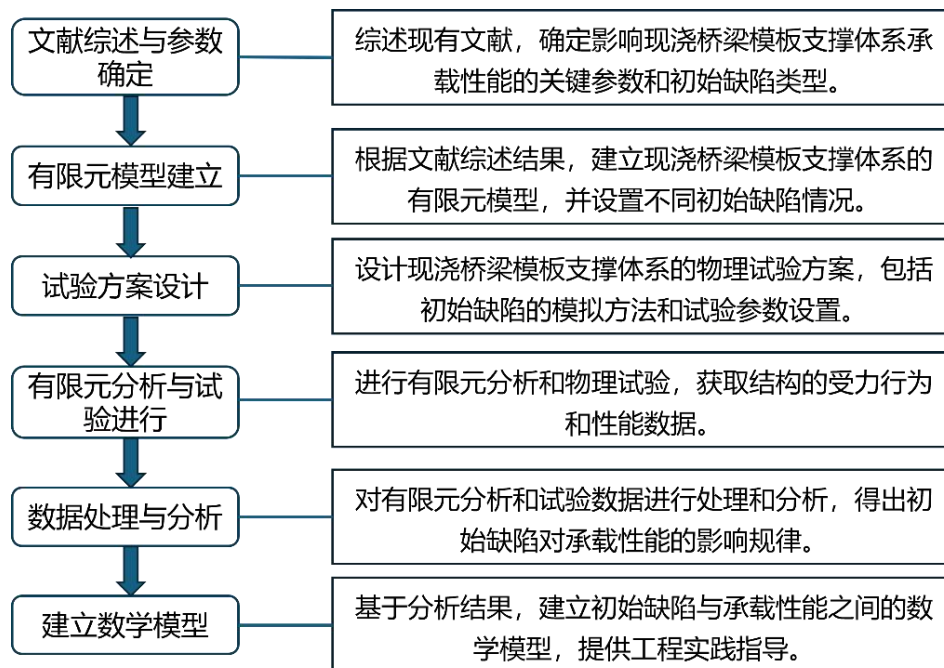


图 32 初始缺陷对现浇桥梁模板支撑体系承载性能影响的分析流程

②考虑随机缺陷的现浇桥梁模板支撑体系设计方法

基于桥梁模板支撑体系的结构特点和受力情况，分析可能存在的随机缺陷类型，如材料缺陷、施工缺陷等，建立考虑随机缺陷的模板支撑体系精细化有限元模型，分析其内力分布规律并结合实地测量的结构变形形式，揭示初始缺陷的影响机理，开发一种能够识别和处理随机缺陷的高级设计方法。同时考虑使用先进的计算机模拟技术，对不同随机缺陷情况下的桥梁模板支撑体系进行仿真分析，并验证所提出的设计方法的准确性和有效性，通过实验数据或现有桥梁工程案例进行验证。根据验证结果，对设计方法进行优化和改进，以提高其适用性和可靠性，并通过合适的数学方法，对随机缺陷的分布、特性进行统计学分析。具体实施步骤如图 34 所示：

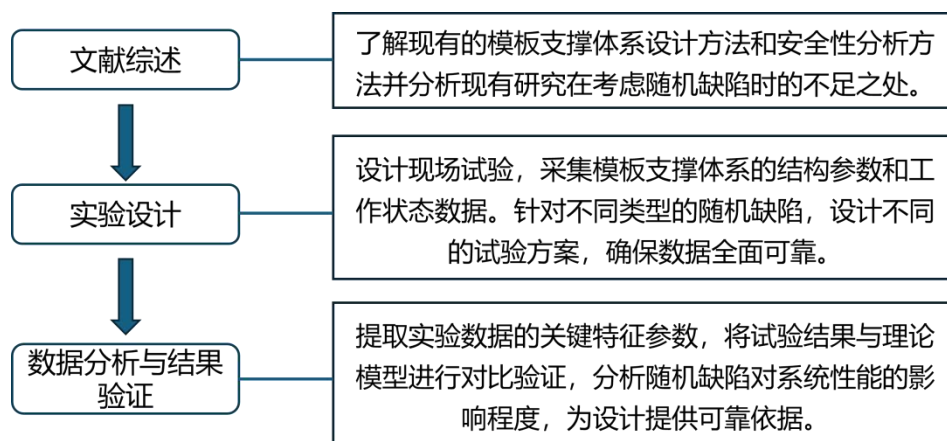


图 33 考虑随机缺陷的现浇桥梁模板支撑体系设计方法研究流程

(2) BIM 技术驱动下的模板支撑体系智能化设计软件系统研发

结合依托项目，基于 BIM 技术与 python 代码编写程序，开发一套模板支撑体系的智能化设计系统。综合考虑盘扣式满堂支架体系和钢管柱—贝雷梁组合支架体系两种常用的现浇桥梁模板支撑体系，并考虑扩展基础、桩基础等架体立柱常用的基础形式，通过组合形成不同的模板支撑结构，按照规范要求与实际工程需要对各支撑结构的形状参数和结构参数进行选取，以结构体系的安全性和经济性为评价指标，对比不同的支撑结构并进行优选，最终获得同时满足安全性与经济性需要的现浇桥梁模板支撑结构，完成模板支撑体系的方案交底。

①考虑施工安全与经济的高墩现浇桥梁模板支撑体系的智能设计技术

基于机器学习与人工智能技术、虚拟现实技术及智能算法，同时确定模板支撑体系中各构件数量的统计方法，研发软件中模板支撑体系施工成本的标准智能化计算模块。该模块分为信息统计、设计方案工程量与施工成本计算、设计方案优化、设计方案比选四部分。系统自动对所有结构类型的模板支撑体系设计方案中面板、次楞、主楞

等构件的数量和尺寸以及各个构件选用的材料以及材料的单价进行统计，通过这些信息来计算各设计方案的工程量与施工成本。根据计算结果先在同一结构类型的模板支撑体系设计方案之间采用智能算法进行迭代优化，最终得到该结构类型的最优方案。重复上述操作，直到将所有结构类型的设计方案全部迭代优化后，得到每一种结构类型的最优方案。最后在所有结构类型的最优设计方案之间进行比选，确定模板支撑体系的最优设计方案。

同时，结合《建筑工程模板支撑系统安全技术规程》等相关规范与已有的设计案例，利用人工智能技术与元启发算法，研究可快速对模板支撑体系进行设计的智能化计算流程，并开发软件中相应的计算模块。结合输入参数，然后按照设计的智能化计算流程进行计算，根据计算结果对现浇桥梁模板支撑体系进行智能化布置与设计，从盘扣式满堂支架体系和钢管柱—贝雷梁组合支架体系中创建多套符合规范安全与构造要求的成本较低的模板支撑体系设计方案。具体实施步骤如图 34 所示：

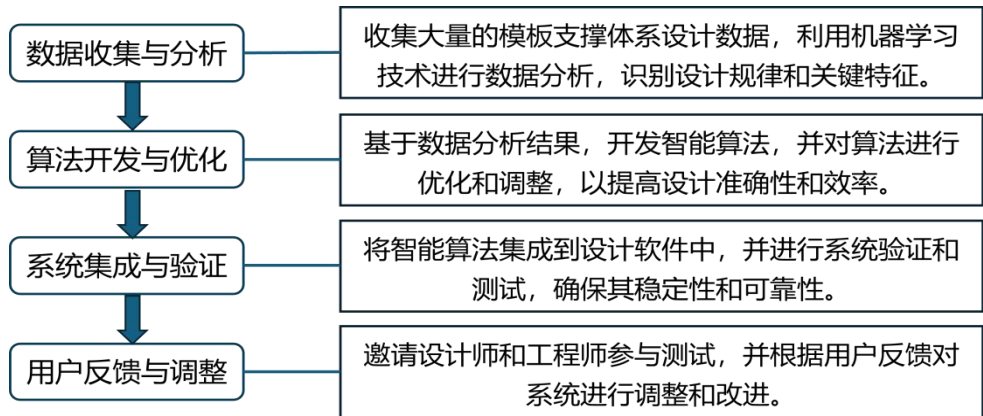


图 34 考虑施工安全与经济的高墩现浇桥梁模板支撑体系的智能设计技术研究

流程

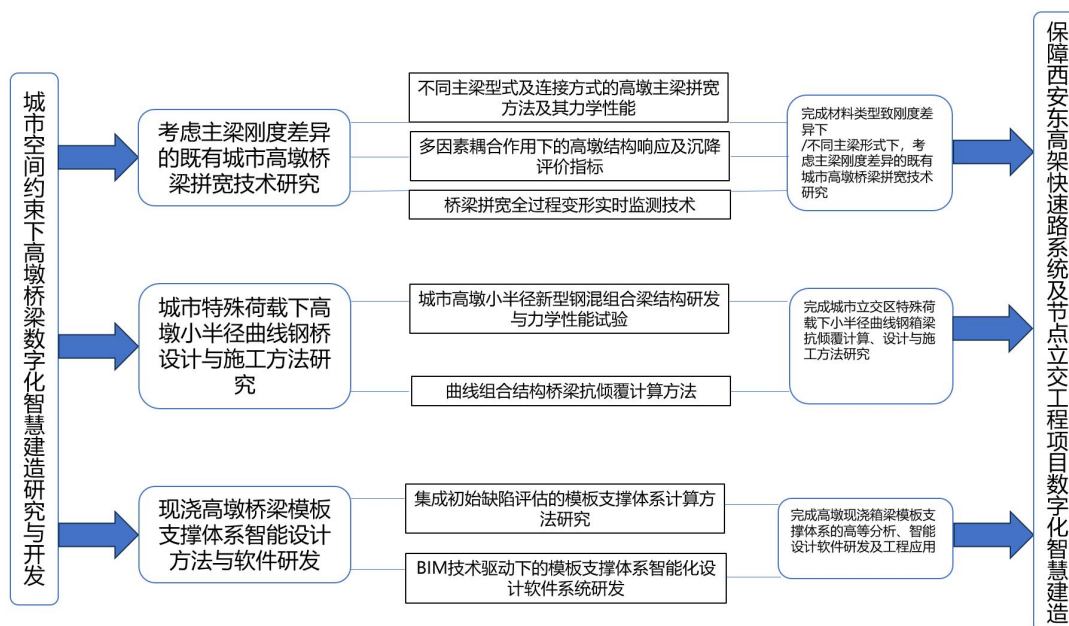


图 35 技术路线

3 后续技术改造或基本建设计划的衔接

首先,由软件研发及试验实施负责单位对项目研究成员进行技术培训,确保各个操作人员具备相应的操作技能。

其次,通过总体项目负责单位做好进度管理,在项目各个阶段中,做好相应的进度管理工作、质量控制工作以及检查验收工作,确保各个阶段的工作按时完成、工作质量达标、操作复合标准规范。

最后,相应软件系统的后续技术改造根据项目实施过程中所遇见的问题及不足,由相应软件系统的负责单位进行相应技术改造。

四、项目承担单位及参加单位概况

1 单位概况

陕西高速机械化工程有限公司,属陕西交通控股集团有限公司全资子公司。公司成立于 1996 年,注册资本 100010 万元,高新技术企

业，省级技术中心，专业从事高速公路、国道干线、地方公路建设与养护施工。主要业务范围涉及：公路工程施工与养护、公路工程材料研发、生产、销售及进出口贸易、绿化生态环保工程、市政工程、水利工程、房屋建筑工程的施工建设。

公司拥有公路工程施工总承包特级资质，工程设计公路行业甲级，市政公用工程总承包一级资质，路基、路面、桥梁、隧道工程专业承包一级资质，路基、路面、桥梁、隧道养护甲级资质、交通安全设施养护资质，公路工程综合试验检测乙级，建筑工程施工总承包二级，消防设施工程专业承包一级，消防维保与评估等 53 项资质，先后参与数十条高速公路、国省干线的新（改）建以及省内收费站改扩建项目施工，累计完成 4000 余公里线路养护施工。共荣获国家及省部级奖项 21 项，其中“国家优质工程奖”2 项、“李春奖”2 项、“中国公路养护工程奖”1 项。

公司现有在职员工 1200 余人，具有正高级职称 8 人，副高级职称 210 人，中级职称 772 人。具有一级注册建造师 87 人，试验检测人员 61 人，公路、市政、建筑、养护等各类施工专业技术人员 900 余人。公司一直致力于养护先进技术的推广使用，开展温拌橡胶沥青、纤维沥青抗滑表层、养护型乳化剂、裂解油生物沥青、超薄罩面、路面三维精细化等科研项目，拥有精表处、冷再生、超薄磨耗层、橡胶沥青、公路改扩建、坑槽维修、养护机械配置等 10 余项成熟的高速公路养护施工技术，取得专利 27 项，省级地方标准 11 项等。公司近年来先后完成 20 余条高速公路、国省干线新建施工，累计里程约 200

公里，完成 30 余个收费站改扩建，21 条/4000 公里线路养护施工。2016 年公司荣获中国公路养护工程领域最具权威性的奖项“中国公路养护工程奖”。公司立足技术创新，以高速公路运营安全为己任，承担了终南山等大型隧道的消防安全服务任务，并参与了多项课题，具有了丰富的专业积累和经验。

陕西省交通规划设计研究院有限公司，于 1958 年由交通部公路勘察设计院第五分院体制下放改组成立。2021 年 5 月，由全民所有制企业改制为有限责任公司。企业注册资金 1.28 亿元，是陕西交通战线上集勘察、设计、施工、科研于一体的大型综合性勘察设计公司。公司拥有工程设计公路行业甲级，市政行业道路、桥梁工程专业甲级，建筑行业建筑工程甲级，通信广电行业电子系统工程甲级，工程勘察综合甲级，地质灾害治理工程勘查、设计及危险性评估甲级，测绘甲级，工程监理甲级等 29 项资质。主要从事各等级公路、桥梁、隧道、交通工程、港口码头、民用建筑、市政工程的勘察设计及公路交通规划、工程可行性研究、遥感与地理信息技术应用、工程地质勘探、材料试验、工程技术咨询、地质灾害治理、设计施工总承包、工程监理等业务。2009 年被认定为陕西省高新技术企业，2014 年被交通运输部指定为国家重点公路工程设计审查咨询单位。

公司现有职工 562 人，其中硕士研究生以上学历人员 187 人，教授级高工 23 人，高级职称 260 人，中级职称 129 人，各类注册人员 199 人，有突出贡献专家 1 人，享受政府特殊津贴专家 1 人，省部级以上劳动模范 4 人，陕西省勘察设计大师 1 人，陕西省优秀勘察设计

师 4 人，陕西省交通运输行业十佳设计师 6 人。

在波澜壮阔的交通事业发展进程中，公司致力服务陕西交通发展，忠实扮演陕西交通建设“排头兵”、“先锋队”角色，承担了全省 85% 以上高速公路项目的工程可行性和 70% 以上高速公路项目的勘察设计工作；累计完成等级公路工程可行性研究 1.9492 万公里，等级公路勘察设计 1.656 万公里（其中高速公路、一级公路 5718 公里），大中型桥梁 3762 座，隧道 523 座（单洞），房屋建筑 290.388 万平方米，国家重点高速公路项目代部咨询审查 5485 公里。同时，积极参与市场竞争，将市场拓展至全国大多数省份和北也门、阿尔及利亚、伊拉克等国家，经营业务由公路勘察设计扩展至市政、铁路工程勘察设计、综合交通规划、工程监理、设计施工总承包等领域。在已完成的勘察设计项目中，先后荣获国家优秀设计、优质工程、优秀咨询成果、詹天佑土木工程等省部级以上奖项 237 项；依托重点勘察设计项目取得的科研成果，分别荣获交通部科技进步奖、陕西省科学技术奖等奖项 25 项，取得发明专利和实用新型专利 44 项，软件著作权 23 项。

企业先后被中华全国总工会授予“全国模范职工之家”，被交通运输部评为“全国交通运输行业文明单位”，被陕西省委、省政府命名为“文明单位”、“文明单位标兵”，被省委组织部评为“全省干事创业好班子”，被省总工会授予“五一劳动奖状”，连年被省交通运输厅评为“‘创佳评差’竞赛活动最佳单位”和“目标责任考核优秀单位”，为陕西乃至全国公路交通基础设施建设作出了积极贡献。

长安大学，中华人民共和国教育部直属高校，是教育部和交通运输部、自然资源部、住房和城乡建设部、陕西省人民政府共建的国家“双一流”建设高校，国家“211 工程”重点建设大学，国家“985 工程优势学科创新平台”建设高校；入选国家“111 计划”、“双万计划”、教育部“卓越工程师教育培养计划”、国家建设高水平大学公派研究生项目、国家级大学生创新创业训练计划、国家级新工科研究与实践项目。

学校现有 9 个一级学科博士点，1 个专业学位博士点，32 个一级学科硕士点，20 个硕士专业学位授权类别，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、化学等 6 个学科进入 ESI 全球排名前 1%。现有 86 个本科专业，其中 50 个专业入选“双万计划”国家级、省级一流本科专业建设点，27 个专业通过国家工程教育认证。学校稳居中国大学百强，土木与交通学科、水资源学科分别位列 U. S. News 全球大学第 20 名和第 10 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”。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 392 人、硕士生导师 1151 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。现有全日制本科生 2.5 万余人，博士、硕士研究生 1.2 万余人，来华留学生 1700 余人。

学校平台条件完善，现有国家级实验教学中心 5 个（含 3 个国家级虚拟仿真实验教学中心）、省部级实验教学中心 19 个（含 4 个省部级虚拟仿真实验教学中心），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 91 个，联合共建陕西国家应用数学中心 1 个。国内高校唯一的“车联网与智能汽车试验场”，被交通运输部认定为全国首批三大“自动驾驶封闭场地测试基地”之一。

（1）长安大学旧桥检测与加固交通行业重点实验室

长安大学旧桥检测与加固技术交通行业重点实验室，依托长安大学土木工程一级博士学科点的桥梁与隧道工程二级博士学科点，并由“陕西省公路桥梁与隧道重点实验室”和“公路大型结构安全教育部工程研究中心”的基础支撑，以既有公路桥梁的技术、管理和市场需求为导向，针对公路桥梁在检测、评价、养护、维修与加固等方面存在的关键技术问题，从事相关基础理论和应用技术研究。主要研究方向涉及桥梁结构优化与承载性能分析、旧桥检测与监测、桥梁承载能力评定与耐久性评估和桥梁养护管理与加固改造等方向。旧桥检测与加固交通行业重点实验室目前有固定资产 6800 万元，实验室总建筑面积 6156 平方米，试验仪器设备总值 1296 万元，其中本研究领域优势仪器设备如 32 通道静动态系统、TDS-602 静态数据采集系统、3000kN 万能试验机、预应力松弛测试系统、锚固张拉系统、20MN 长柱压力机、钢绞线伸长量测试仪、1000kN 微机伺服多点疲劳实验系统，自主开发的预应力张力测试仪等，为本项目的实施提供了良好的实验条件。

（2）陕西省公路桥梁与隧道重点实验室

“陕西省公路桥梁与隧道重点实验室”依托长安大学公路学院，于 1998 年被陕西省教委、陕西省科委、陕西省计委批准建立。现有研

究人员 62 人，其中教授 23 人，副教授 26 人。该实验室的研究领域覆盖桥梁工程学科所有方向，其中桥梁结构理论、桥梁结构评估与加固、桥梁施工控制等研究具有国内领先水平，并形成了自己的优势和特色。先后承担过多项国家及省、部委重大课题和横向合作项目，年均科研经费超过 5000 万元。在所完成的近百项成果中，30 余项获得国家及省、部委等科技成果奖励。

2 技术力量及人员构成

项目研究主要成员情况						
姓名	单位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
薛平安	陕西高速机械化工程有限公司	男	42	副高级	桥梁工程	项目负责人
郭胜涛	陕西高速机械化工程有限公司	男	40	副高级	其他	项目现场负责
杨凯	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	46	正高级	桥梁工程	技术负责人
赵昕	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	43	正高级	道路工程（路基）	研发进度控制
王帅	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	33	中级	桥梁工程	子题二负责人
赵煜	长安大学	男	51	正高级	桥梁工程	子题一负责人
周勇军	长安大学	男	47	正高级	桥梁工程	子题二负责人
药天运	长安大学	男	34	中级	其他	子题三负责人
贺拴海	长安大学	男	63	正高级	桥梁工程	技术顾问
许申炜	陕西高速机械化工程有限公司	男	33	中级	桥梁工程	现场试验实施
于林涛	陕西高速机械化工程有限公司	男	42	副高级	桥梁工程	现场试验实施

仝启凡	陕西高速机械化工程有限公司	男	32	中级	桥梁工程	现场试验
相阳	陕西高速机械化工程有限公司	男	32	助理级	桥梁工程	现场试验
黄秋旭	陕西高速机械化工程有限公司	男	35	中级	桥梁工程	现场试验
姬乃川	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	30	中级	桥梁工程	数字化模拟

3 各自承担的主要工作

本课题拟由陕西高速机械化工程有限公司、陕西省交通规划设计研究院有限公司和长安大学联合完成。校企联合可以实现产学研结合与产业协同发展，学校、企业和科研机构共同参与项目研发和产业化推广，形成良性互动和协同创新的格局，推动产业的快速发展和高质量增长。各个参与单位具体研究工作如下：

牵头单位陕西高速机械化工程有限公司负责项目组织实施及过程管理，对项目总体目标实现负责。

陕西省交通规划设计研究院有限公司完成主要特殊结构、重难点桥梁结构的设计，负责牵头完成小半径钢结构与数字化协调建造子题研发，并对高墩拼宽与模板智能设计子题进行研发方向与进度把控。

长安大学负责具体试验设计、数据分析、软件开发等工作。完成开展施工数字化研究、不同连接方式下拼宽桥梁荷载横向分布规律研究、沉降位移边界条件研究、不同连接方式下的拼宽桥梁结构混合受力性能及刚度匹配研究、沉降监测系统研发、防沉降系统及试验测试相关试验工作，完成相关理论及模板支撑体系智能化设计软件的研

发、相关成果的产出、完成高墩现浇箱梁桥的模板支撑体系的设计。同时，完成实桥方案与试验报告。

4 项目主要负责人情况

薛平安，西安站高架快速路系统及节点立交工程 EPC 项目 1 标段总工程师。参与建设的国道 108 线禹门口黄河公路大桥工程获得中国交建优质工程奖、陕西省“长安杯”、“李春奖”。获得省级工法 3 项。参与省厅级重点课题 2 项，独立发表论文 3 篇，获得发明专利 2 项，实用新型专利 4 项，参与地方标准编制一项，专著一项。获得省级 QC 成果 13 项，一类成果 5 项，二类成果 7 项，三类成果 1 项。获得注册二级建造师（建筑工程）、陕交安 B 证、陕建安 B 证。

2016 年度被韩城市交通运输局评为项目建设先进个人。2017 年度被中交韩城黄河大桥有限公司评为先进个人。2023 年度被陕西高速机械化工程有限公司评为先进个人。已进入陕西省交通运输厅交通科技系统专家库与西安市市政基础设施工程危大专家库。

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

西安站是铁路包海主通道上的重要节点，是西安“四主一辅”重要的铁路枢纽，是含高铁、普铁、城际、地铁、公交为一体的大型综合交通枢纽；东城片区是西安市依托站枢纽，充分发挥其交通优势，重点打造的“西安国际枢纽门户形象、西安东部绿色城市客厅”。东城核心区及其拓展区是东城片区以站为核心的先行建设区，将主要解决站首要的配套设施建设工程，具体包括站站前西广场、连接东

站及主城区的快速路及节点立交、核心拓展区内的市政路网骨架、神鹿坊片区拆迁安置及土地一级开发。

本依托工程为西安站高架快速路系统及节点立交工程 EPC 项目 1 标段。通过本项目的建设,将实现西安市与高铁站的快速衔接,为枢纽提供交通功能的基础保障。主要包括新兴南路-东绕城高速立交(含收费站)、新兴南路高架(含地面道路)、规划南路高架(含地面道路)、长鸣路-规划南路立交、长鸣路高架(含地面道路)、长鸣路-南绕城高速立交(含收费站)等工程。根据《建筑与市政工程抗震通用规范》(GB 55002-2021),建筑场地类别为II类时的反应谱特征周期值应为 0.4s,对应的地震烈度为VIII度,设计基本地震加速度值为 0.20g,设计地震分组为第二组。兴南路-东绕城立交 B 匝道桥第五联桥为平曲线半径 $R=65\text{m}$,跨径布置为 $(35+48+60+54)\text{m}$ 连续钢箱梁结构,桥梁高度约 32.5m,主跨圆心角 54° ,设计过程中发现温度梯度采用不同规范时对抗倾覆设计有较大区别,采用英国标准 BS5400 时,温度梯度最不利支座反力-2132.5kN,抗倾覆系数 1.8;采用通用规范 JTG D60-2015 时,温度梯度最不利支座反力-778kN,抗倾覆系数 3.18,作为参考,同位置处恒载反力仅 2316kN。设计时温度梯度作用通常采用最不利进行取值,往往带来桥墩偏心值过大、压重范围较大等一系列问题,且经此方法处理后的曲线桥结构内倾与外倾系数均处在安全储备较低的状态下。

依托工程同类桥还有新兴南路-东绕城立交 B 匝道第九联 $(44.5+60+47)\text{m}$ ($R=70\text{m}$)、A 匝道第三联 $(33+3\times 34)\text{m}$ ($R=55\text{m}$)、

长鸣路南绕城立交变异喇叭 D 匝道（40+41+38）m（38.97+38.5）m（R=86.15m）、C1 匝道（3x30+29.624）m（R=60m）、B1 匝道（37+40+37）m（33+34+33）m（R=75m）、（31+55+32.5+32.5）m（R=100m）、A1 匝道（4x30）m（29+35+30.498）m（R=50m）、长鸣路南绕城 T 型立交 C 匝道（32+35+24）m（R=65m），共有 3 联小半径大跨径曲线梁桥和 9 联小半径常规跨径曲线梁桥，合计 12 联。

2 投资来源

项目投资来源于陕西交通控股集团有限公司。

3 工程进度与项目科研进度的配合

阶段	开始日期	结束日期	计划完成内容
准备阶段	2025.12	2026.05	① 开展项目可行性论证，分解研究任务，落实承担单位，启动相关研究工作； ② 开展旧桥拼宽前以及不同横向连接方式拼宽后桥梁各自的荷载横向分布系数分布规律研究； ③ 开展不同连接形式下原桥边梁在活载作用下的内力及挠度变化情况研究； ④ 开展新建部分桥梁刚度与拼宽前旧桥梁刚度的匹配性研究； ⑤ 开展最佳主梁连接形式、最佳刚度匹配的选取研究； ⑥ 开展自身变形条件下高墩沉降特征及机理研究； ⑦ 开展曲线新型钢混组合箱梁桥整体倾覆理论研究及新型曲线钢混组合箱梁桥理论研究； ⑧ 开展初始缺陷试验与量化分析，建立缺陷模型； ⑧ 搭建试验与仿真平台，构建深度学习数据集； ⑨ 制定试验、模拟与软件研发方案； ⑩ 提交启动报告、文献综述与第一阶段进展报告。
研究阶段	2026.05	2027.06	① 开展基础非弹性变形条件下高墩沉降特征及机理研究，开展多模态耦合作用下的高墩沉降评价指标研究； ② 开展多模态耦合作用下拼宽桥梁防沉降措施研究； ③ 结构参数和荷载作用对桥梁抗倾覆的影响研究，建立桥梁的非线性数值仿真模型，探究倾覆破坏模式与非线性因素的内在联系； ④ 开展桥梁整体几何特征及桥梁力学性能研究及新型曲线钢混组合箱梁桥力学性能的敏感性参数分析；

			⑤ 开展 BIM 技术驱动下的模板支撑体系智能化设计软件系统研发。 ⑥ 撰写论文 1 篇，受理并实质性审查发明专利 2 项，实用新型专利 4 项。
研究成果工程示范与应用阶段	2027.06	2027.09	① 完成 1 套智能化设计软件系统研发； ② 撰写论文 1 篇，申请软件著作权 2 项，受理并实质性审查发明专利 2 项； ③ 完成《城市立交桥拼宽关键技术研究》、《城市立交小半径曲线梁桥结构设计关键技术研究》、《城市立交现浇高墩桥梁模板支撑体系智能化设计技术研究》3 份研究报告； ④ 完成 1 套拼宽桥梁沉降实时监测和多源数据集成软件系统的研发。
鉴定阶段	2027.09	2027.12	① 课题及子课题研究成果通过验收； ② 撰写论文 1 篇，申请软件著作权 1 项； ③ 课题绩效自我评价报告 1 份。
验收阶段	2027.12	2028.3	① 整理结题资料、提交结题验收。

目前，依托项目已完成以下工作：

系统梳理国内外高墩箱梁桥及钢－混组合梁桥拼宽工程案例，归纳横向连接方式、拼缝构造与施工工艺特征，形成适用于高墩桥梁的主梁型式与连接方式组合库，采用 MIDAS/ANSYS 等建立旧桥与拼宽后新旧主梁的统一空间有限元模型，重点分析不同连接方式下的横向荷载分布、挠度协调和动力特性，并对施工阶段与成桥阶段的内力重分布和变形规律开展对比研究，针对分析中暴露出的局部应力集中和变形协调不足问题，提出简化的拼缝构造优化方案（如横隔梁设置、局部加劲等）及施工要点，并结合依托工程的有限监测数据进行合理性验证，形成工程化设计与施工建议，整体项目按计划达成阶段性目标。

通过前期研究，完成数字化地貌捕捉技术与多软件融合可视化技

术的研究，然后进行高维度桥梁模型搭建，完成钢与组合结构正向设计并进行混凝土结构碰撞检查，降低施工成本。同时，通过进行数字化施工模拟，进行施工组织优化与反馈。后期将完成相关数字化协同建造软件系统的研发，应用到后期工程并投入市场使用。此外，完成模板支撑体系智能化设计软件中智能设计模块的研发，同时，完成对依托工程中现浇高墩箱梁的模板支撑体系相关设计方案的优化，降低施工成本。同时，后期将完成相关理论及模板支撑体系智能化设计软件的研发，应用到后期工程并投入市场使用。

4 组织管理形式

本项目实施设置总体负责单位、设计负责单位、试验负责单位。项目总体负责单位陕西高速机械化工程有限公司负责项目组织实施及过程管理，对项目总体目标实现、项目组织实施工程管理全面负责；设计负责单位陕西省交通规划设计研究院有限公司具体承担依托工程相关施工图设计；试验负责单位长安大学具体负责桥梁施工数字化研究、拼宽桥梁混合受力性能研究、拼宽桥梁沉降位移研究、沉降监测及控制系统研发、曲线钢结构桥梁抗倾覆系统性试验和理论研究、相关理论及模板支撑体系智能化设计软件的研发等工作。项目承担单位的科技管理部门和财务管理部门对项目研究进展和经费使用情况进行联合监督。

项目实行任务目标管理，责任到人，职责分明，充分调动项目组全体人员的积极性与主观能动性。为保障项目的顺利实施，安排专人负责项目实施的全过程管理，主要负责进度控制和监督协调工作，报

告专题动态及组织重要研讨、宣传活动。

六、项目经费估算及资金筹措情况

项目总经费：150 万元；交通运输厅补助：19.5 万元，自筹资金：130.5 万元。

科 目	总经费 (单位：万元)	厅补经费 (单位：万元)
(一) 直接费用	120.3	15.5
1. 设备费	30.5	6.5
(1) 购置设备费	27.5	5
(2) 试制设备费	3	1.5
(3) 设备改造与租赁费	0.0	
2. 业务费	37.6	3
(4) 材料支出	2.5	1
(5) 测试化验实验加工支出	17.6	
(6) 燃料及动力支出	1	0.5
(7) 差旅支出	1.2	
(8) 会议支出	4	
(9) 国际合作与交流支出	2	
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权 事务/印刷支出	9.3	1.5
(11) 其他支出	0	
3. 劳务费	52.2	6
(12) 劳务性支出	36.2	4
(13) 咨询专家支出	16.0	2
(二) 间接费用	10.2	4
4. 管理费	6.2	2
5. 绩效支出	4.0	2
合 计	130.5	19.5

注：预算编制按照《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发[2022]3 号）文件执行，详见附件《科研经费预算编制说明》。项目验收将组织财务专项验收或审计。

七、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）发明专利	4
		（2）实用新型	4
		（3）外观设计	
		2、软件著作权授权数（项）	2
		3、发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（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	否
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1、引进高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		2、培养高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4、是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1、开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2、科研仪器设备利用率（%）	
		3、孵化科技型企业（个）	
		4、转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1、新增产值（万元）	
		2、新增销售（万元）	
		3、新增出口创汇（万美元）	
		4、新增利润（万元）	
	社会效益	1、新增税收（万元）	
		2、新增就业人数	
		3、就业培训（人次）	
		4、带动农民增收（万元）	
		5、培训和指导科技服务（人次）	
		6、新增产业带动情况	
		7、技术集成示范（项）	
		8、建立示范基地（亩数）	
		9、节约资源能源	
		10、环保效益	
其他需要说明的情况			

八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益

1 项目预期目标

(1) 提出考虑主梁刚度差异的既有城市高墩桥梁拼宽技术

研究拼宽后的桥梁边梁与内梁的最不利荷载横向分布系数的大小关系,深入分析不同连接方式下桥梁的荷载横向分布系数规律,探究不同连接形式对桥梁结构混合受力性能的影响,获取各形式对应的最不利横向分布系数,以及确定新老桥梁刚度匹配准则。此外,通过建立高墩及基础相互作用模型,研究多因素耦合作用下高墩的沉降机理,并提出高墩稳定性量化指标及评价方法,为桥梁拼宽过程中的桥墩加固与防护措施优化提供科学依据。提出多因素耦合作用下的高墩沉降监测方案,构建拼宽前后高墩沉降的激光、图像等非接触式动态变形监测系统,采用免标靶式数据采集,达成百米级沉降监测精度为1mm的高标准,以及不低于60Hz的高频监测频率,实现对高墩关键测点的实时、精确数据采集。提出多因素耦合作用下拓宽桥梁防沉降措施。

(2) 完善城市高墩小半径曲线钢混组合桥梁设计及施工技术

通过城市高墩小半径曲线钢混组合桥梁抗倾覆理论研究和系统性试验,提出城市高墩曲线钢混组合桥梁结构的抗倾覆计算方法,并验证准确性。同时,设计适用于城市立交桥的闭口式正交异性桥面板钢混组合梁桥,针对独柱花瓶墩的城市立交匝道桥,在梁高不受限时,选用钢混组合梁结构比钢箱梁结构预计节省用钢量约18%~30%。研究曲线钢混组合梁桥施工临时支撑形式、PBL键和栓钉的合理设置方

式，以提高施工效率和结构安全性，为城市高墩曲线钢混组合桥梁的设计、施工和评估提供科学依据和技术支持。

该研究成果预期为城市高墩曲线桥梁的设计、施工及评估提供理论依据和技术支撑。在节约工程成本提高资源利用效率的同时，有效缩短了施工周期，确保了桥梁结构的长期安全性与稳定性，不仅具有显著的经济效益，也为区域城市交通基础设施的优化升级提供了重要的社会效益。

（3）开发现浇高墩桥梁模板支撑体系智能设计方法与软件

通过对模板支撑体系初始缺陷的定量分析和安全性控制的高等分析方法，提高其施工的安全性和稳定性。通过模板支撑体系的智能设计技术提高设计效率和准确性，从而提升整个施工过程的质量和效率，同时，降低模板支撑体系 5%-10% 的施工成本。本项目将依托实际工程项目，推动模板支撑体系的设计向着安全化、经济化、智慧化的方向不断发展，为模板支架体系的智能设计提供安全可靠的示范案例。本项目的实施，将加快模板支撑体系智能设计软件的研发，有助于智能建造在临时支架行业内的普及和深化。

2 提交的研究成果及其形式

①完成《城市立交桥拼宽关键技术研究》、《城市立交小半径曲线梁桥结构设计关键技术研究》、《城市立交现浇高墩桥梁模板支撑体系智能化设计技术研究》3 份研究报告；

②完成 1 套拼宽桥梁沉降监测和多源数据集成软件系统的研发；

③完成 1 套模板支撑体系的智能化设计软件系统的研发；

- ④在国内外重要学术期刊论文 2~3 篇；
- ⑤受理并实质性审查发明专利 4 项，实用新型专利 4 项；
- ⑥获得软件著作权不少于 2 项。

3 经济、社会、环境效益分析

(1) 经济效益

①考虑主梁刚度差异的既有城市高墩桥梁拼宽技术

技术指标：实现百米级沉降 1mm 高精度监测，不低于 60Hz 高频监测，确保高墩关键测点数据实时、精确采集；

经济指标：给出不同连接方式对桥梁结构混合受力性能的影响，避免工程浪费或隐患，提出新旧桥基础沉降差控制标准，从而减少工程量约 10%。

②城市高墩小半径曲线钢桥设计与施工方法

技术指标：该技术可将同曲线半径主梁抗扭刚度提高约 20%，有效保证了结构的抗倾覆稳定性。

经济指标：对于槽型钢混组合梁，其用钢量较钢箱梁结构可节省约 18%~30%，有效降低了施工成本。

③现浇高墩桥梁模板支撑体系智能设计方法与软件研发

技术指标：模板支撑体系智能化设计软件的设计方案满足规范要求。

经济指标：通过精确计算材料用量及优化结构设计和材料选型，该技术预计可降低模板支撑体系 5%-10%的施工成本。

(2) 社会效益

落实好习近平总书记“在关键领域、卡脖子的地方下大功夫”的指示，响应国家交通强国战略。通过项目开展城市高墩小半径曲线钢混组合桥梁设计及施工技术研究，建立考虑主梁刚度差异的既有城市高墩桥梁拼宽技术，开发现浇高墩桥梁模板支撑体系智能设计方法与软件，实现“被动防灾”到“主动防灾”的理论研究与技术提升，形成一系列具有自主知识产权的城市桥梁设计与分析技术，解决小半径曲线高墩钢混组合桥梁的倾覆机理不明确、城市立交桥拼宽和施工技术落后等一系列问题，保障城市桥梁建设安全与质量水平，提升设计精细化水平能力与施工效率。

本项目研究成果将直接指导现有工程建设，为西安东站项目提供强有力的技术支持，推动桥梁建造技术的创新与发展。此外，这些创新技术的应用将为类似的大型基础设施项目提供宝贵的经验和参考，为将来城市桥梁的进一步发展提供前瞻性技术储备，大力促进我国桥梁建造水平的提高，从而发挥巨大的社会效益。

（3）环境效益

本项目通过对城市空间约束下高墩桥梁的无损检测、监测、智能评估、预警及控制，有利于优化桥梁设计和施工方案，精确判断城市空间约束下高墩桥梁结构的实时性能状态，改善交通网络及关键节点全寿命周期内安全性能与服役性能，助力实现“碳中和”与“碳达峰”。对结构全寿命周期内的养护措施的合理决策，可大幅减少加固和处治中的物料浪费和环境污染。研究成果可以推动环境友好型建设技术的发展和应用，促进绿色建筑和可持续发展的理念在桥梁建设领域的推

广和实践，对实现我国交通基础设施资源节约、可持续发展的目标具有重要意义。

九、 其它需要说明的问题

无

十、 申请单位意见

(各申请单位盖章，申报单位在意见中要明确依托工程、配套经费等落实情况)

单位负责人:



2026年3月5日

单位负责人:



(公章)

(签字)

2026年3月5日 科研项目专用章

单位负责人:



(公章)

(签字)

2026年3月5日

附件：

科研经费预算编制说明

一、预算编制要求

(一)项目预算编制准备。在编制项目预算书之前，应认真阅读相关制度的要求与规定。(《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》(陕政办发[2022]3号))。

(二)项目预算编制原则。编制项目预算必须以项目研究任务为依据，项目预算应与项目任务目标相关；预算应符合有关政策法规；预算应经济合理，在不影响项目任务的前提下，充分提高资金的使用效率，不得在各科目间重复列支。

(三)支出预算和来源预算必须同时编制。采用支出预算和来源预算同时编制的方法编制项目预算。平衡公式为：

$$\text{项目经费支出预算合计} = \text{项目经费来源预算合计}$$

(四)项目预算编制的规范性要求。

1.金额单位和数据精度：预算数据以“万元”为单位，精确到小数点后面两位。各类标准或单价以“元”为单位，精确到个位。

2.名称的规范性：所有项目或项目承担单位的名称，应填写正式全称，单位名称、单位公章及单位开户名称必须一致，如有特殊情况需说明原因；预算申报材料中不同地方出现的相同设备、材料等实物信息应填写规范和统一的名称。

二、预算科目内涵及支出标准

(一)直接费用

直接费用是指在课题研究开发过程中发生的与之直接相关的费用，主要包括设备费、业务费(含材料费、测试化验加工费、燃料动力费、差旅费、会议费、国际合作与交流费、出版/文献/信息传播/知识产权事务费、其他费用)和劳务费(含专家咨询费、聘用人员劳务费、其他劳务费)。

1.设备费：指项目实施过程中必需购置的专用仪器设备，对现有仪器设备进行升级改造，以及租赁外单位仪器设备而发生的费用。

2.业务费：业务费指研究中除设备费、劳务费以外的其他直接费用，包括材料、测试化验加工、燃料动力、出版/文献/信息传播/知识产权、会议/差旅/国际合作等费用。

(1)材料费：指科技项目研究开发或科技创新体系建设过程中所支付的原材料、燃料动力、低值易耗品等的采购及运输、装卸、整理等费用。

(2) 测试化验加工费：指项目实施过程中支付给外单位（包括项目承担单位内部独立经济核算单位）的试验、加工、测试、化验等费用。

(3) 燃料动力费：是指在课题研究开发过程中相关大型仪器设备、专用科学装置等运行发生的可以单独计量的水、电、气、燃料消耗费用等。

(4) 差旅费：指在科技项目研究开发或科技创新体系建设过程中，为科技项目研究开发或科技创新体系建设而进行国内调研考察、现场试验、学术交流等工作所发生的交通、住宿等费用。

(5) 会议费：指科技项目研究开发或科技创新体系建设过程中为组织开展学术研讨、咨询以及协调项目等活动而发生的会议费用。

(6) 国际合作与交流费：是指在课题研究开发过程中课题研究人员出国及外国专家来华工作的费用。国际合作与交流费应当严格执行国家外事经费管理的有关规定。不同的国家的补助标准不一样，请参考目的地国家具体补助标准。

(7) 出版/文献/信息传播/知识产权事务费：指科技项目研究开发或科技创新体系建设过程中发生的信息检索费、著作出版印刷费、专用软件购买、论文版面费、数据调查费、专业通信费、知识产权事务费等。

(8) 其他费用：指除上述费用之外与科技项目研究开发或科技创新体系建设有关的其他费用。

3. 劳务费：劳务费指研究中支付给个人的直接费用包括专家咨询费、人员劳务费等。

(1) 专家咨询费：指项目研究中支付给临时聘请专家的费用。专家咨询费的开支标准按照《财政部关于印发<中央财政科研项目专家咨询费管理办法>的通知》（财科教〔2017〕128号）执行。

(2) 聘用人员劳务费：指项目研究中支付给聘用人员的劳务费。

(3) 其他劳务费：指项目给参与研究的研究生、博士后等人员支付的劳务费。

（二）间接费用

是指承担课题任务的单位在组织实施课题过程中发生的无法在直接费用中列支的相关费用。主要包括承担课题任务的单位为课题研究提供的现有仪器设备、房屋、水、电、气、暖消耗，有关管理费用的补助支出，以及绩效支出等。间接费用使用分段超额累退比例法计算并实行总额控制，按照不超过课题经费中直接费用扣除设备购置费后的一定比例核定，具体比例如下：

100 万元以下（含 100 万）部分不超过 35%；

100 万元至 500 万元（含 500 万）的部分不超过 30%；

500 万元至 1000 万元（含 1000 万）的部分不超过 25%；

超过 1000 万元以上的部分不超过 20%。

1.管理费：指科技项目承担单位及受托管理单位为组织管理科技项目而支出的相关费用。包括现有仪器设备和房屋使用费或折旧、直接管理人员费用和其他相关管理支出。

2.绩效支出：是指承担课题任务的单位为提高科研工作绩效安排的相关支出。

城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发

大纲评审意见

2026年3月23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“城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发”（项目编号：25-65X）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：

1.结合研究内容对城市空间约束与数字化智慧建造进一步丰富完善；

2.进一步梳理拟解决的关键问题、主要研究内容及技术经济指标等内容。

主任委员：王建

2026年3月23日

专家审查意见表

项目名称	城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发				
专家姓名	王建宇	职务/职称	教授	专业	交通工程
专家单位	长安大学			联系电话	13709252206

评审意见

- 1. 加强“数字智慧建造”的体现；
- 2. 技术路线图进一步丰富完善；
- 3. 项目绩效指标结合研究成果进一步考虑。

评审专家（签字）： 王建宇

2026年 3 月 23 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	城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发				
专家姓名	苗建宝	职务/职称	正高工	专 业	土木工程
专家单位	西安公路研究院有限公司			联系电话	15249205285

评 审 意 见

项目以连接西安站及主城区的快速路及节点立交等交通配套设施工程为依托，选题城市空间约束下的高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发，符合目前数字化的发展要求，研究大纲技术路线清晰、依托工程明确，具备一定的实用研究价值与可行性，同意修改完善后研究大纲通过评审。意见如下：

一、总体逻辑与核心思路

1、研究主题与内容方面，项目名称为城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造，目前正文基本上都是拼宽、抗倾覆、模板支架等传统技术，“数字化、智慧建造、协同平台”涉及较少，需要增加数字化与智能建造方面内容，包括该方面国内外研究现状、实施方案及成果等部分。

2、高墩拼宽、小半径曲线桥、模板智能设计三者相互独立，没有形成整体研究，建议挖掘三部分内容的共性，建议通过“数字化智慧建造”将三部分内容串联。

3、课题名称与内容的匹配性，主题是城市空间受限，对于第一部分拼宽桥梁应该研究下部占地较少的方案，比如通过特殊下部结构解决减少工程拆迁及对下穿交通的影响，第二部分是城市空间受限需要设置小半径曲线桥梁对应进行研究，第三部分也是城市桥下空间复杂，通过特殊支撑设计满足空间要求。

二、技术方面

1、建议增加数字化协同设计、施工过程数字化控制、智慧运维接口、数据标准等相关内容。

2、BIM 仅用于支架建模，未贯穿设计-施工-监控监测全流程，前两部分内容能否和BIM融合。

3、数字化智慧建造内容较少，结合新旧桥拼宽、小半径曲线钢混组合结构两部分内容中增加与智慧建造相关内容，尤其是小半径钢混组合结合构造相对复杂如何通过智慧化建造提升建造质量。

三、财务预算方面

1、核查省厅补助150万元是否准确，落实好配套经费。

2、财务预算的格式需按照最新格式调整，同时做好财务预算，设备费37万是否将来能实际实现，为课题顺利验收提前规划好经费预算。

四、人员配置：目前人员配备均为工程，本项目涉及数字化智慧建造方面研究，应该补充牵扯软硬件开发应该增加计算机应用技术、电子信息、人工智能等领域相关研究人员。

五、工程进度与项目科研进度的配合这部分应该增加与依托工程配合情况。

六、项目绩效指标主要是专利、软著和论文，提交的研究成果及其形式这一部分内容丰富，因此建议根据提交的研究成果及其形式是否需要增加部分产出类指标和效果类指标，提升成果的使用价值。

评审专家（签字）：胡建宏

年 月 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发				
专家姓名	唐海敏	职务/职称	正高工	专 业	道路工程
专家单位	中铁第一公路勘察设计院有限公司			联系电话	18192640597

评 审 意 见

一、总体意见.

项目针对城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造技术展开研究,项目研究目标明确,内容全面,技术路线可行. 人员组成合理,唐海敏工程经验丰富,同意研究大纲通过评审.

二、建议.

1. 进一步明确各研究内容之间的关联性;
2. 结合关键技术问题明确项目创新点.

评审专家(签字):

唐海敏

2026年3月23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	城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发				
专家姓名	赵池航	职务/职称	教授、博导	专 业	交通运输工程
专家单位	东南大学			联系电话	13951922763

评 审 意 见

该项目开展城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发的工作，主要包括考虑主梁刚度差异的既有城市高墩桥梁拼宽技术、城市高墩小半径曲线钢桥设计与施工方法、现浇高墩桥梁模板支撑体系智能设计方法与软件研发等。该项目研究大纲的研究内容具体，研究目标及拟解决的问题明确，技术架构与技术路线可行；达到了项目研究大纲的评审要求。

修改建议如下：

（1）在“国内外研究现状分析”中增加近3年的国内外研究的论述及相关参考文献。

评审专家（签字）：

2026年3月23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	城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发				
专家姓名	伍朝辉	职务/职称	副研究员	专 业	交通数字化
专家单位	交通运输部科学研究院			联系电话	15210832821

评 审 意 见

同意通过研究大纲评审。

建议：

（1）“城市空间约束”没有解释清楚，具体有哪些空间约束？采用哪些技术才能解决这些约束，建议在开篇串联好约束与研究内容之间的关系。

（2）“BIM 技术驱动下的复杂大型模板支撑体系智能化图纸信息识别及三维可视化自动建模技术”第 3 条关键问题提法可进一步简化，BIM 主要应用在哪些方向，建模后如何应用，应有所解释。

评审专家（签字）：

伍朝辉

2026 年 3 月 22 日

城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发 (项目编号: 25-65X)

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	王建军	长安大学	交通运输工程	交通运输工程	教授	王建军
2	委员	苗建宝	西安公路研究院有限公司	土木工程	土木工程	正高工	苗建宝
3	委员	曹海波	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	公路工程	公路工程	正高工	曹海波
4	委员	赵池航	东南大学	交通运输工程	智慧交通系统	教授	赵池航
5	委员	伍朝辉	交通运输部公路科学研究院	计算机应用专业	交通数字化	正高工	伍朝辉

专家意见处理表

项目名称：城市空间约束下高墩桥梁数字化智慧建造研究与开发

(项目编号：25-65X)

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	王建军	1.加强“数字化智慧建造”的体现； 2.技术路线进一步丰富完善； 3.项目绩效措施结合研究成果进一步考虑；	1.已在“第三章实施方案-2 主要研究内容及实施方案”中增加数字化智慧建造内容，见 P35 页； 2.已在大纲内增加完善技术路线导图，见 P60 页； 3.已根据研究成果确定项目绩效措施，见 P74 页；
2	苗建宝	1.增加数字化与智能建造方面内容，包括该方面国内外研究现状、实施方案及成果； 2.建议通过“数字化智慧建造”将三部分研究内容串联； 3.加强课题名称与内容的匹配性； 4.建议增加数字化协同设计、施工过程数字化控制、智慧运维接口、数据标准等相关内容； 5.BIM 仅用于支架建模，未贯穿设计-施工-监控检测全流程，前两部分内容能否和 BIM 融合； 6.数字化智慧建造内容较少，增加相关内容； 7.核查省厅补助 150 万元是否准确，落实好配套经费； 8.财务预算的格式需按照最新格式调整，同时做好财务预算，设备费 37 万是否将来能实际实现，为课题顺利验收提前规划好经费预算； 9.人员配置：目前人员配备均为工程，本项目涉及数字化智	1.已增加数字化与智能建造方面内容，包括该方面国内外研究现状、实施方案及成果，见 P5 页； 2.已进一步完善三个研究内容之间的关联性，见 P34 页； 3.已调整大纲内容，保持与课题名称的匹配性； 4.已增加数字化协同设计、施工过程数字化控制、智慧运维接口、数据标准等相关内容见 P35 页； 5.已将部分研究内容与 BIM 融合，完善 BIM 应用方向，见 P57 页； 6.已在“第三章实施方案-2 主要研究内容及实施方案”中增加数字化智慧建造内容，见 P35 页； 7.已核查项目经费组成，见 P73 页； 8.已调整财务预算的格式，并完善财务预算，见 P73 页；

		慧建造方面研究, 应该补充牵扯软硬件开发应该增加计算机应用技术, 电子信息、人工智能等领域相关研究人员; 10. 工程进度与项目科研进度的配合这部分应该增加与依托工程配合情况; 11. 项目绩效指标建议根据提交的研究成果及其形式是否需要增加部分产出类指标和效果类指标, 提升成果的使用价值;	9. 人员配置中部分人员具备软硬件开发、计算机应用技术, 电子信息、人工智能等方面研究的能力; 10. 已增加与依托工程配合情况, 见 P72 页; 11. 已采纳该条建议;
3	曹海波	1. 进一步完善三个研究内容之间的关联性; 2. 结合关键技术问题梳理项目创新性;	1. 已进一步完善三个研究内容之间的关联性, 见 P34 页; 2. 已在“第三章实施方案-2 主要研究内容及实施方案”中结合关键技术问题说明项目创新性, 见 P35 页;
4	赵池航	1. 在“国内外研究现状分析”中增加近 3 年的国内外研究的论述及相关参考文献;	1. 已在“国内外研究现状分析”中增加近 3 年的国内外研究的论述及相关参考文献, 见 P5 页;
5	伍朝辉	1. “城市空间约束”没有解释清楚, 具体有哪些空间约束? 采用哪些技术才能解决这些约束, 建议在开篇串联好约束与研究内容之间的关系; 2. “BIM 技术驱动下的复杂大型模板支撑体系智能化图纸信息识别及三维可视化自动建模技术”第 3 条关键问题提法可进一步简化, BIM 主要应用在哪些方向, 建模后如何应用, 应有所解释;	1. 已完善空间约束与研究内容之间的串联关系, 见 P2 页; 2. 已简化“BIM 技术驱动下的复杂大型模板支撑体系智能化图纸信息识别及三维可视化自动建模技术”第 3 条关键问题, 已完善 BIM 应用方向。见 P57 页;

大纲评审委员会专家 (签字): 王彦子

项目负责人 (签字): 薛平安