

2025 年度山西省科学技术奖申报项目情况

一、项目名称：复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术

二、提名者及提名意见：

提名者：山西交通控股集团有限公司

提名意见：

我单位认真审阅了该项目提名书及其附件材料，确认全部材料真实有效，相关栏目均符合山西省科学技术奖励委员会办公室的填写要求。

该项目面向复杂岩溶地质桥梁基础设计与施工难题，经多年联合攻关，原创成果特色如下：（1）基于“岩溶-桩-岩土体相互作用模型”进行试验和数值仿真分析，揭示了岩溶桥梁桩基承载特性和荷载传递机理，提出了承载力、顶板厚度、嵌岩深度等设计方法及关键参数取值，为桥梁基础韧性提升提供了设计理论依据；（2）针对复杂岩溶地质下桥梁桩基施工技术瓶颈，研发了特大型溶洞的钢筋混凝土协同水泥砂浆双层护壁处治方法，形成了专项施工关键技术及质量控制标准；（3）建立了岩溶区桥梁桩基安全状态评价模型与动态安全预警体系，构建了桩基承载信息库并形成技术指南，提升了桥梁桩基韧性与协同防控能力。

项目累计授权专利 30 余项，其中发明专利 15 项，获软件著作权 1 项，出版专著 1 部，发表论文 36 篇。培养硕博士 16 名、各类技术人才 350 余人。成果成功应用于国道 209 线改线、离隰高速、武汉汉南长江大桥、广西融福高速、广昆高速公路、安六铁路等全国多项重大工程，经济、社会效益显著。经山西省科技成果转移转化促进与数据监测中心组织专家评价，总体达国际先进水平，研究成果为复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升与协同防控提供了理论支撑。

参照山西省科学技术进步奖授奖条件，提名该项目为山西省科学技术进步奖二等奖。

三、项目简介：

本项目开展复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术研究，属于交通运输工程中的桥梁建设技术领域，全面响应了国家提升交通基础设施防灾减灾能力与工程韧性的重大需求。

岩溶是我国公路建设面临的重大不良地质，其显著的隐蔽性与随机性导致岩体强度大幅衰减。在复杂岩溶区，受多变溶洞特征与施工工艺差异的耦合影响，桥梁桩基荷载传递机理极其复杂，传统设计与施工脱节模式导致设计参数取值受限，严重威胁桩基承载安全与系统韧性。本项目依托吕梁国道 209 线改线等典型工程，综合采用实地调研、离心模型试验、数值模拟及现场原位试验等手段，围绕岩溶地质桥梁基础技术瓶颈开展系统攻关，形成了成套关键技术。主要创新成果如下：

（1）揭示了复杂岩溶区桥梁桩基荷载传递机理与破坏演化规律。构建了岩溶-桩-岩土体相互作用模型，探明了多维因素影响下的桩基破坏模式；建立了基于复杂岩溶地质的桥梁桩基承载力计算方法，确立了安全顶板厚度与合理嵌岩深度等设计关键参数取值标准。

（2）研发了复杂岩溶地质桥梁桩基成套施工与质控关键技术。针对多变溶洞特征，制定了专项施工关键技术及质量控制标准；研发了针对特大型溶洞的钢筋混凝土协同水泥砂浆双层护壁处治技术，破解了复杂岩溶地质桥梁基础施工瓶颈。

（3）构建了复杂岩溶地质桥梁基础标准化安全评价与预警体系及工程信息数据库。建立了安全状态评

价模型与动态安全预警技术；构建了桩基承载信息库并形成技术指南，显著提升了桥梁基础体系的工程韧性与协同防控能力。

项目成果评价总体达到“国际先进水平”，累计授权专利 30 项，其中发明专利 15 项，获软件著作权 1 项，出版专著 1 部，发表论文 36 篇。培养硕博士 16 名、各类技术人才 350 余人。成果已成功应用于国道 209 线改线、离隰高速、武汉汉南长江大桥、广西融福高速、广昆高速公路、安六铁路、莆炎高速等全国多项重大工程，产生经济效益达 48300 余万元，经济、社会、技术效益显著。

四、客观评价：

整体技术评价：2026 年 7 月 10 日，山西省科技成果转移转化促进与数据监测中心组织有关专家对“复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术”项目成果的科学、技术、经济、社会和文化价值进行了评价。专家组认为：项目采用理论分析、数值模拟、现场试验及室内离心模型试验等方法，对复杂岩溶地质条件下桥梁基础受力机制、承载特性、韧性提升方法及协同防控关键技术展开系统研究，构建了复杂岩溶地质桥梁桩基础的成套设计、施工指南以及质量评价体系和安全预警模型。项目创新点如下：

(1) 基于“岩溶-桩-岩土体相互作用模型”进行试验和数值仿真分析，揭示了岩溶桥梁桩基承载特性和荷载传递机理，提出了承载力、顶板厚度、嵌岩深度等设计方法及关键参数取值，为桥梁基础韧性提升提供了设计理论依据。

(2) 针对复杂岩溶地质下桥梁桩基施工技术瓶颈，研发了特大型溶洞的钢筋混凝土协同水泥砂浆双层护壁处治方法，形成了专项施工关键技术及质量控制标准。

(3) 建立了岩溶区桥梁桩基安全状态评价模型与动态安全预警体系，构建了桩基承载信息库并形成技术指南，提升了桥梁桩基韧性与协同防控能力。

项目成果总体达到国际先进水平。

五、推广应用情况：

项目围绕复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升与协同防控，建立了岩溶—桩—岩土体相互作用模型，探明了岩溶桩承载机理及破坏模式，提出了复杂岩溶地质影响下桥梁基础设计方法及关键参数，提出了溶洞分类处治、安全评价和预警等成套技术。成果已在公路、铁路等桥梁基础中推广应用，解决了桩基承载机理不清、溶洞处治针对性差、塌孔漏浆频发、成桩质量难控等问题，累计产生效益 48300 万元。

2020 年 10 月-2025 年 10 月，山西交科公路勘察设计院有限公司在国道 209 线改线、省道岚马线及离隰高速等工程勘察设计施工中应用本成果，通过分类注浆、溶洞精准处治、钢护筒跟进、预加固和双层护壁等措施，减少材料消耗和重复钻进，节约 9400 万元。

2020 年 1 月-2025 年 10 月，中铁十二局集团有限公司在安六铁路岩溶区桥梁桩基施工中应用本成果，针对 39.189km 线路、25 座双线大中桥和 5 座双线特大桥的岩溶条件，优化施工处治和质量控制参数，节约 6400 万元。2020 年 1 月-2025 年 11 月，成果在贵南高铁 11.3km 线路、11 座桥梁桩基中应用，节约 6500 万元。2022 年 10 月-2025 年 12 月，成果在广昆高速 24 座桥梁、510 根岩溶区桩基施工中应用，节约 7100 万元。

2022 年 1 月-2025 年 10 月，中建二局第三建筑工程有限公司在广西融福高速公路中应用本成果，大幅

提升了溶洞处治的可靠性和施工效率，有效保障了桩基质量与桥梁结构安全，缩短了工期，破解了岩溶区桩基施工瓶颈，节约 9700 万元。

2023 年 1 月-2025 年 12 月，中国建筑第二工程局有限公司在汉南长江大桥应用本成果，该项目岩溶桩 270 余处，应用后注浆充盈系数较常规方案降低约 36%，塌孔率由 28%降至 6%，单桩有效作业天数平均缩短 6.5 天，累计节约 9200 万元。

本成果可提高岩溶区桥梁基础设计可靠性、施工安全性和质量可控性，缩短工期，降低运营维护风险。我国岩溶分布广，山区交通建设需求大，相关成果可向公路、铁路、市政桥梁及类似复杂地基基础工程推广，对完善技术指南、促进降本增效和提升设施韧性具有广阔前景。

六、主要知识产权证明目录：

项目已授权知识产权一览表

授权项目名称	知识产权类别	国别	申请号	授权号
一种倾斜层状岩层中岩溶基桩模型载荷试验模型制作方法	发明专利	中国	CN202311207142.0	CN117248569B
岩溶区桥梁桩基竖向极限承载力及折减系数计算方法	发明专利	中国	CN202111556198.8	CN114218801B
一种适用于多工况的土工模型实验压实装置	发明专利	中国	CN201911042741.5	CN110793825B
一种变截面钢筋骨架布袋桩结构及施工方法	发明专利	中国	CN202010864934.5	CN111851481B
一种用于土工模型试验土钻进清除装置及方法	发明专利	中国	CN202310237605.1	CN116290177B
一种土工模型一体化试验装置	发明专利	中国	CN201911385220.X	CN110895277B
一种可移动的涵洞清洗装置及清洗方法	发明专利	中国	CN202011323605.6	CN112482551B

岩土工程桥梁桩基承载力结构评定系统	计算机软件 著作权	中 国	无	2021SR0957884
一种穿越溶洞的预制薄壁管桩复合桩基础 结构	实用新型专 利	中 国	CN202320257797.8	CN219653699U
一种扩底灌注桩扩大头配筋结构	实用新型专 利	中 国	CN202220688012.8	CN217027050U

七、代表性论文专著目录

项目代表性论文专著目录

序号	论文专著 名称	刊名	作者	年卷	发表时间	检索 数据 库
1	岩溶发育区桥梁桩基力学特性与工程技术	科学出版社	冯忠居, 陈慧芸	/	2025-7-1	/
2	Field test study on uplift bearing characteristics of rock socketed piles in sandstone stratum	Soils and Foundations	Yang Bai	2025,65	2025-3-12	SCI
3	Study on the vertical bearing performances of piles on karst cave	Scientific Reports	CHEN H Y, FENG Z J	2023,13	2023-3-27	SCI
4	Study on the vertical bearing performance of pile across cave and sensitivity of three parameters	Scientific Reports	CHEN H Y, FENG Z J	2021,11	2021-8-30	SCI
5	下伏溶洞的高嵌岩比基桩承载特性模型试验	岩土力学	杨柏	2025,46	2025-3-6	EI
6	穿越溶洞桥梁桩基嵌岩深度计算方法研究	桥梁建设	陈慧芸, 冯忠居	2024,54	2024-6-28	EI
7	桥梁桩基穿越溶洞的荷载传递机制试验研究	岩土力学	陈慧芸, 冯忠居	2023,44	2023-5-10	EI
8	公路桥梁桩基穿越超大型溶洞的荷载传递机制试验研究	岩石力学与工程学报	冯忠居, 陈慧芸	2023,42	2023-4-15	EI

9	串珠状溶洞影响下桩基 竖向承载特性离心试验	哈尔滨工业 大学学报	陈慧芸, 冯忠居	2023,55	2022-8-25	EI
10	岩溶地区公路桥梁工程 勘察与桥基处理研究	黑龙江交通 科技	师永翔	2021,44	2021-5-15	/

八、主要完成人情况:

序号	姓 名	性别	职称职务	工 作 单 位	对项目主要贡献
1	师永翔	男	正高级工程师/岩土工程 研究院院长	山西交科公路勘察设计院 有限公司	贡献科技创新点 1、2、3
2	冯忠居	男	教授/博导	长安大学	贡献科技创新点 1、2、3
3	陈慧芸	女	讲师/硕导	长安大学	贡献科技创新点 1、2、3
4	闵智昊	男	工程师/项目总工程师	中国建筑第二工程局有限 公司	贡献科技创新点 2、3
5	杨柏	男	副教授/硕导	桂林电子科技大学	贡献科技创新点 1、3
6	沈传东	男	高级工程师/高级主管	中建二局第三建筑工程有 限公司	贡献科技创新点 2、3
7	王富春	男	讲师	长安大学	贡献科技创新点 2、3
8	陈伟明	男	高级工程师/子公司副总 经理兼项目经理	中铁十二局集团有限公司	贡献科技创新点 2、3

九、主要完成单位及创新推广贡献:

排名	单位名称	主要贡献
----	------	------

1	山西交科公路勘察设计院有限公司	山西交科公路勘察设计院有限公司参与了本项目的研究工作,通过长期现场调研与现场试验,对复杂岩溶地质公路桥梁基础设计与施工关键技术进行了理论与技术创新,突破了复杂岩溶地质公路桥梁基础施工技术不系统的瓶颈,对补充和完善复杂岩溶地质公路桥梁基础工程技术及应用体系作出了重要贡献。采用多种手段开展复杂岩溶地质桥梁基础设计与施工关键技术研究,参与研究了不同方法处治溶洞时桩基荷载传递机理,参与研发了不同类别溶洞处治技术和复杂岩溶地质公路桥梁基础施工关键技术;参与建立了适用于复杂岩溶地质公路桥梁基础安全评价模型,并提出了分级标准,为复杂岩溶地质公路桥梁基础的建设和韧性提升提供了技术支撑。 本项目成果已在山西交科公路勘察设计院有限公司参与勘察设计的国道 209 线吕梁新城段改线工程、省道岚马线(岚县—马坊)一级公路工程及离隰高速等岩溶区桥梁基础建设中得到成功应用,取得了显著经济、技术、生态效益应用效果显著。
2	长安大学	长安大学基于现场调研、离心试验、数值模拟、现场试验及理论分析,开展了复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术研究工作,补充和完善了复杂岩溶地质桥梁基础设计计算理论体系、工程技术及应用体系;建立了岩溶-桩-岩土体相互作用模型,探明了岩溶桥梁桩基的荷载传递机理;提出了复杂岩溶地质桥梁基础破坏模式;提出了复杂岩溶地质桥梁基础承载力计算、顶板厚度嵌岩深度计算方法及关键参数取值;提出了复杂岩溶地质桥梁基础施工关键技术及质量控制参数;提出了特大型溶洞采用“钢筋混凝土+水泥砂浆”双层护壁的工程技术;解决了依托工程复杂岩溶地质桥梁基础设计与施工技术,对比分析了其工程效益;建立了复杂岩溶地质桥梁基础设计与施工影响指标体系及安全评价模型,构建了适用于复杂岩溶地质桥梁基础的设计与施工标准化安全评价体系,提出了复杂岩溶地质桥梁基础安全预警技术;建立了复杂岩溶地质桥梁基础信息库,编制了《岩溶发育区公路桥梁桩基设计与施工技术指南》。 通过推广,成果已在山西省、湖北省、贵州省、云南省、广西壮族自治区等地公路及铁路桥梁基础建设中得到成功应用,经济、技术、生态效益显著。
3	中国建筑第二工程局有限公司	中国建筑第二工程局有限公司参与了本项目的研究工作,围绕复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升与协同防控关键技术,结合依托工程实际开展了现场试验测试、施工过程监测与工程应用验证,参与研究了复杂岩溶地质条件下桥梁桩基荷载传递机理、破坏模式及承载特性,参与提出了不同类型溶洞处治施工关键技术、施工质量控制指标及突发问题应控措施;同时参与构建了复杂岩溶地质桥梁桩基施工质量评价体系和安全预警模型,为复杂岩溶地质桥梁基础由经验施工向标准化、精细化、可评价施工转变提供了重要工程支撑。 单位依托自身大型基础设施施工组织与现场实施能力,推动项目成果在武汉都市区环线汉南长江大桥及接线工程项目 HNTJ8 标段线路岩溶区桥梁基础工程中的应用验证,促进了复杂岩溶地质桥梁桩基设计、施工、质量控制和安全防控技术的推广应用,取得了显著的经济、社会、技术和生态效益。
4	中建二局第三建筑工程有限公司	中建二局第三建筑工程有限公司参与了本项目的研究工作,主要承担现场试验实施协调、施工技术实践与工程应用推广等工作。公司依托复杂岩溶地质桥梁基础工程施工实践,配合开展现场监测、实体工程试验和施工过程数据采集,参与研究了复杂岩溶地

	公司	质条件下桥梁桩基施工工艺、溶洞处治措施、质量控制指标及突发问题应控技术，推动了项目理论成果与现场施工需求的有效结合。通过在依托工程及类似岩溶区桥梁基础工程中的实践应用，公司参与验证并完善了不同类型溶洞处治技术、复杂岩溶地质桩基施工关键技术和施工质量控制方法，为形成《岩溶发育区桥梁桩基设计与施工技术指南》提供了重要工程支撑。 通过中建二局第三建筑工程有限公司对研究成果的推广应用，成果成功应用于广西融福高速公路，有效提升了桩基施工质量、安全风险防控能力和工程建设效率，促进了复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升与协同防控技术的工程化应用，取得了良好的经济、技术、社会和生态效益。
5	桂林电子科技大学	桂林电子科技大学参与了本项目的研究工作，重点围绕复杂岩溶地质桥梁桩基承载特性、模型试验与机理分析等方面开展研究，为项目科技创新提供了重要理论与试验支撑。结合工作报告中创新点内容，桂林电子科技大学参与构建了覆盖顶板厚度、嵌入比、岩层倾角、填充物类型、穿越溶洞数量等关键因素的模型试验体系，揭示了复杂岩溶条件下桥梁桩基承载力随顶板厚度、岩层倾角、填充物状态及串珠状溶洞数量变化的规律，为复杂岩溶地质桥梁桩基承载力计算、合理顶板厚度和嵌岩深度等设计参数取值提供了科学依据。同时，桂林电子科技大学参与提出了穿越串珠状溶洞基桩分级风险识别思路，明确了不同岩层倾角条件下基桩压溃型、滑移—压裂复合型和滑移型等破坏模式，揭示了溶洞数量增加对桩侧约束削弱和荷载传递重组的影响机制，为复杂岩溶地质桥梁桩基安全评价、风险分级和协同防控提供了技术支撑。 相关研究成果在依托工程及类似岩溶区桥梁基础工程中得到应用，为提升复杂岩溶地质桥梁基础设计精细化水平、施工安全控制能力和工程韧性作出了重要贡献。
6	中铁十二局集团有限公司	中铁十二局集团有限公司参与了复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术项目的研究工作，通过长期现场调研与现场试验，参与提出了复杂岩溶地质桥梁基础施工关键技术及质量控制参数，对补充和完善复杂岩溶地质桥梁基础理论体系、工程技术及应用体系做出了重要贡献；同时，参与研究了不同类型溶洞的针对性施工关键技术、控制指标及其标准，特别参与实施了特大型溶洞采用“钢筋混凝土+水泥砂浆”双层护壁的工程技术；参与构建了适用于复杂岩溶地质桥梁基础的设计与施工标准化安全评价体系，并参与评价了依托工程复杂岩溶地质桥梁基础的安全状况，使得复杂岩溶地质桥梁基础工程应用体系化且具有创新性。 本项目成果已在中铁十二局集团有限公司承建的广昆高速公路、安六铁路、贵南高铁岩溶区桥梁基础建设中得到成功应用，取得了显著经济、技术、生态效益应用效果显著。

十、完成人合作关系说明：

本项目研究工作由师永翔主持开展，主要完成人为师永翔、冯忠居、陈慧芸、闵智昊、杨柏、沈传东、王富春、陈伟明。师永翔就职于山西交科公路勘察设计院有限公司；冯忠居、陈慧芸、王富春就职于长安大学；闵智昊就职于中国建筑第二工程局有限公司；杨柏就职于桂林电子科技大学；沈传东就职于中建二局第三建筑工程有限公司；陈伟明就职于中铁十二局集团有限公司。自 2018 年 1 月起，项目组围绕“复

杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术”持续开展联合研究。

师永翔是山西交科公路勘察设计院有限公司岩土工程研究院院长，正高级工程师，长期从事岩土与隧道工程相关的勘察设计和科研工作，是本项目总负责人。其主要负责统筹项目立项申请，确定研究内容和研究大纲，协调复杂岩溶地质桥梁基础荷载传递机理现场试验，参与提出复杂岩溶地质桥梁基础设计计算方法与施工技术，并推动项目研究成果的推广应用。作为项目负责人，对本项目创新成果 1、2、3 均作出了显著贡献。

冯忠居是长安大学公路学院教授，长期从事岩土工程、桥梁基础工程等相关科研与教学工作，是本项目的主要技术负责人，负责项目立项内容、研究大纲、试验方案、施工技术开发等方面的审核及总体把控。出版相关专著 1 部，发表相关论文 36 篇，其中 SCI/EI 等高水平论文 35 篇；授权专利 25 项，其中授权国家发明专利 16 项；授权软件著作权 1 项。项目研究期间，与师永翔及其他完成人共同完成了“复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术”的项目研究及成果评价工作；与师永翔、陈慧芸共同完成了创新成果 1、2、3。

陈慧芸是长安大学地质工程与测绘学院讲师，负责开展项目中复杂岩溶地质桥梁基础室内试验、现场试验及数值仿真工作，完成了复杂岩溶地质桥梁基础承载特性、荷载传递机理及破坏模式研究，负责提出相关设计计算方法，并完成依托工程逐桩承载能力信息库的建立。项目研究期间，与师永翔及其他完成人共同完成了“复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术”的项目研究及成果评价工作；与冯忠居共同出版专著 1 部，合作发表论文 12 篇；共同授权专利 10 项，其中共同授权国家发明专利 6 项；共同授权软件著作权 1 项；与师永翔、冯忠居共同完成了创新成果 1、2、3。

闵智昊是中国建筑第二工程局有限公司工程师，负责复杂岩溶地质桥梁基础荷载传递现场试验的协调与实施，参与岩溶桩施工技术和溶洞处治技术研究，并负责复杂岩溶地质桥梁基础协同防控技术的工程推广应用。项目研究期间，与师永翔及其他完成人共同完成了“复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术”的项目研究及成果评价工作；与师永翔、冯忠居、陈慧芸、杨柏共同完成了创新成果 2、3。

杨柏是桂林电子科技大学副教授，负责复杂岩溶地质倾斜层状岩层中基桩承载力变化规律研究，探明了不同岩层倾角、溶洞填充物及溶洞数量对岩溶桩承载特性和破坏模式的影响，提出了穿越串珠状溶洞基桩分级风险识别思路。发表 SCI/EI 等高水平论文 8 篇；授权专利 5 项，其中授权国家发明专利 1 项。项目研究期间，与师永翔及其他完成人共同完成了“复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术”的项目研究及成果评价工作；与师永翔、冯忠居、陈慧芸共同完成了创新成果 1、3；与闵智昊共同完成了创新成果 3。

沈传东是中建二局第三建筑工程有限公司高级工程师，参与复杂岩溶地质桥梁基础施工技术及溶洞处治方法研究，协调岩溶桩荷载传递机理现场试验实施，参与复杂岩溶地质桥梁基础协同防控技术的工程推广应用。项目研究期间，与师永翔及其他完成人共同完成了“复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术”的项目研究及成果评价工作；与师永翔、冯忠居、陈慧芸、闵智昊、杨柏共同完成了创新成果 2、3。

王富春是长安大学讲师，负责并完成了复杂岩溶地质桩基承载特性现场试验和离心模型试验工作，参与提出了“溶洞—桩—岩土体”相互作用模型，参与提出了复杂岩溶地质桩基设计计算方法及关键参数取值。项目研究期间，与师永翔及其他完成人共同完成了“复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术”的项目研究及成果评价工作；与冯忠居合作发表论文 2 篇，授权专利 8 项；与陈慧芸合作发表论文 1 篇；并与师永翔、冯忠居、陈慧芸、杨柏共同完成了创新成果 2、3。

陈伟明是中铁十二局集团有限公司高级工程师，参与复杂岩溶地质桥梁基础承载特性及荷载传递机理现场试验协调工作，参与提出了不同类别溶洞处治技术及岩溶发育区桥梁桩基施工关键技术，推动了复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术的工程应用。项目研究期间，与师永翔及其他完成人共同完成了“复杂岩溶地质桥梁基础韧性提升体系构建与协同防控关键技术”的项目研究及成果评价工作；与师永翔、冯忠居、陈慧芸、闵智昊、杨柏、沈传东、王富春共同完成了创新成果 2、3。