**关于中建隧道建设有限公司申报2020年度**

**重庆市科技进步奖公示材料**

**（一）项目名称**

山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术

**（二）提名单位及提名意见**

提名单位：重庆市南岸区科技局

项目针对富水与断裂地层隧道围岩破坏预测、水荷载与构造应力场确定以及施工安全智能预测预警等关键问题，项目组在交通部、重庆市、广东省等重大项目的支持下，开展了理论分析、模型试验、数值模拟与现场实测等十余年的系统研究，建立了公路隧道围岩极限应变破坏预测方法与标准，实现了对施工人员安全的随动互馈式预警，取得了考虑外水压力-断裂构造应力-自重应力的隧道安全极限分析方法、基于洞周边界面力的隧道水荷载计算方法、基于位移不连续法的断裂构造应力场计算方法、隧道施工安全随动预警系统等创新成果。项目成果已成功应用于多座公路隧道，实现经济效益1.45亿；打通了公路隧道施工过程围岩稳定性“感-传-评-知”关键症结，提升了隧道建设安全保障的行业整体技术水平；具有显著社会价值，应用前景广阔。我单位严格对推荐书内容及全部附件材料进行了严格审查，确认该成果符合《重庆市科学技术奖励办法实施细则》规定的推荐资格条件，推荐材料全部内容属实。

提名该项目为重庆市科技进步奖一等奖。

# （三）项目简介

21世纪以来，我国公路隧道迅猛发展，年均新增超12%，已成为公路隧道最多的国家。然而，对于岩体公路隧道，围岩失稳与结构破坏的预测方法与标准尚不成熟，富水与断裂等典型常见不良地质又加剧了坍塌、突水的灾害；同时，隧道内施工环境恶劣，通讯受阻，定位不准，施工人员的安全往往处于“黑箱”状态，重大安全事故时有发生。因此，如何科学预测围岩破坏，并为施工人员提供准确实时的预警信息，长期以来一直是困扰隧道安全的关键难题。

在交通部、重庆市、广东省等重大项目的支持下，开展了理论分析、模型试验、数值模拟与现场实测等十余年的系统研究，建立了公路隧道围岩极限应变破坏预测方法与标准，实现了对施工人员安全的随动互馈式预警，取得了考虑外水压力-断裂构造应力-自重应力的隧道安全极限分析方法、基于洞周边界面力的隧道水荷载计算方法、基于位移不连续法的断裂构造应力场计算方法、隧道施工安全随动预警系统等四项创新成果，具体包括：

（1）针对隧道破坏预测难题，提出了考虑外水压力、断裂构造应力以及岩体重力等作用的隧道围岩与结构安全极限分析方法，建立了基于安全系数连续量化的公路隧道围岩稳定性评价标准。构建了公路隧道围岩破坏预测体系。

①引入工程材料强度破坏理论和极限应变分析法，根据围岩力学参数开展等效岩块极限应变数值试验，获取了不同围岩级别条件下隧道岩体材料的弹塑性极限应变破坏标准。

②通过对隧道围岩失稳判据调研与对比分析的基础上，建立了隧道洞周位移与围岩稳定安全系数的定量关系，提出了基于“围岩极限应变破坏区域贯通+围岩位移突变”的围岩稳定性综合判据。

③引入隧道围岩稳定安全系数，通过数值极限分析，提出了考虑外水压力、断裂构造应力以及岩体重力作用下的隧道围岩与结构失稳破坏模式以及稳定性定量评价方法与相对极限位移标准。

（2）针对外水压力问题，揭示了考虑渗流作用时空动态效应的岩体隧道水荷载折减机理，提出了基于洞周边界面力的水荷载计算方法。

①针对外水压力折减问题，从蚁群效应、动态效应和渗流效应等角度，立足隧址区地下水运动时空动态效应的本质，系统揭示了岩体隧道水荷载的折减机理，并通过隧道外水压力模型试验进行了验证研究。

②针对外水压力作用下的隧道结构计算问题，系统论证了“基于洞周边界面力的地层结构法”的科学合理性，从原理、方程和过程等角度建立了其方法体系，提出了隧道的关键承水压性能指标“似刚度比”和“下半断面矢跨比”。

（3）针对断裂构造应力场扰动问题，拓展了用于非线性断层扰动应力场分析的位移不连续法，提出了断裂构造应力场的计算方法。

①针对DDM数值方法在有限边界条件的应用局限问题，从传递矩阵-刚度矩阵角度，采用算法推导与计算分析，解决了任意层状异性介质的有限边界、复合平面DDM应用问题。

②针对DDM方法在非线性问题计算上的不足，结合岩体非线性节理模型的DDM算法推导，突破了非连续面压剪传统摩擦滑移DDM简化模式，拓展了DDM数值方法在非线性有限变形问题中的适用性。

③将DDM与多元回归相结合，通过多方法对比，实测验证，形成了的复杂构造应力场的三维数值模拟方法，解决了任意复杂构造地应力场模拟难题。

（4）开发了适应隧道施工环境的扩频通讯技术、人员定位技术与拱顶沉降自动监测装置；基于极限位移预警标准，构建了隧道施工安全随动预警系统。实现了跟随人员、跟随施工、跟随状态的实时互馈式预警。

①针对隧道洞内复杂恶劣的施工环境，引入超宽带定位技术，提出了基于距离交会算法和信号飞行时间的隧道施工环境人员平面精确定位算法，并开发相应的定位预警模块，隧道施工环境平面定位精度达到米级以下。

②针对施工人员自我安全感知的“黑箱”问题，基于极限位移预警标准和扩频通讯技术，研发了隧道施工安全互馈式随动预警系统。

项目编制4部行业规范和地方标准（主编2部），获33项专利授权（发明专利11项），发表99篇论文（SCI收录23篇，EI收录41篇），出版3部专著（“十三五”国家重点图书1部），研发1套新产品，获3项软件著作权。

项目成果已成功应用于多座公路隧道，实现经济效益1.45亿；打通了公路隧道施工过程围岩稳定性“感-传-评-知”关键症结，提升了隧道建设安全保障的行业整体技术水平；具有显著社会价值，应用前景广阔。

项目成果社会、环保及经济效益显著，经评价总体达到国际领先水平。

（四）客观评价

**4.1 查新**

教育部科技查新工作站对“山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术”进行了成果查新，查新结论为：在国内外公开发表的文献中，关于山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术研究，除本项目委托单位项目组成员公开发布文献以外，未见具有与本项目查新点完全相同的公开文献报道。

**4.2 鉴定评价**

2020年5月16日，中国岩石力学与工程学会组织召开了由招商局重庆交通科研设计院有限公司、重庆大学和中建隧道建设有限公司共同完成的“公路隧道围岩极限应变破坏预测与随动预警”项目成果评价会。以冯夏庭院士为主任委员、郑颖人院士、方祖烈教授为副主任委员的评价委员会一致认为该成果总体上达到国际领先水平。

**4.3 检测报告**

西南计算机有限责任公司检测计算与软件测评中心对项目研究成果“隧道施工安全随动互馈式预警系统”进行了测试，在定位救援覆盖范围、预警响应时间等方面，得到如下结论：

定位救援覆盖范围>200m、定位精度<1m；

定位响应时间<60S、预警响应时间<60S。

**4.4 用户评价**

项目研究成果在巫溪隧道、旗杆山隧道、曾家岩隧道等重难点工程中得到应用。针对巫溪隧道穿越岩溶等高水压段，项目成果的应用“避免了突水涌泥等灾害事件的发生，提升了隧道作业效率，降低支护成本，企业效益显著增加”。针对旗杆山隧道穿越断层问题，项目成果的应用“提高了隧道穿越断层带区域支护结构的计算效率，优化结构支护参数，保障施工安全，成果有效可行，具有推广价值”。针对曾家岩隧道城市复杂区施工问题，项目成果的应用“有效评价了隧道围岩稳定性，对于变形严重段落多次成功预警，保障隧道施工结构稳定性的同时，也通过人员随动系统保证了隧道内工作人员的人生安全”。

（五）推广应用、社会效益和经济效益

**5.1 推广应用**

研究成果“山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术”分别在中国铁建大桥工程局集团有限公司城口至开州高速公路城开高速公路旗杆山隧道、中铁十二局集团有限公司巫镇高速巫镇高速公路巫溪隧道、中铁隧道股份有限公司重庆曾家岩大桥隧道工程、重庆中环建设有限公司重庆市两江桥渝中连接隧道、中建隧道建设有限公司缙云山隧道、龙洲湾隧道、中梁山隧道扩容改造工程进行应用，取得了较好的经济、社会和环境效益，得到成果应用单位的一致好评。具体情况详见下表：

主要应用单位情况表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 应用单位名称 | 应用技术 | 应用对象及规模 | 应用起止时间 | 单位联系人/电话 |
| 中国铁建大桥工程局集团有限公司城口至开州高速公路A3合同段项目经理部 | 山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术 | 城开高速公路旗杆山隧道 | 2017年8月-2019年12月 | 李洪林/  18322146900 |
| 中铁十二局集团有限公司巫镇高速总承包指挥部 | 山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术 | 巫镇高速公路巫溪隧道 | 2017年10月-至今 | 杨志杰/  18592029097 |
| 中铁隧道局集团有限公司重庆曾家岩大桥隧道工程项目经理部 | 山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术 | 重庆市曾家岩嘉陵江大桥项目隧道工程 | 2017年7月-至今 | 何乃贵/  15023307581 |
| 重庆中环建设有限公司渝中连接隧道工程项目经理部 | 山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术 | 重庆市两江桥渝中连接隧道 | 2017年3月-2019年5月 | 李劲松/  13635483470 |
| 中国建筑第五工程局有限公司重庆都市快轨铜梁试验线缙云山隧道项目经理部 | 山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术 | 缙云山隧道 | 2017年1月-至今 | 杨静/  19150308895 |
| 中国建筑第五工程局有限公司龙洲湾隧道工程项目经理部 | 山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术 | 龙洲湾隧道 | 2017年2月至2019年3月 | 葛玉强/  15213012009 |
| 中国建筑第五工程局有限公司成渝高速中梁山隧道扩容改造工程一标段项目经理部 | 山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术 | 中梁山隧道扩容改造工程 | 2017年1月-2018年12月 | 曹玉华/  15123134627 |

**5.2 社会效益**

“山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术”相关研究成果的成功应用，成功解决了复杂地质条件下隧道围岩稳定性评价问题，提出了基于洞周边界面力的计算方法，拓展了用于非线性断层扰动应力场分析的位移不连续法，建立了公路隧道围岩安全系数连续量化分级评价标准，构建了隧道施工安全随动预警系统，在保障施工安全的同时，通过优化结构支护参数，大幅提升施工效率；同时新技术的提出以及新产品的研发与应用，也极大的推动了隧道建设行业监测预警和施工安全保障领域的信息化、可视化、智能化的发展进程，提升了行业整水平，将“平安工地、智慧工地”的理念通过行之有效的方法落到实处。技术整体具有极强的社会示范效益和应用推广价值。

**5.3 经济效益**

项目成果已成功应用于多座公路隧道，近3年累计实现经济效益1.45亿。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 自然年 | 应用单位 | |
| 新增利润 | 节约成本 |
| 2017 | 427.83 | 3309.312 |
| 2018 | 992.25 | 5091.761 |
| 2019 | 833.4 | 3818.441 |
| 累计 | 2253.48 | 12219.514 |
| 应用单位经济效益：  （1）中建五局在中梁山扩容隧道、缙云山隧道、龙洲湾隧道三座隧道的建设过程中，通过对山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术技术相关研究成果的应用，在穿越岩溶富水段落以及断层破碎段落时，对水压力折减机理和相关荷载进行合理分析，对断层区域段落的地应力进行计算，合理的提出了支护参数，通过材料、人工、机械器具等投入的减少，节约了成本共计约4963.95万元，通过增加工作效率，缩短了是最大开挖工期，新增利润约为154.33万元。  （2）中铁隧道股份有限公司重庆曾家岩大桥隧道工程项目公司在重庆市曾家岩嘉陵江大桥项目隧道工程推广应用山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术技术相关研究成果前，平均每掘进1m成本约166000元；应用该成果后，平均每掘进1m成本约161900元；2017年曾家岩大桥隧道工程累计掘进510m×2，2018年累计掘进1450m×2，2019年累计掘进1932m×2，共计7784m，节约成本约3191.44万元。成果推广后，平均每天总掘进距离由4m增至6m，每天费用约为1.2万元，新增利润约（7784m/4-7784m/6）×1.2=778.40万元。 累计增加经济效益共计3969.84万元。  （3）中国铁建大桥工程局集团有限公司通过对山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术技术相关研究成果的应用，在1216延米单层构造带区域，每延米节约原材料约为13040元/延米，合计约1585.664万元；提高计算工作效率，节约相应成本约120万元；共计约为1705.664万元。  （4）重庆中环建设有限公司渝中连接隧道工程项目经理部渝中连接隧道对山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术技术相关研究成果的应用，提高了工作效率，节约直接成本约为7200元/天，合计约为709.56万元；通过节约税收、减少不良地质费用等节约间接成本约840万元；累计创造利润约为1540.56万元。  （5）中铁十二局集团有限公司巫镇高速总承包指挥部通过应用山岭隧道围岩整体破坏极限分析与施工人员随动预警关键技术技术相关研究成果，通过优化支护参数，提升了工程作业效率，降低了支护成本。平均每掘进1米成本约为120600元；应用该成果后平均每掘进1米成本约为115700元；2018年累计掘进410m×2，2019年累计掘进1395m×2，共计3610米，节约成本约1768.90万元。成果推广后，平均每天总掘进距离由6m增至9m，每天费用约为1.1万元，新增利润约（3610/6-3610/9）×1.1=360.78万元。合计节约成本约为2129.68万元。 | | |

（六）主要知识产权证明目录

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **知识产权（标准类别）** | **知识产权（标准）具体名称** | **国家**  **（地区）** | **授权号（标准编号）** | **授权（发布）日期** | **证书编号（标准发布部门）** | **（权利人标准起草单位）** | **发明人（标准起草人）** | **发明专利（标准）有效状态** |
| 授权发 明专利 | 一种隧道支护结构受力监测装置及方法 | 中国 | ZL201510662104.3 | 2018-02-09 | 2812438 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 江星宏、杨新安、何知思 | 有效专利 |
| 规范 | 公路隧道设计规范 第一册 土建工程 | 中国 | JTG3370.1-2018 | 2019-05-01 | 中华人民共和国交通运输部 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 蒋树屏（主编） | 有效规范 |
| 软件著作权 | 隧道施工安全便携式人员跟踪预警系统V1.0 | 中国 | 2018SR833570 | 2018-10-18 | 3162665 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 郭鸿雁、李科、江星宏 | 有效知识产权 |
| 授权发明专利 | 富水岩溶隧道衬砌外水压力测试装置及测试方法 | 中国 | ZL201510534899.X | 2017-10-17 | 2658289 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 钟祖良、刘新荣、易立、成盛、刘坤 | 有效专利 |
| 授权发明专利 | 基于地勘成果的水下隧道地应力场DDM反演方法 | 中国 | ZL2016105384307.X | 2019-04-09 | 3326744 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 李科、丁浩、吴梦军、吴胜忠 | 有效专利 |
| 标准 | 重庆市富水公路隧道设计指南 | 重庆 | CQJT/TD01-2016 | 2016-05-01 | 重庆市交通委员会 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 丁浩、李关寿、肖博等 | 有效标准 |
| 规范 | 地下工程地质环境保护技术规范 | 重庆 | DBJ50/T-189-2014 | 2014-09-01 | 重庆市国土资源和房屋管理局、重庆 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 廖云平、杨乐、方玉树等 | 有效规范 |
| 专著 | 有限元极限分析法及其在边坡中的应用 | 中国 | ISBN978-7-114-09205 | 2011-09-01 | 人民交通出版社 | 无 | 郑颖人、赵尚毅、李安洪、唐晓松 | 其他有效知识产权 |
| 专著 | 隧道全寿命周期监测预警技术与系统平台应用 | 中国 | ISBN978-7-5643-7145-0 | 2020-04-01 | 西南交通大学出版社 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 段军、李科、杨志华、郭鸿雁、金飞 | 其他有效知识产权 |
| 专著 | 富水隧道修建理念及关键技术 | 中国 |  | 2019-06-01 | 人民交通出版社 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 蒋树屏、丁浩、方林、张兰军 | 其他有效知识产权 |

# （七）主要完成人情况

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **姓名** | **性别** | **出生年月** | **技术职称** | **文化程度** | **工作单位** | **对成果创造性贡献** |
| 1 | 丁 浩 | 男 | 1978.05 | 研究员 | 博士 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 成果总组织 |
| 2 | 李 科 | 男 | 1986.07 | 正 高 | 博士 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 断裂岩体分析与预警 |
| 3 | 蒋树屏 | 男 | 1951.10 | 研究员 | 博士 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 地下水和围岩稳定分析 |
| 4 | 钟祖良 | 男 | 1980.10 | 副教授 | 博士 | 重庆大学 | 围岩安全评价 |
| 5 | 郭鸿雁 | 男 | 1985.12 | 高 工 | 硕士 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 围岩预警指标 |
| 6 | 张清照 | 男 | 1982.07 | 副研究员 | 博士 | 同济大学 | 围岩稳定性分析 |
| 7 | 江星宏 | 男 | 1991.05 | 工程师 | 硕士 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 数值极限分析 |
| 8 | 须民健 | 男 | 1984.12 | 高 工 | 硕士 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 预警系统研发 |
| 9 | 唐晓松 | 男 | 1979.01 | 副教授 | 博士 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 围岩极限应变法分析 |
| 10 | 敖贵勇 | 男 | 1985.06 | 高 工 | 学士 | 中建隧道建设有限公司 | 现场测试与预警 |
| 11 | 廖 峻 | 男 | 1987.04 | 工程师 | 硕士 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 地下水压力计算与预警 |
| 12 | 郝 坤 | 男 | 1985.02 | 工程师 | 硕士 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 断裂构造应力计算与预警 |
| 13 | 肖 博 | 男 | 1978.08 | 正 高 | 硕士 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 围岩变形分析 |
| 14 | 李文锋 | 男 | 1985.05 | 高 工 | 硕士 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 围岩稳定性分析 |
| 15 | 刘秋卓 | 男 | 1987.09 | 高 工 | 硕士 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 实验与现场测试 |

# （八）主要完成单位情况

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **完成单位名称** | **邮政编码** | **详细通信地址** | **联系人** | **联系电话** |
| 招商局重庆交通科研设计院有限公司 | 400067 | 重庆市南岸区学府大道33号 | 李科 | 18008377503 |
| 重庆大学 | 400044 | 重庆市沙坪坝区沙正街174号 | 钟祖良 | 13594058380 |
| 同济大学 | 200092 | 上海市四平路1239号 | 张清照 | 13816873098 |
| 中建隧道建设有限公司 | 400037 | 重庆市巴南区巴滨路6号 | 敖贵勇 | 18602301985 |

**（九）完成人合作关系说明**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **合作方式** | **合作者** | **合作时间** | **合作成果** |
| 1 | 申请专利 | 丁浩、李科 | 2016.07 | 基于地勘成果的水下隧道地应力场DDM反演方法 |
| 2 | 申请专利 | 李科、郭鸿雁、  江星宏 | 2016.03 | 基于直角三角形原理的隧道沉降位移监测装置 |
| 3 | 申请专利 | 丁浩、李科、郭鸿雁、江星宏 | 2017.07 | 穿越断层隧道开挖模拟实验装置 |
| 4 | 申请专利 | 李科、郭鸿雁、须民健 | 2018.11 | 隧道围岩稳定与测点防撞损毁报警系统 |
| 5 | 标准编制 | 招商局重庆交通科研设计院有限公司、重庆大学 | 2016.05 | 重庆市富水公路隧道设计指南 |
| 6 | 专著编写 | 丁浩、蒋树屏 | 2019 | 富水隧道修建理念及关键技术 |
| 8 | 专著编写 | 李科、郭鸿雁 | 2020 | 道全寿命周期监测预警技术与系统平台应用 |
| 9 | 论文发表 | 丁浩、李科、郭鸿雁 | 2019 | Development and application of portable intelligent warning system for safe tunnelling |
| 10 | 论文发表 | 李科、江星宏 | 2019 | Three-Dimensional Propagation Simulation and Parameter Analysis of Rock Joint with Displacement Discontinuity Method |
| 11 | 论文发表 | 丁浩、蒋树屏 | 2009 | 外水压下隧道围岩与衬砌的随机有限元分析 |
| 12 | 论文发表 | 丁浩、李科、江星实 | 2017 | 断裂扰动区隧道初始地应力场数值反演 |