

2021 年度青岛市科学技术奖拟推荐项目公示材料

一、项目名称：地下工程富水砂土软弱地层高效注浆材料及加固机理与关键技术

二、推荐单位推荐意见：

推荐单位：中国海洋大学

“地下工程富水砂土软弱地层高效注浆材料及加固机理与关键技术”项目研究团队突破了富水砂土软弱地层注浆扩散规律与加固的基础理论难题，为富水砂土软弱地层灾害注浆防控理论奠定了理论基础；研发了新型高效注浆材料 EMCG 及其配套工业制备技术与生产工艺，为新材料大规模工程应用提供了技术保障；攻克了地下工程富水砂土软弱地层灾害主动防控核心成套技术体系难题；具有重大科学意义和应用价值。本成果授权国家发明专利 16 项、实用新型专利及计算机软件著作权 17 项，发布了团体标准 2 部，形成了工法 2 项，出版专著 3 部，相关成果已纳入国家标准《建筑基坑工程监测技术标准》(GB50497-2019)，发表高水平学术论文 93 篇，其中 SCI、EI 检索 53 篇，建立了工程示范基地，培养了博士 7 名、硕士 21 名。本成果已在青岛地铁区间隧道及车站(13 号线、2 号线、4 号线)、京沈高铁高丽营隧道、广西均昌隧道等二十余个富水砂土软弱地层注浆工程中推广应用，产生经济效益 3.17 亿元，节约工程造价 35%以上，取得了良好经济、环境与社会效益。有力促进了行业科技进步，在地下工程富水软弱地层灾害防控领域起到了重要引领与示范作用。参照青岛市科学技术奖申报和推荐条件，推荐该项目申报 2021 年度青岛市科技进步奖二等奖。

三、项目简介：

本项目属于土木水利交通工程领域中的隧道及地下工程。

我国是世界上隧道及地下工程建设规模和难度最大的国家，地下工程建设严重掣肘于赋存环境复杂的富水砂土软弱地层。富水砂土地层因其松散软弱、透水性强、可注性差、自承载能力差、难以预测和治理难度大等特点，极易诱发涌水、突泥溃砂、塌方等重大地质灾害，是隧道与地下工程界最难治理的不良地质之一。

本项目以国家自然科学基金等项目为牵引，结合一批富水砂土软弱地层灾害防控重难点工程，集合 5 家科研、设计和施工单位，经近 10 年科研攻关与工程实践，解决了富水砂土软弱地层灾害防控核心技术难题，形成了涵盖理论、材料、方法、设备、技术在内的整套富水砂土软弱地层灾害防控技术体系。取得了以下科技创新：

(1) 突破了富水砂土软弱地层注浆扩散规律与加固的基础理论难题。构建了基于砂土体与水泥基浆液参数的可注性物理模型；获得了复杂环境下多影响因素对浆液粘度时变影响规律；建立了基于浆-砂耦合作用的砂土体多序压缩模型，创新性揭示了多序注浆动态扩散机理；获得了加固体宏观力学性能参数与浆液参数、注浆参数及砂土体参数间定量关系；获得了渗透-渗滤、劈裂-压密等多种加固模式的主控因

素，提出了主控因素定量表征方法；揭示了浆-岩微观界面特性对加固体宏观力学性能的主导机制；为富水砂土软弱地层灾害注浆防控理论奠定了理论基础。

(2) 研发了新型高效注浆材料EMCG及其配套工业制备技术与生产工艺。基于“超细分级-固废互补协同-火山灰效应”原理，研发了高效注浆材料(EMCG)；EMCG具有可注性高、抗渗抗蚀、微膨胀、高强高耐久、泵送稳定、凝胶时间可控等优点；充分利用了钢渣等固废，实现了固废的绿色、高附加值利用；研发了以“以破带磨-预均化-超细粉磨-气流分级-二次高度均化”为核心的EMCG工业化生产工艺体系，提高了超细分级粉磨及均化效率；形成了EMCG材料性能测试检验标准，为新材料工业大量生产及大规模应用提供了技术保障。

(3) 攻克了地下工程富水砂土软弱地层灾害主动防控核心成套技术体系难题。提出了基于新材料EMCG的注浆加固效果定量估算方法；建立了多序注浆扩散模型，提出了浆脉尺寸的判定方法和标准；研发了关键孔优选、梯度控制、预加地层水平应力、隔压强渗封固等注浆加固技术；提出了关键注浆参数注浆全过程控制方法，实现了注浆压力、浆脉尺寸、注浆加固体参数和注浆加固进度控制；建立了基于新材料与新技术的富水砂土软弱地层注浆工程设计方法；集成建立了成套灾害主动防控技术体系，解决了地下工程砂土软弱地层灾害注浆治理等系列难题。

项目成果已在青岛地铁(13 号线、2 号线、4 号线)、京沈高铁高丽营隧道、广西均昌隧道等二十余个工程中成功推广应用，解决了软弱砂土地层灾害防控技术难题，产生经济效益 3.17 亿元，取得了良好的经济、环境与社会效益。2021 年 4 月 23 日，经中国岩石力学与工程学会组织的科技成果鉴定，成果总体上达到国际先进水平，在注浆新材料、注浆效果控制与评价方法方面达到国际领先水平；2018 年 10 月 27 日，经中国岩石力学与工程学会组织的科技成果鉴定，成果总体达到国际先进水平，其中砂层可注性判识方法与加固技术达到国际领先水平。项目成果作为主要技术已于 2019 年实现专利转化 500 万元，得到了建设与设计单位高度评价。

本项目成果授权发明专利 16 项、实用新型专利及软著 17 项，发布了团体标准 2 部，形成了工法 2 项，出版专著 3 部，相关成果已纳入国家标准《建筑基坑工程监测技术标准》(GB50497-2019)，发表了高水平学术论文 93 篇，其中 SCI、EI 检索 54 篇，建立了工程示范基地，培养了博士研究生 7 名、硕士研究生 21 名，有力促进了行业科技进步，在隧道及地下工程富水软弱地层灾害防控领域起到了重要引领与示范作用。

四、客观评价：

1、科技鉴定评价

(1) 2021年4月23日，中国岩石力学与工程学会组织召开了由中国海洋大学牵头完成的项目成果鉴定评价会，由宋振骥院士等7名专家组成的评价委员会指出：提出了复杂环境浆液粘度时变过程的注浆表征参数，建立了软弱破碎围岩多序注浆劈裂扩散动态模型，提出了浆脉尺寸的判定方法和标准；研发了隧道突水封堵高效水泥基注浆材料，提出了注浆全过程控制方法。评价委员会一致认为，成果总体上达

到国际先进水平，在注浆新材料、注浆效果控制与评价方法方面达到国际领先水平。

(2) 2018年10月27日，中国岩石力学与工程学会组织召开了项目成果鉴定评价会，由方祖烈教授等7名专家组成的评价委员会指出：建立了砂层劈裂-压密注浆扩散理论模型、注浆加固效果定量化估算方法和砂层注浆设计方法；提出了预加地应力控制注浆技术，实现了浆液在砂层内部扩散的定域控制；提出了地表-洞内协同治理技术体系，实现隧道整体开挖安全。评价委员会一致认为，成果总体达到国际先进水平，其中砂层可注性判识方法与加固技术达到国际领先水平。

2、验收意见

支持该成果的国家自然科学基金青年项目：深长隧道充填型致灾构造突水机理与灾变演化全过程模拟研究（51709159）、国家自然科学基金面上项目：海底粉质土液化重建地层特征及其风暴浪动力强度研究-以黄河三角洲为例（41576039）、中国科协青年人才托举工程项目：滨海岩溶弱胶结岩体注浆扩散与加固机理及突涌水防控关键技术（2019QNRC001）、中国博士后科学基金面上项目：富水砂层高效注浆材料及加固机理研究与应用（2018M642658）、山东省水利勘测设计院委托项目：胶东引黄调水工程隧洞段地球物理调查（20090174）主持均通过验收。

3、科技奖励

本项目前期核心探索性研究成果获得了2019年山东省教育厅山东省优秀博士论文奖、山东大学优秀博士论文奖。

4、行业领域评价

本项目相关成果发布了中国工程建设标准化协会“盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程”（T/CECS 563-2018）、江苏省土木建筑学会“城市地下综合管廊工程施工质量验收标准”（T/JSTJXH 6-2021）团体标准2项；形成了“强富水沙层基坑周边注浆止水工法”（ZJSHS-GF-2017-05）、“明挖异型多跨隧道结构施工工法”（ZJSHS-GF-2017-04）工法2项；形成了围绕地下工程富水砂土软弱地层安全施工、灾害治理材料、安全施工的关键工艺技术。本项目研究成果推动了行业技术进步，部分成果已纳入国家标准《建筑基坑工程监测技术标准》（GB50497-2019），出版专著《城市轨道交通工程检测技术与管理指南》（中国建筑工业出版社，2019年）、《地铁施工手册》（人民交通出版社股份有限公司，2020年）及《城市轨道交通地下车站现浇混凝土抗裂设计与施工指南》（中国建筑工业出版社，2019年）3部。本项目研究成果作为主要技术支撑，已实现专利转化500万元，得到了建设与设计单位高度评价。

5、科技查新

2021年3月11日，教育部科技查新工作站对项目进行科技查新，查新结果显示除该委托查新的课题组成员发表的文献外，未见有与项目查新点综合研究内容相同的研究报道。

6、学术评价

本项目成果发表学术论文93篇，其中SCI、EI检索53篇，发表在*Constr. Build.*

Mater.、*J. Mater. Civil. Eng.*、岩石力学与工程学报、岩土力学等国内外知名期刊，核心成果单篇Top SCI他引50余次；被引学者包括北京交通大学973首席科学家袁大军教授团队、山东大学国家杰青李利平教授团队等。西安建筑科技大学王社良教授、马来西亚理科大学Ling Ling Tiong教授、印度SRM大学V.R. Prasath Kumar教授分别在中科院Top SCI期刊*Constr. Build. Mater.*（2020年265卷、2019年202卷）、2区SCI期刊*J. Build. Eng.*（2019年26卷）引述了申请人成果，并在文中作为理论支撑。中南大学林杭教授团队，发表于断裂力学权威SCI期刊*Theor. Appl. Fract. Mec.*（2020年108卷），引述了申请人成果：“Grouting reinforcement can be regarded as the filling of natural flaws with filling materials, such as cement slurry”，并评价为“It is of great engineering significance to study the influence of fillings on rock fractures.”研究成果支撑项目完成人获得了2019年中国科学技术协会岩石力学与工程学会“青年人才托举工程”、2021年山东省青年科技人才托举工程等荣誉。2016年12月发表的相关学术论文荣获“第四届中国有色金属优秀科技论文”。项目核心成果荣获了2019年山东省及山东大学优秀博士论文。

7、应用效果评价

项目组的研究成果已在中交第三航务工程局有限公司、中铁十二局集团有限公司等单位的项目中得到推广应用。成果应用于青岛地铁(13 号线、2 号线、4 号线)、京沈高铁高丽营隧道、广西均昌隧道等二十余个富水砂土软弱地层中，基于富水砂土软弱地层注浆扩散与加固机理的科学系统研究，研发了新型高效注浆材料 EMCG 及其配套工业技术与生产工艺，集成建立了灾害主动防控核心成套技术体系。在砂层可注性判识方法、注浆新材料、注浆效果控制、加固技术与评价方法方面达到了国际领先水平。确保没有因地层隆沉过大导致的停工情况的发生，同时避免了人员伤亡。

五、主要完成人情况：

沙飞，孟庆生，李鹏，刘聪，丁永玲，王宁宁，魏义山，范国玺，苏秀婷，王卫

沙飞(1/10)：副教授，中国海洋大学，对创新点 1、2、3 作出了贡献，其中对创新点 1 的贡献是：构建了基于砂土体与水泥基浆液参数的可注性物理模型；得到了粘度时变影响规律，获得了主控因素与加固体性能间定量关系；揭示了浆-岩微观界面特性对加固体宏观力学性能的主导机制；对创新点 2 的贡献是：研发了高效注浆材料 EMCG 及配套工业化生产工艺体系；对创新点 3 的贡献是：提出了基于新材料 EMCG 的注浆加固效果定量估算方法；研发了关键注浆加固技术，完善了注浆工程设计方法；集成建立了成套灾害主动防控技术体系。

孟庆生(2/10)：副教授，中国海洋大学，对创新点 1、2、3 作出了贡献，其中对创新点 1 的贡献是：开展了富水砂土体的原位测试，获得了注浆加固模式的主控因素；对创新点 2 的贡献是：形成了 EMCG 材料性能测试检验标准，协助第 1 完成人建立了 EMCG 配套工业生产工艺；对创新点 3 的贡献是：完善了注浆效果无损检测评价方法，完善了成套灾害主动防控技术体系。

李鹏(3/10): 副教授, 中国海洋大学, 对创新点 1、3 作出了贡献, 其中对创新点 1 的贡献是: 揭示了浆液粘度时变影响规律及多序注浆动态扩散机理, 协助第 1 完成人建立了基于浆-砂耦合作用的砂土体多序压缩模型; 对创新点 3 的贡献是: 建立了浆脉尺寸的判定方法和标准, 协助第 1 完成人提出了基于关键注浆参数的注浆全过程控制方法。

刘聪(4/10): 博士后, 山东大学, 对创新点 1、3 作出了贡献, 其中对创新点 1 的贡献是: 研究了基于浆/水-砂-土耦合作用的数值模拟与计算方法, 协助第 1 完成人开展了砂土加固地层稳定性与效果主控因素分析研究; 其中对创新点 3 的贡献是: 基于多种数值模拟与计算方法, 协助第 1 完成人提出了注浆加固效果定量估算方法。

丁永玲(5/10): 副教授, 山东交通学院, 对创新点 2 作出了贡献, 对创新点 2 的贡献是: 优化了新型注浆材料组分、水化矿物及微观结构, 协助第 1 完成人建立了工业制备技术, 协助第 2 完成人完成了材料性能测试检验。

王宁宁(6/10): 高级工程师, 苏交科集团股份有限公司, 对创新点 2、3 作出了贡献, 对创新点 2 的贡献是: 开展了新型注浆材料室内性能试验研究; 对创新点 3 的贡献是: 开展了新型注浆材料现场应用试验研究, 协助第 1 完成人完善了新材料工程应用技术规程。

魏义山(7/10): 高级工程师、中交三航局南京分公司副总工, 中交第三航务工程局有限公司, 对创新点 3 作出了贡献, 对创新点 3 的贡献是: 提出了强富水砂层基坑周边注浆止水工法、明挖异型多跨隧道结构施工工法, 协助第 1 完成人完善了现场注浆控制方法与综合施工方法。

范国玺(8/10): 副教授, 中国海洋大学, 对创新点 2、3 作出了贡献, 对创新点 2 的贡献是: 优化了材料工业制备技术; 对创新点 3 的贡献是: 协助第 1 完成人完成了材料现场应用试验与评估研究。

苏秀婷(9/10): 博士研究生, 中国海洋大学, 对创新点 1、3 作出了贡献, 对创新点 1 的贡献是: 开展了室内注浆模型试验及加固体性能试验研究; 对创新点 3 的贡献是: 协助第 1 完成人研发了注浆加固技术。

王卫(10/10): 高级工程师, 苏交科集团股份有限公司, 对创新点 3 作出了贡献, 对创新点 3 的贡献是: 研究了工程应用检验技术, 形成了地下管廊工程施工质量验收标准, 协助第 1 完成人完善了注浆设计与检验方法。

六、完成人合作关系说明:

项目组团搭建充分考虑成员各自优势, 包括理论研究、材料研发、数值模拟、模型试验和现场试验等方面, 衔接高等院校、设计单位和建设单位, 形成机理研究、材料研发、设计方法和现场应用的完整链条, 具体合作关系阐述如下:

(1) 沙飞、孟庆生、李鹏、刘聪和苏秀婷合作负责研究富水砂土软弱地层注浆扩散与加固机理、多序注浆理论、注浆技术与设计方法;

(2) 沙飞、孟庆生、丁永玲和范国玺合作负责研发新型注浆材料 EMCG、配套工业制备技术与生产工艺, 根据材料中试现场反馈数据进一步优化研究成果。

(3) 王宁宁、魏义山、王卫合作负责研究成果在隧道及地下工程中的应用, 根据工程应用现场反馈数据进一步完善研究成果。

七、应用情况:

本成果已在青岛地铁区间隧道及车站(13 号线、2 号线、4 号线)、京沈高铁高丽营隧道、江苏横江大道隧道、广西均昌隧道、广西岭脚隧道、陕西八里关隧道、陕西方家村隧道等二十余个富水砂土软弱地层注浆工程中推广应用, 产生经济效益 3.17 亿元, 节约工程造价 35% 以上, 取得了良好的经济、环境与社会效益。有力促进了行业科技进步, 在地下工程富水软弱地层灾害防控领域起到了重要引领与示范作用。

八、主要知识产权和标准规范等目录:

1. 李术才, 沙飞, 刘人太, 张庆松, 李召峰, 杨磊, 刘浩杰, 杨红鲁, 马晨阳. 用于富水砂层注浆治理的高效超细水泥基复合注浆材料、制备工艺及应用. 中国发明专利权, ZL 201710919736.2, 2019-07, 山东大学, 有效

2. 丁永玲, 孙华东, 张爱勤, 王保群, 葛颜慧, 匡芮, 姜鹏, 王彦敏. 一种半刚性复合改性注浆材料及其制备方法. 中国发明专利权, ZL 201911136486.0, 2021-11, 山东交通学院, 有效

3. 张霄, 李鹏, 李术才, 严绍洋, 李相辉, 朱明听, 张章一, 王倩, 刘振国. 一种倾角可变的模拟裂隙注浆模型试验平台. 中国发明专利权, ZL 201410179207.X, 2017-01, 山东大学, 有效

4. 周宗青, 刘聪, 李术才, 李利平, 宋曙光, 王美霞, 高成路, 张琦. 隧道充填结构渗流、侵蚀与应力耦合失稳机理试验装置与方法. 中国发明专利权, ZL 201810291053.1, 2021-02, 山东大学, 有效

5. 樊玉清, 孟庆生, 王秀海. 一种固化剂及其制备方法和在固化石油污染土壤中的应用. 中国发明专利权, ZL 201210110875.8, 2014-01, 中国海洋大学, 有效

6. 苏秀婷, 董晓芳, 亓宁, 张婷婷, 张亚男, 孟庆生, 张心彬. 适用于模型试验中隧长长距离开挖支护施作装置. 中国发明专利权, ZL 202010304189.9, 2021-02, 中国海洋大学, 有效

7. Fei Sha, Guoxi Fan*. Durability of a novel effective microfine cementitious grouting material in corrosion environments [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 306: 124842.(中科院 Top SCI, 6.141).

8. 王晶, 周永祥, 刘宁, 宋普涛, 王宁宁, 邹德松, 刘明, 李志强, 胡瑾, 王永梅, 杜峰, 王军, 朱先发, 袁芬, 李书进, 刘四德, 杨琳, 温欣岚, 韩锋, 蒋正武, 张建林, 廖娟, 李欢欢, 刘友明, 闫坤, 庞明, 王祖琦, 曾佳亮, 韩卫东, 梁祖焯, 贺阳, 夏京亮, 谢小元, 唐晶晶. 盾构法隧道同步注浆材料应用技术规程. 中国工程建设标准化协会团体标准, T/CECS 563-2018, 2019-05, 有效

9. 王卫, 沈东美, 王宁宁, 黄丽, 张大春, 张涛, 徐兴居, 王开材, 杨小謇, 汪博, 孙小猛, 杜峰, 李书进, 李新祝, 顾晓彬, 林文, 万凯, 吴永哲, 黄焯, 吴文亮, 王辉, 华斌, 魏义山, 王松城, 王军, 杨浚彬, 龚志炜, 胡静, 朱先发, 隆锋, 蒋佳咏, 施维

成. 胡锋, 孟雪飞, 黄国根, 王书灏, 张亚南, 王浩胜, 杨云飞, 王卫星, 张轶, 潘曙东, 曾文超, 范惜辉, 王栋, 魏娜. 城市地下综合管廊工程施工质量验收标准. 江苏省土木建筑学会团体标准, T/JSTJXH 6-2021, 2021-09, 有效

10. 陈剑, 刘人太, 魏义山, 王洪波, 李宝枝, 姜鹏. 强富水沙层基坑周边注浆止水工法, 中交三航局第三工程有限公司企业级工法, ZJSHS-GF-2017-05, 2018-04, 有效

九、主要完成单位及创新推广贡献:

中国海洋大学, 山东大学, 山东交通学院, 苏交科集团股份有限公司, 中交第三航务工程局有限公司

中国海洋大学(1/5): 对创新点 1、2、3 作出了贡献, 突破了富水砂土软弱地层注浆扩散规律与加固的基础理论难题, 为富水砂土软弱地层灾害注浆防控理论奠定了理论基础; 研发了新型高效注浆材料 EMCG 及其配套工业制备技术与生产工艺, 为新材料工业大量生产及大规模应用提供了技术保障; 攻克了地下工程富水砂土软弱地层灾害主动防控核心成套技术体系难题, 解决了注浆治理等系列难题。

山东大学(2/5): 对创新点 1、2、3 作出了贡献, 突破了富水砂土软弱地层注浆扩散规律与加固的基础理论难题; 研发了新型高效注浆材料及其配套工业制备技术与生产工艺; 攻克了地下工程富水砂土软弱地层灾害主动防控核心成套技术体系难题。

山东交通学院(3/5): 对创新点 2 作出了贡献, 研发了新型注浆材料及其配套工业制备技术, 为新材料工业大量生产及大规模应用提供了技术保障。

苏交科集团股份有限公司(4/5): 对创新点 3 作出了贡献, 研究了新型注浆材料工程应用技术与验收方法, 发布了两项相关团体标准, 协助第 1、2 完成单位完善了注浆工程设计与检验方法。

中交第三航务工程局有限公司(5/5): 对创新点 3 作出了贡献, 完成了 2 项中交三航局第三工程有限公司企业级工法, 协助第 1、2 完成单位完善了现场注浆控制方法与综合施工方法。