**科技成果登记表**

|  |  |
| --- | --- |
| **成果名称** | **钻搅喷一体桩复合地基关键技术研究** |
| **成果登记号** |  | **知识产权** |  |
| **完成单位** |
| **序号** | **单位名称** | **通讯地址** |
| **1** | 山东高速济南绕城西线公路有限公司 | 山东省济南市长清区崮云湖街道芙蓉路东段创新大厦801-29 |
| **2** | 山东大学 | 中国山东省济南市山大南路27号 |
| **3** | 山东省机械施工有限公司 | 山东省济南市槐荫区中大槐树街道经四纬十二路167号三箭和平广场2号楼508 |
| **完成人** |
| **序号** | **姓名** | **工作单位** | **对成果的贡献** |
| **1** | 岳宏智 | 山东高速济南绕城西线公路有限公司 | 项目负责人 |
| **2** | 姚占勇 | 山东大学 | 项目技术负责人 |
| **3** | 路本升 | 山东高速济南绕城西线公路有限公司 | 搅拌桩加固理论分析 |
| **4** | 王扬 | 山东高速济南绕城西线公路有限公司 | 工程资料收集 |
| **5** | 赵林 | 山东高速济南绕城西线公路有限公司 | 现场试验 |
| **6** | 姚凯 | 山东大学 | 室内试验 |
| **7** | 张凯兴 | 山东高速济南绕城西线公路有限公司 | 现场试验 |
| **8** | 蒋红光 | 山东大学 | 现场试验检测 |
| **9** | 冯维哲 | 山东大学 | 数据整理与报告撰写 |
| **10** | 张钰赫 | 山东大学 | 试验检测与数据整理 |
| **11** | 荣玉 | 山东大学 | 试验检测与数据整理 |
| **12** | 周冲 | 山东大学 | 数值模拟方法研究 |
| **13** | 王凯 | 山东大学 | 试验检测与整理 |
| **14** | 李霖 | 山东大学 | 现场试验 |
| **15** | 周广泉 | 山东省机械施工有限公司 | 项目协调与方案制定 |
| **成果公报内容** |
| （1）通过工程调研及试验，对比了黄泛区土与海相、湖相软土的差异，黄泛区土和海、湖相软土由于成因不同，其土性差异很大。黄泛区土质呈粉（砂）土、粉质黏土、黏土互层分布，其中粉质黏土、黏土的最大抗剪强度分别可达66.6kPa和72.4kPa，黄泛区土压缩系数均值在0.2-0.34之间，大部分为中压缩性土，少部分粉土和黏土为低压缩性土。我国不同地区的海相土性质较为相似，均呈现高含水率、低抗剪强度的工程性质特点，且均为高压缩性土。（2）传统浆喷桩0.5MPa浆压下浆液无法喷射入土体并与土体混搅，无法切割扰动土体并扩散，特别是深部地应力较大时，浆液无法喷出，导致搅拌杆无浆可搅，是黄泛区浆喷桩质量缺陷的关键原因，加之黏土地层黏土极易粘附在搅拌叶片上，导致黄泛区地层浆喷桩浅层3m以内成桩不均匀、下部不成桩且反浆严重现象。（3）进行了黄泛区典型地层条件下的搅拌桩浆液扩散规律研究。钻杆提升速度为75cm/min时，在黄泛区粉土中的浆液存在临界压力5MPa；在黏土地层中浆液扩散直径随压力的增加呈指数函数关系；在粉质黏土地层中浆液扩散直径随浆液压力的增加呈线性增加。浆液喷射压力不足、浆液无法有效扩散是黄泛区水泥土搅拌桩失效的主要原因。黄泛区黏土的喷浆扰动压力要达到20MPa-25MPa，粉质黏土中的喷浆压力要达到15MPa-20MPa，粉土中的喷浆压力要达到10MPa。浆液压力改善后搅拌桩成桩质量得到明显改善。（4）结合复合胶凝材料的材料特性与钻搅喷一体施工工艺，提出了钻搅喷一体桩的配合比设计方法。给出了复合胶凝材料方案和材料配合比。RFGC(烧结法赤泥+粉煤灰+GM激发剂+水泥)胶结料为复合胶凝材料的优化配方，在45%的最优初始含水率与55%、65%的高初始含水率条件下，水泥：烧结法赤泥：粉煤灰：GM激发剂的适宜质量比分别为714:198:40:48和694:194:38:74。复合胶凝材料具有较好的成本优势，材料成本约为水泥的79%。（5）研发了钻搅喷一体新型浆喷桩技术，通过不同装备及工艺改进，可以形成高压浆喷桩、钻喷筒桩、钻搅喷复合桩等各种新型浆喷桩。开展了钻搅喷一体桩现场试桩试验。试验表明，在黄泛区粉土、粉质黏土、黏土地层均钻搅喷一体桩呈现较好的地基加固效果。其中，钻搅喷复合桩的单桩极限承载力最高，为800kN，达到设计值的2.8倍、传统浆喷桩的7倍以上，桩径达到80cm。15MPa四喷嘴高压浆喷桩在不增加桩径的条件下，单桩承载力即可达到设计值的1.4倍，是普通浆喷桩的4.4倍。钻喷筒桩桩径可以达到80cm，单桩承载力即可达到设计值的2.3倍，是普通浆喷桩的7.2倍。（6）钻搅喷复合桩的强度值在均质土层条件下的强度变异系数较常规浆喷桩较小，说明钻搅喷复合桩成桩质量均匀性更佳。芯样的无侧限抗压强度均大于3MPa，成桩质量较好。对取芯得到的数据进行统计分析，可看出强度的分布大致服从正态分布。（7）两处试验场地的强度与电阻率之间呈现线性相关关系，含水率与电阻率呈现对数函数相关关系。可通过简单易测的电阻率指标进行钻搅喷一体浆喷桩的强度及含水率预测。（8）评估了不同桩型的单位面积地基加固成本，钻搅喷一体桩型的单桩承载力高，可加大布桩的间距，从而减少桩的施工数量。分析表明，在确保成桩质量的前提下，普通搅拌桩设计方案（质量达不到设计要求）相比，钻喷筒桩、四喷嘴高压浆喷桩的单位面积加固费用均显著降低，表现出良好的经济效益，钻搅喷复合桩的工程成本略有增加，但其成桩质量和承载能力均有大幅提升。（9）从技术、经济综合考虑，建议黄泛区地基钻搅喷加固技术的优先推荐顺序为：高压浆喷桩、钻喷筒桩、钻搅喷复合桩。 |
| **评价专家名单** |
| **序号** | **姓名** | **单位** | **专业领域** | **职称** |
| **1** | 左志武 | 中国公路学会 | 道路工程 | 研究员 |
| **2** | 李晋 | 山东交通学院 | 道路工程 | 教授 |
| **3** | 孙吉勇 | 山东省交通运输厅工程建设事务中心 | 道路工程 | 研究员 |
| **4** | 尚勇 | 山东省交通科学研究院 | 道路工程 | 研究员 |
| **5** | 李鹏 | 中国海洋大学 | 道路工程 | 教授 |
| **6** | 张建民 | 山东省路桥集团有限公司 | 道路工程 | 张建民 |
| **7** | 崔忠英 | 山东泉建工程检测有限公司 | 道路工程 | 研究员 |
| **组织评价单位：山东公路学会**  |
| **评价意见** |
| 2025年4月2日，山东公路学会在济南组织了“钻搅喷一体桩复合地基关键技术研究”成果评价工作。评价委员会（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了相关技术资料，经质询和讨论，形成评价意见如下：一、项目组提交的技术资料齐全，内容完整，数据翔实，符合评价要求。二、项目组通过理论分析、室内试验和现场验证相结合的方法，开展了黄泛区公路钻搅喷一体桩复合地基成套技术研究，取得了如下主要创新成果：1. 揭示了黄泛区粉土、粉质黏土、黏土典型地层浆喷桩浆液扩散规律，和传统浆喷桩易发生工程质量缺陷的机理,提出了不同典型土层条件下的合理浆压参数；2. 研发了钻搅喷一体桩施工装备，提出了高压浆喷桩、钻搅喷复合桩、钻喷筒桩三种新型浆喷桩施工工艺和关键工艺参数；3. 研发了具有良好早强特性、抗渗性能、泥浆稳定性与高含水率适用性的环保型钻搅喷一体桩多源固废胶凝材料；4. 揭示了钻搅喷一体桩的承载特性，提出了适用于黄泛区公路地基加固的钻搅喷一体桩桩型方案、设计方法及质量评价体系。三、研究成果在济南绕城高速公路二环线西环段工程、济南至菏泽高速公路改扩建工程、济南至宁津高速公路工程中成功应用，经济、社会和生态效益显著。综上所述，项目研究成果总体上达到国际领先水平。 |