

高速公路水泥搅拌桩地基处理施工技术研究

文 / 杨启东 四川公路桥梁建设集团有限公司公路二分公司

摘要: 当前,在国家交通基础设施加快建设的推动下,高速公路建设项目不断拓展至地质条件复杂的区域,地基加固成为施工技术体系中的难点。水泥搅拌桩因具备成桩速度快等特点,广泛应用于软基处理工程中。基于此,本文探讨了“优化设备选型参数”“严控搅拌作业节奏”“加强现场环境监控”“明确桩位施工工序”“构建分层检测体系”等五项策略,提升其在高速公路地基处理中的适应性,旨在为施工人员提供有益参考。

关键词: 高速公路;水泥搅拌桩;地基处理;施工技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.056

引言

近年来,随着我国高速公路建设向山区等特殊地质区域不断延伸,传统地基处理方式在适应复杂地质条件方面面临严峻挑战。水泥搅拌桩作为一种深层加固方式,因其工艺灵活和适用范围广等特点,在公路软基处理领域广泛采用。高标准路基对成桩精度等提出更高要求,迫切需要形成一套科学完善的施工技术路径,以解决软基处理中的常见问题,提高水泥搅拌桩的工程适应能力,从而为复杂环境下的高速公路建设提供技术支撑。

一、分析高速公路水泥搅拌桩地基处理施工技术存在的问题

(一) 施工设备匹配性差

水泥搅拌桩施工过程对设备性能的依赖程度较高,在高速公路软基处理工程中,施工设备的适配性直接关系到桩体的加固质量。在实际施工中,部分单位为降低投入成本,往往会采用老旧设备或非标准型号的搅拌钻机,这些设备在性能参数和配套协调方面存在较大差距,难以满足复杂地质条件下的施工要求。设备运行稳定性不足,容易造成搅拌刀具转速不均,进而影响土体和浆液的混合均匀程度,浆液无法充分包裹原状土颗粒,致使桩体强度分布不均。此外,注浆系统若存在输送压力不足或流量波动频繁等问题,会导致浆液注入不连续,形成空洞或夹层,进一步削弱桩体结构的整体性。在多层土质交替区域,设备无法自动适应土层变化,会加剧搅拌深度和桩径的不一致,使桩体断面变形埋下结构隐患。

(二) 搅拌工艺控制不严

在高速公路水泥搅拌桩施工过程中,搅拌工艺对桩体成型质量具有决定性的影响,但是,在实际施工中,由于操作流程执行不严,关键工艺参数常常会出现波动现象。具体而言,桩长控制不准确以及提升速度变化不规律等现象较为普遍,这些操作环节,极易导致浆液和土体结合不充分,形成夹层或桩径缩小等结构缺陷。在软硬土层交界区域,如果搅拌力不足,桩体局部结构便会失稳,进而影响整体承载性能。浆液在搅拌过程中可能还会发生沉降或局部流失,若未及时识别并处理,浆

液浓度便会发生变化,最终导致桩体强度分布不均,出现薄弱环节。在搅拌过程中,还常出现桩间间距影响彼此成型质量的情况,使得原本应独立承载的桩体产生干扰现象,加剧施工缺陷。

(三) 环境因素考虑不足

在高地下水位区域,地下水持续渗流会稀释浆液浓度,削弱其固化能力,使浆液扩散范围明显受限,影响加固范围的均匀性。当水流速度较快时,还可能会把尚未固结的浆液部分冲散,使桩体结构被破坏,出现边界模糊等问题。在强风化岩层中,由于岩体破碎且夹杂多种土质,其结构不稳定性高,如果未针对其力学特点调整施工参数,容易造成桩体钻进困难,进一步影响桩身的连续性。在膨胀土地区,土体遇水体积变化剧烈,若忽视这种变化特性,桩体固结后极易受到膨胀应力挤压,导致变形破裂。这些环境因素若未得到有效评估,会导致施工工艺适应性不足,从而削弱地基处理的整体效果。

二、高速公路水泥搅拌桩地基处理施工技术策略

(一) 优化设备选型参数,保障工况适配精准

在高速公路水泥搅拌桩地基处理施工中,设备和工况是否匹配直接影响桩体的稳定性,如果设备型号不合适,容易出现搅拌不到位或浆液分布不均等情况,造成桩体断裂。在地质条件复杂或地下水丰富的区域,设备的扭矩和注浆能力是否合理,能够直接决定浆液和土体能否充分混合。所以,施工人员制定合理的设备选型策略,应以施工要求为基础,结合桩长等关键参数,明确设备所需的技术标准。在地基处理难度较大的区域,提前分析工况,准确识别施工对设备的具体要求,把握设备和施工环境之间的配合关系,为确保水泥搅拌桩质量稳定^[1]。

例如,在一段穿越饱和和粉质黏土的高速公路地基处理中,为提高水泥搅拌桩施工质量,施工人员应根据工程特点开展设备匹配分析,结合现场勘察结果,明确各区域桩长和成桩深度等参数,逐一对应不同地段的土层特性和设备能力,确保施工过程中的搅拌深度和桩体成型效果稳定可靠。在地下水位较高的区域,施工人员需

选用具备双轴搅拌功能的钻机，满足深层作业对设备动力和稳定性的要求。注浆设备需设定自动控制模式，根据土层吸浆变化调整注浆流量，使浆液能够均匀渗入土体，形成结构密实的桩体。同时，设备选型过程要同步参考已有工程数据，分析不同设备在类似条件下的施工

表现，优先选择在垂直度等方面表现稳定的机型。围绕地基处理的目标要求，制定设备运行调试方案，明确不同工况下的参数调整范围，保证各地段桩体结构连续且强度一致，使整个高速公路段地基加固效果更安全（以表1所示）。

表1 优化设备选型参数，保障工况适配精准

项目类别	内容要点
工程基础分析	结合地质勘察，明确不同地段桩长和成桩深度
设备匹配要求	根据地层特性匹配设备能力，确保搅拌深度与成桩效果
高水位区施工设备	选用双轴搅拌钻机，增强动力与作业稳定性
注浆控制方式	启用自动控制系统，随土层变化调整注浆流量，确保浆液均匀渗透
设备选型依据	参考既有工程数据，优选垂直度表现稳定的机型
调试与运行方案	明确各工况参数调整范围，确保桩体结构连续、强度一致

（二）严控搅拌作业节奏，统一操作标准流程

如果搅拌速度不一致或桩长控制不准确，容易造成浆液和土体混合不均，出现夹层等质量问题^[2]。在地下水丰富或土质松软的区域，作业节奏不稳定，会引起浆液扩散不足或沉降异常，降低桩体的密实度。为使施工过程更加规范，施工人员应围绕水泥搅拌桩施工的关键环节建立清晰的操作流程，明确各项作业参数的控制范围。结合不同区域的土层特性，统一搅拌速度等技术要求，使搅拌过程保持稳定性。建立统一的作业标准，有助于减少人为干扰，提高成桩一致性，使高速公路地基加固质量更加可靠，为后续工程建设奠定基础。

例如，在一段高速公路软弱地基加固工程中，施工人员应根据现场地质勘察结果，结合设计桩长和地下水分布情况，制定详细的搅拌作业流程控制方案。该地段土层主要由粉质黏土和饱和淤泥组成，容易在施工过程中出现浆液混合不均或密实度不足等问题。针对不同深度土层的物理特性，施工人员需设定各作业区段对应的搅拌转速和提升速度控制范围，并把相关参数细化至每一项的操作步骤中。所有施工设备应严格按照统一的参数指令执行，每台钻机在作业前均完成标准调试，确保搅拌过程平稳连续。在施工过程中，施工人员可借助监控系统实时采集各作业设备的运行数据，对比设定标准判断是否存在异常。如遇到提升速度或搅拌时间偏差，施工人员会立即调整参数，防止桩体结构受到影响。在地下水位较高的区域，施工人员还要安排节奏控制节点，用以稳定浆液扩散过程，减少水分扰动对桩体密实度的影响。核对每根桩的施工数据和质量检测结果，检查搅拌是否达到设计要求，在整个高速公路地基处理过程中，这套清晰的操作流程能够提升施工的规范性，满足高标准路基对成桩质量的稳定要求。

（三）加强现场环境监控，应对地质突变风险

在高速公路水泥搅拌桩地基处理施工中，地质条件复杂多变，现场环境易受地下水变化以及岩性突变等因素影响。如果施工人员无法及时掌握这些变化，浆液扩散不均或出现孔洞等问题便会频繁发生，直接影响地基

加固效果^[3]。施工人员制定合理的现场环境监控策略，应以施工区域的地质特点为基础，结合土层分布等信息，建立动态识别和跟踪的工作方式。对地质突变风险较高的区域，提前划定重点监测范围，确保施工过程能够和环境条件保持一致，从而更好保障水泥搅拌桩施工技术在高速公路地基处理中的安全性。

例如，在某高速公路改扩建工程中，地基处理段落会穿越一片地质条件复杂且地下水变化明显的区域，土层由粉质黏土和局部风化砂岩组成，含水量高地下水补给速度快，容易影响水泥搅拌桩的加固效果。为确保施工技术稳定可靠，项目技术团队需结合前期地质勘察资料，把整个施工区划分为多个环境监测单元，每一单元应根据土层类型和含水特性设定监控点，布设水位观测孔等测量点，持续采集关键数据（如图1所示）。所有监测数据要统一上传至项目数据平台，系统会根据预设的阈值判断地下水波动和地质结构变化趋势。在地下水位明显上升或特定区域土体强度下降时，系统自动发出提示，施工人员会暂停对应区域作业，检查土层变化对搅拌桩成桩质量的影响，并调整搅拌速度等参数。除此之外，在地下水活跃区，施工人员还要设置补强监测点核查成桩效果，安排关键区域钻芯检测，检验浆液是否充分填充土体结构，能够有效提高施工人员对突发地质变化的应对能力，保障水泥搅拌桩地基处理过程中的施工质量，为高速公路整体工程提供可靠支撑。

（四）明确桩位施工工序，避免路径扰动偏移

在高速公路水泥搅拌桩地基处理中，邻近桩体受到干扰后容易失稳，造成加固区域内桩体承载力不一致，影响整个地基的均匀性。在地层松软或施工密度较大的区域，如果作业路径不清晰，还可能会破坏已施工桩体的完整性，降低地基整体的稳定性，影响路面结构的安全。为保证施工有序，施工人员应根据水泥搅拌桩的技术特点，结合现场地质条件和布桩设计，明确各工区的作业顺序和施工路线。合理安排桩位之间的间距和设备行进路径，避免因操作重叠引发质量问题，确保地基处理效果满足高速公路建设的安全要求^[4]。

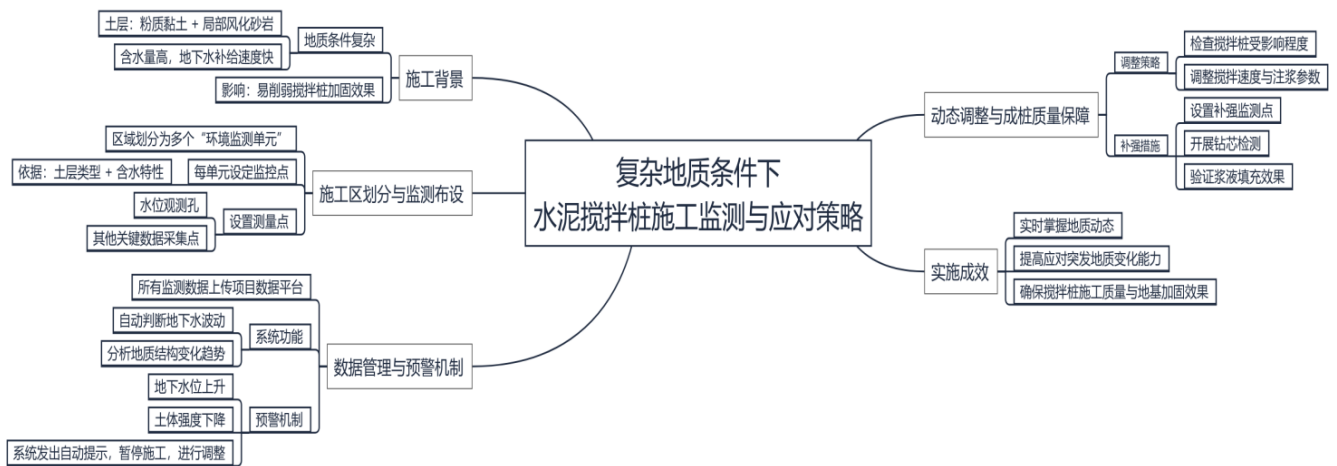


图 1 加强现场环境监控，应对地质突变风险思维导图

例如，在一段高速公路建设项目中，施工人员为提高水泥搅拌桩地基处理的施工质量，需根据设计图纸和现场地质条件，对整个加固区域划分为多个作业单元，并明确每个单元的施工顺序和设备行进路线。在施工时，施工人员要根据桩位布设情况设定设备推进方向，避免机械行走路径覆盖已完成的桩体区域，确保作业过程中不会对桩体造成扰动。在软弱土层和布桩密集区域，施工人员需特别加强作业顺序安排，使成桩之间有足够的硬化反应，减少新作业对已施工桩体结构稳定性的影响。为保持桩体位置的准确性，施工人员应对每个桩点展开精准定位，设定统一的间距控制标准，避免出现桩体偏移或间隙过大等问题。施工设备的移动轨迹需由管理系统实时记录，作业过程中的每一处偏差都能及时发现并调整，防止因路径不清造成质量风险。在靠近路基边缘或结构过渡区域，施工人员还会进一步细化设备行走路线，控制对周围土体的扰动范围，保障桩体成型质量。在施工完成后，施工人员应复核所有桩位，对偏差过大的位置安排补桩，确保地基处理区域的桩体均匀分布，承载性能符合设计要求，从而保障高速公路地基的稳定性。

(五) 构建分层检测体系，落实质量实时反馈

因桩体穿越多个地质层位，质量容易受到设备性能等因素的影响，所以某些桩段会出现强度不足等问题。一旦桩体质量在不同深度存在差异，就可能会导致整体受力不均，影响承载稳定性。若施工中无实时反馈，施工人员就无法及时调整技术参数，容易造成搅拌效果偏差浆液分布不均，进而影响整个地基的加固效果。为提升质量控制水平，施工人员应根据水泥搅拌桩的施工特点，结合不同桩深和材料性能，建立覆盖全流程的检测体系。明确各深度桩段的检测指标，准确掌握每一个阶段的质量情况，有助于提高整体成桩精度，增强地基处理的可靠性。

例如，在某高速公路水泥搅拌桩地基处理工程中，首先，施工人员可结合桩体穿越的土层特性，分别设置

桩顶、中段、桩底等不同深度的检测项目，包括密实度等关键指标。施工过程中，每台设备应配备数据采集装置，实时记录搅拌速度和相关参数，确保每一段施工过程都有完整的质量记录。当某一深度区段的压力值或搅拌功率发生异常时，系统会立即发出预警，标记该桩段为重点复检区域。施工人员随后立即开展实地核查，经过钻芯取样或声波检测等方式进一步确认桩体密实度和浆液分布情况，确保施工质量符合设计要求。其次，在地层变化频繁的区域，施工人员可以增加检测频率，记录各桩段的实际表现，便于后续分析调整施工参数。所有检测结果应统一纳入数据平台展开比对，识别出质量波动较大的施工区域，及时做出技术修正。对出现问题的区域施工人员应重新调整搅拌节奏和注浆浓度，形成标准化的修正方案，使桩体在各深度段落都能达到加固目标，可有效提升高速公路地基处理工程的整体质量。

结语

水泥搅拌桩作为软弱地基加固的手段，其施工技术在高速公路工程中具有关键作用。面对复杂多变的地质条件，提升施工设备的适应性及完善质量反馈机制，已成为保障地基加固效果的方向。未来，施工人员需进一步融合智能感知和数据分析手段，推动地基处理向高精度发展，为交通基础设施建设提供技术保障。

参考文献

[1] 王先军. 软土地基处理技术在高速公路施工中的应用研究 [J]. 工程建设和设计, 2024, (16): 206-208.
 [2] 王丽萍. 高速公路水泥搅拌桩质量检测与评价方法 [J]. 交通世界, 2024, (10): 110-113.
 [3] 宋晓莉, 刘杉, 韩宜均. 京台高速公路齐河至济南改扩建工程地基处理研究 [J]. 山东交通科技, 2022, (06): 126-127.
 [4] 李晨. 关于软土地区高速公路拓宽项目地基处理的探讨 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11(31): 80-83.