

高效深层多轴拌和设备在膨胀土路基施工中的应用研究

邓茂良

云南建投第六建设有限公司 云南 昆明 650000

摘要：膨胀土吸水会膨胀、失水会收缩，再加上多裂隙性和超固结性，路基稳定性被进一步削弱，容易引发滑坡、沉陷这类病害。传统换填法处理深层膨胀土经济性不好，湿度控制法受环境制约大，改性处理又有均匀性瓶颈。高效深层多轴拌和设备靠多轴搅拌系统、输浆系统和导向提升系统协同作业，实现了深层原位均匀改性。水泥水化反应能固化蒙脱石结构，离子交换可以抑制膨胀性，胶结作用则提升抗剪强度。施工中要严格控制搅拌深度、掺入比、均匀性和间隔时间，并通过抗压强度、渗透系数、胀缩总率及耐久性指标来验证改性效果。

关键词：多轴拌和设备；膨胀土路基；施工控制

引言：膨胀土分布很广，遇水膨胀、失水收缩，这种反复变形对路基工程威胁不小。含水率一变，膨胀土体要么产生较大的膨胀压力，要么收缩开裂，结果就是边坡滑坡、路面沉陷、桥头跳车这些典型病害。传统换填法处理深层膨胀土经济性差，湿度控制法很难维持稳定的含水率，石灰改性法又卡在掺量均匀性不够这个技术瓶颈上。为了解决这些问题，高效深层多轴拌和设备把深层搅拌技术和多轴拌和结构结合到一起，实现了膨胀土的原位深层均匀改性。本文围绕该设备的结构原理、改性机制、参数优化及施工控制要点，做一下系统阐述。

1 膨胀土路基施工的技术挑战与设备需求

1.1 膨胀土的工程特性与危害

膨胀土遇水膨胀、失水收缩，这种力学特性使得土体体积随含水率变化剧烈波动。含水率升高时，土体产生不小的膨胀压力，把路基往上顶；含水率降低时，土体收缩开裂，逐渐形成裂隙网络。多裂隙性让膨胀土内部布满了原生和次生裂隙，破坏了土体完整性，整体强度也跟着下降。超固结性意味着膨胀土在历史上承受过较大的压力，开挖卸荷后容易出现松弛和变形。这几个特性叠加在一起，会严重削弱路基的长期稳定性。实际工程中，膨胀土引起的病害主要有边坡滑坡、路面沉陷和桥头跳车。滑坡是因为膨胀土遇水后抗剪强度明显下降，路面沉陷来自土体反复的不均匀收缩和膨胀，桥头跳车则是桥台与膨胀土路基变形不一致造成的错台。

1.2 传统施工方法的局限性

换填法把膨胀土挖走，换上非膨胀土，确实能消除病害，但只适用于浅层处理。碰到深层膨胀土，挖得深、土方量大，弃土和借土都得长距离运输，经济上不划算。湿度控制法通过调节含水率来减小胀缩幅度，可对环境的

依赖太强，一下雨一蒸发，含水率就来回变，很难维持在理想状态，施工质量也不好把控。改性处理法里，掺石灰能发生离子交换和胶凝反应，改善土体性能，但石灰掺量要控制得准并不容易，土体含水率不均、现场拌和条件有限，容易造成局部掺量忽高忽低。另外，石灰和土很难拌得均匀，没拌到的地方仍然会膨胀，形成潜在的薄弱面，这算是技术上的一个瓶颈。

1.3 高效深层多轴拌和设备的技术定位

深层搅拌技术把搅拌装置直接伸到膨胀土地层内部，靠机械力将改性剂与土体原位混合，不用大规模挖填，适合处理深层膨胀土。这项技术的核心优势，是在一定深度范围内做出连续、均匀的加固效果，正好补上了传统方法对深层土体处理能力不足的短板^[1]。多轴搅拌用多个搅拌轴同步旋转和提升，一次作业就能覆盖更大面积，而且轴与轴之间的拌和区域相互交叉，没什么搅拌死角，改性剂在土体里分布得更均匀，整体改性效果也更好。像搅拌轴转速、下钻速度、提升速度、改性剂注入速率这些设备参数，得和膨胀土的塑性指数、天然含水率、膨胀潜势等工程特性匹配上，才能达到预期的改性效果，保证施工质量。

2 高效深层多轴拌和设备的结构与工作原理

2.1 设备核心结构组成

多轴搅拌系统是设备用来破碎土体、进行混合的主体部件。双轴、三轴、五轴搅拌头在搅拌轴数量和空间布置上差别比较明显。双轴结构适合处理范围较小的作业面，三轴结构在搅拌覆盖宽度和动力消耗之间找了个平衡，五轴结构则能做到更大面积的同时搅拌，减少作业次数。动力传输系统把电机产生的旋转动力传到搅拌头，传递路径依次经过电机输出轴、减速机和钻杆。减速机在这里负责降低转速、增大输出扭矩，让搅拌头获

得足够的剪切能力。输浆系统由灰浆泵、输浆管路和喷浆口组成,灰浆泵控制总的浆液输出量,输浆管路把浆液送到钻杆内部,喷浆口设在搅拌头附近,它的流量控制机制直接决定了单位深度里注入了多少浆液。导向与提升系统用的是滑杆式驱动装置,这个装置能实时调节整机重心位置,防止设备在提升或下钻时偏斜,保证搅拌头沿着预定轨迹运动。

2.2 深层搅拌工艺流程

定位与预搅下沉阶段,先把设备移到指定作业位置,用导向系统控制搅拌头的垂直度,保证搅拌轴线和设计方向一致。搅拌头慢速下钻的过程中,对膨胀土体进行预破碎,让原本紧密的土体结构初步松散下来,方便后续浆液渗透。水泥浆制备阶段按设定的水灰比和掺入比来配浆,水灰比决定了浆液的流动性和胶凝性能,掺入比控制单位土体里加入多少水泥,这两个参数一起影响改性后土体的强度指标^[2]。喷浆搅拌提升阶段,搅拌头一边向上提升一边启动喷浆,提升速度和注浆量必须同步控制,这样在不同深度范围里浆液分布才能一致。重复搅拌工艺是把搅拌头再次下放到底部,然后重新提升搅拌,第二次搅拌能进一步打散那些没混匀的土团,让土体和浆液接触更充分,整体均匀性明显提高。

2.3 设备技术参数优化

搅拌轴转速设定在每分钟二十到五十转之间。这个转速区间能对土体产生充分的剪切作用,让膨胀土颗粒和浆液有效混合。转速太低了剪切力不够,土体碎得不完全;转速太高又可能扰动过度,反而破坏土体结构。喷浆压力控制在零点四到零点六兆帕。这个压力范围可以让浆液从喷浆口射出后,有效渗入周围土体的孔隙和裂隙。压力低了渗不透,压力高了浆液会喷得太远、局部聚集或者顺着裂缝流走。搅拌头直径在五百到一千毫米之间变化。较小的直径适合浅层处理,对设备功率要求也低一些;较大的直径能覆盖更宽的搅拌区域,但有效作业深度受设备动力和钻杆刚度限制。施工扭矩采用大扭矩设计,这样设备遇到硬土层时还能维持稳定的旋转和下钻速度,不至于因为阻力太大而卡钻或者停转,从而扩大了设备的适用地层范围。

3 高效深层多轴拌和设备在膨胀土改性中的应用

3.1 膨胀土的物理化学改性机制

水泥水化反应是膨胀土改性里的基础化学反应。水泥颗粒一碰到水,就生成水化硅酸钙和水化铝酸钙这些胶凝产物,这些东西填充和包裹能力都很强。蒙脱石是膨胀土里最主要的黏土矿物,它的层间结构遇水就容易扩张,而水泥水化产物能进到蒙脱石晶层之间,靠物理

填充和化学键合限制晶层间距拉大,从而直接固化蒙脱石结构,让土体失去反复膨胀收缩的能力。离子交换反应发生在水泥水解释放出来的钙离子和土粒表面吸附的钠离子、钾离子之间。钙离子的交换能力比一价阳离子明显高出一截,钙离子进入黏土颗粒的双电层后,会把双电层厚度压薄,降低颗粒表面的亲水性,从根上抑制土体的膨胀潜力,让改性后的膨胀土趋于稳定^[3]。胶结作用是水化产物在土颗粒之间搭起空间网状联结,这种联结把分散的单个土颗粒胶成一个整体,明显提高了土体的内聚力和内摩擦角,从而形成一条清晰的抗剪强度提升路径,让改性土能承受更高的外部荷载而不发生剪切破坏。

3.2 设备参数对改性效果的影响

搅拌深度直接决定了设备能处理到哪一层膨胀土。八到十五米的处理深度,基本能覆盖绝大多数膨胀土的活动层,这个深度范围正是膨胀土体积变化最厉害的区域。搅拌深度不够的话,深层没处理的膨胀土还是会因为地下水位波动或水分渗入而胀缩变形,并通过应力传递影响上部路基的整体稳定性,造成改性层和未改性层之间变形不协调。水泥掺入比是水泥质量与被处理干土质量的比值,控制在百分之七到百分之十五之间,能有效控制土体的胀缩总率。掺入比低于下限,水化产物不够多,没法完全包裹黏土颗粒表面,土体仍然有明显的膨胀特性;掺入比高于上限,胀缩率倒是能再降一降,但可能带来水化热过高、干缩裂缝这些问题。搅拌均匀性用量测精度来表示,正负百分之二的精度,意味着不同深度、不同断面的水泥含量偏差控制在一个不大的范围里。均匀性差的话,改性土强度离散性会明显变大,水泥多的地方形成硬脆点,水泥少的地方就成了强度薄弱区。施工间隔时间指的是相邻两个搅拌桩从施工完成到下一桩开始施工的时间差,控制在十二到二十四小时内连续作业,能保证前后桩体在水泥初凝前完成搭接,形成没有施工缝的连续改性墙体,保证整体结构完整。间隔时间超了,先施工的桩体已经进入初凝阶段,搭接界面就会出现冷缝,大幅削弱墙体的抗渗性和整体承载能力;间隔太短又容易扰动浆液,影响已成桩体的结构稳定^[4]。所以得结合环境温湿度、水泥品种和水灰比来动态优化间隔参数,确保搭接质量可控。

3.3 改性膨胀土的工程性能验证

无侧限抗压强度是衡量改性膨胀土力学性能最直接的指标,取值范围从零点五兆帕到八兆帕,覆盖了从低强度填筑材料到高承载结构用土的各种需求。这个指标反映的是改性土在没有侧向约束的条件下抵抗轴向压

力的极限能力,是判断改性是否满足承载要求的关键依据。渗透系数表征改性土抵抗水分渗透的能力,要求达到十的负六次方到十的负八次方厘米每秒的水平。这么低的渗透性,意味着水分在改性土层里移动得非常慢,能有效阻止地表水下渗到下卧的未处理膨胀土层,防止深层膨胀土因吸水而膨胀变形。胀缩总率是直接评价改性土体积稳定性的综合参数,要求不超过百分之零点七。这个标准意味着改性土从完全干燥状态到饱和吸水状态,体积变化幅度被严格控制在很小的范围内,从而消除了因含水率波动引起的反复胀缩变形。耐久性通过冻融循环试验和干湿交替试验来验证,前者模拟冬季低温环境下土体反复冻结融化的影响,后者模拟干旱和降雨交替出现的气候条件。两种试验都用来观察改性土的抗压强度、渗透系数和胀缩率随着循环次数增加的变化趋势,从而判断改性处理在长期服役条件下性能还能不能保持住。

4 高效深层多轴拌和设备的施工控制要点

4.1 施工前准备与参数标定

施工前得通过现场试验,确定适合具体膨胀土性质的水泥掺入比和水灰比。不同地方的土性差别挺大,用统一的参数不现实。灰浆泵的输浆量和搅拌头提升速度必须精确匹配,标定工作是通过模拟提升过程,测出单位提升高度里的实际注浆量,以此保证浆液分布均匀。搅拌头垂直度直接影响桩体轴线和设计方向之间偏了多少,检测时用双向测斜仪把垂直度偏差控制在允许范围内,同时还要量桩位平面偏差,确保每个桩体都布设在预定的位置上。

4.2 施工过程质量控制

膨胀土含水率要控制在最佳含水率附近,上下浮动不超过两个百分点。含水率太高,土体强度偏低,还容易形成泥浆团;太低的话土体松散,搅不均匀。土体粒径控制在五厘米以内。土块太大,搅拌时不容易彻底破碎,里面没接触到浆液的土芯仍然会膨胀,成了隐患。喷浆过程中万一断浆了,必须马上停止提升,记下中断的位置,等系统恢复正常后,下钻到断浆点以上重新搅

一遍,确保这一段土体拿到足够的浆液。压实度要求达到百分之九十五以上,通过控制碾压速度、碾压遍数和振动参数来实现密实效果。

4.3 特殊工况应对措施

雨季施工时膨胀土含水率容易超标,得翻晒来降低表层含水率,同时通过复压消除雨水软化造成的松软层,必要的时候结合石灰改性进一步提高土体的水稳定性。硬土层施工时搅拌头下钻阻力会明显变大,可以用冲水辅助的方式降低土体阻力,再配合扭矩监测系统实时看钻杆受力状态,防止扭矩超限把设备弄坏^[5]。深层滑坡治理中,单独用搅拌桩抗剪能力有限,需要把搅拌桩和挡土墙组合起来,形成复合支护体系,搅拌桩负责深层土体加固和抗滑,挡土墙提供表层的侧向约束。

结束语:高效深层多轴拌和设备采用多轴搅拌系统和深层原位作业的方式,有效克服了传统膨胀土处理方法在深层处理能力和均匀性控制上的不足。水泥水化反应、离子交换和胶结作用协同起来,从物理化学层面根本性地抑制了膨胀土的胀缩特性。搅拌深度、掺入比、均匀性及施工间隔这些参数合理匹配,是保证改性效果的关键。改性后土体的低渗透性和低胀缩率,显著提升了路基的长期稳定性。施工过程中还得针对雨季、硬土层、滑坡等特殊工况采取相应的控制措施。这套设备与工艺体系,为膨胀土路基病害防治提供了一条可靠的技术路径。

参考文献

- [1] 张小鹏. 高速公路工程膨胀土路基的设计与施工分析[J]. 交通世界, 2024(23): 128-130.
- [2] 闫泽宁. 高速公路膨胀土路基填筑技术研究[J]. 工程建设与设计, 2023(2): 203-205.
- [3] 王宇. 高速公路膨胀土路基施工技术[J]. 交通世界, 2023(12): 84-86.
- [4] 姜丽. 高速公路膨胀土路基施工技术研究[J]. 交通世界(下旬刊), 2022(3): 113-114.
- [5] 丁海军. 高速公路石灰改良膨胀土路基施工工艺[J]. 交通世界, 2023(14): 113-115.