

双向水泥搅拌桩施工工艺优化及常见问题防治对策

——以茸卫公路桥头软基处理为例

平美华

上海金山公路建设有限公司 上海 200540

摘要: 随着我国基础设施建设的不断推进,软土地基处理技术在道路、桥梁等工程中日益受到重视。双向水泥搅拌桩作为一种高效、环保、经济的地基加固方法,因其良好的成桩质量与复合地基承载力,在软土地区被广泛应用。本文以茸卫公路(金山大道—G228公路)改扩建工程为背景,结合该工程桥头段软土地基条件,系统分析了双向水泥搅拌桩的施工工艺流程、关键技术参数控制要点,并针对施工过程中常见的质量问题(如喷浆中断、桩身不连续、桩顶强度不足等)提出了针对性的优化措施与防治对策。研究表明:通过精细化控制水灰比、提升/下沉速度、复搅复喷制度及跳打施工顺序等关键环节,可显著提升桩体均匀性与整体强度;同时,建立完善的应急预案和全过程质量监控体系,是保障双向搅拌桩施工质量的关键。本研究对类似软基处理工程具有重要的实践指导意义。

关键词: 双向水泥搅拌桩;软土地基;施工工艺优化;质量控制;茸卫公路

引言

我国东部沿海及长江中下游地区广泛分布深厚软土层,其高含水量、高压缩性、低强度等特性严重威胁道路、桥梁稳定性。桥头过渡段因刚柔突变易产生差异沉降,引发“桥头跳车”现象,影响行车安全与舒适性。因此,桥后软基加固是保障道路长期服役性能的关键。水泥土搅拌桩技术自20世纪70年代引入我国后,已发展出多种形式,其中双向水泥搅拌桩通过内外钻杆反向旋转,实现土体充分切割、翻拌与混合,显著提高水泥土均匀性和桩体强度,在高等级公路软基处理中应用广泛^[1]。茸卫公路改扩建工程位于上海市金山区,沿线穿越多条河流,地质勘察显示存在厚度达7米以上的淤泥质粉质粘土及6.8米厚的淤泥质粘土,属典型深厚软土区。设计采用双向水泥搅拌桩加固桥头路基,但施工中常因参数控制不当、设备故障或管理疏漏导致成桩质量不达标,因此系统研究施工工艺优化路径及常见问题防治对策具有重要理论价值与工程实践意义。

1 工程概况与地质条件

1.1 工程概况

茸卫公路(金山大道—G228公路)改扩建工程南起金山大道(K0+000),北至卫新河以北100米(K1+940),全长1940米。道路等级为二级公路,设计速度60km/h,红线宽40m,采用“6快2慢”四块板断面。工程需跨越太平港、广茂河、毛家浜及卫新河4条河道,新建桥梁1座,拼宽3座。本研究聚焦于桥头软基处理段,特别是桥梁与路基衔接区域。该区域因荷载集中、

沉降敏感,被列为重点加固对象。在结构安全等级一级、设计使用年限50年的桥梁工程要求下,桥台后一定范围内的路基必须具备足够的承载力和变形控制能力,以避免工后沉降过大引发结构损伤或行车安全隐患。

1.2 地质与水文条件

根据地质勘察报告,工程范围内地基土主要由填土、淤泥质土、粘性土及砂性土组成,共划分为8个主层及若干亚层。其中,对工程影响最大的软土层如下:(1)层灰色淤泥质粉质粘土夹粘质粉土:普遍分布,层顶标高1.58m~-2.49m,平均厚度7.11m,饱和、流塑、高等压缩性,含有机质与云母,局部夹粉性土较多。(2)层灰色淤泥质粘土:普遍分布,层顶标高-6.13m~-7.32m,平均厚度6.83m,同样为饱和和流塑状态,高等压缩性,韧性高,干强度高。此外,最大软土层1-1深度约20.5m,含水量>40%,孔隙比>1.2,进一步印证了地基的软弱性。地下水位较高,对施工排水及水泥水化反应有一定影响。

1.3 设计参数

针对上述地质条件,设计采用双向水泥搅拌桩进行加固,主要参数如下:

表1 设计参数

项目	参数值
桩径	700mm
桩长	21m
桩间距	处理段1.6m,过渡段2.0m
水泥掺入比	15%
水灰比	0.4~0.5

续表:

项目	参数值
单桩承载力特征值	188kN
复合地基承载力	1.6m间距: 128.45kPa; 2.0m间距: 100.95kPa
桩身无侧限抗压强度	≥ 0.8MPa (28天)

核心施工参数: 钻进速度 $v < 1.0\text{m}/\text{min}$; 提升速度 $0.4\sim 0.7\text{m}/\text{min}$; 搅拌转速 $r = 30\sim 50\text{r}/\text{min}$; 喷浆压力 $0.25\sim 0.40\text{MPa}$ 。

2 双向水泥搅拌桩施工工艺流程

2.1 总体流程

双向水泥搅拌桩的施工遵循“先准备、后施工、重监控、严验收”的系统化原则,其总体流程包括场地平整、测量放线、桩机就位、制备水泥浆、预搅下沉(喷气)、喷浆搅拌提升、重复喷浆搅拌下沉、重复搅拌提升、成桩结束及移机等环节。这一流程不仅体现了工序的逻辑顺序,更强调了各阶段之间的紧密衔接与质量传递^[2]。整个施工过程以自动化记录仪为核心,实现对关键参数的实时采集与存档,为后续质量追溯提供数据支撑。

2.2 关键工序详解

(1) 施工准备: 熟悉图纸、地勘报告,编制专项方案并报审,开展三级技术交底。清除障碍物,平整压实场地;精确测放桩位(偏差 $\leq 50\text{mm}$);开挖导流沟(宽 $0.4\sim 0.6\text{m}$,深 $0.5\sim 1.0\text{m}$)及集浆坑。采用P.O42.5普通硅酸盐水泥,复检合格;拌合水为清洁自来水或检验合格地下水。SJB-II型双向搅拌桩机(配自动记录仪)、高速/低速搅拌机、灰浆泵($\geq 1.5\text{MPa}$)、流量计、比重计等。(2) 桩机就位与调平:调整支腿使钻塔垂直(垂直度偏差 $\leq 1\%$);钻头中心对准桩位(偏差 $\leq 50\text{mm}$);连接管路,检查记录仪。(3) 水泥浆制备:按设计水灰比(如0.5)精确计量水与水泥;先加水,边搅拌边匀速加入水泥;高速搅拌 ≥ 3 分钟,倒入低速储浆桶持续搅拌;用比重计实时检测浆液密度。(4) 预搅下沉(喷气):内外钻杆反向旋转(正反转);开启空压机(压力 $\geq 0.6\text{MPa}$),喷气松动土体;匀速下沉至设计桩底(速度 $< 1.0\text{m}/\text{min}$);记录仪同步记录深度、时间。(5) 喷浆搅拌提升:到达桩底后开启灰浆泵;保持喷气,按 $0.4\sim 0.7\text{m}/\text{min}$ 匀速提升;控制喷浆压力 $0.25\sim 0.40\text{MPa}$;确保单位长度喷浆量满足15%掺入比。(6) 重复搅拌下沉与提升(复搅复喷):第一次提升后,关闭灰浆泵,再次下沉至桩底;第二次提升时复喷(约占总浆量10~20%),重点加强桩顶0.5m范围搅拌;此过程极大提升桩身均匀性与顶部强度。(7) 成桩与移

机:成桩后冲洗钻头,防止堵塞;溢出浆液引流至集浆坑;自动记录仪打印数据,签字存档;跳打施工(隔一打一),减少邻桩扰动。

3 施工工艺优化措施

3.1 水灰比优化

应在试桩阶段通过多组对比试验,确定最适合本地土质的最佳水灰比,本工程最终选定0.45作为基准值。在雨季施工时,由于地表水入渗可能导致土体含水率升高,可适当将水灰比下调至0.42左右,以补偿额外水分。施工过程中,必须安排专人使用波美计对每批次浆液进行密度检测,并根据实测结果动态微调配比,实现从“经验控制”向“数据驱动”的转变。

3.2 提升/下沉速度匹配

速度与喷浆量必须严格匹配。设设计水泥掺量为 q (kg/m), 则:

$$q = \frac{\rho \cdot A \cdot v_{\text{提升}}}{\gamma}$$

其中 ρ 为浆液密度, A 为流量, γ 为水泥重度。建议采用变速度控制:桩底1/3段慢速($0.4\text{m}/\text{min}$),中部 $0.5\text{m}/\text{min}$,桩顶 $0.6\text{m}/\text{min}$,配合复喷,确保顶部密实。

3.3 复搅复喷制度强化

传统单搅单喷易导致桩顶“浮浆层”强度不足。本工程要求:执行“两搅两喷”工艺,并明确规定复喷量不得低于总浆量的15%。更重要的是,第二次搅拌必须确保钻头真正到达设计桩底,杜绝为赶工期而简化复搅深度的做法。通过这种“二次强化”机制,桩身整体均匀性显著提升,桩顶区域的强度缺陷得到有效弥补。

3.4 跳打施工顺序优化

为避免邻桩挤压导致缩颈或偏位,采用隔二打一(即跳两根打一根)顺序,尤其在桥台附近加密区域。施工顺序图应明确标注,避免交叉作业。

3.5 自动化与信息化监控

全面启用自动记录仪,实时采集深度、时间、转速、压力、流量;数据云端上传,监理远程监控;异常数据自动报警(如喷浆中断、速度突变)。

3.6 雨季施工适应性调整

场地四周设排水沟,防止积水;水泥随用随运,仓库防潮;雨停后检测地基含水率,必要时晾晒后再施工。

4 常见问题及防治对策

4.1 喷浆中断

喷浆中断是搅拌桩施工中最常见也最危险的质量事故之一,其成因多样,包括输浆管路堵塞、灰浆泵机械故障、突发停电或浆液配制不当导致离析沉淀等。一旦

发生中断,若处理不当,将在桩身内部形成一段无水泥或水泥严重不足的“软弱夹层”,极大削弱桩体的整体性和承载力。针对此问题,项目建立了标准化的应急响应流程:当中断发生时,操作人员必须立即记录当前钻头所处的深度;待故障排除、供浆恢复后,不得直接从原中断点继续提升,而必须将钻头重新下沉至中断点以下至少1.0米的位置,然后重新开始喷浆搅拌并提升,确保新旧浆体有足够长度的搭接重叠^[3]。此外,预防胜于补救,日常应加强浆液过滤(使用80目筛网)、定期清洗管路、配备备用发电机和灰浆泵,从源头上降低中断风险。

4.2 桩身不连续或夹泥

桩身出现不连续、蜂窝状或夹杂纯泥土的现象,通常是由于下沉速度过快、喷浆不均匀或复搅不到位所致。当钻头下沉速度超过土体被切割和混合的能力时,水泥浆无法及时渗透到所有土体颗粒间隙中,导致局部区域形成“干土芯”。为防治此类缺陷,施工中必须严格将下沉速度控制在1.0米/分钟以内,并确保在整个下沉和提升过程中,内、外钻杆始终保持稳定的正反转状态。同时,复搅工序绝不能流于形式,必须保证钻头真实到达桩底,对全桩长进行二次搅拌。在质量检验阶段,应通过28天后的钻芯取样,仔细观察芯样的完整性与连续性,一旦发现夹泥或断桩,必须在原位附近进行补桩处理,以确保加固区域的整体性。

4.3 桩顶强度不足

桩顶强度不足是另一个普遍存在的质量问题,其根源在于桩顶区域受地表扰动大、浆液易上浮、以及传统工艺中搅拌能量衰减等因素共同作用。为解决这一难题,本工程采取了多重保障措施。首先,在工艺上强制实施复喷,将额外10%~20%的水泥浆集中在桩顶1~2米范围内喷入,增加该区域的水泥含量。其次,实行“超灌”策略,即实际成桩顶标高比设计标高高出0.3~0.5米,这部分超灌段在后续路基开挖时被凿除,从而确保设计桩顶位置以下的桩体均为高质量水泥土^[4]。最后,在取芯检测时,特别关注桩顶1米范围内的芯样强度,将其作为验收的关键指标之一。通过这些组合拳,有效攻克了桩顶强度薄弱的行业难题。

4.4 邻桩扰动与偏位

在高密度布桩区域,连续施工极易引发邻桩扰动。新桩施工时产生的侧向挤压力会使邻近尚未完全固化的桩体发生横向位移或截面变形,表现为桩位偏移、桩

径缩小(缩颈)等问题。这不仅影响单桩承载力,更会破坏整个复合地基的均匀性。防治的核心在于打破连续施工的惯性思维,严格执行跳打施工顺序。通过合理的施工规划,让每根桩在成桩后都有足够的时间(通常为24~48小时)进行初步凝结硬化,待其具备一定抗侧压能力后再施工相邻桩。同时,桩机在移动和转向时,必须由专人统一指挥,密切关注地面沉降和已成桩的状态,避免重型设备直接碾压加固区域。

4.5 水泥浪费与环境污染

搅拌桩施工过程中不可避免会产生一定量的溢出浆液,若管理不善,不仅造成水泥浪费,还会污染土壤和水体。为践行绿色施工理念,项目部在施工前就规划了完善的浆液回收系统。沿桩位线开挖的导流沟将溢出的水泥土浆液有序引导至集浆坑,集浆坑底部铺设防渗膜,防止浆液下渗。收集的废浆经过自然沉淀或添加絮凝剂加速固结后,上层清液经检测达标后方可排放,沉淀的泥饼则外运至指定弃土场处置。此外,通过精确计算每根桩的理论用浆量,并与自动记录仪的实际喷浆量进行比对,可以有效监控水泥消耗,及时发现并纠正超耗现象,实现资源节约与环境保护的双重目标。

5 结语

本文以茸卫公路桥头软基处理工程为实例,系统阐述了双向水泥搅拌桩的施工工艺、优化措施及问题防治对策。研究表明,双向搅拌工艺通过正反向旋转与两次喷搅,显著提升了水泥土的均匀性与桩体强度,特别适用于深厚软土地区;施工参数精细化控制(水灰比、速度、复喷量)是保证成桩质量的核心;全过程质量监控与跳打施工顺序可有效避免邻桩干扰与施工缺陷;针对喷浆中断、桩顶强度不足等常见问题,建立标准化应急响应机制至关重要。未来研究可进一步探索智能化施工装备、绿色胶凝材料替代及长期沉降监测,推动软基处理技术向更高效、更环保方向发展。

参考文献

- [1]程建英.双向水泥搅拌桩的设计和施工质量控制[J].四川水泥,2022,(03):217-219.
- [2]李发智.水泥搅拌桩施工技术在市道路施工中的应用[J].全面腐蚀控制,2025,39(04):239-242+254.
- [3]夏灿.双向水泥搅拌桩施工技术在软基路段中的应用[J].交通世界,2021,(13):23-24.
- [4]祖超.双向水泥搅拌桩法在市道路软基加固中的应用实践[J].工程技术研究,2023,8(08):55-57.