

高压喷射注浆技术在深厚砂层地基处理中的效果分析

罗 彬

河南省城乡水务工程建设有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 本文聚焦高压喷射注浆技术在深厚砂层地基处理中的效果分析,阐述了高压喷射注浆技术基础与深厚砂层作用机制,剖析其在深厚砂层中的工作原理。接着深入探讨影响处理效果的因素,涵盖地质条件、施工参数、设备与材料等方面。因此,提出优化策略与质量控制措施,涵盖施工参数优化、施工过程控制及技术创新方向。通过系统研究,旨在为高压喷射注浆技术在深厚砂层地基处理中的科学应用提供理论支持与实践指导,提升地基处理质量与工程安全性。

关键词: 高压喷射注浆; 深厚砂层; 地基处理; 效果分析

引言: 在工程建设领域,深厚砂层地基处理一直是关键且具挑战性的环节。深厚砂层独特的物理力学性质,如较大孔隙比、易液化等,给地基的稳定性带来诸多隐患。高压喷射注浆技术凭借其独特的原理和优势,成为处理深厚砂层地基的重要手段。然而,其处理效果受多种因素制约。深入剖析该技术在深厚砂层地基处理中的效果,对提升工程质量、保障工程安全具有重要意义。

1 高压喷射注浆技术基础与深厚砂层作用机制

1.1 高压喷射注浆技术原理

高压喷射注浆技术是一种广泛应用于地基处理领域的先进技术,其核心原理是借助高压喷射流所具备的强大冲击力来破坏土体结构。以单管法为例,在施工过程中,高压泥浆泵发挥着关键作用,它能够浆液加压至20~40MPa的高压状态,随后浆液从特制的喷嘴高速喷出。这股高速喷射的浆液如同锋利的刀具,对土体进行冲击切割,使原本紧密排列的土颗粒被分散开来。被切割分散的土颗粒与浆液迅速混合,在化学和物理的双重作用下,逐渐形成具有一定强度的加固体。二重管法在此基础上进行了改进,它同时喷射高压水泥浆和压缩空气,压缩空气产生的搅拌作用就像一个高效的混合器,大大增强了浆液与土体的混合效果。三重管法则更为复杂且高效,在二重管的基础上又增加了高压水流,先利用高压水流强大的冲击力破坏土体结构,再注入浆液,从而形成更大直径、更高强度的加固体,能够适应不同复杂地质条件下的地基处理需求。

1.2 深厚砂层地质特性分析

深厚砂层具有一系列独特且对工程建设影响显著的物理力学性质。从颗粒组成方面来看,砂粒的粒径相对较大,这使得砂层内部的孔隙比也较大。较大的孔隙比赋予了砂层良好的透水性,水能够在砂层中较为自由地

流动,就像在无数细小的管道中穿梭。在力学性质上,砂层的抗剪强度与有效应力紧密相关。当处于动水作用环境时,砂层中的砂粒容易失去彼此之间的摩擦力和咬合力,从而发生液化现象,仿佛变成了流动的液体。虽然砂层的压缩性相对较低,但在实际工程建设中,当遇到不均匀沉降或者承受较大荷载时,砂层仍有可能产生较大变形^[1]。

1.3 高压喷射注浆在深厚砂层中的作用机制

在深厚砂层这一特殊地质环境中,高压喷射注浆技术发挥着独特而重要的作用。当高压喷射流作用于深厚砂层时,其强大的冲击和切割能力能够迅速破坏砂层的原有结构,就像一把利刃切开了紧密排列的砂粒阵列。同时,浆液在高压的驱动下,以极快的速度填充砂层的孔隙。这些浆液如同细腻的胶水,与砂粒紧密结合在一起,经过一系列复杂的物理化学变化后,形成具有一定强度的桩体或者连续墙。浆液的凝固过程进一步增强了这种结合效果,使砂层颗粒之间的连接变得更加紧密,大大提高了砂层的整体性和抗剪强度。此外,形成的加固体就像一道坚固的屏障,能够有效阻止地下水的渗透,降低砂层发生液化的可能性。

2 高压喷射注浆技术在深厚砂层地基处理中的效果影响因素分析

2.1 地质条件因素

地质条件是影响处理效果的核心,含砂层颗粒级配、密实度及水文地质条件。颗粒级配方面,细砂层颗粒小、间隙小,射流切割难,桩体直径比设计小10%~15%,浆液易包裹颗粒影响强度;中砂层级配均衡,浆土混合好,桩体强度与完整性最优;粗砂层间隙大,浆液易流失,无措施则桩体易空洞、强度不足。密实度上,松散砂层($Dr < 30%$)射流下易液化,桩体偏移;中密砂层

($D_r = 30\% \sim 60\%$)性质稳定,参数常规即达标,合格率超90%;密实砂层($D_r > 60\%$)颗粒密,需35~40MPa高压射流才能充分破碎,否则加固不充分。水文地质上,地下水位超加固深度需提水泥浆比重至1.2~1.3g/cm³防稀释;承压水(水头 $> 0.1\text{MPa}$)需“隔段注浆+止水环”防冲散浆液。

2.2 施工参数因素

施工参数直接决定处理效果,含喷射系统、浆液性能及施工工艺参数。喷射系统参数中,压力25~40MPa,过低难切割砂层,过高易塌孔;流量80~150L/min,与压力匹配,压力每升5MPa流量加15~20L/min;旋转速度10~20r/min,与提升速度正相关,旋转每加5r/min提升加3~5cm/min,过快混合不均,过慢成本高。浆液性能参数上,选P.O42.5及以上水泥,初凝1.5~2.5h;水灰比1.0~1.5,细砂层1.0~1.2减流失,中粗砂层1.2~1.5提流动性。施工工艺参数中,成孔直径比注浆管大50~100mm;“跳孔喷射”(隔1~2孔)防干扰;自然养护 $\geq 28\text{d}$,低温($< 5^\circ\text{C}$)盖保温棉防强度发展慢。

2.3 设备与材料因素

设备性能与材料质量是高压喷射注浆技术得以有效应用的基础保障。在设备方面,注浆泵应选用额定压力不低于50MPa的高压柱塞泵,且压力波动要控制在 $\pm 2\%$ 以内,以此避免因压力不稳定导致桩体质量不均匀。注浆管需采用壁厚大于等于8mm的无缝钢管,并且每施工500m就要仔细检查其磨损情况,防止在高压环境下发生爆裂^[2]。同时,要配备精度达到 $\pm 1\%$ 的压力传感器与流量计量仪,一旦参数偏差超过 $\pm 5\%$,必须立即停机调整。在材料方面,水泥必须符合国家标准,过期或质量不合格的水泥会大幅降低加固体的强度。

3 高压喷射注浆处理深厚砂层地基的效果评价体系与方法

3.1 效果评价指标体系

构建多维度评价指标体系,含承载力、防渗性能、变形控制及经济性与环境影响。承载力指标有复合地基承载力特征值(平板载荷试验测,需达设计1.2倍以上)、桩体无侧限抗压强度(细砂层28d $\geq 1.8\text{MPa}$,中粗砂层 $\geq 1.5\text{MPa}$)、桩土应力比(2.5~4.0)。防渗性能指标含渗透系数(压水试验测, $\leq 1 \times 10^{-6}\text{m/s}$)、渗流量($\leq 0.01\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$)、止水效果(无渗水点与管涌)。变形控制指标有地基沉降量(竣工1年 $\leq 50\text{mm}$,差异 $\leq 10\text{mm}$)、水平位移量(基坑周边深层 $\leq 30\text{mm}$,速率 $\leq 0.5\text{mm/d}$)、桩体变形(顶沉降 $\leq 20\text{mm}$,无断裂倾斜)。经济性与环境影响指标含单位加固成本(比换填法低30%~50%)、工

期(比碎石桩法短20%~30%),噪声(白天 $\leq 70\text{dB}$ 、夜间 $\leq 55\text{dB}$)、振动速度($\leq 0.15\text{cm/s}$)。

3.2 效果评价方法

采用现场试验、实验室检测与数值模拟结合的评价方法。现场试验中,平板载荷试验用1×1m承压板,分级加载(每级为设计1/10),稳定1h记沉降,沉降突变即停,定承载力;钻孔压水试验选5m试验段,单点或五点法加压注水,记注水量,裘布依公式算渗透系数;取芯检测在桩体上中下各取3芯样,测无侧限抗压强度,算均值与变异系数($\leq 15\%$),查完整性。实验室检测对芯样做室内渗透试验,砂箱模型模拟砂层,测渗透系数补数据。数值模拟用FLAC3D建复合地基模型,输参数模拟应力与沉降,对比现场数据验证效果,预测长期变形。

3.3 长期效果监测与评估

长期监测与评估保障工程安全,监测含地基变形、桩体性能及防渗性能。地基变形监测布沉降与水平位移观测点,沉降点每500m²1个,用 $\pm 0.1\text{mm}$ 精密水准仪,施工每3d、竣工每月测1次,连测1年以上,绘沉降曲线判稳定;水平位移在周边设测斜管, $\pm 0.1\text{mm/m}$ 测斜仪每0.5m读数算位移。桩体性能监测预埋应变传感器,定期采数据换算应力,结合定期取芯对比强度,判老化衰减。防渗性能监测设水位观测井,定期测水位查差变($< 5\text{cm/d}$ 为稳),定期示踪试验评帷幕连续性。评估每半年析数据,对比设计与初期效果,异常即补强,确保长期安全^[3]。

4 高压喷射注浆技术在深厚砂层地基处理中的优化策略与质量控制

4.1 施工参数优化策略

施工参数优化对于提升高压喷射注浆处理深厚砂层地基的效果起着关键作用。在实际施工中,不同地质条件对施工参数的要求差异显著。因此,需通过大量的现场试验,全面分析在不同地质状况下,喷射压力、提升速度、旋转速度以及浆液流量等参数对加固体直径、强度和均匀性的具体影响。例如,在粗砂层中,由于其孔隙较大,适当提高喷射压力至35~40MPa,同时增大浆液流量到120~150L/min,并降低提升速度至0.1~0.15m/min,能够有效增加加固体的直径,使其达到设计要求的1.2~1.5倍,同时显著提升加固体强度20%~30%。建立参数与处理效果的数学模型是精准优化的重要手段。利用先进的优化算法,如遗传算法、神经网络算法等,对模型进行求解,确定最佳参数组合。并且,在施工过程中,借助实时监测设备获取的数据,如压力传感器、流量计等反馈的信息,及时动态调整参数,确保处理效果始终处于最佳状态,从而保证深厚砂层地基处理的质量和稳定性。

4.2 施工质量控制措施

施工质量控制是保障高压喷射注浆处理深厚砂层地基质量的核心环节。施工前,必须对设备和材料进行严格细致的检查。对于高压泵、喷嘴等关键设备,要检查其性能指标是否符合施工要求,如高压泵的压力稳定性、喷嘴的尺寸精度等。对于水泥、外加剂等材料,要查验其质量合格证明,并进行抽样检测,确保其各项性能指标达标。施工过程中,要加强参数监控力度。安排专人实时记录喷射压力、提升速度等参数的变化情况,一旦发现参数偏离设计值,立即进行调整。严格控制浆液配比,按照精确的比例添加水泥、水和外加剂,并保证搅拌时间充足,使浆液充分混合均匀。对成桩质量进行及时检查,采用钻孔取芯法获取加固体样本,检测其强度和连续性。若发现问题,及时分析原因并采取补救措施。建立完善的质量追溯制度,对每个施工环节进行详细记录,包括施工时间、参数设置、材料使用等,以便在出现问题时能够迅速准确地查找原因,追究责任^[4]。

4.3 技术创新方向

技术创新是推动高压喷射注浆技术在深厚砂层地基处理领域不断前进的动力源泉。研发新型浆液材料是重要的创新方向之一。例如,开发具有更高强度的浆液,能够使加固体的承载能力大幅提升,满足更高标准的工程需求;具有更快凝固速度的浆液,可缩短施工周期,提高施工效率;具备更好环保性能的浆液,能减少对周围环境的污染,符合可持续发展的要求。改进施工设备也是关键的创新举措,开发智能化高压喷射注浆机,通过安装传感器和智能控制系统,实现施工参数的自动控制和实时调整,提高施工的精准度和稳定性。探索新的

施工工艺,如将高压喷射注浆技术与其他地基处理方法相结合,形成复合地基处理技术,能够充分发挥各种技术的优势,提高对复杂地质条件的适应性。加强信息技术在施工中的应用,利用BIM技术进行施工模拟,提前发现施工中可能出现的问题并制定解决方案,同时通过BIM模型进行质量控制,实现施工过程的数字化、可视化管理,提升整体技术水平。

结束语

高压喷射注浆技术在深厚砂层地基处理中具有显著效果,但处理效果受地质条件、施工参数、设备与材料等多种因素影响。通过构建科学的效果评价体系与方法,可准确评估处理效果。为进一步提高处理质量,需从施工参数优化、施工质量控制和技术创新等方面入手。优化施工参数能根据不同地质条件实现精准施工;严格的质量控制措施可确保每个施工环节符合标准;技术创新则为解决复杂问题提供新途径。未来,应持续深入研究,不断完善该技术,以更好地满足工程建设对深厚砂层地基处理的需求,保障工程的安全与稳定。

参考文献

- [1]刘峰,肖文海,顾问天.滨海砂层场地桩锚支护基坑事故分析与处理[J].地基处理,2025,7(04):384-391.
- [2]张浩.深厚密实砂层密排护壁桩沉桩施工方法研究[J].中国水运,2025,(13):46-49.
- [3]岑蔚.高压旋喷施工技术在砂卵石地层的应用[J].中国新技术新品,2020(04):112-113.
- [4]胡鹏,潘桥泓.浅谈高压旋喷桩在城市道路软基处理中的应用[J].价值工程,2020(07):164-166.