

土木工程建筑灌注桩后注浆施工技术控制要点研究

郭以撒

中国水利水电第十一工程局有限公司 河南 郑州 450000

【摘要】：土木工程建筑科学运用灌注桩后注浆技术能够有效提升桩基承载力，降低沉降发生率。然而，施工过程中的参数控制不当易导致注浆效果不佳，甚至引发桩体上浮、地表隆起等质量问题。本文针对灌注桩后注浆施工的关键技术控制要点展开系统研究，从施工前准备、注浆管设置与安装；注浆施工过程控制及效果验收等环节提出精细化控制策略。最后本研究还针对注浆管堵塞、压力异常等常见问题提出了防治措施，为后注浆技术的标准化施工与质量控制提供了理论依据和实践参考，对保障复杂地质条件下桩基工程的安全性及经济性具有重要价值。

【关键词】：土木工程；灌注桩；后注浆施工；控制要点

DOI:10.12417/2811-0528.25.21.054

引言

灌注桩因其适应性强、施工效率高等优势，目前已成为土木工程建筑领域的一种主流基础形式，但传统工艺中桩端沉渣、桩侧泥皮等问题易导致承载力损失。后注浆技术通过向桩端及桩侧注入浆液，胶结土体孔隙、改善桩土界面性能，成为弥补上述缺陷的有效技术手段。然而，当前施工中常因材料配比不合理、注浆参数控制失当、工艺执行不规范等问题，导致注浆效果离散性大，甚至引发桩体开裂、周边沉降超标等风险。现有研究多侧重理论机理分析，对现场实操控制的系统性探讨不足。本文基于施工全流程视角，深入剖析材料选择、注浆管安装、压力-流量调控等关键环节的控制要点，旨在构建科学的质量管控体系，为同类工程提供技术借鉴。

1 灌注桩后注浆技术原理与特点

1.1 技术原理

灌注桩后注浆施工是基于浆液渗透、压密与胶结作用的桩基加固机制。成桩后，借助预埋于钢筋笼的注浆管向桩端持力层及桩侧周边土体高压注入水泥基浆液。桩端注浆时，浆液沿桩底沉渣缝隙渗透扩散，填充土体孔隙并胶结松散颗粒，形成扩大的“结石体”，从而大幅提升了端承力；桩侧注浆则是通过浆液劈裂桩周软弱土层，在桩土界面形成硬化壳层，以增强侧摩阻力。两种方式协同作用时，浆液在压力驱动下形成三维加固区，改善桩体受力形态，使桩基竖向承载力显著提升，双管旋喷注浆施工原理如图1所示。

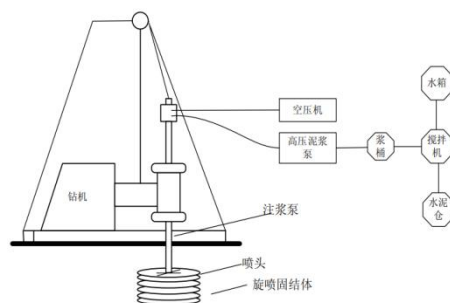


图1 双管旋喷注浆施工原理

1.2 技术特点与适用范围

灌注桩后注浆技术具有施工便捷、经济、环保等特点，其可与灌注桩施工同步预埋注浆管，不额外占用工期；同时，桩端与桩侧的协同加固使得单桩竖向承载力大幅提高；相比传统桩基加长或加粗方案，施工成本也降低约10%-20%；此外，环境影响小，注浆过程无剧烈振动，对周边建筑扰动轻微；动态调控性强，可通过实时调整压力、流量适配复杂地质^[1]。

灌注桩后注浆技术可适用于地质条件上，适用于软土、砂土、卵石层、粉土等多种地层，尤其对存在桩底沉渣或桩侧泥皮的工况效果突出；现如今，在高层建筑、桥梁基础、地下车库、重型设备基础等需提高桩基稳定性的项目中得到非常广泛的应用，特别适合对沉降控制要求严格的工程场景。

2 土木工程建筑灌注桩后注浆施工技术控制要点

2.1 施工前期准备

首先，施工单位需组织专业人员开展详细的地质勘察，明确桩端及桩侧土层分布、渗透性、地下水位等参数，为注浆参数设计提供依据。同时，全面检测成桩质量，通过低应变动力试桩或超声波检测识别桩身缺陷（如沉渣、裂隙）位置及程度，确定注浆区域。其次，试验验证注浆材料，水泥浆液的水灰比宜控制在0.5~0.8，可根据地质条件添加减水剂或膨胀剂以改

善流动性与固结强度。此外,选用高压注浆泵、高精度流量计及耐压注浆管,并提前进行调试与校准。

2.2 注浆管设置与安装

土木工程建筑灌注桩后注浆施工中多采用钢管(直径 $\geq 50\text{mm}$)注浆管,桩端注浆管需延伸至桩底以上 $0.5\sim 1.0\text{m}$,桩侧注浆管沿桩长间隔布置(间距 $2\sim 4\text{m}$),具体根据桩径与地质条件调整。同时做好注浆管与钢筋笼同步绑扎固定工作,底部采用丝扣或焊接封闭,顶部高出桩顶 0.5m 以上并设置管箍保护^[2]。

安装注浆管的时候必须保证注浆管垂直度偏差 $\leq 1\%$,避免与钢筋笼主筋冲突,且管间连接需采用套筒焊接或快速接头,密封性需通过注水试验验证。深长桩可在桩内设置 $2\sim 3$ 根注浆管并分区注浆,以减少注浆阻力。此外,还需在注浆管顶部安装压力表与截止阀,便于施工监控与管路清洗。

2.3 注浆施工过程控制

2.3.1 注浆时机选择

注浆时机的选择对注浆效果与桩体安全均具有极大的影响,过早注浆会导致浆液沿桩侧上返或桩体上浮,过晚则因桩身混凝土强度过高导致浆液渗透困难。一般而言,桩端注浆宜在成桩后 $3\sim 7$ 天进行,既能保证桩体稳定性,又利于浆液扩散;桩侧注浆可适当延迟至 $7\sim 14$ 天,以避免对桩侧土体扰动过大。软土地基或超长桩则需结合现场试桩结果调整时机。此外,注浆施工应尽量避免雨季或地下水位波动期施工,防止浆液稀释或地层失稳^[3]。若成桩后间隔时间过长(超过 28 天),需对桩身进行超声波检测,确认无裂缝后再注浆,并适当降低注浆压力以减少附加应力。

2.3.2 压力与流量控制

初始注浆压力宜低($0.5\sim 1.0\text{MPa}$),待管路畅通后逐步升压至设计值(桩端注浆 $2.0\sim 5.0\text{MPa}$,桩侧注浆 $1.0\sim 3.0\text{MPa}$),具体根据地质条件动态调整。砂层或碎石土压力可适当提高以促进浆液渗透;黏性土或淤泥质土需采用低压慢注($\leq 2.0\text{MPa}$)防止地层劈裂。

流量控制则应与压力相匹配,初始流量宜为 $20\sim 30\text{L/min}$,待桩端或桩侧土体吃浆量下降后逐步降低至 $10\sim 15\text{L/min}$,避免浆液集中导致局部压力过高。施工过程中需持续监测压力表与流量计读数,压力突增且流量锐减易发生管路堵塞或地层劈裂,需立即停泵检查;压力骤降且流量增大则会发生漏浆问题,此时需调整注浆位置或添加速凝剂。除此之外,还需设置压力上限阈值,超限时自动停泵并报警,确保施工安全。

2.3.3 注浆量控制

注浆量的控制需根据桩径、桩长、地质条件及缺陷程度综合计算。理论注浆量可按以下公式进行计算:

$$Q=\alpha \cdot \pi \cdot (d/4) \cdot h \cdot n$$

其中, α 为浆液填充系数, d 为桩径, h 为注浆段高度, n 为土体孔隙率。

实际注浆过程往往实施分阶段控制:初始阶段快速注入设计量的 $50\%\sim 60\%$,促进浆液初步扩散;中间阶段以低压慢注完成剩余 $30\%\sim 40\%$,确保土体充分固结;终了阶段持压 $5\sim 10\text{min}$ (压力不低于设计值的 80%),填补细微裂隙。若注浆量已达设计值但压力未达标,可能存在漏浆或浆液稀释,需暂停注浆并检查管路密封性;若压力达标但注浆量不足,可能因地层致密导致渗透困难,可适当延长持压时间或添加膨胀剂^[4]。

2.3.4 注浆顺序与间歇时间

通常情况下,单桩宜采用“先桩端、后桩侧”的顺序,即先对桩端土体注浆以形成扩大头,再自下而上分段注浆桩侧(每段高度 $2\sim 3\text{m}$),防止浆液上返导致桩侧注浆效果降低。群桩需按“跳桩施工、对称注浆”原则,间隔 $2\sim 3$ 根桩进行注浆,减少相邻桩注浆时的应力叠加效应。

间歇时间控制需结合浆液凝结特性与地层吸浆能力,桩端注浆完成后需间隔 $6\sim 12$ 小时再进行桩侧注浆,确保桩端浆液初步固结;桩侧分段注浆时,每段间隔时间宜为 $30\sim 60$ 分钟,待前段浆液黏度增长至 $50\sim 100\text{mPa} \cdot \text{s}$ 后再注下一段,防止浆液串通。若地层渗透性强或注浆量较大,可适当延长间歇时间至 $2\sim 4$ 小时,并通过取芯检测浆液固结强度(28 天无侧限抗压强度 $\geq 5\text{MPa}$)验证间歇时间合理性。下图2为注浆过程示意图。

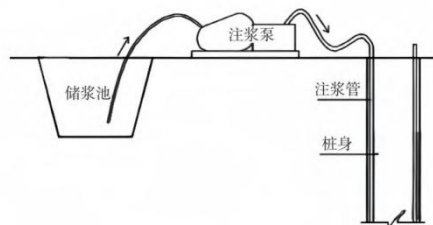


图2 注浆过程示意图

2.3.5 质量验收

灌注桩后注浆施工质量验收内容包括资料审查与现场检测两部分。资料审查主要是核对施工记录、注浆参数设计文件、材料合格证及试桩报告等;现场检测需通过静载试验、动测法或钻芯取样验证注浆效果。静载试验为首要验收方法,单桩极

限承载力需满足设计要求,且沉降量符合规范;动测法通过低应变或高应变检测桩身完整性,注浆后桩底沉渣反射信号应明显减弱;钻芯取样需在桩端及桩侧注浆区域取芯,观察浆液充填情况与固结体强度,芯样完整率应 $\geq 90\%$,无侧限抗压强度 $\geq 5\text{MPa}$ 。不合格桩需根据缺陷位置采取补浆或加固措施,并扩大检测范围至相邻桩基。验收合格后需编制验收报告,明确注浆施工参数、检测结果及质量评定结论,作为工程竣工验收的依据^[5]。此外,建立长期监测机制,定期复测桩顶沉降(每半年一次),确保后注浆桩基的长期稳定性。

3 土木工程建筑灌注桩后注浆施工常见问题与防治措施

3.1 注浆管堵塞

注浆管堵塞是后注浆施工中最为常见的一类问题,主要是由于管内混凝土残留、焊渣掉落或浆液凝固导致。堵塞多发生在注浆管底部或接头处,表现为注浆泵压力骤增而流量锐减,严重时甚至引发管路爆裂。其成因包括:混凝土浇筑时振捣棒触碰注浆管导致变形,管口保护不足使泥浆或杂物侵入,以及注浆间隔时间过长导致管内浆液初凝。

防治措施:安装阶段应采用丝扣连接或专用接头,避免焊接产生焊渣;管口需用塑料布包裹并高出桩顶50cm,防止浇筑时混凝土或泥浆渗入;成桩后立即用高压水冲洗管路(压力 $\geq 0.5\text{MPa}$),确保通畅性。若已发生堵塞,可采用高压空气吹扫或插入软轴钻头疏通;对于顽固堵塞,可在管内注入稀盐酸(浓度10%~15%)溶解水泥块,但需严格控制反应时间($\leq 30\text{min}$)并及时冲洗,防止腐蚀管壁。此外,在注浆管顶部安装单向阀,避免浆液回流导致二次堵塞。

3.2 注浆压力异常

注浆压力异常即压力过高或过低,无论过高还是过低都会对浆液扩散范围与桩基承载力造成很大的不良影响。压力过高通常由地层劈裂、管路堵塞或注浆量过大引发,可能导致桩体上浮或地表隆起;压力过低则因地层渗透性强、漏浆通道多或浆液稀释造成,无法形成有效固结体。

防治措施:施工前应通过试桩确定地层劈裂压力阈值,并在注浆泵上设置压力上限报警装置(通常为设计压力的1.2倍);

超限时自动停泵;若压力突增且流量下降,需立即停泵检查管路密封性或地层是否劈裂,必要时降低注浆速度或改用脉冲注浆工艺。对于压力过低问题,可添加速凝剂(如水玻璃)缩短浆液凝结时间,或在漏浆区域预埋袖阀管进行定向注浆^[6];若因浆液水灰比过大导致压力不足,需调整配比至0.6~0.8,并增加搅拌时间($\geq 3\text{min}$)确保均匀性。此外,实时分析注浆压力-流量曲线,建立压力与地层响应的对应关系,为参数优化提供依据。

3.3 桩体上浮或地表隆起

桩体上浮或地表隆起多是因为注浆压力过高、注浆量过大或地层软弱导致的。上浮主要表现为桩顶标高升高(通常 $> 10\text{mm}$),隆起则伴随地表裂缝或周边建筑物沉降,可能引发桩身断裂或承载力丧失,其成因通常是桩端注浆时浆液对桩底土体的挤压作用产生向上摩阻力,或桩侧注浆导致土体体积膨胀对桩身产生侧向推力;在软土地基中,浆液扩散范围过大易形成“浆泡”,进一步加剧地层位移。

防治措施:一方面,设计阶段应基于有限元分析确定安全注浆压力(通常 $\leq$ 地层自重压力的80%),并限制单桩注浆量(砂层 $\leq 2.5\text{m}^3$,黏性土 $\leq 1.8\text{m}^3$);施工阶段需采用“低压慢注、分段跳桩”工艺,桩端注浆压力控制在2.0~4.0MPa,桩侧注浆压力 $\leq 2.0\text{MPa}$,且每根桩注浆完成后需间隔12~24小时再施工相邻桩。若已发生上浮或隆起,需立即停止注浆并开挖检查桩身完整性,对轻微上浮桩可采用高压注水反压处理,对严重隆起区域需进行地基加固(如搅拌桩或高压旋喷桩)并重新验算桩基承载力。此外,在桩顶设置沉降观测点(每2小时监测一次),结合深层土体位移计实时监控地层变形,确保施工安全。

4 结语

总而言之,灌注桩后注浆施工技术控制需贯穿材料选型、参数调控至检测验收全流程。通过强化注浆管安装精度、动态适配压力流量、实施双控标准,可充分发挥其承载力提升优势。未来还需进一步结合智能化监测与新型环保浆液研发,优化复杂地质适应性,为土木工程桩基工程的安全高效施工提供更完善的技术支撑,推动该技术在绿色建造领域的深度应用。

- 参考文献:
- [1] 宋海培.高层住宅建筑工程后注浆钻孔灌注桩施工技术应用实践分析[J].住宅与房地产,2025,(02):98-100.
 - [2] 练陟.钻孔灌注桩后注浆施工及承载力影响因素分析[J].江西建材,2024,(12):347-348+352.
 - [3] 陈少波.桩端后注浆施工技术在高层住宅建筑工程中的应用研究[J].江西建材,2024,(11):276-277+292.
 - [4] 郑启洪.房建工程中桩端后注浆对灌注桩沉降性能的影响[J].陶瓷,2024,(11):144-147.
 - [5] 康扬.旋挖钻孔灌注桩后注浆施工技术[J].砖瓦,2024,(11):171-173.
 - [6] 李拥文,乐利光.后注浆工艺在桩基施工中的应用[J].港口航道与近海工程,2024,61(S1):54-59.