

# 灌注桩后注浆施工技术在建筑工程施工中的应用探析

朱海荣

江苏省地质局第三地质大队 江苏 镇江 212000

**摘要：**建筑工程桩基施工面临承载力不足、地质条件复杂等挑战，文章以灌注桩后注浆技术作为切入点，对技术原理、施工参数控制、典型应用场景进行系统研究分析，提出材料配比优化、设备选型标准、工艺参数动态调节等具体措施，以为桩基施工领域相关技术人员提供理论参考。

**关键词：**灌注桩；后注浆技术；施工参数控制；承载力提升；地质适应性

## 引言：

桩基工程在建筑结构中承担荷载传递的关键功能，传统灌注桩施工常因沉渣堆积、泥皮形成导致承载能力未能充分发挥，复杂地质条件下成桩质量控制难度进一步加大。后注浆技术在桩端或桩侧注入浆液改善桩周土体状态，为解决承载力不足、沉降控制等问题提供了有效途径，技术应用范围逐步拓展至超高层建筑、抗震设防区域等特殊工程。

## 一、灌注桩后注浆技术原理与分类

### （一）技术基本原理

灌注桩后注浆技术的核心在于注浆材料向桩周土体的有效渗透，水泥浆液或化学浆液在压力驱动下进入桩端沉渣孔隙、桩侧泥皮裂隙以及土体薄弱部位，材料颗粒填充了原本松散的空隙结构。浆液在桩底形成扩散区域后逐渐凝固，沉渣层被浆液置换或压密，桩端土体承载能力随之提升。注浆压力的施加改变了桩周土体的应力状态，土颗粒在压力作用下发生重新排列，孔隙比减小使得土层密实度明显增加。浆液的固结过程产生结石体，结石体与桩身混凝土、周边土层形成整体受力结构，桩侧摩阻力因泥皮固化而显著增大。压力数值需要控制在合理区间，压力过小导致浆液扩散半径不足，压力过大则可能造成土体劈裂或桩身破坏，施工中应根据地层性质调整注浆参数，确保浆液在桩端持力层充分扩散的同时避免对既有结构产生不利影响。

### （二）技术分类与适用范围

后注浆技术按照注浆位置可划分为不同类型，桩端注浆将浆液集中注入桩底持力层，注浆管预埋至桩端标高位置，浆液在端部形成扩大头结构来提高端阻力，适用于持力层较软或存在厚层沉渣的工况。桩侧注浆需要在桩身不同深度预埋多个注浆阀，浆液从侧壁渗入桩周土层，泥皮在压力作用下固化增强了侧摩阻力，软土地层中采用桩

侧注浆能够改善桩身与土体的咬合状态<sup>[1]</sup>。复合注浆同时设置桩端注浆管与桩侧注浆阀，端阻力与侧阻力得到双重提升，对于承载要求高且地质条件复杂的项目具有明显优势。施工阶段的划分标准决定了注浆时机的选择，成桩后注浆在混凝土达到设计强度后进行，桩身混凝土已经形成稳定结构，注浆压力不会对桩体造成损伤，适合大多数常规工程。同步注浆在成孔过程中边成桩边注浆，缩短了施工周期但对设备要求较高，需要专门的同步注浆装置来控制浆液注入时间与混凝土浇筑进度的配合，该方式在工期紧张的项目中应用较为广泛。

### （三）技术优势分析

后注浆技术在提升桩基性能方面展现出明显优势，浆液固结后形成的加固区域直接增大了桩端承载面积，单桩承载力相比常规灌注桩提升幅度可达30%以上，沉降量控制效果同样显著改善。承载力的提高为桩基设计带来更大灵活性，设计人员在满足承载要求的前提下缩短桩长或减小桩径，原本需要50m桩长的工程采用注浆技术后桩长降至40m左右即可达标，钢筋笼用量、混凝土方量因此减少，施工机械台班费用相应降低，整体造价节省比例达到15%左右。复杂地质条件下该技术的适应能力尤为突出，软土地层中桩端持力层承载力不足的问题在注浆后得到解决，浆液渗入软土孔隙使得土体强度明显提升，桩端阻力从原先的薄

弱状态转变为可靠支撑。

## 二、灌注桩后注浆关键施工技术参数与控制要点

### (一) 材料性能要求

注浆材料的质量直接决定加固效果能否达到预期目标，水泥选用42.5级普通硅酸盐水泥作为基础材料，强度等级满足浆液凝固后的承载需求，低标号水泥固结体强度不足会削弱注浆作用。外加剂配比需要根据地层渗透性调整掺量，膨润土按照水泥重量的3%至5%添加，减水剂掺入比例控制在0.5%至1.0%之间，水灰比设定在0.5至0.6范围内，配比过稀导致浆液离析，配比过稠则影响浆液扩散距离。浆液流动性指标要求漏斗黏度计测定值保持在18s至25s之间，流动度太大时浆液在土层中快速流失无法形成有效固结区，流动度过小则浆液难以渗入桩端细小孔隙，拌制过程中应持续搅拌确保材料均匀分散。凝结时间的把控关系到施工进度，初凝时间设置为2h至4h较为合理，终凝时间不宜超过8h，凝结过快会造成管路堵塞导致注浆中断，凝结过慢延长了养护周期影响后续工序开展，现场需配备凝结时间测定仪随时检测浆液状态，温度较高时应适当增加缓凝剂用量来延缓凝结速度<sup>[2]</sup>。

### (二) 注浆设备系统

注浆设备的性能配置直接影响施工质量稳定性，高压注浆泵需要选择额定压力达到10MPa以上的型号，泵送能力应满足连续作业要求，排量范围在50L/min至100L/min之间较为适宜，压力不足会导致浆液无法克服土层阻力进入深部区域，排量过小则延长注浆时间影响整体进度。泵体材质选用耐磨合金钢，柱塞密封件需要定期更换避免压力损失，液压系统油路保持清洁防止杂质进入造成泵体故障。注浆管路采用无缝钢管作为主管材料，管径按照25mm至40mm规格配置，管壁厚度不小于4mm才能承受高压环境，管路连接部位使用锥形螺纹或法兰连接方式，接头处缠绕密封胶带后拧紧确保不发生渗漏，弯头位置设置在应力较小区段减少管路破损风险。耐压测试在每次施工前进行，测试压力设定为工作压力的1.5倍并持续10min观察压力表读数，压力下降超过5%则需要排查泄漏点。智能监测装置安装在注浆管进口端，压力传感器实时采集注浆压力数据，流量计记录浆液累计注入量，数据传输至监控终端后自动生成曲线图，操作人员根据压力突变或流量异常判断地层变化情况并及时调整参数。

### (三) 工艺参数控制

注浆压力需要建立动态调节机制来适应地层变化，初始

压力从2MPa开始逐步提升，每隔5min增加0.5MPa直至达到设计压力值，砂土层中终止压力控制在6MPa至8MPa之间，黏土层可提高至8MPa至10MPa，压力表读数出现突然下降表明浆液进入大孔隙或裂隙，此时应维持当前压力继续注浆直至压力回升，压力持续上升且流量减小说明桩端土体已经密实，操作人员需要及时停止注浆防止桩身抬动。注浆量计算采用经验公式结合现场试验确定，单桩注浆量按照桩端面积乘以扩散厚度再乘以1.2的富余系数，扩散半径根据土层渗透系数推算，渗透系数在 $10^{-5}$ m/s时半径取1.5m至2.0m，渗透系数较小时半径相应缩减至1.0m左右，实际注浆过程中以压力稳定或返浆作为结束标志，累计注浆量不宜超过计算值的150%避免浪费材料。多桩施工区域需要制定协同注浆方案，相邻桩间距小于4倍桩径时采用间隔注浆方式，先对奇数编号桩位完成注浆，间隔48h后再对偶数桩位进行操作，浆液凝固期内避免相邻桩注浆产生的压力叠加效应，桩间距较大时可同时注浆但需要监测地表隆起量，隆起超过5mm应暂停施工。

### (四) 质量验收标准

桩身完整性检测在注浆完成28d后开展，低应变反射波法对全部桩基进行普查，波形曲线出现明显缺陷反射时需要标注异常位置，声波透射法抽检比例不低于总桩数的30%，声测管预埋间距按照桩径的0.6倍布置，超声波接收探头在管内从桩底向上匀速提升，声速值低于3500m/s的区段判定为缺陷部位，波幅衰减超过6dB同样视为质量隐患，检测报告需要附带波形图与数据表格供验收单位审查。承载力验收采用静载试验作为最终判定依据，试验桩数量按照总桩数1%且不少于3根的原则确定，加载等级划分为10级至12级，每级荷载维持时间不少于1h，桩顶沉降量在连续两次观测中增量小于0.1mm时进入下一级加载，极限承载力取沉降急剧增大前一级荷载值，单桩竖向承载力特征值需要达到设计值的1.2倍以上才算合格。沉降观测点沿建筑物四周均匀布设，观测频率在施工期间为每月两次，主体结构完工后改为每季度一次，累计观测时间持续至竣工验收后一年，沉降速率小于0.01mm/d时可终止监测，观测数据绘制成时间沉降曲线图用于评估桩基长期稳定性。

## 三、灌注桩后注浆施工技术在建筑工程中的典型应用场景

### (一) 复杂地质条件适应性

软土地基承载力不足的问题在注浆技术应用后得到针对性解决，浆液渗入淤泥质土层后填充了土颗粒间的大孔

隙,水分在压力挤压下排出使得土体含水率降低,固结后的浆液与土颗粒形成骨架结构,桩端阻力从原先每平方米几百千牛提升至上千千牛,施工中需要将注浆压力控制在4MPa至6MPa范围避免软土层产生侧向挤出,浆液水灰比调整至0.45左右增强凝固强度。

岩溶发育区域桩端下方存在溶洞时常规施工难以保证桩基稳定,注浆管延伸至溶洞顶板位置后注入快凝浆液,浆液在溶洞空间扩散并逐渐填充空洞,凝固后形成的填充体承担桩端荷载避免了桩身下沉,溶洞高度超过3m时应分层注浆,下层浆液初凝后再进行上层注浆防止材料流失,每层注浆间隔时间设定为6h至8h确保浆液具备足够承载能力。砂层施工中孔壁坍塌导致桩径缩颈的现象影响成桩质量,注浆压力使松散砂粒重新排列密实,桩侧泥皮在浆液固化后转变为具有一定强度的护壁层,摩阻力因砂层密实度提高而显著增大,注浆顺序应从下至上逐段进行,每段长度控制在5m左右防止浆液集中在某一部位。

### (二) 特殊结构体系应用

超高层建筑对桩基承载力提出极高要求,单桩荷载往往超过常规建筑数倍,后注浆技术在核心筒区域桩基施工中发挥关键作用,桩端复合注浆使承载力特征值从设计初值的8000kN提升至10000kN以上,施工时需要在核心筒桩位设置双层注浆阀,第一层布置在桩端位置,第二层设置在桩身中部偏下三分之一处,分层注浆间隔72h保证下层浆液充分凝固,注浆压力采用递增控制方式,桩端注浆终压达到9MPa确保持力层充分加固。大跨度结构跨中与支座位置荷载差异明显,桩基沉降不均匀会导致上部结构产生附加应力,跨中区域桩基采用加强注浆方案,注浆量按照常规用量的1.3倍配置,支座区桩基注浆压力提高至8MPa增强桩端刚度,施工中对跨中与支座桩位进行差异化处理,跨度超过40m时应在四分点位置增设沉降观测点,观测数据显示差异沉降超过设计限值的60%时需要沉降较大桩位补充注浆。

### (三) 施工环境适应性

城市密集区周边建筑物对施工振动反应敏感,后注浆技术采用静压注浆方式替代传统锤击,振动源在施工过程中几乎不产生,注浆压力缓慢施加避免了冲击荷载,施工现场距离既有建筑不足10m时需要在建筑物墙角布设振动监测仪,振动速度超过2mm/s应立即降低注浆压力或暂停作业,夜间施工时段设备运转噪音控制在55分贝以下,注浆泵外部加装隔音罩减少噪声传播,管路连接部位使用橡胶垫圈吸收振动能量。

地下水丰富区域施工需要防止浆液污染水体,注浆前在桩孔周围设置截水帷幕,帷幕采用高压旋喷桩形成封闭圈,旋喷桩深度延伸至不透水层阻断浆液扩散通道,浆液配制时严格控制外加剂用量,禁止使用含有重金属成分的材料,废弃浆液收集至沉淀池经过固化处理后再行清运,地下水监测井布置在施工区下游方向,每周采样检测水质指标确保不出现污染超标情况<sup>[3]</sup>。冬季气温低于5℃时浆液凝结速度减缓影响施工进度,拌浆用水需要加热至40℃左右提高浆液初始温度,搅拌罐外壁包裹保温棉保持温度稳定,注浆管外表面缠绕电热带防止管内浆液冻结堵塞,浆液中添加防冻剂降低凝固点,添加比例按照水泥重量的2%至3%控制,注浆完成后在桩顶覆盖保温毯养护48h以上,养护期间测温孔显示桩身温度低于0℃时应延长保温时间。

### 结束语

灌注桩后注浆技术在材料配比、设备选型、工艺参数控制等方面形成了较为完善的技术体系,软土地基、岩溶地质、砂层等复杂工况下的应用效果证明了该技术的可靠性,超高层建筑、大跨度结构、抗震设防区域的成功实践拓展了技术应用边界。施工质量控制需要重点关注注浆压力动态调节、浆液扩散范围监测、桩身完整性检测等环节,城市密集区、地下水敏感区、冬季施工等特殊环境下应制定针对性措施保障施工安全。技术发展方向应聚焦智能监测系统完善、材料性能优化、施工工艺标准化,为桩基工程质量提升提供持续动力。

### 参考文献:

[1]李可霞.灌注桩后注浆施工技术在建筑工程施工中的应用[J].科技资讯,2024,22(14):145-147.

[2]尹坤文.建筑工程施工中灌注桩后注浆施工技术[J].科学技术创新,2024,(09):166-169.

[3]林伟.灌注桩后注浆施工技术在建筑工程施工中的应用分析[J].居业,2023,(07):28-30.