

# 路桥工程桩基后注浆施工关键技术及质量检测

文 / 杜凯凯 山东科达基建有限公司

**摘要：**在国家交通强国战略推进下，路桥工程建设不断向西部山区、东部沿海软土区等复杂地质区域延伸。桩基后注浆技术作为针对性解决方案，通过成桩后向桩底、桩侧注入定制化浆液，实现沉渣胶结、泥皮置换与土层加固的多重效果。该技术自 20 世纪 90 年代引入我国后，经工程实践优化，已形成成熟的工艺体系，在港珠澳大桥、雅西高速公路等重大工程中成功应用，成为复杂地质条件下保障桩基质量的关键技术，具有极高的工程实践与推广价值。

**关键词：**路桥工程；桩基后注浆；施工关键技术；质量检测

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.051

## 引言

在现代路桥工程建设中，桩基作为承载结构的重要组成部分，其施工质量直接影响到整个工程的安全性和耐久性。后注浆技术作为一种有效的加固手段，能够显著提升桩基的承载能力和稳定性。本文旨在探讨路桥工程中桩基后注浆施工的关键技术及其质量检测方法，为实际工程提供理论支持和技术指导。通过分析注浆技术的基本原理、施工过程中的技术要点以及质量检测的具体方法，进一步明确该技术的应用价值和实施路径。

### 一、桩基后注浆技术的基本原理

#### （一）渗透注浆

适用于渗透系数  $> 10^{-4}$ cm/s 的中粗砂、砾石层。当注浆压力（通常 1.5-2.5MPa）小于土体抗剪强度时，浆液以“毛细血管渗透”形式进入土颗粒间孔隙，排挤孔隙内水分与空气。浆液中的水泥颗粒在孔隙内沉积，与土体颗粒形成机械咬合，待水化反应完成后，形成强度达 5-15MPa 的水泥土复合层。例如，在某高速公路砂层桩基工程中，渗透注浆后桩周砂层密实度由 35% 提升至 60%，侧摩阻力从 25kPa 增至 45kPa。

#### （二）挤密注浆

针对渗透系数  $10^{-6}$ - $10^{-4}$ cm/s 的粉土、粉质黏土。由于土层孔隙细小，浆液难以直接渗透，需通过较高压力（2-3MPa）挤压土体。土体在压力作用下发生体积压缩，颗粒重新排列，孔隙率降低 15%-25%；同时浆液在土体挤压作用下形成“局部高压区”，向薄弱部位扩散，最终与挤密后的土体形成“致密复合体”。该机理在软土地区应用时，可有效解决土体“流变性”导致的长期沉降问题。

#### （三）劈裂注浆

适用于渗透系数  $< 10^{-6}$ cm/s 的黏性土、残积土。当注浆压力超过土体抗剪强度（通常 3-4MPa）时，浆液会劈裂土体形成不规则浆脉（宽度 5-20mm），浆脉在压力作用下不断延伸，如同“骨架”支撑周边土体。待浆液凝固后，浆脉与土体形成“刚性骨架-柔性土体”协同受力结构，土体整体抗剪强度可提升 40%-60%。该机理在桩侧深层软弱土层加固中效果显著，能有效突破传统注浆的“加固深度瓶颈”。

## 二、路桥工程桩基后注浆施工关键技术

### （一）施工前准备工作

施工前准备需围绕“地质适配、方案精准、设备可靠”三大核心，为后续施工奠定基础。桩基后注浆施工整体示意图见图 1。

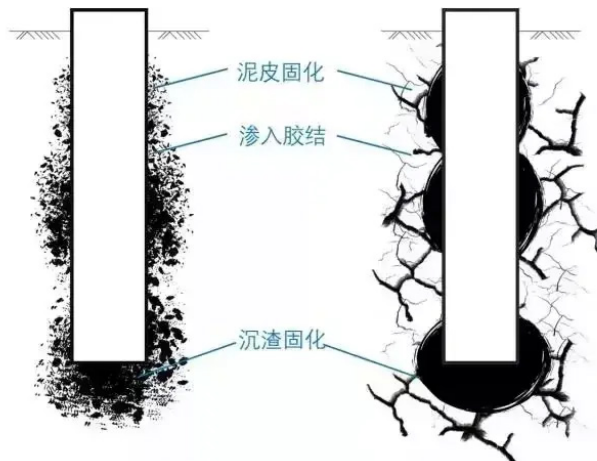


图 1：桩基后注浆施工整体示意图

（含桩底 / 桩侧注浆管布置、浆液扩散范围）

1. 精细化地质勘察需结合钻探、原位测试与室内试验获取全面地质参数，要求如下

勘察方法：采用“钻孔取样 + 标准贯入试验（SPT） + 静力触探试验（CPT）”组合，钻孔间距  $\leq 20$ m，每 3-5m 取 1 组土样做室内试验。

核心勘察内容：

土层分布：明确桩身及桩底以下 3-5m 土层类型、厚度，标注软弱土层顶底标高。

物理力学参数：测定各土层孔隙率（砂层  $\leq 40\%$ 、黏性土  $\leq 50\%$ ）、渗透系数、压缩模量、抗剪强度，关注桩端土层承载力特征值。

沉渣与泥皮：用钻孔成像仪观测桩底沉渣厚度（设计要求  $\leq 50$ mm）、成分（砂质 / 泥质）及桩侧泥皮厚度（ $\leq 3$ mm）。

地下水位：监测埋深、变化趋势，判断有无承压水（有则制定抗浮措施）。

勘察报告要求：专项绘制“桩基加固影响范围地质

剖面图”，标注注浆重点区域，提出注浆参数建议值。

## 2. 专项施工方案设计

方案需结合地质条件与工程要求，实现“一孔一策”，核心内容如下：

### (1) 注浆方式选择

**桩底注浆：**适用于桩底沉渣厚（ $> 50\text{mm}$ ）、桩端土层承载力低（ $< 150\text{kPa}$ ），注浆管深入沉渣层中心；

**桩侧注浆：**适用于桩侧有连续软弱土层（厚度 $> 3\text{m}$ ）、侧摩阻力不足（ $< 20\text{kPa}$ ），注浆孔对应软弱土层高程，上下覆盖 $\geq 1\text{m}$ ；

**联合注浆：**适用于高承载需求（单桩承载力 $> 5000\text{kN}$ ）或复杂地层（如“砂层+黏性土”交互层），先桩底注浆固化沉渣，间隔24h后桩侧注浆加固土层。

### (2) 注浆管布置设计

**材质与规格：**用 $\Phi 25\text{-}50\text{mm}$ 无缝钢管（Q235钢），壁厚 $\geq 3\text{mm}$ ，管体抗压强度 $\geq 200\text{MPa}$ ，确保高压注浆不变形；

**桩底注浆管：**

桩径 $< 1.2\text{m}$ ：沿钢筋笼圆周 $180^\circ$ 对称布2根，管底伸出50-100mm；

桩径 $1.2\text{-}2.0\text{m}$ ： $120^\circ$ 均匀布3根，管底设 $45^\circ$ 斜切口；

桩径 $> 2.0\text{m}$ ： $90^\circ$ 均匀布4根，管底包500mm长过滤层（双层钢丝网+土工布）；

**桩侧注浆管：**

按软弱土层分布设1-3层注浆孔，每层梅花形布置（孔径8-12mm，孔间距100-200mm），覆盖土层厚度 $\geq 1.5\text{m}$ ；

注浆管与钢筋笼主筋用“绑扎+点焊”固定，绑扎间距1.5m（16号铁丝），点焊间距3m（焊点长 $\leq 20\text{mm}$ ）；

**保护措施：**注浆管顶端高出桩顶30-50cm，丝堵密封（缠生料带），管身贴反光标识防吊装碰撞。

## (二) 注浆管安装关键技术

注浆管安装质量直接决定注浆效果，需与钢筋笼制作、吊装同步控制：

### 1. 注浆管加工

**管体处理：**按设计长度切割（砂轮切割机），切割面平整（垂直度偏差 $\leq 1^\circ$ ）；采用调直机调直，直线度偏差 $\leq 1\%$ （每米 $\leq 1\text{mm}$ ）；

**注浆孔钻设：**使用台钻钻设注浆孔（避免手工钻孔孔径不均），孔口用砂纸打磨毛刺（防止划破过滤层）；

**过滤层包裹：**在注浆孔区域包裹“双层钢丝网（孔径0.5mm）+单层土工布（渗透系数 $\leq 10^{-7}\text{cm/s}$ ）”，包裹长度超出注浆孔区域200mm，两端用16号铁丝绑扎（间距50mm，松紧适度）；

**密封性测试：**加工完成后进行水压试验（0.5MPa保压10min），无渗漏方可使用。

### 2. 安装与垂直度控制

**钢筋笼制作：**钢筋笼主筋间距偏差 $\leq \pm 10\text{mm}$ ，箍筋

间距偏差 $\leq \pm 20\text{mm}$ ；注浆管紧贴主筋外侧布置，用靠尺检查垂直度（偏差 $\leq 1^\circ$ ）；

**吊装保护：**钢筋笼吊装采用双点起吊（吊点位于钢筋笼1/3和2/3长度处），注浆管顶端套橡胶保护套（避免碰撞变形）；

**垂直度监测：**吊装过程中用全站仪实时监测钢筋笼垂直度（每提升5m测1次），偏差超 $1^\circ$ 时调整吊点位置；

**位置复核：**钢筋笼安装到位后，测量注浆管平面位置（偏差 $\leq 100\text{mm}$ ）、管底高程（偏差 $\leq 50\text{mm}$ ），确保注浆孔对准加固土层。

## 3. 密封性检查

**试验流程：**封闭注浆管底端（焊接堵头）→顶端连接压力表与注浆泵→注入清水排气→加压至0.5-1.0MPa→保压30min；

**合格标准：**保压期间压力下降 $\leq 0.05\text{MPa}$ ，管体无渗漏、无变形；

**不合格处理：**若压力下降过快，采用肥皂水涂抹管身（尤其是焊点、注浆孔处），查找漏点；焊缝漏点需补焊（采用氩弧焊，避免烧穿管体），过滤层破损需重新包裹。

## (三) 浆液制备与输送技术

### 1. 浆液制备

**计量控制：**用自动计量系统，按设计配比精准计量水泥、外加剂（误差 $\leq \pm 2\%$ ），用水量由流量计控制。

**搅拌流程：**先向搅拌机加80%设计水量，再加入水泥与外加剂，搅拌2min，接着加入剩余20%水量，继续搅拌1-2min（总搅拌时间 $\geq 3\text{min}$ ）。

**性能检测：**每批次浆液检测2项关键指标，稠度用漏斗法测定（浆液从 $\Phi 100\text{mm}$ 漏斗流出时间），控制在18-22s（超范围调水灰比）；初凝时间用凝结时间测定仪，需 $\geq 3\text{h}$ （防注浆时凝固堵管）。

**储存要求：**浆液存入带搅拌功能储浆罐（转速 $\leq 30\text{r/min}$ ，防离析），储存时间 $\leq 2\text{h}$ ，超时废弃（不得重新加水搅拌）。

### 2. 浆液输送

**管路连接：**注浆泵出口经高压橡胶管到注浆管，连接处加丁腈橡胶密封圈，用喉箍紧固（防压力高脱落）。

**管路清洗：**注浆前用清水冲洗管路（时间 $\geq 5\text{min}$ ），中途停注超30min（如设备故障），立即用清水冲洗（至流出清水）。

**压力补偿：**考虑管路压力损失（每100m约0.2MPa），实际注浆压力在设计值基础上补偿（如设计3MPa，实际设3.2MPa）。

**异常处理：**输送压力突然升高（ $>$ 设计值1.2倍），停止注浆，检查管路堵塞情况：①管路堵塞，拆解接头清理；②注浆孔堵塞，用0.5-1MPa低压清水反向冲洗。

## (四) 施工后养护技术

**养护时间：**养护期 $\geq 7\text{d}$ ，夏季5-7d，冬季7-10d。

**养护措施：**禁止扰动，养护期间禁止在桩基周边5m

范围内进行土方开挖等作业；排水防护，在桩基周边设坡度 $\geq 3\%$ 的排水沟，避免雨水浸泡桩底；温度控制，冬季覆盖保温棉被确保桩周土温度 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ ，夏季洒水保湿；沉降监测，养护前3天每天监测1次，之后每2天监测1次，沉降速率 $> 0.1\text{mm/d}$ 时排查原因。

### 三、桩基后注浆质量检测方法

质量检测需形成“完整性-承载力-注浆效果”三维管控体系，确保检测结果全面可靠。

#### (一) 桩身完整性检测

##### 1. 低应变法

适用范围：桩长 $\leq 40\text{m}$ 、桩径 $\leq 1.5\text{m}$ 的桩基，检测数量 $\geq$ 总桩数20%（且不少于3根）。

检测前准备：桩顶处理，清除浮浆露出新鲜混凝土，打磨平整，平整度偏差 $\leq 2\text{mm/m}$ ；传感器安装，在桩顶对称布置2个传感器，距桩边 $\geq 0.2$ 倍桩径，涂抹耦合剂，厚度 $\leq 1\text{mm}$ 。

检测过程：激振，用10-20kg力锤敲击桩顶中心，能量适中；信号采集，采集反射波信号，幅值稳定，信噪比 $\geq 10\text{dB}$ ，每桩采集3-5组有效信号。

##### 2. 超声波透射法

适用范围：桩长 $> 40\text{m}$ 、桩径 $> 1.5\text{m}$ 或完整性要求高的桩基，检测数量 $\geq$ 总桩数10%。

检测前准备：声测管清理，用高压水枪冲洗去除泥沙，确保畅通，注入清水，水位高于检测高程；设备校准，调试检测仪，用标准试块校准声时、波速，误差 $\leq \pm 1\%$ 。

检测过程：探头布置，发射与接收探头分别放入相邻声测管，同步沿桩长以20-50mm/s速度移动；数据采集，每200mm采集1组数据，发现异常区域加密至50mm采集。

#### (二) 承载力检测

##### 1. 静载试验（金标准）

适用范围：作为承载力最终判定依据，检测数量 $\geq$ 总桩数的1%（且不少于3根），总桩数 $\leq 50$ 根时检测2根。

试验装置：加载系统用千斤顶加载（额定荷载 $\geq 1.2$ 倍设计荷载），千斤顶与桩顶间垫钢板；反力系统采用锚桩反力梁系统（锚桩数量 $\geq 4$ 根，锚桩抗拔力 $\geq 1.5$ 倍最大试验荷载）；测量系统在桩顶对称布置4个位移计（精度0.01mm）测桩顶沉降。

试验过程：分级加载，按设计荷载的1/10分级，每级加载后保持荷载稳定，每15min读数1次观测沉降；沉降稳定标准为连续2次读数沉降量 $\leq 0.1\text{mm/h}$ 可进行下一级加载；终止加载条件为桩顶沉降量达桩径的0.05倍、加载至1.5倍设计荷载且沉降稳定、桩身出现明显裂缝或破坏迹象。

##### 2. 高应变法

适用范围：作为承载力初步评估手段，用于快速筛查桩基承载力，检测数量 $\geq$ 总桩数的5%。

试验装置：激振系统采用重锤激振（锤重 $\geq$ 桩身重

量的10%），锤底垫橡胶垫；测量系统在桩顶以下2-3倍桩径处粘贴应变片和加速度传感器。

试验过程：激振时提升重锤至1.5-2.0m高度自由下落敲击桩顶；数据采集时采集桩顶速度信号与桩身应变信号，确保信号完整。

#### (三) 注浆效果检测

##### 1. 钻芯法

适用范围：直接验证注浆效果，检测数量 $\geq$ 总桩数的0.5%（且不少于2根）。

钻孔布置：在桩侧1-2倍桩径范围内（避开注浆管）布置2-3个钻孔，深度至桩底以下1-2m；采用金刚石钻头钻孔，芯样直径 $\geq 100\text{mm}$ ，连续取芯（采取率 $\geq 90\%$ ）。

芯样分析：外观检查，观察水泥浆与土体胶结情况（正常芯样水泥浆均匀、无孔隙，不良芯样有未胶结区域或空洞）；力学试验，从芯样截取3组边长100mm立方体试块，养护28d后进行抗压强度试验，砂层芯样抗压强度 $\geq 3\text{MPa}$ 、黏性土芯样 $\geq 2\text{MPa}$ 为合格。

##### 2. 标准贯入试验（SPT）

适用范围：评估桩周土层加固效果，与注浆前数据对比，检测数量与钻芯法配套。

试验布置：沿桩周2倍桩径范围内均匀设3个试验点，各点按土层分层试验。

试验过程：用63.5kg重锤，按76cm落距自由下落，将贯入器打入土层30cm，记录击数（N值）。

效果评估：注浆后同一土层N值较注浆前提升 $\geq 30\%$ ，表明土层密实度改善、注浆效果好；若提升 $< 20\%$ ，需分析原因（如注浆量不足、压力不够），必要时补注浆。

#### 结语

综上所述，桩基后注浆技术在路桥工程中的应用，需以“地质适配为前提、精准施工为核心、多维检测为保障”。随着智能化技术发展，未来可通过研发“注浆参数自动调控系统”（实时监测并调整压力、流量）、“环保型复合浆液”（利用工业废渣降低成本），进一步提升技术经济性与环境友好性。该技术在复杂地质路桥工程中的推广应用，将为我国交通基础设施高质量建设提供有力支撑。

#### 参考文献

- [1] 李守国. 路桥工程桩基后注浆施工关键技术及质量检测[J]. 四川水泥, 2025, (08): 172-174.
- [2] 李创明. 灌注桩后注浆补强对抗压承载力的影响[J]. 广东建材, 2025, (07): 84-87.
- [3] 陈雄雄. 灌注桩后注浆施工技术在工程中的应用[J]. 科学技术创新, 2025, (14): 170-173.
- [4] 冯十英. 桩底复合式后注浆技术设计方法与承载特性研究[J]. 建筑与预算, 2025, (05): 58-60.
- [5] 史英超. 不同地层的桩基后注浆压力选取策略[J]. 建筑机械化, 2025, (04): 98-101.