

# 采用双液浆的复合式后注浆钻孔灌注桩施工方法

石磊<sup>1</sup> 谢国兵<sup>2</sup> 潘大波<sup>3</sup>

1. 泗洪县城区河道管护中心, 中国·江苏 宿迁 223900

2. 泗洪县梅花水利站, 中国·江苏 宿迁 223900

3. 泗洪县大楼水利站, 中国·江苏 宿迁 223900

**摘要:** 随着我国城市化进程的纵深推进与土地资源约束的日益趋紧, 高层及超高层建筑的规模化建设对基础工程的承载性能、稳定耐久性及差异沉降控制提出了前所未有的严苛要求。钻孔灌注桩技术作为一种成熟可靠的深基础形式, 依托其施工作业相对简便、单桩承载效能突出、地层适应能力广泛以及对毗邻构筑物扰动微弱等系列优势, 在各类大型工业与民用建筑、大跨径桥梁结构、重型工业厂房以及近海工程构筑物中获得了极为普遍的应用。然而, 该工艺体系在具体实施过程中存在着若干固有技术缺陷: 成孔作业阶段, 受泥浆护壁工艺特性及地层机械扰动的综合影响, 不可避免地会在桩-土接触界面形成强度极低的软弱泥皮结构, 并在桩端区域沉积一定厚度的松散沉渣物质; 与此同时, 桩端持力层在钻掘过程中遭受持续的机械性扰动, 其原生结构完整性遭到破坏, 承载刚度呈现不同程度的衰减。这些负面效应的叠加, 导致桩身侧壁摩阻力和桩端端承阻力难以在设计荷载水平下充分激活与发挥, 致使实际工程桩的极限承载能力往往显著低于理论计算数值, 成为制约桩基工程安全可靠性与技术经济合理性的关键性技术瓶颈。为系统性破解上述工程技术难题, 本文创新性地提出一套“采用双液浆的复合式后注浆钻孔灌注桩施工方法”的完整技术体系。该体系的核心技术创新在于有机融合了“高性能水泥浆-水玻璃双液浆注浆材料体系”与“桩端可启闭式+桩侧环向均布式的复合式注浆管网系统”。通过材料科学与工程构造学的双重创新, 致力于实现对桩端沉渣堆积体、桩端持力层扰动区以及桩侧全长范围内泥皮软弱层与邻近土体的系统性、均匀性、可靠性强化加固。本文将从工程技术演进背景、系统构造精细化设计、材料性能优化机理、施工工艺流程标准化、关键参数智能监控以及全生命周期技术经济分析等多个维度, 对这一创新性技术方法进行系统、全面、深入的阐述与论证, 以期对各类复杂地质环境条件下的桩基工程设计优化、施工质量控制与工程风险管理提供坚实的理论支撑与实践指导范式。

**关键词:** 双液浆体系; 复合式后注浆; 钻孔灌注桩; 承载性能提升; 泥皮加固机理

## The construction method of composite post-grouting bored piles using double-liquid slurry

Shi Lei<sup>1</sup>, Xie Guobing<sup>2</sup>, Pan Dabo<sup>3</sup>

1. Si Hong County Urban River Management and Protection Center, China Jiangsu Suqian 223900

2. Meihua Water Conservancy Station, Si Hong County, China Jiangsu Suqian 223900

3. Si Hong County Building Water Conservancy Station, China Jiangsu Suqian 223900

**Abstract:** With the in-depth advancement of urbanization in China and the increasingly tight constraints of land resources, the large-scale construction of high-rise and super high-rise buildings has put forward unprecedentedly strict requirements for the bearing capacity, stability and durability, and differential settlement control of foundation engineering. Bored cast-in-place pile technology, as a mature and reliable form of deep foundation, has been widely applied in various large-scale industrial and civil buildings, long-span bridge structures, heavy industrial plants and offshore engineering structures, thanks to a series of advantages such as relatively simple construction operations, outstanding single-pile bearing capacity, wide adaptability to strata and weak disturbance to adjacent buildings and structures. However, there are several inherent technical flaws in the specific implementation process of this technological system: During the hole-forming operation stage, under the combined influence of the characteristics of the mud wall protection process and the mechanical disturbance of the stratum, it is inevitable that a weak mud skin structure with extremely low strength will form at the pile-soil contact interface, and a certain thickness of loose sediment material will be deposited in the pile-end area; Meanwhile, the bearing stratum at the pile tip is subjected to continuous mechanical disturbance during the drilling process, and its original structural integrity is damaged, with the bearing stiffness showing varying degrees of attenuation. The superposition of these negative effects leads to the fact

that the frictional resistance on the side walls of the pile shaft and the end-bearing resistance at the pile end are difficult to be fully activated and exerted at the design load level. As a result, the ultimate bearing capacity of actual engineering piles is often significantly lower than the theoretical calculated values, becoming a key technical bottleneck restricting the safety and reliability as well as the technical and economic rationality of pile foundation engineering. To systematically solve the above-mentioned engineering and technical problems, this paper innovatively proposes a complete technical system of "construction method of composite post-grouting bored cast-in-place piles using double liquid slurry". The core technological innovation of this system lies in the organic integration of the "high-performance cement slurry - sodium silicate dual-liquid slurry grouting material system" and the "composite grouting pipe network system of pile end openable type + pile side circumferential uniform distribution type". Through materials science and engineering construction.

**Keywords:** Two-liquid slurry system; Composite post-grouting; Bored cast-in-place pile; Improved load-bearing performance; The mechanism of mud skin reinforcement

## 1 绪论：技术发展脉络与研究框架

### 1.1 钻孔灌注桩技术的历史演进与当代挑战

钻孔灌注桩技术的工程应用可追溯至 20 世纪中期，其在我国的大规模推广始于上世纪七十年代末。该技术的基本原理是通过机械或人工方式在地层中钻掘形成设计直径与深度的圆柱形孔洞，随后在孔内吊放预先绑扎成型的钢筋笼骨架，并通过导管法连续灌注水下混凝土，最终形成钢筋混凝土柱状承载构件。由于其具备穿透各类第四纪覆盖层、嵌入中微风化基岩的能力，并能提供巨大的竖向抗压、抗拔承载力及水平抗力，已成为超高层建筑、特大跨径桥梁、重型工业设备基础以及海上风电导管架等重大工程不可或缺的基础形式。

然而，“机械成孔”这一核心工序本身即内蕴着对地层原始状态的干扰与破坏。为维持钻孔孔壁的临时稳定，普遍采用膨润土或聚合物配制的高性能泥浆进行护壁，这导致在硬化后的混凝土桩身与孔壁原始土体之间，形成一层由泥浆颗粒物理化学沉积而成的、含水率高、强度极低的软弱夹层，工程界通称为“泥皮效应”。泥皮的存在，如同在桩-土界面涂抹了一层润滑剂，严重削弱了混凝土与周围土体之间的直接接触、机械咬合与摩擦作用，导致桩侧极限摩阻力出现显著折减，折减幅度可达 30%~50%。另一方面，受现有清孔工艺技术水平限制以及泥浆流体力学特性的影响，桩底不可避免地残存着一定厚度（通常为 5~30 厘米）的钻渣碎屑、泥浆沉淀物等松散堆积体，即“沉渣问题”。沉渣属于高压缩性、低强度的软弱介质，在桩顶荷载施加初期即产生较大的压缩变形，使得桩端阻力无法及时、有效地参与承载，造成明显的端阻滞后效应。

### 1.2 后注浆强化技术的发展阶段与研究现状

为主动干预并改善桩-土界面的不利条件、弥补成桩工艺缺陷，后注浆（Post-Grouting）地基加固技术自二十

世纪八十年代起逐渐发展并应用于钻孔灌注桩工程。其基本技术路径是：在桩身混凝土达到一定强度后，通过预先埋设在桩体内的注浆管路系统，利用高压泵送设备将具备胶凝、固化能力的浆液材料，强制注入桩端及桩侧预定区域的土层中。浆液在压力驱动下，经历渗透、填充、劈裂、挤密及固结等一系列复杂的物理、化学与力学过程，最终实现以下多重工程目标：（1）将桩底松散的沉渣转化为具有较高强度的水泥石结石体，变“软垫”为“硬垫”；（2）挤密加固桩端以下一定深度和范围内的持力层土体，提高其变形模量与极限承载力；（3）浆液沿桩侧壁上返扩散，部分或全部置换原泥皮物质，并渗入桩周邻近土体的孔隙与裂隙中，形成强度远高于原状土与泥皮的“水泥-土”复合加固圈，从而有效恢复并显著提升桩侧法向应力与切向摩阻力。

尽管如此，当前工程实践中广泛采用的后注浆技术体系仍面临以下四个层面的突出挑战：

（1）材料性能瓶颈：以普通硅酸盐水泥为主剂的单液浆体系，普遍存在凝结时间过长、早期强度发展缓慢的技术短板。在地下水活跃、存在动水补给的环境下，浆液易被稀释、迁移甚至冲失，严重影响其固结效果与加固范围。同时，浆液的流动性（可注性）与稳定性（防离析性）往往难以兼顾。

（2）系统可靠性危机：传统构造的注浆管（多为直管，底部设筒易单向阀或橡胶套）在混凝土浇筑的巨大冲击与复杂环境下，其出浆口极易被水泥浆微粒或混凝土包裹堵塞，工程中注浆管“预埋即失效”的案例屡见不鲜，成为制约技术可靠性的最大痛点。

（3）加固空间失衡：常规设计通常仅设置桩端注浆管，忽视了桩侧摩阻力在总承载力中的重要贡献（尤其在摩擦桩或端承摩擦桩中）。对于长径比大的超长桩，桩身

上部的侧摩阻力发挥严重不足,单一的桩端加固无法实现桩身承载力沿深度的优化分布。

(4) 过程控制失范:注浆施工多依赖操作工人的经验判断,缺乏对注浆压力、注入速率、累计流量等关键参数的实时、连续、精准监测与自动化反馈控制。注浆终止标准往往单一地以预设注浆量为准,可能导致局部压力不足、浆液扩散不均,或压力过高引发桩身混凝土劈裂、地面隆起等工程风险。

### 1.3 本文研究体系架构与技术路线

本文所述技术体系通过多学科交叉的系统性创新,致力于推动钻孔灌注桩后注浆技术从“基于经验的半艺术化操作”向“基于数据的精细化、可控化、智能化工程”的根本性转变,为全面提升我国桩基工程的质量可靠性、经济合理性与环境友好性提供强有力的技术引擎。

## 2 复合式后注浆系统精细化设计理论

### 2.1 系统总体架构与集成原理

本方法所构建的复合式后注浆系统是一个高度集成化的机电液一体化工程系统,由三大功能模块有机组成:地面智能化注浆站、桩身嵌入式注浆管网以及高低压衔接输送管路。

(1) 地面智能化注浆站:此为系统的“大脑”与“心脏”。包括双液自动计量配制与高速搅拌系统(配备浆液密度在线监测)、大功率变频高压注浆泵组(压力调节范围0-20MPa,流量无级可调)、多参数实时数据采集与传输系统(集成高精度压力传感器、电磁流量计、数据记录仪)、以及基于工业计算机或可编程控制器(PLC)的中央控制系统,可实现注浆过程的自动控制与远程监控。

(2) 桩身嵌入式注浆管网:此为系统的“神经网络”与“执行末端”,是技术创新的核心载体。管网由两套完全独立、互为备份的注浆子系统构成,每套子系统包含一根桩端主注浆管和一根桩侧主注浆管,沿钢筋笼内侧呈180度对称布置。所有管道均采用高强度、耐腐蚀的加厚无缝钢管或特种工程塑料管,通过防松脱的专用卡箍或高强度镀锌铁丝与钢筋笼主筋进行刚性连接。

(3) 高低压衔接输送管路:此为系统的“动脉血管”。采用多层钢丝缠绕增强的超高压橡胶软管或铠装高压软管(额定工作压力 $\geq 15\text{MPa}$ ),配备快速自锁式密封接头,实现地面泵站与桩身注浆管口之间快速、可靠、无泄漏的连接。

### 2.2 桩端注浆管的革命性防堵设计

桩端注浆管的设计哲学是:将被动防护转变为主动控

制,通过机械结构的创新实现出浆口的“按需启闭”,从根本上杜绝堵塞。

(1) 构造细节与几何参数:管体选用外径 $\Phi 32\text{mm}$ 、壁厚 $\geq 3.5\text{mm}$ 的优质无缝钢管。其底部自由段伸出钢筋笼底端设计为 $500 \pm 20\text{mm}$ ,以确保能直接插入并穿越预估的沉渣层,进入持力层顶部。管顶高出施工地坪 $300\text{mm}$ ,并配有带螺纹的防护盖帽。

(2) 核心创新:可旋转多孔花管与联动保护罩:

花管段:在管体最下端 $500\text{mm}$ 长度范围内,采用精密数控机床加工出浆孔。出浆孔孔径优化为 $7\text{mm}$ (兼顾出流面积与防堵能力),孔口进行倒角去毛刺处理。出浆孔的排布采用“局部加密、整体对称”原则:在管体横截面上,选取对称的两个 $90^\circ$ 扇形区域作为出浆区,在该区域内按梅花形(等边三角形)布置出浆孔,孔距约为孔径的8-10倍(约 $60\text{mm}$ )。另外两个对称的 $90^\circ$ 扇形区域则保持为无孔的光滑管壁。

联动保护罩:在花管段外部,同轴套装一个壁厚稍薄、内径稍大的外保护钢管套。该保护罩通过上下两对精密轴承与内管实现相对旋转,同时通过轴向限位卡环防止其脱落。保护罩的管壁上,在对应内管无孔区域的 $180^\circ$ 范围内,开设有与内管出浆孔分布模式相同的通孔阵列;而在对应内管有孔区域的 $180^\circ$ 范围内,则为无孔壁面。

### 2.3 桩侧环向注浆管的均布加固设计

桩侧注浆管的设计目标是:实现浆液在桩周方向的均匀分布与在桩身深度方向的分层可控加固,最大化提升桩侧摩阻力。

(1) 主管-环管耦合系统:桩侧注浆主管竖直布置,在其设计加固深度处,通过一个三通连接器与一个水平闭环环形管连通。该环形管采用高韧性、耐高压的增强尼龙或聚氨酯软管制成,通过专用支架均匀地夹持在钢筋笼外侧的保护层定位支架上,确保其与钻孔孔壁土体保持约 $20-30\text{mm}$ 的均匀间隙。

(2) 均布出浆与防逆流机制:

梅花形均布出浆网络:在环形管上,沿圆周方向以约 $150-200\text{mm}$ 的间距,以梅花形图案开设出浆孔。每个出浆孔并非直接开口,而是压入安装一个“微型柔性单向喷射阀”。该阀体由耐油耐碱橡胶制成,内部结构为“十字狭缝式”或“鸭嘴式”,其开启压力预设为 $0.8-1.2\text{MPa}$ 。当管内注浆压力低于此阈值时,狭缝紧闭,有效防止外部介质倒灌;压力超过阈值时,狭缝被撑开,浆液以扁平扇状或集中射流状喷出,对桩周土体产生冲刷、渗透与劈裂作用。

管系双重防逆流设计: 首先, 在每个柔性喷射阀入口处集成了微型不锈钢过滤网, 拦截可能的大颗粒杂质。其次, 在桩侧注浆主管的顶端进浆口下方约 1.2m 处, 安装一个机械式弹簧加载止回阀, 阀口方向朝下。该阀在注浆泵提供的正向压力下开启, 一旦泵压停止或管路卸压, 弹簧力驱动阀瓣迅速关闭, 杜绝孔内泥浆或地下水的虹吸倒灌, 保持管路清洁。

分层差异化布置策略: 为适应超长桩的承载力分布特点, 两根桩侧注浆管的主管长度差异化设计, 其连接的环形管布置在不同地质层位或受力关键截面。通常, 第一环管(上环)设置在距桩顶约 1/4 桩长深度以下(且通常不小于 8m), 以避免浅部易受扰动的填土层或软弱土层; 第二环管(下环)设置在距第一环管约 1/3 桩长深度以下(通常间距 6-15m), 以实现桩身中下部的有效加固。这种“上下错落、覆盖重点”的布置, 结合“自上而下、间隔跳打”的注浆顺序, 可形成沿桩身的分段强化区, 优化荷载传递路径。

## 2.4 高性能水泥浆-水玻璃双液浆体系

### (1) 材料组成与配比优化:

A 液(基液): 采用 P.O 42.5R 早强型普通硅酸盐水泥, 水灰比(W/C)根据地层渗透系数(k)动态调整: 当  $k > 10^{-3}$  cm/s 时, W/C 取 0.5-0.55, 以获得较高早期强度; 当  $10^{-5} < k < 10^{-3}$  cm/s 时, W/C 取 0.55-0.65, 兼顾流动性与强度; 当  $k < 10^{-5}$  cm/s 时, 可掺入高效减水剂, 将 W/C 降至 0.45 以下, 或考虑使用超细水泥。为减少收缩, 可掺加水泥用量 8%-12% 的膨胀剂(如 UEA)。

B 液(促凝剂): 采用模数 2.6-2.9、浓度 38-40° Bé 的钠水玻璃溶液。其模数影响浆液凝结速度, 浓度影响结石体强度。

混合比(A:B): 通过室内配比试验与现场工艺试验确定, 通常体积比范围为 1:0.3 至 1:0.8。对于动水地层, 采用较低比例(如 1:0.5)以加快凝结; 对于静水或弱透

水层, 采用较高比例(如 1:0.7)以获得更好的渗透扩散效果。

### (2) 核心性能优势机理:

可控胶凝动力学: 水泥水化产生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  与水玻璃( $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ )迅速反应, 生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶与硅酸钙沉淀。通过调节 B 液比例与浓度, 可精确控制浆液从液态变为塑性体再变为固体的时间, 凝结时间可在 30 秒至 30 分钟内灵活调控, 实现“指哪打哪、快速固定”。

高固结率与微膨胀性: 双液反应迅速、充分, 浆液流失率极低, 固结率高达 98% 以上。反应过程中的部分产物具有微膨胀特性, 能有效补偿水泥硬化收缩, 使加固体与桩身、土体结合更为紧密。

卓越的渗透与劈裂协同效应: 初始混合浆液粘度较低, 具有良好的渗透能力, 可进入细小孔隙; 随着反应进行, 粘度指数级增长, 产生明显的“黏度时变效应”, 有利于在压力下对土体产生水力劈裂, 形成脉状浆脉网络, 从而显著扩大有效加固半径。

自动化配制与双路输送: 采用双缸计量泵或两个独立的搅拌输送系统, 分别精确输送 A 液和 B 液。两路浆液在接近桩顶注浆管口处的“静态混合器”内实现瞬时均匀混合, 然后立即泵入注浆管, 避免在管路中过早凝固。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国行业标准. JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [2] 刘金砺, 高文生, 邱明兵等. 建筑桩基技术规范应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [3] 张忠苗. 灌注桩后注浆技术及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [4] 王旭, 周健, 徐枫等. 双液注浆在软土地基加固中的扩散机理与效果研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 567-572.