

# 桩基在水厂软弱地基处理中的应用与沉降控制

王 洋

北京市政建设集团有限责任公司 北京 100080

**摘要:** 桩基作为一种深基础形式,因其能有效穿越软弱土层、将荷载传递至深层稳定持力层,并显著控制沉降变形,在水厂软弱地基处理中得到广泛应用。本文系统阐述了水厂工程中软弱地基的主要工程特性与危害,分析了桩基选型的关键因素,重点探讨了预制桩、钻孔灌注桩及复合地基(如CFG桩)在水厂不同构筑物中的适用性;深入研究了桩基沉降机理,提出了基于弹性理论、荷载传递法及数值模拟的沉降预测方法;并总结了桩长、桩径、桩距、持力层选择、后注浆技术及施工质量控制等关键措施对沉降控制的有效性。研究表明,科学合理的桩基设计与精细化施工管理是实现水厂软弱地基高效处理与沉降精准控制的核心。

**关键词:** 水厂工程; 软弱地基; 桩基; 沉降控制; 地基处理; 后注浆

## 引言

现代水厂作为城市基础设施的重要组成部分,其构筑物(如沉淀池、滤池、清水池、加药间、泵房及综合楼等)具有占地面积大、荷载分布复杂(既有大面积均布荷载,也有局部集中荷载)、对不均匀沉降敏感等特点。尤其是一些大型矩形或圆形水池,其结构整体性要求高,过大的差异沉降易导致池体开裂、渗漏,不仅造成水资源浪费,更可能引发水质污染和结构安全隐患。桩基础通过将上部结构荷载传递至深层坚实土层或岩层,绕过软弱土层,从根本上改善了地基的承载性能和变形特性。近年来,随着桩基理论的发展、施工技术的进步以及监测手段的完善,桩基已成为处理水厂软弱地基的首选方案之一。然而,如何针对水厂不同构筑物的特点,科学选择桩型、优化桩基参数、精确预测并有效控制沉降,仍是工程实践中亟待解决的关键问题。

## 1 水厂软弱地基的工程特性与危害

### 1.1 软弱地基的定义与分类

根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007),软弱地基主要指主要由淤泥、淤泥质土、冲填土、杂填土或其他高压缩性土层构成的地基。在水厂工程中,最常见的软弱土包括:(1)淤泥与淤泥质黏土:天然含水量通常大于液限,孔隙比 $e > 1.0$ (淤泥)或 $0.8 < e \leq 1.0$ (淤泥质土),不排水抗剪强度 $c_u$ 一般小于15kPa,压缩模量 $E_s$ 常低于4MPa。(2)软塑至流塑状粉质黏土/黏土:标准贯入试验锤击数 $N < 4$ ,静力触探锥尖阻力 $q_c < 0.8\text{MPa}$ 。(3)新近沉积的饱和砂土:可能存在液化风险。

### 1.2 软弱地基对水厂工程的危害

一是承载力不足:天然地基承载力特征值 $f_{ak}$ 通常仅为40~80kPa,远低于水厂构筑物基底压力(尤其对于有

覆土或设备的区域)。二是沉降量大且历时长:软土的高压缩性导致总沉降量可达数十厘米甚至更大。主固结沉降完成需数年乃至数十年,次固结沉降亦不可忽视。三是不均匀沉降风险高:水厂场地内软土厚度、性质常存在横向变化;构筑物荷载分布不均(如泵房设备集中荷载与大面积水池均布荷载相邻),极易引发差异沉降。对于刚度较大的水池结构,差异沉降超过限值(如 $L/500 \sim L/1000$ ,L为相邻柱距或池壁间距)即可能导致结构开裂。四是稳定性问题:在边坡附近或填土地基上,软弱夹层可能成为潜在滑动面,威胁构筑物整体稳定。

## 2 桩基在水厂工程中的选型与应用

### 2.1 常用桩型及其适用性

#### 2.1.1 预制混凝土桩(PHC管桩、方桩)

预制混凝土桩(如PHC管桩、方桩)因其工厂化预制、质量稳定、施工速度快且无泥浆污染等优点,在部分场景下具有一定优势。其单桩承载力较高,穿透能力也较强,尤其适用于持力层埋深适中(一般不超过40米)且无坚硬夹层或孤石的软土地区。然而,其显著的挤土效应在饱和软土中是一把双刃剑,施工过程中极易产生超孔隙水压力,不仅可能导致邻近已施工桩体上浮,还可能引起地面隆起,对周边环境造成不利影响<sup>[1]</sup>。因此,预制桩更常用于水厂附属建筑如办公楼、加药间、中小型泵房等对沉降要求相对宽松的构筑物,在应用时必须谨慎评估挤土效应,必要时采取引孔或设置应力释放孔等措施进行缓解。

#### 2.1.2 钻孔灌注桩

其最大优势在于无挤土效应,对周边环境扰动极小,能够灵活调整桩长与桩径以适应复杂的地质变化,并可直接嵌入岩层以获得极高的端承力。此外,钻孔灌

注桩为实施后注浆技术提供了便利条件,可进一步提升其性能。尽管其施工工序较为繁琐,涉及泥浆制备与处理,且成孔质量(如孔壁稳定性、沉渣厚度)和混凝土浇筑质量对最终承载力影响极大,但其卓越的适应性和可控性使其特别适用于对沉降控制要求极为严苛的核心构筑物,如大型沉淀池、滤池、清水池等,也适用于存在坚硬夹层或需嵌岩的复杂地层,以及邻近既有设施、需严格控制施工扰动的敏感区域。

### 2.1.3 水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)复合地基

水泥粉煤灰碎石桩(CFG桩)复合地基则代表了另一种思路,它通过柔性桩体与桩间土共同承担荷载,形成复合地基来改善整体性能。该方法造价相对较低,施工速度较快,并能在一定程度上加速地基固结。然而,其沉降控制能力本质上无法与刚性桩基础相媲美,且对桩体自身强度和上部褥垫层的设计要求很高,在极软弱土层中效果有限。因此,CFG桩复合地基通常仅适用于荷载较轻、沉降允许值较大的水厂道路、堆场或小型辅助构筑物,对于大型水池等关键工艺构筑物,一般不作为首选方案。

## 2.2 桩基布置原则

桩基的平面布置需根据上部构筑物的结构形式和受力特点进行针对性设计。对于水池类构筑物,由于其荷载面积大且对整体变形协调性要求高,通常采用满堂布桩的方式,桩距的确定主要依据沉降计算结果,一般控制在桩径的4至6倍之间。同时,桩顶需设置刚度较大的筏板或承台梁,以有效协调各桩之间的变形,抑制差异沉降的产生<sup>[2]</sup>。对于泵房、综合楼等框架结构,则多采用柱下独立承台或联合承台布桩,设计时不仅要验算单个承台的承载力,更需进行整体沉降及柱间差异沉降的验算,确保结构安全。而对于大型水泵、电机等重型设备基础,则因其荷载集中且可能伴随动力作用,常采用专门设计的群桩基础,并在设计中充分考虑动力荷载对桩-土体系的影响,以保证设备的平稳运行。

## 3 桩基沉降机理与预测方法

桩基沉降 $S_{total}$ 由三部分组成:

$$S_{total} = S_s + S_p + S_{ps}$$

其中, $S_s$ 为桩端平面以上土层压缩引起的桩身压缩; $S_p$ 为桩端刺入持力层产生的沉降; $S_{ps}$ 为桩端平面以下土层压缩引起的整体沉降(群桩效应下尤为显著)。

### 3.1 理论计算方法

为了对上述沉降进行量化预测,工程界发展了多种理论计算方法。基于弹性理论的Mindlin解法,将桩视为作用于半无限弹性体内部的荷载,通过积分求解土体位

移场,适用于对单桩或疏桩基础进行初步的沉降估算。荷载传递法则是一种更为精细的方法,它将桩离散为若干单元,通过建立侧摩阻力与桩-土相对位移( $t-z$ 曲线)以及桩端阻力与桩端位移( $Q-w$ 曲线)之间的非线性关系,来模拟真实的桩-土相互作用过程,能够较好地反映土体的非线性特性,常被集成于各类数值分析程序中。对于桩距较小(通常小于6倍桩径)的密集群桩,工程上常采用实体深基础法(或称等代墩基法),即将整个群桩及其间的土体视为一个假想的实体深基础,然后运用分层总和法计算其下卧压缩层的沉降。这种方法概念清晰、计算简便,但往往因忽略了桩-土之间的相互作用而偏于保守。

### 3.2 数值模拟方法

随着计算技术的发展,以有限元法(FEM)为代表的数值模拟方法已成为复杂桩基工程沉降分析的有力工具。这类方法能够更真实地模拟桩-土-结构三者之间的共同作用、土体材料的非线性本构关系、实际的施工加载顺序以及饱和软土中的固结-应力耦合效应。在建模过程中,选用合适的土体本构模型(如Mohr-Coulomb模型或更先进的HardeningSoil模型)、准确模拟桩-土界面的接触行为(通常通过设置接触面单元实现)、并合理考虑从基坑开挖、桩基施工到上部结构逐步加载的全过程,是获得可靠分析结果的关键。虽然数值模拟的前处理和计算过程相对复杂,但它能提供传统解析方法无法企及的详细信息,如应力、应变及沉降在时空上的连续分布,为复杂水厂项目的沉降预测、方案比选与设计优化提供了强大的决策支持。

## 4 沉降控制关键技术措施

### 4.1 优化桩基设计参数

实现有效沉降控制的首要环节在于科学合理的桩基设计。其中,持力层的选择至关重要,应优先选取压缩模量高、厚度大且横向分布稳定的土层,如密实的砂层、硬塑状黏土层,甚至是中风化岩层,作为桩端的支撑点。必须避免将桩端置于薄而硬的“假壳层”之上,否则在长期荷载作用下,桩端可能刺穿该层,导致沉降突增。在此基础上,桩长与桩径的确定需进行综合权衡。桩长必须足以穿越全部软弱土层,并在持力层中有足够的嵌固深度,以提供充足的侧摩阻力和端阻力,但过长的桩不仅增加成本,也可能因进入更深的软弱层而得不偿失。适当增大桩径则是一种高效的策略,因为单桩承载力大致与桩径的平方成正比,增大桩径可以在减少桩数的同时显著提升承载效率,从而有效削弱群桩效应,降低整体沉降。此外,合理控制桩距也是关键,适

当增大桩距（例如大于6倍桩径）可以减弱桩与桩之间的应力叠加，有利于减小群桩的整体沉降，当然这需要与承台或筏板的尺寸和经济性进行综合考量。

#### 4.2 应用后注浆技术

对于钻孔灌注桩而言，后注浆技术是提升其性能、实现精细化沉降控制的一项革命性措施。该技术通过在成桩后，经由预埋的注浆管向桩端和/或桩侧特定土层注入高压水泥浆液。桩端注浆能够有效固化钻孔过程中难以彻底清除的沉渣和虚土，形成一个高强度的扩大头，极大地增强了桩端阻力<sup>[3]</sup>。而桩侧注浆，特别是在淤泥等软弱土层段进行，浆液会沿着桩-土界面渗透、劈裂并最终形成结石体，这不仅能显著提高该段桩周土的侧向约束，还能大幅增加桩侧摩阻力。

#### 4.3 施工过程控制

再完美的设计也依赖于精准的施工来实现。在桩基施工全过程中，必须实施严格的质量控制。对于钻孔灌注桩，首先要确保成孔质量，包括孔径、垂直度的偏差在允许范围内，并在浇筑混凝土前进行彻底清孔，将孔底沉渣厚度严格控制在规范限值之内（端承型桩  $\leq 50\text{mm}$ ，摩擦型桩  $\leq 100\text{mm}$ ）。其次，混凝土的浇筑是决定桩身完整性的关键步骤，必须保证浇筑的连续性，精确控制导管的埋入深度，严防断桩、缩颈、夹泥等质量缺陷的发生。此外，在饱和软土地区进行密集打桩时，应对邻近已施工的桩进行上浮监测，一旦发现异常，应立即调整施工顺序或采取其他补救措施<sup>[4]</sup>。对于水厂这类对沉降极其敏感的工程，从施工初期就应布设沉降观测点，实施全过程的沉降监测，利用监测数据反馈指导施工，真正实现信息化、动态化的施工管理。

#### 4.4 结构措施

除了地基与基础层面的措施外，上部结构的合理设计也能为沉降控制提供重要补充。对于长度或直径超大

的水池结构，可在适当位置设置后浇带，通过分阶段浇筑混凝土，有效释放结构早期因温度、收缩以及部分地基沉降差异所产生的内应力，从而减少裂缝的产生。同时，通过加强结构的整体刚度，例如采用整体式筏板基础代替独立承台，或在水池的池壁、底板中配置足够且合理的构造钢筋，可以显著提高结构自身抵抗和适应不均匀沉降的能力，即使地基因产生微小的差异变形，也能通过结构的内力重分布来维持其完整性与防水性能。

#### 结束语

水厂工程常遇深厚软弱地基，桩基技术因能提升承载力、控制沉降，成为保障构筑物安全的关键。桩型选择要因因地制宜：钻孔灌注桩无挤土、适应性强，适合对沉降敏感的核心构筑物；预制桩适用于附属建筑；CFG桩复合地基用于次要区域。沉降控制是系统工程，需全流程协同，优化桩基参数、应用后注浆技术、把控施工质量、采取合理结构措施，可精准控制沉降。先进数值模拟技术助力桩基沉降预测，结合现场监测反演分析，能实现信息化、精细化施工。未来，随着智能建造、绿色施工理念普及，桩基技术在水厂软弱地基处理中将更高效、性能更优、环境影响更低，为城市供水安全筑牢地基。

#### 参考文献

- [1]丁英品,常学宁,凌小军.软土地基上桩基轨道两侧沉降差控制研究[J].中国水运,2022,22(24):157-160.
- [2]潘海龙.基于差异沉降控制的桩基优化设计[J].石家庄铁路职业技术学院学报,2021,20(01):62-66+83.
- [3]杨远舟.深厚软土地基桥梁桩基稳定性控制方法与沉降监测分析[J].技术与市场,2025,32(11):117-121.
- [4]陈波,谢乔木,覃杰,等.基于沉降控制的深厚粘土层超长桩基的优化设计[J].港工技术,2023,60(01):53-56.