

# 不同地质条件下预应力管桩数值模拟分析

文 / 王军英 广州市南沙新区产业园区开发建设管理局

**摘要：**本文以某项目预应力管桩为研究对象，深入探讨不同地质条件下预应力管桩及土体的受力情况。通过对单桩竖向抗压静载试验建立数值模型，详细分析不同阶段下桩体的荷载-位移状态，对预应力管桩施工过程中土体的应力-应变状态进行分析。采用生死单元法对管桩孔位土体进行动态地“激活”和“死亡”，精确模拟预应力管桩与土体之间的复杂接触行为，为地下工程设计和施工提供了科学的参考依据。

**关键词：**预应力管桩；生死单元；地应力平衡；数值模拟

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.026

## 引言

预应力管桩是一种常用的地基处理技术，通过在桩体中引入高强度钢筋与混凝土形成预压状态，可显著提升其承载能力与变形性能，为地基稳定性提供可靠支撑<sup>[1]</sup>。然而，不同地质条件对预应力管桩的受力特性影响复杂，当前相关研究仍显不足。特别是在软土、高地应力等复杂地质环境中，预应力管桩的受力行为尚未被充分理解和解决<sup>[2, 3]</sup>。因此，深入研究其在复杂地质条件下的受力机制，对于提升工程适应性与设计合理性具有重要意义。通过实验与数值模拟相结合，研究地质条件变化对预应力管桩力学响应的影响，将为基础设施建设提供更加科学的设计依据与实践指导<sup>[4]</sup>。

本文以广州市南沙区某工程中的预应力管桩为研究对象，通过构建数值模型，模拟预应力管桩在不同地质条件下的单桩竖向抗压静载试验及施工过程，揭示桩体受力演化规律，为工程设计优化与施工质量提升提供理论支撑。

## 一、工程概况

该项目桩基础工程中预应力管桩为PHC-AB-500(125)型，桩基设计等级为乙级，有效桩长约20~30m，桩尖采用十字型桩尖，桩端间采用端板焊接法接桩，桩端持力层为粉质黏土层；桩顶采用C35微膨胀混凝土填芯，桩顶嵌入承台或筏板50mm，桩顶构造大样图如图1所示。

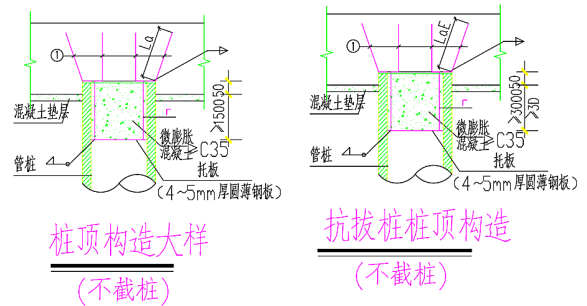


图1 桩顶构造大样示意图

根据工程区域及勘察资料，地基土层按成因年代可分为5个地质单元层及2个亚地质单元层，具体土层参数见表1。

表1 土层分层及参数

土层	天然重度	含水量	直剪快剪		固结快剪	
	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	W (%)	C (kPa)	$\Phi$ (°)	C (kPa)	$\Phi$ (°)
杂填土	19.00	/	/	/	/	/
素填土	18.00	/	/	/	/	/
中砂	19.00	/	5	28	/	/
砾砂	19.50	/	10	32	/	/
黏土	18.12	30.8	37.9	8.9	41.2	11.6
粉质黏土	17.80	31.97	38.1	12.9	/	/
粗砂	19.00	/	8	30	/	/
粉质黏土	17.87	31.42	39.0	13.6	/	/

## 二、单桩竖向抗压静载试验

采用堆载法构建试验平台，该平台由工字钢和跳板搭建，上方均匀放置混凝土预制块，以形成加载反力系统，如图2所示。加载装置为油压千斤顶，其输出通过试桩中心施加。压力值由经过标定的油压传感器实时监测，并根据千斤顶的标定曲线换算为实际荷载。

试验所用的千斤顶、油泵及高压油管的设计压力需大于最大加载压力的1.2倍，以确保安全。试桩的沉降变形通过在桩头对称布置的量程为50mm的百分表进行测量，分辨率要求不小于0.01mm。所有位移传感器通过磁性表座固定在基准梁上，该梁具备良好的刚度。基准桩与试桩的中心距离应大于2.0m，同时，基准桩

与压重平台支墩的边缘距离亦不小于 2.0m，以确保试验数据的准确性和可靠性。

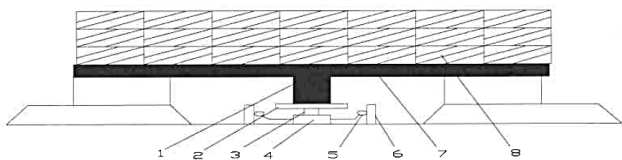


图 2 静载（堆载）试验示意图

1- 主梁 2- 承压板 3- 千斤顶 4- 试桩 5- 位移表 6- 基准梁

7- 次梁 8- 预制块 / 砂袋 / 钢筋

### 三、模型建立

首先明确定义管桩的几何参数，外径 500 mm，桩长 25 m。承台尺寸为 2.0 m×2.0 m×0.5 m。选择水平方向每边取桩径的 15~20 倍作为土体边界范围。在垂直方向上，考虑土体对管桩的影响深度，将土体深度设置为伸出桩端以下 2 倍桩长的距离。在数值模拟中，采用减缩积分的 8 节点 3D 实体单元 C3D8R 来模拟管桩基础和土体的行为。

在桩基础-土体的三维模型中，将土体划分为八个不同的层次，并采用摩尔-库仑塑性模型来描述土体的力学行为。在模型中，承台与管桩之间采用 tie 连接，以确保它们之间的协调运动。同时，将承台顶端面与 RP-1 点耦合，以模拟其受力情况。

在模型中，承台与土体之间以及管桩与土体之间都设置了硬接触，摩擦系数取值为 0.3。在管桩内部施加预应力场，模拟预应力管桩的真实受力场景。

在边界条件设定中，与 x 轴法向方向位移为 0，与 y 轴法向方向位移为 0，土体底部设置 x、y、z 三个正交方向完全固定，土体上部不设约束。把上部荷载简化为作用在 RP-1 点的位移，如图 3 所示。

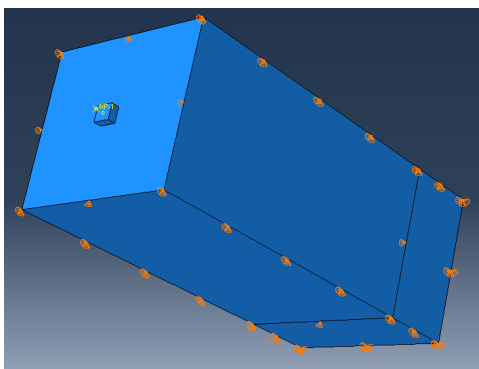


图 3 边界条件与荷载分布

在数值模拟中，生死单元法是一种用于处理接触面的高级技术。它允许在模拟过程中动态地激活或移除特定的单元，从而模拟物体之间的接触行为。单元的“生死”状态取决于物体之间的接触情况。

在预应力管桩施工开始时，可以将与管桩接触的土体单元设定为“死亡”状态，从而将其排除在模拟之外。这样可以模拟出土体在施工过程中被移除的效应，使得相应的接触力为零。通过生死单元法，能够更准确地模拟桩基础与土体之间的复杂接触行为，为工程设计提供可靠的数值分析结果。

### 四、数值模拟分析

#### (一) 地应力平衡

地下工程中，土体的地应力平衡至关重要，对确保工程结构的稳定性和安全性起着关键作用。如图 4 所示为不同地质条件下土体的应力平衡状态，地应力平衡状态是设定数值模拟分析的重要依据之一，准确设置土体的地应力状态有助于模拟出更真实的工程场景，提高模拟结果的可信度和准确性。

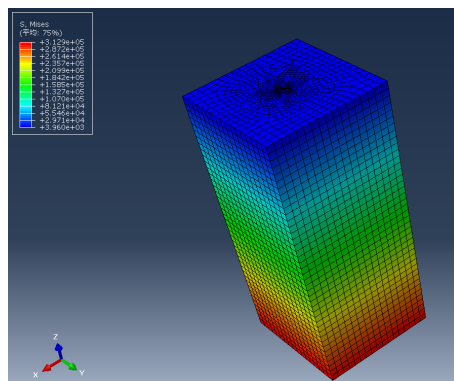


图 4 地应力平衡

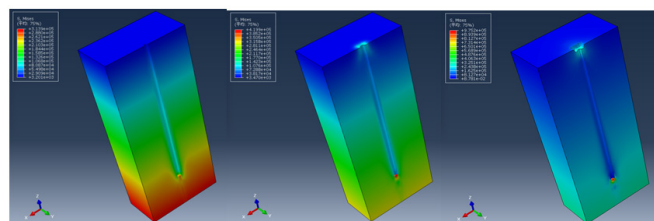
#### (二) 预应力管桩施工过程模拟

在预应力管桩施工过程中，土体的状态变化尤为关键，它直接反映了对周围结构的影响。

图 5 (a) 为前期阶段，此时土体受到的应力变化较为剧烈。主要表现为振动荷载引起的剪切和动压效应，土体周围的振动响应较为明显。

图 5 (b) 为中期阶段，土体逐渐趋于稳定的过程，土体的应力变化逐渐减弱。要表现为振动荷载逐渐减弱，土体内部的应力逐渐趋于平衡，土体的振动响应逐渐减弱。

图 5 (c) 为后期阶段，打桩过程接近尾声时的阶段，此时土体的应力变化相对较为稳定。主要表现为桩周土体产生较大位移，周围土体内部应力得到稳定和平衡，土体恢复到静态平衡状态，打桩过程结束。



(a) 前期阶段 (b) 中期阶段 (c) 后期阶段

图 5 土体应力全过程

(三) 单桩竖向抗压静载试验模拟

施工最大试验荷载为 4000kN，抗压试验荷载 - 位移数据如表 2 所示，试验与模拟的 Q-s 曲线和模拟桩 - 土 U3 位移云图如图 6、图 7 所示。可以看出，管桩最大沉降位移为 -8.12 mm，与试验数据仅相差 8% 左右，同时，各级加载下桩体的沉降趋势与实际试验基本一致，误差皆在在可接受范围内，说明数值模型较好的反应了桩 - 土间相互作用。然而，数值分析的结果整体偏大，主要原因包括本构模型未考虑土体固结、土壤的非线性特性以及环境因素等。

表 2 单桩抗压试验荷载 - 位移数据

荷载 (kN)	沉降 (mm)	
	本级	累计
800.0	0.59	0.59
1200.0	0.47	1.06
1600.0	0.86	1.92
2000.0	0.82	2.74
2400.0	1.15	3.89
2800.0	0.92	4.81
3200.0	0.47	5.28
3600.0	1.25	6.53
4000.0	0.96	7.50
3200.0	0.02	7.52
2400.0	-0.23	7.29
1600.0	-1.29	6.00
800.0	-0.90	5.10
0.0	-0.78	4.32

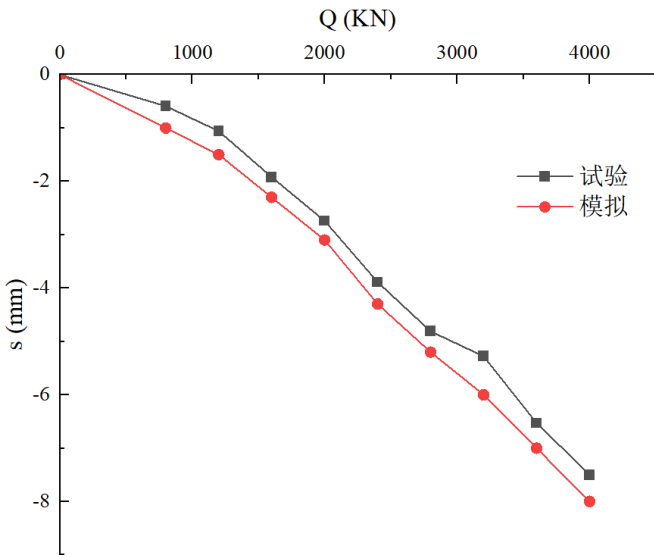


图 6 Q - s 曲线

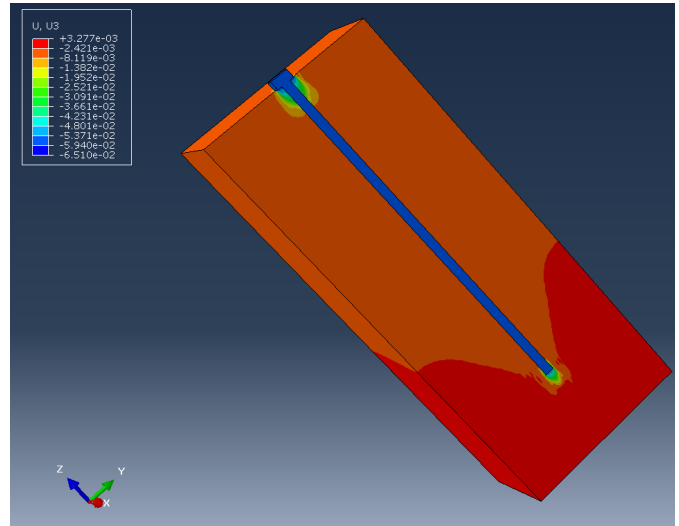


图 7 桩 - 土 U3 位移云图

结语

本文广州市南沙区某项目预应力管桩施工为例，采用大型有限元软件建立了桩基础 - 土体的三维计算模型，通过施工模拟分析，得出不同地质条件下预应力管桩的受力特点：

(1) 地质条件对预应力管桩的受力行为具有显著影响。模拟分析表明，复杂地质条件下的土层性质和地下水位变化会导致预应力管桩的应力分布产生差异。同时，土体应力分析揭示了预应力管桩施工过程中的关键特征。在不同施工阶段，土体的应力变化表现出不同的趋势，从振动响应到逐渐稳定。

(2) 通过模拟单桩竖向抗压静载试验，结果表明，最大沉降位移为 -8.12mm，模拟与试验数据之间的差异仅约 8%，表明模型的准确性较高。各加载阶段下，桩体沉降的变化趋势与实际试验基本吻合，进一步验证了模型在桩 - 土相互作用中的有效性。

参考文献

[1] 郭佳诚, 吴道祥. 预应力混凝土管桩竖向承载特性数值模拟研究 [J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2023, 23(04): 35-40.

[2] 刘永超, 刘岩, 李兵兵, 等. 基于基坑支护工程的区段复式配筋预应力管桩抗弯试验及数值模拟 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46(02): 406-414.

[3] 孙怀军, 杨笑男, 李连营. 基于不同土层及厚度的预应力管桩水平承载性能数值模拟 [J]. 勘察科学技术, 2022, (03): 6-10.

[4] 黄彬, 郭强, 殷晓龙, 等. 预应力混凝土管桩承载力计算和数值分析 [J]. 价值工程, 2017, 36(06): 159-161.