

上海地区单桩承载力确定方式的分析

孙露露

深圳地质建设工程公司

摘要: 本文以上海市松江区某工程项目为背景, 先通过静力触探估算法估算单桩极限承载力, 再通过现场静载试验进行验证, 然后对桩基在静载试验中的工况进行有限元分析, 将数值模拟结果与现场静载试验结果进行对比。本文可为上海地区桩基工程设计、施工提供一定的借鉴意义, 以期节约人力、试验成本。

关键词: 静力触探估算法; 数值模型; 静载试验; 有限元分析; 桩基工程

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.11.028

引言

在以中软土为特性的上海地区, 工程中应用桩型为端承摩擦桩。端承摩擦桩在达到承载能力极限值前, 竖向荷载主要由桩身侧摩阻力进行承载。关于摩擦桩承载作用机理如图1所示: 可将端承摩擦桩等距离散化, F 为桩体所受外荷载, d 为桩直径, τ 为桩体与桩周土体间侧摩阻力, f_d 为端阻力, L 为桩长, i 为第 i 层土体, 当 F 较小时, 桩身与桩周土体间产生相对滑动, 此时的桩周土体处于弹性状态, 桩身可依靠自身变形协调以及与桩周土体之间的侧摩阻力进行承载, 以维持桩体稳定性; 随着 F 不断增大, 上部桩周土体由弹性状态逐渐转为塑性状态, 桩土之间相对滑移不断增大, 直至该部位的侧摩阻力无法完全承载, 致使荷载逐渐向桩身下部不断传递, 致使桩身下部土体也逐渐被调动起来; 当 F 逐渐趋近于单桩极限承载力时, 桩端土体被调动起来, 此时的桩端端阻力发挥承载作用。由此可知, 端承摩擦桩主要依靠桩体与桩周土体之间的侧摩阻力进行承载, 非必要时, 桩端阻力仅仅作为安全承载储备^[1]。

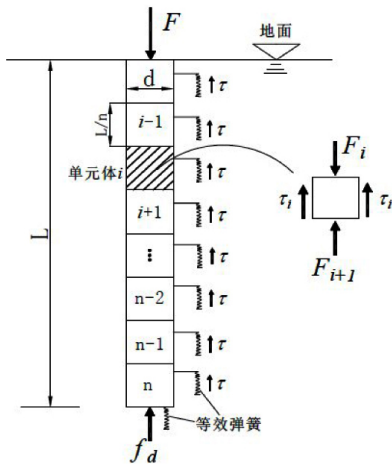


图1 摩擦桩承载作用机理

鉴于桩基荷载传递理论, 国内外专家学者通过理论分析、有限元分析、模型试验以及现场试验等方法对桩基沉降特性、承载性状等进行深入研究, 理论分析计算较为简便且概念明确, 在实际工程应用中具有一定的

实用性。现场静载试验是最为常用、最直接评定桩基承载力的重要技术手段, 但是该方法工程成本较高, 受材料设备、试验场地、施工条件等客观因素影响较大, 对于拟建场地土体扰动亦较大。鉴于此, 国内外专家学者逐渐尝试拓展试验方法, 以期降低工程成本等。随着科技的不断发展和完善, 有限元分析也逐渐被广大工程技术人员应用于工程实际之中。相较于解析法、传递函数法等传统理论分析的方法, 数值分析可充分考虑到模型边界约束条件、应力历史、拟建场地复杂的地质条件对计算结果精度的影响, 得出更加合理的桩体及桩周土体在外荷载作用下的沉降特性及承载性状, 可较好的反应实际工况。姬猛等^[2]以黄土地区某工程为背景, 分别通过现场静载试验和数值模拟, 通过对比研究发现: 数值模拟所得桩顶沉降值等与现场静载试验数据较为吻合, 证明了数值模拟的可靠性。熊文亮^[3]以莆田某海上风电场为背景, 研究发现: 数值模拟方法与现场静载试验数据较为接近, 由此证明数值模拟所得数据具有一定的精度, 可较为准确的拟合现场工程试验数据。秦月等^[4]通过室内模型试验, 对比分析不同荷载作用下的单桩承载性状, 揭示桩基与桩周土体相互作用机理。

本文以“松江南站大型居住社区某地块动迁安置”项目为背景, 根据静力触探实测值结合上海市工程建设规范《岩土工程勘察标准》(DG/TJ08-37-2023)表16.5.5和《地基基础设计标准》(DGJ08-11-2018)表7.2.4估算单桩承载力, 再通过现场单桩竖向抗压静载荷试验, 确定单桩竖向抗压极限承载力。然后根据该项目勘察成果选取试验点的合理土层物理力学参数建立数值模型, 对试验过程进行有限元分析, 印证了有限元法较为符合实际工况, 可为上海地区桩基工程设计和施工提供一定的指导和借鉴。

一、工程概况

拟建场地位于上海市松江区车墩镇, 项目主要建设内容为: 16~17层高层住宅(1~12#), 3层配套公建(13~14#)、1座单层地下水以及垃圾房、门卫、KP站、KT站等辅助建筑物, 其中地下室基础埋深为5.3m。设计拟采用Φ500mm的PHC管桩, 其中高层住宅有效桩长拟定28m, 混凝土强度为C80。

拟建场地位于长江三角洲入海口东南前缘, 地貌类型为湖沼平原I-2区, 拟建场地内基本为农田, 局部地势略有起伏。拟建场地地层分布如图2所示:

二、各桩基持力层的确定

(一) 静力触探估算法

上海地区所采用的静力触探估算法是将静探探头按一定速率穿过拟建场地的各地质土层, 通过探头反馈的阻力来模拟桩基的受力状态, 进而拟定公示计算桩基承载力。根据《岩土工程勘察标准》(DG/TJ08-37-2023)中第16.5节可知估算单桩竖向承载力设计的计算

Q ₃	①	素填土	1.20	
	②	粉质黏土	3.90	
	③1	淤泥质粉质黏土	7.70	
	③3	黏土	17.90	
Q ₄	⑤	黏土	22.90	
	⑥	粉质黏土	26.10	
	⑦1	砂质粉土	30.50	
	⑦2	粉砂	50.00	

图2 拟建场地地层分布

公式为:

$$R_d = \frac{R_{sk}}{\gamma_s} + \frac{R_{pk}}{\gamma_p} = \frac{U_p \sum f_{si} l_i}{\gamma_s} + \frac{f_p A_p}{\gamma_p}$$

上式中： U_p ——桩身截面周长（m）， f_{si} ——桩侧第*i*层土的极限摩阻力标准值（kPa）， f_p ——桩端处土的极限摩阻力标准值（kPa）， l_i ——第*i*层土的厚度（m）， A_p ——桩端横截面积（m²）， γ_s ——总侧摩阻力的分项系数， γ_p ——桩端阻力的分项系数。

根据上述公式结合“松江南站大型居住社区某地块动迁安置”内原位测试实测值及设计资料，采用⑦₁层砂质粉土作持力层，有效桩长28m，估得Φ500mm的PHC管桩单桩极限承载能力约为3000kN。

（二）静载试验

本次试验在现场布置3根Φ500mm的PHC管桩（桩号为：6#-XS1、10#-XS2、11#-XS3），桩长均为28m，采用⑦₁层砂质粉土作持力层，混凝土强度为C80。

本次抗压试验的加荷系统由大型箱梁、油压千斤顶（630T）、压力传感器等组成。反力由压重平台反力装置提供（堆载重物为混凝土压块），沉降量测采用4只测读精度为0.01mm的位移传感器，对称安装在桩侧2个正交直径的方向上，基准系统采用Φ50mm钢管作基准梁安放在基准桩上，基准桩采用1.5m长的Φ50mm钢管打入地下1.0m，并焊接成T形结构。试验装置如图3所示。

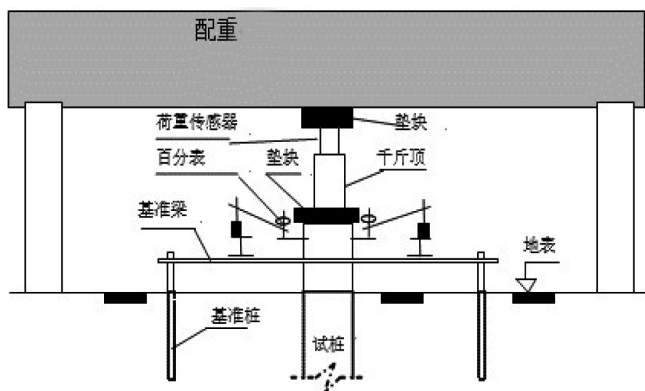


图3 单桩竖向静载试验设备

本次抗压试验第一级荷载双倍施加为660kN，之后每级以300kN为一级继续进行加载。当加载量达到3000kN之后以150kN为一级继续加载，当加载量达到3300kN地基土或桩身材料仍未破坏，可停止加载。卸载量是加载量的2倍，逐级等量卸载。每级卸载后在第5分钟、第15分钟、第30分钟及第60分钟进行测读记录；最后一级卸载完成后还需测读第90分钟及120分钟的读数。

（三）有限元法

为了提高有限元法计算精度和效率，分别根据试桩点地层依次建立三个桩基模型，将PHC管桩假定为规则的圆柱体，拟建场地地层假定为理想弹塑性体，地层底面采用全约束，遵循Mohr-Coulomb屈服准则，利用ABAQUS内置的接触面单元，以桩身为主面，桩周土体为从面模拟接触。并在桩-土附近加密网格，通过ABAQUS内置*Load命令对桩顶逐级施加荷载，加载过程可根据现场静载试验步骤进行合理调整，数值模拟所需部分土体物理力学参数表如表1所示。

表1 拟建场地地层土体物理力学性质表

地层编号	土层名称	平均层厚(m)	压缩模量(MPa)	粘聚力(kPa)	内摩擦角(°)	重度(kN/m ³)
②	粉质黏土	2.7	3.90	23.0	16.0	18.7
③1	淤泥质粉质黏土	3.8	3.04	13.0	17.0	17.6
③3	黏土	10.2	3.28	15.0	14.5	17.9
⑤	黏土	5.0	3.23	15.0	14.0	17.6
⑥	粉质黏土	3.2	6.33	44.0	16.0	19.7
⑦1	砂质粉土	4.4	9.77	5.0	29.5	18.6

三、结果分析

（一）单桩极限承载力数值对比分析

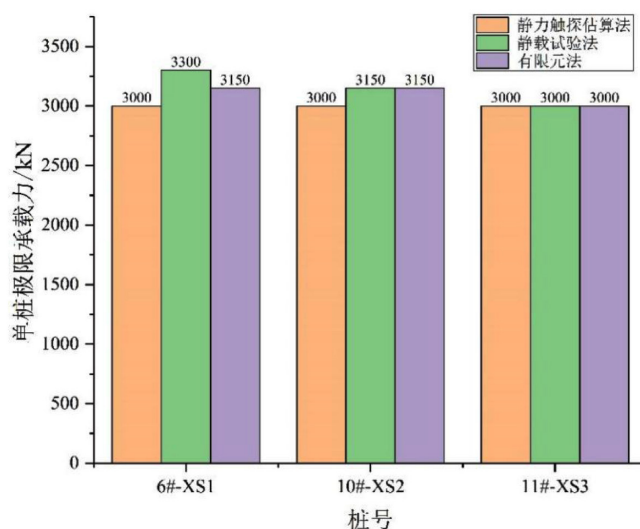


图4 单桩极限承载力数值对比分析

根据图4可知，采用静力触探模拟桩体计算出的承载力与现场静载试验所得实测值较为吻合，有限元法所得数据结果较为符合实际工况。

(二) 位移沉降结果对比分析

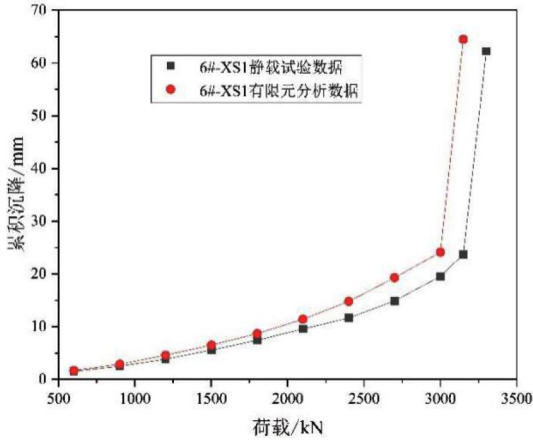


图 5 6# 桩单桩抗压静载荷试验累积位移结果对比图

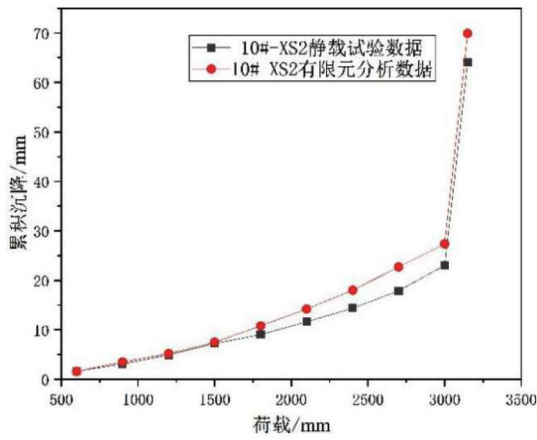


图 6 10# 桩单桩抗压静载荷试验累积位移结果对比图

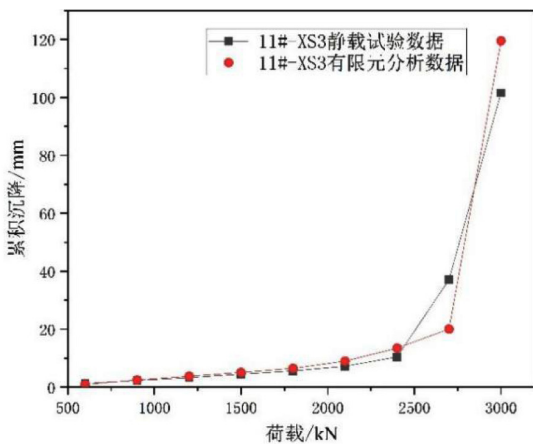


图 7 11# 桩单桩抗压静载荷试验累积位移结果对比图

对比图5-图7可知：静载加载初期，当外荷载小于单桩极限承载力时，累积位移沉降曲线基本光滑，未出现明显的转折拐点，表明桩可依靠自身变形协调能力及桩-土间侧摩阻力承担外部荷载；随着分级荷载的持续增加，累积位移沉降曲线增长趋势逐渐加快，表明桩身

上部的土体逐渐由弹性状态转变为塑性状态，桩身所承受的外荷载逐渐向下部传递，桩身下部土体逐渐被调动起来；当荷载逐渐趋近于单桩极限承载力时，桩周土体逐渐遭受破坏，位移陡增，且现场技术人员通过超声波法探知桩身并未发生破坏，由此可知桩侧及桩端土体均已发生塑性变形，单桩承载力达到极限值，试桩结束。

根据模拟结果与现场静载试验实测数据对比，两者变化规律基本一致，表明有限元法所得数据结果较为符合实际工况。但数值模拟的拐点较试验数据有一定的偏差，这是因为对试桩进行有限元分析时，为简化建模步骤、提高计算效率，将试验场地地层假定为理想模型，且勘察报告所提供的地质参数稍有保守，加之现场地质情况存在一定的突变性和静载试验对周围土体也有一定的扰动和挤密作用。

四、结论

1、通过上述对比分析可知，静力触探估算法以原位测试成果为基础，估算单桩极限承载力的数值与静载试验所得结果较为吻合，证明该方法在以中软土为特性的上海地区的合理性和有效性，但勘察技术人员依靠大量工程经验所选用的桩侧摩擦力和桩端阻力一般偏于保守，不利于节约工程成本。

2、通过选取合理土层物理力学参数，建立桩基数值模型，对桩基在静载试验中的工况进行有限元分析，将模拟的单桩承载力和位移沉降值与现场试验结果进行对比，从而验证了有限元分析方法的可靠性。

3、由于有限元法模型为假理想状态，且受限于工程技术人员提供的经验参数和场地地质条件的复杂性，模拟成果与静载试验存在一定的偏差，但变化规律一致，数据也基本吻合，可较好的反映实际工况。

4、单桩抗压静载荷试验累积位移曲线通过建立数学模型进行单桩极限承载力计算，该方法具有一定的精度，但无法较为准确的反映单桩在竖向荷载作用下的力学性状，亟待相关专家和学者对其进行修正和完善。

参考文献

[1] 乔世范, 蔡子勇, 檀俊坤, 董常瑞, 刘钰. 深厚淤泥软土地层桩基承载力性状研究[J]. 建筑结构, 2022, 52 (S1): 2729-2735.
 [2] 姬猛, 何怀东, 李艳芹. 黄土地区摩擦桩基承载力现场试验及数值分析[J]. 路基工程, 2016 (05): 119-125.
 [3] 熊文亮. 基于现场试桩的海上风电场嵌岩桩基承载力分析研究[J]. 海峡科学, 2022 (08): 53-58+64.
 [4] 秦月, 孟庆山, 汪稔, 朱长歧. 钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36 (06): 1714-1720+1736.