

双桥静力触探试验在静压桩沉桩阻力估算中的应用

王斌

(国家林业和草原局西南调查规划院, 云南 昆明 650031)

摘要: 静压法沉桩是一种高效的深基础施工技术, 在城市中心建筑及基础设施建设中发挥着重要作用。静压法沉桩过程中沉桩阻力的预测对提高桩基施工质量、提升施工效率及降低基础施工成本具有重要意义。基于双桥静力触探试验及静压桩施工原理的相似性, 引入侧摩阻力动静转换系数 k 以及桩侧、桩端综合调节系数 γ_1 、 γ_2 , 建立了基于双桥静力触探法的静压桩沉桩阻力预测函数式, 并对计算参数进行了识别。通过实际工程案例的对比分析, 验证了该模型的准确性和实用性。结果表明, 基于CPT数据的沉桩阻力估算方法能够有效地预测不同土层条件下的沉桩阻力, 为静压桩施工提供了可靠的技术支撑。
关键词: 双桥静力触探; 静压桩; 沉桩阻力; 阻力预测

Application of cone penetration test in estimating the sinking resistance of static pressure pile

WANG Bin

(Southwest Survey and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650031)

Abstract: Static pressure pile driving is an efficient deep foundation construction technology that plays an important role in the construction of urban central buildings and infrastructure. The prediction of pile driving resistance during static pressure pile driving is of great significance for improving the quality of pile foundation construction, improving construction efficiency, and reducing foundation construction costs. This article is based on the similarity between the cone penetration test and the construction principle of static pressure piles, introducing the dynamic static conversion coefficient k of lateral friction resistance and the comprehensive adjustment coefficients γ_1 and γ_2 of pile side and pile end, a predictive function formula for the resistance of static pressure pile sinking based on the cone penetration test method was established, and the calculation parameters were identified. The accuracy and practicality of the model were verified through comparative analysis of actual engineering cases. The results indicate that the estimation method of pile driving resistance based on CPT data can effectively predict the pile driving resistance under different soil conditions, providing reliable technical support for static pressure pile construction.

Key words: cone penetration test; static pressure pile; pile sinking resistance; resistance prediction

引言

近几年随着我国城市建设规模的扩大, 高层建筑及大型基础设施建设需求不断增加, 预制混凝土桩、载体桩^[1]、钻孔灌注桩^[2]等作为高效的地基基础处理方式在城市建设中的应用日益广泛。预制混凝土桩的沉桩方式主要有静压法及锤击法, 锤击法利用重锤的冲击力, 通过锤击的方式将预制桩打入设计标高或持力层中, 设备简单、成本较低, 但施工过程中会产生较大的噪音及振动, 在城区范围内的适用性较差, 静压法施工时噪音较小, 且对周边的环境影响较小, 因此在城市中心区域的应用较

为广泛^[3]。在静压桩基施工时, 机械型号的选择及施工配重的预估对施工效率、成本以及工程质量的影响较大, 传统估算方法往往根据土层的软硬状态、桩入土深度选择机型及配重, 存在一定的局限性, 容易出现沉桩困难、爆桩或欠送等^[4]。桑松魁等^[5]通过现场试验及数值模拟研究了层状土中静压桩沉桩阻力的变化规律, 结果表明桩端阻力的变化规律与土层的性质及分布密切相关, 且桩端阻力是沉桩阻力的主要影响因素; 郑志鹏^[6]基于ABAQUS软件对静压沉桩过程进行数值模拟, 研究了土塞作用对沉桩阻力的影响, 验证了桩基承载力和沉桩阻力之间的转换关系; 王海刚等^[7]成功

收稿日期: 2024-09-29

作者简介: 王斌, 男, 硕士, 工程师, 主要从事公路路基设计工作。

监测了静压桩沉桩阻力随贯入深度的变化规律, 试验结果表明当桩端位于黏性土层中时, 沉桩阻力随沉桩深度增加变化较小, 而桩端位于粉土、粉砂层时, 沉桩阻力会迅速增大; Lee 等^[8]通过有限元方法和非线性弹塑性模型对砂土地基中的模型桩进行建模, 研究了砂土地基中桩端阻力的发挥特性; 朱小军等^[9]采用室内模型试验研究了新型长短桩组合桩基的荷载-沉降曲线、侧摩阻力随贯入深度的变化规律。

通过前人的研究成果不难发现, 对静压桩沉桩阻力的预测大都集中于数值模拟及现场试验, 而基于现场原位测试的静压桩沉桩阻力预测方法较少。本文基于现场双桥静力触探原位试验及静压桩施工原理的相似性, 提出了采用双桥静力触探法预测静压桩沉桩阻力的计算方法, 并通过实际工程案例进行了验证。

1 基于双桥静力触探的静压桩沉桩阻力预测

1.1 双桥静力触探试验

1932年荷兰工程师 P. Barentsen 首次进行了静力触探试验。1935年荷兰 Delft 土力学实验室在桩基承载力试验设计并使用了 10 吨的荷兰锥贯入装置, 单桥静力触探法出现雏形。1957年荷兰 Delft 土力学实验室研制出第一台能同时测定锥尖阻力和侧摩阻力的电测式探头。这标志着双桥静力触探技术正式成为工程地质勘探中的一种原位测试方法^[10]。我国从 20 世纪 60、70 年代开始逐步在铁路地质勘察中使用电测试单桥及双桥静力触探仪, 在铁道部多家单位及建设部门的共同努力下, 双(单)桥静力触探技术在我国积累了大量的工程经验, 形成了一套完整的操作流程及技术规范^[11]。

双桥静力触探试验作为一种原位测试方法, 在粉质黏土、粉土、粉砂及黏土中具有显著的适用性。双桥静力触探试验过程中通过静力将探头以一定的速率匀速压入土中, 利用探头内的传感器, 通过电子量测器将探头受到的锥尖阻力和侧壁摩阻力记录下来。由于锥尖阻力与侧壁摩阻力的大小与土层的性质有关, 因此通过分析双桥静力触探成果可以确定土的工程性质。由于双桥静力触探试验贯入过程

中, 探头的贯入速度较慢, 对土层的扰动较小, 探头处的土层基本保持着原状特征, 因此双桥静力触探的贯入过程处于拟静态平衡状态。静压法沉桩是利用静压力将预制桩逐节压入土层中, 直至到达设计标高, 在黏性土、粉土及粉砂土地基中具有广泛的应用。由于静压法沉桩过程中桩体与土层之间的接触面产生剪切应力, 周边土体发生剪切破坏, 使得桩侧及桩端土层进入塑性状态, 即土颗粒发生相对位移, 土体结构出现不可逆的变化, 因此静压法沉桩过程处于动态平衡状态。双桥静力触探法与静压法沉桩均采用静力法压入, 过程极为相似。双桥静力触探可以看作为小型化的静压法沉桩过程, 两者区别主要是拟静探与动态过程以及尺寸的大小。因此可采用双桥静力触探法对静压法沉桩沉桩阻力进行预测研究^[12]。

1.2 静压桩沉桩阻力预测研究

双桥静力触探探头在单桥探头的基础上进行了改进, 除顶柱、电阻应变片、锥尖传感器外, 增加了摩擦套筒及侧壁摩擦传感器, 可以同时测量锥尖阻力及侧摩阻力两个土层指标, 即探头侧阻力 f_s 及探头端阻力 q_c 。由于土的类型、物理性质、力学指标、沉积年代的差异性, 静压桩沉桩过程中不同的土性的沉桩阻力具备显著的差异性, 如流塑~软塑的粉质黏土沉桩阻力主要来源于桩侧, 桩端阻力较小, 而中密~密实的粉砂土沉桩阻力主要来源于桩端, 桩侧阻力较小, 因此无法采用同一函数预测沉桩阻力。

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)中提供了根据双桥静力触探资料, 确定混凝土预制桩单桩竖向极限承载力标准值的计算方法^[13], 如式(1)所示。

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum l_i \cdot \beta_i \cdot f_{si} + \alpha \cdot q_c \cdot A_p \quad (1)$$

黏性土、粉土: $\beta_i = 10.04(f_{si})^{-0.55}$; 砂土

$$\beta_i = 5.05(f_{si})^{-0.45} \quad (2)$$

式中: Q_{sk} 及 Q_{pk} 分别为总极限侧阻力标准值及总极限端阻力标准值, kPa; u 为桩身周长, m; l_i 为桩侧第 i 层土的厚度, m; β_i 为第 i 层土桩侧阻力修正系数, 按式(2)计算; f_{si} 为第 i 层土双桥静力触探平均侧阻力, kPa; α 为桩端阻力修正系数, 黏性土、粉土取 2/3, 饱和砂土取 1/2; q_c 为桩端平面上、下探头阻力, 取桩端平面上 $4d$ 范围内土层厚度

的探头阻力与桩端平面下 1d 范围内的探头阻力进行平均, kPa; d 为桩径, m; A_p 为桩身截面积, m²。

由式 (1) 可以看出, 混凝土预制桩单桩竖向极限承载力标准值由两部分组成, 分别为总极限侧阻力标准值以及总极限端阻力标准值。静压法沉桩过程中, 沉桩阻力同样来自于桩侧及桩端, 而桩侧及桩端的沉桩阻力又与土性直接相关, 即沉桩阻力与双桥静力触探探头侧阻力 f_s 及探头端阻力 q_c 具有高度的相关性。但由于双桥静力触探的贯入过程处于拟静态平衡状态, 这与静压法沉桩的动态平衡差异较大, 无法采用探头侧阻力 f_s 及探头端阻力 q_c 直接计算沉桩阻力, 因此引入侧摩阻力动静转换系数 k, 将双桥静力触探试验中的探头侧阻力转换为静压法沉桩过程中土层对桩侧的实际摩阻力。同时, 由于同一土性情况下不同状态的土层力学性质具备显著的差异性, 为保证沉桩阻力计算的精确性, 根据土层的分布状态采用综合调节系数 γ₁ 和 γ₂ 对探头侧阻力 f_s 及探头端阻力 q_c 预测沉桩阻力进行修正, 将式 (1) 改写成静压法沉桩阻力预测函数式, 如式 (3) 所示。

$$Q = Q_a + Q_b = \gamma_1 \cdot u \cdot \sum l_i \cdot \beta_i \cdot \frac{f_{si}}{k_i} + \gamma_2 \cdot \alpha \cdot q_c \cdot A_p \quad (3)$$

式中: Q 为静压法沉桩阻力预测值, kN; Q_a 为静压法沉桩侧阻力预测值, kN; Q_b 为静压法沉桩端阻力预测值, kN; γ₁ 和 γ₂ 分别为桩侧及桩端调节系数, 与土性及土的状态有关; k_i 为桩侧第 i 层土的侧摩阻力转换系数, 与土性相关; 其余参数同式 (1) ~ (2)。

2 桩端阻力与桩侧阻力估算

2.1 桩侧阻力估算

根据式 (3), 静压法沉桩桩侧阻力预测公式为:

$$Q_a = \gamma_1 \cdot u \cdot \sum l_i \cdot \beta_i \cdot \frac{f_{si}}{k_i} \quad (4)$$

根据式 (4), 在桩长及桩径确定的情况下, 静压法沉桩桩侧阻力的大小主要与桩侧综合调整系数 γ₁、桩侧阻力修正系数 β_i、探头侧阻力 f_s 及侧摩阻力转换系数 k 相关。而桩侧阻力修正系数 β_i 由探头侧阻力 f_s 计算得出, 且侧摩阻力动静转换系数 k 与原状土及重塑土的性质有关。可以参考土的灵敏度对 k 进行赋值。① 淤泥质粉质黏土。该类土颗粒细, 含水率高, 孔隙比大于 1.0, 双桥静力触探曲线较为平滑, 静压法沉桩过程中对其影响小, k 值可取 0.8~1.2。② 粉质黏土。该类土颗粒较细, 含水率一般, 孔隙比约为 0.90, 双桥静力触探曲线较为平滑, 稍有起伏, k 值可取 1.0~1.5。③ 粉土。该类土的颗粒大小介于粉质黏土与粉砂之间, 静压法沉桩过程中易受扰动, k 值取 1.2~1.8。④ 粉砂。该类土颗粒较大, 易受扰动, 且伴随着明显的挤土效应, k 值取 1.5~2.0。

2.2 桩端阻力估算

根据式 (3), 静压法沉桩桩端阻力预测公式为:

$$Q_b = \gamma_2 \cdot \alpha \cdot q_c \cdot A_p \quad (5)$$

根据式 (5), 在桩长及桩径确定的情况下, 静压法沉桩桩端阻力的大小主要与桩端综合调整系数 γ₂ 及桩端附近一定范围内的探头端阻力 q_c 有关。对静压法沉桩而言, 桩端阻力所占比重较大, 特别是对持力层采用密实砂土的端承桩而言, 进入持力层后桩端阻力迅速增加, 由此可见探头端阻力 q_c 的取值对沉桩阻力的影响较大。总结了我国国家标准及地方标准中对 q_c 取值范围的规定, 如表 1 所示。

表 1 q_c 取值范围建议值 (d 为桩径)

取值范围	桩基规范	江苏省规	四航局	上海地基规范	同济大学	铁道部
桩端以上	8d	8d	4d	8d	4d	4d
桩端以下	4d	4d	4d	4d	1d	4d

本文中, 为便于计算分析, 参照现有研究成果, q_c 取值范围取桩端以上 8d 及桩端以下 4d, 计算方法按式 (6) 取加权平均值。

$$q_c = \frac{q_{c1} \cdot 8d + q_{c2} \cdot 4d}{8d + 4d} \quad (6)$$

式中: q_{c1} 为桩端平面以上 8d 范围内的探头端阻

力加权平均值, kPa; q_{c2} 为桩端平面以下 $4d$ 范围内的探头端阻力加权平均值, kPa; d 为预制桩桩径, mm。

2.3 综合调节系数的确定

采用双桥静力触探法计算静压法沉桩阻力时, 计算值的精度与综合调节系数 γ_1 和 γ_2 值有关。根据土性及分布状态选择正确的综合调节系数可获得较准确的沉桩阻力值预测结果。根据现有的研究成果, 采用桩侧及桩端综合修正系数对静压桩沉桩阻力进行修正是可行的^[14-15]。

静压桩的沉桩阻力与桩的入土深度、桩径、桩

侧及桩端土性有直接关系。当桩的入土深度较浅时, 桩侧阻力未得到有效发挥, 此时桩端阻力在沉桩阻力中的占比较大; 当桩的入土深度增加时, 随着桩侧阻力逐步累积, 桩侧阻力在沉桩阻力中的占比也逐步增加; 当桩端穿越密实度较高的粉砂、粉土层时, 桩端阻力显著增加, 此时桩端阻力对沉桩难易程度起到控制作用。通过不同土层中静压桩施工时压桩力的实测值与预测值的对比分析, 结合工程经验进一步归纳总结, 提出不同土性不同状态下的综合调节系数, 如表 2 所示。

表 2 土的综合调节系数

土性 状态	填土 松散	淤泥质土 流塑	粉质黏土				粉土及粉砂			
			流塑	软塑	可塑	硬塑	松散	稍密	中密	密实
γ_1	0	0.2	0.3~0.5				0.5~0.8			
γ_2	0	0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	0.4~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0	1.0~1.2

由表 2 可知, 随着土颗粒粒径的增加, 综合调节系数 γ_1 和 γ_2 逐步增大, 同一土性时, 土的硬度及密实度越大, 综合调节系数越大; 说明土的颗粒越大, 力学强度越大, 沉桩过程中阻力越大。

3 工程实例计算分析

为进一步验证本文中采用双桥静力触探法预测静压法沉桩阻力的可行性, 对比沉桩阻力预测值与

实测阻力的差异, 以华东地区两个静压法沉桩项目为例进行分析。

3.1 工程实例一

某办公建筑位于华东某市, 共 3 层, 建筑高度 12.0 m, 采用预制混凝土管桩, 桩径 600 mm, 桩长 13.0 m。建筑场地类型为 IV 类, 设计地震分组为第二组, 基本地震动峰值加速度为 0.10 g, 基本地震动加速度反应谱特征周期为 0.75 s。场地内各土层参数及物理力学性质见表 3。

表 3 各土层参数及物理力学性质

层号	土层名称	层底深度 /m	层厚 /m	有效层厚 /m	q_c 平均值 /kPa	f_s 平均值 /kPa	状态	α	β	k	γ_1	γ_2
1	填土	0.7	0.7	0.7	1054	21	松散	—	—	—	0	0
2	粉土	2.0	1.3	1.3	2164	35	稍密	2/3	1.42	1.4	0.5	0.6
3	粉砂	4.6	2.6	2.6	6143	47	中密	1/2	0.89	1.6	0.7	0.9
4	粉质黏土夹粉土	10.4	5.8	5.8	1890	31	软塑	2/3	1.52	1.3	0.4	0.5
5	粉质黏土	16.2	5.8	2.6	1171	23	流塑	2/3	1.79	1.2	0.3	0.3
6	淤泥质粉质黏土	20	3.8	—	912	15	流塑	2/3	2.26	1.0	0.2	0.2

根据式 (3) ~ (5), 计算曲线与实测静压桩沉桩阻力结果如图 1 所示。

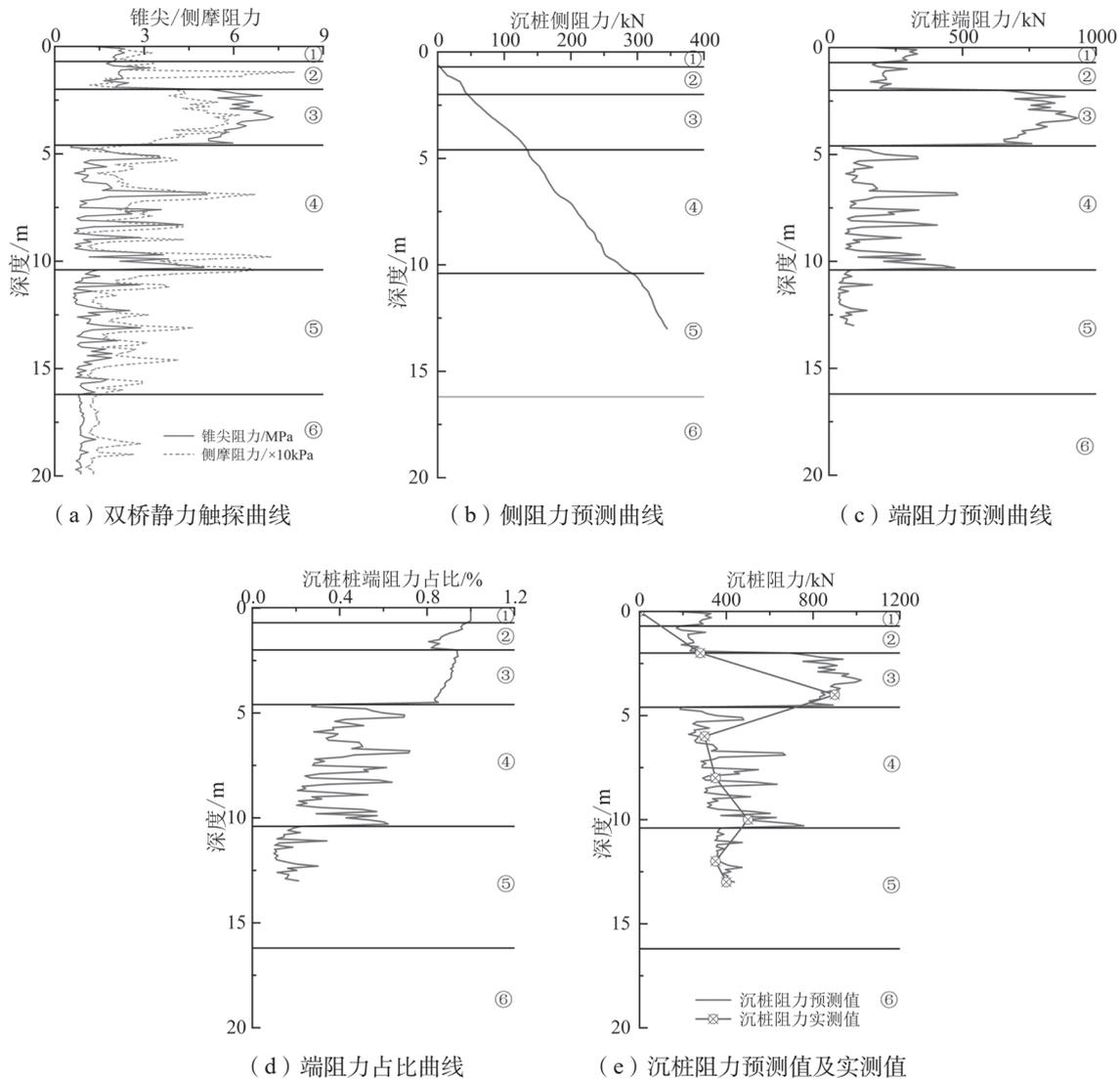


图 1 某办公建筑沉桩阻力计算曲线及实测曲线

3.2 工程实例二

某高层建筑位于长江下游某市，共 5 层，建筑高度 23.9 m，采用预制混凝土管桩，桩径 500 mm，桩长 19.0 m。建筑场地类型为 III 类，设计地震分

组为第二组，基本地震动峰值加速度为 0.15g，基本地震动加速度反应谱特征周期为 0.55 s。场地内各土层参数及物理力学性质见表 4。

表 4 各土层参数及物理力学性质

层号	土层名称	层底深度 /m	层厚 /m	有效层厚 /m	q_c 平均值 /kPa	f_s 平均值 /kPa	状态	α	β	k	γ_1	γ_2
1	填土	1.1	1.1	1.1	1478	12	松散	—	—	—	0	0
2	粉土	9.4	8.3	8.3	2733	27	稍密	2/3	1.64	1.4	0.5	0.6
3	粉砂	15.5	5.9	5.9	8637	61	中密	1/2	0.79	1.7	0.6	0.9
4	粉质黏土	16.3	0.8	0.8	2169	38	软塑	2/3	1.36	1.3	0.4	0.5
5	粉砂	21.6	5.3	2.9	12.17	81	密实	1/2	0.70	1.9	0.8	1.1
6	粉砂夹粉质黏土	25.0	3.4	—	6.39	66	中密	1/2	0.77	1.6	0.5	0.8

根据式(3)~(5)，计算曲线与实测静压桩沉桩阻力结果如图2所示。

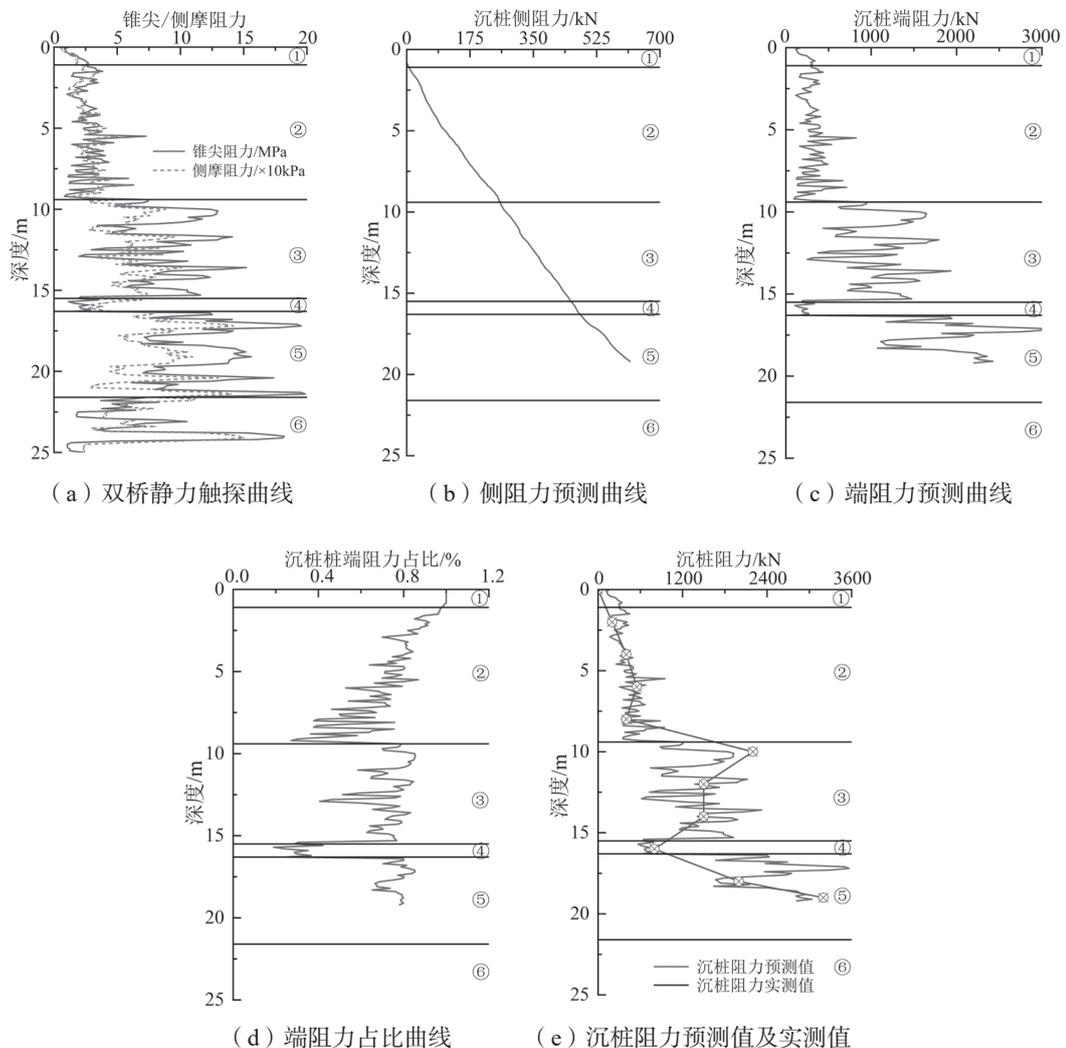


图2 某高层建筑沉桩阻力计算曲线及实测曲线

3.3 计算结果分析

根据图1(e)及图2(e)可以看出,采用式(3)计算得到的静压桩沉桩阻力预测曲线与双桥静力触探曲线沿深度方向的变化规律基本相似,说明采用双桥静力触探法预测静压桩沉桩阻力是可行的。通过不同土层中的预测值及实测值对比可知,桩端进入流塑或软塑的粉质黏土层时,桩端阻力变化较小。此时的桩侧摩阻力对沉桩阻力起主导作用。而当桩端进入中密~密实的粉土或粉砂层时,桩端阻力迅速增加,桩端阻力在沉桩阻力中起主导作用。

从桩侧阻力曲线可以看出,桩侧阻力随着桩入土深度的增加而增加,与桩的入土深度基本呈近似

线性关系。在力学性质较差的流塑~软塑的粉质黏土中,桩侧阻力随桩入土深度的增长速率较小。而在力学性质较好的中密~密实的粉土或粉砂中,桩侧阻力增长速率较快,说明桩侧土层的力学性质对桩侧阻力有一定的影响。同时,由于浅部为松散的填土层,该层土内的桩侧阻力为零,沉桩阻力主要为桩端阻力。此外由于案例一为软弱土地,以流塑~软塑的粉质黏土及稍密的粉土为主,静压桩沉桩时桩侧阻力对沉桩阻力的影响较大。由图1(d)可以看出,随着桩入土深度的增加,桩侧逐步增加,桩端阻力在总沉桩阻力中的占比逐步减小。而案例二为中软土地,该场地内主要为中密至密实的粉

砂,如图 2(e)所示,桩端阻力在总沉桩阻力中占比较大,起到主导作用。

由桩端阻力曲线可以看出,桩端阻力曲线的变化规律与双桥静力触探曲线以及沉桩阻力曲线基本一致,且桩端阻力不随桩的入土深度的增加而成倍增加。桩端在进入软硬不同的土层时才会出现显著的波动,同一土层中,桩端阻力随桩入土深度的变化较小。总沉桩阻力的增加主要来源于桩侧阻力的累积。当桩端进入密实粉砂层时,桩端阻力迅速增加,此时桩端阻力占到总沉桩阻力的 80% 以上,因此当以密实的土层作为桩端持力层时,应重点关注沉桩的可行性。

4 结 论

依据双桥静力触探试验与静压桩沉桩及静压桩施工原理的相似性,以双桥静力触探法计算混凝土预制桩单桩竖向极限承载力标准值的方法为理论基础,引入侧摩阻力动静转换系数以及桩侧、桩端综合调节系数,建立了基于双桥静力触探法的静压桩沉桩阻力预测函数式。该方法量纲正确,计算方法清晰。分别对静压法沉桩桩侧阻力及桩端阻力预测公式中的参数进行了识别,确定不同土性各状态下的综合调节系数。

结合华东地区软土地基及中软土地基场地内的静压桩施工实测数据,验证了该计算方法的准确性和实用性。结果表明,静压桩沉桩阻力预测曲线与双桥静力触探曲线沿深度方向的变化规律基本相似,沉桩阻力受桩端持力层的影响较大,桩端位于密实砂土层中时,沉桩阻力迅速增大;而位于流塑~软塑粉质黏土层中时,沉桩阻力变化较小。研究成果对于优化静压桩施工技术、提高施工安全性和经济性具有重要的理论和实践意义。

参考文献:

- [1] 王有昌. 载体桩在元谋地区膨胀土地基中的应用[J]. 林业建设,2018(4):62-66.
- [2] 郭景堂,伍桂花. 钻孔灌注桩事故原因及处理方法[J]. 林业建设,2009(5):43-44.
- [3] 周峰,梅国雄,宰金珉. 估算软土地区预制桩最终极限承载力的修正方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2005(6):663-666+670.
- [4] 刘永超,卫超群,陆鸿宇,等. 软土地区倾斜静力压桩法沉桩机理研究及应用[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2):158-161.
- [5] 桑松魁,孔亮,白晓宇,等. 层状土中静压桩贯入过程沉桩阻力现场试验与数值模拟[J]. 宁夏工程技术,2022,21(3):212-218+225.
- [6] 郑志鹏. 基于即时实测静压开口管桩沉桩机理及阻力估算研究[D]. 南京:东南大学,2022.
- [7] 王海刚,白晓宇,张明义,等. 静压桩沉桩阻力现场试验与数值模拟分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2021,52(1):91-97.
- [8] Lee JH,Salgado R.Determination of pile base resistance in sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999,125(8):673-683.
- [9] 朱小军,杨敏,杨桦,等. 长短桩组合桩基础模型试验及承载性能分析[J]. 岩土工程学报,2007,29(4):580-586.
- [10] 刘松玉,吴燕开. 论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J]. 岩土工程学报,2004,26(4):553-556.
- [11] 付超. 静力触探实验在土层划分中的应用研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版),2013,26(2):305-308.
- [12] 王文韬,刘元钊. 经验参数法与双桥静力触探估算预制桩单桩承载力对比分析[J]. 工程技术研究,2020,5(11):27-28.
- [13] 赵建平,周峰,宰金珉,等. 软土地区预制桩单桩最终极限承载力估算方法[J]. 重庆建筑大学学报,2005(6):44-48.
- [14] 李雨浓,李镜培,赵仲芳. 基于静力触探试验的静压桩沉桩阻力估算[J]. 路基工程,2010(3):67-69.
- [15] 蔡国军,刘松玉. 基于 CPTU 测试的桩基承载力可靠性分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(3):404-412.