

# 基于桩侧摩阻力退化静压桩沉桩效应室内试验

王永洪<sup>1,2</sup>, 金珈民<sup>1</sup>, 袁继奎<sup>3</sup>, 张东<sup>4</sup>, 王东雷<sup>5,6</sup>

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 山东省高等学校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033; 3. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014; 4. 建华建材(莱阳)有限公司, 山东 烟台 265200; 5. 青岛永元海洋科技有限公司, 山东 青岛 266033; 6. 青岛绿色理工岩土工程有限公司, 山东 青岛 266033)

**摘要** 目的 开展桩侧摩阻力退化静压桩沉桩效应室内试验, 准确反映静压桩在实际沉桩过程中的受力变形特性, 解决静压桩沉桩特性研究中难以获得静压桩真实的沉桩特性等问题。方法 使用室内试验方式进行大比尺静压桩的分段沉桩试验; 基于桩侧摩阻力退化理论, 实现分段试验数据的耦合叠加, 分析沉桩过程的受力特性, 探讨桩侧摩阻力退化对沉桩效应的影响。结果 压桩力随贯入深度的增加呈均匀增长, 桩侧摩阻力的退化对压桩力的影响较小; 基于桩侧摩阻力退化理论修正后桩侧摩阻力整体变化规律较好, 在桩段连接处产生的差值基本为0; 桩侧摩阻力随着沉桩深度的不断增加而逐渐发挥, 曲线整体线性较好; 桩端阻力随深度增大呈波动性增长, 且在压桩力中的占比较高, 维持在50%以上。结论 侧摩阻力退化效应的存在对桩基承载力的预测具有较大影响, 且退化效应显著性随沉桩深度增大而增大; 通过对分段沉桩数据修正后进行叠加耦合可获取静压沉桩特性的准确数据; 本研究可为今后静压桩沉桩特性研究提供新的思路。

**关键词** 桩侧摩阻力退化; 静压桩; 分段沉桩; 受力特性; 叠加耦合

中图分类号 TU473.11

文献标志码 A

**引用格式:**王永洪, 金珈民, 袁继奎, 等. 基于桩侧摩阻力退化静压桩沉桩效应室内试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(6): 1021-1028. (WANG Yonghong, JIN Jiamin, YUAN Jikui, et al. Experimental study of pile jacking effect based on pile side friction resistance degradation[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(6): 1021-1028.)

## Experimental Study of Pile Jacking Effect Based on Pile Side Friction Resistance Degradation

WANG Yonghong<sup>1,2</sup>, JIN Jiamin<sup>1</sup>, YUAN Jikui<sup>3</sup>, ZHANG Dong<sup>4</sup>, WANG Donglei<sup>5,6</sup>

(1. College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, China, 266033; 2. Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao, China,

收稿日期: 2022-10-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0113400); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2022ME143)

作者简介: 王永洪(1984—), 男, 博士, 主要从事桩基础等方面研究。

266033;3. Shandong Luqiao Group Co. Ltd. , Ji'nan, China, 250014;4. Jianhua Building Materials Co. , Yantai, 265200,;5. QingdaoYongyuan Marine Technology Co. , Qingdao, China, 266033;6. Qingdao Green Tech Geotechnical Engineering Co. , Qingdao, China, 266033)

**Abstract:** The research on the characteristics of static pressure piles is mostly concentrated in model tests and numerical simulation, and cannot accurately reflect the problems of the real sinking piles of static piles accurately. Based on the degeneration of the pile side motorcyle resistance, this paper conducted a large-scale static stake pile section segmentation pile test. Based on the degradation theory of pile side friction resistance, coupling and stacking of segmented test data is achieved to analyze the stress characteristics of the pile sinking process and explore the influence of pile side friction resistance degradation on the pile sinking effect. As a result, the test results showed that the pressure pile force increased evenly with the depth of the penetration, and the degeneration of the pile side rubbing resistance was less impact on the pressure pile force; Well, the difference in the difference at the pile section connection is basically zero; the resistance power of the pile side is gradually exerted as the depth of the sinking piles, and the overall linearity of the curve is better; The pile force accounts for relatively high, maintaining above 50%. In this paper, the segmented pile sinking test of large scale hydrostatic pile was carried out by indoor test method, and the pile sedimentation characteristics of hydrostatic pile were studied by combining the pile side friction resistance degradation theory, which provides a new idea for the future study of the sinking characteristics of hydrostatic pile.

**Key words:** pile side friction resistance degradation; jacked pile; subsection of pile; mechanical characteristics; superposition of coupling

静压桩具有环境污染小、施工速度快等优点,在实际工程中广泛应用<sup>[1-3]</sup>。静压桩沉桩特性研究已成为诸多学者的研究重点<sup>[4-6]</sup>。影响静压桩沉桩过程的受力机理与沉桩特性的重要因素尚无系统研究。目前,对于静压桩沉桩特性的分析,大多数学者通过室内试验结合数值模拟的方式进行研究。H. S. Yu 等<sup>[7]</sup>基于原有沉桩贯入机制,结合球孔扩张理论,以及引入 Boussinesq 的修正解,研究沉桩过程中桩侧摩阻力和桩端阻力,量化了桩身受力特征。L. F. Cao 等<sup>[8]</sup>对黏性土进行了不排水试验,结合弹塑性区的应变变化,对比数值建模解析解与现场试验数据进行分析,研究了超固结率对超孔隙水压力的影响。部分学者利用应变路径法对沉桩机理进行了研究,罗战友等<sup>[9-10]</sup>通过运用源-源法,源-汇法修正了应变路径的边界条件,并基于有限变形理论及土体屈服准则建立压桩的有限元模型,对静压桩沉桩产生的位移场进行了讨论。汪敏等<sup>[11]</sup>假设土体

位移为小应变,结合源-源,源-汇的相互作用,到静压管桩单桩竖向和水平挤土位移的解析解,并对其影响因素进行了研究。L. Li 等<sup>[12]</sup>基于有效应力法,考虑桩周土在沉桩、加载过程中的历史固结,对桩周土体的有效应力变化进行了求解,研究表明,触变效应对桩承载力有较大影响。J. T. Chin 等<sup>[13]</sup>通过分组位移控制循环轴向荷载的室内压桩试验,研究桩侧摩阻力在干石灰质砂土中的特性,结果表明,桩侧摩阻力的退化受“循环滑移位移”模型控制。B. M. Lehane 等<sup>[14]</sup>通过大型室内干砂模型桩沉桩试验,研究开口管桩的直径和壁厚对开口管桩承载力的影响,考虑了界面摩擦和水平应力对开口管桩承载力的影响,同时也对比验证了由于土塞效应引起的内壁剪应力与已有数据的一致性。同时,国外学者提出了更简便的承载力计算方法,通过离心试验对沉桩特性进行了深入研究<sup>[15-19]</sup>。

静压桩多应用于实际工程,工程实践表

明,考虑沉桩过程中的桩侧摩阻力退化对压桩机型的选择具有指导意义,同时在施工完成后可以通过沉桩过程中桩侧摩阻力的变化预测桩基承载力。基于室内模型试验获得的数据通常与实际情况存在一定的差距,应用性不足;而现场试验造价较高,土层情况较为复杂,沉桩过程中理想的试验数据不易获得,难以获得在均质土层的静压桩沉桩特性。因此如何获得均质土层,特别是黏性土中准确的沉桩特性,是目前室内试验亟待解决的问题。基于此,笔者基于桩侧摩阻力退化现象提出了更准确的计算方法,研究表明,侧摩阻力的退化效应较为显著,显著性随沉桩深度的增大逐渐增大;经退化计算的桩侧摩阻力连续性较好,随沉桩深度呈线性增长,耦合效果良好。

1 试验设计原理

1.1 分段沉桩原理

静力沉桩过程中桩侧摩阻力的分布可看作经验性的滑动摩擦模式,基于桩周土体的扰动及桩侧摩阻力退化效应,沉桩过程中桩侧摩擦力的分布形式可近似认为是线性的,将整个桩长划分为  $d_1, d_2, \dots, d_n$  段,上段部分因压桩晃动影响,摩阻力等于0或很小,中段部分由于摩阻力退化数值居中,下段部分最大<sup>[19]</sup>。桩侧摩阻力的分布如图1所示。

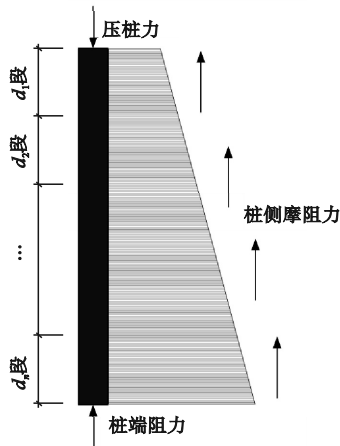


图1 静力沉桩桩侧摩阻力分布

Fig. 1 The lateral friction distribution of static pile jacking

现场试验中静压桩桩长较大,将桩长分为适于操作的  $n$  个等长小桩段,进行分段沉桩,将结果叠加耦合,从而分析整个过程的沉桩特性。

1.2 桩侧摩阻力退化理论

由于静压桩沉桩是一个连续的贯入过程,上部土体会经过多次磨削,导致桩土界面的黏结性降低,法向力减小,最终导致最上部土体产生的桩侧摩阻力减小,即存在着桩侧摩阻力退化现象<sup>[20]</sup>。本试验基于模型箱进行大比尺试验桩的分段沉桩,直接将每一桩段沉桩时的桩侧摩阻力进行叠加会导致总桩侧摩阻力偏小,因此需要对第1桩段沉桩时测得的桩侧摩阻力进行退化后,方可与第2段沉桩的桩侧摩阻力进行叠加后再耦合。而桩侧摩阻力的退化主要受到侧压力、土的性质影响,基于第1桩段沉桩,可以计算出桩侧摩阻力的退化系数  $k$ 。通过对室内沉桩试验<sup>[21-23]</sup>进行总结分析,在对多组不同试验获得的桩侧摩阻力退化情况进行分析后得出:经过1次重复磨削的部分,可将其退化看做1次退化,经过一次退化的桩侧摩阻力值为  $kF_s$ ;同理,对于经过  $n$  次磨削的部分,可以近似将其退化看做  $n$  次退化。

2 试验

2.1 试验模型装置

该静压沉桩模型箱试验系统中的模型箱长×宽×高为  $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ ,由高强度钢板焊接而成;每阶段试验可以完成6个桩段的沉桩,为避免开孔过多影响加压的稳定性与安全性,在模型箱箱盖与加压相同位置处开3孔进行沉桩。

2.2 地基土的制备

试验所用地基土取自青岛市李沧区某基建工程项目现场,根据试验方案安排结合试验地基土制备要求,将取自现场地基的粉质黏土进行分层填入模型箱。取得地基土土样后,基于《土工试验方法标准》(GB/T

50123—1999),进行一系列室内土工试验,以如表1所示。  
获得重塑后的地基土的相关参数,具体参数

表1 土样物理力学参数

Table 1 The physical and mechanical parameters of soil samples

密度 $\rho_0/$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	饱和度 $S_r/\%$	含水率 $w/\%$	土样液限 $w_L/\%$	土样塑 限 $w_p/\%$	液性指数 $I_L/\%$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	压缩模量 $E_{s1-2}/\text{MPa}$
1.96	92.6	23.1	25.8	14.6	0.76	22.3	8.0	5.194

2.3 试验桩的制备与选取

对3根试验桩进行3次静力压桩试验,3根相同试验桩的桩长为1.2 m,桩径为100 mm,管壁厚度为3 mm。3根试验桩桩端均安装有全截面土压力传感器,为闭口桩。一般大直径钢管桩的桩径为3~6 m,桩长为30~50 m,按原型桩桩长为40 m,桩径为5.6 m,弹性模量为210 GPa,根据相似比理论确定几何相似比为40,弹性模量相似比为2.9,泊松比相似比为1,密度相似比为2.9,模型桩选用6063铝制材料制作,设计桩位及桩端距离模型箱内壁的最小值为400 mm (4D,D为桩径),因此可不考虑边界效应。试验桩的具体参数见表2。

表2 试验桩参数

Table 2 The parameters of test pile

外径/ mm	内径/ mm	壁厚/ mm	桩端 形式	弹性模 量/GPa	泊松比
100	94	3	闭口	72	0.3

2.4 试验过程

沉桩试验首先进行第1桩段的沉桩,第1桩段为0~0.85 m段的沉桩,无需上覆加压,在操控台将油压千斤顶移动至桩位1,进行第1段沉桩;然后将一根试验桩直立放对待压桩位,通过水平和垂直方向定位确定管桩竖直直立后,对油泵进行持续加压,观测到千斤顶下降至管桩顶端上部标定位置后停止加压,在管桩桩顶水平中心位置处放置压力传感器,检查传感器传输线路,在压桩试验开始前采集数据,检测确认传感器连接无误。通过控制千斤顶的降落,完成静力沉桩,管桩沉桩速度控制在600 mm/min。

后续桩段的沉桩步骤基本同上,第2、3段沉桩上覆加压数值分别为17 kPa、68 kPa,模拟上覆土层厚度分别为0.85 m、3.4 m。本次试验仅进行3段沉桩。沉桩过程如图2所示。



图2 静力沉桩过程

Fig. 2 The pile jacking process

3 试验结果分析

3.1 桩侧摩阻力

为了直观地反映静压桩在沉桩过程中的桩侧摩阻力的变化曲线,采用直接叠加1~3段沉桩过程的总桩侧摩阻力的方法进行处理,如图3所示。

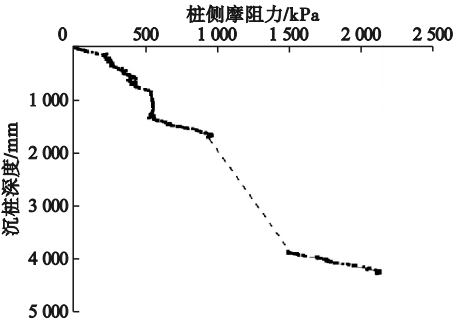


图3 叠加后的桩侧摩阻力

Fig. 3 The lateral resistance of pile after stacking



如果直接将各沉桩桩段的桩侧摩阻力进行叠加,由于每一段的桩侧摩阻力均从0开始增长,会使得叠加后的曲线缺少分析价值。因此通过除第一桩段外的后续桩段沉桩初期桩侧摩阻力较小的部分进行舍去后再进行叠加。可以看出,在连接处前一桩段的桩侧摩阻力要略大于后一桩段的桩侧摩阻力,在第1桩段与第2桩段连接处,桩侧摩阻力的差值约为220.4 kPa,而第3桩段与前一桩段的差值约为500.0 kPa。需要通过对侧摩阻力进行退化后耦合叠加来减小直接叠加产生的误差。

### 3.2 压桩力

通过直接叠加1~3段沉桩的压桩力可以获得一个完整的静压桩沉桩压桩力变化曲线,如图4所示。

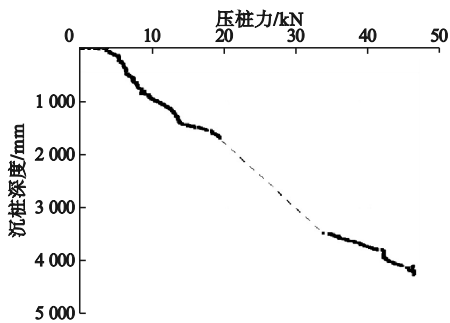


图4 叠加后的压桩力

Fig. 4 The jacking force of pile after stacking

由于每一桩段进行沉桩时,其最表层地基土均存在硬壳现象,导致每一桩段的压桩力在沉桩初期存在突然增大的现象。因此,在进行沉桩相关受力的叠加时,将其开始沉桩时存在迅速增长的部分进行了修正后再进行叠加。可以看出直接叠加的压桩力线性较好,整体增加趋势较为稳定,但直接叠加会导致计算压桩力较小,这是由于桩侧摩阻力未进行退化计算,导致除第1桩段外的后续桩段直接测得的压桩力较实际值偏小。由图4可知,在沉桩深度为0.85 m时,压桩力为8.83 kN;沉桩深度为1.7 m时,压桩力为19.26 kN。相较于深度85 cm处,压桩力增

长了10.43 kN,压桩力的倍数关系与深度的倍数关系相一致。

## 4 受力特性耦合分析

在实际沉桩过程中,浅层土体沉桩过程中经历了长时间的磨削作用,桩-土直接接触面之间的土体受重复剪切作用,接触面不再黏着密实,反映了在沉桩初期浅层土体总桩侧摩阻力变小的现象。通过使用桩侧摩阻力退化系数进行折减计算后,将各桩段叠加耦合可以获得准确的桩侧摩阻力。根据前文中桩侧摩阻力退化的相关理论内容,结合第1段沉桩的数据可以计算得到桩侧摩阻力的退化系数 $k=0.146$ 。

第1段沉桩无上覆土,桩侧摩阻力不存在退化,因此其桩侧摩阻力 $F_{s1}$ 保持原值不变;第2段沉桩时,叠加于其上的第1段沉桩在实际完整沉桩过程中只存在1次退化,因此此时沉桩至1.7 m时的桩侧摩阻力 $F'_{s2}$ 应叠加进行过1次退化的第1段沉桩的桩侧摩阻力值,计算公式如下:

$$F'_{s2} = k \cdot F_{s1} + F_{s2}. \quad (1)$$

式中: $F'_{s2}$ 为第2段叠加后的桩侧摩阻力; $k$ 为桩侧摩阻力的退化系数; $F_{s1}$ 为0~0.85 m内的桩侧摩阻力计算赋值; $F_{s2}$ 为0.85~1.7 m内的桩侧摩阻力计算赋值。

第3段模拟是3.4~4.25 m内的沉桩,对于0~0.85 m内的第1段沉桩,存在着4次退化,对于0.85~1.7 m范围内的第2段沉桩,存在着3次退化,对于1.7~2.55 m与2.55~3.4 m内未进行沉桩的部分,分别应存在着2次与1次退化,对于这两部分的数值采用选取1.7 m与3.4 m时的桩侧摩阻力数值进行一次函数的计算赋值,以保证第3段沉桩的桩侧摩阻力的计算。总的计算公式如下:

$$F'_{s3} = k^4 \cdot F_{s1} + k^3 \cdot F_{s2} + k^2 \cdot F_{s3} + k \cdot F_{s4} + F_{s5}. \quad (2)$$

式中: $F'_{s3}$ 为经过4次退化叠加后的桩侧摩阻

力; $k$ 为桩侧摩阻力的退化系数; $F_{s1}$ 为0~0.85 m内的桩侧摩阻力计算赋值; $F_{s2}$ 为0.85~1.7 m内的桩侧摩阻力计算赋值; $F_{s3}$ 为1.7 m时的桩侧摩阻力计算赋值; $F_{s4}$ 为3.4 m时的桩侧摩阻力计算赋值; $F_{s5}$ 为4.25 m时的桩侧摩阻力计算赋值。

4.1 退化计算后的桩侧摩阻力

同理根据式(1)、式(2)计算可得到第2、3段的退化后的桩侧摩阻力,将其进行叠加耦合,可以得到真实的完整的沉桩过程中的桩侧摩阻力变化曲线,如图5所示。

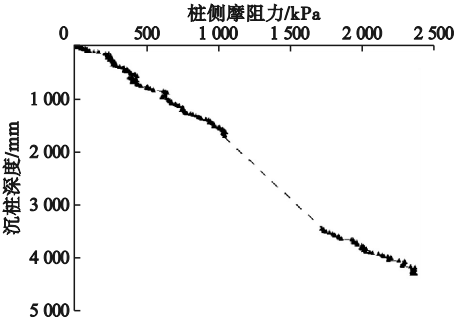


图5 退化计算后的桩侧摩阻力

Fig. 5 The lateral resistance of pile after degradation calculation

由图5可知,相较于直接叠加的桩侧摩阻力,经过退化计算的桩侧摩阻力的不合理突变有所减少,特别是在相邻桩段连接处,可以将相邻两桩段准确地连接起来。这也从侧面反映出了通过使用桩侧摩阻力退化系数经折减计算可以使试验结果更为准确科学。由图5可知,桩侧摩阻力随着沉桩深度的增加表现为正相关增长,沉桩深度为4.25 m时,桩侧摩阻力达到最大值2 109.1 kPa。

随着桩的贯入深度不断增大,与桩接触的桩周围的土壤面积继续增大。由于在上部接触部分产生了连续磨削,减小了桩的侧向摩擦,但桩侧周围的土压力逐渐升高,桩与土体之间的附着力增大,导致桩侧摩阻力持续增大。

将直接叠加的桩侧摩阻力与计算后的桩侧摩阻力进行对比,如图6所示。

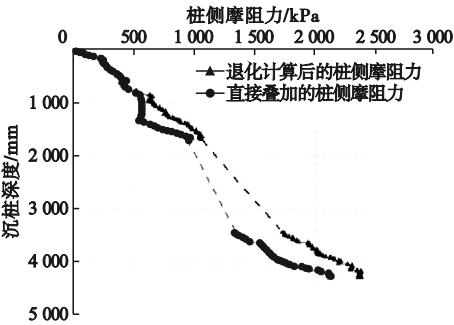


图6 桩侧摩阻力对比

Fig. 6 The comparison result of pile lateral resistance

由图6可知,经过退化计算后的桩侧摩阻力曲线的数值突变有所减少;两条曲线的桩侧摩阻力的退化效应比较明显,且随着沉桩深度的增加,两条曲线的差值逐渐增大,在第2段沉桩部分的修正差值最大为223.87 kPa,而在第3段沉桩部分的修正差值为397.75 kPa。因此,如不考虑侧摩阻力退化效应,将导致所得数值偏小且误差将随着沉桩深度的增大而增大。通过桩侧摩阻力的退化后再叠加耦合,可以对原始数据起到较好的修正与优化作用。在桩沉桩到一定深度后,动摩擦阻力的增长逐渐稳定,显示出侧摩阻力的临界深度现象,反映了沉桩深度影响的极限。

4.2 退化计算后的压桩力

将计算后的桩侧摩阻力与准确的桩端阻力叠加后,可以得到真实的压桩力曲线,如图7所示。

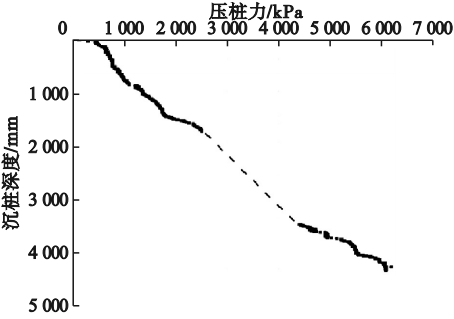


图7 退化计算后的真实压桩力

Fig. 7 The jacking force of pile after degradation calculation

由图7可知,沉桩过程中的真实压桩力随着沉桩深度的增大呈波动性增长趋势,这

也说明了压桩力主要受到土层性质的影响;由于地基土取自试验场地的粉质黏土层,存在不均匀性,因此曲线存在着波动性。压桩力在压桩中前期的增长速度小于压桩后期,是因为在本试验条件下,沉桩开始阶段压桩荷载较小,桩端阻力在突破上覆“硬壳”后,桩端阻力值变化不大,随着贯入深度增加,压桩荷载明显增大,桩端阻力与桩侧摩阻力也显著增加,导致了压桩力的增长速度的增加。随着沉桩深度不断增加,压桩力的增长速度逐渐增快,这主要与桩侧摩阻力的快速增长有关。

将直接叠加的压桩力与计算后的压桩力进行对比,如图8所示。

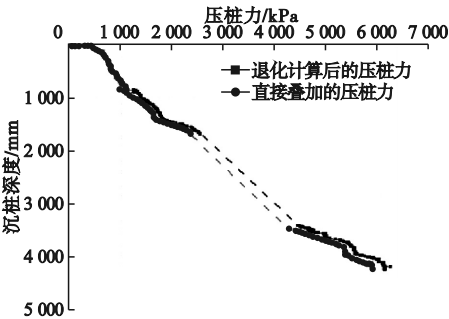


图8 压桩力对比

Fig. 8 Comparison result of pile jacking forces

由图8可知,由于压桩力的总体数值较大,在该坐标系下,修正前后的压桩力数值差距不大,这主要是因为压桩力修正的差值完全来自于桩侧摩阻力的修正,在压桩力中桩侧摩阻力的占比始终低于50%,因此修正的数值对压桩力的影响较小。退化计算后的压桩力的增长速度较为均匀;在沉桩深度范围内未达到临界深度。

4.3 单位侧摩阻力的叠加计算

通过分段沉桩获得的总桩侧摩阻力进行计算后,可以获得单位侧摩阻力的分布曲线,如图9所示。

由图9可知,桩侧摩阻力具有“退化效应”,主要原因是沉桩的深度越深,在相同深度下的重复磨削作用将持续的时间就越长。

同时,反复研磨也会导致水平方向上释放应力,所有这些都导致了桩侧摩阻力减小。在不同的贯入深度处,单位侧摩阻力的变化趋势相似,在不同上覆土重的作用下,其单位侧摩阻力呈现与上覆土重比例一致的变化特性。

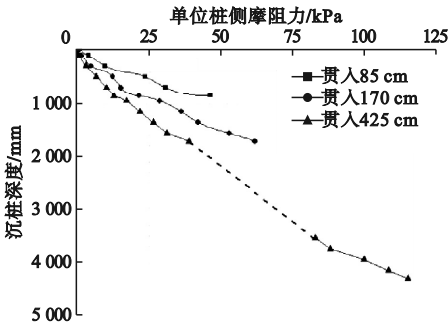


图9 单位桩侧摩阻力的分布曲线

Fig. 9 The distribution curve of the unit side friction resistance

5 结 论

(1)通过退化计算获得桩侧摩阻力的不合理突变有所减少,甚至为0;在相邻桩段连接处,可以将相邻两桩段更为准确地进行耦合;沉桩深度逐渐加深,桩侧摩阻力也逐渐变大,二者基本呈线性增长,在沉桩深度达到最大时,桩侧摩阻力达到最大值2 109.1 kPa。

(2)对比退化修正前后的桩侧摩阻力和压桩力,发现桩侧摩阻力的退化效应十分显著;随着沉桩深度的增加,受桩侧摩阻力退化效应影响产生的差值也逐渐增长;考虑桩侧摩阻力的退化,再叠加耦合成桩的整体桩侧摩阻力曲线,可以避免因分段沉桩直接叠加产生的桩侧摩阻力偏小的问题。

参考文献

[1] 张明义,时伟,章伟,等.地基基础工程[M].北京:科学出版社,2017.  
(ZHANG Mingyi, SHI Wei, ZHANG Wei, et al. Ground foundation engineering [M]. Beijing: Science Press, 2017.)

[2] 宰金珉. 塑性支承桩——卸荷减沉桩的概念及其工程应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 273-278.  
(ZAI Jinmin. Concept of plastically bearing

- pile and its practical application [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2001, 23(3): 273 – 278. )
- [3] 龚维明, 蒋永生, 施明征, 等. 高层建筑桩基逆作法应用研究 [J]. 建筑结构学报, 2000, 21(3): 69 – 76.  
(GONG Weiming, JIANG Yongsheng, SHI Mingzheng, et al. Study on the application of reverse pile foundation method for high-rise buildings [J]. Journal of building structures, 2000, 21(3): 69 – 76. )
- [4] 宰金珉, 杨嵘昌. 复合桩基承台下土的极限承载力提高值理论解 [J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 39 – 48.  
(ZAI Jinmin, YANG Rongchang. Theoretical solution of increasing ultimate bearing capacity of soil under composite pile foundation [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 1997, 19(4): 39 – 48. )
- [5] 刘俊龙. 砾卵石层中预制桩的承载性状研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1280 – 1284.  
(LIU Junlong. Research on bearing behavior of precast piles in gravel layer [J]. Rock and soil mechanics, 2008, 29(5): 1280 – 1284. )
- [6] 钟建敏. 预制桩沉桩挤土引起的桩基质量问题与处理 [J]. 建筑结构, 2017, 47(增刊2): 458 – 463.  
(ZHONG Jianmin. Pile foundation quality problems caused by precast pile driving and soil squeezing and treatment [J]. Building structure, 2017, 47(S2): 458 – 463. )
- [7] YU H S, HOULSBY G T. Finite cavity expansion in dilatant soil: loading analysis [J]. Geotechnique, 1991, 41(2): 173 – 183.
- [8] CAO L F, TEH C I, CHANG M F. Undrained cavity expansion in modified cam clay I: theoretical analysis [J]. Geotechnique, 2001, 51(4): 323 – 334.
- [9] 罗战友. 静压桩挤土效应及施工措施研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
(LUO Zhanyou. Study on compacting effects and construction measures of jacked pile [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. )
- [10] 罗战友, 龚晓南, 王建良, 等. 静压桩挤土效应数值模拟及影响因素分析 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(7): 992 – 996.  
(LUO Zhanyou, GONG Xiaonan, WANG Jianliang, et al. Numerical simulation and analysis of influencing factors of soil compaction effect of static piles [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2005, 39(7): 992 – 996. )
- [11] 汪敏, 储召军, 石少卿, 等. 基于应变路径法的压入管桩单桩挤土位移 [J]. 后勤工程学院学报, 2015, 31(4): 23 – 30.  
(WANG Min, CHU Zhaojun, SHI Shaoqing, et al. Squeeze displacement of a single pile pressed into the pipe pile based on the strain path method [J]. Journal of logistics engineering university, 2015, 31(4): 23 – 30. )
- [12] LI L, LI J P, SUN D A, et al. Time-dependent bearing capacity of a jacked pile: an analytical approach based on effective stress method [J]. Ocean engineering, 2017, 143: 177 – 185.
- [13] CHIN J T, POULOS H G. Tests on model jacked piles in calcareous sand [J]. Geotechnical testing journal, 1996, 19(2): 164 – 180.
- [14] LEHANE B M, GAVIN K G. Base resistance of jacked pipe piles in sand [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2001, 127(6): 473 – 480.
- [15] YASUFUKU N, OCHIAI H, OHNO S. Pile end-bearing capacity of sand related to soil compressibility [J]. Soils and foundations, 2001, 41(4): 59 – 71.
- [16] PAUL M, SAHU R B, BANERJEE G. Undrained pore pressure prediction in clayey soil under cyclic loading [J]. International journal of geomechanics, 2015, 15(5): 1 – 11.
- [17] NICOLA A D E, RANDOLPH M F. Centrifuge modelling of pipe piles in sand under axial loads [J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 295 – 318.
- [18] LEHANE B M, WHITE D J. Lateral stress changes and shaft friction for model displacement piles in sand [J]. Canadian geotechnical journal, 2005, 42(4): 1039 – 1052.
- [19] WENG X, ZHAO Y, LOU Y, et al. Application of fiber bragg grating strain sensors to a centrifuge model of a jacked pile in collapsible loess [J]. Geotechnical testing journal, 2016, 39(3): 362 – 370.
- [20] 胡永强, 汤连生, 李兆源. 静压桩桩 – 土界面滑动摩擦机制研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1288 – 1294.  
(HU Yongqiang, TANG Liansheng, LI Zhaoyuan. Research on the sliding friction mechanism of the pile-soil interface of the static pressure pile [J]. Rock and soil mechanics, 2015, 36(5): 1288 – 1294. )
- [21] 李发明, 陈竹昌, 刘利民. 桩侧阻力的几种退化效应简述 [J]. 土工基础, 1998, 12(1): 41 – 46.  
(LI Faming, CHEN Zhuchang, LIU Limin. Brief description of several degradation effects of pile side resistance [J]. Geotechnical foundation, 1998, 12(1): 41 – 46. )
- [22] 王永洪, 张明义, 刘雪颖, 等. 基于桩土界面的静压沉桩效应与承载特性室内试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42(10): 157 – 165.  
(WANG Yonghong, ZHANG Mingyi, LIU Xueying, et al. Laboratory experimental study of pile jacking-in effects and capacity characteristics based on pile-soil interface [J]. Journal of building structures, 2021, 42(10): 157 – 165. )
- [23] 王鹏, 张明义, 王永洪, 等. 静压桩荷载传递机制的室内模型试验研究 [J]. 工程建设, 2017, 49(7): 9 – 13.  
(WANG Peng, ZHANG Mingyi, WANG Yonghong, et al. Indoor model test study on static pressure pile load transfer mechanism [J]. Engineering construction, 2017, 49(7): 9 – 13. )
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)