

DOI:10.11784/tdxbz202410004

## 海上风电大型单桩打入过程桩周土体弱化研究

刘 润, 苏春阳, 梁 超

(天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 打桩是海洋工程钢管桩的主要安装方式, 高能量的连续锤击会使桩周土体强度降低, 有效降低了打桩的难度, 但随着桩基及配套施工设备不断向大型化发展, 打桩过程对桩周土体的扰动加剧, 精准预测桩周土体的强度弱化规律是打桩过程控制的关键. 针对此问题, 在打桩分析软件中引入现有的 8 种不同桩周土体强度折减方法, 开展了打桩分析计算, 通过与打桩记录的对比, 发现现有方法无法精准模拟大直径单桩打桩过程中桩周土体的弱化规律. 随后, 开展了桩-土界面循环剪切试验, 研究界面粗糙度、初始法向应力、往复循环次数等因素对打桩过程中桩周土体强度弱化的影响. 试验结果表明: 循环剪切试验可以有效模拟打桩过程中桩周土体的强度弱化现象, 桩周土体强度会随着循环次数的增加而不断减小并最终稳定至残余强度; 初始法向应力越大, 桩周土体强度弱化程度越低; 桩-土界面粗糙度越高, 桩周土体强度弱化程度越高. 同时, 基于对大量海上风电大直径钢管桩打桩记录的反分析, 提出了考虑桩-锤-土共同作用下大直径钢管桩桩周土体强度弱化的模拟方法, 并验证了该方法的可靠性.

**关键词:** 桩基础; 打桩; 土体强度弱化; 循环剪切试验

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)07-0740-11

## Influences of Offshore Wind Turbine Large-Diameter Single-Pile Driving Process on Weakening of Soil Strength Around Pile

Liu Run, Su Chunyang, Liang Chao

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Pile driving is the main installation method for steel pipe piles in marine engineering. High-energy continuous hammering can reduce the strength of soil around the pile, effectively reducing the difficulty in pile driving. However, as pile foundations and supporting construction equipment continue to develop towards larger sizes, the disturbance of soil around the pile during the pile driving process will intensify. Therefore, accurately predicting the strength weakening law of soil around the pile is the key to controlling the pile driving process. Aimed at this issue, eight different methods for reducing the strength of soil around the pile were introduced into the pile driving analysis software, and analyses and calculations were carried out. Through a comparison with the pile driving records, it was found that the existing methods cannot accurately simulate the weakening law of soil around the pile during the process of large-diameter single-pile driving. Subsequently, cyclic shear tests were conducted on the pile-soil interface to investigate the effects of factors such as interface roughness, initial normal stress and the number of reciprocating cycles on the weakening of soil strength around the pile during the pile driving process. Test results showed that cyclic shear tests can effectively simulate the weakening phenomenon of soil strength around the pile during the pile driving process, and the strength of soil around the pile will continuously decrease with the increasing number of cycles and eventually stabilize to the residual strength. The greater the initial normal stress, the lower the degree of weakening of soil strength around the pile. In comparison, the higher the roughness of pile-soil interface, the greater the degree of

收稿日期: 2024-10-09; 修回日期: 2025-01-08.

作者简介: 刘 润(1974—), 女, 博士, 教授, liurun@tju.edu.cn.

通信作者: 梁 超, liangchao@tju.edu.cn.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51825904).

Supported by the Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (No. 51825904).

weakening of soil strength around the pile. Meanwhile, based on the back analysis of a large number of offshore wind turbine large-diameter steel pipe pile driving records, a simulation method considering the weakening of soil strength around large-diameter steel pipe piles under the joint action of pile-hammer-soil was proposed, and its reliability was verified.

**Keywords:** pile foundation; pile driving; soil strength weakening; cyclic shear test

桩基础是目前海上风电场中应用最广泛的基础形式<sup>[1]</sup>。目前,海上风电桩基具有大直径、超长和贯入深度大等特点<sup>[2-4]</sup>,直径通常不小于5 m,贯入海床下深度常接近甚至超过100 m,此类海上桩基可归类为大直径超长桩。在海洋桩基工程中,桩基通常采用锤击法或者振动下沉进行安装,但是长时间动力沉桩会导致土体强度的弱化与桩侧摩阻力大幅衰减,存在安全隐患,因此有必要开展动力沉桩研究。

Seed等<sup>[5]</sup>通过沉桩试验发现土体强度只有初始强度的30%。王戌平<sup>[6]</sup>在沉桩试验中发现沉桩结束时桩身侧摩阻力只能达到初始强度的25%~65%。朱斌等<sup>[7]</sup>对钱塘江的饱和粉砂土进行了静力触探研究,发现打桩会造成地表以下1~2 m范围内土强度的明显降低。Hwang等<sup>[8]</sup>基于沉桩试验发现土体弱化与土质相关。Airhart等<sup>[9]</sup>通过沉桩试验以及三轴试验研究了桩周土体强度弱化现象。杨国权等<sup>[10]</sup>采用小孔扩张理论研究发现锤击法施工方式会明显降低桩基承载力。刘润等<sup>[11-12]</sup>通过定量分析了土体强度弱化,并验证了准确性。刘润等<sup>[13]</sup>和孟祥然<sup>[14]</sup>研究了在打桩过程中土塞的发育对桩可打入性的影响。Yan等<sup>[15]</sup>发现砂性土不易发生强度弱化程度。在打桩工程中,进行桩的可打入分析时需要对其土体的强度进行一定程

度的折减。对于小直径桩(直径小于2 m),常用的桩周土体强度折减方法较多<sup>[16]</sup>。

综上所述,对于打桩过程中桩周土体强度弱化的研究较多,但针对大直径桩并考虑多因素影响的研究较少。因此,本文针对大直径桩开展桩周土体强度弱化规律研究,基于室内桩-土界面循环剪切试验,研究界面粗糙度、初始法向应力、往复循环次数等因素对土体强度弱化的影响,并结合打桩记录反分析,提出评估海上大型桩贯入时土体强度弱化方法。

## 1 现有桩周土体强度弱化公式分析

本文将现有的适用于评估小直径桩桩周土体强度弱化的经验公式<sup>[14,16-17]</sup>用于大直径桩的打桩分析,并与实际打桩记录进行对比。

### 1.1 工程概况

#### 1.1.1 工程实例1

实例1为某海上风电场单桩基础,桩长 $L=72.0$  m,设计入泥深度 $H=44.0$  m,桩径 $D$ 取值范围为5.5~6.2 m,选用MHU1900S型打桩锤,额定锤击能量为1900 kJ。地质参数见表1。

表1 地质参数(实例1)

Tab.1 Geological parameters (Case 1)

土层层号	土层名称	层底深度/m	有效容重/(kN/m <sup>3</sup> )	不排水强度/kPa	内摩擦角/(°)	桩侧单位阻力/kPa	桩端单位阻力/MPa
1	粉砂	2.50	9.5	—	31	15	—
2	粉土	4.68	9.1	17	24	10	—
3	粉质黏土	7.42	8.8	21	—	10	—
4	粉砂	8.30	9.4	—	28	30	1.0
5	粉质黏土	9.96	8.7	30	—	35	0.5
6	粉质黏土	12.78	8.7	26	—	24	0.3
7	粉砂	16.22	9.2	—	30	46	1.8
8	粉质黏土	21.04	8.7	55	—	43	1.0
9	粉砂	22.10	9.1	—	29	48	1.9
10	粉质黏土	26.34	9.3	53	—	55	1.5
11	粉质黏土	28.60	10.1	70	—	60	1.8
12	粉砂	32.78	9.5	—	36	81	4.8
13	粉砂	33.86	9.4	—	30	67	2.9
14	粉砂	36.74	9.5	—	35	81	4.8
15	粉质黏土	42.10	9.3	100	—	68	2.2
16	粉砂	49.36	9.3	—	34	81	4.8

注:“—”表示不涉及某参数。

1.1.2 工程实例 2

实例 2 为某海上风电场单桩基础, 桩长  $L = 67.4 \text{ m}$ , 设计入泥深度  $H = 40.0 \text{ m}$ , 桩径  $D$  取值范围为  $5.5 \sim 6.2 \text{ m}$ , 同样选用 MHU1900S 型打桩锤, 地质参数见表 2.

1.1.3 工程实例 3

实例 3 为某海上风电场单桩基础, 桩长  $L = 69.2 \text{ m}$ , 设计入泥深度  $H = 41.7 \text{ m}$ , 桩径  $D$  取值范围为  $5.5 \sim 6.2 \text{ m}$ , 也选用 MHU1900S 型打桩锤, 地质参数见表 3.

表 2 地质参数(实例 2)

Tab.2 Geological parameters (Case 2)

土层层号	土层名称	层底深度/m	有效容重/(kN/m <sup>3</sup> )	不排水强度/kPa	内摩擦角/(°)	桩侧单位阻力/kPa	桩端单位阻力/MPa
1	粉砂	1.18	9.5	—	30	15	—
2	粉砂	7.76	9.1	30	28	10	—
3	粉砂	11.40	9.4	—	29	25	0.9
4	粉砂	14.82	9.2	—	31	40	1.5
5	粉土	16.84	9.4	—	26	45	1.6
6	粉砂	17.84	9.2	—	28	48	1.7
7	粉质黏土	22.68	8.7	50	—	42	1.0
8	粉砂	24.34	9.1	—	30	50	2.1
9	粉质黏土	30.48	9.3	55	—	60	1.5
10	粉质黏土	34.80	10.1	80	—	65	2.0
11	粉砂	42.44	9.5	—	37	96	9.6

表 3 地质参数(实例 3)

Tab.3 Geological parameters (Case 3)

土层层号	土层名称	层底深度/m	有效容重/(kN/m <sup>3</sup> )	不排水强度/kPa	内摩擦角/(°)	桩侧单位阻力/kPa	桩端单位阻力/MPa
1	淤泥	1.16	6.0	3	—	2	—
2	粉砂	1.80	9.5	—	27	15	—
3	粉土	5.10	9.1	25	24	10	—
4	粉质黏土	6.94	8.8	23	—	10	—
5	粉土	8.32	9.2	40	25	15	—
6	粉土	10.08	9.4	—	31	25	0.8
7	粉砂	19.88	9.2	—	32	45	1.5
8	粉质黏土	23.10	9.6	—	29	48	1.9
9	粉土	24.72	9.1	—	33	67	2.9
10	粉质黏土	28.08	9.3	55	—	60	1.5
11	粉质黏土	30.10	10.1	85	—	65	1.9
12	粉砂	35.90	9.7	—	36	81	4.8
13	粉质黏土	36.58	9.1	115	—	64	2.2
14	粉砂	38.38	9.7	—	38	96	9.6
15	粉质黏土	40.50	9.8	110	—	68	2.2

1.2 打桩分析与打桩记录对比

分别采用如式(1)~(10)所示的 8 种不同的桩周土体强度弱化经验公式<sup>[14,16-17]</sup>计算土体强度折减因子  $\beta_s$ , 并将其引入到打桩软件 GRLWEAP 中进行打桩分析, 此处  $\beta_s$  为桩周土体经过打桩扰动后的残余强度值与初始强度值之比.

线性公式 1 和线性公式 2<sup>[16]</sup>分别为

$$\beta_s = \frac{z}{Y} \quad (1)$$

$$\beta_s = \frac{z}{Y-5} \quad (2)$$

式中:  $z$  为土层深度, m;  $Y$  为桩的最大贯入深度, m.

非线性公式 1 和非线性公式 2<sup>[16]</sup>分别为

$$\beta_s = \left(\frac{z}{Y}\right)^2 \quad (3)$$

$$\beta_s = \left(\frac{z}{Y-5}\right)^2 \quad (4)$$

指数公式 1 和指数公式 2<sup>[16]</sup>分别为

$$\beta_s = e^{-0.04(Y-z)} \quad (5)$$

$$\beta_s = e^{-0.04(Y-5-z)} \quad (6)$$

常系数公式<sup>[14]</sup>为

$$\beta_s = 1 - f_s^* + f_s^* f_{GL} \quad (7)$$

$$f_s^* = \frac{1 - \frac{1}{f_s}}{1 - \frac{1}{f_{sx}}} \quad (8)$$

式中： $f_s$  为恢复系数，仅与土的类型有关且为定值； $f_s^*$  为相对土/桩敏感系数； $f_{sx}$  为桩周土体中最灵敏土层的恢复系数； $f_{GL}$  为阻力恢复系数，与最灵敏土层保持一致。

多因素公式<sup>[14,17]</sup>为

$$\beta_{s1} = 0.535 + 4 \times 10^{-4} \times K_0 \sum (\gamma'_i z_i) \quad (9)$$

$$\beta_{s2} = 0.77 + 2.5 \times 10^{-4} \times K_0 \sum (\gamma'_i z_i) \quad (10)$$

式中： $\beta_{s1}$  和  $\beta_{s2}$  分别为黏土和砂土的折减因子； $K_0$  为静止土压力系数； $\gamma'_i$  为第  $i$  层土体的有效容重，

$\text{kN/m}^3$ ； $z_i$  为第  $i$  层土层深度，m。

在计算过程中，除相关土体参数以及桩身参数，还需要输入桩侧面和桩端的弹限  $q_s$ 、 $q_p$  以及阻尼常数  $J_s$ 、 $J_p$ ； $q_s$  取 2.5 mm；对于  $q_p$ ，建议根据土质的坚硬程度设置为  $D/120$  或  $D/60$ ；对于砂土， $J_s$  通常取 0.15 s/m，对于黏土， $J_s$  取 0.65 s/m； $J_p$  均取为 0.50 s/m。将分析结果与不考虑土体强度弱化时的打桩分析结果及实际工程打桩记录进行对比，如图 1 所示。

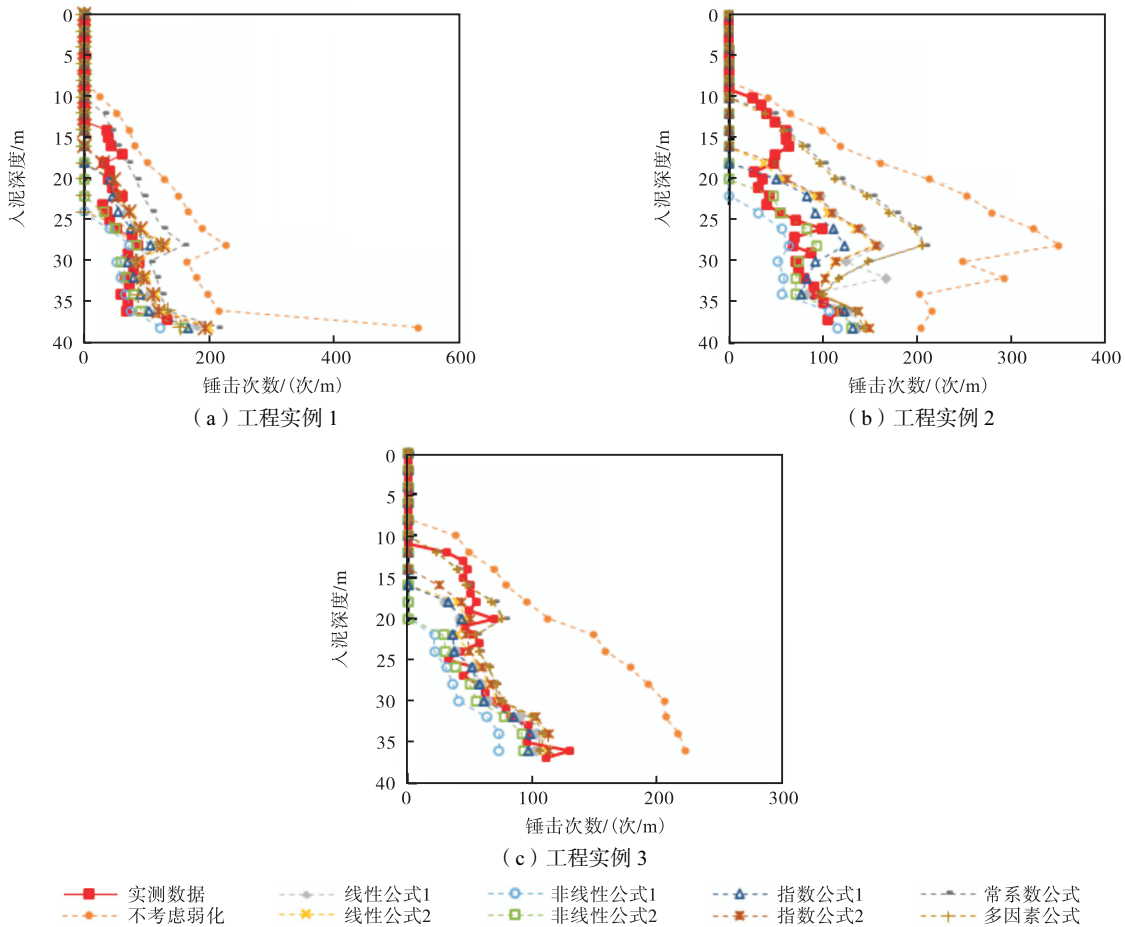


图 1 打桩分析结果

Fig.1 Analysis results of pile driving

根据图 1，不考虑弱化的锤击次数远高于实测打桩记录的结果，可知打桩造成的桩周土体强度弱化不容忽视。对比多种土体强度弱化经验公式的打桩分析结果可知，当桩的入土深度较浅时采用常系数法的分析结果更接近实测结果。随着桩基贯入深度的增加，常系数法计算结果的准确性降低，此时采用考虑土层埋深影响的经验公式能更好地模拟土体强度弱化，尤其是非线性公式模拟效果最好，线性公式与指数公式次之。这说明在打桩过程中，随着桩基贯入深度的增加，土性对土体强度的影响逐渐减弱，土层埋深的影响逐渐增强。由此可见，考虑单一因素评估土

体强度弱化的方法不具有普适性，同时考虑土性和埋深影响的多因素公式<sup>[14,17]</sup>模拟效果好于其他公式。

由图 1 可以看出，无论采用哪种现有的经验公式进行打桩分析，其计算结果均与实测值存在明显差异，原因在于现有的经验公式均是基于小直径桩提出的。

## 2 影响桩周土强度弱化的因素分析

### 2.1 桩-土界面循环剪切试验

#### 2.1.1 试验准备

为研究循环作用下桩-土界面剪切特性，使用的

试验设备为 TKA-DDS-5F 型全自动循环直剪仪。

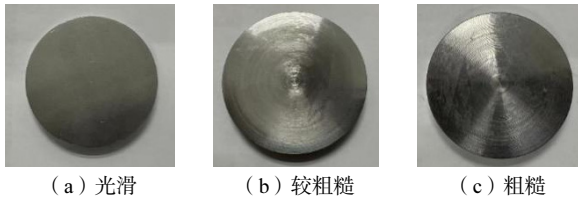
试验选用海相粉质黏土, 土体参数见表 4。

表 4 试验土体物理参数

Tab.4 Physical parameters of soil for testing

比重 $G_s$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	密度 $\rho/$ ( $g/cm^3$ )	孔隙比 $e$	干密度 $\rho_d/$ ( $g/cm^3$ )	含水率 $w/\%$
2.73	37.60	17.27	1.90	0.95	1.40	35.7

为研究不同界面粗糙度对剪切过程中土体弱化的影响, 分别定制了不同表面粗糙度的钢板, 如图 2 所示。



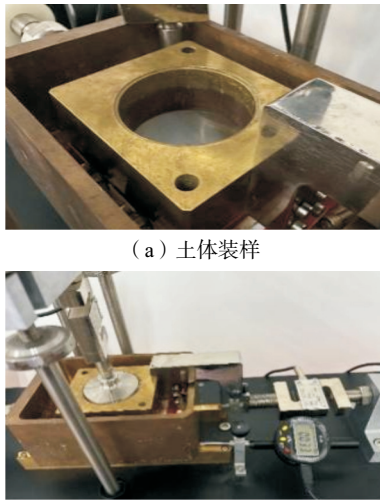
(a) 光滑 (b) 较粗糙 (c) 粗糙

图 2 不同粗糙度钢板

Fig.2 Steel plates with different roughnesses

2.1.2 试验方案

为研究界面粗糙度、初始法向应力、往复循环次数等因素对打桩过程中土体强度弱化的影响, 开展了多组循环直剪试验。图 3 所示为试验过程, 具体试验方案见表 5。



(a) 土体装样

(b) 循环直剪

图 3 试验过程

Fig.3 Testing process

表 5 循环直剪试验方案

Tab.5 Schemes for cyclic direct shear test

试验方案	界面粗糙度	初始法向应力/kPa
1	光滑	100, 150, 200, 250, 300
2	较粗糙	100, 150, 200, 250, 300
3	粗糙	100, 150, 200, 250, 300

2.1.3 试验结果

1) 循环剪切位移-剪应力曲线

根据表 5 试验方案得到了不同条件下循环剪切

位移-剪应力曲线, 以试验方案 1 为例进行分析, 结果如图 4 所示。

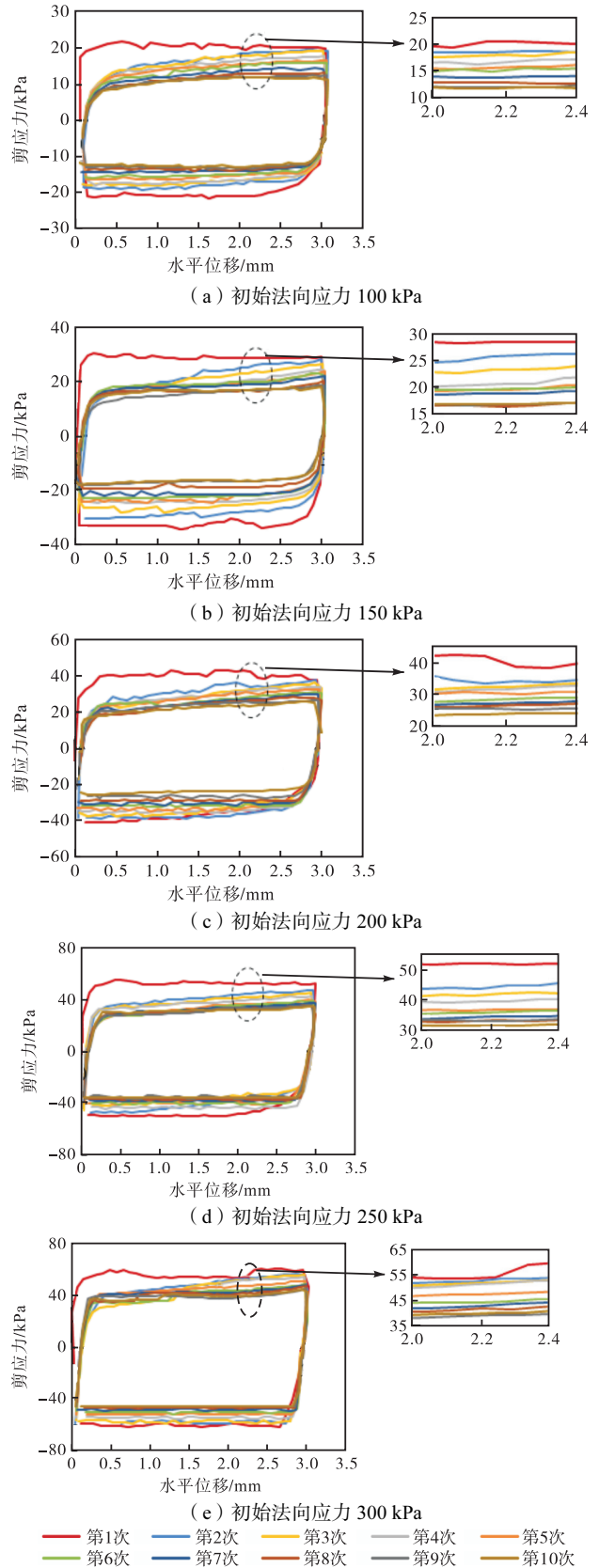


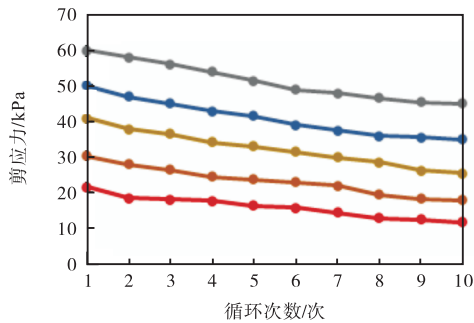
图 4 光滑界面条件下剪切位移-剪应力曲线

Fig.4 Curves of shear displacement vs shear stress under smooth interface conditions

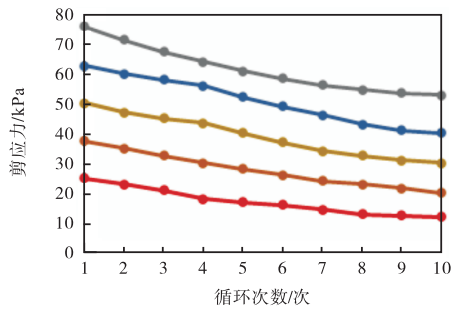
根据图 4 可以看出,循环剪切试验可以有效模拟打桩过程中桩周土体强度弱化.随着循环剪切次数的增加,滞回圈逐渐缩减,说明剪应力在循环剪切过程中不断降低,同时每次循环后滞回圈之间的间隙也逐渐减小,说明每次循环造成的剪应力降低幅度在逐渐减小,最终达到稳定的残余强度.

2) 初始法向应力的影响

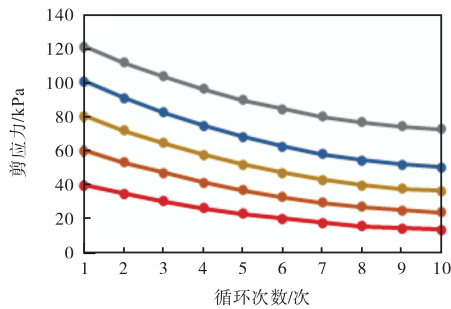
对比各试验组不同法向应力作用下循环剪切后土体的残余强度以及  $\beta_s$ , 以此研究不同打桩贯入深度对桩周土体强度弱化的影响.剪应力-循环次数曲线如图 5 所示.



(a) 试验 1



(b) 试验 2



(c) 试验 3

—●— 100 kPa —●— 150 kPa —●— 200 kPa —●— 250 kPa —●— 300 kPa

图 5 剪应力-循环次数曲线

Fig.5 Curves of shear stress vs cycle times

由图 5 可以看出,剪应力随着循环次数增加而逐渐减小,各试验组曲线整体均成下降趋势,但下降趋势逐步放缓,在曲线末尾段近似成水平趋势,说明各

试验组在循环剪切作用后,土体强度趋于稳定的残余强度.

$\beta_s$  与初始法向应力关系曲线如图 6 所示.

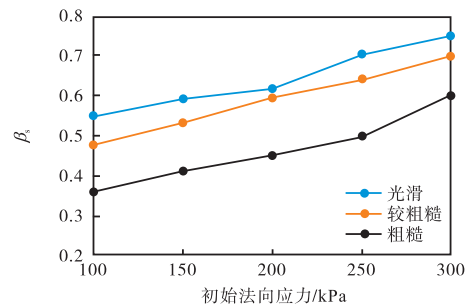


图 6  $\beta_s$ -初始法向应力关系曲线

Fig.6 Curves of  $\beta_s$  vs initial normal stress

由图 6 可以看出,随着初始法向应力的增加, $\beta_s$  不断增大,说明初始法向应力越大,土体强度弱化程度越低,原因主要是初始法向应力越大,土体的上覆压力越大,土体被压缩得越密实,土体结构更为紧密牢靠,因此在往复剪切过程中土体结构更不容易发生破坏,进而导致土体强度弱化程度降低.

3) 界面粗糙度的影响

对比各试验组不同界面粗糙度下的  $\beta_s$  以研究界面粗糙度对打桩过程中桩周土体强度弱化的影响,结果如图 7 所示.

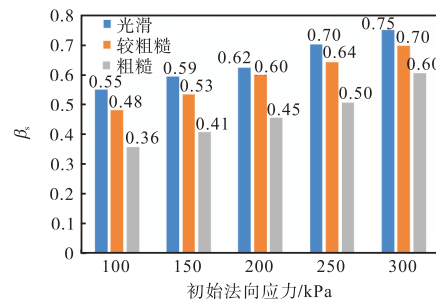


图 7 不同界面粗糙度下  $\beta_s$

Fig.7 Values of  $\beta_s$  under different interface roughnesses

由图 7 可以看出,在同一初始法向应力作用下,界面粗糙度越高, $\beta_s$  越小,说明界面越粗糙,土体强度弱化程度越高,原因主要是界面越粗糙,在循环剪切过程中桩-土界面被破坏程度越高,土体结构破损更加严重,进而导致土体强度弱化程度增加.

综上所述,在实际打桩工程中,桩周土体的强度弱化与初始法向应力、界面粗糙度、往复循环次数均有着密切关系.在打桩过程中,桩周土体强度会随着循环次数的增加而不断减小,最终稳定至残余强度.初始法向应力越大,桩周土体强度弱化程度越低,而桩-土界面粗糙度越高,桩周土体强度弱化程度越高.

### 2.2 工程实例反分析

大量的实测打桩记录显示,打桩的难易程度不仅与桩的贯入深度、锤击次数、桩-土界面等因素相关,还受到土性、桩体质量、锤击能量的影响,即其是多个因素共同作用的结果.因此,以下对实际工程的打桩记录进行反分析,探讨不同因素对于打桩过程中土

体强度弱化的影响规律.

#### 2.2.1 土性及桩基贯入深度的影响

某海上风电场桩基工程中,不同机位桩的贯入深度设计有所不同,因此可以就相似场地开展打桩反分析.地质参数及打桩参数如表 6~8 所示.

表 6 地质参数(实例 4)

Tab.6 Geological parameters(Case 4)

土层层号	土层名称	层底深度/m	有效容重/(kN/m <sup>3</sup> )	不排水强度/kPa	内摩擦角/(°)	桩侧单位阻力/kPa	桩端单位阻力/MPa
1	粉砂	7.5	20.4	6.7	36.8	25	—
2	粉土	13.7	19.3	8.3	35.7	35	—
3	粉砂	20.3	20.1	7.0	36.7	42	—
4	淤泥质黏土	29.6	18.2	12.8	26.1	26	—
5	粉砂	37.2	19.8	9.0	36.4	40	—
6	粉质黏土	38.0	18.6	20.1	13.2	46	—
7	粉砂	54.0	20.4	7.2	36.6	66	4
8	粉质黏土	58.0	20.1	4.0	33.8	72	—
9	粉质黏土	60.0	19.2	35.6	16.0	55	—
10	粉质黏土	73.0	19.0	26.5	17.7	56	5

表 7 地质参数(实例 5)

Tab.7 Geological parameters(Case 5)

土层层号	土层名称	层底深度/m	有效容重/(kN/m <sup>3</sup> )	不排水强度/kPa	内摩擦角/(°)	桩侧单位阻力/kPa	桩端单位阻力/MPa
1	粉砂	8.1	20.4	6.7	36.8	25	—
2	粉砂	19.2	20.1	7.0	36.7	42	—
3	淤泥质黏土	32.2	18.2	12.8	26.1	26	—
4	粉质黏土	43.7	18.6	20.1	13.2	46	—
5	粉质黏土	52.0	19.2	35.6	16.0	55	—
6	粉砂	65.0	20.2	6.7	36.9	72	4.5
7	粉砂	76.6	20.3	7.5	36.8	78	5.0

表 8 工程实例 4、5 打桩参数

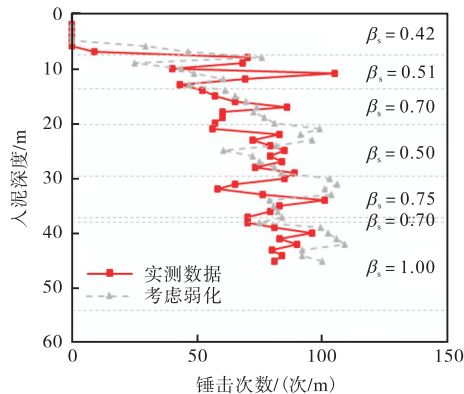
Tab.8 Pile driving parameters(Cases 4 and 5)

工程实例编号	桩长/m	桩径/m	打桩锤型号	入泥深度/m
4	69.0	7.0	IHC-S1400	45.1
5	72.0	7.0	IHC-S1400	64.0

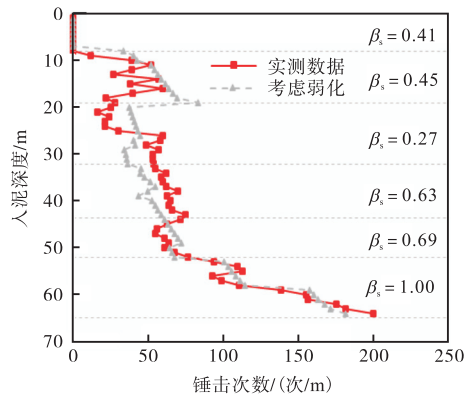
采用 GRLWEAP 软件进行打桩反分析,得到的  $\beta_s$  的取值与打桩反分析结果如图 8 所示.

由图 8 的打桩反分析结果可以横向对比两场地在 10 m 处以及 40 m 处的土体  $\beta_s$ ,可以看出同一深度下黏性土的强度弱化程度大于非黏性土体,其原因主要是无黏性土的渗透性更强,土体中的超孔隙水消散快.

同时土层埋深也会影响土体的强度弱化程度,埋深越深,  $\beta_s$  越大,在接近桩的设计深度处,土体强度



(a) 工程实例 4



(b) 工程实例 5

图 8 工程实例 4、5 打桩反分析结果

Fig.8 Back analysis results of pile driving(Cases 4 and 5)

基本不出现弱化,说明浅层土体相较于深层土体的强度弱化程度更高.

2.2.2 桩身质量的影响

为研究桩身质量在打桩过程中对土体强度弱化

的影响,通过控制变量的方法,对相同打桩锤作用下的桩基贯入实例进行分析对比,地质参数及打桩参数如表 9~11 所示.

表 9 地质参数(实例 6)

Tab.9 Geological parameters (Case 6)

Table with 8 columns: 土层层号, 土层名称, 层底深度/m, 有效容重/(kN/m³), 不排水强度/kPa, 内摩擦角/(°), 桩侧单位阻力/kPa, 桩端单位阻力/MPa. Rows 1-7 showing soil layers from 粉砂 to 粉砂.

表 10 地质参数(实例 7)

Tab.10 Geological parameters (Case 7)

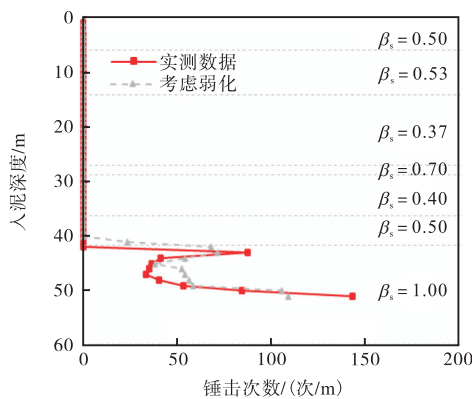
Table with 8 columns: 土层层号, 土层名称, 层底深度/m, 有效容重/(kN/m³), 不排水强度/kPa, 内摩擦角/(°), 桩侧单位阻力/kPa, 桩端单位阻力/MPa. Rows 1-6 showing soil layers from 淤泥质黏土 to 粉砂.

表 11 工程实例 6、7打桩参数

Tab.11 Pile driving parameters (Cases 6 and 7)

Table with 5 columns: 工程实例编号, 桩长/m, 桩径/m, 打桩锤型号, 入泥深度/m. Rows for cases 6 and 7.

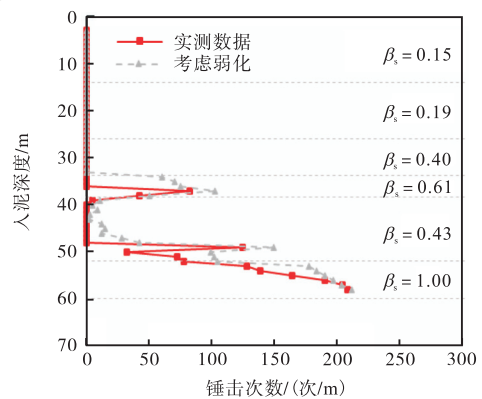
采用 GRLWEAP 软件进行打桩反分析,得到的



(a) 工程实例 6

beta\_s 的取值与打桩反分析结果如图 9 所示.

由图 9 可以看出,桩体质量越大,土体强度弱化程度越高.分析原因主要是在于桩体质量越大,桩身尺寸也会随之增加,桩贯入土体时产生的惯性力和冲击能力更大,桩对桩周土体的扰动范围和程度也随之增加.



(b) 工程实例 7

图 9 工程实例 6、7打桩反分析结果

Fig. 9 Back analysis results of pile driving (Cases 6 and 7)

2.2.3 锤击能量的影响

通过控制变量的方法,在相似场地条件下,对不同打桩锤作用下的桩基贯入实例进行对比分析,进一步研究锤击能量对于桩周土体强度弱化的影响.地质

参数及打桩参数如表 12~14 所示.

采用 GRLWEAP 软件进行打桩反分析,得到的 beta\_s 的取值与打桩反分析结果如图 10 所示.

由图 10 可以看出,在打桩过程中,对于相同土

表 12 地质参数(实例 8)

Tab.12 Geological parameters (Case 8)

土层号	土层名称	层底深度/m	有效容重/(kN/m <sup>3</sup> )	不排水强度/kPa	内摩擦角/(°)	桩侧单位阻力/kPa	桩端单位阻力/MPa
1	粉砂	2.4	20.4	6.7	36.8	25	—
2	淤泥质黏土	13.4	18.5	17.6	12.7	15	—
3	粉砂	17.4	20.1	7.0	36.7	42	—
4	淤泥质黏土	35.0	18.2	12.8	26.1	26	—
5	粉质黏土	39.1	18.6	20.1	13.2	46	—
6	粉砂	52.2	20.4	7.2	36.6	66	4.0
7	粉质黏土	58.5	19.2	35.6	16.0	55	—
8	粉砂	60.2	20.2	6.7	36.9	72	4.5
9	粉质黏土	61.7	20.1	4.0	33.8	72	—
10	粉砂	65.0	20.2	6.7	36.9	72	4.5
11	粉砂	77.5	20.3	7.5	36.8	78	5.0

表 13 地质参数(实例 9)

Tab.13 Geological parameters (Case 9)

土层号	土层名称	层底深度/m	有效容重/(kN/m <sup>3</sup> )	不排水强度/kPa	内摩擦角/(°)	桩侧单位阻力/kPa	桩端单位阻力/MPa
1	粉砂	7.8	20.4	6.7	36.8	25	—
2	粉土	13.5	19.3	8.3	35.7	35	—
3	粉砂	14.8	20.1	7.0	36.7	42	—
4	淤泥质黏土	26.5	18.2	12.8	26.1	26	—
5	粉质黏土	30.4	19.9	22.0	31.5	76	—
6	粉质黏土	37.0	18.6	20.1	13.2	46	—
7	粉砂	50.0	20.4	7.2	36.6	66	4.0
8	粉质黏土	60.2	19.2	35.6	16.0	55	—
9	粉砂	67.0	20.2	6.7	36.9	72	4.5
10	粉砂	75.8	20.3	7.5	36.8	78	5.0

表 14 工程实例 8、9 打桩参数

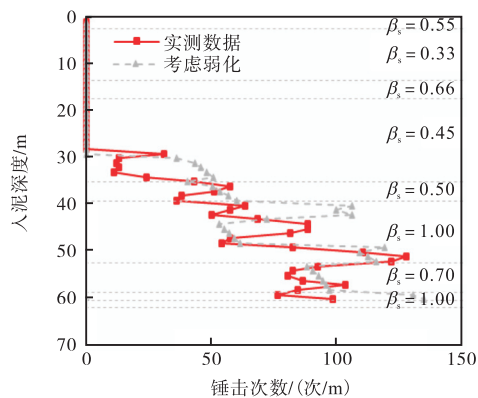
Tab.14 Pile driving parameters (Cases 8 and 9)

工程实例编号	桩长/m	桩径/m	打桩锤型号	入泥深度/m
8	83.0	7.0	IHC-S1800	60.0
9	84.0	7.0	IHC-S3000	63.0

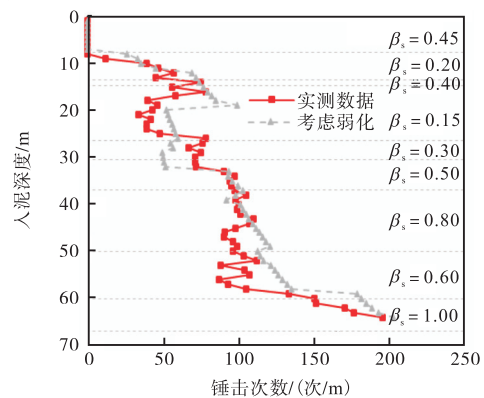
原因主要是冲击荷载越大,土体结构的破坏程度越高,同时会加剧孔隙水压力的积累<sup>[11]</sup>,导致有效应力的降低更明显。

综上所述,在研究打桩贯入过程时需要同时考虑土体、桩体、锤体等多种因素对桩周土强度的弱化影响。

性的土层,冲击能量的增加会加剧土体强度弱化,其



(a) 工程实例 8



(b) 工程实例 9

图 10 工程实例 8、9 打桩反分析结果

Fig.10 Back analysis results of pile driving (Cases 8 and 9)

### 3 大直径桩桩周土 $\beta_s$ 的推荐算法

基于上述分析,综合考虑各种影响因素,提出考虑桩-锤-土共同作用下  $\beta_s$  的计算方法,即

$$\beta_s = \alpha(0.1 - 0.26 \ln \mu + 3 \times 10^{-4} \sigma' + 4 \sigma'^2) \delta \quad (11)$$

$$\sigma' = \sum_{i=1}^i K_0 \gamma_i z_i \quad (12)$$

$$\delta \propto \frac{N/Y}{\frac{N_i}{z_i} W m} \quad (13)$$

式中:  $\alpha$  为土性修正因子<sup>[16]</sup>,取值范围为 1~2;  $\mu$  为桩-土摩擦系数;  $\sigma'$  为计算点处有效上覆土压力大小, kPa;  $N$  为桩体贯入设计深度总锤击次数;  $N_i$  为桩体贯入第  $i$  层土所需锤击次数;  $\delta$  为桩体贯入难度系数,取值范围为 0~1;  $W$  为锤击能量, kJ;  $m$  为桩体质量, kg.

根据上述方法计算大直径桩的桩周土强度折减因子,对某海上风电桩基打桩进行分析验证. 该海上风电场的单桩基础桩径  $D = 7.0 \text{ m}$ ,设计入泥深度  $H = 52.3 \text{ m}$ ,选用 IHC-S1400 型打桩锤进行打桩施工,额定锤击能量为 1400 kJ. 地质参数如表 15 所示.

表 15 地质参数(实例 10)

Tab.15 Geological parameters (Case 10)

土层层号	土层名称	层底深度/m	有效容重/(kN/m <sup>3</sup> )	不排水强度/kPa	内摩擦角/(°)	桩侧单位阻力/kPa	桩端单位阻力/MPa
1	粉砂	6.6	20.4	6.7	36.8	25	—
2	粉土	14.0	19.3	8.3	35.7	35	—
3	粉砂	20.4	20.1	7.0	36.7	42	—
4	淤泥质粉质黏土	31.6	18.2	12.8	26.1	26	—
5	粉砂	34.0	19.8	9.0	36.4	40	—
6	粉砂	50.0	20.4	7.2	36.6	66	4.0
7	粉砂	60.0	20.2	6.7	36.9	72	4.5
8	粉质黏土	69.5	19.0	26.5	17.7	56	—
9	粉砂夹粉土	76.6	20.3	7.5	36.8	78	2.0

打桩分析与实际工程打桩记录的对比如图 11 所示.

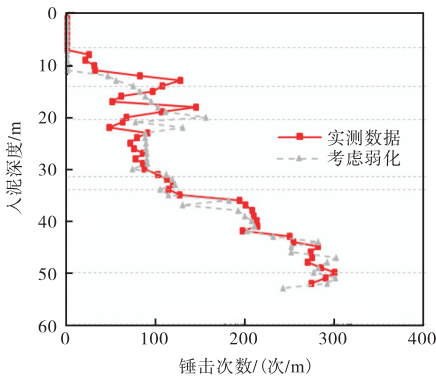


图 11 计算结果与实际记录对比

Fig.11 Comparison between calculated results and actual records

由图 11 可以看出,基于式(11)的打桩分析结果与现场打桩记录吻合良好,验证了本文提出的大直径桩周土体强度折减因子  $\beta_s$  计算方法的合理性. 对包括上述工程在内的 30 组直径大于 5 m 的单桩进行了打桩分析,结果表明无论是在黏土或者砂土中,式(11)得到的结果具有良好的规律性且与实际工程打桩记录吻合良好.

(1) 在砂土中,当相对埋深(土层深度与桩身最终

贯入深度之比)  $d_{rel} \in [0.10 \sim 0.35]$  时,  $\beta_s$  最小为 0.4; 当  $d_{rel} \in [0.35 \sim 0.80]$  时,  $\beta_s$  约为 0.7; 当  $d_{rel} \geq 0.80$  时,土体强度几乎不弱化.

(2) 在黏土中,当  $d_{rel} \in [0.10 \sim 0.30]$  时,  $\beta_s \leq 0.3$ ,甚至在表层  $\beta_s < 0.1$ ; 当  $d_{rel} \in [0.30 \sim 0.80]$  时,  $\beta_s \approx 0.5$ ; 当  $d_{rel} \geq 0.80$  时,  $\beta_s$  的取值范围为 0.5~0.8.

### 4 结 论

(1) 在大直径桩打桩分析中,考虑土性影响的常数系数法适用于评估浅层土体的强度弱化规律,考虑埋深影响的非线性公式法适用于评估深层土体强度弱化规律,这说明随着桩贯入深度的增加,土性对土体强度弱化程度的影响逐渐降低,埋深的影响逐渐增加.

(2) 桩-土界面剪切应力随着循环剪切次数的增加而不断降低,降低幅度逐渐减小,并最终稳定于残余强度. 桩周土体的弱化程度与初始法向应力和界面粗糙度密切相关: 初始法向应力越大,弱化程度越低; 界面粗糙度越高,弱化程度越高.

(3) 在大直径桩的打桩过程中,浅层砂土  $\beta_s$  最小可达到 0.4, 中层砂土  $\beta_s$  约为 0.7, 深层砂土强度几乎没有弱化. 浅层黏土  $\beta_s$  不大于 0.3, 表层甚至可达到 0.1 以下, 中层黏土  $\beta_s$  约为 0.5, 深层黏土的  $\beta_s$  在

0.5 ~ 0.8 范围内。

(4) 本文提出了考虑桩-锤-土共同作用下桩周土强度折减因子  $\beta_s$  的计算方法, 经 30 余个工程打桩记录验证, 该方法对于大直径桩具有很好的适用性。

#### 参考文献:

- [1] 隋侗侗, 张弛, 高玉峰, 等. 波浪作用下单桩基础周围海床液化机制研究[J]. 海洋工程, 2018, 36(4): 88-96.  
Sui Titi, Zhang Chi, Gao Yufeng, et al. Wave-induced seabed liquefaction around an inserted mono-pile foundation[J]. The Ocean Engineering, 2018, 36(4): 88-96 (in Chinese).
- [2] Liu R, Zhou L, Lian J J, et al. Behavior of monopile foundations for offshore wind farms in sand[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2016, 142(1): 04015010.
- [3] 刘润, 尹瑞龙, 梁超, 等. 黏土中超大直径钢管桩内侧摩阻力研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(1): 232-240, 250.  
Liu Run, Yin Ruilong, Liang Chao, et al. Inner frictional resistance of superlarge diameter steel pipe pile in clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(1): 232-240, 250 (in Chinese).
- [4] 刘润, 韩德卿, 梁超, 等. 砂土中超大直径钢管桩内侧摩阻力研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1067-1075.  
Liu Run, Han Deqing, Liang Chao, et al. Inner frictional resistance of superlarge-diameter steel pipe piles in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1067-1075 (in Chinese).
- [5] Seed H B, Reese L C. The action of soft clay along friction piles[J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1957, 122(1): 731-754.
- [6] 王戌平. 深厚软土中 PHC 长桩的时效性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 239-241.  
Wang Shuping. Study on time effect of PHC open-ended pile in deep soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 239-241 (in Chinese).
- [7] 朱斌, 任宇, 陈仁朋, 等. 竖向下压循环荷载作用下单桩承载力及累积沉降特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 186-193.  
Zhu Bin, Ren Yu, Chen Renpeng, et al. Model test on bearing capacity and accumulated settlement of single pile subjected to axial cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 186-193 (in Chinese).
- [8] Hwang J H, Liang N, Chen C H. Ground response during pile driving[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(11): 939-949.
- [9] Airhart T P, Coyle H M, Hirsch T J, et al. Pile-soil system response in a cohesive soil[C]//Performance of Deep Foundations. Pennsylvania, USA: ASTM, 1969.
- [10] 杨国权, 刘海波. 锤击法与静压法施工预制桩单桩承载力差异分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(3): 53-56.  
Yang Guoquan, Liu Haibo. Analysis on the difference of prefabricated single pile bearing capacity between construction by hammer-driven and static-pressure[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009, 36(3): 53-56 (in Chinese).
- [11] 刘润, 董伟, 嵇瑞花, 等. 土体疲劳对打桩分析的影响[J]. 海洋技术, 2005, 24(4): 68-72.  
Liu Run, Dong Wei, Zhuo Ruihua, et al. The influence of soil fatigue on pile drivability[J]. Ocean Technology, 2005, 24(4): 68-72 (in Chinese).
- [12] 刘润, 闫淑旺. 大直径超长桩打桩过程中桩周土体的疲劳与强度恢复[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 452-456.  
Liu Run, Yan Shuwang. Study on soil fatigue and restoration during deep penetration large diameter pile driving[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 452-456 (in Chinese).
- [13] Liu R, Yan S W, Li Z H. Soil plug effect prediction and pile driveability analysis for large-diameter steel piles in ocean engineering[J]. China Ocean Engineering, 2009, 23(1): 107-118.
- [14] 孟祥然. 海上大直径钢管桩打桩过程中桩周土阻力弱化研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2021.  
Meng Xiangran. Study on the Weakening of Soil Resistance Around Large Diameter Steel Pipe Pile During Pile Driving[D]. Tianjin: School of Civil Engineering, Tianjin University, 2021 (in Chinese).
- [15] Yan S W, Zhao L. Study on soil fatigue effect in the drivability analysis for foundation piles of offshore oil platform[C]//International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, MACE2010. Wuhan, China: IEEE, 2010.
- [16] 刘润, 闫淑旺. 海洋大直径钢管桩工程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.  
Liu Run, Yan Shuwang. Offshore Large Diameter Steel pipe Pile Project[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2016 (in Chinese).
- [17] 孟祥然, 刘润, 练继建, 等. 海上大直径钢管桩打桩过程中桩周土强度弱化研究[J]. 海洋工程, 2022, 40(2): 88-96.  
Meng Xiangran, Liu Run, Lian Jijian, et al. Study on the weakening of soil resistance around large diameter steel pipe pile during pile driving[J]. The Ocean Engineering, 2022, 40(2): 88-96 (in Chinese).

(责任编辑: 武立有)