

DOI: 10.11779/CJGE2022S2048

考虑桩土相对刚度影响的桩基水平循环累积变形特性及预测方法研究

王 洋^{1,2}, 竺明星³, 戴国亮², 龚维明², 林靖阳²

(1. 山东理工大学建筑工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189; 3. 江苏科技大学土木工程与建筑学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对海上风机桩基水平循环累积变形预测研究主要聚集于外部循环荷载作用特征, 忽视桩土相对刚度影响的问题, 通过自行研制的循环加载系统在砂土中开展了一系列 1g 模型试验研究。试验结果表明: 归一化累积变形 y_N/y_1 随循环次数 N 增加呈指数型增长趋势, 且随着循环荷载比 ζ_c 的增大而减小, 但与循环幅值比 ζ_b 无明显关联性。桩土相对刚度与归一化累积变形呈现“S”型变化规律, 即相对刚度对柔性桩和刚性桩的累积变形影响较小, 但半刚性桩的累积变形则随着桩土相对刚度的增大而增加。在此基础之上, 进一步提出了考虑循环荷载特性及桩土相对刚度联合影响的桩基水平循环累积变形预测公式, 通过与文献已有试验数据对比分析, 验证了方法的合理性与可靠性。

关键词: 桩基础; 水平循环试验; 累积变形; 桩土相对刚度; 预测公式

中图分类号: TU472.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S2-0220-06

作者简介: 王 洋(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事海上风电基础等方面的研究工作。E-mail: wy_0127@163.com。

Characteristics of cumulative deformation and prediction method for pile foundation under cyclic lateral loading considering influences of pile-soil relative stiffness

WANG Yang^{1,2}, ZHU Ming-xing³, DAI Guo-liang², GONG Wei-ming², LIN Jing-yang²

(1.School of Civil and Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: The researches on the prediction of cyclic lateral cumulative deformation of pile foundation for offshore wind turbines mainly focus on the characteristics of external cyclic loading, ignoring the influences of pile-soil relative stiffness. A series of 1g model tests are carried out on sand by the self-developed cyclic loading system. The test results show that the normalized cumulative deformation y_N/y_1 increases exponentially with the increase of the cycle number N , and increases with the increase of the cycle load ratio ζ_c , but it is not significantly correlated with the cycle amplitude ζ_b . Also, the relationship between the pile-soil relative stiffness and the normalized cumulative deformation shows a "s" shape, that is, the pile-soil relative stiffness has small effects on the cumulative deformation of the flexible and rigid piles. But, the cumulative deformation of the semi-rigid pile increases with the increasing pile-soil relative stiffness. On this basis, the prediction model for the cyclic lateral cumulative deformation considering the combined effects of characteristics of cyclic loading and pile-soil relative stiffness is proposed. The rationality and reliability of this method are verified by comparing with the experimental data in the literatures.

Key words: pile foundation; lateral cycle test; cumulative deformation; pile-soil relative stiffness; prediction model

0 引言

当下能源革命背景下, “双碳”目标已成为时代的里程碑。发展绿色能源的迫切需求促使海上风电飞速发展, 大直径单桩作为海上风机最常见的基础形式, 在风、浪等长期水平循环荷载作用下, 易产生累积变形, 影响风机正常使用。因此, 对单桩累积变形的研

究是关系到风机结构全寿命周期安全的重点课题^[1]。

近年来, 国内外学者通过模型试验开展水平循环荷载下单桩累积变形研究, 并取得了一系列代表性成

基金项目: 江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK20180155);
国家自然科学基金项目(51808112, 51678145, 51878160)

收稿日期: 2022-12-01

果。其中, 部分研究着眼于外部循环荷载特性对累积变形的影响。Rosquoet 等^[2]和 Klinvort 等^[3]分别通过离心机模型试验对柔性桩和刚性桩的循环响应展开研究, 并建立了考虑循环荷载特性的累积变形模型。也有研究在考虑外部循环荷载特性的基础上, 对土体密实度 D_r 的影响展开研究。Leblanc 等^[4]基于刚性桩 1g 模型试验探究 D_r 对累积变形的影响; 张勋等^[5]在 3 种不同密实度的砂土中进行了 1g 模型试验研究, 结果表明 D_r 对累积变形影响较大; Truong 等^[6]利用离心机试验对半刚性、刚性桩的累积变形特性展开研究, 建立了考虑 D_r 的循环累积变形模型, 但该模型的适用条件限定为: $D_r > 50\%$ 。另外, 也有学者认识到桩体特性对循环累积变形的影响, Frick 等^[7]基于 1g 模型试验对刚性桩累积变形展开研究, 结果表明, 埋深越大, 累积变形越明显; 张纪蒙等^[8]通过 1g 模型试验研究表明, 增大桩径比增加埋深更能有效地减小累积变形; 王欢^[9]的研究表明累积变形的发展与桩径并没有直接关系。

鉴于以上研究对桩-土体系综合参数影响的考虑存在的不足, 基于自主研发的水平循环加载系统在砂土中开展了一系列 1g 模型试验, 通过设置不同的桩基埋深、直径和壁厚来改变桩土相对刚度, 探究桩土相对刚度的影响, 提出相应的累积变形预测模型, 以期完善水平循环累积变形特性研究。

1 室内模型试验

1.1 循环加载系统

水平循环加载系统为自行设计, 主要由模型箱、伺服控制系统、位移传感器、力传感器和弹簧元件等组成, 如图 1 所示。模型箱尺寸为 150 cm(长)×100 cm(宽)×100 cm(高), 足以消除边界效应影响。2 个量程 100 mm 的位移传感器分别安装于泥面以上 2.5 cm 和 6 cm 处。力传感器距泥面高度 22 cm。

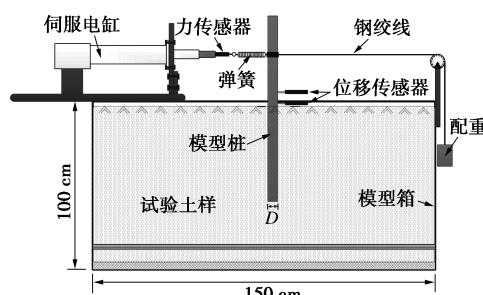


图 1 循环加载系统

Fig. 1 Cyclic loading system

加载过程中的循环幅值、加载频率以及循环次数等均可通过软件控制系统进行设置, 各传感器数据均用 Tst3826-2 采集, 采样频率为 10 Hz, 如图 2 所示。



图 2 软件控制系统和 Tst3826-2 数据采集仪

Fig. 2 Control interface and TST3826-2 data acquisition instrument

1.2 试验地基土制备

试验地基土为江苏某河道砂, 级配曲线如图 3 所示, 土体特性参数见表 1。

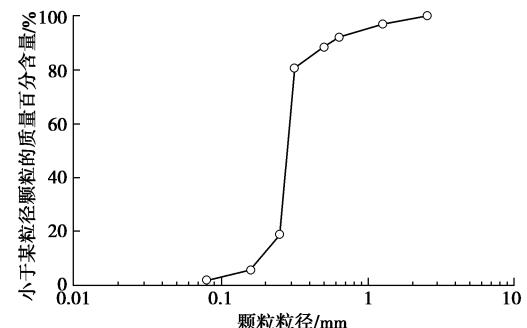


图 3 试验砂土颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curve of sand

表 1 砂土特性参数

Table 1 Properties of sand

土体特性	参数值
颗粒尺寸 (d_{10}, d_{50}) /mm	0.21, 0.42
最小干重度 $\gamma_{min}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	15.17
最大干重度 $\gamma_{max}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	19.58
含水率/%	2
试验土样重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	17.44

采用分层填筑法^[5]制备地基土体, 每层土填筑高度 0.05 m, 按照目标土体密实度 ($D_r=50\%$) 计算得到每层填筑土样体积为 0.075 m³, 质量为 130 kg。每层填土后进行平整夯实、表面刮毛处理, 并采用环刀法测定了 3 次试验土样重度, 保证制备的土样重度不超过目标值的 5%, 以控制土体密实度得到均质地基。

1.3 模型桩

采用 Reese 等^[10]法计算桩土相对刚度,

$$L \begin{cases} > 5T & (\text{柔性桩}) \\ < 2T & (\text{刚性桩}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, L 为桩基埋深, $T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{n_h}}$, $E_p I_p$ 为桩基抗弯刚

度, n_h 为地基反力系数, 由 API 规范^[11]中 n_h-D_r 关系曲线确定, 如图 4 所示。

为便于分析, 本文采用无量纲参数 $5T/L$ 表示桩土

相对刚度大小,由式(1)得, $5T/L < 1$ 为柔性桩, $1 \leq 5T/L \leq 2.5$ 为半刚性桩, $5T/L > 2.5$ 为刚性桩。模型桩采用空心铝管加工而成,弹性模量为70 GPa。考虑埋深 L 、桩径 D 和壁厚 t 的不同制作4组模型桩,如表2所示。当 $D_r=50\%$ 时,由图4知 $n_h=24 \text{ MN/m}^3$,由式(1)计算各桩的 $5T/L$,结果汇总于表2。

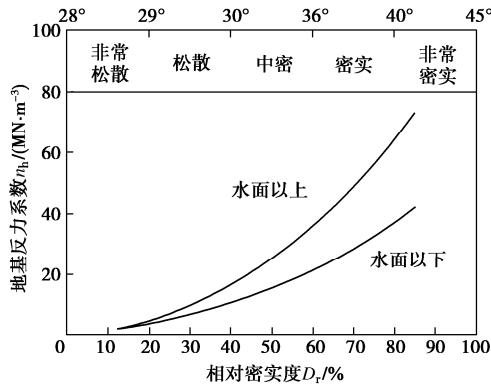


图4 砂土 n_h 与 D_r 关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between n_h and D_r

表2 模型桩参数及临界桩长

Table 2 Parameters and critical lengths of model piles

模型桩 编号	桩径 D/cm	壁厚 t/cm	埋深 L/cm	$5T/L$
A-30	5	0.2	40	3.18
A-50	5	0.2	50	1.91
A-70	5	0.2	70	1.36
B-70	3	0.1	70	0.88

1.4 试验方案

首先开展水平静载试验,以确定单桩极限承载力 H_u 。循环试验开展16组,见表3。其中, $\zeta_b=H_{\max}/H_u$,为循环幅值比; $\zeta_c=H_{\min}/H_{\max}$,为荷载幅值比(H_{\max} 为循环荷载最大值, H_{\min} 为循环荷载最小值)。本次研究均为单向循环加载, ζ_b 取值范围为0.3~0.75, ζ_c 取值范围为0~0.6。

表3 静力和循环加载试验方案

Table 3 Schemes of static and cyclic loading tests

试验编号	荷载类型	ζ_b	ζ_c	N	α
A-30-s	—	—	—	—	—
A-50-s	静载	—	—	—	—
A-70-s	—	—	—	—	—
B-70-s	—	—	—	—	—
A-30-c1	—	0.76	0.01	2000	0.161
A-30-c2	循环	0.75	0.35	2000	0.115
A-30-c3	—	0.40	0.00	2000	0.160
A-30-c4	—	0.40	0.35	2000	0.112
A-50-c1	—	0.70	0.01	10000	0.104
A-50-c2	循环	0.75	0.29	2000	0.091
A-50-c3	—	0.72	0.41	2000	0.072
A-50-c4	—	0.71	0.59	2000	0.054
A-70-c1	—	0.34	0.01	2000	0.063
A-70-c2	循环	0.50	0.30	2000	0.051
A-70-c3	—	0.62	0.32	2000	0.047
A-70-c4	—	0.51	0.46	2000	0.035
B-70-c1	—	0.60	0.02	2000	0.049
B-70-c2	循环	0.71	0.07	2000	0.049
B-70-c3	—	0.47	0.08	2000	0.043
B-70-c4	—	0.30	0.20	2000	0.034

2 试验结果分析

2.1 静载下荷载-位移曲线

表3中各模型桩的静载-位移曲线如图5所示,可见各曲线均呈加工硬化型,无明显破坏点。研究中常取 $y=0.1D$ 为极限承载力^[7],采用该标准确定 H_u ,得A-30-s、A-50-s、A-70-s、B-70-s模型桩的水平极限承载力分别为61.2, 123.8, 280.3, 118.8 N。

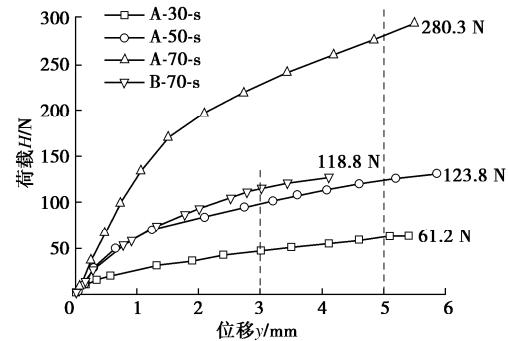


图5 单桩水平静载荷载-位移曲线

Fig. 5 Lateral static load-displacement curves of single pile

为验证试验的可靠性,对每组试验的静载曲线进行了归一化处理,并结合已公开的荷载-位移曲线进行对比验证,结果见图6。图6中表明,本次试验结果与Leblanc等^[4]和张勋等^[5]的结果一致,可靠性较好;进一步对归一化曲线进行拟合处理,

$$\frac{H}{H_u} = 3.08 \left(\frac{y}{D} \right)^{0.49} \quad . \quad (2)$$

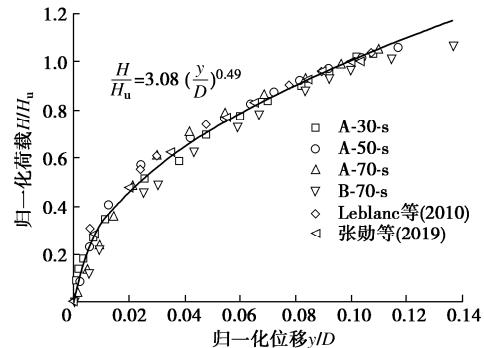


图6 归一化荷载-位移曲线拟合结果

Fig. 6 Fitting results of normalized load-displacement curve

2.2 循环荷载-位移响应

图7(a)给出了工况A-50-c1的循环荷载-位移曲线,可以看出,曲线呈现明显的滞回特性,滞回圈随循环次数增加不断右移,累积位移持续发展。图7(b)进一步给出了其不同加载阶段的滞回曲线形态,可见加载前期滞回圈面积较大,累积位移发展较快;随着循环次数的增加,滞回圈面积逐渐减小,滞回圈重叠区域逐渐增多,表明土体的摩擦耗能逐渐降低,变形累积速率逐渐减缓,这主要由土体渐进致密所导

致。当循环次数达到 10000 次时, 10 次循环的滞回圈几乎完全重叠, 位移累积趋于稳定, 此时的土体可能达至最大致密状态。

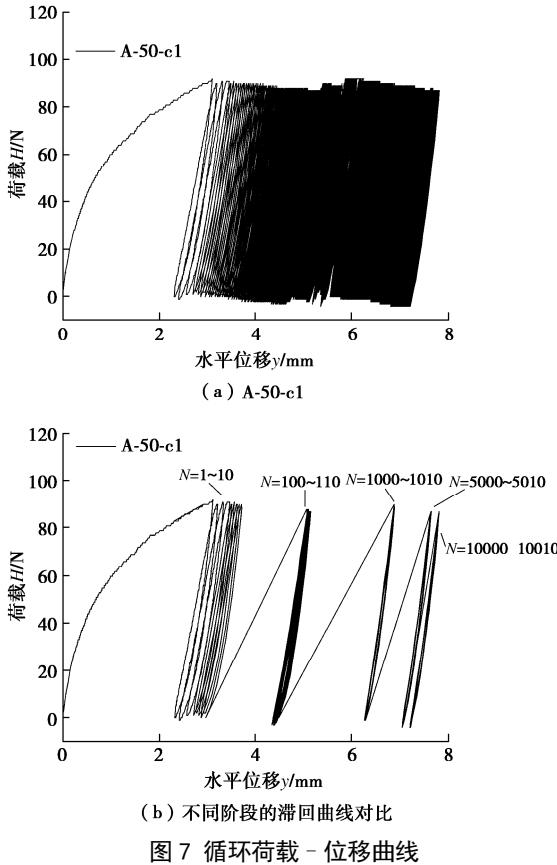


图 7 循环荷载 - 位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves under cyclic loading

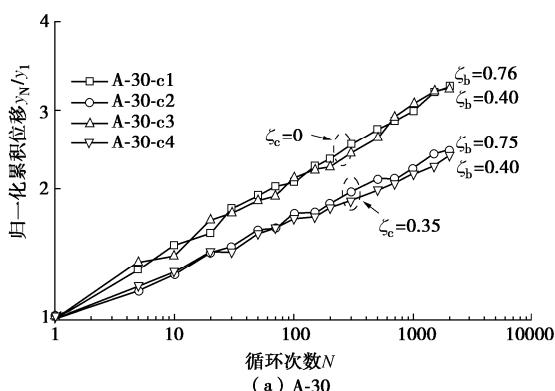
2.3 累积位移影响因素分析

研究中累积变形的数学模型大致分为两种, 对数函数^[2]和指数函数^[3-7]:

$$y_N / y_1 = N^\alpha \quad , \quad (3)$$

$$y_N / y_1 = 1 + \beta \ln N \quad . \quad (4)$$

采用双对数坐标系, 分别绘制 A-30 和 A-50 桩基的归一化累积位移 y_N / y_1 随循环次数 N 的变化曲线, 如图 8 所示。可知, y_N / y_1 与 N 呈现明显的线性关系, 故可采用指数模型, 即式(3)对累积位移进行预测。图 8 中曲线斜率即为位移累积系数 α , 通过数据拟合得到所有试验组的 α 值, 汇总于表 3。



(a) A-30

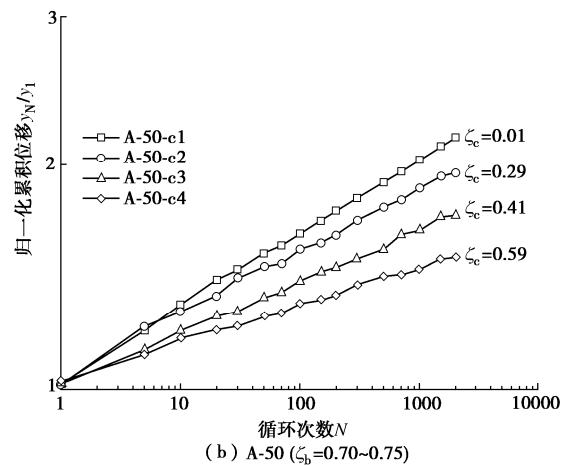
(b) A-50 ($\zeta_b = 0.70 \sim 0.75$)

图 8 循环荷载特性对累积位移的影响

Fig. 8 Influences of characteristics of cyclic loading on cumulative displacement

图 8 (a) 表明, ζ_c 相同时, 不同的 ζ_b 没有引起 y_N / y_1 的明显差异; 而相同 ζ_b 下, ζ_c 越大 y_N / y_1 越小, 这一结论在图 8 (b) 中也可得到验证。选取各桩基 $\zeta_c \approx 0$ 的试验组进行对比, 见图 9。图 9 中表明, y_N / y_1 随着 $5T/L$ 的增大而增大。

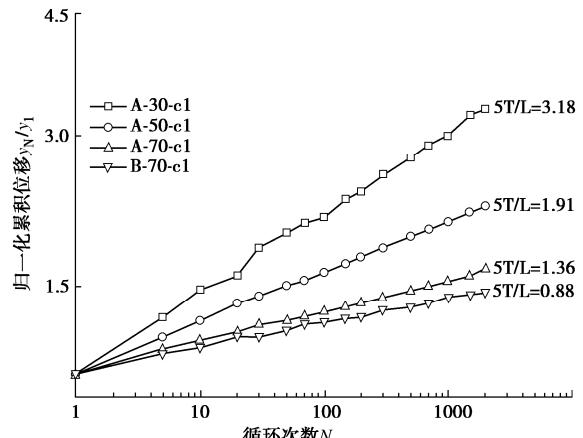


图 9 桩土相对刚度对累积位移的影响

Fig. 9 Influences of pile-soil relative stiffness on cumulative displacement

2.4 位移累积模型的建立

基于上述分析, 累积位移系数 α 可表示为

$$\alpha(\zeta_c, 5T/L) = f(\zeta_c) \times \psi(5T/L) \quad , \quad (5)$$

式中, $f(\zeta_c)$, $\psi(5T/L)$ 分别为 ζ_c 和 $5T/L$ 的影响系数。

上述研究表明, 在 $\zeta_c = 0$ 时, 累积位移取得最大值。令 $f(\zeta_c) = 1$, 那么完全单向循环荷载下的 α 表达式为

$$\alpha(\zeta_c = 0, 5T/L) = 1 \times \psi(5T/L) \quad . \quad (6)$$

对所有试验组的单向循环工况 ($\zeta_c = 0 \sim 0.02$) 进行统计, 为拓宽桩土相对刚度的适用范围, 选取了部分文献中公布的试验数据作为补充, 汇总于表 4, 并将 α 与 $5T/L$ 的关系绘制于图 10。

图 10 表明, α 与 $5T/L$ 存在明显相关性, 曲线

大致呈“S”形态。在柔性临界点 ($5T/L=1$) 附近, α 变化幅度较小, 在 0.05 左右浮动; 进入半刚性区间后, α 随着 $5T/L$ 的增加迅速增大; 进入刚性桩区间 ($5T/L > 2.5$) 后, α 增长速度减缓, 逐渐稳定在 0.2 左右。可见, 随着桩基由柔性转变为刚性, 位移累积速率逐渐增大, 原因在于柔性长桩通常只有浅层部分土体参与荷载作用, 而刚性桩为全埋深范围的土体调动, 循环荷载的影响范围更大, 砂土颗粒的流动剧烈, 导致位移累积越明显。

表 4 水平循环试验汇总
Table 4 Summary of lateral cycle tests

文献	D/m	L/m	$E_p I_p / (\text{GN} \cdot \text{m}^2)$	$D_r / \%$	$5T/L$
Li 等 ^[12]	0.340	2.2000	3.80×10^{-2}	100.0	1.99
Frick 等 ^[7]	0.050	0.3000	9.06×10^{-6}	40.0	3.78
		0.4000			2.74
Klinkvort 等 ^[3]	0.028	0.1680	6.22×10^{-6}	92.9	4.57
	0.040	0.2400	2.59×10^{-5}	94.7	4.25
Truong-DTU 等 ^[6]				51.0	4.06
	0.040	0.2400	7.07×10^{-6}	58.0	3.84
				64.0	3.70
				85.0	3.28
Truong-UWA 等 ^[6]	0.011	0.1254	2.78×10^{-8}	68.0	2.26
Rosquoet 等 ^[2]	0.720	12.000	4.76×10^{-2}	86.0	0.61
			3.03×10^{-6}		
王欢 ^[9]	0.040	0.6000	1.07×10^{-5}	65.0	1.24
	0.060			1.60	
张勋等 ^[5]	0.030	0.3000	1.44×10^{-5}	28.2	2.90
				59.5	2.20
				84.7	1.91
	0.050	0.3000	6.09×10^{-6}		3.18
本文	0.050	0.5000	6.09×10^{-6}		1.91
	0.050	0.7000	6.09×10^{-6}	50.0	1.36
	0.030	0.7000	6.71×10^{-7}		0.88

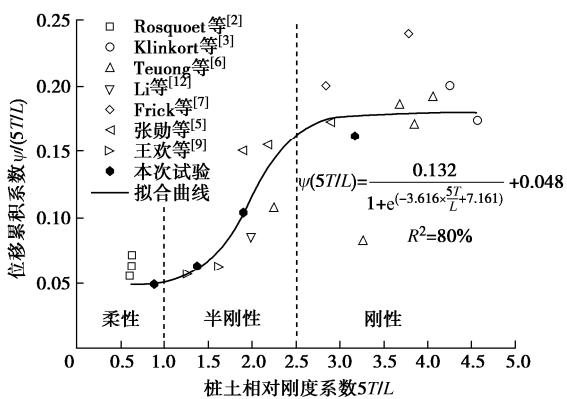


图 10 α 与桩土相对刚度 $5T/L$ 的关系

Fig. 10 Relationship between α and $5T/L$

图 10 进一步给出了 α 和 $5T/L$ 的拟合关系式:

$$\alpha(\zeta_c = 0, 5T/L) = \frac{0.132}{1 + e^{(-3.616 \times \frac{5T}{L} + 7.161)}} + 0.048 \quad (7)$$

式 (7) 表明, 桩土相对刚度对位移累积系数的影响存在临界范围, 约为 0.048~0.18; 累积位移在半刚性体系中变化最为明显, 趋于太柔或太刚的桩基都

不会引起累积位移发展速率的明显转变。

将式 (7) 代入式 (5), 可进一步得到循环荷载比 ζ_c 影响系数的表达式:

$$f(\zeta_c) = \frac{\alpha}{\psi(5T/L)} = \frac{\alpha}{\frac{0.132}{1 + e^{(-3.616 \times \frac{5T}{L} + 7.161)}} + 0.048} \quad (8)$$

依据式 (8), 将本文模型试验得到的 α 进行进一步处理。图 11 中, 纵坐标为剔除桩土相对刚度影响后的 α , 拟合得到:

$$\frac{\alpha}{\psi(5T/L)} = f(\zeta_c) = (1 - \zeta_c)(1 + 0.258\zeta_c) \quad (9)$$

综合式 (3), (5), (7), (9) 可得

$$\frac{y_N}{y_1} = N \left[\frac{0.132}{1 + e^{(-3.616 \times \frac{5T}{L} + 7.161)}} + 0.048 \right] (1 - \zeta_c)(1 + 0.258\zeta_c) \quad (10)$$

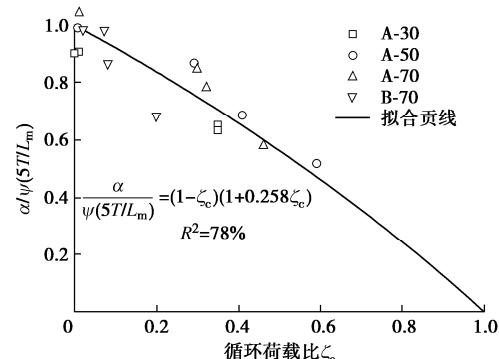
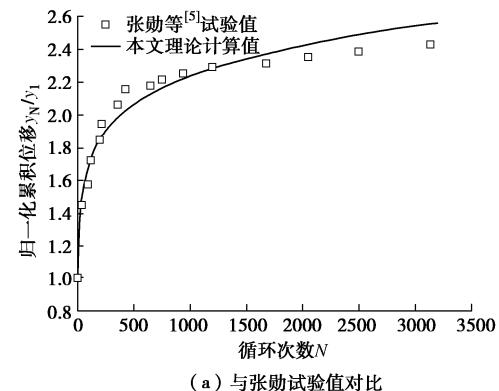


图 11 α 与循环荷载比 ζ_c 的关系

Fig. 11 Relationship between α and ζ_c

3 分析验证

工况一: 张勋等^[5]开展了 1g 模型试验, 其桩径 $D=0.03 \text{ m}$, 埋深 $L=0.3 \text{ m}$, 桩基 $E_p I_p=1.44 \times 10^{-5} \text{ GN/m}^2$, 土体 $D_r=59.5\%$, $5T/L=2.20$, 对比结果如图 12 (a) 所示。工况二: Li 等^[13]开展了离心机模型试验研究, $D=1.8 \text{ m}$, $L=9 \text{ m}$, $E_p I_p=1.44 \times 10^{-5} \text{ GN/m}^2$, $D_r=80\%$, $5T/L=1.63$, 对比结果如图 12 (b) 所示。两组对比结果表明, 本文模型具有一定的可靠性。



(a) 与张勋试验值对比

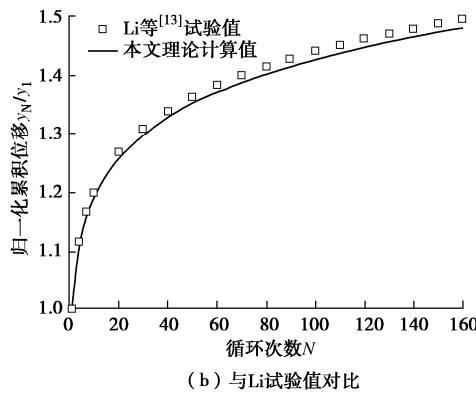


图 12 与相关试验数据对比结果

Fig. 12 Comparison between calculated results and relevant test data

4 结 论

(1) 归一化累积位移 y_N/y_1 随循环次数 N 的发展趋势可用指数函数表达, 且随着 ζ_c 的增大而减小, 与 ζ_b 无明显相关性。

(2) 位移累积系数 α 与无量纲 $5T/L$ 的关系大致呈“S”形态。桩土相对刚度对位移累积系数的影响存在临界范围, 约为 $0.048 \sim 0.18$; 累积位移在半刚性体系中变化最为明显, 趋于太柔或太刚的桩基均不会引起累积位移发展速率的明显转变。

(3) 构建了考虑循环荷载特性和桩土相对刚度影响循环累积位移预测模型, 并与相关文献中的试验数据进行了对比, 验证了本文模型的可靠性。

参考文献:

- [1] ABADIE C N, BYRNE B W, HOULSBY G T. Rigid pile response to cyclic lateral loading: laboratory tests[J]. *Géotechnique*, 2019, **69**(10): 863 – 876.
- [2] ROSQUOET F, THOREL L, GARNIER J, et al. Lateral cyclic loading of sand-installed piles[J]. *Soils and Foundations*, 2007, **47**(5): 821 – 832.
- [3] KLINKVORT R T, HEDEDAL O. Lateral response of monopile supporting an offshore wind turbine[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2013, **166**(2): 147 – 158.
- [4] LEBLANC C, HOULSBY G T, BYRNE B W. Response of stiff piles in sand to long-term cyclic lateral loading[J]. *Géotechnique*, 2010, **60**(2): 79 – 90.
- [5] 张 勋, 黄茂松, 胡志平. 砂土中单桩水平循环累积变形特性模型试验[J]. 岩土力学, 2019, **40**(3): 933 – 941. (ZHANG Xun, HUANG Mao-song, HU Zhi-ping. Model tests on cumulative deformation characteristics of a single pile subjected to lateral cyclic loading in sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(3): 933 – 941. (in Chinese))
- [6] TRUONG P, LEHANE B M, ZANIA V, et al. Empirical approach based on centrifuge testing for cyclic deformations of laterally loaded piles in sand[J]. *Géotechnique*, 2019, **69**(2): 133 – 145.
- [7] FRICK D, ACHMUS M. An experimental study on the parameters affecting the cyclic lateral response of monopiles for offshore wind turbines in sand[J]. *Soils and Foundations*, 2020, **60**(6): 1570 – 1587.
- [8] 张纪蒙, 张陈蓉, 张 凯. 砂土中大直径单桩水平循环加载模型试验研究[J]. 岩土力学, 2021, **42**(3): 783 – 789. (ZHANG Ji-meng, ZHANG Chen-rong, ZHANG Kai. Model tests of large-diameter single pile under horizontal cyclic loading in sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, **42**(3): 783 – 789. (in Chinese))
- [9] 王 欢. 砂土海床大直径单桩基础和桶形基础水平受荷特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. (WANG Huan. Lateral Behaviour of Offshore Monopile and Bucket Foundations in Sand[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese))
- [10] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Analysis of laterally loaded piles in sand[C]// Proc 6th Annual Offshore Technology Conf. Houston, 1974.
- [11] American Petroleum Institute. Geotechnical Considerations and Foundation Design for Offshore Structures[M]. Washington D C: API, 2014.
- [12] LI W, IGOE D, GAVIN K. Field tests to investigate the cyclic response of monopiles in sand[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2015, **168**(5): 407 – 421.
- [13] LI Q, ASKARINEJAD A, GAVIN K. Lateral response of rigid monopiles subjected to cyclic loading: centrifuge modelling[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2022, **175**(4): 426 – 438.

(编校: 胡海霞)