

文章编号:1673-9469(2026)01-0017-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.01.003

## 软土地区不同预制桩型承载特性现场试验与模型验证

张安琪<sup>1</sup>, 闫楠<sup>1\*</sup>, 白晓宇<sup>1</sup>, 米春荣<sup>2</sup>, 张亚妹<sup>1</sup>, 郝增明<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 山东省建筑科学研究院有限公司, 山东 济南 250031)

**摘要:** 为深入探究预应力高强混凝土(PHC)管桩及预应力混凝土实心方桩(YZH)在软土地区的竖向抗压承载特性, 依托于上海某工程, 对6根PHC管桩和2根YZH桩进行单桩竖向抗压静载试验, 对比分析两种预制桩的荷载-位移特性, 评估指数函数模型在预测单桩竖向抗压极限承载力方面的适用性, 并对指数函数模型进行修正。结果表明, 该试验场地的2种桩型均发生破坏, 荷载-沉降曲线均呈陡降型, 桩顶荷载水平介于4 725~6 000 kN之间时试桩发生破坏, 残余沉降占比均在87%以上; 采用修正指数模型预测试桩的单桩极限承载力更为精准, 吻合度更高, 且预测曲线变化趋势在塑性变形阶段具有较高的预测精度。

**关键词:** PHC管桩; YZH桩; 单桩竖向承载力; 静载试验; 数学模型

**中图分类号:** TU473.1

**文献标识码:** A

## Field Test and Model Validation of Load-Bearing Characteristics of Different Types of Prefabricated Piles in Soft Soil Areas

ZHANG Anqi<sup>1</sup>, YAN Nan<sup>1\*</sup>, BAI Xiaoyu<sup>1</sup>, MI Chunrong<sup>2</sup>, ZHANG Yamei<sup>1</sup>, HAO Zengming<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;

2. Shandong Architectural Science Research Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong 250031, China)

**Abstract:** In order to deeply explore the vertical compressive bearing characteristics of prestressed high-strength concrete (PHC) pipe piles and prestressed concrete square (YZH) piles in soft soil areas, a single-pile vertical compressive static load test was carried out on 6 PHC pipe piles and 2 YZH piles based on a project in Shanghai, and the load-displacement characteristics of the two types of prefabricated piles were compared and analyzed. The applicability of the exponential function model in predicting the vertical ultimate compressive capacity of single piles was evaluated, and the exponential function model was modified. The results showed that both pile types at the test site failed, and the *Q-s* curves showed a steep drop. The pile top load level was between 4 725 kN and 6 000 kN, and the residual settlement accounted for more than 87%. Using the modified exponential function model to predict the ultimate bearing capacity of single piles is more accurate and exhibits high consistency, and the prediction curve trend has higher prediction accuracy in the plastic deformation stage.

**Key words:** PHC pipe pile; YZH pile; vertical bearing capacity of single pile; static load test; mathematical model

在我国东南沿海一带, 由于地基条件普遍较为复杂, 分布着淤泥和淤泥质土等地基承载力较低的地层, 工程对桩基础的承载能力要求较高, 因此预制桩成为一种常见选择。预制桩是指在工厂

或现场通过先张法等预应力离心成型工艺制成的预制构件, 因其具有承载力高、桩身强度高、易于施工等优点, 能有效克服软土地区承载力不足和稳定性较差问题, 在沿海工程中得到广泛应

收稿日期: 2024-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52478348, 51778312); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2024ME224, ZR2023QE107); 青岛市自然科学基金原创探索项目(24-4-4-zjj-180-jch); 山东省泰山学者项目(tsqn202306234)

第一作者: 张安琪(1998—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 研究方向为地基与基础工程。

\* 通信作者: 闫楠(1982—), 女, 山东潍坊人, 博士, 副教授, 研究方向为环境岩土工程。

用<sup>[1-2]</sup>。常见的预制桩包括预制方桩和预制管桩等,随着技术的进步和工艺的改进,对预制桩也提出了更高的要求。

确定预制桩的单桩竖向抗压承载力是确保工程质量、提高结构安全性、延长工程使用寿命至关重要的环节,因此,国内外众多学者<sup>[3-7]</sup>基于静载荷试验,针对预制管桩和预制方桩的承载力问题开展了广泛研究。闫楠等<sup>[8]</sup>通过研究预应力混凝土管桩的承载特征,揭示其承载力发挥机制,并基于常规理论预测模型,对预应力混凝土管桩单桩竖向抗压极限承载力进行预测。郭志广等<sup>[9]</sup>针对深厚软土地基中的预制桩,深入探讨其承载机理和变形特性,并提出了有效的参数确定方法。杨帆等<sup>[10]</sup>通过对预制方桩进行轴向抗压性能测试及数值模拟,解析了桩体在受压过程中的裂缝发展模式、轴压承载力及破坏形式,为新型预制方桩的设计提供了科学依据和数据支持。杨志坚等<sup>[11-12]</sup>利用 ABAQUS 对预制桩进行有限元分析,研究了其承载性能的不同影响因素,为预应力高强混凝土(Prestressed High-Strength Concrete, PHC)管桩及预制实心方桩的优化设计和实际工程应用提供了重要参考。

然而现有研究对预制管桩与预制方桩的对比分析较少,张忠苗等<sup>[13]</sup>基于静载荷试验,对比了 PHC 管桩及预制方桩的受力性状,发现二者荷载传递规律相同,但是力的发挥程度不同。郑刚等<sup>[14]</sup>在软土场地针对预应力管桩、预制方桩展开单桩拟静力试验,探究各桩型足尺桩受桩顶低周往复水平荷载作用时的承载性状,发现常规预应力桩多呈脆性破坏,增加非预应力筋可有效提高抗震性能。

综上所述,目前虽已对预制桩承载特性问题进行了丰富的研究,但对相同场地预制管桩与预制方桩承载性能的对比研究尚有不足,限制了不同桩型的推广应用。鉴于此,本文基于上海某工程,

在软土地区同一场地对预制管桩及预制方桩进行现场静载荷试验,明确不同预制桩类型对其承载性能的影响,对比分析不同桩型的单桩竖向极限承载力及其荷载-位移理论模型的适宜性,并对函数模型进行修正,进一步评估预制桩单桩极限承载力。

## 1 试验概况

### 1.1 水文地质概况

场区浅部地下水为潜水,稳定水位为 1.20~2.50 m,承压含水层为 7 层,最浅埋深 25.80 m。根据勘察报告,场地地面标高在 3.16~5.22 m 之间,自上而下土层主要物理力学参数如表 1 所示。

### 1.2 试桩概况

本次试验试桩共 8 根,分为 3 种桩型:桩型 A 有 3 根,为桩径 500 mm、壁厚 125 mm 的 PHC 管桩;桩型 B 有 3 根,为桩径 600 mm、壁厚 130 mm 的 PHC 管桩;桩型 C 有 2 根,为边长 500 mm 的预应力混凝土实心方桩(代号 YZH)。3 种桩型试桩均采用静压法施工,桩顶标高 4.30 m,桩端持力层均为 7<sub>2-1</sub> 层灰黄色粉砂。试桩桩位平面布置见图 1,桩侧土体的剖面图见图 2,各试桩参数如表 2 所示。

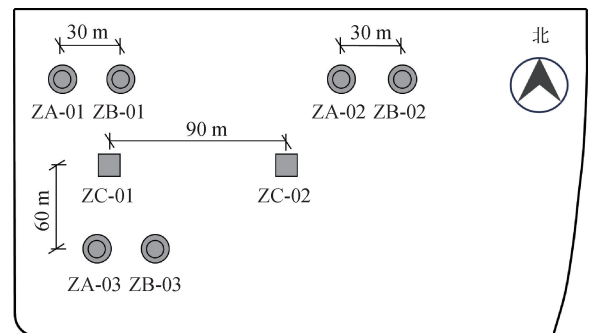


图 1 桩位布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pile layout

表 1 土层主要物理力学参数

Tab. 1 Main physical and mechanical parameters of soil layers

序号	土层名称	层面标高/m	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
1 <sub>1</sub>	吹(冲)填土	2.69~5.22	18.8	18	25.5	7.05
1 <sub>3</sub>	黏质粉土	-0.91~2.43	19.0	12	32.5	10.39
2 <sub>3</sub>	砂质粉土夹粉质黏土	-3.6~-5.07	18.9	13	32.0	10.50
4	淤泥质黏土	-12.10~-13.50	17.0	14	14.5	2.60
5 <sub>1</sub>	黏土	-15.13~-17.26	17.7	17	15.0	3.08
5 <sub>3</sub>	粉质黏土	-19.57~-19.95	18.3	20	20.5	3.86
6	粉质黏土	-18.20~-21.55	19.6	49	15.5	6.77
7 <sub>1</sub>	粉质黏土	-21.59~-27.85	18.9	7	34.0	10.35
7 <sub>2-1</sub>	粉砂	-30.85~-34.19	19.2	4	35.5	13.16
7 <sub>2-2</sub>	粉砂	-43.41~-47.57	19.3	3	36.0	14.43
7 <sub>2-3</sub>	粉砂	-56.69~-60.75	19.4	2	37.5	15.94

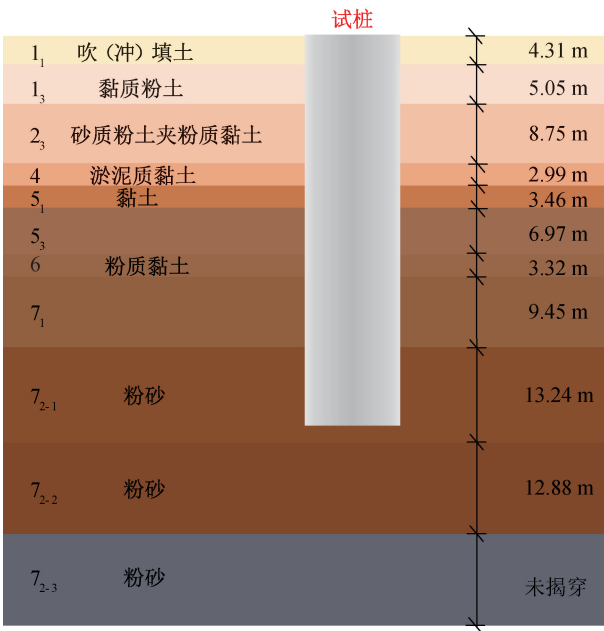


图 2 试桩典型剖面图

Fig. 2 Typical profile of the test pile

表 2 试桩参数

Tab. 2 Test pile parameters

桩号	桩径(边长) /mm	桩长/m	预估最大 加载值/kN
ZA-01	500	38.0	5 500
ZA-02	500	36.8	5 500
ZA-03	500	38.0	5 500
ZB-01	600	36.8	6 000
ZB-02	600	32.7	6 000
ZB-03	600	34.5	6 000
ZC-01	500	37.1	6 500
ZC-02	500	34.5	6 500

试桩在进行静载试验前,采用低应变法对桩身进行了完整性检测,结果表明 8 根试桩均为 I 类桩,满足试验要求。现场试验采用压重平台反力装置进行单桩竖向抗压静载试验,图 3 为其示意图,检测方法为慢速维持荷载法,加载分级进行,并逐级等量加载,桩型 A 分级荷载为 450 kN,桩型 B 分级荷载为 550 kN,桩型 C 分级荷载为 600 kN。其中,首级加载量为分级荷载的 2 倍,从第十级开始每级加载量为分级荷载的 1/2,卸载亦分级进行,并逐级卸载。加、卸载应保证荷载传递均匀、连续、无冲击,且每级荷载在维持过程中的变化幅度不超过分级荷载的  $\pm 10\%$ 。位移测读时间、终止加载条件等其他要求均按现行《建筑地基与基础检测技术规程》<sup>[15]</sup>进行。

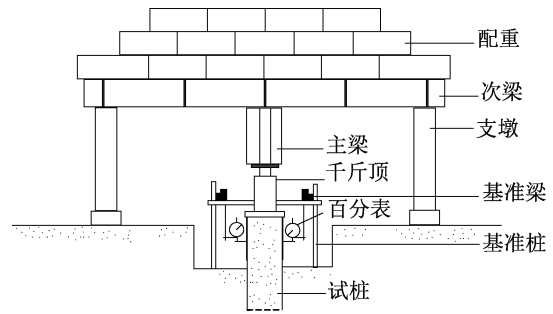


图 3 桩基静载检测示意图

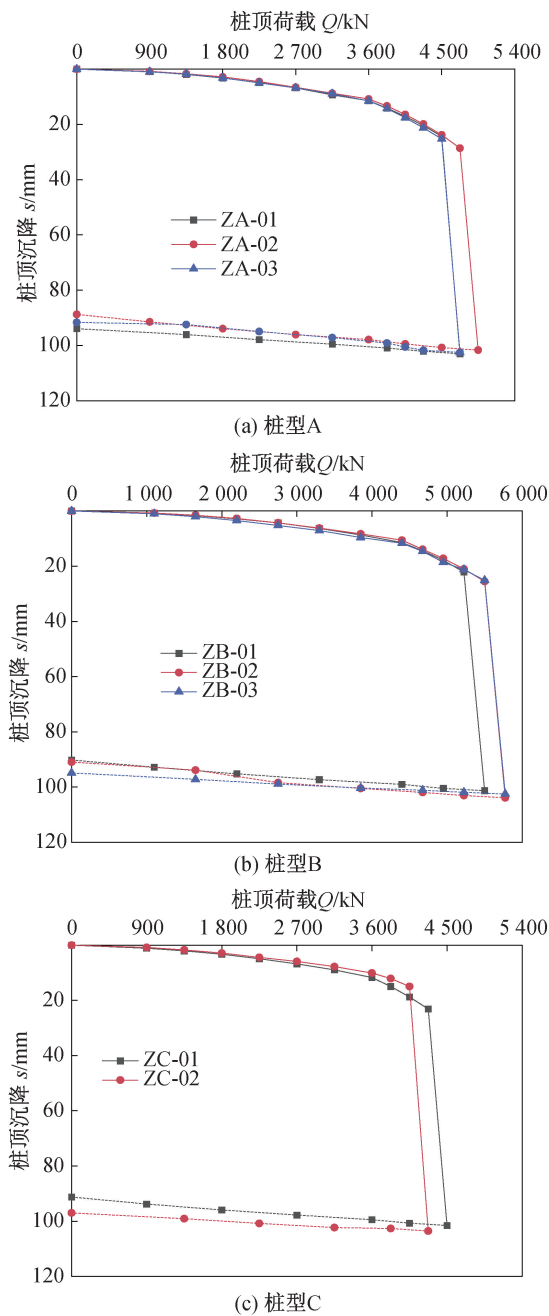
Fig. 3 Static load detection diagram of pile foundation

## 2 试验结果及分析

通过静载荷试验,能够有效确定试桩的极限承载力,分析桩基的破坏特征。依据现场试验,将各试桩的试验结果绘制成荷载-沉降( $Q-s$ )曲线,如图 4 所示,静载荷试验结果见表 3。

从图 4 可以看出,加载初期,3 种桩型的  $Q-s$  曲线基本呈线性变化趋势,随着荷载水平增加, $Q-s$  曲线逐渐向非线性发展,直至发生陡降破坏。桩型 A 的  $Q-s$  曲线在桩顶荷载不大于 4 500 kN 时,各试桩桩顶沉降基本重合, $Q-s$  曲线变化趋势近似线性,说明桩身处于弹性变形阶段;当桩顶荷载超过 4 500 kN 后,各试桩沉降陡然增加,试桩 ZA-02 的最大加载量为 4 950 kN,桩顶沉降达 101.67 mm,试桩 ZA-01 和 ZA-03 的最大加载量为 4 725 kN,此时对应的桩顶沉降量分别为 103.03 mm 和 102.53 mm,均超过 40 mm,约为前一级的 4 倍,由此判断试桩发生了破坏。桩型 B 的  $Q-s$  曲线基本同桩型 A 一致。对比不同桩型的  $Q-s$  曲线,桩型 C 与桩型 A、B 无明显区别,当桩顶荷载不超过 5 700 kN 时,桩型 C 的  $Q-s$  曲线基本呈线性变化趋势;桩顶荷载超过 5 700 kN 后,桩顶沉降急剧增大,发生破坏,试桩 ZC-01、ZC-02 的桩顶沉降量分别达 101.51 mm 和 103.54 mm。

从表 3 可以看出,PHC 桩和 YZH 桩残余沉降占比均在 87% 以上,其中试桩 ZC-02 桩顶残余沉降量达到最大值 96.98 mm,试桩桩顶回弹率不高,在 6.34%~12.70% 之间,弹性工作性能均不明显,说明三种试桩均在软土地区发生破坏。究其原因:桩周土层和桩端持力层是重要的影响因素。当桩顶荷载较小时,沉降主要由上部土层的侧摩阻力发挥作用,随荷载的增加,下部土层侧摩阻力逐渐发挥作用,二者异步发挥作用,侧摩阻力随桩土相对位移的增大而增大,当荷载水平更高时,桩端

图4 试桩  $Q-s$  曲线Fig. 4  $Q-s$  curves of test piles

阻力开始发挥作用,并逐渐增强,对于PHC管桩及预制方桩而言,荷载传递规律基本相同<sup>[13,16]</sup>。

在桩端持力层相同的情况下,桩型B的 $Q-s$ 曲线比桩型A的更加平缓,单桩承载力更强,说明桩径越大,桩的竖向承载能力越大。桩型C是边长为500mm的预制混凝土方桩,与采用的两种PHC桩长相近,土层环境基本一致,周长与桩型B相近,略大于桩型A。试验发现,试桩ZC-01、ZC-02的承载力均高于桩型A,与桩型B的承载力相差不大。张忠苗等<sup>[13,16]</sup>发现预制方桩与PHC管桩的桩侧摩阻力及桩端阻力分布规律相同,但发挥程度不同,且材料、造价差异较大,在侧表面积、桩长、地质条件相似的情况下,单桩承载力也基本相同,该结论与本文试验结果一致。

### 3 理论模型适应性评估及分析

确定单桩竖向抗压承载力是桩基设计的决定性环节,关系着整个工程的造价、安全和质量。因此结合既有的静载试验数据与可靠的数学预测模型,对单桩承载力进行预测,并将预测结果与试验结果进行对比,不仅能验证预测模型的可靠性,还为确定实际工程的单桩极限承载力提供坚实依据<sup>[8,17-18]</sup>。

#### 3.1 已有理论模型

现有的承载力预测模型有曲线拟合法预测模型、人工神经网络模型、灰色预测模型等<sup>[17-20]</sup>,本文首先采用曲线拟合法中预测精度较高的指数模型对预制管桩、预制方桩的部分试验结果进行拟合,并对预测结果进行对比分析,评估模型的适用性,相应的拟合曲线及预测结果见图5、表4。

指数模型:

$$Q = Q_u(1 - e^{-ks}) \quad (1)$$

式中: $Q$ 表示桩顶荷载,kN; $s$ 表示桩顶沉降,mm;

表3 试桩抗压静载试验结果

Tab. 3 Results of pile static load test

试桩编号	最大加载量/kN	桩顶沉降/mm	回弹量/mm	残余沉降/mm	回弹率/%	残余沉降占比/%
ZA-01	4 725	103.03	9.09	93.94	8.82	91.18
ZA-02	4 950	101.67	12.91	88.76	12.70	87.30
ZA-03	4 725	102.53	10.86	91.67	10.59	89.41
ZB-01	5 500	101.31	11.09	90.22	10.95	89.05
ZB-02	5 775	103.89	12.94	90.95	12.46	87.54
ZB-03	5 775	102.51	7.65	94.86	7.46	92.54
ZC-01	6 000	101.51	10.28	91.23	10.13	89.87
ZC-02	5 700	103.54	6.56	96.98	6.34	93.66

$Q_u$  表示静载试验中单桩所受最大荷载,即破坏荷载, kN;  $k$  表示沉降衰减因子,  $\text{mm}^{-1}$ 。

相应参数可采用变尺度优化方法求解。

针对本文试桩,因其  $Q-s$  曲线为陡降型,可采用折减系数法对单桩极限承载力进行预测<sup>[21]</sup>,取

$$Q' = \gamma \cdot Q_u \quad (2)$$

式中:  $Q'$  表示预测的单桩极限承载力, kN;  $\gamma$  表示折减系数,按经验取值范围在 0.7~0.9 之间,根据式(2)按单桩极限承载力试验值进行计算得  $\gamma$  为 0.95。

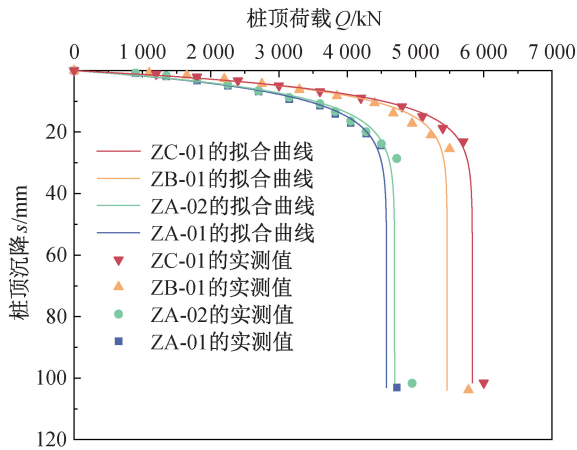


图 5 指数函数模型拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of exponential function model

表 4 单桩竖向抗压极限承载力预测值与实测值对比

Tab. 4 Comparison of predicted and measured values of vertical compressive ultimate bearing capacity of single piles

试桩编号	设计值/kN	最大加载量/kN	实测值/kN	预测值/kN	误差/%
ZA-01	3 120	4 725	4 500	4 347	3.4
ZA-02	3 120	4 950	4 725	4 459	5.63
ZB-01	3 725	5 775	5 500	5 189	5.65
ZC-01	3 500	6 000	5 700	5 541	2.89

单桩极限承载力试验值按《建筑基桩检测技

术规范》<sup>[22]</sup>要求进行取值,指数函数模型计算所得的破坏荷载乘以折减系数得到单桩抗压极限承载力预测值。将单桩抗压极限承载力预测值与试桩 ZA-01、ZA-02、ZB-01、ZC-01 对应的试验值 4 725、4 950、5 775、6 000 kN 进行对比,相应的拟合  $Q-s$  曲线见图 5,单桩竖向抗压极限承载力预测对比结果见表 4,单桩抗压极限承载力预测值满足设计要求。通过图 5、表 4 可以得出,曲线与试桩实测值的吻合度仍存在部分差异,误差在 2.89%~5.65% 之间,所以针对指数模型进行修正。

### 3.2 修正指数模型

修正公式(1)并引入新的拟合参数“ $\eta$ ”“ $\lambda$ ”,得到:

$$Q = Q_u (1 - \eta \cdot e^{-k_1 s} - \lambda \cdot e^{-k_2 s}) \quad (3)$$

通过引入新的拟合参数来调节原有指数函数模型,使修正指数模型能更好适应弹性阶段的拟合,调整试桩拟合曲线从弹性阶段向弹塑性阶段、再向塑性阶段的转化。

为使模型更直观、简便、易于计算,在式(3)中,令  $\alpha = -Q_u \cdot \eta, \beta = -Q_u \cdot \lambda$ ,于是我们得到修正指数模型:

$$Q = Q_u + \alpha \cdot e^{-k_1 s} + \beta \cdot e^{-k_2 s} \quad (4)$$

式中:  $\alpha, \beta$  为新的拟合参数,  $k_1, k_2$  为沉降衰减因子,  $\text{mm}^{-1}$ 。

通过变尺度优化法,我们得到拟合参数  $\alpha$  和  $\beta$  的最优解,所得极限承载力预测值见表 5,修正指数模型的拟合曲线如图 6 所示。

通过表 5、图 6 可以看出,各试桩拟合曲线与试验所得实测结果拟合程度大大提升,相关系数均有所提高,误差均有所减小,误差在 0.07%~0.71% 之间。以试桩 ZA-01、ZC-01 为例,对原始指数函数模型与修正指数模型所得的拟合曲线进行对比,

表 5 修正指数模型拟合结果

Tab. 5 Fitting results of the adjusted exponential model

试桩编号	拟合方程	最大加载量/kN	相关系数	极限承载力试验值/kN	极限承载力预测值/kN	误差/%
ZA-01	$Q = 4\,742.182\,7 - 491.255\,0 \times e^{-200.400\,8s} - 4\,250.435\,9 \times e^{-0.110\,0s}$	4 725	0.999 2	4 500	4 504	0.08
ZA-02	$Q = 4\,942.064\,1 - 802.267\,8 \times e^{-1.598\,0s} - 4 \times 139.217\,1 \times e^{-0.096\,6s}$	4 950	0.999 1	4 725	4 694	0.66
ZB-01	$Q = 5\,749.582\,4 - 970.121\,1 \times e^{-1.808\,0s} - 4\,289.111\,7 \times e^{-0.110\,2s}$	5 775	0.999 6	5 500	5 461	0.71
ZC-01	$Q = 5\,996.889\,2 - 591.970\,0 \times e^{-2.055\,0s} - 5\,405.114\,9 \times e^{-0.122\,4s}$	6 000	0.999 6	5 700	5 696	0.07

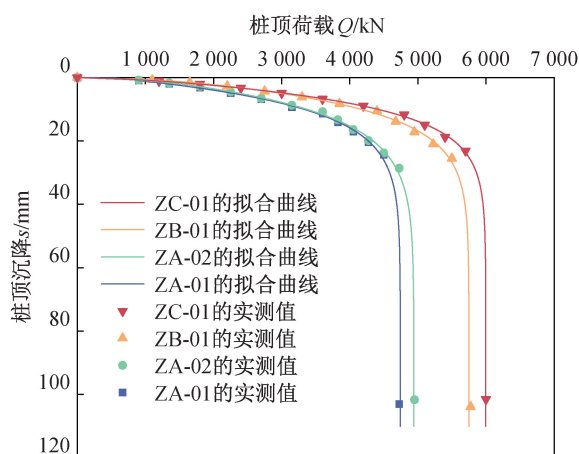


图6 修正指数模型拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of the adjusted exponential model

如图7所示。不难看出,试桩 ZA-01 单桩竖向抗压极限承载力预测值达 4 504 kN,误差为 0.08%,比原指数函数模型减少 3.32%,相关系数高达 0.999 2;试桩 ZC-01 单桩竖向抗压极限承载力预测值达 5 696 kN,误差为 0.07%,减少了 2.82%,相关系数达 0.999 6,拟合度均有所提升。对比原始指数函数模型,修正指数模型曲线在受塑性破坏造成的陡降点部位也能很好地进行拟合。

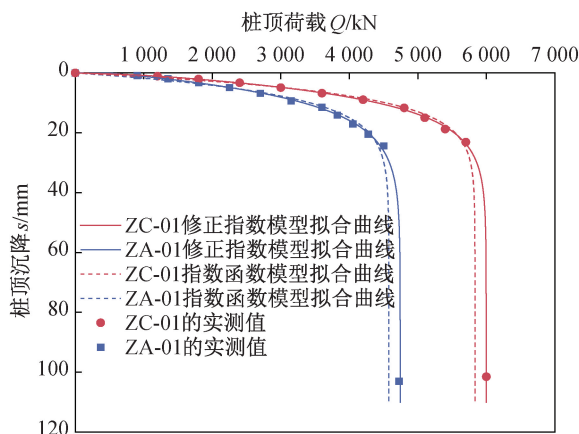


图7 试桩拟合曲线对比图

Fig. 7 Comparison diagram of fitting curves of test piles

## 4 修正指数模型工程实例验证

### 4.1 工程实例 1

文献[23]对浙江舟山某工程的 PHC 管桩在经吹填造陆形成的软土层环境下进行静载荷试验,现以其中试桩 1、试桩 3 为例,采用原指数函数模型及修正指数模型进行拟合,对二者进行对比分析,以验证修正指数模型的优越性。取折减系数  $\gamma = 0.95$ ,所得指数函数模型和修正指数模型拟

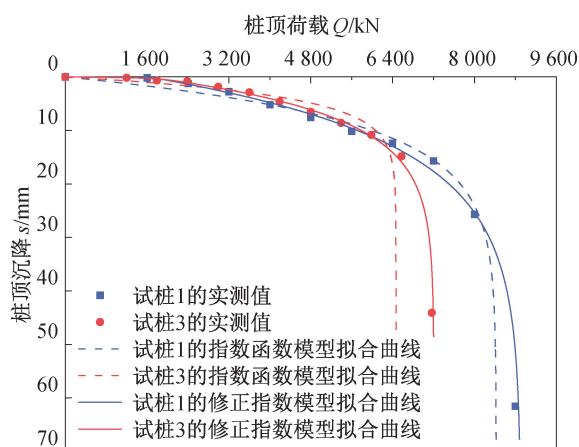


图8 试桩拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of test piles

合曲线对比见图8、拟合结果见表6(桩1和桩3)。

通过图8、表6可知,试桩使用修正指数模型的拟合程度高于原指数函数模型,误差均有所减小。试桩1的预估极限承载力为 8 017 kN,误差仅为 0.02%,减小了 5.19%,相关系数达 0.997 3,与原指数函数模型相比拟合度提高了 3.11%;试桩3拟合度达到 99.7%,修正指数模型预估极限承载力为 6 486 kN,误差为 1.73%,采用修正指数模型进行拟合,曲线拟合程度、误差率均优于原指数函数模型,说明了修正指数模型的优越性。

### 4.2 工程实例 2

文献[24]对长江沿岸某地高强预制混凝土空心方桩进行桩基静载试验,桩周土、桩端持力层多为粉质黏土层,现对其中 293 号试桩利用两种指数模型进行拟合,验证模型对预制方桩预测的适用性。取折减系数  $\gamma = 0.86$ ,原指数函数模型和修正指数函数模型的拟合曲线对比见图9、拟合结果见表6(293号试桩)。

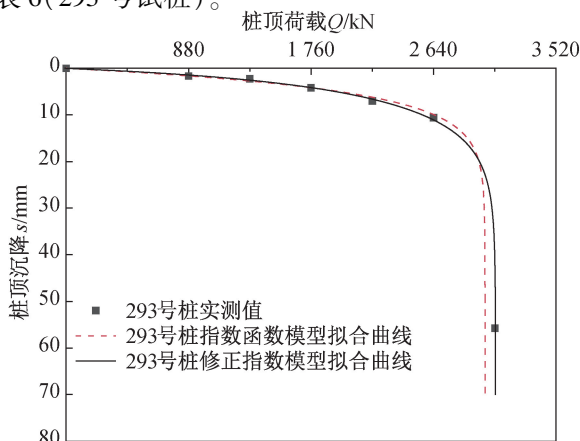


图9 试桩 293 号拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of test pile No. 293

表 6 实例的修正指数模型拟合结果

Tab. 6 Fitting results of the adjusted exponential model for the cases

试桩 编号	拟合方程	相关 系数	极限承载力 试验值/kN	指数函数模型		修正指数模型	
				预测值/kN	误差/%	预测值/kN	误差/%
桩 1	$Q=8\ 908.809\ 9-1\ 628.597\ 8\times e^{-14.618\ 0s}-7\ 280.214\ 2\times e^{-0.082\ 2s}$	0.997 3	8 000	7 583	5.21	8 017	0.02
桩 3	$Q=7\ 207.976\ 4-1\ 621.022\ 8\times e^{-6.910\ 0s}-5\ 578.841\ 5\times e^{-0.136\ 8s}$	0.996 5	6 600	5 820	11.81	6 486	1.73
293 号	$Q=3\ 084.866\ 1-719.026\ 3\times e^{-0.614\ 7s}-2\ 373.441\ 1\times e^{-0.151\ 3s}$	0.996 6	2 640	2 587	5.57	2 654	0.53

通过图 9、表 6 可知,试桩使用修正指数模型与试验数据吻合较好,拟合度达 99.66%,对比原指数函数模型有所提升,试验所得单桩极限承载力为 2 640 kN,采用修正指数模型拟合预测值为 2 654 kN,误差仅 0.53%,比原指数函数模型减少了 5.04%,进一步体现修正指数模型对预制方桩的适用性。

## 5 结论

1) 8 根试桩(6 根预应力高强混凝土管桩和 2 根预应力混凝土实心方桩)的荷载-沉降曲线均为陡降型,沉降大于 40 mm,均发生破坏,弹性工作性能不显著。

2) 通过对比预制管桩及预制方桩竖向抗压承载力发现,在侧表面积、桩长、地质条件相似的情况下,单桩竖向极限承载力也基本相同。

3) 评估了指数模型对单桩极限承载力预测的适用性,并对指数函数模型进行修正。修正指数模型拟合度有所提高,误差比原指数函数模型减小了 2.82%~3.32%,在塑性变形阶段的预测结果更为准确。

4) 通过工程实例进一步验证了修正指数函数模型预测预制桩极限抗压承载力的可靠性,证明其具有较好的适用性及优越性。

### 参考文献:

[1] 戴轩,郑刚,张楠,等. 成层软土地区高层建筑 PHC 管桩抗震性能研究[J]. 土木工程学报,2019,52(S1): 248-256.  
DAI X,ZHENG G,ZHANG N,et al. Seismic performance of PHC pipe piles of high-rise building in layered soft soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1):248-256.

[2] 倪洁,陈永辉,毛斌. 深厚软土区过渡段软基处理方式现场试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2019,36(4):13-18.

NI J,CHEN Y H,MAO B. Field test on treatment of soft foundation in transition section of deep soft soil area[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition),2019,36(4):13-18.

[3] 凌造,唐孟雄,胡贺松,等. 非挤土嵌岩预应力高强度混凝土管桩的桩端承载性能研究[J]. 岩土力学,2024,45(1):97-107.  
LING Z,TANG M X,HU H S,et al. Bearing capacity of pile toe of non-displacement rock-socketed PHC pipe piles[J]. Rock and Soil Mechanics,2024,45(1):97-107.

[4] 罗凯,张小勇,陈家勋,等. 既有竖向荷载对承台桩水平承载特性影响的 PIV 试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2023,40(2):1-8.  
LUO K,ZHANG X Y,CHEN J X,et al. PIV experimental study of existing vertical load on horizontal bearing capacity of pile with cap[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2023, 40(2): 1-8.

[5] 马鹏程,刘润,李国和,等. 成层土中长桩竖向承载激发规律研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2024,41(2):23-29.  
MA P C,LIU R,LI G H,et al. Research on vertical bearing excitation law of long piles in layered soil[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition),2024,41(2):23-29.

[6] LI G W,PEI H F,YIN J H,et al. Monitoring and analysis of PHC pipe piles under hydraulic jacking using FBG sensing technology[J]. Measurement,2014,49:358-367.

[7] YE X,WU J T,LI G W. Time-dependent field performance of PHC pile-cap-beam-supported embankment over soft marine clay[J]. Transportation Geotechnics,2021, 26:100435.

[8] 闫楠,孙淦,袁炳祥,等. 第四系地层预应力混凝土管桩承载性状现场试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2023,54(8):3273-3285.  
YAN N,SUN G,YUAN B X,et al. Field test study on bearing behavior of the fourth strata prestressed concrete pipe pile[J]. Journal of Central South University (Sci-

- ence and Technology), 2023, 54(8): 3273-3285.
- [9] 郭志广,魏丽敏,何群,等. 深厚软土地基预制管桩荷载传递试验与数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3589-3595.  
GUO Z G, WEI L M, HE Q, et al. Experimental and numerical analyses of load transfer characteristics of prestressed concrete pipe pile in deep soft soil[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(10): 3589-3595.
- [10] 杨帆,徐铨彪,陈刚,等. 复合配筋混凝土预制方桩轴向抗压性能研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(3): 102-107+86.  
YANG F, XU Q B, CHEN G, et al. Study on axial compression behavior of composite reinforcement concrete prefabricated square piles[J]. Building Structure, 2019, 49(3): 102-107+86.
- [11] 杨志坚,盖常宏. 轴力对预应力高强混凝土管桩抗震性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(3): 423-431.  
YANG Z J, GAI C H. Effect of axial force on seismic performance of prestressed high-strength concrete piles[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2024, 40(3): 423-431.
- [12] 徐运生,陈忠范,范记,等. 预应力混凝土实心方桩力学性能研究[J]. 中国工程机械学报, 2022, 20(6): 552-556.  
XU Y S, CHEN Z F, FAN J, et al. Research on mechanical properties of prestressed concrete solid square pile[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2022, 20(6): 552-556.
- [13] 张忠苗,喻君,张广兴,等. PHC管桩和预制方桩受力性状试验对比分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3059-3065.  
ZHANG Z M, YU J, ZHANG G X, et al. Contrastive experimental analysis of bearing behaviors of PHC pile and precast square piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3059-3065.
- [14] 郑刚,刘畅,刘永超,等. 往复水平荷载作用下不同桩型单桩水平承载性能足尺对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(1): 32-40.  
ZHENG G, LIU C, LIU Y C, et al. Experimental study on horizontal bearing behaviors of different types of full-scale piles under reciprocating horizontal loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(1): 32-40.
- [15] 上海市建筑科学研究院. 建筑地基与基桩检测技术规程: DG/TJ 08-218—2017[S]. 上海: 同济大学出版社, 2017.  
Shanghai Research Institute of Building Sciences. Technical specification for inspection of building foundations and piles: DG/TJ 08-218—2017[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2017.
- [16] 陈焰明,马燕燕,徐艳萍,等. 软土地区防洪堤工程中预制方桩和PHC管桩的对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 986-989.  
CHEN Y M, MA Y Y, XU Y P, et al. Comparative analysis of precast square piles and PHC piles for flood protection work in soft soil areas[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 986-989.
- [17] LI C C, BAI X Y, YIN J C, et al. Field experimental investigation on bearing characteristics of super-long pile under dynamic compaction in land reclamation area[J]. Applied Ocean Research, 2024, 142: 103842.
- [18] 高磊,袁泽,贺敬绪,等. 基于神经网络模型的预拌流态土剪切特性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(4): 45-51.  
GAO L, YUAN Z, HE J X, et al. Study on shear characteristics of premixed fluid soil based on neural network[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2023, 40(4): 45-51.
- [19] 白晓宇,张明义,寇海磊,等. 基于BP神经网络的静压桩承载力时间效应预测[J]. 工程勘察, 2014, 42(4): 7-11.  
BAI X Y, ZHANG M Y, KOU H L, et al. Prediction of time effect of static pile bearing capacity by BP neural network[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 42(4): 7-11.
- [20] 刘超,白晓宇,银吉超,等. 中风化花岗岩中嵌岩桩承载性能原位试验与极限承载力预测[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024, 41(3): 49-58.  
LIU C, BAI X Y, YIN J C, et al. In-situ test and numerical simulation on bearing characters of rock-socketed pile for medium weathered granite[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2024, 41(3): 49-58.
- [21] 刘俊龙. 双曲线法预测单桩极限承载力的讨论[J]. 岩土工程技术, 2001, 15(4): 204-207+216.  
LIU J L. Discuss on forecasting ultimate bearing capacity of single pile by hyperbola method[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2001, 15(4): 204-207+216.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

- 系统防护能量计算方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2015,35(2):91-96+113.
- QI X, WEI T, YU Z X. Energy calculation method of the rigid protective system for low level rockfall[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(2):91-96+113.
- [11] 齐欣, 韦韬, 余志祥. 高速铁路防零星落块刚性防护系统试验与数值分析[J]. 铁道标准设计, 2013(10):31-35.
- QI X, WEI T, YU Z X. Test research and numerical analysis of rigid protection system against sporadic rock falling on high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2013(10):31-35.
- [12] 辛春亮. 由浅入深精通 LS-DYNA[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019:73-76.
- XIN C L. Master LS-DYNA from shallow to deep[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019:73-76.
- [13] European Organisation for Technical Approvals. ETAG 027: Guideline for European technical approval of falling rock protection kits[M]. Brussels: European Organisation for Technical Approvals, 2013:37-38.
- [14] 张宏. 应用弹塑性力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2011:136-143.
- ZHANG H. Applied elastic-plastic mechanics [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2011:136-143.
- (责任编辑 王利君)
- 
- (上接第 24 页)
- [23] 李波, 余建飞. 基于 PHC 管桩现场静载试验的基桩承载特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(10):96-102.
- LI B, YU J F. Research on bearing characteristics of foundation piles based on on-site static load tests of PHC pipe piles[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(10):96-102.
- [24] 赵飞涛, 窦斌, 钱进中, 等. 粘性土层中 PHZ 方桩荷载检测数据异常分析[J]. 工程勘察, 2022, 50(10):37-42.
- ZHAO F T, DOU B, QIAN J Z, et al. Analysis of abnormal data of loading test on hollow square pile in clay [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2022, 50(10):37-42.
- (责任编辑 王利君)
- 
- (上接第 32 页)
- [17] 王龙, 陈国兴, 胡伟, 等. 基于拟动力法抗滑桩加固非饱和土边坡稳定性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(6):1386-1394.
- WANG L, CHEN G X, HU W, et al. Seismic stability of unsaturated soil slopes stabilized by anti-slide piles based on pseudo-dynamic approach[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(6):1386-1394.
- [18] 王振, 孙志彬, 杨胜宇, 等. 三维加筋边坡抗震稳定性的拟动力上限分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2024, 47(9):1288-1296.
- WANG Z, SUN Z B, YANG S Y, et al. Seismic stability analysis of three-dimensional reinforced slope based on pseudo-dynamic method[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2024, 47(9):1288-1296.
- [19] PAN Q J, QU X R, WANG X. Probabilistic seismic stability of three-dimensional slopes by pseudo-dynamic approach[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(7):1687-1695.
- [20] 李春立, 李东贤, 李亮, 等. 地震对边坡失稳滑动面积的影响研究[J]. 青岛理工大学学报, 2023, 44(4):19-27.
- LI C L, LI D X, LI L, et al. Study of the influence of earthquake on slope failure sliding area[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2023, 44(4):19-27.
- (责任编辑 王利君)