

DOI: 10.11779/CJGE2025S10008

基于现场试验的负摩阻力基桩承载性能研究

李波¹, 余建飞², 刘军¹, 周密¹

(1. 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 浙江石油化工有限公司, 浙江 舟山 316000)

摘要: 针对我国滨海深厚软土地层经排水固结法预处理后仍存在显著工后沉降(达数十厘米量级)诱发桩基负摩阻力效应的问题, 本研究通过现场试验揭示了负摩阻力作用下桩身轴力分布规律及其对承载性能的影响机制。选取 2 根桩端持力层不同的预应力高强混凝土管桩(PHC 桩), 在桩身布设钢筋应力计实时监测轴力演变, 分别模拟桩顶无荷载(工况 I)及施加工作荷载(工况 II)两种工况。试验结果表明: 工况 I 下, 中性点轴力表征桩身最大下拉荷载, 其值随桩周土沉降发展呈递增趋势, 且中性点深度由初始 30.00 m(摩擦桩)下移至 44.66 m(端承桩), 对应下拉荷载分别达 2160 kN 与 3640 kN(桩土相对位移 87 mm); 工况 II 持续加载 55 d 后, 桩顶荷载增量传递至中性点的比例显著衰减, 上部桩-土界面因桩体下沉转为正摩阻力区。研究表明, 在地基处理稳定后期进行桩基施工可有效降低下拉荷载(降幅达 40%以上), 而现行规范基于中性点静态假设的承载力预测值偏于保守。研究成果为优化深厚软土区桩基设计提供了定量化试验依据。

关键词: 桩基工程; 负摩阻力; 深厚软土地基; 中性点迁移; 现场试验

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)S1-0066-05

作者简介: 李波(1982—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事岩土工程和离心模型试验技术方面的研究。E-mail: libo_auliso@126.com。

Bearing capacity of piles with negative skin friction based on field tests

LI Bo¹, YU Jianfei², LIU Jun¹, ZHOU Mi¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Zhejiang Petrochemical Co. Ltd., Zhoushan 316000, China)

Abstract: In response to the significant post-construction settlement (up to tens of centimeters) persisting in coastal deep soft clay strata pretreated by the drainage consolidation methods, which triggers the negative skin friction (NSF) effects on pile foundations, the axial force distribution and bearing performance degradation mechanisms are investigated through the field tests. Two prestressed high-strength concrete (PHC) piles with different tip-bearing layers are selected, and the rebar stress gauges are embedded to monitor the real-time axial force evolution under two working conditions: no pile-top load (Condition I) and applied working load (Condition II). The results demonstrate that under Condition I, the axial force at the neutral point represents the maximum drag load on the pile, which increases progressively with soil settlement. The neutral point depth migrates downward from an initial 30.00 m (friction pile) to 44.66 m (end-bearing pile), corresponding to the drag loads of 2160 kN and 3640 kN, respectively (at a pile-soil relative displacement of 87 mm). After 55 days of sustained loading under Condition II, the proportion of pile-top load increment transmitting below the neutral point significantly attenuates, while the upper pile-soil interface transitions to a positive friction zone due to pile penetration. The study indicates that delaying pile construction until the post-treatment soil stabilization can reduce drag loads by over 40%, whereas the current codes overestimate drag loads by assuming the static neutral points, leading to conservative bearing capacity predictions. These findings provide quantitative experimental evidence for optimizing pile design in deep soft soil regions.

Key words: pile foundation; negative skin friction; deep soft soil strata; neutral point migration; field test

0 引言

中国南方海域多分布深厚软基, 因软基含水率高、

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308067); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2023327/YT); 浙江石油化工有限公司科技项目(ZPCG-01-1162); 安徽省引江济淮集团有限公司科技项目(YJJH-ZT-ZX-20230118528; YJJH-ZT-ZX-20191031216); 武汉市知识创新专项项目(曙光计划项目)(2023020201020359)

收稿日期: 2025-04-05

表 1 现场试验场地各土层的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil layers in test site

地基土名称	天然含水率/ %	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	天然 孔隙比	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	侧阻力特征 值/kPa	端阻力特征 值/kPa
冲填土	—	18.0	—	—	—	—	15	—
淤泥质粉质黏土	39.6	16.7	1.292	2.30	11.9	6.7	14	—
粉质黏土	32.7	19.0	0.909	4.66	22.7	15.4	35	—
含砾粉质黏土	26.9	19.2	0.764	5.55	24.4	18.5	48	2200
中风化凝灰岩	—	—	—	—	—	—	55	3600

强度低、沉降大等问题,常采用塑料排水板进行软基的前期排水固结预处理。但是,地基预处理后的场地无法消除深厚软基的全部沉降,后续沉降可达数十厘米^[1]。由于后期构筑物稳定性和变形的要求,仍需要采用预应力管桩、钻孔灌注桩等桩基进行基础处理。但预处理后地基的大变形沉降,使得桩周土体对埋置于其中桩身产生向下的摩阻力,即产生桩基负摩阻力,易造成桩基承载力不足和桩顶沉降过大,迫使设计采用更多的桩基以满足地基承载力需要,既难以满足工程总工期的建设要求,同时也会造成地基处理的巨大耗资。因此,深厚软土地区桩基负摩阻力发展机理的研究和承载力准确计算成为保证工程安全、指导桩基设计和施工的关键问题。

桩基负摩阻力问题早在 20 世纪 40 年代被人们认识, Terzaghi 和 Peck 首次提出了负摩阻力的概念,随后中性点的概念被提出,并先后出现各种各样计算中性点的计算方法。桩基负摩阻力特性与计算方法、中性点位置确定以及减少负摩阻力措施等问题成为国内外学术界和工程界关心的热点和难点问题之一。现场试验方法^[2-4]是研究桩基负摩阻力特性最直接、最可靠的方法,同时也是验证物理模型试验、数值模拟和理论研究结果合理性的重要手段。李玲玲等^[5]以冲孔灌注桩为例,通过原位试验分析,研究了大面积堆载下桩周土体沉降对桩基负摩阻力特性的影响,探讨了桩周土体固结沉降对桩身所受下拉荷载和中性点位置的影响。邓会元等^[6]在台州湾大桥工程中开展钻孔灌注桩的现场试验,场地的淤泥质粉质黏土软弱土层厚度约为 22 m,地表堆载高度为 4 m,负摩阻力最大为 2687 kN,中性点深度约为 29.5 m,且负摩阻力随堆载时间不断变化。

现有的桩基负摩阻力研究较少针对堆载预压预处理后的软土地基条件,也很少针对在深厚软基中桩顶施加工作荷载的工况,针对的软土厚度一般小于 20 m,产生的下拉荷载作用较小。本文在浙江舟山某深厚软土固结预处理场地,开展 2 根 PHC 管桩的桩基负摩阻力现场试验。通过埋设传感器实测得到桩顶沉降、桩身轴力、桩侧摩阻力随地基固结的变化规律,实测中性点位置的变化。

1 现场试验概况

本次现场试验在浙江舟山某深厚软土固结预处理场地进行,场地原为近海滩涂和水上浅滩,软基深厚,平均厚度约 30 m,采用塑料排水板联合堆载预压进行场地的预处理,预压时间在半年以上,设计工后沉降为 50 cm。开展 2 根预应力管桩的负摩阻力现场试验,在管桩预制过程中设置桩身钢筋计,并监测桩顶和桩周土体沉降。

1.1 桩基参数和地质条件

试验场地尺寸为 100 m \times 100 m,主要地层的物理力学参数见表 1,桩基所在地层剖面如图 1 所示。桩 P1 和桩 P2 均采用预应力管桩 PHC600 (130) AB,持力层分别在中风化凝灰岩和含砾粉质黏土。为避免施工对内置在管桩中的振弦式钢筋计产生影响,采用静压法施工。共设置两根预制管桩,桩 P1 为端承型桩,长度 56.2 m,桩 P2 为摩擦型桩,长度 50 m。

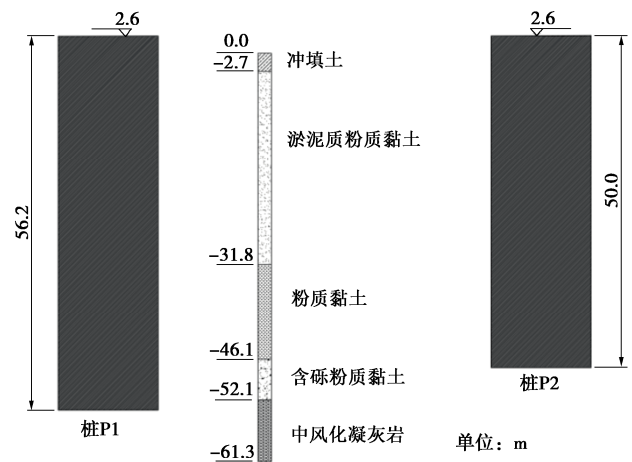


图 1 现场试验地层剖面图

Fig. 1 Profiles of soil layers in test site

1.2 试验过程与步骤

图 2 为桩基负摩阻力现场试验堆载历时曲线。主要分为三个阶段:第一阶段为施工期,场地先施工塑料排水板,于 2018 年 7 月 31 日堆载高程至 2.6 m,回填料采用宕渣料,9 月 8 日开始施工桩基、埋设传感器等。第二阶段为堆载期,场地于 10 月 23 日开始

进行堆载预压，高程分别为4.9 m和8 m。第三阶段为桩顶加载期，桩顶施加载工作荷载，稳压55 d。本文将10月23日的监测结果作为分析的起点，重点分析堆载期中性点的位置和负摩阻力的变化。

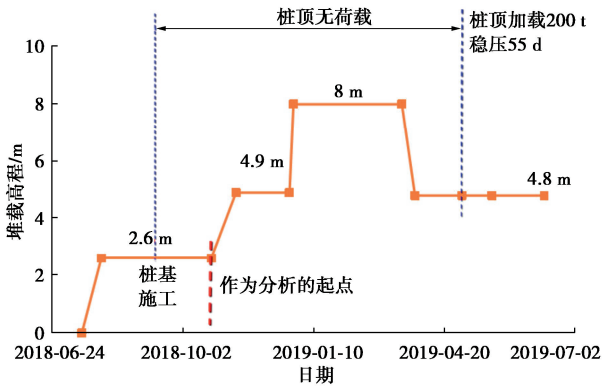


图2 现场试验堆载历时曲线

Fig. 2 Loading duration curves of field tests

1.3 现场监测及传感器布置

在试桩及桩周土内主要埋设振弦式钢筋计、分层沉降仪等，如图3所示。其中，桩身对向布置钢筋计以测试不同深度处的桩身轴力，桩周土内埋设分层沉降仪。在管桩预制过程中埋设钢筋计，以保证传感器能够直接测量桩身轴力，避免对管桩承载受力产生影响，并保证钢筋计的成活率^[7]。

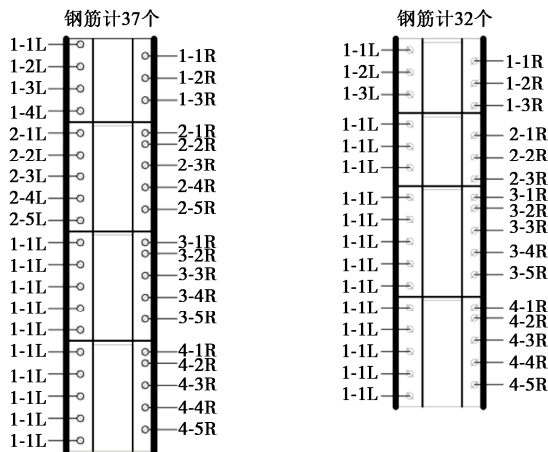


图3 钢筋应力计布置图

Fig. 3 Layout of reinforcement stress meters

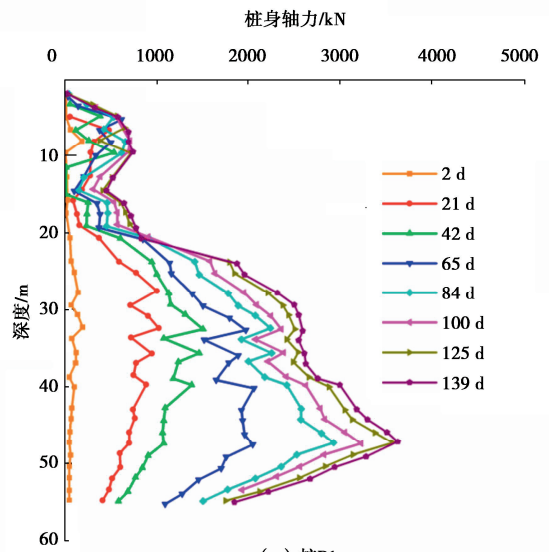
桩P1中钢筋计设置2列，在主筋对向布置，平均间距1.5 m，小计37个；桩P2中钢筋计设置2列，在主筋对向布置，平均间距1.5 m，小计32个。

2 监测结果及分析

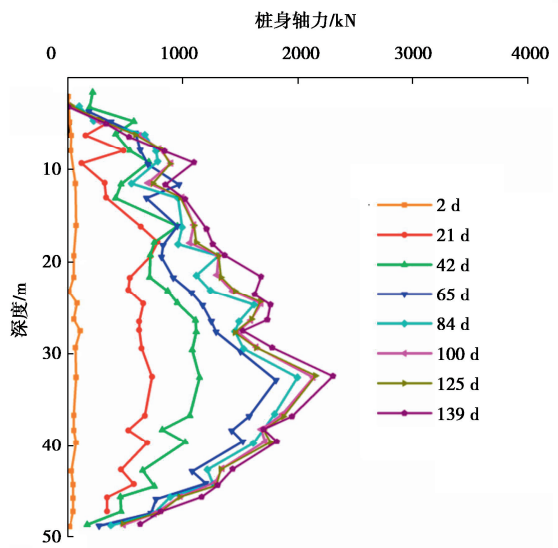
2.1 桩顶无荷载

通过监测桩身钢筋计频率值换算得到桩身轴力，以第一级堆载前的测量结果（2018年10月20日测量

结果）作为分析的基准点，假定此时桩身轴力为零，后续堆载时得到的桩身轴力均为相对于基准点的变化量。图4为桩的桩身轴力-深度分布曲线。



(a) 桩P1



(b) 桩P2

图4 桩身轴力与深度的关系

Fig. 4 Relationship between axial force of pile shaft and depth

分析表明，桩身轴力沿着深度方向先增大后减小，且随着时间逐渐增大。桩周边土体表面堆载高度为4.9 m时，桩P1（端承型）与桩P2（摩擦型）桩身轴力最大值分别约为1498 kN与1250 kN，最大值位于深度约29.9 m与19.8 m处（桩顶高程2.6 m），与压缩层厚度（46.1 m，包括淤泥质粉质黏土和粉质黏土）之比为0.65与0.43。堆载高度为8.0 m时，桩身轴力最大值分别约为3640 kN与2157 kN，最大值位于深度44.66 m与29.96 m处，与压缩层厚度之比为0.97与0.65。结果表明，中性点位置也可通过最大轴力位置确定，随堆载高度逐级增大，中性点位置越深。对于端承型桩，中性点深度为0.65~0.97倍压缩层厚度；对

于摩擦型桩, 中性点深度为 0.43~0.65 倍压缩层厚度。

2.2 桩顶施加工作荷载

在桩顶施加工作荷载(桩 P1 为 2000 kN 和桩 P2 位 1500 kN)作用稳压 55 d 时间, 最后不断施加荷载直至破坏。研究桩身轴力随桩周土固结沉降的变化规律。

以桩基施工后(2018 年 10 月 23 日)的测量结果作为基准点, 得到如图 5 所示不同固结时间的桩身轴力-深度的曲线, 沿桩身自上而下, 轴力增量先增大后减小。分析表明, 随固结时间的增大, 中性点位置逐渐上移。对于端承型桩 P1, 桩顶加载约 2000 kN, 稳压 55 d 后, 桩身轴力最大值约 3978 kN, 最大值位于深度约 43.2 m 处(桩顶高程 2.6 m), 与压缩层厚度(46.1 m, 包括淤泥质粉质黏土和粉质黏土)之比为 0.94; 对于摩擦型桩, 桩顶加载约 1500 kN, 稳压 55 d 后, 桩身轴力最大值约 2851 kN, 最大值位于深度约 19.1 m 处, 与压缩层厚度之比为 0.41。

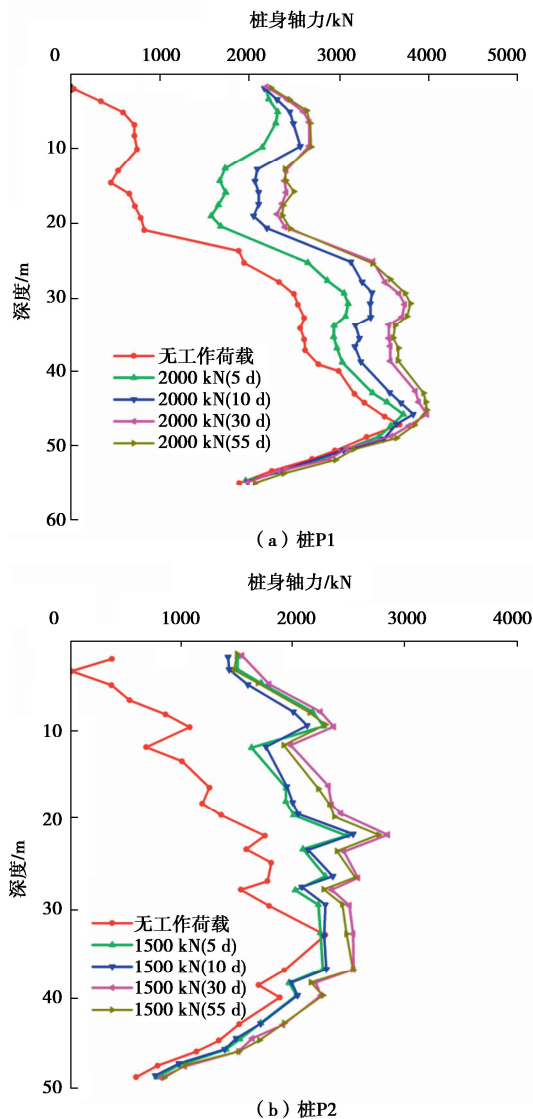


图 5 桩身轴力随深度变化曲线

Fig. 5 Variation of axial force of pile shaft with depth

稳压结束后, 继续增大桩 P1 桩顶荷载, 按照慢速维持荷载法, 继续增大桩顶工作荷载直至桩发生破坏, 此时的最大工作荷载为 6000 kN。

3 讨 论

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)表明中性点深度与桩周土和桩的沉降密切相关。现场试验与规范得出的中性点深度对比, 如表 2 所示。分析表明: 桩顶无荷载作用, 桩周土堆载预压过程中, 中性点位置相对比较深, 与规范建议的中性点深度基本一致; 当桩顶施加工作荷载时, 桩产生一定的沉降, 桩周土沉降与桩沉降相等的位置存在一定的上移, 即中性点产生一定的上移; 桩顶荷载继续增加, 开展常规竖向抗压静载试验时, 由于桩产生沉降, 整个桩身基本没有负摩阻力作用, 桩侧基本全部表现为正摩阻力作用。

表 2 中性点深度的对比

Table 2 Comparison of depths of neutral point

桩号	桩顶无荷载(桩周土堆载预压)	桩顶加载(稳压 55 d)	规范 JGJ—2008	说明
P1	0.65~0.97	0.97~0.94	1.0	端承型桩
P2	0.43~0.65	0.65~0.41	0.5~0.8	摩擦型桩

《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)对预制管桩的极限承载力采用如下公式计算:

$$Q_u = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p$$

式中: Q_u 为极限承载力; u 为桩身周长; q_{sik} 为桩侧第 i 层土极限侧阻力标准值; l_i 为第 i 层土地厚度; q_{pk} 为极限端阻力标准值; A_p 为桩端截面积。

桩顶继续施加工作荷载, 得到实测单桩竖向抗压承载力为 6000 kN (此时已无负摩阻力), 规范计算值为 5312 kN, 两者相差约 13%。

4 结 论

基于滨海深厚软土地基排水固结预处理场地开展的 PHC 管桩负摩阻力现场试验, 通过桩身轴力及中性点动态监测数据, 系统揭示了桩顶无荷载与工作荷载耦合作用下轴力演化规律及中性点迁移机制, 主要结论如下:

(1) 中性点动态迁移机制与荷载传递特性

桩顶无荷载工况下, 中性点深度随桩周土堆载预压进程呈渐进下移特征。端承桩 P1 与摩擦桩 P2 中性点深度分别分布于 29.0~44.7 m (0.65~0.97 倍压缩层厚度) 与 19.8~30.0 m (0.43~0.65 倍压缩层厚度) 区间。当桩土相对位移达 87 mm 时, P1 与 P2 下拉荷载峰值分别为 3640 kN 与 2160 kN, 对应中性点深度为 44.7 m 与 30.0 m。

桩顶施加工作荷载 (P1:2000 kN, P2:1500 kN)

后,中性点显著上移(P1:44.7→43.2 m; P2:30.0→19.1 m),且摩擦桩中性点位移敏感性高于端承桩(摩擦桩和端承桩中性点位移幅度分别达36.3%和3.4%)。稳压55 d后,桩土相对位移收敛至39 mm,下拉荷载衰减至803 kN(P1)与539 kN(P2)。

(2) 规范中性点预测偏差与修正建议

现行规范(JGJ 94—2008)中性点深度估算值较实测结果偏高,其根源在于未计入桩顶荷载效应及地表堆载强度影响,仅基于桩端持力层性质保守取最大值。试验表明,桩顶荷载与堆载耦合作用可诱发中性点动态回缩,建议修正规范模型以纳入荷载-位移耦合参数。

(3) 地基处理时效性与承载力优化路径

滞后施作桩基(地基固结度 $\geq 90\%$)可显著抑制下拉荷载发展,对比试验表明桩顶荷载增量($\Delta Q = 2000$ kN)传递至中性点以下的比例不足18%,验证了“先固结、后施桩”工艺的可行性。

桩身轴力沿深度呈非线性衰减,桩侧摩阻力随荷载增加由负转正。当桩顶荷载达6000 kN时,桩侧摩阻力完全转化为正摩阻力,实测极限承载力(6000 kN)较规范计算值(5312 kN)高13%,表明现行规范低估了桩-土协同承载潜力。

参考文献:

- [1] 李波,程文亮,项存平,等. 大面积堆载预压处理深厚软基工后沉降预测研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊2): 162-165. (LI Bo, CHENG Wenliang, XIANG Cunping, et al. Prediction of post-construction settlement of soft foundation after large-area surcharge preloading treatment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S2): 162-165. (in Chinese))
- [2] 高登辉,赵宽耀,金松丽,等. 大厚度自重湿陷性黄土场地桩基负摩阻力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(增刊1): 231-235. (GAO Denghui, ZHAO Kuanyao, JIN Songli, et al. Method for calculating negative skin friction of pile foundation in large-thickness self-weight collapsible loess silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(S1): 231-235. (in Chinese))
- [3] 谷川,王林伟,王军,等. 不同初始含水率条件下欠固结软黏土地基单桩负摩阻力模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(12): 2554-2566. (GU Chuan, WANG Linwei, WANG Jun, et al. Model tests on the negative skin friction of a pile in unconsolidated soft clay foundation with various initial water contents[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(12): 2554-2566. (in Chinese))
- [4] FELLENIUS B H. Results from long-term measurement in piles of drag load and downdrag[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, **43**(4): 409-430.
- [5] 李玲玲,王立忠,邢月龙. 大直径钻孔灌注桩负摩阻力试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(3): 583-590. (LI Lingling, WANG Lizhong, XING Yuelong. Experimental research on negative skin friction of large-diameter bored piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(3): 583-590. (in Chinese))
- [6] 邓会元,戴国亮,龚维明,等. 不同平衡堆载条件下桩基承载特性的原位试验研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(11): 3063-3070. (DENG Huiyuan, DAI Guoliang, GONG Weiming, et al. In situ experimental study of bearing characteristics of pile foundation under different balanced surcharges[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(11): 3063-3070. (in Chinese))
- [7] 程文亮,李波,刘勇,等. 预应力管桩制作过程中钢筋计埋设研究[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2021, **40**(1): 32-39. (CHENG Wenliang, LI Bo, LIU Yong, et al. Study on installation techniques of vibrating wire rebar meter in production process of prestressed pipe pile[J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology (Natural Science Edition), 2021, **41**(1): 32-39. (in Chinese))

(编校: 明经平)