

DOI: 10.11779/CJGE2024S20010

基于分布式光纤传感技术的超长桩承载特性分析

付张鑫¹, 曹文昭^{*1,2}, 吴旭君^{1,2}, 张兴杰², 罗沐池¹

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100082; 2. 中国京冶工程技术有限公司, 北京 100082)

摘要: 为探究不同地质条件下超长桩承载变形特性及数值模拟中摩擦系数对桩-土相互作用的影响, 以深圳湾超级总部某项目系列试桩为背景, 采用 FBG 密集分布式光纤传感技术进行基桩内力测试, 并采用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟, 对比分析桩、土界面采用不同摩擦系数取值方式时土层平均侧阻力模拟结果。结果表明: ①灌注桩承载变形特性与桩长和持力层性质密切相关, 超长桩轴向沿深度方向基本呈线性递减, 端阻比明显减小; 持力层为强风化花岗岩层时, 试桩轴向沿深度方向呈“大肚形”递减, 端阻比低于 17.1%。②数值模拟中摩擦系数取值方式会对土体侧阻力模拟结果产生较大影响, 根据土层性质差异, 对桩土界面采用多个摩擦系数能够提高模拟结果准确性。

关键词: FBG 密集分布式光纤传感技术; 超长灌注桩; 承载变形特性; 数值模拟; 侧阻力

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S2-0140-05

作者简介: 付张鑫(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事桩-土相互作用方面的研究工作。E-mail: 2321473728@qq.com。

Bearing characteristics of ultra-long piles based on distributed fiber optic sensing technology

FU Zhangxin¹, CAO Wenzhao^{1,2}, WU Xujun^{1,2}, ZHANG Xingjie², LUO Muchi¹

(1. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing 100082, China; 2. China Jingye Engineering Co., Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: Based on a series of pile foundation tests from a project in the Super Headquarters Base in Shenzhen Bay, the load deformation characteristics of super-long piles under different geological conditions and the impact of friction coefficient on pile-soil interaction in numerical simulations are investigated. The FBG (fiber bragg grating) densely distributed fiber optic sensing technology is employed for internal force tests of the piles and the ABAQUS for numerical simulations. The results of the simulated average lateral resistance of the soil layers are compared and analyzed with different friction coefficient values applied to the pile-soil interface. The results indicate that: (1) The load deformation characteristics of bored piles are closely related to the pile length and the properties of the bearing stratum. The axial force of super-long piles decreases linearly with depth, and the end resistance ratio significantly reduces. In cases where the bearing layer consists of moderately weathered granite, the axial force of the test pile decreases in a "bulging" shape along the depth direction, with the end resistance ratio lower than 17.1%. (2) The method for determining the friction coefficient in numerical simulations significantly impacts the simulated lateral resistance of the soil. Multiple friction coefficients at the pile-soil interface can improve the accuracy of the simulated results, depending on the nature of the soil layer.

Key words: FBG densely distributed fiber optic sensing technology; super-long bored pile; bearing deformation characteristic; numerical simulation; lateral resistance

0 引言

灌注桩具有承载力高、适应性强、施工方便等优点, 被广泛应用于工程建设中, 工程实践中常采用静载试验探究基桩承载变形特性。然而, 受限于传统测试手段精度低、布设难度大的缺陷, 基桩静载试验中难以实现对 50 m 以上长桩内力、变形的高精度测试。针对这一问题, 诸多学者将光纤传感技术应用到基桩内力测试中, 朴春德等^[1]、杨建平^[2]将 BOTDR 光纤

传感技术应用于灌注桩内力测试中, 结果表明采用光纤传感技术能够显著提高桩基内力测试精度。

基桩静载试验数值模拟中摩擦系数反应桩-土接触面上作用的切向摩擦力与法向力的比值, 该值与接触

基金项目: 五矿科技创新发展基金项目 (JHCX20220011); 国家重点研发计划项目 (2023YFB3711605)

收稿日期: 2024-06-21

*通信作者 (E-mail: cwz_1990@alumni.hust.edu.cn)

面的粗糙情况密切相关而与接触面积无关。贺嘉等^[3]、高鲁超等^[4]、秦仕伟等^[5]采用 ABAQUS 有限元软件探究灌注桩承载变形特性, 模拟桩-土相互作用时对桩、土接触面采用统一摩擦系数。考虑到不同土层与桩接触面粗糙程度存在显著差异性, 想要实现桩-土相互作用的准确模拟, 应对数值模拟中桩、土界面摩擦系数取值方法开展研究。

本文以深圳湾超级总部某项目为依托, 采用 FBG 密集分布式光纤传感技术进行基桩内力测试, 旨在对深圳地区超长桩荷载传递机理及承载变形特性进行研究, 并采用 ABAQUS 软件建立基桩静载试验数值模型, 探究摩擦系数对桩-土相互作用的影响。

1 密集分布式光纤测试原理

目前工程应用中常见的光纤传感技术主要是基于布里渊散射的光频域散射技术。密集分布式光纤传感技术基于布里渊频域技术, 采用扫描波长干涉测量技术 (SWI) 测量光纤的温度和应变分布^[6]。波长与应变、温度满足线性关系式^[6]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B0}} = (1 - P_c)\Delta\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_{B0}} = C_s\Delta\varepsilon + C_T\Delta T. \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda$ 表示 FBG 波长变化量; ε 为光纤应变; ΔT 为温度变化; P_c 为光纤光弹系数; α 为光纤热膨胀系数; ζ 为光纤热光系数; C_s 和 C_T 分别为应变校准常数和温度校准常数。

光纤与灌注桩主筋进行绑扎, 认为光纤轴向应变与桩身轴向应变一致, 桩身应力按下式计算:

$$\sigma(Z) = \varepsilon(Z) \cdot E_c. \quad (3)$$

式中: $\sigma(Z)$ 为桩身应力; $\varepsilon(Z)$ 为桩身应变; E_c 为灌注桩弹性模量。

桩身侧摩阻力按照土层进行计算, 对某一土层取上下截面之间的轴力差值与该土层中桩周面积之比为该段桩的桩身侧摩阻力:

$$F(Z) = \sigma(Z) \cdot A, \quad (4)$$

$$\Delta F(Z) = F(Z_2) - F(Z_1), \quad (5)$$

$$F_s(Z) = -\frac{1}{U} \frac{\Delta F(Z)}{\Delta Z}. \quad (6)$$

式中: $F(Z)$ 为试桩轴力; A 为桩身截面面积; $F_s(Z)$ 为桩侧摩阻力; U 为桩周长。

2 现场静载试验

2.1 试验概况

深圳湾超级总部某项目位于深圳市南山区, 根据工程需要, 对不同地层分布情况下的 3 根灌注桩进行

现场静载试验, 表 1 为不同灌注桩参数, 其中 Z5、Z8 设计为摩擦端承桩, Z10 设计为摩擦桩。

表 1 灌注桩参数

Table 1 Parameters of cast-in-place piles

桩号	桩径/mm	桩长/m	混凝土强度等级
Z5	1000	67.8	C50
Z8	1200	51.6	C50
Z10	800	50.9	C50

2.2 试验方案

(1) 静载试验方案

静载试验参照《深圳市建筑基桩检测规范》(SJG09—2020)^[7]4.3.5 条设置分级加载, 分级荷载为预估单桩竖向抗压极限承载力的 1/10, 首级荷载取分级荷载的 2.0 倍, 每级荷载施加完成, 试桩沉降相对稳定后, 再施加下一级荷载。荷载设置见表 2。

表 2 灌注桩加载情况

Table 2 Loading conditions of cast-in-place piles

桩号	首级荷载/kN	分级荷载/kN	最终荷载/kN	加载级数
Z5	4000	2000	14000	6
Z8	6200	3100	32000	9
Z10	2000	1000	13000	12

(2) 密集分布式光纤布置

本试验密集分布式光纤分两个方向沿钢筋笼主筋内侧布置, 光纤与主筋进行绑扎固定, 光纤布置形状为“U”形, 光纤布置如图 1 所示。

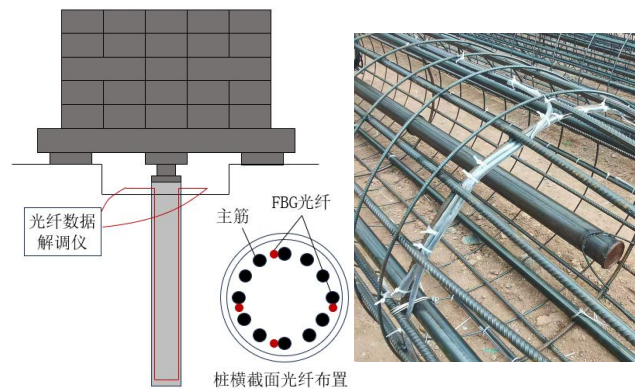


图 1 FBG 光纤布置图

Fig. 1 Layout of FBG fiber optic sensors

2.3 试验结果分析

图 2 为试桩轴力沿深度变化情况, 试桩轴力沿深度方向整体呈递减趋势。首级加载时, 试桩轴力基本按线性趋势减小, 桩端处轴力几乎为 0, 桩端阻力基本没有发挥, 桩顶荷载全部传递给桩侧土体; 随荷载等级增加, 试桩轴力递减趋势增强, 表明桩侧土体逐渐进入塑性变形阶段, 桩端阻力随荷载等级增加不断增大。对比图 2 (a) ~ (c) 可发现, 试桩轴力沿深度方向变化情况与桩长和持力层性质密切相关, 桩长较大时, 土层侧阻力尚未完全发挥, 试桩轴力沿深度方向基本呈线性趋势递减; 持力层为中风化花岗岩时,

各级荷载作用下试桩轴力沿深度方向基本按线性趋势递减(图2(a),(b)),持力层为强风化花岗岩时,各级荷载作用下试桩轴力在桩身下部快速减小(图2(c))。

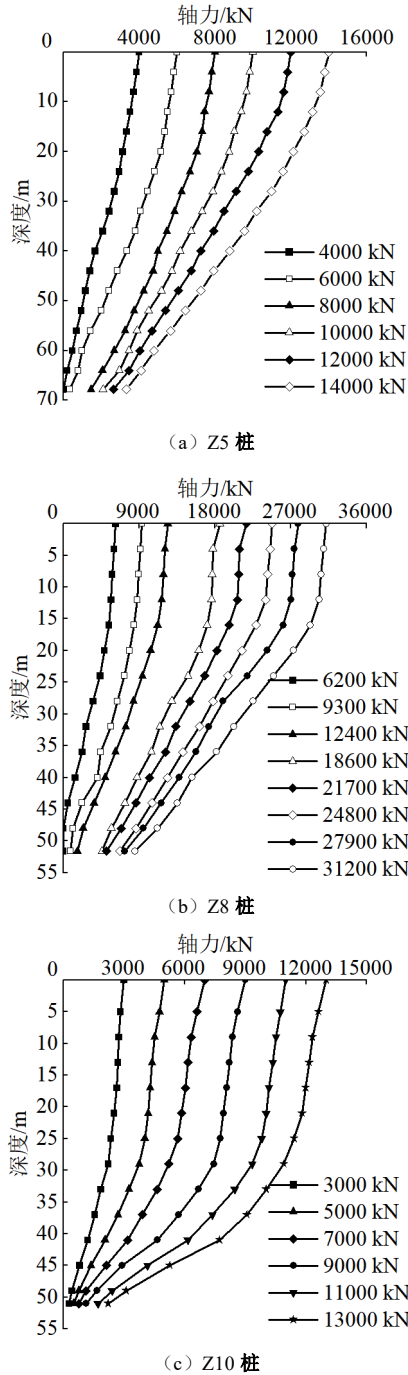


图2 试桩轴力沿深度变化

Fig. 2 Variation of pile axial force along depth

加载过程中各试桩端承力和侧摩阻力占比变化情况如图3所示。试桩 Z5、Z8 设计为摩擦端承桩,持力层为中风化花岗岩,首级加载时端阻力几乎不发挥,端阻比随荷载增大而不断增大,加至最后一级荷载时端阻比分别为 23.7%、27.3%。试桩 Z10 设计为摩擦桩,持力层为强风化花岗岩层,加载过程中端阻比几乎保持不变,加至最后一级荷载时端阻比为 17.1%。

总体来说,超长灌注桩侧摩阻力占据主导地位,承担70%以上的荷载,端阻力发挥滞后于桩侧摩阻力,加载过程中试桩端承力和侧阻力占比与桩长和持力层性质密切相关,类似地层条件下,桩长较大时试桩端阻比明显减小,侧摩阻力占比明显提高;持力层为中风化花岗岩时,试桩端阻比明显提高。

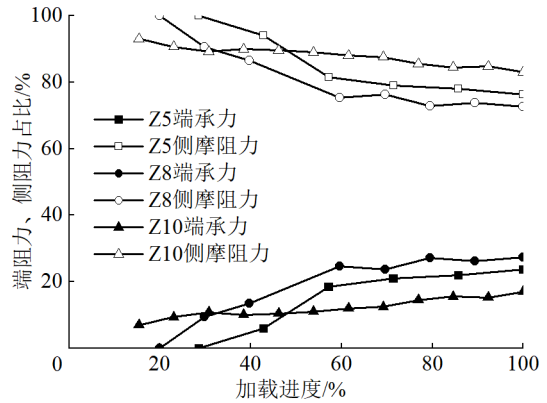


图3 桩端阻力、侧摩阻力占比图

Fig. 3 Percentage distribution of pile end resistance and side friction resistance

试桩加载过程中各土层实测极限平均侧阻力见表3,桩周土极限侧阻力参照《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106—2014)^[8]中给出的建议值。总体来说,Z8、Z10 桩周各土层实测平均极限侧阻力值与规范较为接近,Z8 桩周砾质黏性土、全风化花岗岩层极限平均侧阻力远高于规范建议值,可能原因是成孔过程中出现了“扩径”现象。Z5 桩上部土层极限侧阻力平均值与规范较为接近,下部风化花岗岩层侧阻力远低于规范建议值,原因在于设计桩长较长,且未加载到试桩破坏,下部土层与桩相对位移较小,土层侧阻力未能完全发挥。

表3 桩周土实测极限平均侧阻力

Table 3 Measured average ultimate side resistances of soils

土层	单位: kPa			规范建议值 ^[8]
	Z5	Z8	Z10	
①1 杂填土	17.95	23.08	30.05	20~28
②3 淤泥	34.31	19.90	21.91	12~18
④1 砾质黏性土	41.52	132.98	37.38	38~96
⑤1 全风化花岗岩	55.56	150.61	105.41	120~140
⑤2 强风化花岗岩	60.80	150.62	191.24	160~240
⑤4 中风化花岗岩	73.42	218.11	—	—

3 数值模拟

3.1 数值模型的建立

试桩 Z10 和桩周土体采用 C3D8R 实体单元,假定桩体为均匀的线弹性材料,土体为均匀的弹塑性材料,变形满足 Mohr-Coulomb 准则。

土体模型计算厚度取 2 倍桩长, 径向范围取 20 倍桩径, 如图 4 所示为数值模型尺寸参数。试验桩 Z10 混凝土强度等级为 C50, 弹性模量为 3.45×10^4 MPa, 泊松比 0.2, 重度为 $25.0 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。土体按照地勘资料共分为五层, 土层参数见表 4。

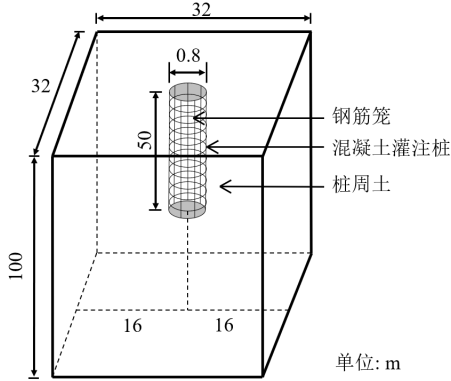


图 4 数值模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of numerical model

表 4 土层参数

Table 4 Soil parameters

土层	厚度/ m	重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	压缩模量 E_s/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	泊松比 μ
①1	9.1	18.0	3.0	12.0	15	0.38
②3	3.5	17.0	2.5	10.0	4	0.35
④1	19.2	19.0	8.0	22.5	20	0.33
⑤1	4.7	20.5	15.0	33.0	29	0.35
⑤2	—	25.0	24.0	37.0	31	0.35

3.2 模拟结果分析

试桩 Z10 轴力实测值与模拟值沿深度变化情况如图 5 所示。试桩轴力沿深度方向呈“大肚形”趋势减小, 数值模拟结果与实测结果吻合较好, 误差在可接受范围之内, 验证了数值模拟的有效性。

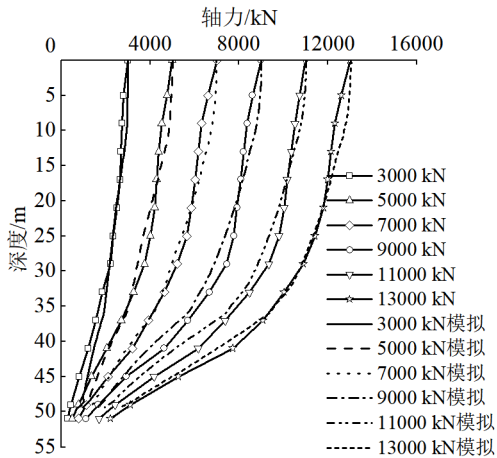


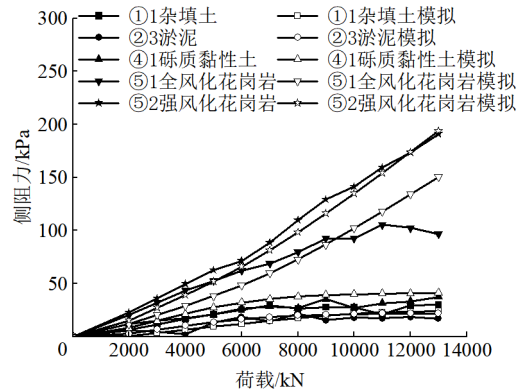
图 5 试验与数值模拟结果

Fig. 5 Experimental and numerical results

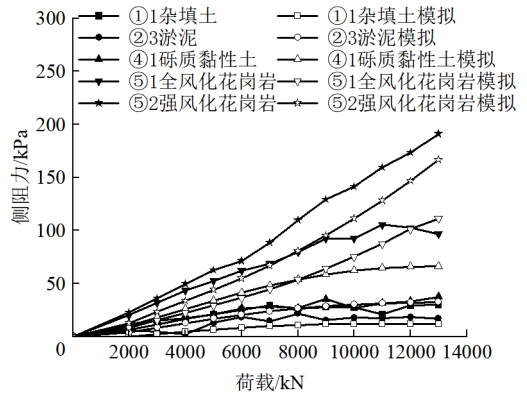
4 摩擦系数对土层侧阻力影响分析

采用 ABAQUS 有限元软件对各土层与桩界面采

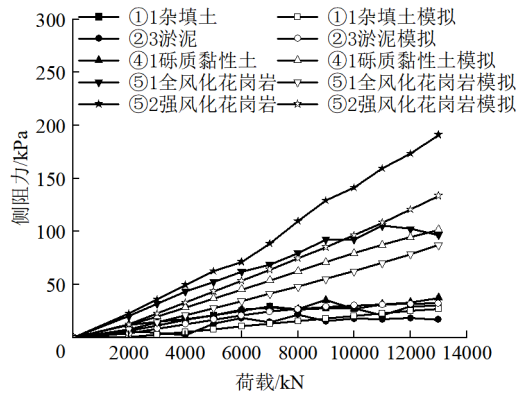
用不同摩擦系数 μ 以及统一取界面摩擦系数为 0.3、0.5、0.7 进行建模, 图 6 为采用不同摩擦系数取值方式, 各土层的平均侧阻力模拟值与实测值对比情况。



(a) 各土层与桩界面摩擦系数不同



(b) $\mu=0.3$



(c) $\mu=0.7$

图 6 不同摩擦系数土层侧阻力发挥对比

Fig. 6 Comparison of side resistance in soil layers with different friction coefficients

各土层实测平均侧阻力随荷载增大整体呈递增趋势, 杂填土、淤泥及砾质黏性土随荷载增大逐渐进入屈服, 平均侧阻力随荷载增大而增大, 达到平均侧阻力峰值后基本保持不变。如图 6 (a) 所示, 各土层与桩界面采用不同摩擦系数时, 极限平均侧阻力模拟值与实测值拟合最优; 如图 6 (b), (c) 所示, 采用统一界面摩擦系数时, 随着摩擦系数增大, 土层平均侧阻力模拟值与实测值误差逐渐增大, 且砾质黏性土平

均侧阻力峰值趋于不明显。总体来说,摩擦系数取值不同,桩周土层侧阻力发挥存在显著差异,摩擦系数对 ABAQUS 数值模拟中桩-土相互作用影响显著,各土层与桩界面采用不同摩擦系数时,土层侧阻力模拟值与实测值拟合较好。

各土层与桩界面采用不同摩擦系数时土层极限平均侧阻力模拟值与实测值见表 5。杂填土、淤泥、砾质黏性土极限平均侧阻力模拟值与实测值比值分别为 0.80、1.00、1.10,数值误差在 20%以内,全风化、强风化花岗岩层未出现平均侧阻力峰值,但最后一级荷载加载完成时,土层平均侧阻力模拟值与实测值较为接近。各土层极限平均侧阻力实测值、模拟值基本处于规范建议值范围内或略有超出,可为深圳地区类似工程的设计与分析提供参考。

表 5 土层极限平均侧阻力

Table 5 Ultimate average lateral resistances of soil layers

土层	摩擦系数 μ	模拟值/ kPa	实测值/ kPa	规范建议 值 ^[8] /kPa	比 值
①1	0.22	23.86	30.05	20~28	0.80
②3	0.50	21.87	21.91	12~18	1.00
④1	0.20	41.17	37.38	38~96	1.10
⑤1	0.29	150.75	105.41	120~140	1.43
⑤2	0.27	193.71	191.24	160~240	1.01

5 结 论

以深圳湾超级总部某项目试桩为背景,采用 FBG 密集分布式光纤传感技术进行灌注桩内力测试,并结合 ABAQUS 建模计算结果,分析摩擦系数对桩-土相互作用的影响,主要得到以下结论:

(1)灌注桩承载变形特性与桩长和桩周土性质密切相关,超长桩端阻比明显较小,试桩轴力沿深度方向基本按线性趋势递减。桩端持力层为中风化花岗岩时,桩端阻比较大,试桩轴力随荷载增大基本按线性趋势递减,持力层为强风化花岗岩层时,桩端阻比较小,试桩轴力呈“大肚形”趋势递减。

(2)数值模拟中摩擦系数取值方式会对土体侧阻力模拟结果产生较大影响,根据土层性质差异,对桩土界面采用多个摩擦系数能够提高模拟结果准确性。

(3)对深圳地区桩基试验进行 FBG 密集分布式测试与数值模拟,揭示了超长灌注桩承载变形特性及摩擦系数对桩-土相互作用的影响,可为深圳地区类似工程的设计、分析提供参考。

参考文献:

[1] 朴春德,施 斌,魏广庆,等. 分布式光纤传感技术在钻孔灌注桩检测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 976-981. (PIAO Chunde, SHI Bin, WEI Guangqing, et al.

Application of distributed fiber optic sensing techniques in bored pile detection[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 976-981. (in Chinese))

[2] 杨建平,朴春德,常鸿飞,等. 水平荷载下灌注桩变形分布式检测及承载机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 2983-2988. (YANG Jianping, PIAO Chunde, CHANG Hongfei, et al. Distributed detection of deformation and bearing mechanism on bored pile under horizontal load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 2983-2988. (in Chinese))

[3] 贺 嘉,陈国兴. 基于 ABAQUS 软件的大直径桩承载力-变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(2): 306-310. (HE Jia, CHEN Guoxing, Analysis of bearing capacity-deformation of the large diameter pile by the ABAQUS software[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2): 306-310. (in Chinese))

[4] 高鲁超,叶生洋. 基于 ABAQUS 软件的单桩静载试验数值模拟[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, 32(3): 51-54. (GAO Luchao, YE Shengyang. Numerical simulation of the single pile static load test based on ABAQUS software[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2015, 32(3): 51-54. (in Chinese))

[5] 秦仕伟,高 磊,韦兵兵,等. 基于光纤技术和有限元计算的灌注桩承载特性[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5685-5692. (QIN Shiwei, GAO Lei, WEI Bingbing, et al. Bearing characteristics of cast-in-place piles based on optical fiber technology and finite element calculation[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(13): 5685-5692. (in Chinese))

[6] HUANG X D, WANG Y, SUN Y Y, et al. Research on horizontal displacement monitoring of deep soil based on a distributed optical fibre sensor[J]. Journal of Modern Optics, 2018, 65(2): 158-165.

[7] 深圳市建筑基桩检测规程: SJG 09—2020[S]. 2020. (Testing Specification of Building Foundation Piles in Shenzhen City: SJG 09—2020 [S]. 2020. (in Chinese))

[8] 建筑基桩检测技术规范: JGJ 106—2014[S]. 2014. (Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ 106—2014[S]. 2014. (in Chinese))

[9] 曹文昭,杨志银,王雪阳. 大直径超长桩静载试验中试桩-锚桩相互影响分析[J]. 工业建筑, 2022, 52(9): 206-213. (CAO Wenzhao, YANG Zhiyin, WANG Xueyang. Analysis of interaction between test piles and reaction piles of super-long large diameter piles in static loading tests[J]. Industrial Construction, 2022, 52(9): 206-213. (in Chinese))