

文章编号: 2097-096X(2025)-04-0393-09

分层土中超长钻孔灌注桩侧摩阻力预测方法讨论

宋士杰^{1,2}, 段志强^{1,2}, 郭伟², 任宇晓²

(1. 天津市勘察设计院集团有限公司, 天津 300191; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 桩侧摩阻力是决定超长桩基承载力的重要因素。本文基于某高层建筑的超长钻孔灌注桩的现场桩基静载试验结果, 分析了桩基在成层土中的荷载-位移发展关系和桩侧摩阻力发展特性, 评估了基于静力触探试验(CPT)和标准贯入试验(SPT)结果的若干种预测桩侧极限摩阻的方法的准确性。试验结果表明: 试桩表现为摩擦桩。在 3 种 CPT 方法中, Bustamante 法依赖对经验摩擦系数的选择, 对本地区土层桩侧极限摩阻力的预测在黏土中偏小、在粉土中偏大。建筑桩基技术规范对除地表土层以外的其他土层中的桩侧极限摩阻力的预测最为准确。SPT 方法的整体精度高于 CPT 方法, 其中 Yamashita 精度最高, 可利用 SPT 试验结果建立适合本地区的经验公式以准确预测桩侧极限摩阻力。

关键词: 钻孔灌注桩; 极限摩阻; 荷载传递特性; 静力触探试验; 标准贯入试验; 成层土

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240113

1 研究背景

由于沿海地区软土层较厚, 在建设高层建筑时, 往往需要采用超长桩基础来承担上部荷载。这类桩主要是通过桩侧摩阻力承担荷载而非桩端阻力, 在功能上可归类为摩擦桩。沿海地区存在地基淤泥承载力弱, 地表稳定性差等特点, 对桩基承载能力的发挥是个考验^[1]。钻孔灌注桩具有造价低、承载力高、工程适应性强等优点, 是目前应用最广泛的基础之一^[2-3]。钻孔灌注桩的极限侧摩阻力是影响其荷载传递机理和决定承载能力的关键指标之一^[4]。由于极限侧摩阻力受桩周围土层特性、桩径、桩土界面特性等诸多因素的影响, 桩身极限摩阻力一直受到众多学者的关注^[5]。

α 法和 β 法等经验方法常被用来预测桩-土界面的极限摩阻力^[6-8], 但 α 法通常适用于黏土在不排水条件下的桩侧摩阻力预测, β 法虽在砂土和黏土中都有应用但摩擦系数的取值需要依赖实测数据。

原位试验方法如静力触探试验(CPT)^[9-11]具有操作简单、成本低、可靠性高、适应各种环境等优点, 是桩基设计分析中应用最广泛的方法。标准贯入试验(SPT)^[12]也是一种常用的原位试验方法, 标准贯入击数(N_{60})与土体性质之间存在相关性, 通过将修正系数与 N_{60} 相乘可确定极限桩侧摩阻力。由于桩型和土层性质的不同, 该修正系数的取值不同^[13]。

本文以天津某超高层建筑的穿越分层土的超长桩基础的试桩静载试验为例, 采用上述两种原位试验方法计算桩侧极限摩阻力, 讨论了现有的几种极限桩侧摩阻力的计算方法及其优缺点, 并结合现场试验结果对其精度进行了分析。

2 原位试验预测桩侧阻力方法

表 1 列举了利用 CPT 和 SPT 测试结果预测桩侧极限摩阻力 τ_{su} 的方法。基于 CPT 的方法中, Busta-

收稿日期: 2024-07-09; 网络首发时间: 2024-11-28

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.tv.20241128.0909.001>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52171273, 52108335, 52078336); 天津市科技计划项目(20JCJCJC00220)

作者简介: 宋士杰(1971-), 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察设计和咨询工作。E-mail: Song_shijie@sina.com

通信作者: 任宇晓(1991-), 博士, 副研究员, 主要从事岩土工程领域的研究工作。E-mail: renyx@tju.edu.cn

mante 等^[14]建议对 15~120 kPa 范围内的极限侧摩阻力, 将 CPT 试验测得的锥尖阻力 q_c 除以无量纲系数 ζ_f 作为对应桩段的极限侧摩阻力, 无量纲系数根据土性在 30~150 范围内取值。Dekuiter 等^[15]基于 α 和 β 法提供了针对不同土性的两种方法。对黏土, 将锥尖阻力除以范围在 15~20 之间的无量纲系数 N_k 作为岩土体的不排水抗剪强度 s_u , 并乘以折减系数 α 作为极限侧摩阻力, 其中 α 在正常固结土和超固结土中分别取 1 和 0.5。对砂土, 将锥尖阻力乘以折减系数 β 作为极限侧摩阻力, 其中 β 对抗压桩和抗拔桩的取值分别为 1/300 和 1/400。《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[16]中建议将锥侧阻力 q_s 乘以系数 β 作为极限侧摩阻力, 对黏性土与粉土 β 取 $10.04q_s^{-0.55}$, 对砂土 β 取 $5.05q_s^{-0.45}$ 。

基于 SPT 的方法中, Yamashita 等^[17]建议将标准贯入击数 N 乘以系数 κ 并加上强度参数 η 作为极限桩侧摩阻力, 其中在非黏性土中当 $\tau_{su} \leq 200$ kPa 时 η 取 30, κ 取 2.0, 在黏性土中当 $\tau_{su} \leq 150$ kPa 时 η 取 0, κ 取 5.0。Shioi 等^[18]建议, 对现场浇筑桩, 当 $\tau_{su} \leq 150$ kPa 时, 将 N 乘以系数 α 作为极限桩侧摩阻力, 对非黏性土, α 取 5.0, 对黏性土, α 取 10.0。Decourt 等^[19]建议, 将 $2.8N+10$ 乘以系数 α 作为极限桩侧摩阻力, 其中, 对任意土中的挤土桩或黏土中的非挤土桩, α 取 1, 对粒状土壤中的非挤土桩, α 取 0.5~0.6。

表 1 设计计算方法汇总
Table 1 Summary of calculation design methods

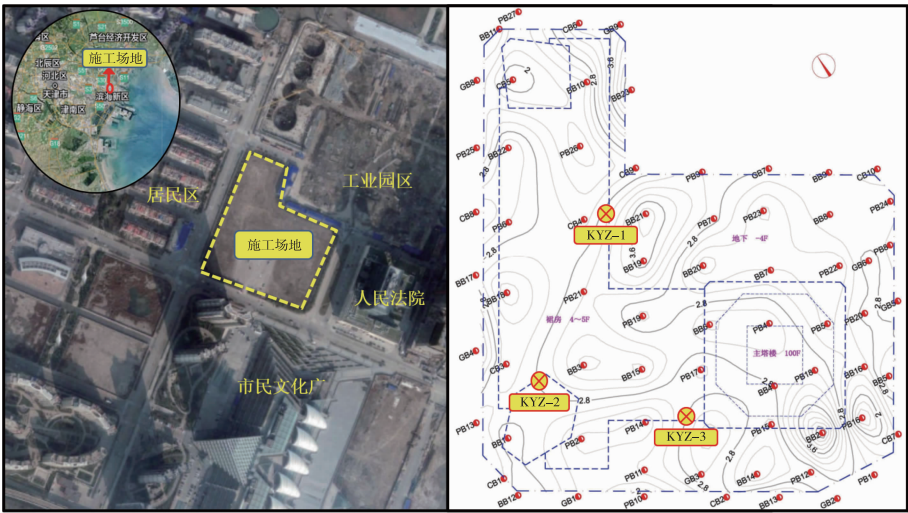
试验方法	提出学者	桩侧摩阻力计算方法
CPT	Bustamante 和 Gianeselli, (LCPC) ^[14]	$\tau_{su} = q_c / \zeta_f$ 式中 q_c 为锥尖阻力; ζ_f 为无量纲系数, 可从 30~150 范围内选取, 同时计算极限侧摩阻力应在 15~120 kPa 范围内。
	Dekuiter 和 Beringen ^[15]	在黏土中: $\tau_{su} = \alpha S_u \leq 120$ kPa $S_u = q_c / N_k$ 式中在正常固结黏土和超固结黏土中 α 分别取 1 和 0.5; N_k 为无量纲系数, 在 15~20 范围内选取。 在砂土中: $\tau_{su} = \beta q_c$ 式中 β 在抗压桩中取值为 1/300, β 在抗拔桩中取值为 1/400。
	JGJ 94—2008 ^[16]	$\tau_{su} = \beta q_s$ 对黏性土和粉土, $\beta = 10.04q_s^{-0.55}$ 对砂土, $\beta = 5.05q_s^{-0.45}$ 式中 q_s 为锥侧阻力。
	Yamashita 等 ^[17]	$\tau_{su} = \eta + \kappa N$ 式中 N 为标准贯入击数; 在非黏性土中且 $\tau_{su} \leq 200$ kPa 时, η 取 30 kPa, κ 取 2.0; 在黏性土中且 $\tau_{su} \leq 150$ kPa 时 η 取 0, κ 取 5.0。
SPT	Shioi 和 Fukui ^[18]	$\tau_{su} = \alpha N$ 在现场浇筑桩中, 当 $\tau_{su} \leq 150$ kPa 时, 对非黏性土, α 取 5.0; 对黏性土, α 取 10.0。
	Decourt 等 ^[19]	$\tau_{su} = \alpha(2.8N+10)$ 对任意土中的挤土桩或黏土中的非挤土桩, α 取 1; 对粒状土壤中的非挤土桩, α 取 0.5~0.6。

3 桩基现场试验方案

3.1 桩基布置 以天津市某一高 530 m 的大型超高层建筑采用的钻孔灌注桩的试桩试验为例, 对上述

桩侧摩阻力预测方法进行讨论。该场地位置如图 1 所示，对 3 根钻孔灌注桩 KYZ-1、KYZ-2、KYZ-3 进行现场压载测试。三根桩的直径 D 均为 0.8 m，长度分别为 52.5 m、52.4 m、52.3 m，桩顶标高+0.5 m。

场地土层分布的钻孔资料如图 2 所示，可大致划分为表 2 所示的 6 层：①标高+0.0~>-6.4 m 的人工填土层，主要由工程废土、黏土与粉质黏土组成，均匀性较差；②-6.4~>-17.6 m 范围内的淤泥和淤泥质黏土；③-17.6~>-24.8 m 地层以黏土和粉质黏土为主；④在-24.8~>-30.4 m 主要由粉土组成；⑤-30.4~>-42.8 m 主要由黏土和粉质黏土组成；⑥-42.8 m 以下为粉砂层，即桩端所在持力层，该地层含水率 w 、天然孔隙比 e 、压缩模量 E_s 和标准贯入击数 N 的算术平均值分别为 20.9%、0.612、17.02 MPa 和 83.8，土质总体较好、强度高，总体分布较稳定且厚度大。



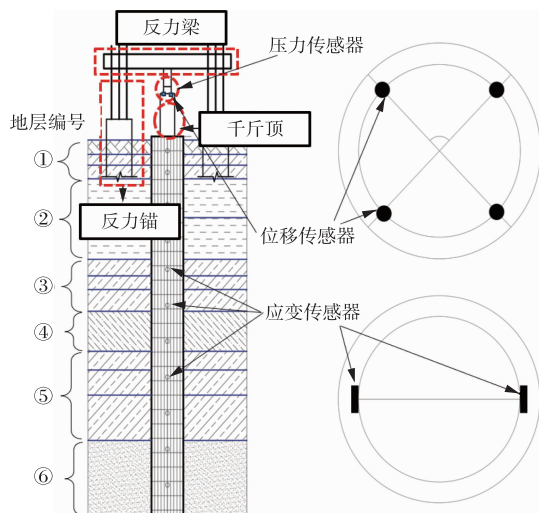


图2 静载试验系统

Fig.2 Static load test system

4 静载试验结果分析

3根试桩的荷载-沉降关系如图3所示。随着荷载逐级增加，桩顶沉降逐渐增大，但荷载-沉降曲线平滑无明显拐点，若根据规范(JGJ 106—2014)将桩顶沉降达到40 mm时的对应荷载视作试桩的极限荷载，则静载试验荷载远未达到试桩极限荷载，7000 kN桩顶荷载对应的三根抗压试桩的沉降在8.27~10.12 mm范围内，卸荷后桩身残余沉降约2.8~3.6 mm，回弹率约为72%。这表明试桩受荷远未达到自身极限承载力，试桩承载能力大于预期。

加载过程中沿桩身的轴力由测得的应变数值换算得到，如图4所示。随着荷载的逐渐增大，各试桩沿桩身轴力的变化趋势基本一致，随着深度的增大，桩身轴力逐渐减小。由桩顶至-19.9 m深度处，桩身轴力缓慢减小，该段地层以浅部黏土和淤泥为主，土性一般，由桩侧土提供摩阻力较小。在-19.9~-48.5 m段，桩身轴力减小速率明显增大，在应变传感器J11所在深度-49 m处的轴力接近于0。现场静载试验中未测量基桩端阻，但根据试桩桩身轴力的测量结果可知，传递到桩底附近的桩身轴力较小，试桩表现出明显的摩擦桩承载特性。

根据试桩各截面应力应变传感器测量结果可计算得到的轴力值，将上下相邻节点的轴力相减即可得到该区段的桩侧摩阻力 τ_s ，典型地层内各截面桩身侧摩阻力分布与归一化的桩顶沉降 $w/D(\%)$ 的关系如图5所示，其中 w 为桩顶沉降量， D 为桩径。

图5数据表明，在整个试验过程中，桩身侧摩阻力随桩顶位移的增加而增加，对于较深的深度(标高-24.m以下的⑤黏土和粉质黏土层、⑥粉砂层)，在荷载试验结束时未达到极限值。以抗压桩KYZ-1静载试验结果为例，在桩土相对位移相同的情况下，较深的地层中由于地应力水平较大，桩身的极限侧摩阻力较浅层地层中明显更大。②淤泥层的极限桩侧摩阻力仅为22 kPa，明显小于邻层③黏土和粉质黏土层中的极限桩侧摩阻力值68.2 kPa，表明土体性质是影响极限桩侧摩阻力的重要因素。当 w/D 为1%时，⑤黏土和粉质黏土层中的桩侧摩阻力达到82 kPa，曲线上升速率逐渐减小，但明显未达到极限值。⑥粉砂层中的桩侧摩阻力超过84.2 kPa后仍保持快速上升趋势，显然远未达极限。

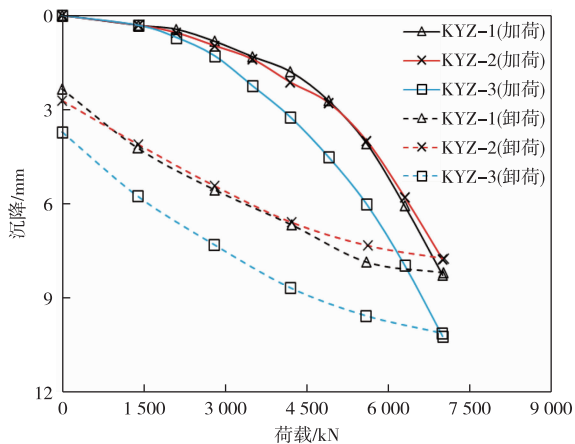


图3 试桩荷载-沉降曲线

Fig.3 Load-settlement curve of test piles

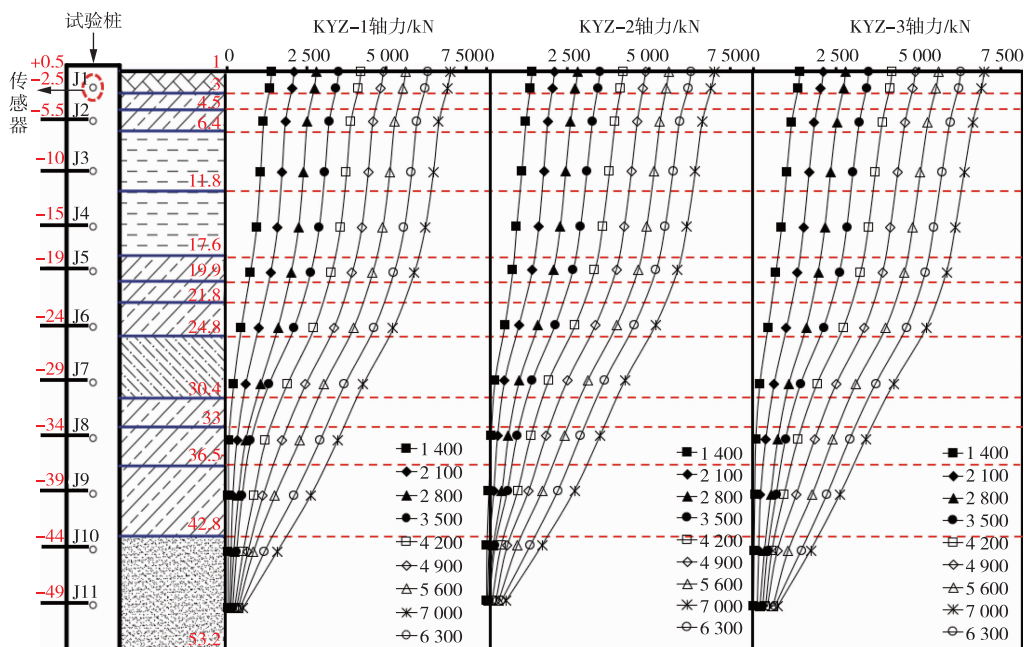


图 4 试桩轴力分布

Fig.4 Axial force distribution of test piles

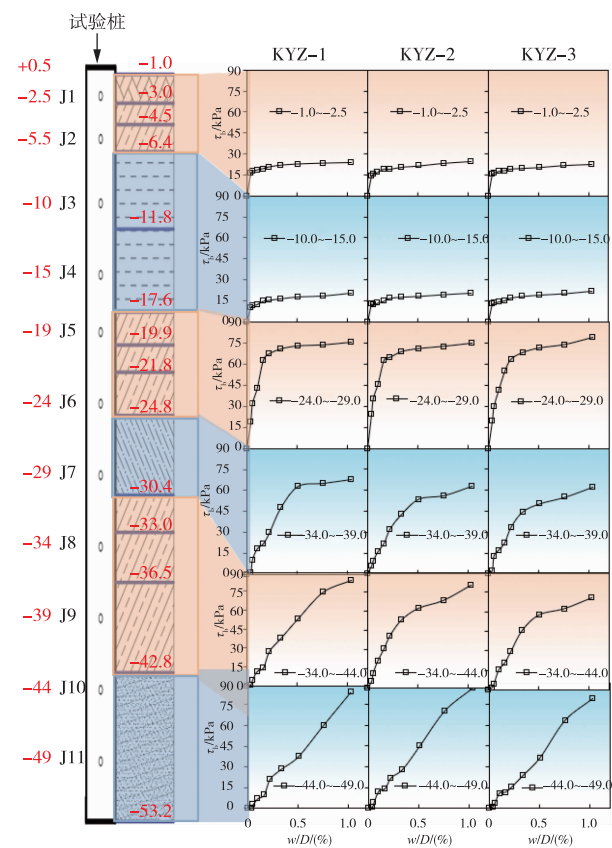


图 5 试桩局部侧摩阻力的发挥情况

Fig.5 Mobilization of local shaft resistance on test piles

5 桩侧极限阻力预测方法对比

图 5 反映出有 -30.4 m 以上 4 个土层①地表人工填土层、②淤泥层、③黏土和粉质黏土层、④粉

土层中桩侧摩阻力达到了极限值, 本节对表 1 所列各类基于 CPT 和 SPT 结果预测桩侧极限摩阻力 τ_{su} 的方法进行讨论。

5.1 CPT 计算结果与实测结果对比 基于 CPT 试验实测数据对前述现场静压桩的桩侧摩阻力预测结果见图 6。

可以看出, 由 Bustamante 法^[14]计算得到的极限桩侧摩阻力 τ_{su} , 在桩顶至 -19 m 深度范围内与实测值较为吻合。在③黏土和粉质黏土层所在的 -21.8 ~ -24.8 m 深度范围内, Bustamante 法^[14]预测的桩侧摩阻力小于实测值。在④粉土层所在的 -24.8 ~ -30.4 m 深度范围内, Bustamante 法^[14]预测的桩侧摩阻力体现出了 CPT 实测的锥头阻力和侧壁摩阻力的急剧变化, 但预测的桩侧极限摩阻力的偏大。

由 Dekuiter 法^[15]得到的极限桩侧摩阻力 τ_{su} 在桩顶至 -15 m 深度范围内与实测值接近; 在 -19 m 以下范围的预测值和实测值对比表明, 该方法对黏土和粉质黏土中的桩侧极限摩阻的预测结果偏大。

由规范 JGJ 94—2008^[16]得到的极限桩侧摩阻力在标高 -2.5 m 附近偏大, 该误差可能是由于地表人工填土受扰动所致; 在标高 -5.5 ~ -24 m 范围内计算值与实测值接近。

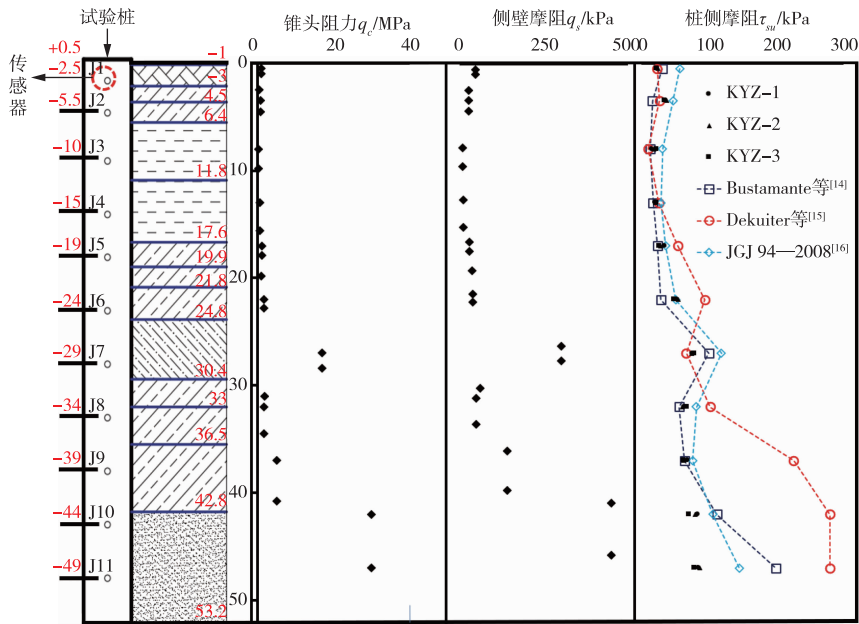


图 6 CPT 计算结果与实测结果对比
Fig.6 Comparison of calculation results by CPT and measured results

5.2 SPT 计算结果与实测结果对比 基于 SPT 实测数据对前述现场静压桩的桩侧摩阻力预测结果见图 7。

可以看出, Yamashita 法^[17]计算所得极限侧摩阻力在 -30.4 m 以上与实测值接近, 在 -30.4 m 以下略大于实测值, 说明该段桩土界面未达到极限剪切状态。

Shioi 法^[18]在 -19 m 以上桩段的极限侧摩阻力计算值与实测值接近, -19 m 以下段计算值大于实测值, 计算结果偏激进。

Decourt 法^[19]计算所得桩侧摩阻力在 -44 m 以上与实测值接近, 考虑到图 5 反映的 -30.4 m 以下土层中桩土间摩擦力并未达到极限, 说明该方法在对浅层土体中桩侧极限摩阻力的预测具有一定精度, 但对深部土体的桩身极限侧阻估计偏保守。

上述结果表明, 基于 SPT 方法利用标准贯入试验击数预测桩侧极限摩阻具有较高的准确度, 其中 Yamashita 法^[17]最为准确。

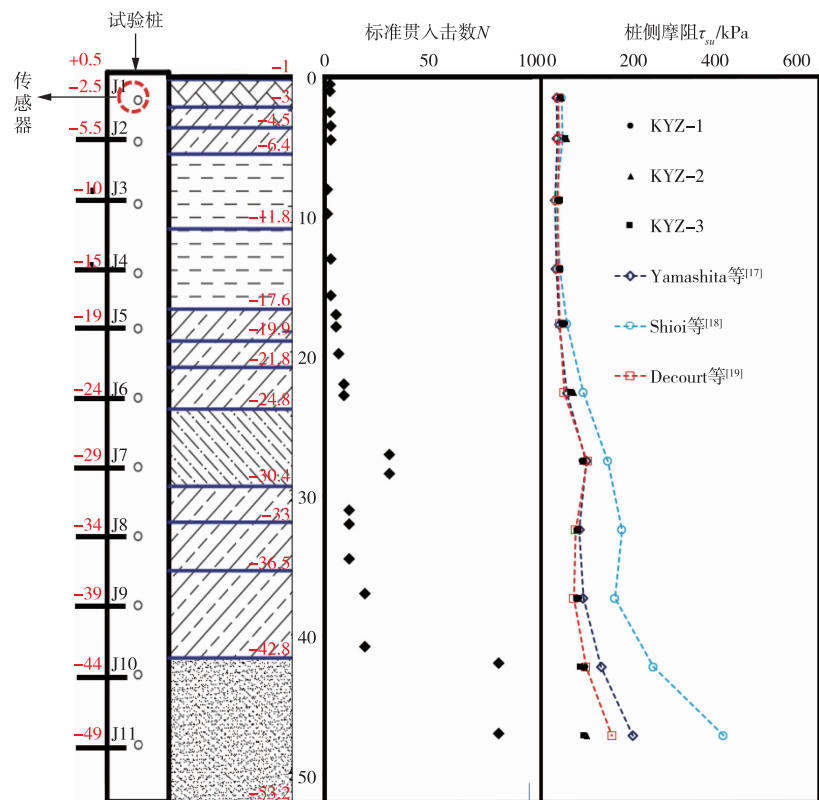


图 7 SPT 计算结果与实测结果对比

Fig.7 Comparison of calculation results by SPT and measured results

6 结论

本文开展了成层土地基中的超长钻孔灌注桩的现场桩基静载试验，并讨论了基于 CPT 和 SPT 原位试验方法的两种方法预测本地区土层的桩侧极限摩阻力的准确性，得到以下结论：

- (1) 试验结果表明，该超长钻孔灌注桩的上半段桩身受临界侧摩阻力，该超长桩为摩擦型桩；
- (2) 在基于 CPT 预测桩侧极限摩阻力的 3 种方法中，Bustamante 法依赖对经验摩擦系数的选择，对桩侧极限摩阻力的预测在黏土中偏小、在粉土中偏大。不考虑地表人为扰动土层，规范方法 (JGJ 94—2008) 对桩侧极限摩阻力的预测较为准确。
- (3) SPT 预测桩侧极限摩阻力的精度整体高于 CPT 法，其中 Yamashita 法结果与实测值最为贴合。

参 考 文 献：

- [1] 张翔宇, 崔炜, 刘毅, 等. 滩涂光伏 GFRP 管桩原位承载试验及反馈分析研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报 (中英文), 2024, 22(3): 250-260. (ZHANG Xiangyu, CUI Wei, LIU Yi. In-situ bearing test and feedback analysis of photovoltaic GFRP pile foundation [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Reserach, 2024, 22(3): 250-260. (in Chinese))
- [2] CHANG Mingfang, ZHU Hong. Construction effect on load transfer along bored piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(4): 426-437.
- [3] ZHANG Qianqing, ZHANG Zhongmiao. A simplified nonlinear approach for single pile settlement analysis [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(11): 1256-1266.
- [4] 訾洪利. 水利工程中大直径 PHC 管桩承载力试验研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(5): 340-344. (ZI Hongli. An investigation into stress characteristics of PHC pipe piles in hydraulic structure [J].

- Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Reserach, 2016, 14(5): 340–344. (in Chinese))
- [5] 石名磊, 邓学钧, 刘松玉. 大直径钻孔灌注桩桩侧极限摩阻力研究[J]. 建筑结构, 2003, 33(11): 13–16. (SHI Minglei, DENG Xuejun, LIU Songyu. Study on shaft skin friction resistance of large diameter bored piles[J]. Building Structure, 2003, 33(11): 13–16. (in Chinese))
 - [6] 王勇, 肖正华, 余雄飞. 国内外单桩承载力估算方法对比与探讨[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2008, 25(4): 488–491. (WANG Yong, XIAO Zhenghua, YU Xiongfei. The contrast and discussion on estimating bearing capacity of single pile in domestic and foreignland[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2008, 25(4): 488–491. (in Chinese))
 - [7] 李文平. 基坑开挖对桩基承载力的影响及 β 法的工程应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 259–262. (LI Wenpin. Effect of excavation on pile capacity and engineering application of β -method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 259–262. (in Chinese))
 - [8] 李永辉, 王卫东, 吴江斌. 桩端后注浆超长灌注桩桩侧极限摩阻力计算方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 382–386. (LI Yonghui, WANG Weidong, WU Jiangbin. A calculation method of pile shaft ultimate friction of tip post grouted super-long bored pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 382–386. (in Chinese))
 - [9] 沈锦宁, 钱龙, 石锐龙, 等. 海上风电大直径钢管桩溜桩承载力计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(S1): 158–161. (SHEN Jinning, QIAN Long, SHI Ruilong, et al. Prediction for pile running of large-diameter steel pipes pile for offshore wind power[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(S1): 158–161. (in Chinese))
 - [10] 刘路路, 蔡国军, 耿功巧, 等. 考虑土塞效应的开口管桩承载力 CPTU 计算方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(2): 280–285. (LIU Lulu, CAI Guojun, GENG Gongqiao, et al. Calculation method for bearing capacity of open-ended pipe pile considering plugging effect of soil based on CPTU[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2020, 50(2): 280–285. (in Chinese))
 - [11] 任志文, 莫品强, 刘彬, 等. 黄河下游地区灌注桩侧摩阻力预测方法研究[J]. 地基处理, 2022, 4(S1): 121–127, 133. (REN Zhiwen, MO Pinqiang, LIU Bin, et al. Predictions on shaft resistance of cast-in-place piles in the lower reaches of Yellow River[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(S1): 121–127, 133. (in Chinese))
 - [12] YVES Robert. A few comments on pile design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(4): 560–567.
 - [13] GAVIN K, CADOGAN D, CASEY P. Shaft capacity of continuous flight auger piles in sand[J]. Geotech. Geoenviron. Eng., 2009, 135(6): 790–798.
 - [14] BUSTAMANTE M, GIANESELLI L. Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT[C]//Proceedings of the 2nd European symposium on penetration testing. Balkema, Amsterdam, the Netherlands, 1982(2): 493–500.
 - [15] DEKUITER J, BERINGEN F L. Pile foundation for large North Sea structures[J]. Marine Geotechnology, 1979, 3(3): 267–314.
 - [16] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (China Academy of Building Research. Technical Code for Building Pile Foundation: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
 - [17] YAMASHITA M, ENJOJI H. Resistivity correction factor for the four-circular-probe method[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1989, 28(2): 258.
 - [18] SHIOI Y, FUKUI J. Application of N-value to Design of Foundations in Japan[M]//Penetration Testing, volume 1. Routledge, 1982: 159–164.
 - [19] DECOURT L, QUARESMA A R. Practical applications of the standard penetration test complemented by torque measurements, present stage and future trends[C]//International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1994: 143–146.
 - [20] 中国建筑科学研究院. 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. (China Academy of Building Research. Technical Code for Testing of Building Foundation Piles: JGJ 106—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese))

(下转第 411 页)

(上接第 400 页)

Discussion on prediction method of unit shaft resistance of super long drilled cast-in-place pile in layered soil

SONG Shijie^{1,2}, DUAN Zhiqiang^{1,2}, GUO Wei², REN Yuxiao²

(1. TianJin Survey Design institute Group Co., Ltd, Tianjin 300191, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The unit shaft resistance of piles is an important factor determining the bearing capacity of ultra long pile foundations. Based on the on-site static load test results of a super long drilled cast-in-place pile of a high-rise building in layered soils, the bearing characteristics and unit shaft resistance development characteristics of the pile in layered soils are analyzed in this paper. The accuracy of several methods for predicting the ultimate pile friction based on the results of Cone Penetration Test (CPT) and Standard Penetration Test (SPT) are evaluated. The results indicate that the test pile behaves as a friction pile. Among the three CPT methods, the Bustamante's method relies on the selection of empirical friction coefficients of the soil layers in this area, and the prediction of ultimate pile shaft resistance is smaller in clay and larger in silt. The JGJ94-2008 standard provides the most accurate prediction of the ultimate pile shaft resistance in soil layers other than the surface soil layer. The overall accuracy of the SPT method is higher than that of the CPT method, with Yamashita's method having the highest accuracy. The SPT results can be used to establish an empirical formula suitable for the local area to accurately predict the ultimate pile friction.

Keywords: drilled cast-in-place pile; ultimate shaft unit resistance; load transfer characteristic; CPT; SPT; layered soils

(责任编辑: 祁 伟)