

【工程应用】

# 黄河下游地区灌注桩侧摩阻力预测方法研究

任志文<sup>1\*</sup>, 莫品强<sup>1</sup>, 刘彬<sup>1</sup>, 王洪国<sup>2</sup>, 庄培芝<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学 力学与土木工程学院 / 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 山东高速建设管理集团有限公司, 山东 济南 250098; 3. 山东大学 齐鲁交通学院, 山东 济南 250002)

**摘要:** 为了评估已有基于静力触探试验(CPT)的桩基侧摩阻力计算方法对黄河下游地区灌注桩的适用性, 采用文献中4种CPT方法和SPT试验进行预测, 并与现场静载试验结果进行了对比分析。结果表明: AOKI法显著低估了总桩侧阻力, PHILIPPONNAT法和LCPC法总侧阻力计算结果与试验结果误差较小, 但是对于土层的桩侧摩阻力预测结果误差较大; LCPC法和孔压静力触探测试技术规程方法预测较好, 但是4种CPT方法均不及SPT试验, 无论是数据拟合还是概率分析, SPT试验整体预测效果均较可靠。该研究可为黄河下游地区及相似土质情况下灌注桩的桩侧摩阻力计算提供参考。

**关键词:** CPT; 灌注桩; 侧摩阻力; 静载试验; 标准贯入试验

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0121-07

## Predictions on shaft resistance of cast-in-place piles in the lower reaches of Yellow River

REN Zhi-wen<sup>1\*</sup>, MO Pin-qiang<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, WANG Hong-guo<sup>2</sup>, ZHUANG Pei-zhi<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering/

School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

2. Shandong Hi-Speed Group Co., Ltd., Jinan 250098, Shandong, China;

3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China)

**Abstract:** To evaluate the applicability of the existing methods of pile shaft resistance based on static penetration test (CPT) to cast-in-place piles in the lower reaches of Yellow River, four CPT methods and SPT tests in the literature were used for prediction, and the results were compared with the results of the static load test. The results show that the Aoki method significantly underestimates the total pile side resistance, the error between the calculation by the Philipponat method and the LCPC method is small. But the error of the prediction result of pile side friction for soil layer is larger. The predictions of the LCPC method and the pore pressure static penetration test method are better, but the four CPT methods are not as good as the SPT test. Comparatively SPT test predictions are reliable both in data fitting and probability analysis. This study can provide a reference for the calculation of pile shaft resistance of cast-in-place piles in the lower reaches of Yellow River and similar soil conditions.

**Key words:** cone penetration test (CPT); cast-in-place piles; pile side friction; the static load test; standard penetration test

## 0 引言

黄河下游地貌以冲洪积平原为主, 第四系松散地层广泛分布, 地下水类型主要为孔隙潜水, 受黄河河水和大气降水影响, 可液化土层埋深大且密实度差, 地基易产生液化现象, 在工程建设中通常会采用建立桩基础的形式对地基进行处理。随着近年

大直径灌注桩应用的增加, 研究者们对于该桩型的承载性能和荷载传递机理展开了广泛的研究。赵春风等<sup>[1]</sup>通过超长钻孔灌注桩静载试验, 发现淤泥质黏土比砂土容易达到极限侧摩阻力; 王应斌等<sup>[2]</sup>结合静力计算方法, 提出黄土地区钻孔灌注桩侧摩阻力计算公式, 通过工程案例验证了计算结果的可靠性; LU等<sup>[3]</sup>应用深度学习方法来提高灌注桩侧

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908546, 52178374)。

作者简介: 任志文(1997—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事CPTU数据解译及桩基工程应用研究。E-mail: 2305469277@qq.com。

摩阻力的预测精度;刘红艳等<sup>[4]</sup>研究了桩端后压浆对钻孔灌注桩侧摩阻力的影响,发现桩侧摩阻力的增强效果与桩端压浆加固效果有显著关系,为优化桩基设计提供了参考。由于工程地质条件的差异,现场试验的结果存在偏差,灌注桩侧摩阻力的发挥往往会受到工程地质环境与上部结构的影响,在桩基工程中需格外重视对桩体侧摩阻力的预测<sup>[5]</sup>。

静力触探探头可以认为是一种小尺寸的模型桩,其贯入可以视为模型桩的贯入过程,由于通过土壤强度变形特性评估桩的承载力存在不确定性,在工程实践中通常会将桩轴向承载力直接与现场试验结果相关联,这种方法能够消除用户的主观性并直接从静力触探数据中计算桩的承载力,国内外已积累丰富经验,并且该方法相比于静载试验设备简单,受场地制约因素小,成本低,使用CPT确定桩基承载力是其较为成功的应用成果<sup>[6-7]</sup>。目前基于CPT数据确定桩基竖向承载力的方法已有很多,TITI等<sup>[8]</sup>评价了8种CPT方法在预测预应力混凝土桩(PPC)极限承载力方面的应用,发现欧洲法、LCPC法对PPC桩的承载力预测结果最好;何智敏等<sup>[9]</sup>依据港珠澳大桥的地层特点以及试桩桩端阻力与侧摩阻力资料,提出该区域的桩基承载力CPTU评估方法,能够更加精确计算出单桩承载力,对于工程具有较高的实用性和可操作性。但钻孔灌注桩由于机械类型、成孔时间以及泥浆性能等的不同,造成成桩后钻孔灌注桩侧极限摩阻力具有一定不确定性<sup>[10]</sup>。目前工程上通常采用经验方法进行预测,结合静载试验结果确定桩侧摩阻力的大小,但在利用CPT确定桩侧阻力时,由于桩体长度要远远大于静力触探长度,随着桩体贯入,土对桩的侧阻发生了明显的减小,造成测试结果存在一定误差,对于灌注桩侧摩阻力的确定还有待探索。

本文基于济南绕城高速二环线北段试桩工程项目,采用自平衡静载试验方法得到3根试验灌注桩各土层的桩侧摩阻力,并开展相应的静力触探和标准贯入试验获取所需的数据,用经验方法对桩侧摩阻力进行预测,与静载试验测试结果进行对比以评估各方法预测的可靠性,该研究为黄河下游地区及具有相似土质情况的地区大直径灌注桩竖向承载力的计算提供了参考。

## 1 工程项目与现场试验

### 1.1 工程概况

山东省济南市绕城高速公路二环线北段试桩

工程全线可分为黄河桥区域及其他区域,黄河桥区域内受黄河冲积影响,岩性松散,富水性较强,地层承载力及摩阻力明显低于其他区域,试验资料与地勘资料在地表以下45m范围内基本相符,场地土体均为第四系沉积物,包括粉质黏土、粉土和粉砂层。为进一步优化桩基设计,对场区内3根灌注桩K1、K2、K3分别进行自平衡法静载试验,试验桩的基本参数如表1所示。

表1 试验桩的参数  
Table 1 Parameters of test piles

桩号	桩型	桩径/m	桩顶标高/m	桩底标高/m	桩长/m
K1	灌注桩	1 600	18.84	-11.16	30
K2	灌注桩	1 600	14.40	-15.60	30
K3	灌注桩	1 600	15.80	-14.20	30

### 1.2 场地条件及土体参数

根据本次勘探成果,场地地基土以粉质黏土、粉土和粉细砂为主,本次试验分别在3根试验桩的孔位处进行静力触探、标准贯入以及室内土工试验。以试验桩K1为例,场地相关地层的构造与特征见表2。勘探深度内揭露的土层分布较为规律,但是不同土层相互渗透,粉质黏土层中夹粉土薄层,粉土层夹杂部分黏土,对测试数据的稳定性存在一定影响。试验现场土体钻探取样后测得各土层的主要物理性质指标见表3。

### 1.3 自平衡法静载试验

自平衡静载试验是在桩身预埋荷载箱,利用桩身自重、桩侧阻力及桩端阻力互相提供反力的试验方法,自平衡静载试验系统见图1。

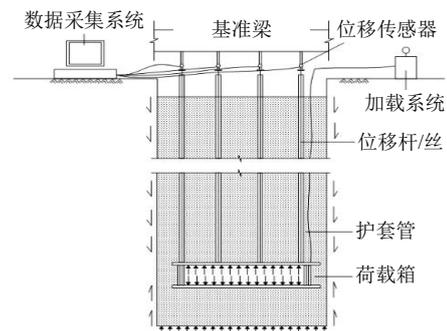


图1 自平衡静载试验系统

Fig. 1 Self-balancing static load test system

该方法测得上、下两段桩的荷载-位移曲线,得到上、下两段桩的承载力(当桩身预埋内力测试元件时,可测得土层侧阻和端阻),进而得到整桩承载力。另外,还可按照等效转换方法,得到桩顶受压时的桩顶等效荷载-位移曲线。3根试验桩桩侧土层侧摩阻力的实测值如表4所示。

表 2 试验桩 K1 场区地层特征  
Table 2 Stratigraphic characteristics of test pile K1 site

地质时代	层号	名称	层厚/m	层底标高/m	描述
Q <sub>4</sub> <sup>2al</sup>	①	粉质黏土	1.2	17.28	黄褐色, 可塑, 土质不均匀, 黏性中等, 局部夹粉土薄层。
Q <sub>4</sub> <sup>2al</sup>	②	粉土	5.3	11.98	黄褐色, 稍密, 黏性差, 摇振反应迅速。
Q <sub>4</sub> <sup>2al</sup>	③	粉质黏土	3.3	8.68	可塑, 局部夹灰黑色, 韧性中等, 切面稍光滑。
Q <sub>4</sub> <sup>2al</sup>	④	粉土	2.6	6.08	土质不均匀, 局部夹黏粒。
Q <sub>4</sub> <sup>2al</sup>	⑤	粉质黏土	1.5	4.58	可塑, 土质较均匀, 黏性中等, 局部夹粉土薄层。
Q <sub>4</sub> <sup>2al</sup>	⑥	粉砂	3.6	0.98	饱和稍密, 砂质不纯, 局部含黏粒多, 主要成分石英长石, 级配不良, 分选差。
Q <sub>4</sub> <sup>2al</sup>	⑦	细砂	13.1	-12.12	灰褐色, 饱和中密, 含少量云母碎片, 级配不良。

表 3 试验桩 K1 场地土层的主要物理力学性质指标  
Table 3 Physical and mechanical properties of soil layer at pile K1 site

层号	名称	含水率/%	密度/g·m <sup>-3</sup>	饱和度/%	孔隙比 e <sub>0</sub>	塑性指数 I <sub>p</sub>	内摩擦角/(°)
①	粉质黏土	27.4	1.87	—	—	8.4	—
②	粉土	28.0	1.92	95.0	0.799	6.8	—
③	粉质黏土	29.6	1.94	99.0	0.804	9.8	—
④	粉土	23.7	2.05	100.0	0.629	8.2	42.0
⑤	粉质黏土	19.2	2.05	92.0	0.558	3.7	35.6
⑥	粉砂	—	—	—	—	—	—
⑦	细砂	—	—	—	—	—	—

表 4 桩侧土层侧摩阻力表  
Table 4 Pile shaft resistance of soil layers

土层	K1 处层厚/m	实测值/ kPa	土层	K2 处层厚/m	实测值/ kPa	土层	K3 处层厚/m	实测值/ kPa
①粉质黏土	1.2	21	①粉土	1.2	33	①粉质黏土	3.1	32
②粉土	5.3	21	②粉质黏土	2.2	33	②粉土	1.3	38
③粉质黏土	3.3	24	③粉土	4.2	34	③粉质黏土	7.5	38
④粉土	2.6	25	④粉质黏土	1.9	46	④粉砂	3.7	39
⑤粉质黏土	1.5	26	⑤粉质黏土	5.5	36	⑤粉砂	5.9	45
⑥粉砂	3.6	40	⑥粉砂	5.0	45	⑥粉砂	5.1	62
⑦细砂	12.5	46	⑦粉土	7.5	61	⑦粉土	3.4	63

## 2 总桩侧阻力与桩侧摩阻力的计算

### 2.1 CPT 方法

桩基竖向承载力分为两个部分: 桩侧承载力和桩端承载力, 其中桩侧承载力公式为:

$$Q_s = \sum q_{si} A_{si} \quad (1)$$

式中:  $Q_s$  为桩侧承载力;  $q_{si}$  为第  $i$  层土的单位桩侧摩阻力;  $A_{si}$  为第  $i$  层土中桩的侧面积。

合理确定各土层的单位桩侧摩阻力  $q_s$  是准确

计算桩侧承载力的关键, 在 CPT 方法中可以通过试验测得的锥尖阻力  $q_c$  来确定。

#### (1) AOKI 法<sup>[11]</sup>

AOKI 等依据静力触探试验提出用锥尖阻力  $q_c$  来计算桩侧摩阻力, 具体公式形式如下:

$$q_s = q_c \alpha_s / F_s \quad (2)$$

式中:  $\alpha_s$  是土体相关系数, 对于粉质黏土取 0.04, 粉土取 0.034, 粉砂取 0.02;  $F_s$  依据不同桩型取值, 对于灌注桩取值范围是 6.0~7.0;  $q_s$  最大值不超过

120 kPa。

(2) PHILIPPONNAT 法<sup>[12]</sup>

$$q_s = q_c \alpha_f / \alpha_s \quad (3)$$

式中：对于直径大于 1 600 mm 的灌注桩  $\alpha_f$  取 0.75； $\alpha_s$  的取值与土性有关，对于黏土取 50，粉土、黏性砂等取 60，砂土取值范围 100~200，依据松散程度确定； $q_s$  上限依据桩体类型确定，对于灌注桩不超过 80 kPa。

(3) LCPC 法<sup>[13]</sup>

LCPC 法是 BUSTAMANTE 和 GIANESELLI 基于不同地基土和不同类型桩的 197 组载荷试验结果的分析而提出的。单位桩端和侧阻均可以从平均  $q_c$  得到，其中桩侧摩阻力按下式计算：

$$q_s = \alpha_b q_c \quad (4)$$

式中： $\alpha_b$  是摩擦系数，取值范围是 0.005~0.03。根据土壤类型、桩类型和桩安装方法，桩侧摩阻力上限范围 15~120 kPa。

(4) 孔压静力触探测试技术规程<sup>[14]</sup>

该规程依据已有 CPT 方法分析总结后，以 LCPC 方法为基础，结合我国部分地区的桩基载荷试验资料进行一些修正。对于桩侧摩阻力的计算公式如下：

$$q_s = q_c / \xi_f \quad (5)$$

式中： $\xi_f$  是摩擦系数，根据地基土类和锥尖阻力范围确定，对于软黏土、淤泥取 90，粉土、松散砂土取 60，粉砂取值范围 60~100。

2.2 SPT 试验

标注贯入试验 (SPT) 具有操作简单、地层适应性广的优点，在本次试验研究与 CPT 方法进行对比分析，目前利用标贯试验成果估算总桩侧阻力时一般采用如下公式<sup>[15]</sup>：

$$Q_{sik} = u \sum l_i q_{sik} \quad (6)$$

$$q_{sik} = \beta_i N_{si} \quad (7)$$

式中： $Q_{sik}$  是单桩极限侧阻力，kN； $u$  是桩身周长，m； $q_{sik}$  是第  $i$  个标贯点标贯击数估算的桩侧土极限侧阻力，kPa； $N_{si}$  是桩侧第  $i$  个标贯点的标贯击数； $\beta_i$  是第  $i$  个标贯点桩侧阻力换算系数，对于黏性土取值 3~6，对于砂土取值 2~5。

依据上述方法对 3 根试验桩的总桩侧阻力和单位桩侧摩阻力进行计算，结果如图 2 和图 3 所示。

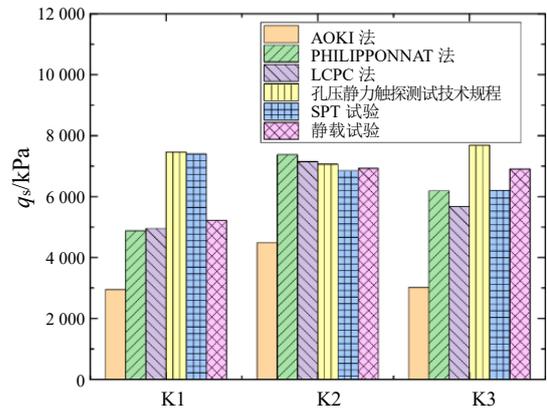


图 2 不同计算方法总桩侧阻力计算结果

Fig. 2 Predicted pile shaft resistance by different methods

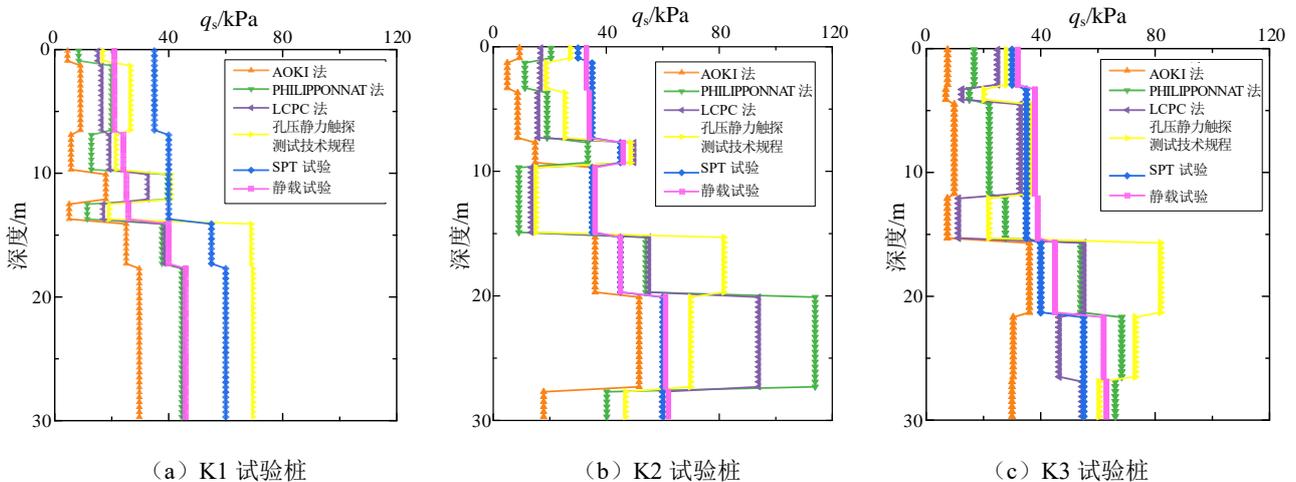


图 3 3 根试验桩  $q_s$  随深度的变化情况

Fig. 3 Variation of  $q_s$  with depth in three test piles

从图 2 中可以看出 AOKI 方法对于桩侧阻力的预测结果偏于保守, 与静载试验结果相比计算结果明显偏小, 在其余 3 种 CPT 方法中, PHILIPPONNAT 法和 LCPC 法对于预测结果均较为准确, 而孔压静力触探测试技术规程方法预测结果则表现出不同程度的偏高情况, SPT 试验结果除了对于 K1 桩预测结果偏高, 对于 K2 和 K3 结果的计算均在正常的偏差范围内。从图 3 中同样可以看出 AOKI 法对于粉质黏土、粉土和粉砂层的桩侧摩阻力计算结果均偏小, 而 PHILIPPONNAT 法对于不同孔位计算的桩侧摩阻力差别较大, 在 K1 试验桩桩侧摩阻力计算中, 除了少部分土层计算结果偏小, 其余均与静载试验结果偏差较大, 而在 K2 试验桩中, 埋深较浅的粉质黏土和粉土层计算结果偏小, 埋深较深的粉土层计算结果偏大, 最终导致桩侧阻力计算结果与静载试验误差较小, 在实际工程应用中存在潜在的安全隐患。因此, 为了评估各方法的可靠性, 需要进一步展开对单位桩侧摩阻力的评价分析。

### 3 计算结果分析与评价

为了精确评价上述方法对单位桩侧摩阻力预测结果的可靠性, 选取桩体长度 30 m 深度范围内的土层作为研究对象, 共计 22 个有效数据点, 使用上述 4 种 CPT 方法以及 SPT 试验对不同土层的单位桩侧摩阻力预测, 以静力触探试验结果作为实测值, 预测值  $q_s^p$  与实测值  $q_s^m$  之间的关系如图 4 所示。

图 4 中  $R^2$  是基于最小二乘法的相关系数, 值越

接近 1 拟合效果越好。从图中可以看出在 CPT 方法中, AOKI 法拟合效果最差,  $R^2$  为 0.787, 预测结果与图 2、图 3 一致; 其次是 PHILIPPONNAT 法,  $R^2$  为 0.817, 数据呈现出一定的离散性; LCPC 法和孔压静力触探测试技术规程拟合结果较好,  $R^2$  分别为 0.870 和 0.872。但是, 这 4 种方法预测结果均不及 SPT 试验, 数据离散程度最低, 随着  $q_s$  值增大, 预测结果均贴近似合直线分布, 相对来说该方法具有更好的适用性。

为了进一步考察计算结果的分布和离散情况, CPT 方法和 SPT 试验计算得到的频率分布图和基本统计量见图 5 和表 5, 表中  $\mu$  为算数平均值,  $\sigma$  为标准差,  $COV$  为变异系数, 区间范围是指  $q_s^p/q_s^m$  最大与最小值之差。在图 5 中, 4 种 CPT 方法均表现出不同程度偏离  $q_s^p/q_s^m = 1$  的情况, 除了孔压静力触探测试技术规程, 其余 3 种方法的均值  $\mu$  均小于 1, 这意味着这些方法均低估了桩侧摩阻力。AOKI 法偏离程度最大且变异性最高,  $COV$  为 0.594, 结合图 2 和图 4, 表明该方法并不适用于本次工程试验; 而孔压静力触探测试技术规程建议值偏离程度相对较小,  $\mu$  也与 1 最接近, 但是区间范围最大, 预测结果不稳定性。SPT 结果在 5 种预测方法中表现最好, 基本关于  $q_s^p/q_s^m = 1$  呈对称分布, 其  $COV$  和  $\sigma$  与 CPT 方法相比也是最小的, 更加符合实际情况。图 5 中的阴影区域为  $q_s^p/q_s^m$  在 0.8~1.2 的区间范围, 意味着 20% 精确度水平下对应的概率, 同样可以看出 SPT 试验在该区域的面积要远大于 4 种 CPT 方法。

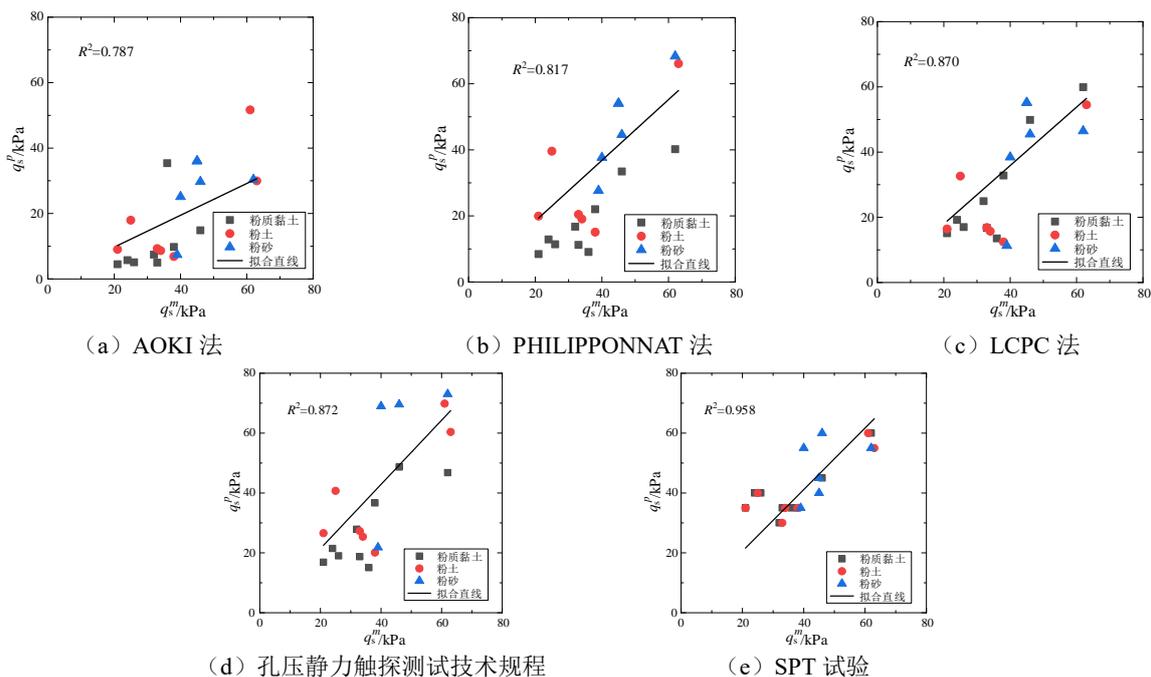


图 4 5 种方法预测值与实测值之间的关系

Fig. 4 Relationship between predicted values and measured values of five methods

评估不同桩基承载力预测方法的可靠性不能仅仅依靠单一指标，如果只基于统计分析评估 CPT 方法可能会得出误导性的结论。因此，我们应结合多个标准进行评估。在图 6 中使用累积概率的方式确定 50%和 90%的累积概率值。50%累积概率所对应的  $q_s^p/q_s^m$  值越接近 1 且 50%~90%范围最小的方法预测结果最好<sup>[8]</sup>。从图 6 中可以直观看出 SPT 试验 50%累积概率所对应的  $q_s^p/q_s^m$  值最接近于 1，其次是孔压静力触探测试技术规程建议值；而 LCPC 法在 50%~90%累积概率区间范围最小，其次是 AOKI 法；综合两个指标来看，LCPC 方法最好，其次是 SPT 试验。

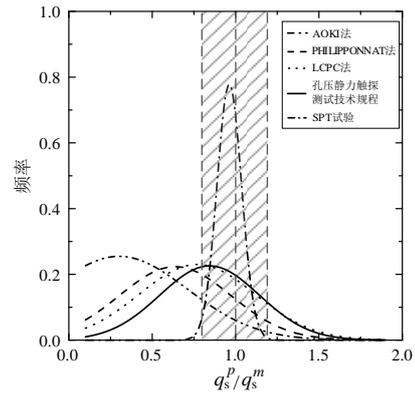


图 5 各方法的频率分布图对比  
Fig. 5 Comparison of frequency distribution of each method

表 5 桩侧土层侧摩阻力表  
Table 5 Pile shaft resistance of soil layers

参量	统计量	AOKI 法	PHILIPPONNAT 法	LCPC 法	孔压静力触探测试技术规程	SPT 试验
$q_s^p/q_s^m$	$\mu$	0.437	0.800	0.818	1.035	1.138
	$\sigma$	0.260	0.413	0.333	0.428	0.299
	COV	0.594	0.517	0.407	0.414	0.263
	区间范围	0.831	1.616	1.258	1.401	0.794

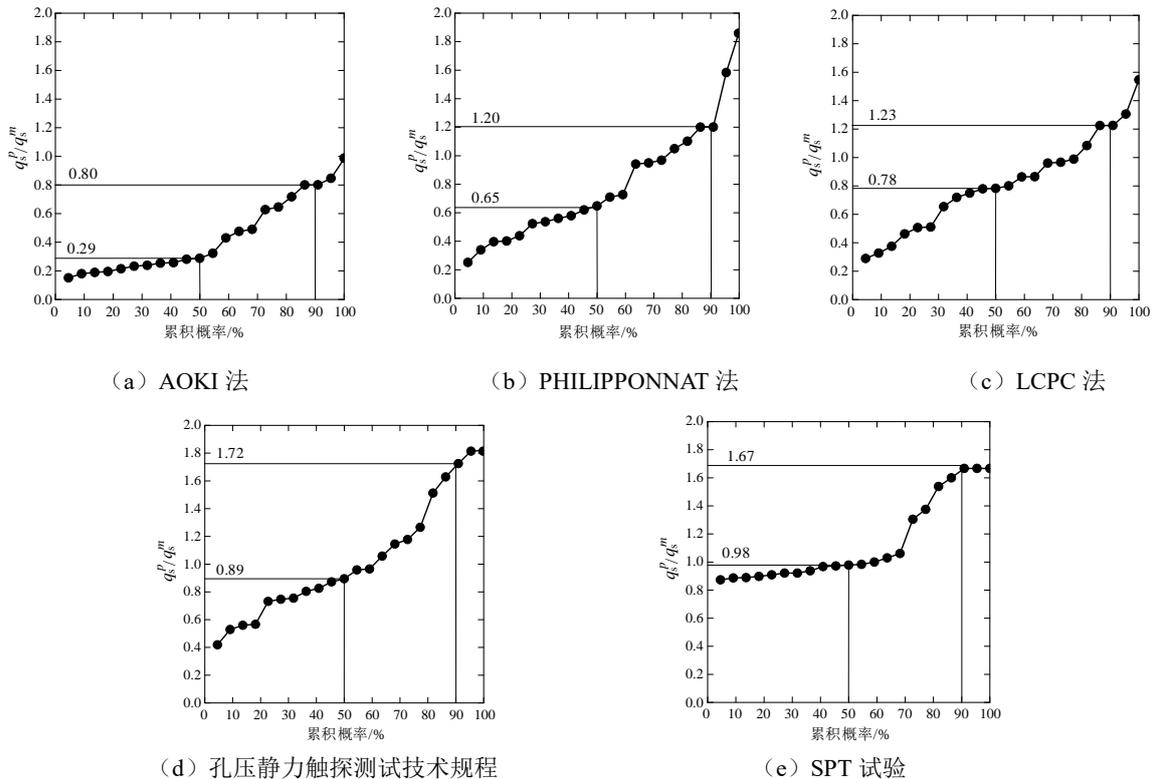


图 6 5 种方法的累积概率分布图  
Fig. 6 Cumulative probability plot of five methods

### 4 结论

本文依托济南绕城高速二环线试验桩工程项

目对试验桩单位桩侧摩阻力进行评价，考虑了 4 种 CPT 方法以及 SPT 试验结果并进行对比分析，得出如下结论：

(1) 4 种 CPT 方法中 PHILIPPONNAT 法和

LCPC 法对于总桩侧阻力预测结果较好, AOKI 法预测结果均显著低于静载试验结果, 对各土层的桩侧摩阻力预测和静载试验均有明显的出入, 该方法的可靠性需要更多的现场原位测试数据加以分析。

(2) 在桩侧摩阻力的方法评价中, AOKI 法拟合效果最差且数据较为离散, 表明该方法并不适用于本次工程试验, LCPC 法和孔压静力触探测试技术规程拟合结果较好,  $R^2$  分别为 0.870 和 0.872。但是 4 种 CPT 方法均不及 SPT 试验, 无论是数据拟合还是离散性分析, SPT 试验整体预测效果均较可靠, 并且在 50% 累积概率对应的  $q_s^p / q_s^m$  最接近 1, 准确性较高。

(3) 现有 CPT 方法基于粉质黏土、粉砂以及粉土层进行评价, 表现出一定的精确度和可靠性, 应用于其他地区如一些特殊土质情况时需进行可靠性验证, 本文的研究可为黄河下游地区及相似土质情况下灌注桩的桩侧摩阻力提供参考。

## 参考文献

- [1] 赵春风, 李俊, 邱志雄, 等. 广东地区大直径超长钻孔灌注桩荷载传递特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 849-855.  
ZHAO Chun-feng, LI Jun, QIU Zhi-xiong, et al. Experimental research on load transfer of large-diameter and super-long bored pile in guangdong area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 849-855.
- [2] 王应斌, 姜培军, 周志军. 基于参数统计法黄土地区灌注桩桩侧摩阻力分析[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2019, 15(3): 259-261.  
WANG Ying-bin, JIANG Pei-jun, ZHOU Zhi-jun. Analysis of shaft resistance of bored piles in Loess Area based on parametric statistics[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technology Edition, 2019, 15(3): 259-261.
- [3] LU S L, ZHANG N, SHEN S L, et al. A deep-learning method for evaluating shaft resistance of the cast-in-site pile on reclaimed ground using field data[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2020, 21(6): 496-508.
- [4] 刘红艳, 王志辉. 桩端后压浆对钻孔灌注桩侧摩阻力的增强作用[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2020, 53(12): 1078-1084.  
LIU Hong-yan, WAN Zhi-hui. Enhancement effect of base post-grouting on shaft resistance of bored piles[J]. Engineering Journal of Wuhan University: Engineering Edition, 2020, 53(12): 1078-1084.
- [5] 宋广, 杨鹏, 侯智超, 等. 黄河中下游地区大直径超长灌注桩静载试验与分析[J]. 工程勘察, 2019, 47(9): 24-32.  
SONG Guang, YANG Peng, HOU Zhi-chao, et al. Field loading tests on large-diameter and super-long bored piles in the middle and lower reaches of Yellow River in Henan Province[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2019, 47(9): 24-32.
- [6] 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 Lu-lu, CAI Guo-jun, GENG Gong-qiao, 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.
- [7] 蔡国军. 现代数字式多功能 CPTU 技术理论与工程应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.  
CAI Guo-jun. Research on theory and engineering application of modern multi-function digital CPTU technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [8] TITI H H, ABU-FARSAKH M. Evaluation of bearing capacity of driven piles from cpt data and development of design software[C]//Art of Foundation Engineering Practice. GeoFlorida: Geo-Institute of ASCE, 2010: 670-686.
- [9] 何智敏, 孔明, 马秋柱. 孔压静力触探测试数据在桩基承载力评估中的应用[J]. 水运工程, 2013(7): 35-38.  
HE Zhi-min, KONG Ming, MA Qiu-zhu. Application of CPTU data on pile bearing capacity assessment[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(7): 35-38.
- [10] 谢志斌, 廖广超, 莫品强, 等. 厚淤泥地层灌注桩深长护筒受力特性理论分析[J]. 地基处理, 2021, 3(6): 458-463.  
XIE Zhi-bin, LIAO Guang-chao, MO Pin-qiang, et al. Theoretical analysis on mechanical characteristics of deep and long pile casing for cast-in-place piles in deep soft clay[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(6): 458-463.
- [11] AOKI N, VELLOSO D A. An approximate method to

