

DOI: 10.11779/CJGE2021S1004

基于旁压试验的桩基承载力计算分析

邓会元¹, 戴国亮^{*2}, 竺明星², 龚维明²

(1. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:非洲某工程桥梁基础穿越深厚砂性土, 为了研究砂性地层钻孔桩承载特性, 选取了主桥的 TP-1 和 TP-2 两根 2.0 m 直径的桩基进行现场试验及对临近钻孔进行旁压试验。试验结果表明, 深厚砂性土会对成桩质量产生影响, 砂性土越厚, 桩端沉渣越显著。桩端沉渣会显著影响桩基沉降, 使桩端阻力产生弱化和强化特性。此外, 基于欧洲规范 (BS EN 1997—2) 旁压试验预测桩基承载力, 会高估 95% ~ 140% 桩基承载力, 而公路桥涵规范计算的承载力也明显大于实测值。通过对旁压试验进行三段线性分类, 可得到一种直接利用旁压试验预测桩基承载力的方法, 相较于欧洲规范和公路桥涵规范更适用于深厚砂性土桩基承载力预测。

关键词:深厚砂土; 现场试验; 旁压试验; 桩端沉渣; 承载力预测

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S1-0019-06

作者简介:邓会元 (1989—), 助理研究员, 博士, 毕业于东南大学, 主要从事地下结构工程方面的研究。E-mail: 973730609@qq.com。

Calculation and analysis of bearing capacity of pile foundation based on PMT

DENG Hui-yuan¹, DAI Guo-liang², ZHU Ming-xing², GONG Wei-ming²

(1. CCCC Highway Planning & Design Institute Co. Ltd., Beijing 100088, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The foundation of a bridge in Africa passes through thick sandy soils. In order to study the bearing characteristics of bored piles in thick sandy soils, two 2.0 m-diameter pile foundations (TP-1 and TP-2) of the main bridge are chosen to conduct field tests, and pressuremeter tests (PMT) on adjacent boreholes are performed. The test results show that the thick sandy soils have an important influences on pile quality, and the thicker sandy soils will induce serious pile base sediment. The pile base sediment will significantly affect the settlement of the pile foundation, resulting in weakening and strengthening of the pile base resistance. In addition, the prediction of the bearing capacity of piles based on the PMT of European Code (BS EN 1997—2) will overestimate about 95% ~ 140% of the bearing capacity of the pile foundation, and the bearing capacity calculated by the China's specification for design of foundation of highway bridges and culverts is significantly larger than the measured value. A new method by performing three-stage linear classification of the PMT can directly predict the bearing capacity of piles. The proposed method is more suitable for the prediction of the bearing capacity of piles in thick sandy soil areas than the European Code and the China's specifications for design of foundation of highway bridges and culverts.

Key words: thick sandy soil; field test; pressuremeter test; pile base sediment; prediction of bearing capacity

0 引言

桩基因其承载力高、沉降小等特点, 而广泛应用于桥梁、建筑、码头、海上风电等重大工程中。桩基础承载力的可靠性直接关乎上部结构的安全, 承载力直接确定方法主要是桩顶静载试验。针对承载力高、现场试验条件复杂等测试难题, 而后也发展出 O-cell 法或自平衡法, 极大地推动了对桩基础的承载机理研究。但实际工程中, 桩基础的初步设计及承载力预估主要依赖于基本的岩土试验参数, 如 SPT (标注贯入试验)、CPT (静力触探试验)、PMT (旁压试验) 等试验方法确定的参数。不同国家及不同行业领域规范也会偏重于

某一岩土试验方法, 如法国规范 (NF P94-150-1)^[1] 主要采用 PMT 法, 采用法国规范的地区一般进行 PMT 试验, 而很少做其他岩土参数试验。

旁压试验参数既能用于工程场地地质评价, 也能对浅基础的地基承载力进行设计和桩基础承载力设计^[2-3]。彭柏兴^[4]对长沙某工程 44 根嵌岩桩进行统计

基金项目:国家自然科学基金项目 (51878160, 51678145); 中央高校基本科研业务费专项资金资助和江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目 (KYLX16_0239)

收稿日期: 2020-12-16

* 通信作者 (daigl@seu.edu.cn)

分析,认为按照旁压试验计算的软质裂隙岩体的允许承载力,其安全度能满足工程设计要求。王哲威等^[5]对阿尔及利亚东西高速公路桥梁工程进行了现场旁压试验,分别应用法国规范和中国规范对桩基承载力进行计算,发现两者差别较小。杨石飞等^[6]对上海软土地区 30 多项旁压试验及 133 组静载试验进行统计分析,提出了根据旁压试验确定挤土桩和非挤土桩的承载力计算公式。此外, Schlosser 等^[7]对突尼斯湖 Rades 桥深厚黏土场地进行现场旁压试验,采用旁压试验预测了桩基承载力,与实测承载力较接近。Boumedi 等^[8]利用旁压试验对尼罗河下游的 LNG 储油罐桩基础竖向和水平承载力进行预测,发现与实测结果吻合较好。

既有文献大多数利用旁压试验对嵌岩及黏性土中桩基进行承载力预测,但很少有对深厚砂性土中桩基承载力进行预测,也缺少现场静载试验对比。为了揭示深厚砂性土层中的桩基承载特性,以下选取了非洲某大桥主桥试桩进行竖向静载试验,对比分析了旁压试验方法与其他不同方法的承载力计算结果,为类似工程设计提供有益参考。

1 旁压试验确定桩基承载力的方法

旁压试验是利用可侧向膨胀的旁压仪,通过对钻孔孔壁周围土体施加径向压力的原位测试方法。根据孔壁压力与变形量的关系,计算地基土承载力、压缩模量。该原位试验方法适用土层较广泛,可应用于软弱土层,也可用于软岩地层,且试验深度可达到 100 m 以上。Baguelin 等^[9]认为旁压试验比较接近桩周土受力模型, Briaud^[10]认为旁压试验是一种很好的分析桩基承载力和桩基沉降的试验方法。根据欧洲规范 (BS EN 1997—2) 及法国规范,桩基竖向承载力可通过现场旁压试验进行计算,推荐采用 Menard 方法,公式如下:

$$Q = A \cdot k \cdot p_{LM,e}^* + U \sum q_{si} z_i \quad (1)$$

$$p_{LM}^* = p_{LM} - p_0 \quad (2)$$

$$p_0 = K_0 (\sigma_{v0} - u) + u \quad (3)$$

式中 Q 为单桩竖向承载力; A 为桩端截面积; k 为抗压承载力系数,与桩端持力层性质以及桩类型有关,可根据规范查表得到,对于非挤土桩 k 为 1.0~1.8,对于挤土桩 k 为 1.4~4.2; $p_{LM,e}^*$ 为桩端等效净极限压力值,可根据公式 (4) 进行计算; U 为桩周长; q_{si} 和 z_i 分别为第 i 层土侧摩阻力和土层厚度, q_{si} 可通过各土层的旁压试验净极限压力值 p_{LM}^* 查图表得到,见欧洲规范 (BS EN 1997—2) 附录 E 所示; K_0 为常数,取为 0.5; σ_{v0} 为试验时桩端以上土竖向有效应力; u 为孔隙水压力。

$$p_{LM,e}^* = \frac{1}{b + 3a} \int_{L-b}^{L+3a} p_{LM}^*(z) dz \quad (4)$$

$$a = \max \left\{ \frac{D}{2}; 0.5 \right\} \quad (5)$$

$$b = \min \{ a; h \} \quad (6)$$

式中 z 为土层深度, D 为桩径; L 为桩入土长度; h 为桩端以上持力层厚度。

此外, Baguelin 采用如下公式计算侧摩阻力 q_s 和端阻力 q_b :

$$q_b = p_{LM}^*/3 \quad (7)$$

$$q_s = p_{LM}^*/20 \quad (8)$$

2 工程应用及试桩承载力对比

2.1 工程概述及地质条件

非洲科特迪瓦某新建桥梁全长 630 m, 主桥为主跨 200 m 独塔斜拉桥, 跨越运河, 主梁为钢混组合梁型式。连接线采用 34.2 m 跨连续梁结构, 全线桥梁下部结构采用桩基础。为得到桩的极限承载力及对应沉降, 本项目对主线桥及法国大街立交桥进行桩基荷载试验。

为了有效推进该大桥的设计工作, 自平衡法被推荐为桩基承载力检测的静载试验方法, 选取了 2 根主桥 P3 和 P7 桥墩附近的桩基进行静载试验。其中试桩 TP-1 位于主桥 P3 轴线上, 距离 P3 墩台外边缘 7 m; 试桩 TP-2 位于主桥 P7 墩顺桥方向轴线上, 距离 P7 墩系梁外边缘 7 m。桩长范围主要为细砂及中砂类砂性土, 两根试桩及其地层剖面如图 1 所示。

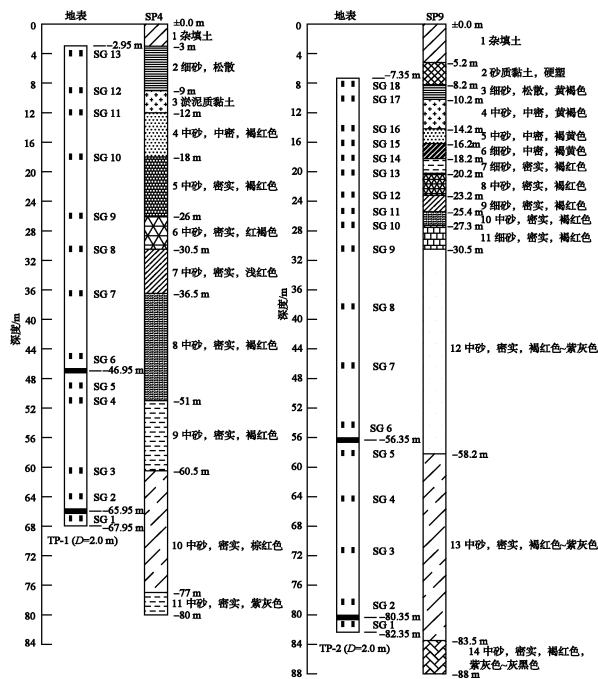


图 1 试桩剖面图

Fig. 1 Profile of test piles

2.2 桩基静载试验结果与分析

(1) 荷载位移分析

根据设计要求,试验按照法国规范^[1]分两次循环加卸载。两根试桩均采用双荷载箱(如图1所示),试验先加载下荷载箱,再加载上荷载箱,通过加载上下两个荷载箱可得到桩基承载力。通过向上向下荷载位移曲线,可按照自平衡规范^[11]等效转换得到桩顶的荷载位移曲线,如图2所示。

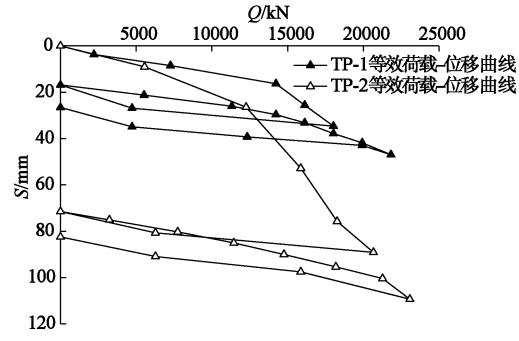


图2 等效荷载-位移曲线图

Fig. 2 Curves of equivalent load-displacement

从图2可知,试桩 TP-1 和 TP-2 第1次循环加载至峰值时等效得到的桩顶荷载分别为 18032 kN 和 20676 kN,对应的位移分别为 34.65 mm 和 89.15 mm。而试桩第2次循环加载至极限时,等效得到的荷载分别为 21832 kN 和 23076 kN,对应的位移分别为 46.97 mm 和 109.37 mm。说明第1次循环加载沉降量较显著,可能因为砂性地层桩端密实性较差,存在一定厚度的沉渣影响,通过第1次循环加载可使得桩端土进一步压密,从而第2次循环加载位移趋于平缓。试桩 TP-2 的沉降量远大于试桩 TP-1,说明试桩 TP-1 的施工质量更好,可能因为 TP-2 钻孔深度大于 TP-1 钻孔深度,成孔时间长,影响成桩质量。由于该试桩桩径为 2.0 m,根据法国标准 (NF P94—150—1)^[1] 及欧洲规范 (EN 1997—2)^[12],极限位移可取为 0.1D (D 为桩径),即为 200 mm。但是,为了设计保守,建议取为实际最大极限加载值等效桩顶荷载作为试桩的极限承载力。

(2) 桩侧摩阻力分析

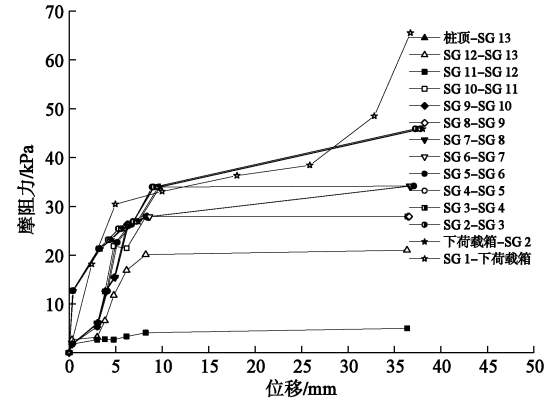
为了获得桩身不同位置的轴力及土层侧摩阻力,在不同截面埋设了应变计,如图1所示。应变计考虑了温差影响,每级加载阶段桩身截面的应变计应变变化量计算公式如下:

$$\varepsilon = (\varepsilon_i - \varepsilon_0) + (T_i - T_0)(F_{\text{应变计}} - F_{\text{混凝土}})。(9)$$

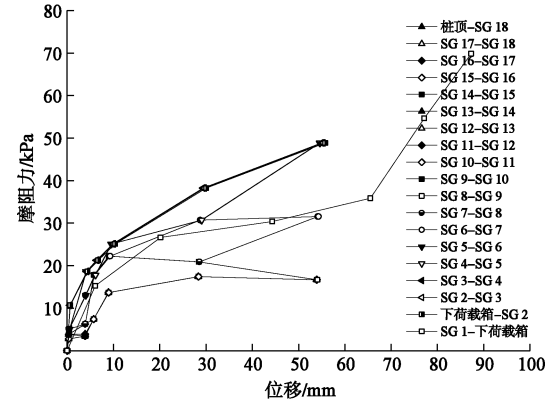
式中 ε_i 和 ε_0 分别为第 i 级加载时的测量应变值、初始应变值,单位为 $\mu\varepsilon$; T_i 和 T_0 分别为第 i 等级加载时的测量温度、初始温度; $F_{\text{应变计}}$ 和 $F_{\text{混凝土}}$ 分别为 12.2 $\mu\varepsilon/^\circ\text{C}$ 和 10 $\mu\varepsilon/^\circ\text{C}$ 。

根据计算的桩身轴力及实测位移,可推算得到桩侧摩阻力和桩身某一截面的位移。为了分析不同土层

侧摩阻力发挥机理,将两根试桩桩身各区段侧摩阻力位移关系曲线绘制如图3所示,限于篇幅,图中仅提供了下荷载箱测试分析结果。由图3可知,随着位移的增加,桩侧的摩擦力逐渐发挥,越靠近桩端的密实土层,极限摩阻力越大,且极限摩阻力的临界位移也越大。通过对桩端附近土侧摩阻力位移曲线分析,发现桩端附近土侧摩阻力出现硬化增长现象,可能受桩端阻力影响。而其他土层的侧阻力位移则表现为快速增长和平稳变化形态。其中 TP-1 试桩侧阻力快速增长阶段的剪切位移主要为 5 mm 以内,而平稳阶段主要为 5 ~ 10 mm。但 TP-2 试桩的两阶段的剪切位移范围均比 TP-1 试桩的偏大,如平稳阶段的剪切位移达到 10 ~ 30 mm。这可能因为 TP-2 试桩桩长大于 TP-1 桩长,使得 TP-2 钻孔暴露时间更长,砂层也较厚,泥浆护壁时间也较长,增加桩侧泥皮厚度,泥皮的黏滞特性会使摩阻力发挥所需的剪切位移增大。



(a) TP-1下荷载箱测试摩阻力位移图



(b) TP-2下荷载箱测试摩阻力位移图

图3 试桩侧阻力位移变化曲线

Fig. 3 Distribution curves of friction and displacement

(3) 桩端阻力分析

根据现场测试,可获得桩端阻力和桩端位移,如图4所示。由图4可知,两根试桩的端阻力增长规律相似,均没有出现明显陡变现象。由于受桩端沉渣影响,桩端阻力出现软化和硬化现象,软化主要表现为沉渣压密过程,桩端位移增长较快;而硬化主要表现为沉渣厚度在充分压缩后,颗粒的稳定性开始逐渐增强、承载

能力不断强化,逐渐由桩端持力层发挥承载。

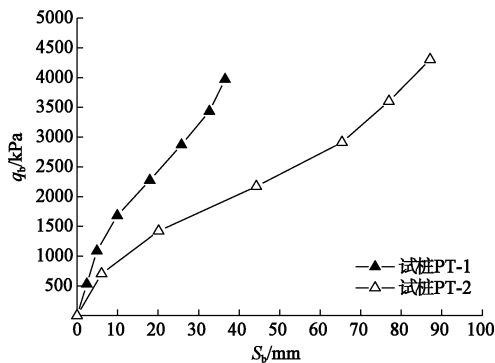


图4 端阻力-位移变化曲线

Fig. 4 Distribution curves of base resistance and displacement

根据两根试桩端阻力-位移曲线结果,虽然最终未出现极限破坏状态,为安全设计考虑,两根试桩均以最终加载获得的端阻力作为极限端阻力,试桩 TP-1 和 TP-2 最大端阻力分别为 3971 kPa 和 4304 kPa,对应的极限位移分别为 36.5 mm 和 87.1 mm。从端阻力位移结果也可以看出 TP-2 试桩的桩端沉渣厚度大于 TP-1,说明桩端沉渣会显著影响桩基的沉降,从现场施工记录来看,TP-2 成孔过程出现过塌孔现象,发现桩底沉渣也较厚,本次试验也证实了沉渣问题。

2.3 试桩承载力计算分析

本工程地勘均采用欧洲规范,现场对不同钻孔均进行了旁压试验,其中临近主桥试桩 TP-1 和 TP-2 位置的钻孔 SP4 和 SP9 旁压试验参数随试验深度的变化关系如图 5 所示。

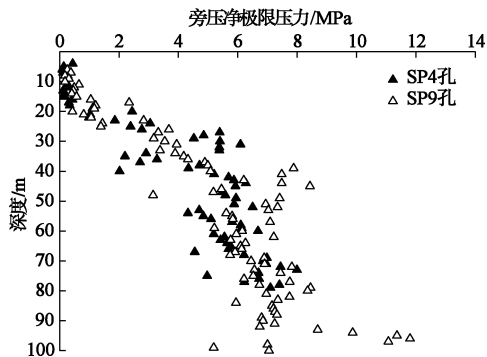


图5 旁压试验参数随深度变化图

Fig. 5 Variation of pressuremeter test parameters with depth

从图 5 可知,旁压净极限压力 p_{LM}^* 总体上随土层深度增加而增大,但没有明显的线性关系,而是表现出与土性相关。在黏土中 p_{LM}^* 明显比砂土中小,且密实砂土中的 p_{LM}^* 大于松砂。地表以下 20 m 范围主要为黏性土及松砂,旁压净极限压力小于 2 MPa,而 20 m 以下的土层主要为中密及密实砂土, p_{LM}^* 值达到 2 ~ 10 MPa。在同一土层中 p_{LM}^* 值随土层深度存在一定的线性相关性。

根据旁压净极限压力 p_{LM}^* ,可得到试桩位置各土层

桩侧土单位桩长侧摩阻力以及桩端阻力。其中桩侧摩阻力随深度变化如图 6 所示,从图 6 可知,深度超过 30 m 时,欧洲规范旁压试验换算得到的侧摩阻力保持不变,由于该深度以下土体旁压净极限压力大于 2 MPa,从欧洲规范设计曲线获得的侧阻力为常数值。浅层松质土中旁压试验计算得到的侧摩阻力比实测值小,而对于中密及密实的砂土侧摩阻力计算值比实测值大,TP-1 试桩差异达到 22% ~ 177%,最大差异主要表现在中段桩侧阻力,而对于下段桩侧阻力,计算值和实测值相差较小,TP-2 试桩也表现出类似的差异。

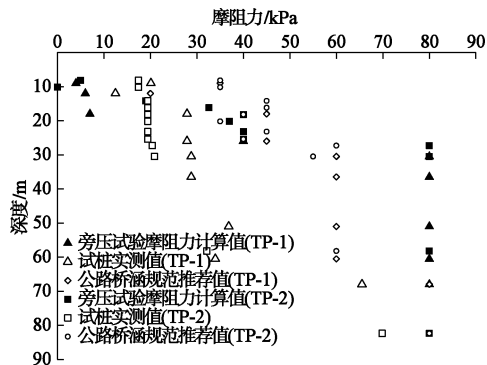


图6 桩侧摩阻力随深度变化图

Fig. 6 Variation of shaft friction with depth

此外,根据不同土性,该图中也给出了公路桥涵规范(JTG 3363—2019)^[13]推荐的土层侧摩阻力值,与欧洲规范旁压试验计算值差别较小,但明显比实测值偏大。上段和中段桩侧阻力实测值比公路桥涵规范摩阻力标准值小 37% ~ 52%,若考虑上段和中段桩侧摩阻力为负摩阻力的影响,按照自平衡技术规程(JT/T738—2009)^[11],黏性土侧阻力一般按照 0.8 的系数进行修正,砂性土按照 0.7 的修正系数。经过修正后得到的侧阻力比公路桥涵规范摩阻力标准值小 11% ~ 31%。说明按照公路桥涵规范进行承载力设计,会高估桩侧摩阻力,使承载力偏于不安全。

两根试桩的侧阻力远比欧洲规范和公路桥涵规范小,除了受成孔质量影响和正负摩阻力效应影响外,还可能与土层温度效应影响有关。公路桥涵规范主要对中国地区的不同地层进行统计,提出的侧阻力标准值在中国国内工程应用具有一定的普适性,但对于科特迪瓦热带地区国家的地层,存在显著的温度差异。已有研究表明^[14-15],黏土及砂土的抗剪强度会随温度的增加而有所降低,表现出热软化现象。本工程 TP-1 试桩在测试阶段已发现地层温度普遍较高,达到 30℃ ~ 45℃,如图 7 所示。

从图 7 可以看出,浅层土的温度达到 40℃ 左右,65 m 深度的土层温度也达到了 30℃ 以上,该温度明显高于中国区域土体温度。因此,直接采用中国公路桥涵规范侧阻力推荐值会存在一定的偏差。

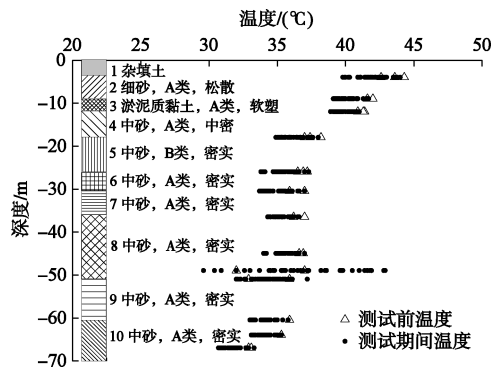


图 7 土层温度随深度变化

Fig. 7 Variation of soil temperature with depth

根据欧洲规范旁压试验结果,可计算得到桩端阻力,由于桩端持力层为中密实砂层,抗压承载力系数 k 取为 1.2。不同方法计算得到的端阻力如表 1 所示。

表 1 不同方法端阻力计算值

Table 1 Base resistances obtained by different methods (kPa)					
试桩	试桩实测最大值	欧洲规范旁压试验计算值		公路桥涵规范 (JTG 3363—2019)	
		数值	差异比/%	数值	差异比/%
TP-1	3971	6072	52.91	5594	40.87
TP-2	4304	7476	73.70	5594	29.97

从表 1 可以看出,两根试桩实测获得的最大端阻力均明显小于欧洲规范旁压试验计算值以及公路桥涵规范计算值。其中欧洲规范计算得到的端阻力约为实测端阻力的 1.5 ~ 1.7 倍。因此,若按照欧洲规范旁压试验结果进行估算桩端阻力需进行一定的修正。

3 基于旁压试验三折线预测桩基承载力

为了分析桩侧阻力、桩端阻力与旁压净极限压力之间的关系,以下对两根试桩结果进行统计,如图 8 所示。根据实测统计结果,以下提出了分段线性拟合方法,对旁压净极限压力进行三段线性分类,可得到较合理的计算桩侧摩阻力的计算公式,如公式 (10) 所示。

表 2 不同方法桩基承载力结果

Table 2 Bearing capacities of pile foundation by different methods									
试桩	工况	试验实测结果		欧洲规范 (BS EN 1997—2) 旁压试验		公路桥涵规范 (JTG 3363—2019)		旁压试验分段函数法	
		数值	比例/%	数值	比例/%	数值	比例/%	数值	比例/%
TP-1	桩侧阻力 (kN)	9355	43	23625	55	22406	56	14216	55
	桩端阻力 (kN)	12477	57	19075	45	17573	44	11604	45
	承载力 (kN)	21832	—	42700	—	39979	—	25820	—
TP-2	桩侧阻力 (kN)	9554	41	31814	58	29070	62	22970	62
	桩端阻力 (kN)	13522	59	23486	42	17573	38	14288	38
	承载力 (kN)	23076	—	55300	—	46643	—	37258	—

该分段公式克服了 Baguelin 方法高估桩侧摩阻力的不安全问题。

$$q_s = \begin{cases} 0.0825p_{LM}^* & 0 < p_{LM}^* < 200 \text{ kPa}, \\ 0.0025p_{LM}^* + 17.5 & 200 \text{ kPa} \leq p_{LM}^* < 3000 \text{ kPa}, \\ 0.015p_{LM}^* - 20 & 3000 \text{ kPa} \leq p_{LM}^* \end{cases}$$

(10)

而对于端阻力,由于两根试桩持力层的平均旁压净极限压力分别为 5.06 MPa 和 6.23 MPa,通过实测端阻力可换算得到两根试桩的端阻力与旁压净极限压力的比值分别为 0.78 和 0.69,均大于 Baguelin 方法提出的系数。此工程的桩端持力层均为中密实砂层,建议该比值采用平均值,即为 0.73。

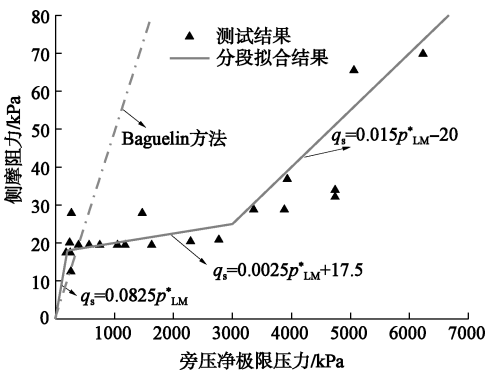


图 8 侧摩阻力与旁压净极限压力的关系

Fig. 8 Relationship between skin friction and pressuremeter net ultimate pressure

通过两根试桩测试结果,可得到不同方法单桩极限承载力及端阻力、侧阻力组成情况,见表 2。

从表 2 中可知,实测获得的侧阻力为承载力的 41% ~ 43%,欧洲规范 (BS EN 1997—2) 旁压试验得到侧阻力所占比例为 55% ~ 58%,公路桥涵规范 (JTG 3363—2019) 得到的侧阻力所占比例为 56% ~ 62%。而欧洲规范计算得到的承载力为实测承载力的 1.95 ~ 2.4 倍,公路桥涵规范计算得到的承载力为实测承载力的 1.83 ~ 2.02 倍,两种规范计算结果差别较小。该工程采用欧洲规范旁压试验计算方法会明显高估了单

桩承载力,采用该欧洲规范旁压试验方法时需进行一定的修正。而如果采用旁压试验分段函数法,计算得到的承载力均比欧洲规范和公路桥涵规范得到的承载力小,与实测承载力更为接近,近似为实测承载力的1.18~1.61倍。由于本工程两根试桩结果忽略了上段桩正负摩阻力影响,以及桩端阻力未达到极限,实测承载力在一定程度上存在富余。因此,采用旁压试验分段函数法对本工程桩基承载力进行预测更为合理。

4 结 论

结合非洲某工程桩基现场试验及旁压试验,研究了深厚砂性土中桩基承载特性。主要结论如下:

(1) 砂层的厚度会影响成桩质量,钻孔穿越砂层越厚,桩端更容易出现沉渣问题。通过试桩两次循环加载的沉降变化也证实了沉渣问题,且桩端沉渣会显著影响桩基沉降,使桩端阻力产生弱化和强化特性。

(2) 两根试桩的侧阻力远比欧洲规范和公路桥涵规范小,除了受成孔质量影响和正负摩阻力效应影响外,还可能与土层温度效应影响有关,温度越高,会使土体抗剪强度表现热软化特性,降低侧摩阻力。

(3) 通过对旁压试验进行三段线性分类,可得到旁压试验预测桩基承载力方法,相较于欧洲规范和公路桥涵规范更适用于深厚砂层桩基承载力预测。

参考文献:

- [1] Investigation and Testing-Static Test on Single Pile: French Standard NF P 94-150-1. Association Francaise de Normalisation, 1999.
- [2] 汪 稔, 胡建华. 旁压试验在苏通大桥地质勘察工程中的应用[J]. 岩土力学, 2003, **24**(6): 887-891. (WANG Ren, HU Jian-hua. Application of pressuremeter test to estimating intensity parameters in geological exploration for Sutong Bridge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**(6): 887-891. (in Chinese))
- [3] 温 勇, 杨光华, 汤连生, 等. 基于原位旁压试验的切线模量法及其初步验证[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(S1): 121-125. (WEN Yong, YANG Guang-hua, TANG Lian-sheng, et al. Tangent modulus method based on in-situ pressuremeter tests and its preliminary validation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S1): 121-125. (in Chinese))
- [4] 彭柏兴. 旁压试验确定单桩承载力的方法与应用[J]. 西部探矿工程, 1998, **10**(3): 24-27. (PENG Bai-xing. The method and use for pressuremeter test to determine the capacity of single pile [J]. West-China Exploration Engineering, 1998, **10**(3): 24-27. (in Chinese))
- [5] 王哲威, 付开隆. 阿尔及利亚东西高速公路梅拉尔旁压试验应用[J]. 铁道工程学报, 2013, **30**(1): 17-21. (WANG Zhe-wei, FU Kai-long. Application of menard pressuremeter test in construction of east-west freeway of Algeria[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, **30**(1): 17-21. (in Chinese))
- [6] 杨石飞, 顾国荣, 董建国. 旁压试验确定上海软土地区的单桩承载力[J]. 上海地质, 2002, **23**(4): 41-46. (YANG Shi-fei, GU Guo-rong, DONG Jian-guo. Determination of bearing capacity of single pile in Shanghai soft soil with pressuremeter test[J]. Shanghai Geology, 2002, **23**(4): 41-46. (in Chinese))
- [7] SCHLOSSER F, GUILLOUX A, ZAGHOUBANI K, et al. Rades bridge drilled shafts designed and tested using menard pressuremeter [C] // International Foundation Congress and Equipment Expo 2009. March 15-19, 2009, Orlando, Florida, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineer, 2009: 42-49.
- [8] BOUMEDI J Y, BAUD J P, RADIGUET B. LNG tanks at Damietta on drilled shafts designed and tested using menard PMT [C] // International Foundation Congress and Equipment Expo 2009. March 15-19, 2009, Orlando, Florida, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineer, 2009: 103-110.
- [9] BAGUELIN F, JÉZÉQUEL J F, SHIELDS D H. The Pressuremeter and Foundation Engineering [M]. Clausthal: Trans Tech Publications, 1978.
- [10] BRIAUD J L. The Pressuremeter [M]. A. A. Balkema, Brookfield VT, 1992.
- [11] 桩基静载试验自平衡法: JT/T738—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (Static Loading Test of Foundation Pile-Self Balance Method: JT/T738—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [12] Eurocode 7: Geotechnical Design-Part 2: Ground Investigation and Testing: EN 1997-2 [S]. Brussel, Belgium: CEN, 2007.
- [13] 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019. (Specifications for Design of Foundation of Highway Bridges and Culverts: JTG3363—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019. (in China))
- [14] 赖远明, 张 耀, 张淑娟, 等. 超饱和含水率和温度对冻结砂土强度的影响[J]. 岩土力学, 2009, **30**(12): 3665-3670. (LAI Yuan-ming, ZHANG Yao, ZHANG Shu-juan, et al. Experimental study of strength of frozen sandy soil under different water contents and temperatures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(12): 3665-3670. (in Chinese))
- [15] 邵玉娟, 施 斌, 顾 凯, 等. 非饱和黏性土抗剪强度的温度效应试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(1): 137-142. (SHAO Yu-xian, SHI Bin, GU Kai, et al. Direct shear test for temperature effect on shear strength of unsaturated clayey soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(1): 137-142. (in Chinese))