

文章编号:1006-2467(2021)04-0380-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.348

长期受荷桩极限承载力的预测

李镜培, 徐子涵

(同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室; 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 为准确预测长期受荷桩的极限承载力,对桩基承载力时间效应经验公式的不足进行了探讨,并基于天然饱和黏土地基静压桩承载力时效性研究的理论成果,对经历长期受荷的旧桩承载力的影响因素进行了分析.在此基础上,采用相关研究机构的桩基承载试验数据开展分析,提出了考虑桩基承载力时间效应的静压桩极限承载力计算公式;提出了桩侧阻力时效系数 γ ,探讨了影响 γ 的一些关键因素,并基于试验数据提出了采用土体性质参数计算 γ 的方法.通过现场试验对本文方法的准确性进行了验证.研究表明:采用 γ 可对现行规范中单桩承载力计算公式进行修正,在保证安全性的前提下,获得更高的旧桩单桩承载力设计值;而 γ 则可采用不排水抗剪强度 S_u 及塑性指数 I_p 进行预测.

关键词: 旧桩; 极限承载力; 时效系数; 不排水抗剪强度; 现场试验

中图分类号: TU 473

文献标志码: A

Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Long-Term Loaded Piles

LI Jingpei, XU Zihan

(Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education;
Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To predict the ultimate bearing capacity of long-term loaded piles, the shortcomings of current empirical formulas of pile bearing capacity considering time effect are discussed. Based on the current research of the bearing capacity of static bearing piles in natural saturated clay, factors for the bearing capacity of long-term loaded old piles are analyzed. Then, based on analysis of the data from pile foundation bearing tests, the formula for calculating the ultimate bearing capacity of jacked piles considering the time effect and the current pile foundation technical code is proposed, in which the pile side resistance aging coefficient of pile side resistance is proposed, and some factors for the aging coefficient are discussed. Based on the experimental data, a method for calculating the parameters in the formula by using soil properties is proposed. The accuracy of the proposed method is verified by a field test. The results show that this pile side resistance aging coefficient can predict the bearing capacity of single pile under current code, increase the design value of the bearing capacity of old piles while ensuring safety. By using the undrained shear strength and plasticity index, the pile side resistance aging coefficient can be predicted.

Key words: old pile; ultimate bearing capacity; aging coefficient; undrained shear strength; field test

收稿日期:2019-12-03

基金项目:国家自然科学基金(41972274)资助项目

作者简介:李镜培(1963-),男,江西省赣州市人,教授,博士生导师,主要研究方向为岩土力学及桩基础工程.

电话(Tel.):13901656003;E-mail:ljip2773@tongji.edu.cn.

近年来,全国各大城市高速发展,可用于新建建筑的土地资源不断减少.同时,随着城市老旧建筑功能过时,出现了大量需要在建筑原址上进行升级改造的工程.改造工程中如何合理再利用经历长期受荷的旧桩成为一个新的课题^[1].

桩基承载能力具有时间效应,随着桩周土体超孔隙水压力的消散^[2-3]和土体蠕变^[4-5]等因素的影响,长期受荷的旧桩基通常具有比新桩更高的承载能力.这种现象最初于1900年观测到,承载力的增长幅度最多可达沉桩结束时的数倍^[6-7].对于静压桩,由于沉桩过程的挤土效应,桩周土体超孔隙水压力的消散会导致桩承载力产生较大幅度的提升.因此旧桩再利用工程中对静压桩的承载能力重新进行评估,可以在保证工程安全性的前提下节省工程预算,具有较大的工程经济价值^[8-10].

根据以往的研究结果,已有的一些经验公式可用于既有旧桩承载力的计算评价,但这些经验公式在工程实际应用中还存在适用性较差、计算参数难以确定等问题^[11].本文基于现有的经验公式和相关桩基承载力时效性理论解答,通过收集分析美国佛罗里达大学(UF)及路易斯安那州交通研究中心(LTRC)等研究机构对长期受荷桩基承载力的测试研究数据,提出了基于我国现行桩基设计规范,可适用于工程实际的旧桩极限承载力计算公式.对公式中参数取值的问题进行了讨论,并通过国内工程现场试验对本文计算公式的合理性进行了验证.

1 旧桩承载力计算方法探讨

1.1 考虑时间效应的桩基承载力经验公式

国外对桩基承载力时间效应的研究起步较早,积累了大量不同工程地质环境下桩基承载力随时间变化的资料,通过分析数据并加以总结,提出了一些经验公式.

目前国外常用的公式是Skov等^[12]所建议的公式,其采用对数时间轴,具体表达式如下:

$$\frac{Q_t}{Q_0} = 1 + A \lg \frac{t}{t_0} \quad (1)$$

式中: Q_t 为沉桩后 t 时刻的桩基承载力; Q_0 为 t_0 时刻的桩基承载力; A 为根据土体类型确定的参数; t_0 为土体超孔隙水压力开始呈线性消散的时刻.

确定 Q_0 与 t_0 通常需要在现场进行载荷试验,也可根据现场数据进行分析或根据当地经验总结得到.影响 t_0 的主要因素为土的类型及桩径等.桩径越大, t_0 越大,黏性土中一般取 $t_0 = 1 \sim 2$ d. 参数 A 取决于土的类型,与桩的埋设深度、超孔隙水压力的消

散状况无关.

此外,还有多位学者提出了相关经验公式. Pei等^[13]以沉桩结束时刻的桩基承载力 Q_{EOD} 和桩基最大承载力 Q_{max} 作为参考承载力,提出如下桩基时效承载力计算公式:

$$Q_t = Q_{EOD} + 0.263(\lg t + 1)(Q_{max} - Q_{EOD}) \quad (2)$$

Bogard等^[14]以桩的最终承载力 Q_u 和沉桩50%所需时间 T_{50} 作为参考承载力和参考时间,提出如下桩基承载力计算公式:

$$Q_t = Q_u \left[0.2 + 0.8 \left(\frac{t/T_{50}}{1 + t/T_{50}} \right) \right] \quad (3)$$

上述经验公式具有较大的理论和工程意义,例如都指出了沉桩之后桩基的承载力会随时间增长,且增长速率随时间减小.然而,这些公式大都存在以下缺陷,导致在工程实际中的应用存在局限:

(1) 已有的经验公式主要是对桩基总承载力的增加进行估算,未考虑桩侧阻力与桩端阻力影响的差异,导致上述经验公式仅适用于特定的土性、桩型条件,不同公式的适用范围都较为有限.

(2) 上述经验公式大多需要沉桩结束时刻的承载力作为参考承载力,对于长期受荷的旧桩,由于服役时间已久,这些数据往往难以准确确定.

(3) 这些经验公式多为国外研究成果,与国内现行规范中桩基承载力计算公式缺乏联系,难以在国内工程设计中推广应用.

因此,有必要在考虑桩基承载力时间效应影响因素的条件下,提出更为通用的旧桩承载力计算公式.在满足一定计算精度的前提下,公式中的计算参数应便于选取.同时,计算公式应与现行桩基技术规范的计算方法相结合,方便工程设计人员参考使用.

1.2 考虑时间效应的桩基承载力理论解答

由于通过对现场载荷试验结果进行统计拟合得到的经验计算公式无法从机理上反映桩基承载力时效性的本质,本文依据相关理论研究对桩基承载力时效性的影响因素进行了总结分析.

Li等^[15]基于 K_0 固结条件下的修正剑桥模型(K_0 -MCC),在综合考虑天然饱和黏土各向异性和应力历史的基础上,基于总应力法推导了天然饱和黏土地层中静压桩时变承载力的解析解,提出了桩侧和桩端承载系数的理论计算方法,进而提出了考虑时效的静压桩极限承载力的理论公式:

$$Q_{ult}(t) = 2\pi r_d \alpha_1(t) \int_0^L c_1 dz + \pi r_d \alpha_2(t) c_1 \quad (4)$$

$$\alpha_1(t) = \frac{(3 - \sin \varphi') \cos \varphi' p'_1(t)}{3 p'_0 O_c^A} \quad (5)$$

$$\alpha_2(t) = \frac{2 \int_L^{L+r_d} c_2 (L + r_d - z) dz}{r_d^2 c_1} + \frac{\sigma_{u2}(t)}{c_1} \quad (6)$$

式中: r_d 为桩径; $\alpha_1(t)$ 和 $\alpha_2(t)$ 为桩侧承载系数和桩端承载系数; c_1 、 c_2 为沉桩前和沉桩一段时间后桩周土体不排水抗剪强度; φ' 为桩土界面有效摩擦角; p'_0 、 p'_1 为沉桩前和沉桩一段时间后桩周土体弹性区内有效主应力; O_c 为土体超固结比; Δ 为土体塑性体应变系数; L 为桩长; z 为深度; $\sigma_{u2}(t)$ 为桩端挤压土体向外扩张的极限压力。

上述理论公式综合考虑了土体原位力学特性、沉桩效应、桩端土再固结过程, 在计算出桩侧承载系数和桩端承载系数后, 可采用三轴条件下土体的原位不排水抗剪强度直接计算任意时刻静压桩的极限承载力。Li 等^[15] 通过对 $\alpha_1(t)$ 和 $\alpha_2(t)$ 进行理论计算, 认为沉桩结束后桩侧承载系数随再固结时间的增幅远高于桩端承载系数, 沉桩结束后桩承载力的增长主要是桩侧承载力的增长。基于该理论, 本文计算对静压桩承载力时间效应的影响因素进行了简化, 仅考虑桩侧承载能力提高对旧桩承载力的影响。

2 旧桩极限承载力标准值计算方法

基于上述理论研究结果, 结合经典桩基承载力时效经验公式, 本文提出了可与现行规范相结合的长期受荷旧桩极限承载力标准值计算方法。

2.1 旧桩极限承载力标准值计算公式

文献[16]中规定, 当根据土的物理指标和承载力参数之间的经验关系确定单桩极限承载力标准值时, 宜按下式计算:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (7)$$

式中: Q_{uk} 为单桩极限承载力标准值; Q_{sk} 、 Q_{pk} 分别为总极限侧阻力标准值和总极限桩端阻力标准值; u 为桩身周长; q_{sik} 为桩侧第 i 层土的极限侧阻力标准值; l_i 为桩周第 i 层土的厚度; q_{pk} 为极限端阻力标准值; A_p 为桩端面积。

式(7)将单桩极限承载力分为了桩侧和桩端两部分。本文提出桩侧阻力时效系数 γ , 以式 $\gamma u \sum q_{sik} l_i$ 表示考虑时效性的桩侧阻力, 通过 γ 取值与沉桩过后时间之间的关系, 反映桩侧桩基承载力随时间的改变量, 进而提出考虑时效性的静压桩极限承载力标准值计算公式:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = \gamma u \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (8)$$

γ 的确定方法将在下文讨论。

式(8)与现行单桩极限承载力标准值计算公式

(7)之间仅有一个参数 γ 的区别, 便于工程应用。该式仅对桩侧阻力进行修正, 在 γ 取值合理的情况下, 相对于其他经验公式, 更为明确地反映了静压桩承载力的时效特征。

2.2 考虑时效性的桩侧阻力计算

为了合理预测桩侧阻力随时间的增长, 本文采用佛罗里达大学在 5 处沿海土壤中沉桩, 并观测 5 年的试验数据^[17], 对不同场地、不同土层条件下桩基的桩侧阻力随时间的变化关系进行了统计分析。

图 1 为 5 个场地桩侧阻力 Q_s 与沉桩时间 t 的关系, 其中时间采用对数坐标。从图中可以看出, 沉桩一段时间之后, 所有桩基的侧阻力几乎都与时间对数成线性关系, 以 γ_s 表示沉桩后任意时刻桩侧阻力与初始时刻桩侧阻力的比值, 则 γ_s 可采用下式表示:

$$\gamma_s = B \lg\left(\frac{t}{t_0}\right) + C \quad (9)$$

式中: B 和 C 为实测数据拟合得到的参数; t_0 为超孔隙水压力开始呈线性消散的时刻, 依据 Skov 等^[12] 的相关理论, 取 $t_0 = 1 \sim 2$ d。

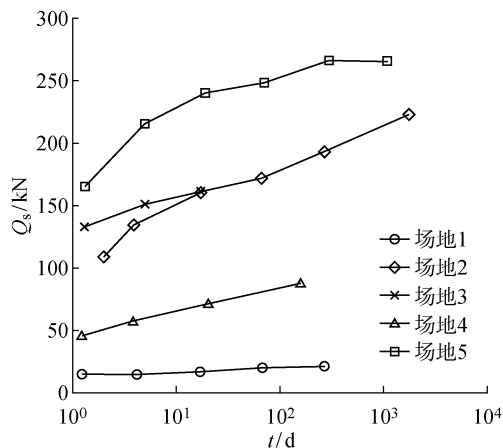


图 1 桩侧阻力与沉桩时间关系曲线

Fig. 1 Correlation of pile side resistance versus time

为确定参数 B 和 C , 计算各场地不同时刻的 γ_s , 得到 γ_s 与 $\lg(t/t_0)$ 的关系, 如图 2 所示。从图中可以看到, 不同场地桩侧阻力时效系数随时间线性关系的截距差异较小, 且当 $t/t_0 > 1$ 时, $\gamma_s > 1.0$, 表明沉桩结束后桩侧阻力均随时间增长。对各条曲线进行拟合, 获得直线斜率为 B , 截距为 C 。其中 B 的取值为 $0.17 \sim 0.35$, C 的取值为 $0.92 \sim 1.1$, 拟合优度决定系数 R^2 为 $0.88 \sim 0.96$ 。

取 C 的值为 1, B 是一个与场地条件相关的参数, 对于场地资料缺少的静压桩, 本文认为 B 可取保守值 0.17, 则:

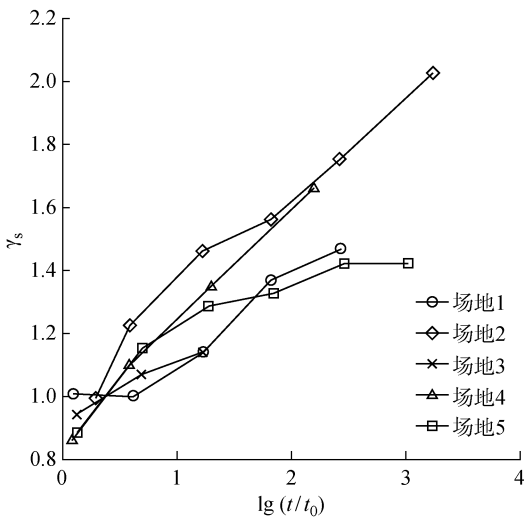


图 2 γ_s 与 $\lg(t/t_0)$ 关系
Fig. 2 Correlation of γ_s versus $\lg(t/t_0)$

$$\gamma_s = 0.17\lg\left(\frac{t}{t_0}\right) + 1$$

(10)

2.3 桩侧阻力时效系数的计算

值得注意的是, γ_s 表示的是桩侧阻力相对于超孔隙水压力开始呈线性消散时刻的承载力的增长. 这一时刻桩的极限承载力往往还达不到现行规范计算得到的单桩极限承载力. 为确定 γ , 应确定单桩极限承载力的参考时间. 文献[18]中规定, 根据土体类别的差异, 沉桩之后, 桩承载力监测前应有休止时间, 如表 1 所示.

表 1 桩基承载力监测休止时间

Tab. 1 Rest time of pile bearing capacity test monitoring	
土 的 类 别	休 止 时 间 / d
砂 土	7
粉 土	10
非 饱 和 黏 性 土	15
饱 和 黏 性 土	25

以休止时间作为规范计算的极限承载力的参考时间, 以该时刻的桩侧阻力作为参考承载力. 因此, 结合式(9), γ 可表示为

$$\gamma = \frac{\gamma_s}{\gamma_s|_{t=t_1}} = \frac{B\lg(t/t_0) + 1}{B\lg(t_1/t_0) + 1}$$

(11)

式中: t_1 为旧桩所在场地的桩基承载力检测休止时间, 按表 1 取值.

根据本文采用试验数据, 当 B 值取 0.17 时, 对于沉桩时间达数年以上的静压桩, 计算得到的 γ 偏于安全, 可用于评估长期受荷的静压桩的承载能力, 并用于相关桩基工程初步设计. γ 值与场地土条件有关, 对于具体的工程场地, 其更为合理的取值需要

根据场地土相关参数进行计算确定.

3 时效系数 γ 参数取值方法

式(11)中 B 值是决定 γ 大小的关键参数, 该值与土体性质紧密相关. 对于多层土地, 可确定各土层的 B 值, 再根据土层厚度进行加权平均即可得到整个场地的平均 B 值.

本文采用佛罗里达大学和路易斯安那州交通研究中心分别进行的现场载荷试验所得到的数据^[17,19-21], 对不同工程场地的 67 层黏土层的 B 值与土层各项参数之间的关系进行了统计分析, 结果表明: B 值随土体不排水抗剪强度 S_u 的增大而减小, 随土体塑性指数 I_p 的增大而增大.

3.1 不排水抗剪强度 S_u 的影响

Li 等^[15]认为采用土体的原位不排水抗剪强度可以直接计算旧桩的极限承载力, 因此首先考虑不排水抗剪强度 S_u 与 B 值的关系. 各试验场地土层不排水抗剪强度 S_u 从 5~156 kPa 不等, 图 3 为试验场地不同土层的测试数据换算得到的参数 B 与 S_u 的关系. 从图中可以看出, B 值与 S_u 为负相关关系, 即在 S_u 较小的软黏土当中, 参数 B 较大, 桩基承载力随时间对数的增长率较大; 在 S_u 较大的硬黏土当中, 参数 B 较小, 桩基承载力随时间的增长率较小.

直接对 B - S_u 关系进行线性拟合, R^2 为 0.594, 表明 B 与 S_u 的线性相关度较差. 对 B - S_u 关系采用指数函数进行非线性拟合, 如图 3 所示, R^2 为 0.754, 拟合优度较高, 且高于采用对数函数拟合 ($R^2=0.68$) 以及采用幂函数拟合 ($R^2=0.66$) 的结果, 因此本文认为可采用以下指数函数形式计算 B

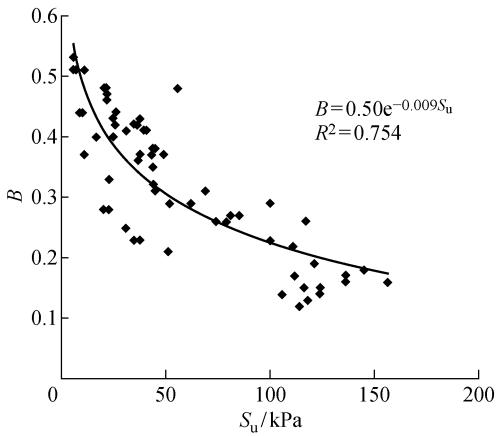


图 3 B 值与不排水抗剪强度 S_u 的拟合关系
Fig. 3 Correlation of B versus undrained shear strength S_u

值:

$$B=0.5\mathrm{e}^{-0.009S_{\mathrm{u}}}$$

(12)

3.2 塑性指数 I_{P} 的影响

土体塑性指数 I_{P} 是描述场地土性质的重要参数. Ksaibati 等^[7]认为土体塑性可以反映土体的时效强化, Haque 等^[22]认为可采用塑性指数对桩侧摩阻力的时效增长预测. 因此, 本文亦对土体塑性指数 I_{P} 与 B 的关系进行了统计分析. 试验场地各土层的塑性指数 I_{P} 从 5% 至 81% 不等. 图 4 为不同土层 B 值与 I_{P} 之间的关系, 从中可以看出, B 与 I_{P} 为正相关关系.

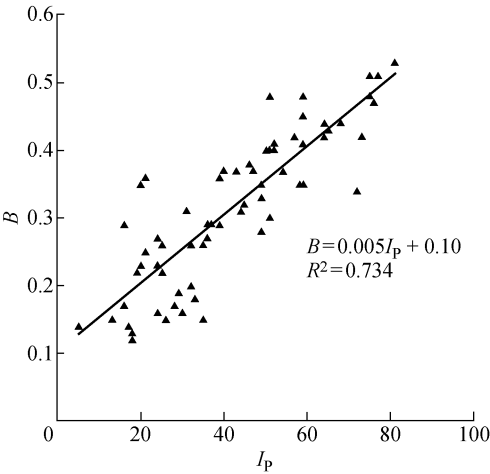


图 4 B 值与塑性指数 I_{P} 的拟合关系

对 B 与 I_{P} 进行线性拟合, R^2 为 0.734, 线性相关度较好. 因此, 本文认为亦可采用 I_{P} 作为计算 B 值的土性参数, 建议采用下式计算 B 值:

$$B=0.005I_{\mathrm{P}}+0.1$$

(13)

采用上述计算方法, 可以针对具体的工程场地按式(12)或(13)计算其土层的 B 值, 进而根据式(11)计算得到场地的 γ , 计算结果具有较好的可信度. 如场地资料允许, 可分别采用两种参数计算 B 值, 取其 γ 较小值用于场地土桩基承载力评价.

4 工程验证与分析

4.1 现场试验概况

试验场地位于上海浦东新区周浦镇周东路西侧, 地貌类型属滨海平原, 地貌形态单一, 土层平均厚度 H 、土体容重 γ 、孔隙比 e 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 及压缩模量 E_{s} 等物理力学性质资料见表 2.

对场地原有的 3 根桩龄 30 a 的旧桩以及打入 28 d 的 3 根新桩进行单桩竖向静载荷试验. 加载方式为慢速维持荷载. 旧桩桩径 400 mm, 桩长 30 m,

表 2 试验场地土层物理力学性质

Tab. 2 Physic-mechanical properties of soil strata at the test site

土层名称	H/m	$\gamma/(\mathrm{kN}\cdot\mathrm{m}^{-3})$	e	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$E_{\mathrm{s}}/\mathrm{MPa}$
杂填土	1.53	—	—	—	—	—
浜土	1.60	—	—	—	—	—
粉质黏土	1.75	18.9	1.052	25	31.7	5.46
淤泥质粉黏土	1.71	17.6	1.187	16	27.5	3.67
砂质粉土	2.38	18.7	1.003	2	32.5	10.94
淤泥质黏土	9.39	16.6	1.485	14	24.8	2.17
黏土	10.03	17.4	1.219	16	28.4	3.14
粉质黏土	8.93	17.8	1.065	16	31.9	4.07
砂质粉土	10.04	18.5	0.988	4	31.8	9.12
粉质黏土夹砂	10.97	17.5	0.980	17	31.7	4.10

每级加载量为 180 kN. 新桩桩径 300 mm, 桩长 29 m, 每级加载量为 105 kN.

4.2 试验结果对比分析

根据式(12), 对该场地桩长范围内的土层进行计算, 得到 $B=0.22$, 再结合式(11)和(8)计算得到该试验旧桩、新桩的极限承载力预测曲线. 试验测得 3 根旧桩和 3 根新桩的极限承载力 Q 后, 将该实测值与根据本文方法计算得到的旧桩、新桩极限承载力预测曲线对比, 如图 5 所示.

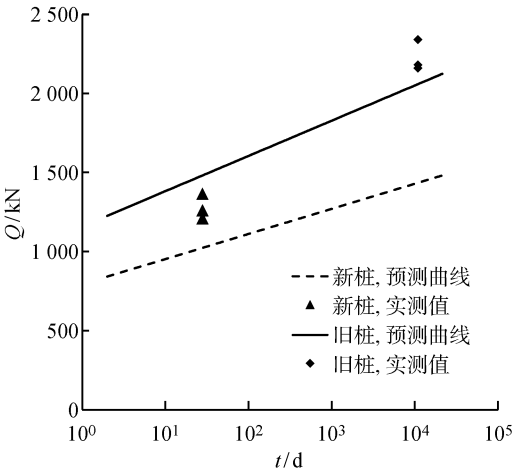


图 5 新、旧桩极限承载力预测曲线和实测值
Fig. 5 Prediction curves and measured values of ultimate bearing capacity of new and old piles

从图 5 可以看出, 对于桩龄长达 30 a 的 3 根旧桩, 试验得到的极限承载力实测值分别为 2 340 kN、2 160 kN、2 160 kN, 平均值为 2 220 kN. 按照本文方法计算得到的极限承载力预测值为 2 063 kN,

与旧桩试验承载力平均值接近,表明本文方法能够较为合理地预测长期受荷旧桩的极限承载力。

对于沉桩时间为28 d的3根新桩,试验得到的极限承载力实测值分别为1 260 kN、1 365 kN、1 210 kN,平均值为1 278 kN。按照本文方法计算得到的极限承载力预测值为1 023 kN,二者有一些差异,说明采用本文方法预测桩的短期承载力方面还存在一定误差。但该误差值在20%以内,且预测值偏小即偏于安全,因此本文计算方法亦可用于对沉桩一段时间之后的新桩极限承载力变化进行预估评价。

5 结论

本文通过总结修正已有桩基础时效承载力经验公式,结合静压桩承载力的时效性研究的理论成果,分析处理已有相关载荷试验结果,得到了以下主要结论:

(1) 在现行《建筑桩基技术规范》中单桩极限承载力计算方法的基础上提出了桩侧阻力时效系数 γ 的概念,进而提出了考虑桩基承载力时效性的静压桩极限承载力计算方法,并给出桩侧阻力时效系数 γ 的计算公式。

(2) γ 的计算公式中,参数 B 与土体性质相关。试验结果统计表明, B 值随土体不排水抗剪强度 S_u 的增大而减小,随土体塑性指数 I_p 的增大而增大。在以黏土为主的场地中,提出了根据土性参数计算 B 值的公式。

(3) 通过与工程现场试验结果的对比,本文提出的考虑桩基承载力时间效应的旧桩极限承载力计算方法能够较为合理地预测旧桩的极限承载力,该值可用于评估长期受荷的静压桩承载力随时间的增加量,对解决旧桩再利用工程中承载力计算问题具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 李镜培,张凌翔,李林,等.天然饱和黏土中新、旧桩荷载-沉降关系研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(9):1906-1913.
LI Jingpei, ZHANG Lingxiang, LI Lin, *et al.* Analysis of load-settlement relationship of new and old piles in natural saturated clays[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(9): 1906-1913.
- [2] NG K W, SRITHARAN S. A procedure for incorporating setup into load and resistance factor design of driven piles[J]. *Acta Geotechnica*, 2016, 11(2): 347-358.
- [3] KRISTINOF R, THORN M. Setup of driven pile capacity with time in soft marine sediments[J]. *Australian Geomechanics Journal*, 2017, 52(3): 1-9.
- [4] DOHERTY P, GAVIN K. Pile aging in cohesive soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(9): 1620-1624.
- [5] CHEN Q M, HAQUE M N, ABU-FARSAKH M Y, *et al.* Field investigation of pile setup in mixed soil[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2014, 37(2): 268-281.
- [6] HAQUE M N, ABU-FARSAKH M Y, ZHANG Z J. Evaluation of pile capacity from CPT and pile setup phenomenon[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 14(2): 196-205.
- [7] KSAIBATI R, NG K. Medium-scale experimental study of pile setup[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2017, 40(2): 269-283.
- [8] GAVIN K, JARDINE R, KARLSRUD K, *et al.* The effects of pile ageing on the shaft capacity of off-shore piles in sand[C]//*Proceedings of Int. Symp. on Frontiers in Offshore Geotechnics III (ISFOG)*. CRC Press/Balkema: Boca Raton, 2015: 129-151.
- [9] WANG J X, VERMA N, STEWARD E J. Estimating pile set-up using 24-h restrrike resistance and computed static capacity for PPC piles driven in soft louisiana coastal deposits[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2016, 34(1): 267-283.
- [10] HAQUE M N, CHEN Q, ABU-FARSAKH M, *et al.* Effects of pile size on set-up behavior of cohesive soils[C]//*Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability*. ASCE, 2014: 1743-1749.
- [11] 李林,李镜培,孙德安,等.考虑时效性的静压桩荷载-沉降关系预测方法[J].岩土工程学报,2017,39(12):2327-2334.
LI Lin, LI Jingpei, SUN De'an, *et al.* Prediction method for time-dependent load-settlement relationship of a jacked pile[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(12): 2327-2334.
- [12] SKOV R, DENVER H. Time-dependence of bearing capacity of piles[C]//*Proceedings of Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*. Ottawa. IOS Press: Amsterdam, 1988: 25-27.
- [13] PEI J, WANG Y. Practical experiences on pile dynamic measurement in Shanghai[C]//*Proceedings of International Conference on Deep Foundations*. CRC Press/Balkema: Boca Raton, 1986: 36-41.

[14] BOGARD J D, MATLOCK H. Application of model pile tests to axial pile design[C]// **Offshore Technology Conference**. ASCE, 1990: 13-20.

[15] LI L, LI J P, SUN D A, *et al.* Analysis of time-dependent bearing capacity of a driven pile in clayey soils by total stress method[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2017, 17(7): 04016156.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基技术规范:JGJ 94-2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94-2008 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.

[17] BULLOCK P J. Pile friction freeze: A field and laboratory study[D]. Gainesville, Florida: University of Florida, 1999.

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑桩基检测技术规范:JGJ 106-2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for testing of building foundation piles: JGJ 106-2014 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press,

2014.

[19] ABU-FARSAKH M Y, HAQUE M N, TSAI C. A full-scale field study for performance evaluation of axially loaded large-diameter cylinder piles with pipe piles and PSC piles[J]. **Acta Geotechnica**, 2017, 12(4): 753-772.

[20] ABU-FARSAKH M Y, ROSTI F, SOURI A. Evaluating pile installation and subsequent thixotropic and consolidation effects on setup by numerical simulation for full-scale pile load tests[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 52(11): 1734-1746.

[21] ABU-FARSAKH M Y, HAQUE M N, CHEN Q. Field instrumentation and testing to study set-up phenomenon of piles driven into Louisiana clayey soils [R]. Louisiana Transportation Research Center, 2016.

[22] HAQUE M N, ABU-FARSAKH M Y, TSAI C, *et al.* Load-testing program to evaluate pile-setup behavior for individual soil layers and correlation of setup with soil properties[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2017, 143(4): 04016109.

(本文编辑:陈晓燕)