

软土地区预制桩单桩最终极限承载力估算方法*

赵建平, 周峰, 宰金珉, 梅国雄

(南京工业大学 土木工程学院, 南京 210009)

摘要:软土地区预制桩施工具有较强的挤土效应,通常表现为桩周一定范围内土体受到侧向挤压,土体孔隙比降低,抗剪强度增加。目前估算预制桩单桩极限承载力通常选用沉桩前土体参数,这和桩体最终受力状态相比有一定的差异,计算结果通常偏于保守。应用圆柱形小孔扩张理论分析了沉桩的挤土机理,并根据土体抗剪强度与土体密度的唯一性关系,建立了沉桩休止期后桩周土体抗剪强度增量的理论计算公式。应用该公式可估算出预制桩单桩最终极限承载力。经与工程实测结果相比,两者比较接近,说明这种计算方法有一定的工程应用价值。

关键词:预制桩;最终极限承载力;抗剪强度;小孔理论;时间效应

中图分类号:TU473.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2005)06-0044-05

An Approach for Estimating the Final Ultimate - bearing Capacity of Driven Pile In Soft Clay

ZHAO Jian - ping, ZHOU Feng, ZAI Jin - min, MEI Guo - xiong

(Civil Engineering Institute, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, P. R. China)

Abstract: The prefabricated pile, driven in soft clay, can squeeze the soil laterally in a certain scope around the pile, and the void ratio is reduced significantly; consequently, the shear bearing capacity is raised. But the soil parameter, which is used to estimate the capacity of pile, is reduced according to the soil state before the pile was driven. Then, a certain difference appears when the pile is working. The calculation result usually is partial to conservative. This paper analyzes the squeezing mechanism of the pile using the theory of cylindrical cavities expansion. And a formula, which is used to estimate the increment of shear bearing capacity of soil around the pile when excess pore water pressure from pile driving distributes completely, is presented based on the unique relation between the shear bearing capacity and the density of the soil. This formula can be used to estimate the final ultimate - bearing capacity of the pile. The calculated results by the proposed formula are in good agreement with those of the site measurement.

Keywords: prefabricated pile; final ultimate - bearing capacity; shear bearing capacity; the theory of cylindrical cavities expansion; timing effect.

大量工程实例表明^[1,2]:在软土地区使用预制桩,由于沉桩时的挤土效应,桩周一定范围内土体受到侧向挤压,土体孔隙比降低,抗剪强度增加。预制桩极限承载力会随着时间的推移而逐渐增加,并最终趋于一稳定值(最终极限承载力)。目前国内外已有很多专家对此进行了大量的研究,取得了一些成果,但这些研究主要集中在作用机理方面,定量分析尚少见。另外目前常用的确定桩基极限承载力的方法如经验参数法和静载荷试验法,由于未能考虑沉桩前后土体性状的变化和对试桩时间的要求,对预制桩并不适用,其结果通常偏于保守。因此提出一种估算软土地区预制桩最终极限承载力的方法就显得

* 收稿日期:2005-05-22

基金项目:江苏省“六大人才高峰”项目(51213028);霍英东青年教师基金(91076);江苏省青年科技创新人才基金(BK2003418)
作者简介:赵建平(1971-),男,江苏靖江人,讲师,硕士,主要从事桩土共同作用理论和实践研究。

尤为重要。在详细分析预制桩沉桩机理的基础上,对解决上述问题进行了有益的尝试。

1 沉桩机理

预制桩沉桩时,桩端入土使地基原状土的初始应力状态受到破坏,桩端下土体开始压缩变形。随着桩的继续沉入,贯入阻力持续增大,当桩端处土体所受应力超过其抗压强度时,土体发生急剧变形破坏,随即向桩外侧挤出,并向上隆起。当桩沉入到一定深度,桩端处的上拱力小于上覆土层的压力时,土体则主要向桩周水平方向挤出,并使贴近桩周土体结构完全破坏。根据小孔扩张理论可以将上述过程下的桩周土体分成四个范围,分别是: I 隆起区、II 塑性区、III 部分扰动区(弹性区)和IV非扰动区,具体见图1。

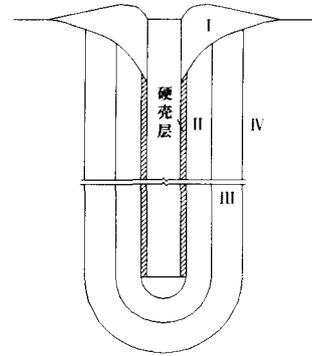


图1 桩周土体扰动情况分区图

由于挤压应力沿桩径方向衰减,故在桩土界面处挤压应力最大,产生的超静孔隙水压力也最大。因此在桩不断贯入的过程中粘聚力最小的桩土界面上将形成一“水膜”,该水膜不仅起到降低沉桩贯入阻力的作用(若打桩中途停歇,水膜消散,便会使沉桩阻力大大增加),而且在桩表面形成排水通道使重塑区土体快速固结,并随静置和固结时间延长,逐步形成一紧贴于桩表面的硬壳。该硬壳的厚度为3~20 mm,随土性、桩表面粗糙程度而变化。由于该硬壳的剪切强度大于其外围土的强度,因此当桩受竖向荷载发生竖向位移时,其剪切面将发生于硬壳层与塑性区土体的交界面,亦即桩侧摩阻力的大小将取决于硬壳层与塑性区界面处土体的抗剪强度。

2 桩周土体密度估算

Carter^[3](1986)在小孔扩张理论的基础上,推得了土体在莫尔-库仑屈服条件下桩周塑性区内土体任一点的位移表达式:

$$u(r) = \varepsilon_{\theta} \left[A \left(\frac{R}{r} \right)^{1+\alpha} + B \left(\frac{R}{r} \right)^{1-\beta} + D \right] r \quad (1)$$

式中: R 为塑性区半径, r 为桩周某点到桩轴线水平距离。其余各符号均为土体参数(内聚力 c ,摩擦角 φ ,弹性模量 E ,泊桑比 μ 和剪胀角 ψ)的函数,具体意义参见文献^[4]。

文献^[4]还利用式(1)的计算结果与实测值进行了比较,结果非常接近,平均误差只有3.56%。但是由于式(1)形式复杂,使用参数较多(5个),实际操作起来会有较大的难度。注意到如果取上述参数为常量,式(1)实际上可以近似简化成如下形式:

$$u(r) = \frac{m}{r^2} + n \quad (2)$$

式中 m 、 n 的大小与土体参数有关。图2是取 $c = 34 \text{ kPa}$, $\varphi = 5^\circ$, $\psi = 1^\circ$, $\mu = 0.48$, $E = 10 \text{ MPa}$, $r_0 = 0.5 \text{ m}$ 的情况下式(1)和式(2)的计算结果比较。

从图可以看出,靠近桩周范围式(2)与式(1)结果很接近。考虑到桩周土体在受到侧向挤密作用后的密度又和其侧向位移呈一致对应关系,因此假定沉桩后桩周土体密度和水平距离呈与式(2)相似的幂函数形式,亦即可假定如下公式成立:

$$\rho(r) = \frac{a}{r^2} + b \quad (3)$$

式中: $\rho(r)$ 为桩轴线 r 处的土体密度; r 为桩轴线到桩周土体某点的水平距离; a 、 b 为待定系数。

根据小孔扩张理论,桩周土体的挤密半径和扩张半径、土体不排水抗剪强度等因素有关,通常情况下其值约为6倍桩径左

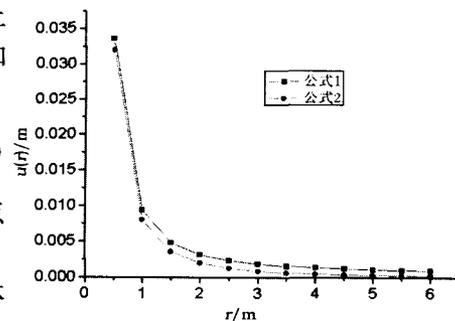


图2 桩周土体水平方向位移分布图

右。另外考虑到沉桩前后桩周压密半径范围内土体总重量没有发生改变。据此有以下二式成立:

$$\begin{cases} \pi(6r_0)^2 L \rho_0 = 2\pi L \int_0^{6r_0} r \rho(r) dr & (4) \\ \frac{a}{(6r_0)^2} + b = \rho_0 & (5) \end{cases}$$

式中: r_0 为预制桩半径; L 为预制桩桩长; ρ_0 为土体天然密度。

联立式(4)、式(5)求得 a 、 b 并代入式(3)即得估算桩周土体内某点密度的公式:

$$\rho(r) = \frac{0.38\rho_0 r_0^2}{r^2} + 0.99\rho_0 \quad (6)$$

上式是假定在桩长范围内桩侧土体全部沿径向挤密的情况下得出,实际上在桩顶一定范围内桩侧土体主要表现为向上隆起,因此实际应用时上式还应乘以修正系数 α , $\alpha = 1 - l/L$, L 为桩侧土体隆起区深度。

3 土体密度 - 有效应力 - 抗剪强度的唯一性关系

影响土的抗剪强度的因素有很多,特别是对于粘性土更是复杂,其中最主要的因素是土的组成、土的密度、土的结构以及所受的应力状态。文献[5]经过大量研究指出:同一种土,其密度、有效应力和抗剪强度具有唯一性关系,亦即密度愈高,土体抗剪强度愈大;有效应力愈高,抗剪强度也愈大。为了证明这一点,文献[5]进行了如下试验:第一个试验让饱和试体在围压 σ_3 作用下固结,孔隙比为 e_0 , 然后进行排水剪切,加偏差应力 $\Delta\sigma_1$ 直至试件破坏。测得破坏时的孔隙比为 e_f 。其应力路径是与 p' 轴成 45° 的斜线,交破坏主应力线于 A 点,如图3中①所示。

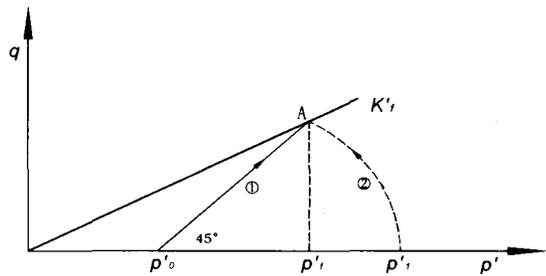


图3 $q_f - p'_f - e_f$ 唯一性试验验证(陈仲颐等,1994)

第二个试验用初始状态完全相同的另一个试件,选择某一适当的围压 σ_3 固结,使固结后的密度与第一个试件破坏时的密度 e_f 相同,然后进行不排水剪切,直至试件破坏。饱和试件在不排水剪切中密度不变,但孔隙水压力 u 不断发展。测出孔隙水压力,绘制剪切过程的有效应力路径,直至试件破坏,如图中②所示。

试验结果表明,应力路径与破坏主应力线 k'_f 的交点正好是第一个试验的破坏点 A 。因为主应力线上任一点代表一个破坏时的应力圆,而每一个应力圆则代表一种固定的 $q_f - p'_f - e_f$ 关系。因此上述试验也就证明了土体密度 - 有效应力 - 抗剪强度的唯一性关系是成立的。

4 预制桩最终极限承载力的估算公式

4.1 公式推导

《建筑桩基技术规范》(JGJ94-94)建议的几种计算单桩极限承载力的方法,可以归纳为如下公式:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} \quad (7)$$

式中: Q_{sk} 、 Q_{pk} 分别是单桩侧壁摩阻力和端阻力极限值。实际上如上文所述,预制桩沉桩前后,桩侧土体性质已发生显著改变,因此规范建议的方法明显偏于保守。

考虑到预制桩沉桩效应主要表现为对桩周土体的挤密,即土体孔隙比降低、密度提高。又对于同一种土其抗剪强度与其密度唯一对应,而单桩侧壁摩阻力极限值又取决于土体抗剪强度。因此如能分别知道土体初始状态和沉桩后土体中超孔隙水压力完全消散的最终状态的土体密度,就可以在规范建议的经验系数法基础上粗略估算出预制桩单桩最终极限承载力。

鉴于此,作者根据前文的论述提出如下修正公式来估算单桩最终极限承载力:

$$Q_{uk} = \alpha\beta \cdot Q_{sk} + Q_{pk} \quad (8)$$

式中: $\alpha = 1 - \frac{1}{L}$; $\beta = \frac{0.38r_0}{r_0 + a} + 0.99$; a 为桩壁硬壳层的厚度, 根据土性的不同而改变, 一般 $3 \text{ mm} < a < 20 \text{ mm}$; 其余符号同上。

4.2 关于公式的几点说明

1) 预制桩沉桩过程除对桩侧土体有挤密作用外, 对桩端土体亦有同样的挤密效果, 桩端阻力和侧壁摩阻力一样亦会有提高。提高值的大小和桩基类型(比如是摩擦桩还是端承摩擦桩)、桩端持力层土体特性等有关。限于篇幅, 没有考虑桩端土体的挤密作用, 因此计算值会小于实际值, 但这样做明显偏于安全。

2) 当假定地基土为饱和软土时, 沉桩过程会使土体引起明显的隆起现象, 隆起深度大概在 10 倍桩径左右, 在该深度范围内土体一般不会表现为侧向挤密或者挤密作用不明显。通过系数来对此进行修正, 但要注意的是: 实际上即使在软土地区, 地基土表层也不是绝对饱和, 甚至可能还是较稀疏的人工填土, 此时沉桩过程可能不出现隆起现象, 甚至桩周土体还会在拖带作用下下沉。因此实际应用本文公式时, 可根据具体情况相应改变修正系数的大小甚至不进行修正。

3) 实际上公式计算结果是指桩周超孔隙水压力完全消散时的单桩极限承载力。从建筑物的使用寿命上看, 此值亦非完全意义上的最终值。实际上随着时间的逐渐推移, 桩周土体除了完成在径向上的固结外, 还会因为自身的重力作用逐渐在垂直方向逐渐固结沉降(如很多建造年代较长的建筑, 就常常出现承台底板与地基土脱空的现象)。因此完全意义上的单桩极限承载力最终值还会比本文计算值有较大部分的提高。但是出现这部分提高值需要的时间实在太长(往往需要几年甚至几十年的时间), 已经远远超出了房屋的建造周期。

4) 静压桩施工时, 终压力通常被认为是沉桩控制的重要指标之一。但是根据经验静压桩的终压力通常小于其极限承载力, 这是由于在沉桩时桩周土体受到强烈挤压作用, 土体结构已完全破坏, 此时的桩侧土体只具有残余抗剪强度。在正常情况下可以通过图 4 来表示这几个指标值的关系。

4.3 公式的适用范围

可以看出, 估算公式可用于软粘土地区(如上海、南京等地)预制桩最终极限承载力的估算, 不宜用于在桩长范围内有较厚中密以上砂层的地质条件。如确需使用, 需通过系数 α 中的 l 值作较大幅度的修正。另外, 公式如应用于混凝土预制方桩, 具体估算时可先通过表面积相等的原则将其等效为圆柱; 如应用于预应力管桩, 由于其挤土效应较弱, 亦应通过 l 进行相应修正, 一般可取 $l = 0.2 \sim 0.3 L$ 。

5 算例分析

试验场地为典型的上海地区饱和淤泥质软土地层分布区, 地层分布较为齐全。桩基持力层为第⑥层暗绿色粉质粘土, 桩身穿越的地层除第③-2层为砂质粉土外, 其余均为粘性土或淤泥质粘性土。这些土层的共同特点是含水量高、强度低。场地工程地质概况见表 1^[6]。

原设计采用预制桩, 具体参数为: 截面尺寸 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$; 桩长 25.6 m ; 桩身混凝土强度为 C30; 桩端持力层为第⑥层。本文作者利用表 1 的参数, 用规范^[7]建议的经验法重新对桩基的极限承载力进行了计算, 其值为 915 kN 。

根据文献^[6], 该工程共进行了 12 组静载荷试验, 其中 3 组值近似达到设计要求, 剩余 9 组试验的结果和本文的计算结果的比较如表 2 所示。

从表 2 可以看出: 复压休止期大约为 2-3 个月, 试验结果中有 67% 小于并接近按本文方法计算的最终极限承载力(差异为 12%), 这是合理的。考虑到本文的方法在部分地方做了保守计算, 实际上的最终极限承载力还应该比计算值更大一些。这也从另一个方面说明了试验中预制桩承载力的稳定期远远不止 2-3 个月, 应该更长一些; 其承载力还会随着时间逐渐增长(至少还应该 12% 的增长空间),

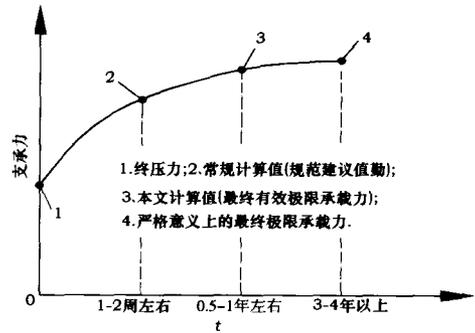


图4 预制桩承载力指标的对比

不过增长速率可能会有所降低。

表1 场地工程地质概况

层序	土层名称	层底标高/m	土层的力学性质			
			C/kPa	$\varphi/^\circ$	$\alpha_{0.1-0.2}/\text{MPa}^{-1}$	$E_{0.1-0.2}/\text{MPa}$
②	粉质粘土	0.76 ~ -1.88	14	14.0	0.48	4.34
③-1	淤泥质粉质粘土	-1.58 ~ -0.14	7	10.1	0.95	2.23
③-2	砂质粉土	-3.17 ~ -1.71	4	21.9	0.23	8.86
③-3	淤泥质粉质粘土	-4.63 ~ -3.97	7	8.6	1.37	1.62
④-1	淤泥质粘土	-14.49 ~ -13.61	9	8.1	1.25	1.88
④-2	粘土	-17.03 ~ -16.11	12	9.8	0.70	3.13
⑤1-1	粉质粘土	-18.83 ~ -17.35	12	13.1	0.42	4.53
⑤1-2	粉质粘土	-20.95 ~ -19.72	11	14.1	0.40	4.79
⑥	暗绿色粉质粘土	-25.67 ~ -24.01	29	15.3	0.21	8.15
⑦-1	砂质粉土	-35.59 ~ -34.08	4	23.9	0.22	8.82

表2 试验计算结果对比

试桩编号	初压休止期/d	初压极限值/kN	复压休止期/d	复压极限值/kN	本文计算值/kN	差异率/%
1#	14	784	36	1 120	1 250	12
2#	15	672	68	784	1 250	-
3#	15	784	65	784	1 250	-
4#	21	896	70	1 120	1 250	12
5#	14	672	30	1 008	1 250	24%
6#	18	896	32	1 120	1 250	12%
7#	17	672	28	1 120	1 250	12%
9#	15	784	65	1 120	1 250	12%
12#	15	784	34	1 120	1 250	12%

对于其中2#、3#桩出现的异常情况,文献[6]是这样解释的:这两组桩初复压间隔时间较短,且其附近(3-5 d)进行了工程桩的施工,影响了试验桩周围土体的再固结与抗剪强度的再恢复。

6 结语

预制桩最终极限承载力的研究具有巨大的应用价值,它可以充分发挥桩基潜力,使桩基设计更科学、合理,减少工程投资。但是影响预制桩最终极限承载力的发挥有很多因素,要对其精确估算非常困难,目前还做不到。考虑到预制桩施工时的挤土效应,会使桩周土体挤密,抗剪强度提高。本文从土体密度-有效应力-抗剪强度唯一性关系出发,考虑沉桩后超孔隙水压力完全消散的最终状态,初步对预制桩最终极限承载力的大小进行了定量分析,并提出了相应的估算公式,经验算有一定的工程实用价值。另外应该意识到的是本文的工作仅仅是初步的尝试,还远远不够,有许多其它影响因素没有考虑进来,因此希望本文能起到一个抛砖引玉的作用。

参考文献:

- [1] 张继红,顾国荣. 上海地区预制桩承载力时间效应的统计分析与研究[J]. 土木工程学报,2002,35(4):98-102.
- [2] 李雄,刘金砺. 饱和软土中预制桩承载力时效性的研究[J]. 岩土工程学报,1992,14(4):9-16.
- [3] Carter. J. P., Booker. J. R., Yenny. S. K. Cavity Expansion in Cohesive Frictional Soils[J]. Geotechnique,1986,36(3):349-348.
- [4] 李月健,陈云敏. 土体内空穴球形扩张问题的一般解及应用[J]. 土木工程学报,2002,35(1):93-98.
- [5] 陈仲颐,周景星. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2000,181-182.
- [6] 叶为民,黄雨. 饱和软土中打入式预制桩单桩承载力的时效性[J]. 岩土力学,2002,21(4):367-369.
- [7] JGJ94-94,建筑桩基技术规范[S].