

开口桩与闭口桩承载力时效的试验研究

马海龙

(浙江理工大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为研究软土中开口桩与闭口桩承载力差异及承载力随时间增长问题, 共完成了 36 组模型桩的原位静压沉桩试验, 开口桩与闭口桩各 18 组, 试验持续时间长达 72 d。在试验条件下, 发现闭口桩与开口桩的承载力最小时效系数分别为 2.4 和 3.6。桩直径越小, 承载力增加幅度越大, 承载力时效系数也越大。开口桩与闭口桩承载力随时间增加而增大, 沉桩后休止 72 d, 开口桩与闭口桩承载力达到稳定值, 此后承载力增加不再明显。开口桩初始极限承载力小于闭口桩初始极限承载力, 仅为闭口桩的 60%~70%, 沉桩后休止 72 d, 开口桩与闭口桩稳定时效承载力的大小几乎相同。开口桩的土塞长度随桩径的增大而增加, 其承载力时效系数约为闭口桩的 1.4~1.6 倍。

关键词: 土力学; 桩基础; 开口桩; 闭口桩; 桩承载力; 时效承载力; 原位试验

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 2 - 3349 - 05

FIELD TEST ON TIME EFFECT OF BEARING CAPACITY ON END-OPEN PILE AND END-CLOSED PILE

MA Hailong

(Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang Science and Technology University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: To research the differences of bearing capacity and the time-related setup of both end-open pile and end-closed pile in soft clay, field test of in-situ static pressures of 36 piles have been carried out within 72 days. Under such circumstances, the test results show that the minimum time effect coefficient of end-closed pile is 2.4 while end-open pile 3.6. Besides, the smaller the pile diameter is, the greater positive range and coefficient bearing capacity are. The bearing capacity increases with time, reaching steady value after 72 days' intermission but showing no distinctive raise later on. The original capacity of end-open pile is 60% - 70% of end-closed one but with the same bearing capacity after intermission of 72 days. The soil length of end-open pile increases with the increase of pile diameter with time effect coefficient 1.4 - 1.6 times against that of the end-closed pile.

Key words: soil mechanics; pile foundation; end-open pile; end-closed pile; pile bearing capacity; bearing capacity of time effect; in-situ experiment

1 引 言

钢管桩、预应力混凝土管桩在土木工程建设中应用十分广泛, 不仅用作高层建筑物的基础, 还应用于桥梁基础、港口码头建设^[1]以及多层建筑软弱

地基的加固中^[2]。这些桩多用于软土中, 为了减少沉桩对周围土的挤压效应, 在打入或压入过程中都有一个特点, 那就是桩尖是在开口状态下打入或压入的, 尤其是 PHC 管桩。相对于闭口桩(实心桩), 开口桩的承载力可能存在两方面差异: 一是沉桩结束后的初始承载力方面的差异; 二是休止一段时间

收稿日期: 2007 - 07 - 18; **修回日期:** 2007 - 10 - 17

作者简介: 马海龙(1964 -), 男, 博士, 1986 年毕业于南京建筑工程学院, 现任教授, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: ma-hailong@163.com

后的时效承载力方面的差异。

对闭口桩承载力时效的研究结果^[3~5]表明,考虑承载力时效后,承载力会有较大幅度提高。这一点也被 C. G. Ramesh^[6]所证实。

C. R. Ramesh^[6]从锥尖贯入处的超孔隙压力随时间消散现象发现,贯入后的数小时内超孔隙压力消散很快,此后消散速度减缓。因此有效应力在贯入后一定时间内增加很快,则桩的承载力增加就很快,说明了桩承载力的时效性。

胡琦等^[7]采用回归法预测了开口桩承载力时效问题,给出稳定承载力的时效系数可高达 3.5。

目前针对单一桩型时效承载力研究比较多^[8~10],基本上是结合具体工程项目,孤立研究某类实心桩(闭口桩)或开口桩(管桩)的时效情况。很少在同一工程项目中,同时看到对开口桩与闭口桩的时效承载力进行对比试验的研究。由于同一场地未能同时进行开口桩与闭口桩承载力时效研究对比,这些借助于不同工程进行的研究结论就没办法拿到一起对比、总结,不能准确解释在相同条件下开口桩与闭口桩承载力差异问题。

另外,规范^[11]认为,由于土塞效应,开口桩的承载力要小于闭口桩的承载力。

显然,如果不研究相同试验条件(相同地层、相同桩长及桩径)下,开口桩与闭口桩承载力的定量区别(包括初始承载力和时效承载力),土塞效应对开口桩承载力到底有何影响及影响大小将还是一个模糊问题。

为了获得相同试验条件下开口桩与闭口桩承载力的定量差异问题,在同一地层中共进行了 36 组原位压桩试验。对相同桩长、直径(壁厚亦相同)的开口桩与闭口桩进行了系统的承载力试验,包括开闭口桩初始极限承载力、时效极限承载力对比以及桩径对承载力时效和土塞长度影响等。

2 现场试验项目规划

在现场开展了如下工作:

(1) 相同条件(相同土层、相同桩径和桩长)下,开口桩与闭口桩初始极限承载力的差异分析。

(2) 为了获得压桩后静止时间对桩承载力的影响,选取压桩后分别静止 24, 48, 72 d 时进行压桩试验,比较相同条件下的桩承载力随时间变化,即

时效承载力问题。

(3) 开口桩与闭口桩静止相同时间后的时效承载力差异分析。

(4) 为了获得桩直径对桩承载力时效的影响,选用直径 $d = 60, 70, 80$ mm,壁厚 7.5 mm 的钢管,制作 3 种直径的钢管桩,桩长均为 3 m,研究桩直径对桩承载力时效的影响。

(5) 为了获得桩尖开口、桩尖闭口对桩承载力时效问题的影响,分别制作了相应直径的开口桩与闭口桩进行对比试验。

试验内容见表 1。

表 1 试验内容
Table 1 Test contents

静止时间/d	开口桩						闭口桩					
	第 1 组			第 2 组			第 1 组			第 2 组		
	$d = 60$ mm	$d = 70$ mm	$d = 80$ mm	$d = 60$ mm	$d = 70$ mm	$d = 80$ mm	$d = 60$ mm	$d = 70$ mm	$d = 80$ mm	$d = 60$ mm	$d = 70$ mm	$d = 80$ mm
0	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
24	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
48	√	√	√				√	√				
72				√	√	√				√	√	√

注:√代表试验项目。

地基土表层为约厚 0.8 m 的素填土,试验时已挖除,下面为厚约 6.0 m 的粉质黏土,软塑~可塑,3 m 长的钢管桩压入该层土内,其物理力学指标见表 2。

表 2 地层物理力学指标
Table 2 Physico-mechanical parameters of strata

地层名称	层厚/m	γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	e	w /%	c /kPa	ϕ /(°)	f_{ak} /kPa
素填土	0.8						
粉质黏土	6.0	18.3	0.882	38	25.0	5.5	90

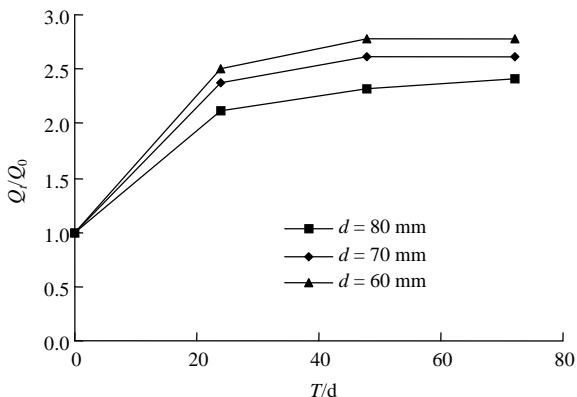
采用油泵驱动静压法沉桩。压到设计标高(入土 3 m)时,记录压桩力,此时为初始压桩力。再按照表 1 静止相应时间后压桩,记录起始压桩力,为对应不同静止时间的压桩力,称为时效压桩力。

根据 C. G. Ramesh^[6]的研究,采用施工压桩力作为单桩初始极限承载力来分析时效性问题是合理的。因此,本文提及的压桩力可视为相应试验时间的极限承载力。

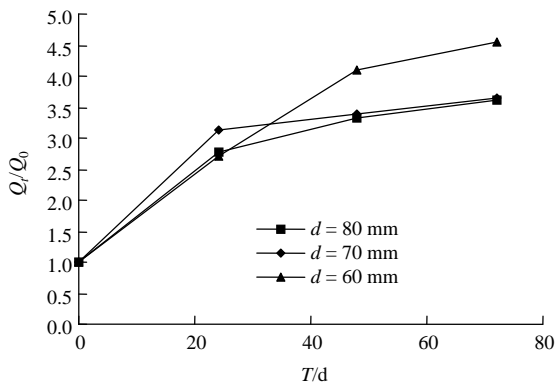
3 试验成果分析

3.1 承载力随时间增加而增长的关系

图 1 为承载力时效系数与时间的关系。横坐标代表桩入土后的静止时间，纵坐标代表某一静止时间时的极限承载力与初始极限承载力(静止时间为 0 d 时的承载力)之比 Q_t/Q_0 (即承载力时效系数)，3 条曲线分别代表 3 种桩径。



(a) 闭口桩



(b) 开口桩

图 1 承载力时效系数与时间的关系

Fig.1 Relationship between bearing capacity coefficient and time

图 1(a)给出了闭口桩和开口桩承载力时效系数与时间的关系。

对于图 1(a)的闭口桩，桩的承载力在 24 d 内增长最快，超过 24 d 后增长幅度不再明显。对直径 80 mm 的桩来说，24 d 时承载力的增长率为 2.1 倍，72 d 时承载力的增长率为 2.4 倍，从 24~72 d，承载力增长幅度仅为 14%。48 d 后的承载力增长很缓慢，72 d 后闭口桩的承载力增长趋于稳定。

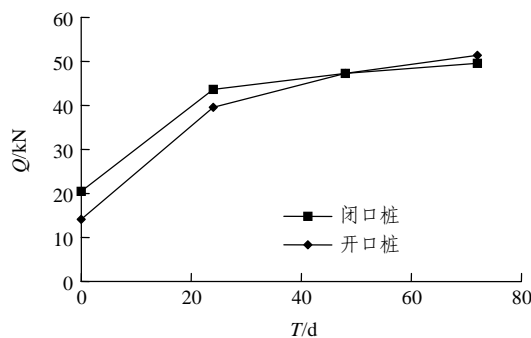
对于图 1(b)的开口桩，桩的承载力也是在 24 d

内增长最快。与闭口桩不同的是，超过 24 d 后，增长幅度仍然很大。对直径 80 mm 的桩来说，24 d 时的承载力增长率为 2.8 倍，72 d 时的承载力增长率为 3.6 倍，从 24~72 d，承载力增长幅度为 29%。从增长趋势看，72 d 后开口桩承载力还有所增加。

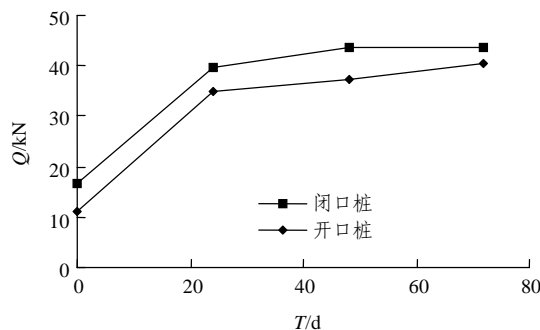
另外，桩的直径对承载力时效有显著影响。总体上说，桩的直径越小，承载力的时效性越显著。对于图 1(a)的闭口桩，72 d 时直径 60 mm 的时效系数为 2.8，直径 80 mm 的时效系数为 2.4。对于图 1(b)的开口桩，72 d 时直径 60 mm 的时效系数为 4.5，直径 80 mm 的时效系数为 3.2。

3.2 开口桩与闭口桩初始极限承载力和时效承载力

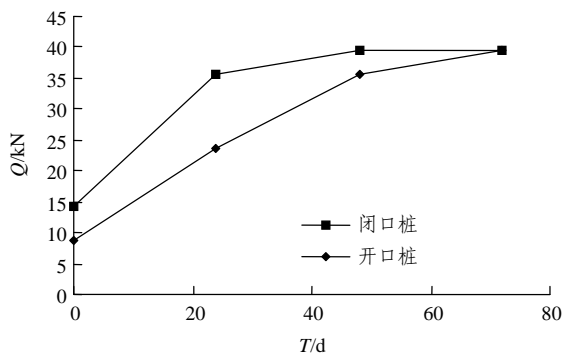
图 2 为桩的几何条件(桩直径和桩长)相同时，



(a) d = 80 mm



(b) d = 70 mm



(c) d = 60 mm

图 2 开口桩与闭口桩初始承载力和时效承载力对比

Fig.2 Contrast of end-open pile and end-closed pile between original and time effect capacity

开口桩与闭口桩初始极限承载力和时效极限承载力对比。

由图 2(a)可知, 开口桩与闭口桩的初始极限承载力分别为 14.2, 20.5 kN, 开口桩的承载力仅为闭口桩的 69%; 24 d 后开口桩的承载力已达闭口桩的 91%; 72 d 后开口桩的承载力已接近闭口桩的承载力。

由图 2(b)可知: 开口桩与闭口桩的初始极限承载力分别为 11.1, 16.6 kN, 开口桩的承载力约为闭口的 67%; 24 d 时开口桩的承载力已达闭口桩的 88%, 72 d 后开口桩的承载力也已接近闭口桩的承载力。

由图 2(c)可知: 开口桩与闭口桩的初始极限承载力分别为 8.7, 14.2 kN, 开口桩的承载力仅为闭口的 61%; 24 d 时开口桩的承载力也已达闭口桩的 90%, 72 d 后开口桩的承载力也同样已接近闭口桩的承载力。

3.3 开口桩与闭口桩承载力时效

图 3 为 3 种桩直径情况下, 开口桩与闭口桩承载力时效系数比较。

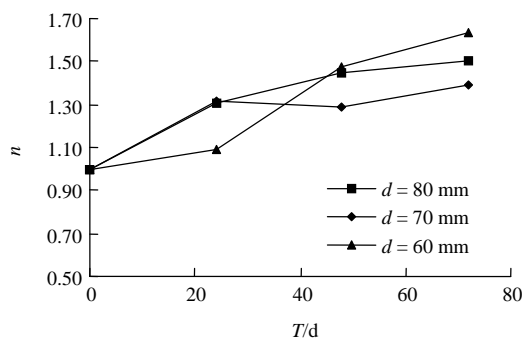


图 3 开口桩与闭口桩承载力时效系数比较

Fig.3 Time-effect coefficient contrast between end-open pile and end-closed pile

从图 3 可以看出, 随着时间增长, n 值均大于 1.0, 表明开口桩的承载力时效系数大于闭口桩的, 也就是说开口桩的承载力随时间增长的更快。72 d 后, 对直径 60 mm 的桩而言, 开口桩承载力增长率为闭口的 1.63 倍, 对直径 70 mm 的桩, 开口桩增长率为闭口桩的 1.39 倍, 对直径 80 mm 的桩, 开口桩增长率为闭口桩的 1.50 倍。表明开口桩的承载力时效现象比闭口桩的时效现象更为明显。

4 试验成果讨论

4.1 承载力随时间增长而增长的幅度问题

图 1 表明, 承载力随压桩后静止时间的增加而增长。对图 1(a)的闭口桩, 3 种桩直径中, 72 d 最小增长幅度为初始承载力的 2.4 倍, 即承载力最小时效系数为 2.4。对图 1(b)的开口桩, 其时效系数更大, 72 d 承载力最小时效系数达 3.6。闭口桩的实测最小时效系数为 2.4, 最大时效系数为 2.7。王伟等^[4]根据实测计算出在黏性土中预制混凝土桩(相当于闭口桩)的承载力时效系数可达 3.0 以上, 与本文的试验结果接近。考虑时效系数以后, 承载力增幅非常明显。

根据承载力时效系数随时间变化趋势可以看出, 时效系数在压桩静止的 24 d 内增加最快, 在压桩静止 72 d 后, 时效系数基本趋于稳定, 随时间增加而增长的幅度不再明显。

因此, 饱和软黏土中的开口桩, 应在静止 24 d 后进行桩的竖向抗压承载力试验。规范^[12]规定, 对于饱和软黏土中桩的静载荷试验, 沉桩后的静止时间不得少于 25 d, 这与本文的试验结果基本吻合。

4.2 开口桩与闭口桩初始极限承载力和时效承载力问题

由图 2 可知, 开口桩的初始极限承载力较低, 3 种桩径的试验结果很一致, 为闭口桩的 60%~70%。但静止 72 d 后, 开口桩的承载力却极为接近闭口桩的承载力, 即二者稳定时效承载力接近。

开口桩在压桩过程中, 桩尖处的土体进入开口桩内, 桩尖土剪切破坏, 导致桩尖土软化, 桩尖土承载力降低, 也直接影响桩尖以上土层的摩阻力, 致使开口桩的初始承载力降低, 仅为闭口桩的 60%~70%。

静止 72 d 后, 进入开口桩尖内的土体完成固结形成土塞, 土塞与桩的内壁结为整体, 72 d 后再次压桩时, 呈现闭口桩的承载特性, 此时开口桩的时效承载力接近闭口桩的时效承载力。

直径 60, 70, 80 mm 的桩的实测土塞长度分别为 150, 200 和 300 mm。可以看出, 直径越大, 土塞越长。土塞形成静止一段时间后, 土塞发生固结硬化, 封闭了开口桩底, 其作用相当于闭口桩情形。

李雄和刘金砺^[3]对比了原型桩(桩长 24.0 m, 截面尺寸 400 mm×400 mm)与钢管模型桩(桩长 4.5 m, 直径 100 mm)承载力时效问题, 发现尽管钢管模型桩尺寸较小, 但原型桩和钢管模型桩的时效承载力曲线线形非常接近, 增长幅度也相仿。

由于本文的模型桩尺寸还要小, 研究结果能否应用到原型桩上, 尚需进一步开展对比试验。

5 结 论

(1) 试验条件下, 72 d 时闭口桩的承载力最小时效系数为 2.4, 开口桩的承载力最小时效系数为 3.6。

(2) 试验条件下, 开口桩与闭口桩达到稳定时效承载力的时间为 72 d。

(3) 开口桩的初始极限承载力为闭口桩的 60%~70%, 72 d 稳定时效承载力二者几乎相同。

(4) 进入开口桩内的土塞长度与桩直径有关, 直径越大, 土塞越长。

(5) 开口桩承载力随时间增长幅度比闭口桩的快, 开口桩承载力时效系数为闭口桩的 1.4~1.6 倍。

参考文献(References):

- [1] 王永强, 刘军保, 孙 义. 天津港东突堤北侧集装箱码头 PHC 管桩打桩应力试验研究[J]. 中国港湾建设, 2004, 131(4): 42 - 44.(WANG Yongqiang, LIU Junbao, SUN Yi. Experiment and study of piling stress of PHC tubular piles for container terminal on North Side of East Pier in Tianjin Port[J]. China Harbor Engineering, 2004, 131(4): 42 - 44.(in Chinese))
- [2] 魏 林, 郑七振, 周 奎, 等. 静压敞口钢管桩在某仓库改建中的应用[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(6): 537 - 541.(WEI Lin, ZHENG Qizhen, ZHOU Kui, et al. Application of static pressured opening steel pipe pile in warehouse reconstruction[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2004, 26(6): 537 - 541.(in Chinese))
- [3] 李 雄, 刘金砺. 饱和软土中预制桩承载力时效研究[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(4): 9 - 16.(LI Xiong, LIU Jinli. Analysis of time-dependent bearing capacity of driven piles in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(4): 9 - 16.(in Chinese))
- [4] 王 伟, 卢延浩, 宰金珉. 预制桩承载力时效的人工神经网络预测[J]. 水运工程, 2004, 370(11): 9 - 12.(WANG Wei, LU Yanhao, ZAI Jinmin. Prediction of time-dependent bearing capacity of driven piles by using artificial neural networks[J]. Port and Waterway Engineering, 2004, 370(11): 9 - 12.(in Chinese))
- [5] 黄宏伟. 微型预制桩单桩承载力时效现场试验分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 666 - 669.(HUANG Hongwei. In-situ test analyses on time effect of bearing capacity of single precast concrete mini-pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 666 - 669.(in Chinese))
- [6] RAMESH C G. Discussion of “soil deformation and excess pore pressure field around an end-closed pile” by JUAN M P, CHRISTOPHER E H, JONATHAN D B[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(7): 669 - 671.
- [7] 胡 琦, 蒋 军, 严细水, 等. 回归法分析预应力管桩单桩极限承载力时效性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(4): 602 - 604.(HU Qi, JIANG Jun, YAN Xishui, et al. Regression analysis of the time effect of ultimate bearing capability of single reinforced pile[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(4): 602 - 604.(in Chinese))
- [8] 陈兰云, 陈云敏, 张卫民. 饱和软土中钻孔灌注桩竖向承载力时效分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 471 - 474.(CHEN Lanyun, CHEN Yunmin, ZHANG Weimin. Time-effect on vertical bearing capacity of single drilled grouting pile in saturated soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 471 - 474.(in Chinese))
- [9] 叶为民, 黄 雨, 唐益群, 等. 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, 2000, 21(4): 367 - 369.(YE Weimin, HUANG Yu, TANG Yiqun, et al. Time effect on bearing capacity of driven pile in saturated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 367 - 369.(in Chinese))
- [10] 张明义, 时 伟, 王崇革, 等. 静压桩极限承载力的时效性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 601 - 2 604.(ZHANG Mingyi, SHI Wei, WANG Chongge, et al. Time effect on the ultimate bearing capacity of static pressed pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 601 - 2 604.(in Chinese))
- [11] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 94 - 94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ 94 - 94 Technical code for pile foundation of building[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995.(in Chinese))
- [12] 中华人民共和国国家标准编写组. GB 50007 - 2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50007 - 2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))