

# 基于时效性的静压管桩侧阻力计算

王家涛<sup>1</sup>, 张明义<sup>2</sup>

(1. 山东水利职业学院建筑工程系, 山东 日照 276826; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘要:** 饱和软黏土地基中的静压管桩隔时复压试验表明, 复压起动压桩力增长幅度较大, 且前期增长较快而后期较慢。通过分析静压管桩时效机理发现, 静压桩的单桩承载力随时间的提高主要来源于桩侧阻力的增长, 而桩端阻力变化对承载力的时间效应贡献较小。利用软件对试验数据进行回归分析, 得出静压管桩侧阻力随时间增长的关系可以用对数曲线进行模拟的结论, 从而为求得不同休止期的静压桩极限承载力提供了一种新方法。与现场试验资料对比分析表明, 侧阻力的模型计算值与实测值的变化规律一致, 且误差较小, 能够满足工程需要。

**关键词:** 静压管桩; 时效性; 侧阻力; 端阻力; 极限承载力

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S2-0287-04

作者简介: 王家涛(1978-), 男, 山东日照人, 硕士, 讲师, 主要从事岩土工程等方面的研究与教学工作。E-mail: wy\_wjt@126.com。

## Computation of side resistance of jacked pipe piles based on time effect

WANG Jia-tao<sup>1</sup>, ZHANG Ming-yi<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shandong Water Polytechnic, Rizhao 276826, China; 2. Department of Civil Engineering, Qingdao Technology University, Qingdao 266033, China)

**Abstract:** The re-pressed tests on jacked pipe piles in soft clay indicate that the re-pressed starting pressure is greatly improved after finishing the installation and increases more rapidly in early period than in later one. Through the study of the time effect mechanism, it is found that the increment of the ultimate bearing capacity of a single pile is mainly caused by side soil resistance. The end resistance has little influence on the time effect of bearing capacity of the pile. According to the simulated results of the test data, the relationship between pile side resistance and time can be described by use of logarithmic curve. By means of this new computing model, the side frictional resistance in different time of response as well as the ultimate bearing capacity can be obtained. It is proved that the proposed method is feasible because the values of side soil resistance calculated by the computing model with software are consistent with the field test results.

**Key words:** jacked pipe pile; time effect; side resistance; end resistance; ultimate bearing capacity

## 0 引言

近年来, 静压管桩技术在中国发展迅速, 它把管桩本身的优点和完善的静压工艺结合起来, 以其单桩承载力高、抗震性能好、无振动、无噪音、无污染、造价适中、施工周期短、施工场地文明整洁等优点, 被大量用于工业与民用等各类建筑物和构筑物的基础工程中。但是, 预制桩被压入后, 其承载力会随时间而不断增长, 最后才达到极限值, 即存在桩承载力的时效问题<sup>[1-5]</sup>。已有的研究成果表明<sup>[2]</sup>, 静压管桩最终单桩极限承载力较初始值增幅较大。因此, 正确认识静压管桩在软土地基中承载力的时效性, 提出行之有效的承载力计算公式, 可以有效的降低工程成本, 对工程的设计等将会有重大的意义。

本文结合现场试验资料, 对静压管桩单桩承载力随时间变化的规律作了进一步的探讨, 提出了黏土层桩侧阻力随时间增长的估算公式, 从而为计算单桩在不同休止期的极限承载力提供了一种新方法。

## 1 静压管桩承载力时效机理

### 1.1 静压管桩的承载力与时效性

所谓静压桩承载力的时效性, 是指桩被静力压入之后, 承载力随时间而增加的现象。工程经验表明, 在桩基施工后较短的时间内进行复压试验, 压桩力提高较快, 而在后期, 压桩力变化很小, 进入一稳态贯

入阶段。实际上, 桩的极限承载力是在终压力的基础上, 经过触变恢复和固结等作用发展的, 在桩周土未达到充分固结恢复之前的承载力, 都是“拟极限承载力”, 或称为广义极限承载力。进行静压桩时效性研究, 主要目的就是找出广义极限承载力在不同休止期的变化规律, 为工程提供设计依据。

### 1.2 静压管桩承载力时效机理

静压管桩的入土过程与其他静压桩相类似, 其时效性机理归纳起来有以下 3 点。

(1) 土的触变恢复时效。桩周土在沉桩过程中被挤压扰动, 强度显著降低, 但随着时间的发展, 黏性土的触变作用使损失的强度逐步恢复。李雄等<sup>[5]</sup>对重塑饱和软土进行重塑后不同休止时间的 UU 三轴试验, 试验结果表明土的触变恢复时效与桩承载力的时效规律一致。

(2) 固结时效。在沉桩过程中, 由于施工过程中的挤土效应, 桩周土体产生扰动, 孔隙水压力有较大幅度上升<sup>[6]</sup>。而在沉桩结束后, 地基土中的超静孔隙水压力逐渐消散, 桩周土产生再固结, 其强度得以恢复, 则桩的承载力将得到提高。

(3) 土壳效应。受沉桩过程竖向剪切、横向挤压作用, 桩周近旁的土成为完全塑性区<sup>[7]</sup>。压桩结束后, 经过一段时间的静置和固结, 会逐步形成一层紧贴于桩身表面的硬壳层<sup>[8]</sup>。由于其抗剪强度高于周围土体的强度, 当桩发生位移时, 该层将随桩身一同移动, 这实质上使桩的侧表面摩擦面积增大, 加大了桩的承载力。

通过上面的分析, 无论是触变恢复时效、固结时效还是尺寸效应, 都是桩侧土体的性状、作用发生了改变才导致了桩的承载力的提高, 也就是说静压桩承载力时间效应主要表现在桩侧阻力随时间的变化, 而桩端阻力的变化对承载力影响不大。

## 2 工程试验分析

### 2.1 工程试验

为了进一步探求桩的极限承载力在不同休止期的变化规律, 选取了某工程场地进行了压桩力试验和隔时复压试验。

试验场地属山前滨海地貌, 地下水位在地表以下 0.3 m。试验用桩为 PHC-A400 (95) 型预应力管桩, 数量为 3 根, 桩距为 6 m, 桩长分别为 26, 25, 25 m, 地质情况相近。桩长范围内自上而下土层情况如表 1 所列。

3 根试验管桩沉桩后, 间隔不同的时间进行复压, 记录各次的起动压力, 即不同休止期的极限承载力。

复压时间选择的原则为早期间隔时间短而后期较长, 以利于观察承载力的增长趋势, 最后一次复压的休止期选为 25 d, 与规范规定的休止期相对应, 为检测时间的选择以及终止压力的选择提供依据。以终止压桩力作为初始承载力, 3 根试验桩承载力随时间的变化曲线如图 1 所示。

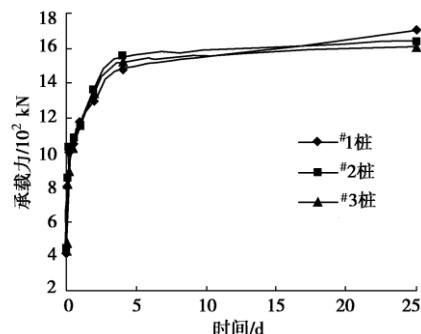


图 1 试验桩承载力增长曲线

Fig. 1 Increment curves of bearing capacity of test piles

表 1 试验场地的地质资料

Table 1 Geological data of test field

名称	层厚/ m	黏聚力 $c/kPa$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	承载力特征 值 $f_{ak}/kPa$
填土	3.2~3.4			
淤泥	14.0~14.2	5.0	1.2	55
黏土	10.8~11.2	33.7	5.8	130

### 2.2 试验结果分析

通过图 1 可以发现, 3 根试验桩的试验曲线十分接近, 开始增长较快, 后期较为平缓。其中 #1 试验桩的极限承载力增长趋势与 #2, #3 试验桩相比较规律略有不同, 休止期较短时三者承载力相差不大, 但随休止期的增长 #1 桩承载力的增长幅度逐渐大于其他 2 根。由试验资料可知, 自上而下桩长范围内分布着约 3 m 左右未固结完成的填土层和 14 m 左右的淤泥层, 以下 8 m 范围内为黏土层。地面以下大约 2 m 范围内土体与桩体之间因施工时桩身晃动而产生裂缝, 此段为无摩擦区, 即填土层基本上是不提供侧阻力的。淤泥的抗剪强度相比黏土小很多, 该层对承载力增长的影响也是有限的, 可见试验中静压桩承载力增长主要依赖于黏土层抗剪强度的提高, 桩土摩擦力时间效应室内试验也证明了在较大法向力的条件下, 黏性土摩阻力提高的幅度是相当大的<sup>[9]</sup>。由此可以解释 #1 桩承载力增长趋势相比其他 2 根试验桩略有不同, 是因为桩身在黏土层中的长度大于其他 2 根。

为了探讨承载力时效性规律, 考虑各桩终压力不同, 用不同休止期的复压起动力与初始压桩力的比值, 即压力比来考察极限承载力与时间关系曲线的变化规律(限于试验条件, 该处取同一工程的不同桩的数据)。

因各桩的长度略有差别, 土质条件也不尽相同, 所以该计算仅用于说明曲线的变化趋势)。对试验中的 3 根管桩, 以横坐标为时间, 纵坐标为压力比, 画出压力比曲线图, 如图 2 所示。

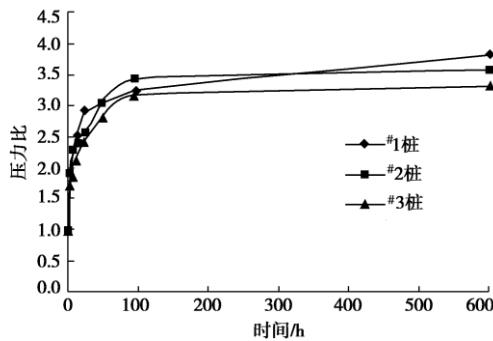


图 2 压力比变化曲线

Fig. 2 Variation curves of pressure ratio with time

由图 2 可以看出, 休止期为 25 d 时的承载力相比终止压力有较大幅度的提高, 后者约为前者的 3.5 倍。压桩在早期承载力提高较快, 后期变化较小, 曲线趋向平缓, 最终达到一稳定值。如果时间点选择合理, 该曲线则能较好的反映广义极限承载力随时间的变化趋势。试验数据模拟结果表明, 该曲线的变化可以用对数曲线描述。

### 3 静压管桩侧阻力的计算

#### 3.1 计算模型的建立

由上文分析可知, 引起复压时单桩极限承载力大幅提高的主要原因, 应是桩侧黏土摩阻力的提高。利用 Matlab 等软件对工程试验数据进行分析处理, 可建立不同休止期的桩侧阻力估算公式:

$$q_{st} = q_{s0} + \alpha(1 + \lg t)(q_{smax} - q_{s0}) \\ = q_{s0} + \Delta q_{max} \alpha(1 + \lg t), \quad (1)$$

式中,  $q_{st}$  为  $t$  时刻的桩侧阻力 (kPa),  $q_{s0}$  为初始扰动土侧阻力 (kPa),  $\Delta q_{max}$  为桩侧阻力最大增长值, 可根据圆孔扩张理论求得<sup>[10]</sup>, 也可根据静载荷试验近似取休止期为 25 d 的桩侧阻力增长值,  $\alpha$  为时效系数, 与土质有关,  $t$  为固结时间 (h)。

可以通过先求出不同休止期的静压管桩侧摩阻力的方式进而求得不同休止期的极限承载力。

#### 3.2 对比分析

试验中淤泥土层和桩端阻力对承载力增长的贡献, 通过在黏土层侧阻力增长的基础上以修正系数的形式得以体现<sup>[11]</sup>。将各时刻的承载力 (压桩力) 除以系数 1.5 得出黏土层总的桩侧阻力。忽略试验桩桩侧土层厚度的微小差别, 只考虑黏土层中桩长的不同, 可以进一步得到单位面积的桩侧阻力测量值。

运用数理统计回归分析方法对试验数据进行研究, 对建立的预测函数形式进行拟合, 可以得到  $\alpha$  值 (根据模拟结果, 文中时效系数  $\alpha$  取 0.265), 从而得到静压管桩在不同休止期侧阻力计算值。将模型的计算曲线与由复压试验得到的测量值一并绘于图 3。

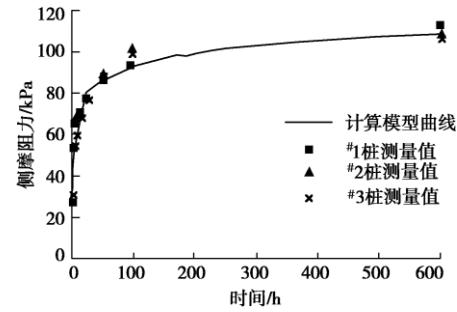


图 3 计算值与测量值

Fig. 3 Comparison between calculated and test values

从图 3 中数据可以看出, 3 根桩的侧阻力随时间呈增长趋势, 在前期增长较快, 但当压桩休止期超过 25 d 后, 侧阻力增长缓慢, 并逐渐趋向于一稳定值; 模型计算值总体上略低于隔时复压试验得到的极限侧阻力实测值, 总体上吻合效果较好; 计算值与实测值的变化规律也基本保持一致, 大致呈对数曲线增长; 从图中还可以看出, 随着休止期的延长, 模型预测的精确度逐渐提高。

对模型计算值整体上略低于实测值的现象进行分析, 发现这部分差值主要是由于在根据隔时复压试验确定侧阻力时未考虑桩端组力的变化造成的: ①一方面, 初压时桩端土的局部压密造成了土的性状的变化, 使实测单桩极限承载力有所提高; ②另一方面, 桩端扰动土体的再固结等作用的时效性也会对承载力产生一定的影响。实际上, 影响端阻变化的因素是非常复杂的<sup>[12]</sup>, 可以不计这部分增加量以提高工程的安全性。

此外, 在对比其它工程中的单桩试验数据研究时发现, 当桩体所处的土层较单一, 土质均匀的情况下, 利用该计算方法能收到与实测值较好的吻合效果; 而对于变化多样, 分布不均的土层, 计算过程要相对繁琐, 误差也较大。

### 4 结 论

(1) 饱和软黏土地基中静压管桩施工, 单桩承载力工后增大效应主要源于桩侧阻力的增长, 桩端阻力的变化对承载力贡献较小。数值模拟结果表明, 单桩极限承载力与时间的关系可以用对数曲线来描述。

(2) 在试验数据分析的基础上, 提出了软黏土地基中不同休止期的静压管桩侧阻力的估算公式。将该

计算模型得到的极限侧阻力曲线与“隔时复压试验”得到的侧阻力进行对比,发现两者吻合较好,且随着休止期的延长,预测的精确度逐渐提高。

(3) 借助于建立的侧阻力估算公式,可以进一步推算出静压管桩在不同休止期的单桩极限承载力,为工程的设计、施工等环节提供依据。

### 参考文献:

- [1] LEHANE B M, GAVIN K G. Base resistance of jacked pipe piles in sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(6): 473 - 479.
- [2] 王俊林, 王志宽, 马艳. 静压管桩单桩极限承载力与终压力关系的探讨[J]. 岩土力学, 2008, **29**(11): 631 - 634. (WANG Jun-lin, WANG Zhi-kuan, MA Yan. Relationship between ultimate bearing capacity of single pile and final pressure of static pressure pipe pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(11): 631 - 634. (in Chinese))
- [3] AXELSSON G. Long-term increase in shaft capacity of driven piles in sand[C]// Proc 4th Int Con on Case Histories in Geotechnical Eng, St Louis, 1998: 125 - 129.
- [4] 张忠苗, 刘俊伟, 俞峰, 等. 静压管桩终压力与极限承载力的相关关系研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(8): 1207 - 1213. (ZHANG Zhong-miao, LIU Jun-wei, YU Feng etc. Relationship between terminative jacking force and ultimate bearing capacity of jacked pipe piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(8): 1207 - 1213. (in Chinese))
- [5] 李雄, 刘金砾. 饱和软土中预制桩承载力时效的研究[J]. 岩土工程学报, 1992, **14**(4): 9 - 19. (LI Xiong, LIU Jin-li. Time effect of bearing capacity of precast pile in saturated soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, **14**(4): 9 - 19. (in Chinese))
- [6] 陈书申. 固结效应与静压预制桩技术应用[J]. 土工基础, 2001, **15**(4): 27 - 30. (CHEN Shu-shen. Consolidation effect and technical application of static pressure prefabricated concrete pile[J]. Soil Engineering and Foundation, 2001, **15**(4): 27 - 30. (in Chinese))
- [7] 费勤发, 马海龙. 饱和软土排土桩侧摩阻力时效问题研究[J]. 苏州城建环保学院学报. 1995, **8**(4): 35 - 40. (FEI Qin-fa, MA Hai-long. Study on time effect of skin friction of soil displacement pile in saturated soft soil[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou. 1995, **8**(4): 35 - 40. (in Chinese))
- [8] 宋兵, 蔡健. 预应力管桩侧摩阻力影响因素的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009(28): 3863 - 3869. (SONG Bing, CAI Jian. Research on influence factors of side soil resistance of PHC pipe pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009(28): 3863 - 3869. (in Chinese))
- [9] 张明义, 邓安福. 桩-土滑动摩擦的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, **23**(2): 246 - 249. (ZHANG Ming-yi, DENG An-fu. Experimental study on sliding friction between pile and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(2): 246 - 249. (in Chinese))
- [10] 王家涛, 周健, 张明义. 基于球孔扩张理论和时效性的静压桩承载力计算[J]. 地下空间与工程学报, 2010, **6**(5): 964 - 968. (WANG Jia-tao, ZHOU Jian, ZHANG Ming-yi. Computation of bearing capacity of jacked piles based on spherical cavity expansion theory and time effect[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, **6**(5): 964 - 968. (in Chinese))
- [11] 张明义, 刘俊伟, 于秀霞. 饱和软黏土地基静压管桩承载力时间效应试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(10): 3005 - 3008. (ZHANG Ming-yi, LIU Jun-wei, YU Xiu-xia. Field test study of time effect on ultimate bearing capacity of jacked pipe pile in soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(10): 3005 - 3008. (in Chinese))
- [12] 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 Hong-wei. In-situ test analysis of 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))

(本文责编 胡海霞)