

文章编号: 1674-599X(2021)03-0017-05

# 软土地基中预应力管桩荷载-沉降曲线计算

李文勇<sup>1</sup>, 张浩<sup>1</sup>, 关宏信<sup>2</sup>, 李文静<sup>3</sup>

(1.湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200; 2.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 3.湖南省交通科学研究院有限公司, 湖南 长沙 410015)

**摘 要:** 为研究预应力管桩单桩极限承载力, 采用指数函数模型计算和分析预应力管桩桩周摩阻力-沉降关系、桩端阻力-沉降关系。以安慈高速预应力管桩单桩极限承载力为例, 进行指数函数模型计算和静载试验, 并对计算结果和试验结果进行对比分析。研究结果表明: 指数函数模型的计算结果与静载试验的结果较为相近, 该模型可以有效预测软土中预应力管桩单桩极限承载力, 可为类似工程估算桩土沉降提供指导。

**关键词:** 荷载传递法; 指数模型; 静载试验; 荷载-沉降曲线

中图分类号: TU471.8

文献标志码: A

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.003

## Calculation of load settlement curve of prestressed pipe pile in soft soil foundation

LI Wen-yong<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>, GUAN Hong-xin<sup>2</sup>, LI Wen-jing<sup>3</sup>

(1.Hunan Provincial Communications Planning Survey&Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China;  
2.School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;  
3.Hunan Communications Research Institute, Co., Ltd., Changsha 410015, China)

**Abstract:** In order to investigate the ultimate bearing capacity of single prestressed pipe pile, the exponential model method was used to describe the relationship between frictional resistance and settlement, and the relationship between the pile tip resistance and settlement. The ultimate bearing capacity of single prestressed pipe pile was calculated using the exponential function model. Which was then compared with the value measured from the statics test at the Anci Highway. The research showed that the result of load settlement theoretical calculation is close to that of static load test. The bearing capacity of single prestressed pipe pile in soft soil can be predicted effectively using the exponential function model. Therefore, this study can provide guidance for similar project to estimate the pile-soil settlement.

**Key words:** load transfer method; exponential model; load test; load-settlement curve

桩基复合地基具有沉降变形小、沉降稳定所需时间短, 且施工质量易于控制的优点, 广泛应用于深厚软土地基处置中<sup>[1]</sup>。在桩基设计中, 需要特别考虑桩的承载力和沉降特性。目前, 规范中所采用的桩基承载力计算公式常为桩侧摩阻力和桩端阻力之和, 不能反映出桩基的沉降特性<sup>[2]</sup>。而在工程实践中, 为确定桩基的承载力, 通常采用静载试验获得桩基的荷载-沉降曲线。Zhang等人<sup>[3]</sup>

通过荷载传递法确定了桩基的荷载-沉降关系。荷载传递法能明确地表达出桩土体系中荷载的传递机理, 而且具有原理简明、计算便捷、实用性较强等优点<sup>[4]</sup>。因此, 作者拟采用荷载传递法计算分析软土地基中预应力管桩的荷载-沉降关系, 并与静载试验结果进行对比, 验证理论计算的可行性, 以期工程实践提供指导。

收稿日期: 2020-09-28

作者简介: 李文勇(1986—), 男, 湖南省交通规划勘察设计院有限公司工程师。

## 1 计算方法

在桩荷载作用下,非线性变形主要出现在桩土界面处,如图1所示。为描述荷载-沉降的非线性关系,荷载传递法常用的数学模型有抛物线模型<sup>[5]</sup>、双曲线模型<sup>[6-8]</sup>和指数模型<sup>[9]</sup>。其中,指数模型与原位测试结果拟合效果更好,且不需要引入额外的物理量<sup>[10]</sup>。本研究采用指数函数描述预应力管桩桩周摩阻力-沉降关系、桩端阻力-沉降关系,如图2所示。其中, $Q$ 为桩顶压力; $\tau$ 为侧摩阻力; $q$ 为桩端阻力。由于预应力管桩强度较高,又处于深厚软基之中,在计算桩基沉降时只考虑土体变形,桩身压缩变形不计。

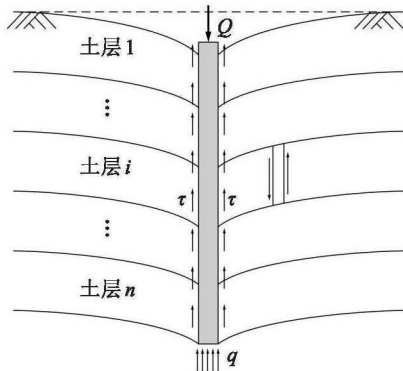


图1 荷载作用下桩基位移示意

Fig. 1 Schematic diagram of pile foundation displacement induced by load

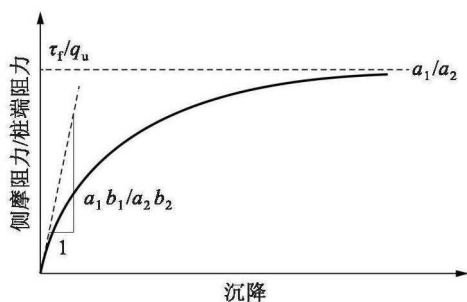


图2 指数函数荷载传递曲线

Fig. 2 Load-transfer curve of exponential function

### 1.1 桩身侧摩阻力与沉降关系

在实际工程中,土体分布并非均匀,土体具有非线性力学特征,桩土间相互作用比较复杂。静载试验表明:剪切应力 $\tau$ 和桩身位移 $S$ 的关系,可以近似用指数函数表示<sup>[9]</sup>:

$$\tau = a_1(1 - e^{-b_1 S}). \quad (1)$$

式中: $a_1$ 、 $b_1$ 为计算参数。

由莫尔强度理论求得桩侧摩阻力极限值<sup>[7]</sup>为:

$$\tau_f = c + K_0 \sigma_h \tan \varphi. \quad (2)$$

式中: $\sigma_h$ 为土体地应力( $\sigma_h = \gamma h$ ,  $h$ 为地面以下深度;若在水位以下, $\gamma$ 取浮重度); $K_0$ 为侧压力系数, $K_0 = \nu/(1 - \nu)$ , $\nu$ 为桩间土体泊松比; $c$ 、 $\varphi$ 分别为桩间土体的黏聚力和摩擦角,可由直剪试验或三轴抗剪试验得到。

$a_1 = \tau_f$ ,  $a_1$ 、 $b_1$ 代表桩侧摩阻力荷载曲线初始切线模量的计算参数,则:

$$b_1 = \frac{q_{sk}}{\pi r_0 a_1}. \quad (3)$$

式中: $q_{sk}$ 为桩侧摩阻力标准值; $r_0$ 为预应力管桩直径。

### 1.2 桩端阻力与沉降关系

在桩荷载作用下,桩端土体受力与位移通常具有非线性关系<sup>[11]</sup>。桩端阻力 $q$ 与桩端位移 $S$ 的非线性关系的表达式为<sup>[9]</sup>:

$$q = a_2(1 - e^{-b_2 S}). \quad (4)$$

从图2中可以看出, $a_2$ 等于极限桩端阻力 $q_u$ 。

Yasufuku等人<sup>[12]</sup>提出了极限桩端阻力 $q_u$ 的计算式:

$$q_u = N_q \sigma_h. \quad (5)$$

$$N_q = \frac{A}{1 - \sin \varphi} \left[ \frac{\frac{G}{\sigma_h}}{B + D \left( \frac{G}{\sigma_h} \right)^{-0.8}} \right]^C. \quad (6)$$

$$\text{其中, } A = \frac{3(1 + \sin \varphi)}{3 - \sin \varphi} \left( \frac{1 + 2K_0}{3} \right); \quad B = \left( \frac{1 + 2K_0}{3} \right)$$

$$\tan \varphi; \quad C = \frac{4 \sin \varphi}{3(1 + \sin \varphi)}; \quad D = 50 \left( \frac{1 + 2K_0}{3} \tan \varphi \right)^{1.8}.$$

式中: $G$ 为桩端处地基土的剪切模量。

$a_2$ 、 $b_2$ 代表桩端荷载曲线初始切线模量的计算参数,则:

$$b_2 = \frac{4G}{\pi r_0^2 a_2 (1 - \nu)}. \quad (7)$$

## 2 载荷试验

2.1 工程概况

湖南省安乡至慈利在建高速公路位于洞庭湖西部地区, 湖相及河湖相的沉积盆地区的软土分布广, 软土厚度为5~25 m。安慈高速地基的地质条件由上至下分别为硬壳层粉质黏土、淤泥质土、粉质黏土和粉细砂。其中, 淤泥质土强度低、含水量大、流动性强, 对工程产生不利影响, 可能会导致路基侧向滑移, 边坡失稳。针对淤泥较深的情况, 本项目大量采用预应力管桩作为软土地基的处治方案。预应力管桩桩径为300 mm, 壁厚为70 mm, 桩长为12~30 m。

2.2 单桩承载力静载试验

安慈高速预应力管桩单桩承载力检测主要依据《建筑地基检测技术规范》(JGJ340—2015), 现场检测方法为静载试验。试验的堆载平台主要由跳板和工字钢组成, 上部由预制混凝土块均匀布置, 构成反力系统, 如图3所示。试验所采用的加载装置为1台油压千斤顶(100T型)。为了在静载试验中获得精准的压力值, 油压传感器应事先在试验室中精确标定。施加给预应力管桩的荷载源于千斤顶, 其值可由千斤顶的标定曲线换算得出。为了保证试验安全, 采用的千斤顶、油泵、高压油管的容许压力应不小于试验最大荷载压力的1.2倍。在桩头设置最大量程为50 mm、精度不小于0.01 mm的位移传感器, 确定试验过程中的沉降变形。位移传感器均采用磁性表座, 固定在基准梁上。基准桩的桩中心距离与试桩中心距离≥2.0 m, 基准桩的桩中心与堆载平台支墩边的距离≥2.0 m。



图3 静载试验  
Fig. 3 Load test

根据《建筑地基检测技术规范》(JGJ340—2015), 试验最大荷载应为设计荷载值的2倍, 并采用由跳板和工字钢组成的堆载平台提供荷载压力。荷载采用分级加载, 每级加载荷载的大小为

试验最大荷载的1/10。在每级荷载加载之后的第5、15、30、45、60 min时, 读取桩基沉降值, 然后每隔30 min读取1次, 待桩基沉降量达到了稳定状态, 方可施加下一级荷载。

当出现以下情况才可终止加载: ①荷载-沉降(Q-S)曲线上有可判定的极限承载力陡降段; ②某级荷载条件下, 桩基沉降量达到了上一级荷载作用条件下沉降量的2倍以上, 且24 h之后沉降仍未达到稳定状态; ③增强体破坏, 顶部变形急剧增大。

3 计算实例

采用指数函数拟合计算方法, 选取安慈高速两处较为典型的预应力管桩进行计算, 并与其静载试验结果进行对比分析。

1) 1号试桩, 里程为安慈高速安乡枢纽互通AK0+500, 桩径 $r_0=300$  mm, 桩距 $s=2.2$  m, 桩长 $l=18$  m。为获取土层地质参数, 对地基土层进行了原位试验, 并采取试样进行了室内试验, 结果见表1。其中,  $E$ 为压缩模量。指数函数拟合的计算结果和静载试验检测结果如图4所示。从图4中可以看出, 理论计算结果和现场试验结果相近, 2条曲线走势较吻合。沉降-荷载曲线表现出典型的非线性特点, 表明: 采用指数函数形式拟合荷载-沉降是可行的。随着荷载的增加, 沉降也在逐渐增大。在施加荷载的初始阶段, 沉降增长较为平稳, 当荷载达到桩基承载力的极限值时, 沉降速率突然增大。单桩承载力极限计算值为489 kN, 单桩极限承载力试验值为560 kN, 计算结果比试验结果略小, 计算误差为14.5%。

表1 1号桩桩间土参数  
Table 1 Soil parameters of the pile 1

土层名称	厚度/ m	$\gamma$ / ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$q_{sk}$ / kPa	$c$ / kPa	$\varphi$ / ( $^{\circ}$ )	$\nu$	$E$ / MPa
粉质黏土	2.9	18.5	35	15	15	0.35	3.5
淤泥质土	8.4	18.3	18	15	10	0.40	2.4
粉质黏土		18.8	45	20	15	0.35	4.5

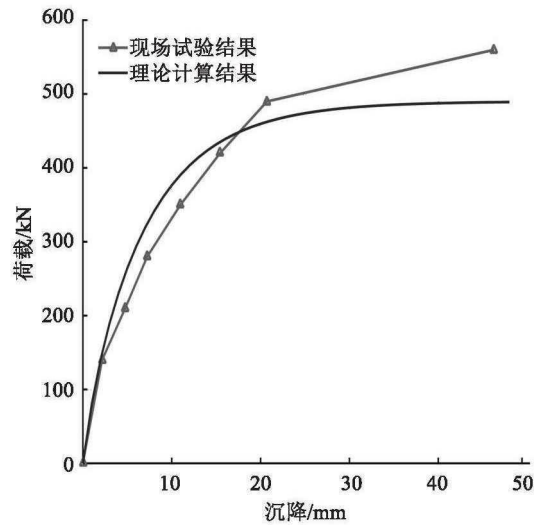


图4 1号桩荷载沉降曲线

Fig. 4 Load-settlement curve of the pile 1

2) 2号试桩, 里程为K14+700, 桩径 $r_0=300$  mm, 桩距 $s=2.4$  m, 桩长 $l=24$  m。通过原位试验和室内试验得到桩间土参数, 见表2。指数函数拟合的理论计算结果和静载试验检测结果如图5所示。从图5中可以看出, 理论计算结果现场和试验结果较为相近, 采用指数函数形式拟合荷载-沉降曲线取得了理想的效果。沉降速率随着荷载的增加而逐渐增大, 当沉降曲线出现明显的转折点时, 即可判定承载力达到了极限值。单桩极限承载力计算值为742 kN, 单桩极限承载力试验值为750 kN, 计算结果比试验结果略小, 误差为1.08%。2号桩的计算结果较1号桩的更为理想, 主要是因为1号桩所处地区地质情况更为复杂, 桩间距更小, 打桩过程中对土体的扰动更大。

表2 2号桩桩间土参数

Table 2 Soil parameters of the pile 2

土层名称	厚度/ m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$q_{ik}/\text{kPa}$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^{\circ})$	$\nu$	$E/\text{MPa}$
粉质黏土	1.0	18.5	35	15	10	0.35	3.5
淤泥质土	9.3	18.3	15	10	8	0.40	2.2
粉质黏土	9.5	18.8	45	20	15	0.35	4.5
粉细砂		19.6	30	0	25	0.30	8.0

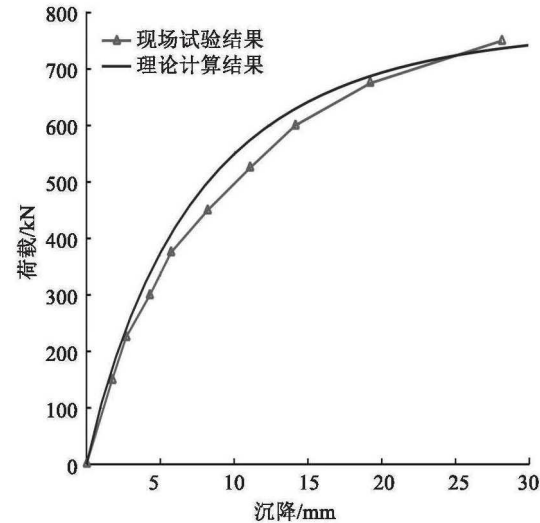


图5 2号桩荷载-沉降曲线

Fig. 5 Load-settlement curve of the pile 2

1) 当预应力管桩主要处于软土地基中时, 由于桩身强度较高而土体承载力较大, 静载试验的主要沉降主要来源于土体变形, 因此管桩自身压缩所带来的沉降可以忽略不计。

2) 在静载试验中, 土体沉降与荷载关系为非线性关系, 随着荷载的逐渐增大, 桩基沉降的速率也逐渐增大。当荷载接近或达到桩基承载力的极限值时, 沉降速率会出现大幅度的增加, 会在荷载-沉降曲线上表现为明显的转折点。

3) 理论计算所采用的参数可由室内试验或原位试验获得, 计算简单且概念清楚。指数函数拟合的计算结果与静载试验的较为相近, 为预应力管桩在软土地区的设计工作提供了参考, 也为根据试验结果反算地质参数提供了方法。

4 结论

基于荷载传递理论, 采用指数函数形式拟合软土中预应力管桩荷载-沉降曲线, 并与静载试验结果进行对比, 得到结论为:

参考文献(References):

[1] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115. (LIU Han-long, ZHAO Ming-hua. Review of ground improvement technical and its application in China[J]. China Civil Engineering Journal,

- 2016, 49(1): 96-115.(in Chinese))
- [2] 杨桦, 杨敏. 荷载传递法研究单桩荷载-沉降关系进展综述[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 155-159, 165. (YANG Hua, YANG Min. Development of load-transfer method for settlement calculation of single pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 155-159, 165.(in Chinese))
- [3] Zhang Q Q, Feng R F, Yu Y L, et al. Simplified approach for prediction of nonlinear response of bored pile embedded in sand[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(5): 1562-1578.
- [4] Carrubba P. Skin friction on large-diameter piles socketed into rock[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1997, 34(2): 230-240.
- [5] 姜振春. 软黏土中超长预应力高强度混凝土管桩竖向承载特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2639-2644, 2649. (JIANG Zhen-chun. Experimental study of vertical bearing behaviors of super-long prestressed high-strength concrete pipe pile in soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2639-2644, 2649.(in Chinese))
- [6] 郭志广, 魏丽敏, 何群, 等. 深厚软土地基预制管桩荷载传递试验与数值分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(10): 3589-3595. (GUO Zhi-guang, WEI Li-min, HE Qun, et al. Experimental and numerical analyses of load transfer characteristics of prestressed concrete pipe pile in deep soft soil[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(10): 3589-3595.(in Chinese))
- [7] 赖琼华. 桩的P-S曲线计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 509-513. (LAI Qiong-hua. Calculation procedure for p-s curve of piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 509-513. (in Chinese))
- [8] 胡超. 湘府路高架桥桩基沉降计算及影响因素分析[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(2): 98-103. (HU Chao. Settlement calculation and influencing factor analysis of pile foundation in Xiangfu viaduct[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2): 98-103. (in Chinese))
- [9] Li L, Li J P, Wang Y, et al. Analysis of nonlinear load-displacement behaviour of pile groups in clay considering installation effects[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(4): 752-766.
- [10] 罗喆, 胡彪. 基于热力荷载传递原理的能量桩长期响应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4): 549-555, 563. (LUO Zhe, HU Biao. Long-term response of energy pile based on Thermo-mechanical Load-transfer principle[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(4): 549-555, 563.(in Chinese))
- [11] LI Y H, ZHU X, CHEN L J, et al. Load transfer calculation and analysis of large-diameter bored piles according to rules based on test pile measurement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2018, 12(3): 28-36.
- [12] Yasufuku N, Ochiai H, Ohno S. Pile end-bearing capacity of sand related to soil compressibility[J]. Soils and Foundations, 2001, 41(4): 59-71.