

# 利用剪切变形传递法分析基桩的竖向承载特性

赵海元 高 强

(上海岩土工程勘察设计院有限公司, 上海 200331)

**【摘 要】** 利用成层土中剪切变形传递法分析单桩的竖向承载特性和沉降特性, 经过与现场实测数据结果比较分析, 证明剪切变形传递法, 在用于计算设计荷载范围内的单桩桩身内力和沉降方面具有很好的精度。故在无现场静载荷试验的条件下, 剪切变形传递法可作为分析单桩竖向承载特性及桩周土体阻力发挥过程的一种辅助方法。

**【关键词】** 单桩; 剪切变形传递法; 竖向承载特性; 饱和软土

**【中图分类号】** TU 473.12

## Applying Refined Load-transfer Method to Analyze Bearing Characteristic of Single Pile

Zhao Haiyuan Gao Qiang

(Shanghai Geotechnical Investigations & Design Institute Co., Ltd, Shanghai 200331 China)

**【Abstract】** Applying refined load-transfer method to analyze bearing characteristic and settlement behavior of single pile, and compared with test results, the calculational results are precise close to designed load. When there is no test result, load-transfer method can be applied to analyze bearing characteristic and settlement behavior of single pile, and it will be an effective assistant measurement for the analysis of bearing capacity.

**【Key Words】** single pile; refined load-transfer method; bearing characteristic; soft soil

### 0 引言

近年来, 随着桩基础施工技术的提高, 单桩的承载力也不断提高, 因此, 一桩一柱基础也越来越多, 所以单桩基础竖向承载特性及其沉降特性越来越得到人们的关注。目前, 单桩的竖向承载特性往往是通过现场静载试验, 但现场静载试验需要在桩基中事先安装应力计, 故试验相对较为复杂。本文利用剪切变形传递法计算成层土中单桩的沉降和桩身轴力, 通过与现场实测结果的分析, 证明剪切变形传递法完全可以用于竖向荷载作用下的单桩特性分析中。

### 1 成层地基中的单桩沉降

根据文献[1], 可得到均质土层中桩长为  $L$  范围内, 应用剪切变形传递法计算得桩顶位移和轴力方程如下:

$$\begin{Bmatrix} w_t \\ p_t \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} w_b \\ p_b \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$$[T] = [T(z_z) [T(z_b)]^{-1}] = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix}$$
$$t_{11} = \frac{e^{uL} + e^{-uL}}{2}; \quad t_{12} = \frac{e^{uL} - e^{-uL}}{2uE_p A}$$

$$t_{21} = uE_p A \frac{e^{uL} - e^{-uL}}{2}; \quad t_{22} = t_{11}$$

其中,  $u = \sqrt{\frac{k}{NAE_p}}$ ,  $k = 2\pi G_s / \ln(r_m / r_0)$ ,  $r_m = 2.5 \cdot L \cdot \rho \cdot (1 - \nu_s)$ ,  $A$  为桩身截面积;  $E_p$  为桩身弹性模量; 非均质土层修正系数  $\rho = \sum_{i=1}^n G_i h_i / G_m L$ ;  $G_m$  为各土层的最大剪切模量;  $G_i, H_i$  分别为各土层的剪切模量和厚度, 均质土体中  $\rho = 1$ ;  $\nu_s$  为泊松比。

桩端的压缩变形可以采用弹性理论公式进行计算, 其公式为<sup>[2-3]</sup>

$$w_b = \frac{P_b(1 - \nu_s)}{4r_0 G_s} \eta \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为桩入土深度影响系数, 一般为 0.85 ~ 1.0;  $G_s$  为剪切模量;  $r_0$  为影响半径。

在实际工程中, 地基土都是由若干土层组成的, 因此要把均质土中的单桩分析法推广到成层地基中, 使其符合实际情况。首先考虑在双层土中的单桩沉降计算方法。由式(1)可以知道, 在第一层土中的桩段的位移及轴力方程为

$$\begin{Bmatrix} w_{1t} \\ p_{1t} \end{Bmatrix} = [T_1] \begin{Bmatrix} w_{1b} \\ p_{1b} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

在第二层土中的方程为:

$$\begin{Bmatrix} w_{2t} \\ p_{2t} \end{Bmatrix} = [T_2] \begin{Bmatrix} w_{2b} \\ p_{2b} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

由于桩身变形是连续的, 即  $w_{1b} = w_{2t}$ 、 $p_{1b} = p_{2t}$ , 由式(3)和式(4)可以得到双层土中的整根桩的位移及轴力方程为

$$\begin{Bmatrix} w_{1t} \\ p_{1t} \end{Bmatrix} = [T_1][T_2] \begin{Bmatrix} w_{2b} \\ p_{2b} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

由上式的推导过程可以知道, 对于有  $n$  层土层组成的地基中的单桩沉降计算公式为

$$\begin{Bmatrix} w_{1t} \\ p_{1t} \end{Bmatrix} = [T_1][T_2] \cdots [T_i] \cdots [T_n] \begin{Bmatrix} w_{nb} \\ p_{nb} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

式中, 计算  $[T_i]$  时, 要把相应的第  $i$  层土的有关参数代入, 根据上式还可以计算出桩侧各土层的摩阻力分布情况。

## 2 实例分析

### 2.1 工程概况<sup>[4]</sup>

上海市某工程的桩基设计采用  $\phi 600$  的钻孔灌注桩, 设计桩长为 28.0 m, 桩身混凝土强度为 C25, 单桩设计容许承载力为 1 000 kN。根据勘察单位提供的地质资料, 本工程地基土属于第四纪以海相沉积为主的软土, 地表以下 50 m 以内地层分为 8 个工程地质层, 试桩穿过其中 6 个工程地质层, 持力层落在第⑦层中, 地基土的物理力学指标见表 1。

表 1 场区地基土的物理力学指标

层序	土层名称	层厚 / m	含水量 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}/\text{MPa}$
①	杂填土	2.7	34.7	18.5	9.5	15.0	3.58
②	粘土	1.8	34.7	18.5	12.4	17.0	4.80
③	淤泥质粉质粘土	0.8	35.1	18.4	14.3	12.5	3.88
④	淤泥质粘土	10.1	47.4	17.3	10.0	12.0	1.82
⑤	粉质粘土	1.9	27.8	19.1	14.0	15.0	7.98
⑥	粉质粘土	8.4	32.1	18.3	16.5	30.0	8.85
⑦	砂质粉土	2.7	32.1	18.3	26.0	5.0	4.55
⑧	粘土	8.1	31.8	18.8	16.4	15.0	3.78

### 2.2 试验简述

试桩的钢筋采用通长配筋, 主筋为  $\phi 16$  的螺纹钢, 在制作钢筋笼时, 将不同量程且直径为  $\phi 16$  的 VWR 型振弦式钢筋计与钢筋笼的主筋对焊成一体, 钢筋计在平面上呈对称布置, 并位于不同土层的分界面处, 对于厚度较大的第④层土和第⑥层土, 在土层中间各设置一个测试断面, 共计 10 个断面, 钢筋计的布置见图 1。

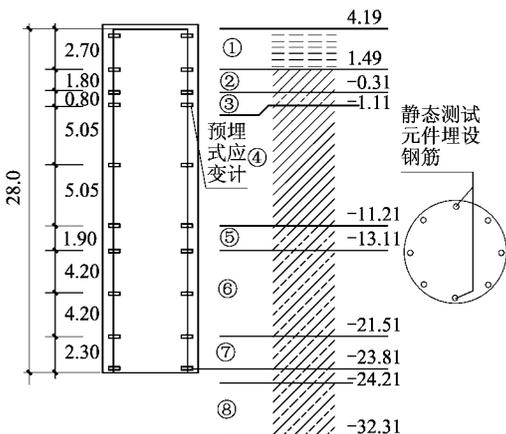


图 1 轴力测点布置平纵断面图(单位: m)

### 2.3 实测结果与计算结果比较

#### 1) 桩身轴力比较分析

根据式(6)计算得到的试验桩基不同断面的轴力结果见图 2, 在现场的实测桩基不同断面的轴力结果见图 3。

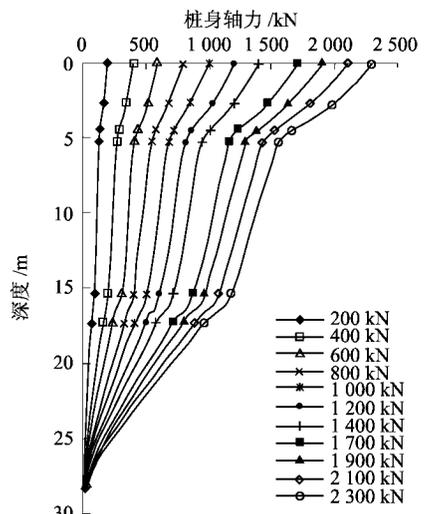


图 2 桩身轴力计算结果

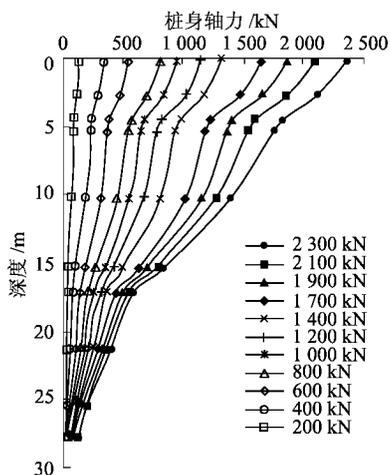


图3 桩身轴力实测结果

比较图2中的计算结果和图3中的实测结果曲线可以看出,计算值与实测值曲线在形状上十分相似。共同点:①在各级荷载下,桩身轴力从桩顶到桩端逐步递减;同一荷载级别下,衰减速率和桩周土体的性质有关;②当桩顶荷载较小时,桩身轴力的衰减速率较小,随着桩顶荷载的增加,桩身轴力的衰减速度加快,尤其在地面下17.4m以上表现的较为明显。不同点:深度为5m左右和15m左右桩身轴力的计算值与实测值稍有差别,出现该差别的原因主要为:即剪切变形传递法计算得到的桩身轴力是在室内土工试验提供的计算参数的基础上得到的,该计算参数与现场的实际情况略有差别的缘故。

### 2) 桩侧阻力比较分析<sup>[5-6]</sup>

根据桩身轴力计算得各土层的桩侧阻力见图4和图5。比较图4和图5的桩侧摩阻应力的计算结果和现场实测的推算结果,可以看出:两幅图的曲线在形状上基本一致,但是③、⑥的侧摩阻应力的计算结果明显大于实测结果,而④、⑤的侧摩阻应力的计算结果的又小于现场实测的推算结果。这一现象也充分体现了室内土工试验的计算参数对桩侧摩阻应力的计算精度的影响<sup>[6]</sup>。

### 3) 桩端阻力比较分析

桩端阻力的计算结果和实测结果在0~600kN的过程中比较吻合(见图6),但是,由于当桩顶加载从600kN到1000kN以及从1900kN到2300kN过程中,桩基的内力发生了调整,桩端阻力的实测值有较明显的增加过程,以加载量从1900kN到2300kN为例,端阻力侧阻力的荷载分担比从4.0%变化到5.56%。然而,桩端阻力的计算值却没有体现出这个变化,且保持2.92%恒定不变。这是因为剪切

变形传递法以弹性理论为基础的,故无法完全真实的反映现场的实际情况。

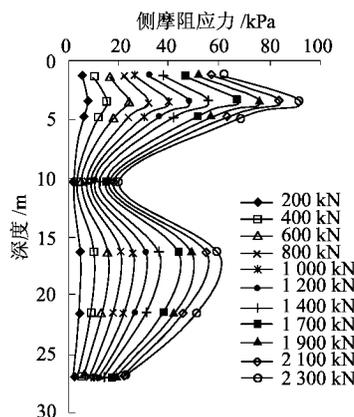


图4 平均桩侧摩阻应力计算结果

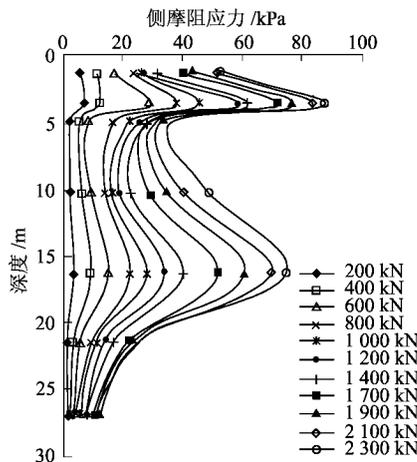


图5 平均桩侧摩阻应力实测结果

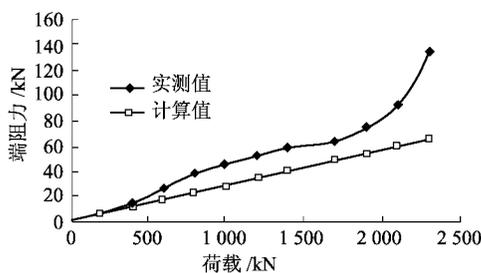


图6 荷载-端阻力曲线

### 4) 桩基沉降比较分析

采用剪切变形传递法计算得到的桩顶沉降量,把计算的沉降量和实测的沉降量进行对比分析,结果见图7。

由图7知,单桩沉降的实测结果和剪切变形传递法计算结果在设计荷载(1000kN)以内,计算结果的精度较高(7%);当单桩桩顶的荷载量大于设计荷载后,沉降实测结果与计算结果的差异越来越大,图7清晰直观地反映这种变化趋势。其原因主要

为: 在设计荷载以内时, 桩基以及地基各土层的变形基本上处于弹性阶段, 桩土间未产生相对位移, 桩与土仍满足变形协调方程, 与剪切变形法的基本假定相符, 故应用剪切变形法的计算精度也相对较高; 当桩基的加载量大于设计荷载后, 各土层的土体已经逐渐进入塑性阶段, 桩土间产生相对位移, 随着加载量的增加这种趋势表现的愈来愈显著。

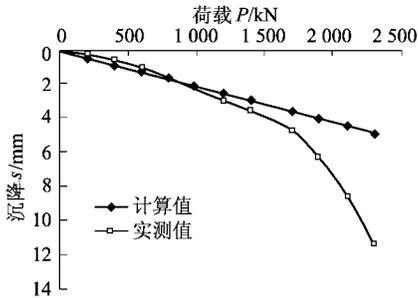


图7 试桩  $P-s$  曲线

为了进一步研究桩周各土层在设计荷载附近的压缩程度, 将桩周各土层的压缩量除以相应的层厚得到单位的土层厚度的压缩量, 详细结果见图8。

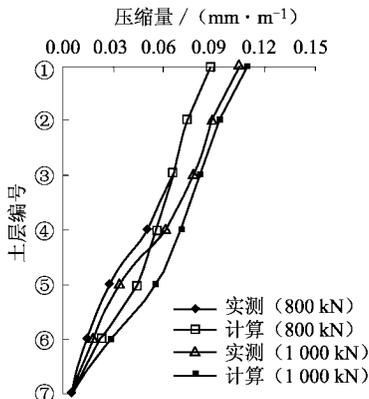


图8 桩周土单位层厚的压缩量

在图8中, 桩身单位长度压缩量的实测曲线可知, 桩基的单位长度的压缩量, 由上到下依次衰减, 同一荷载级别下, 衰减速率和桩周土体的性质以及桩周摩擦力的发挥程度有关; 随着荷载的增加, 这种衰减速率也在相应地增加<sup>[7]</sup>。

另外, 通过图8 实测曲线与计算曲线的比较得到, 试桩的上部土层单位长度的桩身压缩量的计算值和实测值均比较吻合, 但下部有较大差别, 尤其是第⑤层, 这主要是因为该场地原有三层旧式住宅, 地基土处于超固结状态, 超固结比为 5.66, 土层性质较正常固结状态有所改进, 从而导致第⑤层的单位压缩量要小于理论的计算结果的缘故。

### 3 结论

1) 在竖向荷载作用下, 在设计荷载范围内桩土处于弹性状态, 桩身应力的分析完全可以通过基于弹性理论为基础的剪切变形传递法计算完成, 计算结果的精度较高。

2) 在竖向荷载作用下, 使用剪切变形传递法对单桩作应力分析时, 室内土工参数的试验结果的准确性对分析结果影响较大。

3) 就目前的桩基设计而言, 单桩的受荷量基本上在设计荷载附近, 所以, 使用剪切变形传递法计算单桩的沉降量具有较高的精度和工程实用价值。

### 参 考 文 献

- [1] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [2] 刘利民. 桩基工程理论进展与工程实践[M]. 北京: 中国工业出版社, 2002.
- [3] 钟闻华, 刘松玉. 桥梁桩基础沉降简化计算[J]. 公路交通科技, 2004, 21(2): 62-64.
- [4] 高 强, 杨龙才, 王炳龙. 软粘土中钻孔灌注桩承载特性的试验研究[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(1): 35-39.
- [5] 刘利民. 桩侧阻力取值的几个问题[J]. 西部探矿工程, 2001(5): 40-42.
- [6] 吴兴序. 桩的端阻和侧阻相互作用及其工程应用价值[J]. 西南交通大学学报, 1997(3): 25-28.
- [7] 王幼青, 张克绪. 竖向荷载作用下单桩工作性能模拟分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(5): 39-41.

收稿日期: 2007-09-19