

# 超长桩荷载传递机理研究

阳吉宝

(上海市民防地基勘察院 上海 200232)

**【提要】**本文在分析超长桩实测资料的基础上,对现有的荷载传递函数进行修正,并用实例计算说明修正后的荷载传递函数能很好地反映超长桩的荷载传递机理。

**【关键词】**超长桩 荷载传递机理 修正

**【Abstract】**This paper introduces the load transfer function revised by author based on the analysis of measured data from super-long pile static load test. And proves that this function can reflect the load transfer mechanism of super-long pile by practical cases.

**【Keywords】**Super-long pile, Load transfer mechanism, Revise

## 0 引言

单桩受力机理分析的基本课题在于要确定:桩在不同深度 $z$ 处截面的竖向位移与深度的关系;荷载沿桩深度如何变化;桩侧摩阻力沿桩深度如何分布。目前,用于单桩受力机理分析的主要方法有:

- (1) 荷载传递分析法;
- (2) 弹性理论法;
- (3) 剪切变形传递法;
- (4) 有限元分析法;
- (5) 边界元分析法;
- (6) 其它简化方法。

结合本文单桩受力机理分析理论,下面主要阐述荷载传递分析法。

荷载传递分析法也称传递函数法。它是Seed和Reese于1957年首先提出的。这种方法的基本概念是把桩划分为许多弹性单元,每一单元与土体之间用非线性弹簧联系,以此来模拟桩—土间的荷载传递关系。桩端处土也用非线性弹簧与桩端相联系。这些非线性弹簧的应力—应变关系,即表示桩侧摩阻力 $\tau$ 。(或桩端阻力)与剪切位移 $S$ 间的关系,一般就称作为传递函数。

荷载传递法的研究已有40多年的历史,其间经过Kezdi、佐滕悟、Coyle和Reses、Gardner、Kraft以及国内学者陈竹昌、徐和等人的继承和发展,该法日趋完善。由于概念明确,适用性强,计算简便等特点而深受工程界的喜爱和重视。

求解传递函数的方法有两类。一是解析法,佐滕悟、罗惟德、陈龙珠对该法做过一些研究。解析法简单、近似,有一定的实用价值;二是位移协调法,此类方法由Seed和Coyle等提出。它是用实测方法求得传递函数曲线,因得到的曲线一般较为复杂,难以用简单的数学关系式描述,无法直接用解析法求解,必须根据平衡条件和位移协调原则,经过反复试算求得桩侧摩阻力和轴力。

## 1 荷载传递函数的修正

用荷载传递法分析单桩受力机理的关键在于选择能真实反映桩—土共同作用机理的传递函数。目前,传递函数法由于假定桩侧任何点的位移只与该点上的摩阻力有关,即忽视了土的连续性,以致在理论上受到一定的限制。对于短桩,影响不大;对于超长桩,可能会产生较大的误差。具体表现在,多数超

长桩的实测结果表明，当桩端有较大的位移时，桩端阻力较小，甚至为零。这与下面式(1)的理论解释相矛盾。为了克服上述不足，曹汉志曾提出桩尖位移等效法，庄卫林等提出一种含桩身坐标的传递函数，来消除未考虑土体连续性所带来的误差。上述两种做法虽有一定的效果，但计算过程较为复杂，计算参数确定也较困难，有必要对此作进一步的研究与探讨。

单桩在轴向荷载作用下，其沉降量由下述三部分组成：

- (1) 桩体本身的弹性压缩量；
- (2) 由于桩侧摩阻力向下传递，引起桩端土体压缩所产生的桩端沉降；
- (3) 由于桩端荷载引起桩端下土体压缩所产生的桩端沉降。

荷载传递法略去的正是上述三项中的第二项，这不仅表现在桩端处，还表现在桩顶到桩端的任一截面处，而且随着桩长的增大，所带来的误差也在增大。笔者通过对近50根短桩、中长桩和超长桩实测桩侧摩阻力的优化分析发现，由桩侧土体连续而引起的桩体位移分布规律可用图1表示。

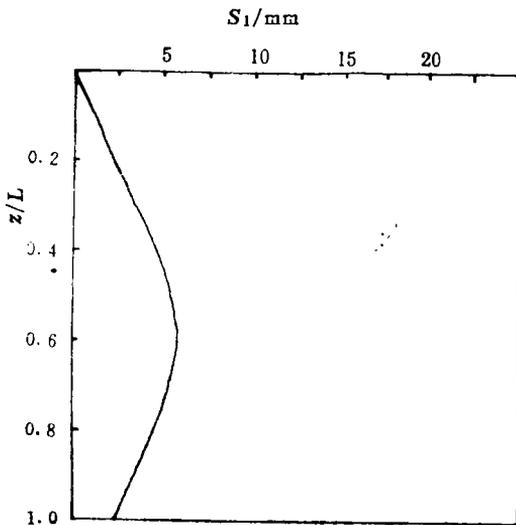


图1 土体连续性产生的桩侧土体位移示意

这里需要说明的是：图1所示的因土体连续性而产生的桩侧土体位移分布是上小下大，中部最大。它与桩侧摩阻力、桩埋深等有关，这里给出的仅仅是示意图，在实际计算中应视桩侧土体、桩长等具体情况确定。

根据桩侧摩阻力实测资料，目前传递函数通常取下式：

$$\tau(z) = \frac{aS}{b+S} \tag{1}$$

式中  $\tau(z)$  ——为桩侧摩阻力；

$S$  ——桩身位移；

$a, b$  ——岩土参数。

则式中 $S$ 应扣除土体连续性所引起的位移，这样，才能真正反映位移传递函数的本来用意。

为简便而又真实地反映式(1)未考虑土体连续性所引起的误差，笔者在分析大量超长桩、中长桩和短桩实测荷载传递曲线的基础上提出，用下式表式因土体连续性所产生的位移 $S_1$ 。

$$S_1 = C \left( \frac{z}{L} \right)^{1.5} S \tag{2}$$

式中  $C$  ——综合参数，按表1取值，它可分层取值，本文只取一个值；

$z$  ——竖向坐标，桩顶处 $z=0$ ；

$L$  ——桩长。

表1 C值取值范围

桩长/m	>45	45~30	30~10	<10
C	0.75~0.30	0.50~0.20	0.35~0.10	<0.10

这样，式(1)就改写为：

$$\tau(z) = \frac{aS [1 - C (z/L)^{1.5}]}{b+S [1 - C (z/L)^{1.5}]} \tag{3}$$

式(3)所示的方程就是本文用来分析超长桩受力机理的传递函数。对于桩身和桩端都用该式，只是 $a, b$ 取值不同而已。 $C$ 值的取值范围是笔者通过对实测桩侧摩阻力的优化反分析后，再加以统计分析得到的。具体取

值时, 当桩长或荷载较大取高值, 反之取低值。

## 2 荷载传递法计算过程

如图2所示, 在桩上任意深度  $z$  处取一单元体, 由静力平衡条件得到:

$$\frac{dP(z)}{dz} = -U \cdot \tau(z) \quad (4)$$

式中  $P(z)$  —— 桩轴向力;  
 $\tau(z)$  —— 桩侧摩擦力;  
 $U$  —— 桩截面周长。

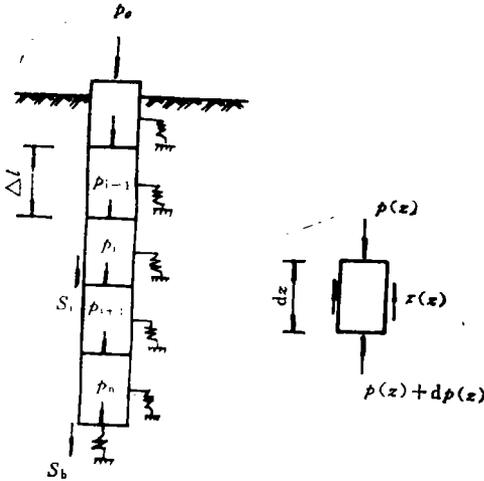


图2 桩的计算模式

假定桩在深度  $z$  处的位移为  $S$ , 则有:

$$P(z) = -EA \frac{ds}{dz} \quad (5)$$

式中  $E$  —— 桩弹性模量;  
 $A$  —— 桩的截面积。

将式(5)求导并代入式(4)得:

$$\frac{d^2 S(z)}{dz^2} - \frac{U}{EA} \tau(z) = 0 \quad (6)$$

式(6)就是传递函数法的基本微分方程, 它的求解取决于传递函数  $\tau(z) - S$  的形式。

据前面所述, 将式(3)代入式(6), 然后用分段直接计算, 就可以得到桩轴力分布图以及桩顶荷载—沉降曲线等。

取桩的压缩变形为正, 轴力以受压为正, 利用方程(4)和(5)得:

$$dP = U \cdot \tau(S) dz \quad (7)$$

$$ds = P \cdot dz / E \cdot A \quad (8)$$

在考虑场地工程地质条件的情况下, 可把桩分成若干段, 如  $N$  段。令各段分界点的编号为  $n=0, 1, 2, \dots, N$ 。在  $n=0$  处即为桩顶,  $P_0$  即为桩顶荷载,  $S_0$  为桩顶沉降。在  $n=N$  处即为桩端,  $P_N$  为桩端阻力,  $S_N$  为桩端位移。计算时从桩顶开始, 先假设一个桩端位移, 具体计算过程如下:

(1) 假设一个桩端位移  $S_b$ , 然后用下式计算桩端阻力  $R_b$ ,

$$R_b = A_b \tau(S_b) \quad (9)$$

式中  $A_b$  为桩端截面积,  $\tau(S_b)$  为桩端荷载传递函数, 其具体形式为:

$$\tau(S_b) = \frac{aS_b(1-C)}{b \pm S_b(1-C)} \quad (10)$$

显然有:  $P_N = R_b$ ,  $S_N = S_b$ 。

(2) 对桩最底下一段, 即  $N$  段进行计算。先假定第  $N$  段桩位移为  $S_b$ , 计算  $\Delta P$ :

$$\Delta P = \Delta L \cdot U \cdot \tau(S_b) \quad (11)$$

式中  $\tau(S_b)$  即为桩侧土荷载传递函数,  $\Delta L$  为最底下一段桩长。

(3) 利用下式计算第  $N$  段的压缩量, 即

$$\Delta S = (P_N + \Delta P / 2) \Delta L / E \cdot A \quad (12)$$

(4) 再计算  $\Delta P$ , 此时位移值取  $S_N$  和  $S_{N-1}$  的平均值, 于是

$$\Delta P = \Delta L \cdot U \tau(S_b + \Delta S / 2) \quad (13)$$

(5) 重复第3、4步计算, 直到收敛为止, 即  $\Delta S$  和  $\Delta P$  保持不变, 然后计算轴力  $P_{N-1}$  和  $S_{N-1}$ , 即:

$$P_{N-1} = P_N + \Delta P \quad (14)$$

$$S_{N-1} = S_N + \Delta S \quad (15)$$

(6) 第  $N$  段计算结束后, 计算第  $N-1$  段, 并以  $P_{N-1}$  和  $S_{N-1}$  作为第  $N-1$  段的起始轴力和桩的位移, 重复第2~5步计算, 这样一直计算到最上面一段为止。由此可以得到桩顶轴力和沉降, 桩顶轴力即为桩顶荷载。

(7) 若已知桩顶荷载, 则可通过不断

调整桩端位移 $S_b$ 值, 重复以上1~6步, 直到计算的桩顶荷载与实际值相差很小为止。

### 3 实例

本节首先对某地单桩静载试验的 $P-s$ 曲线进行优化反分析<sup>[1]</sup>, 优选出岩土参数, 然后用本文提出的计算方法对该桩的荷载传递规律进行分析, 并将计算结果与实测结果相对比, 用以证明本文所提出的传递函数的合理性。

#### 3.1 过程概况

苏州某地拟建一幢38层、高148m的大楼。主楼采用钻孔灌注桩基础, 桩径 $\phi 800$

mm, 设计桩长55.4m, 桩入土深度 $L = 65$ m。根据桩基设计单位的要求, 该工程共进行三组静载试验。在试验桩桩身内不同部位设置量测元件, 量测设计桩长的单桩承载力、桩侧摩阻力和桩端抵抗力。

#### 3.2 计算参数选取

根据工程地质勘测报告, 确定出各层土的 $a$ 、 $b$ 取值上下限。用黄金分割法对各层土的 $a$ 、 $b$ 值进行优选<sup>[1]</sup>。桩长范围内的土体分为8层, 包括桩端两个参数和 $c$ 值, 共有19个待求参数值。各层岩土参数优选值见表2。 $c$ 的初始值为0.5, 优化值为0.42。

表2 参数 $a$ 、 $b$ 的初始值和优化值

层数	参数范围		a		b	
	a	b	初 值	优化值	初 值	优化值
1	20~60	0.5~5.0	50	34.50	0.5	0.65
2	20~100	0.5~5.0	50	71.00	0.5	3.29
3	20~100	0.5~5.0	50	67.40	3.0	3.20
4	20~100	0.5~5.0	50	73.10	3.0	2.49
5	20~80	0.5~5.0	50	45.90	4.0	2.87
6	20~100	0.5~5.0	50	55.43	5.0	3.47
7	40~200	0.5~5.0	100	150.00	5.0	3.69
8	60~400	0.5~5.0	300	345.80	5.0	4.44
桩端	300~3000	0.5~10.0	2000	2876.90	5.0	5.48

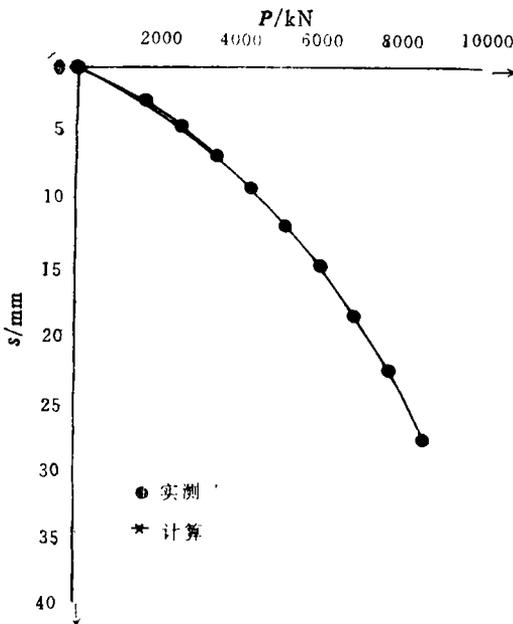


图3 实测与计算的桩顶荷载—沉降曲线

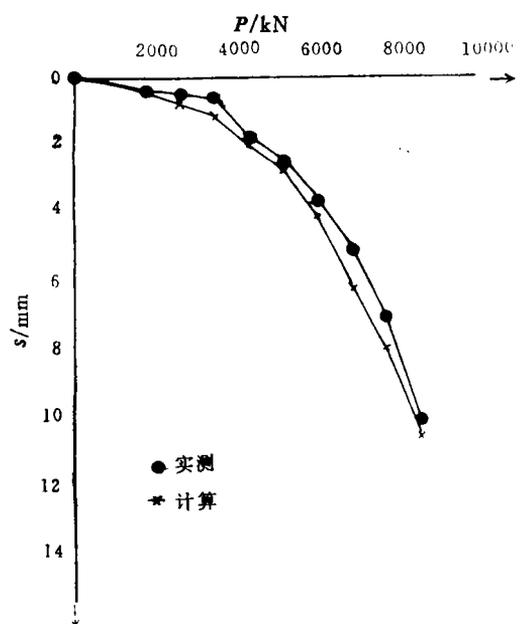


图4 实测与计算的桩端阻力—沉降曲线

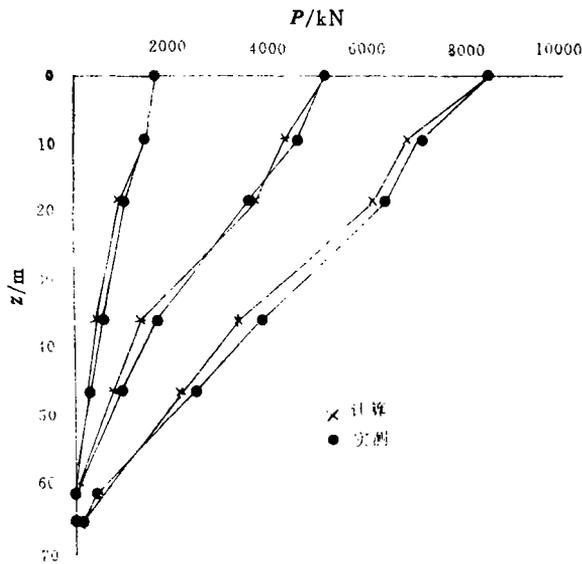


图5 桩轴力的计算值与实测值

### 参 考 文 献

- 1 阳吉宝. 超长桩荷载传递机理与桩箱(筏)基础优化设计研究. 博士学位论文. 同济大学地下建筑与工程系, 1996.08
- 2 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手

### 3.3 计算结果分析

图3和图4分别为用反分析所得到的参数计算出的桩顶荷载—沉降曲线和桩端阻力—位移曲线。图5为桩体轴力图。

从图3~图5可见：本文修正后的传递函数能较好地反映桩顶荷载沿桩体的传递规律。

### 4 结 论

本文在优化拟合桩侧摩阻力的基础上，对现有荷载传递函数加以修正。实例计算表明：修正后的荷载传递函数能较好地反映超长桩的荷载传递机理。

册. 北京：中国建筑工业出版社，1995

- 3 潘时声. 桩的刚度计算. 岩土工程学报, 1996, 18 (1)

收期日稿：1996-10-07

## 欢迎订阅1997年《岩土工程师》

《岩土工程师》是1989年创办的一份面向国家经济建设、贴近工程、理论联系实际的专业性刊物。

《岩土工程师》刊登岩土工程方面的学术论文、研究报告、工程报导和实录、经验总结、专题评述、试验与监测以及技术通讯等文章和报导，还开辟规范介绍、岩土工程界、国外译文、问题讨论以及学术活动与会议信息等栏目，形式多样、内容丰富。

《岩土工程师》的读者对象是从事岩土工程勘测、设计、施工、监测和科研、教

学的广大专业技术人员。《岩土工程师》也将是土建工程技术人员的一份有益的参考读物。

《岩土工程师》为季刊，16开本，每期正文64页。1997年每期工本费4.50元，另收邮寄费1.75元，全年25元。另外1991~1996年各期尚有少量余额，还备有1991~1995年的合订本，每本20元。欢迎各单位和个人订阅。欲购者请来信索取订单。地址：宁波市南站东路2号望湖大楼《岩土工程师》编辑部；邮编：315010；电话：0574-7317948，或直接通过邮局汇款。