

# 大直径桩荷载传递规律的试验及理论研究

肖宏彬<sup>1,2</sup> 刘杰<sup>1,2</sup> 王永和<sup>2</sup>

(1, 株洲工学院土木工程系, 株洲 412008) (2, 中南大学土建学院, 长沙 410075)

**【摘要】** 用室内直剪摩擦试验和压缩试验测定桩侧不同深度土层及桩端土层的荷载传递参数, 根据桩-土共同作用理论分析桩的荷载-沉降关系及桩的荷载传递规律, 为确定大直径桩的承载力提供了一种新的非破坏性的室内试验与理论分析相结合的方法, 其分析结果与现场荷载试验结果完全吻合。

**【关键词】** 大直径桩; 直剪摩擦试验; 荷载传递

**【中图分类号】** TU473

## Experimental and Theoretic Studies on the Law of Load Transfer of Large-Diameter Pile

**【Abstract】** Using direct shear friction and consolidation test to determine the load transfer parameters of soil surrounding the pile in different depth or beneath the pile tip, based on the theory of pile-soil interaction, the relationship of load-settlement and the law of load transfer have been studied. A new nondestructive method that combination with indoor test and theoretic analysis is presented. Comparison is made between the results obtained by the proposed method and the load test data and close agreement has been found, thus verifying the reliability of the proposed method.

**【Key words】** large-diameter pile; direct shear friction test; load transfer

### 0 引言

随着高层建筑、城市立交和高速公路的发展, 大直径桩、大直径空心桩 ( $D \leq 3$  m), 由于具有承载力高、变形小、整体刚度大、节约投资得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。由于这类桩的承载力很大, 要根据常规的现场荷载试验来确定桩完整的荷载-沉降曲线 ( $P-s$  曲线), 是很困难的。许多学者致力于用荷载传递方法确定桩的荷载-沉降关系的理论研究<sup>[2~4]</sup>。但是, 用理论方法确定桩的荷载-沉降关系的关键是要准确地确定桩-土荷载传递参数  $a$  和  $b$ 。张明义、邓安福在研究静力压桩的贯入摩阻力时用改装的直剪试验测定桩-土滑动摩擦(以下简称直剪摩擦试验)的试验方法为解决这一问题提供了一种新的思路<sup>[5]</sup>。本文用这种直剪摩擦试验(进一步改装后)来测定桩侧不同深度土层的荷载传

递参数, 对于桩端土采用压缩试验测定其荷载传递参数, 通过数值迭代分析方法<sup>[3]</sup>得到桩的完整的  $P-s$  曲线和桩身荷载传递规律, 并与现场荷载试验结果对比完全吻合。

### 1 试验方法

#### 1.1 桩侧土的直剪摩擦试验

用理论方法分析桩的荷载传递规律和荷载-沉降关系, 通常采用荷载传递模型(见图1)和桩-土共同作用模型(见图2)。图1所示的荷载传递模型的数学表达式为:

$$\text{对于桩侧: } \tau = \frac{s}{a + b_s} \quad (1)$$

$$\text{对于桩端: } \sigma = \frac{s_b}{a_b + b_b s_b} \quad (2)$$

式中:  $\tau$  为桩侧摩阻力,  $\sigma$  为桩端反力,  $s$  和  $s_b$  为桩身或桩端沉降,  $a, b$  和  $a_b, b_b$  分别为桩侧和桩端土的荷载传递参数。

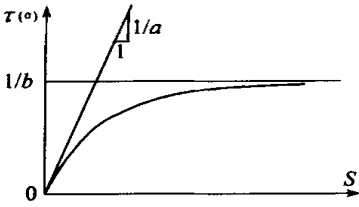


图1 土的荷载传递模型图

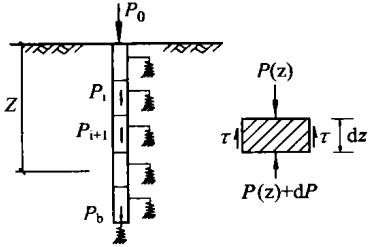


图2 桩-土共同作用模型图

为了确定图1中的荷载传递参数  $a$  和  $b$ ，许多学者提出了经验公式<sup>[6][7]</sup>。由于这些经验公式不能准确地反映桩和土的实际情况，使得理论分析受到了很大的局限。根据文献[5]提供的试验方法，用直剪摩擦试验来测定桩侧土的荷载传递参数。为了避免在直剪试验中剪切面不断变小而影响摩擦阻力试验结果，本试验将原直剪仪底盒直径加大 20 mm，底盒内垫砧板，其余同文献[5](见图3)。

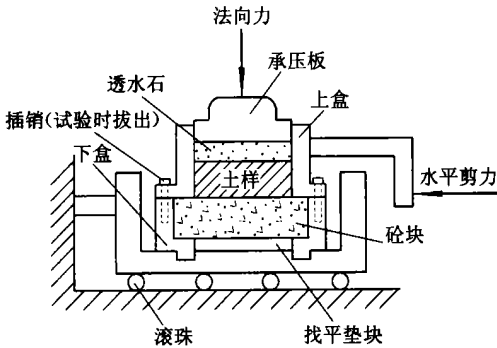


图3 改装后的直剪摩擦试验仪示意图

为了考虑桩侧摩擦阻力沿深度的变化，在桩侧每一天然土层中沿桩身取上、中、下三个土样做直剪摩擦试验。根据各土样在天然土层中的深度计算出相应位置处的自重应力和侧土压力。由于桩-土之间的剪切滑动面发生在紧靠桩表面的土体中，因此，与直剪试验相应

的法向压力就是土体在天然状态下所受到的侧土压力。即：

$$\sigma_0 = k_0 \gamma z \tag{3}$$

$$k_0 = 1 - \sin \varphi \tag{4}$$

式中： $k_0$ 为相应土层的静止土压力系数， $\varphi$ 为相应土层的有效内摩擦角。由室内三轴试验得到。每个土样按直剪试验方法装入剪力盒后，据式(3)计算所需施加的法向应力，用 1 mm/s 的速度对土样进行剪切(试验方法与直剪试验同)，并记录相应的  $\tau$  和  $s$ ，可绘出  $\tau-s$  曲线。对试验曲线用式(1)所示的双曲线函数进行拟合可得到土的荷载传递参数  $a$  和  $b$ 。由式(1)和图1知：

$$\frac{1}{a} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\Delta \tau}{\Delta s} = \tau'(s) \tag{5}$$

$$\frac{1}{b} = \lim_{s \rightarrow \infty} \tau = \tau_{\max} \tag{6}$$

即： $1/a$ 就是  $\tau-s$  曲线起始点的切线斜率， $1/b$ 就是试验中得到的最大摩擦阻力。将每一天然土层的上、中、下三个试验结果的平均值作为该天然土层的荷载传递参数用于桩的荷载传递分析。

### 1.2 桩端土的压缩试验

为了测定桩端土的荷载传递参数  $a$  和  $b$ ，本项研究中采用固结仪进行测定。试验时分别记录所施加的法向压力和相应的沉降，可得到桩端土的  $e-p$  曲线。据  $e-p$  曲线可得到土的压缩模量  $E_s$ ，根据土力学原理可得到变形模量  $E_0$ ，即：

$$E_0 = \beta E_s \tag{7}$$

式中： $\beta = 1 - 2\mu k_0$ ， $\mu$ 为土的泊松比， $k_0 = 1 - \sin \varphi$ ， $\varphi$ 为土的有效内摩擦角。

Randolph(1979)建议桩端土的位移方程可用 Boussinesq 公式求解<sup>[2]</sup>，即

$$s_b = \frac{p_b d \omega (1 - \mu^2)}{E_0} \tag{8}$$

根据土的载荷试验知，当荷载较小时， $p_b - s_b$  曲线近似为直线，其斜率即为式(2)中的  $1/a_b$ 。故据式(8)有：

$$1/a_b = \frac{p_b}{s_b} = \frac{E_0}{\omega d(1-\mu^2)} = \frac{\beta E_s}{\omega d(1-\mu^2)} \quad (9)$$

桩端土的最大反力即为式(2)中的  $1/b_b$ 。据 Terzaghi 极限承载力公式可得:

$$1/b_b = p_u = cN_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma d N_\gamma \quad (10)$$

式中:  $p_u$  为地基土的极限承载力;  $q = \sum_{i=1}^n \gamma_i l_i$ ,  $\gamma_i$  为桩端平面以上第  $i$  层土的重度,  $l_i$  为桩端平面以上第  $i$  层土的厚度;  $\gamma$  为桩底土的重度;  $d$  为桩端直径;  $N_c$ 、 $N_q$ 、 $N_\gamma$  为 Terzaghi 极限承载力系数。

## 2 桩的荷载-沉降关系分析

据直剪摩擦试验和固结试验得到的桩侧土和桩端土的荷载传递参数后,用文献[3]的迭代分析方法可得到桩顶的  $P$ - $s$  曲线及桩身轴力沿深度的分布。

$$\Delta p = \frac{\alpha s}{p(\alpha + b \cdot s)} \Delta s \quad (11)$$

式中:  $\alpha = u_p EA$ ,  $u_p$  为桩的周长,  $E$  为桩身材料的弹性模量,  $A$  为桩身横断面积。

将桩身分成几个小分段,取每小段的长度为 1 m 左右,每次设定一个桩端沉降  $s_b$ ,计算  $n$  分段的顶面沉降  $s_{n-1}$  和轴力  $P_{n-1}$ ,然后根据  $s_{n-1}$  和  $P_{n-1}$  计算第  $n-1$  段的顶面轴力  $P_{n-2}$  和沉降  $s_{n-2}$ ,……。一直计算到桩顶得到  $P_0$  和  $s_0$ ,假定不同的  $s_b$  计算得到不同的  $P_0$  和  $s_0$ ,从而可绘出  $P_0$ - $s_0$  曲线。据  $P_0$ - $s_0$  曲线可确定桩的极限承载力。分析过程中需要对每个小分段进行迭代计算,以保证足够的计算精度。

## 3 实例分析

株洲某工程采用人工挖孔桩,桩径  $D = 1.2$  m,桩长 17 m,土层见图 4。在挖孔过程中,分别在 A-G 点取土样做直剪摩擦试验,得到相应土层的荷载传递曲线(见图 5)。由桩端土层的压缩试验得到 H 点土的压缩模量  $E_s$ 。各土层的侧土压力系数  $k_0$  为:

$$k_{01} = 1 - \sin \varphi_1 = 1 - \sin 22^\circ = 0.625$$

$$k_{02} = 1 - \sin \varphi_2 = 1 - \sin 24.5^\circ = 0.585$$

$$k_{03} = 1 - \sin \varphi_3 = 1 - \sin 26.5^\circ = 0.554$$

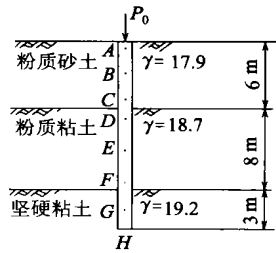


图 4 桩身土层分布示意图

直剪摩擦试验时,根据计算得到各土样需施加的法向应力见表 1

表 1 直剪摩擦试验时,各土样施加的法向应力表

编号	A	B	C	D	E	F	G
$\sigma/kPa$	5.59	33.56	61.53	68.30	106.59	144.88	158.33

在 A~G 各点的平面位置取四个土样,对每组的四个土样结果取平均值得到该位置的荷载传递参数。据直剪摩擦试验得到各土层的  $\tau$ - $s$  曲线见图 5。

据压缩试验结果得到桩端土层的压缩模量为  $E_s = 53.6$  MPa,由式(9)得:

$$1/a_b = \frac{\beta E_s}{\omega d(1-\mu^2)} = 41.5, \text{MN/m}^3$$

由式(10)得到:

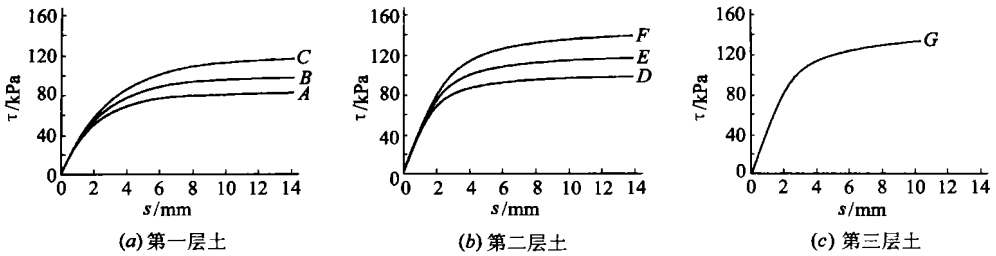
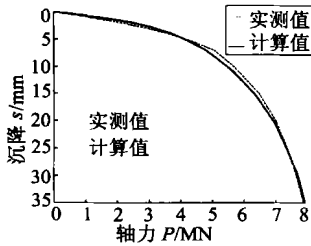
$$1/b_b = cN_c + qN_q + \frac{1}{2} \gamma d N_\gamma = 2.73, \text{MPa}$$

根据试验结果整理得到各土层的平均荷载传递参数,见表 2。

表 2 桩侧各土层的平均荷载传递参数

土 层	第一层	第二层	第三层	桩端土
$(1/a)/(MN \cdot m^{-3})$	20	36	39.2	41.5
$(1/b)/MPa$	0.098	0.12	0.14	2.73

据分析得到桩的荷载-沉降曲线见图 6。图 6 中虚线为成桩后现场荷载试验结果。从图上可以看出按室内试验分析得到的  $P$ - $s$  曲线与现场荷载试验得到的  $P$ - $s$  曲线非常吻合,从而证明了本文方法的可靠性和正确性。

图5 桩侧各土层的  $\tau$ - $s$  曲线图图6 桩顶实测与计算的  $P$ - $s$  曲线图

按本文方法计算得到的不同的桩顶荷载作用下桩身轴力分布图见图7。与许多学者的实测结果得到的分布图是一致的。

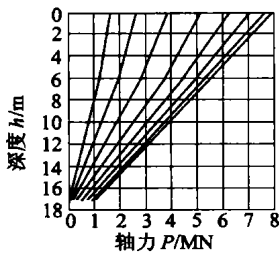


图7 轴力沿桩身的分布图

#### 4 结论

1) 利用室内直剪摩擦试验和压缩试验测定土的荷载传递参数用于分析桩的荷载-沉降关系是简便、可行的, 对于大直径桩当做完整的现场荷载试验有困难时, 可以用室内试验结果进行分析。

2) 对于大直径桩, 根据许多学者的研究其荷载-沉降关系呈缓变型曲线的特点<sup>[7]</sup>, 这与按双曲线荷载传递函数分析得到的结果是一致的。因此, 用荷载传递方法分析大直径桩的荷载-沉降关系是特别合适的。

3) 对于桩端土层, 用室内压缩试验测定其

压缩模量, 据弹性力学公式反算土的荷载传递参数  $1/a_0$  是可行的。因为桩端土的荷载传递曲线与荷载试验测得到土的压力-沉降曲线是一致的。考虑桩端土的埋深较一般浅基础大, 因此桩端土受到的侧向压力也就较大, 对  $\beta$  的取值应根据试验经验做适当的修正。

4) 用 Terzaghi 极限承载力公式计算桩端土的荷载传递参数  $1/a_0$  能较好地反映桩端土的埋深及桩端直径的影响。对于桩端土为软粘土和松砂的情况, 宜采用修正的 Terzaghi 极限承载力公式计算将更为合理。

5) 对于嵌岩桩, 桩-岩之间的荷载传递参数可直接由岩石的室内力学试验得到。

#### 参 考 文 献

- 1 王伯惠, 上官举. 中国钻孔灌注桩新发展. 北京: 人民交通出版社, 1999. 1~55
- 2 朱百里, 沈珠江. 计算土力学. 上海: 上海科技出版社, 1990. 223~251
- 3 肖宏彬, 钟辉虹等. 单桩荷载-沉降关系的数值模拟方法. 岩土力学, 2002, 23(5): 592~596
- 4 Carrubba, Paolo. skin friction of large-diameter piles socketed into rock. J of Can Geotech, 34: 230~240.
- 5 张明义, 邓安福. 桩-土滑动摩擦的试验研究. 岩土力学, 2002, 23(2): 246~249
- 6 Wei Dong Guo, Mark F Randolph. Rationality of load transfer approach for pile analysis. Computers and Geotechnics, 34(23): 85~112
- 7 刘金砺. 桩基础设计与计算. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990. 95~174

收稿日期: 2002-08-13