

# 明特林法计算桩沉降量中的一些探讨

何德彦 施云华

(中国船舶工业勘察设计院, 上海 200063)

**【摘要】** 随着上海地区高层、超高层的日趋增多及沉降控制复合桩基的出现, 按明特林法计算桩基沉降的结果较实体基础法更接近实际情况。就明特林法计算桩基沉降中的一些问题进行了探讨, 使计算结果与实际试桩结果更为接近。

**【关键词】** 明特林法; 畸变; 沉降

**【Abstract】** The settlement calculated by the Mindlin method is more approaching to one of reality for pile foundation with the increase of tall—storey and supertall—storey buildings in Shanghai and the appearance of composite pile foundation to control settlement. The some problems calculated the settlement of pile foundation by the Mindlin method are discussed. Compared with the other methods its calculating result is better.

**【Key words】** Mindlin method; distortion; settlement

## 1 明特林法

目前上海应用广泛的桩基沉降计算方法是上海规范推荐的等代实体基础法, 随着上海地区高层、超高层的日趋增多及沉降控制复合桩基的出现, 由于等代实体基础法不能很好地考虑小桩台、轴线桩、稀桩及不同桩长组成的桩基中桩距及桩型等因素的影响, 其适用性受到限制。上海市标准地基处理规范提出一种适用于软土中单桩和群桩沉降的半理论半经验的实用方法<sup>①</sup>。该方法假设: (1) 近似认为单桩及群桩中各桩的荷载传递规律基本相同; (2) 近似认为桩侧阻力和桩端阻力与桩顶荷载的比例与桩顶荷载无关且均为常量, 均取极限状态下单桩极限侧阻力及单桩极限端阻力与单桩极限荷载的比值; (3) 桩侧阻力分布规律: 一般情况下均可采用沿桩长线性增加的假定; (4) 桩端阻力分布规律: 一般情况下视作集中力。根据以上假设采用盖

斯特将弹性理论中的明特林解导出的应力计算公式<sup>②</sup>, 侧阻力考虑沿桩侧线性增加及均匀分布二种情况, 端阻力按集中力考虑, 桩荷载在地基中任一点产生的竖向应力为:

$$\sigma_z = \sigma_{zb} + \sigma_{zs} \quad (1)$$

$$\sigma_{zb} = Q_b I_b / L^2 \quad (2)$$

$$\sigma_{zs} = Q_s I_s / L^2 \quad (3)$$

式中:  $Q_b$ ——桩端阻力, kN;

$Q_s$ ——桩侧阻力, kN;

$\sigma_{zb}$ ——桩端阻力在地基中任一点产生的竖向应力, kPa;

$\sigma_{zs}$ ——桩侧阻力在地基中任一点产生的竖向应力, kPa;

$I_b$ ——桩端阻力应力影响系数, 量纲一的量;

$I_s$ ——桩侧阻力应力影响系数, 量纲一的量;

$L$ ——桩长, m。

① 上海市标准《地基处理技术规范》(DBJ40—90) 第十二章及条文说明。

作者简介: 何德彦, 女, 工程师。1998年毕业于同济大学地下建筑工程系, 现从事岩土工程专业工作。

$$I_b = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \{ -(1-2\mu)(m-1)/A^3 + (1-2\mu)(m-1)/B^3 - 3(m-1)^3/A^5 - [3(3-4\mu)m(m+1)^2 - 3(m+1)(5m-1)]/B^5 - 30m(m+1)^3/B^7 \} \quad (4)$$

桩侧阻力矩形分布:

$$I_s = \frac{1}{8\pi(1-\mu)} \{ -2(2-\mu)/A + [2(2-\mu) + 2(1-2\mu)(m^2/n^2 + m/n^2)]/B - (1-2\mu)^2(m/n)^2/F + n^2/A^3 + [4m^2 - 4(1+\mu)(m/n)^2m^2]/F^3 + [4m(1+\mu)(m+1)(m/n + 1/n)^2 - (4m^2 + n^2)]/B^3 + [6m^2(m^4 - n^4)/n^2]/F^5 + 6m(mn^2 - (1/n^2)(m+1)^5)/B^5 \} \quad (5)$$

桩侧阻力三角形分布:

$$I_s = \frac{1}{4\pi(1-\mu)} \{ -2(2-\mu)/A + [2(2-\mu)(4m+1) - 2(1-2\mu)(m/n)^2(m+1)]/B + [2(1-2\mu)(m^3/n^2 - 8(2-\mu)m)/F + [n^2 + (m-1)^3]/A^3 + [4\mu n^2 m + 4m^3 - 15n^2 m - 2(5+2\mu)(m/n)^2(m+1)^3 + (m+1)^3]/B^3 + [2(7-2\mu)mn^2 - 6m^3 + 2(5+2\mu)(m/n)^2m^3]/F^3 + [6mn^2(n^2 - m^2) + 12(m/n)^2(m+1)^5]/B^5 - [12(m/n)^2m^5 + 6mn^2(n^2 - m^2)]/F^5 - 2(2-\mu)\ln[(A+m-1)(B+m+1)/(F+m)^2] \} \quad (6)$$

其中:  $F = m^2 + n^2$ ;

$$A^2 = n^2 + (m-1)^2;$$

$$B^2 = n^2 + (m+1)^2;$$

$$n = r/L;$$

$$m = z/L;$$

$\mu$  ——土的泊松比;

$z$  ——计算点深度, m;

$r$  ——计算点与桩轴线间水平距离, m。

$D/2$  处( $D$  为桩径)。即

$$\sigma_{zs} = \int_0^{\pi} q_s I_s / L^2 \cdot \frac{D}{2} \cdot d\theta \quad (7)$$

那么, 计算  $I_b$  时该点上的  $n$  值应取  $DL/2$ 。

如果把桩端阻力视作圆形均匀分布荷载, 那么

$$\sigma_{zb} = \int_0^{\frac{D}{2}} \int_0^{\frac{D}{2}} q_b I_b \cdot L^{-2} \cdot r \cdot dr d\theta \quad (8)$$

式中:  $q_s$  ——桩侧阻力, kPa;

$q_b$  ——桩端阻力, kPa;

$D$  ——桩径, m。

据力矩平衡原理积分

$$\int_0^{\frac{D}{2}} \int_0^{\frac{D}{2}} q_b r^2 dr d\theta = \frac{D}{3} \cdot \left( \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot q_b \right)$$

它相当于作用于距桩轴线  $D/3$  处的环形线荷载, 那么计算  $I_b$  时该点的  $n$  值应取  $DL/3$ 。

因此, 在实际计算桩荷载在地基中产生的影响时, 桩侧阻力及桩端阻力并不是简单作用于桩轴线上的。那么, 在计算桩侧阻力

按上式可计算出单桩荷载在地基中任一点产生的竖向应力。但在计算中当  $n=0$  时, 在桩轴线处会出现畸变。为避免这一现象, 规范条文说明中建议取一极小数代入(如  $n=0.002$ ), 近似看做  $n=0$  处的应力。

## 2 桩荷载传递规律

单桩和群桩的荷载传递规律的研究和试验表明, 桩侧阻力分布不仅与桩顶荷载, 位移, 时间有关, 还受施工方法等诸多因素的影响<sup>[2]</sup>。但在实际桩荷载情况下, 无论其分布规律多么复杂, 桩侧阻力产生在桩侧壁与土的接触面之间, 即桩侧阻力作用于距桩轴线

在地基中产生的影响时,以  $n = DL/2$  代替  $n = 0$ ; 计算桩端阻力在地基中产生的影响时,以  $n = DL/3$  代替  $n = 0$ , 是符合实际桩荷载情况下桩侧阻力及桩端阻力分布规律的。并且,它比以  $n = 0.002$  代替  $n = 0$  得出的计算结果更接近实际试桩情况。

### 3 计算实例及分析

3.1 选择不同地层组合中不同类型的桩进行计算

3.1.1 复合桩基中常用的微型桩(美国学校)

桩型: 200mm × 200mm 混凝土预制桩, 桩长 18.0m, 以 ⑤ 为持力层。  $\alpha = 0.10$  ( $\alpha$ ——极限桩端阻力与单桩极限承载力之比)。

桩端附近地层情况见表 1 ( $\mu$  取 0.4)。

表 1 桩端附近地层情况表

地层编号	地层名称	层面埋深 H/m	压缩模量 E <sub>s</sub> /MPa
⑤	灰色粉质粘土	16.0	7.2
⑥	灰绿色粉质粘土	30.0	13.1

试桩结果见表 2。

表 2 试桩及计算结果表

荷 载 P/kN	160	200	240
实测桩顶沉降值 s/mm	2.73	3.93	5.19
按本文方法计算沉降值 s <sub>1</sub> /mm	4.21	5.53	6.87
按 n=0.002 方法计算沉降值 s <sub>2</sub> /mm	9.36	11.55	13.57

3.1.2 摩擦+端承桩(光大大厦)

桩型:  $\phi 650$ mm 钻孔灌注桩, 桩长 37.0m, 以 ⑦ 为持力层,  $\alpha = 0.21$ 。

桩端附近地层情况见表 3 ( $\mu$  取 0.4)。

表 3 桩端附近地层情况表

地层编号	地层名称	层面埋深 H/m	压缩模量 E <sub>s</sub> /MPa
⑦	灰色粉砂	35.8	50.0
⑧	灰色粉质粘土	40.5	12.0

试桩结果见表 4。

表 4 试桩及计算结果表

荷 载 P/kN	1 500	1 800	2 100
实测桩顶沉降值 s/mm	2.18	2.89	3.70
按本文方法计算沉降值 s <sub>1</sub> /mm	3.88	4.80	5.74
按 n=0.002 方法计算沉降值 s <sub>2</sub> /mm	10.57	12.53	13.78

3.1.3 长摩擦型桩(国际商厦)

桩型:  $\phi 800$ mm 钻孔灌注桩, 桩长 59.6m, 以 ⑧<sub>2</sub> 为持力层,  $\alpha = 0.13$

桩端附近地层情况见表 5 ( $\mu$  取 0.4)。

表 5 桩端附近地层情况表

地层编号	地层名称	层面埋深 H/m	压缩模量 E <sub>s</sub> /MPa
⑧ <sub>2</sub>	灰色粉质粘土	58.2	14.6
⑧ <sub>3</sub>	灰色粉质粘土夹粉砂	76.0	20.0

试桩结果见表 6。

表 6 试桩及计算结果表

荷 载 P/kN	2 000	2 500	3 000	3 500
实测桩顶沉降值 s/mm	5.67	7.30	9.72	12.29
按本文方法计算沉降值 s <sub>1</sub> /mm	7.23	9.76	12.31	14.97
按 n=0.002 方法计算沉降值 s <sub>2</sub> /mm	19.21	24.62	30.03	35.35

### 3.2 计算结果分析

由以上算例可以看出,按照本文方法计算的沉降值虽然比按  $n=0.002$  方法计算值更接近实际试桩结果,但它与实际试桩结果还是有区别的,一般比实际试桩略大。这主要有两个原因。(1) 桩在设计荷载作用下其桩端阻力所占比例并不与极限状态时的比例相同,而计算时  $\alpha$  值取其极限端阻力与单桩极限承载力的比值,并假设其值不变,因而计算结果略大,且荷载越小,偏差越大。这正符合由大量试桩证明的那样:荷载水平越低端阻力发挥越少。(2) 由于试桩周期较短,它所测得的沉降并不是桩的最终沉降量,随着时间的推移,桩沉降量也会略有增加。因此,本文的方法计算的单桩最终沉降量比试桩通常要大一些是合理的。

### 4 结论

桩侧阻力及桩端阻力实际作用位置应在距桩轴线  $D/2$  及  $D/3$  处,以  $n=DL/2$  及  $n=DL/3$  代替  $n=0$  进行计算比按  $n=0.002$  代替  $n=0$  计算更符合实际桩荷载情况,且计算结果也更接近实际情况,在小桩台、轴线桩、稀桩及不同桩长组成的桩基计算中效果尤其显著。因此,这种计算方法在工程应用上更合理,具有更广泛的实用意义。

### 参 考 文 献

- 1 Poulos H G Davis E H. Pile Foundation Analysis and Design John Wiley and sons, 1980.
- 2 刘金砺. 桩基础设计计算. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990

收稿日期: 1998-10-06

(上接 29 页)

### 5 结 论

(1) 本文建立模型于三维基坑整体分析对比,在计算容量要求减小较多,速度增大同时,也具有相当精度。

(2) 参考文献[1]提出的护坡桩空间受力简化计算方法经本文分析是简便可行的。

(3) 若支护结构设计中采取承载力控制,则利用空间效应方法以改变桩距为好;采取变形控制,则利用空间效应方法以改变桩径为好。

(4) 上述对比得出较好方法,并未从施工角度,经济角度综合考虑。

### 6 结束语

深基坑支护结构作整体三维有限元分析,更加合理,但由于计算量过大,要求内存过高,在实际设计中较少使用。而本文方法避免了上述问题,而且能考虑空间效应,与参考文献[1]提出的护坡桩空间受力简化计算

方法吻合较好,具有较强的工程实用价值。由于采用有限元方法,适用于大多数支护类型、土质、各种埋深等。

但不足的是不能模拟开挖过程,不能对施工过程作分析,提出有益建议,而且由于采用软件限制,采用弹性土体单元,于实际有出入,只能有待更好软件。

### 参 考 文 献

- 1 黄强. 护坡桩空间受力简化计算方法. 建筑结构, 1981
- 2 杨雪强, 刘祖德, 何世秀. 论深基坑支护的空间效应. 岩土工程学报, 1998
- 3 余志成, 施文化. 深基坑设计与施工. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997
- 4 Qu. C. Y., Chiou. D. C., Wu. T. C journal of geotechnical engineering Threedimensional finit elemnt method analysis of deep excavations 1996

收稿日期: 1998-08-26