

# 建筑基坑支撑结构体系水平刚度系数的计算

杨 敏 熊巨华

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

【摘要】 讨论了单独的桩顶圈梁、内支撑体系和外拉锚杆的水平刚度系数的计算方法。

【关键词】 基坑; 支撑结构; 刚度系数

【Abstract】 The methods to calculate the horizontal stiffness coefficients of beam at the top of pile and bracing system and soil anchor are discussed in foundation excavation.

【Key words】 foundation excavation; bracing structure; stiffness coefficient

基坑围护结构是采用围护墙(又称护坡桩)和内支撑结构(或外拉锚杆)构成的围护体系,来共同承担土体的作用。在水、土压力等外荷载作用下,对围护墙内力和变形进行计算分析,是围护体系设计的重要环节;目前一般是将围护墙和支锚结构分开计算,并考虑两者之间的相互作用。

据中华人民共和国行业标准《建筑基坑支护技术规程》(报批稿)的有关规定,围护墙结构的内力和变形计算值和支点力计算值应根据基坑开挖及地下结构施工过程的不同工况按弹性支点法计算(以  $m$  法为基础的弹性地基梁法),其中第  $i$  层支撑处支点力的计算公式为:

$$T_i = K_{Ti} \cdot (y_i - y_{0i}) \quad (1)$$

式中:  $K_{Ti}$  ——水平刚度系数,  $\text{kN}/\text{m}^2$ ;

$y_i$  ——第  $i$  层支撑处的水平位移值,  $\text{m}$ ;

$y_{0i}$  ——第  $i$  层支撑处在支撑设置前的

水平位移值,  $\text{m}$ 。

## 1 桩顶圈梁的水平刚度系数

采用桩顶圈梁可以使分离的挡土桩的水平联系加强,有效控制和改善基坑围护结构的内力和变形。实践证明,采用合理的圈梁布置形式,可以有效地减少和控制围护桩的桩顶水平位移。因此在分析和计算挡土桩的内力、位移时,应该考虑圈梁的支承效应,用刚度为  $K_T$  的弹簧模拟之。所以水平刚度系数  $K_T$  的确定就显得尤为重要。圈梁对挡土桩的侧向水平约束刚度取决于圈梁的侧向变形系数,而且沿圈梁的长度方向是变化的,刚度系数在其跨中是最小的。

设圈梁侧向承受均布荷载,圈梁作为两端固支梁(或连续梁),则圈梁跨中的刚度为:

$$K_T = \frac{384 \cdot EI' \cdot S}{l^3} \quad (2)$$

式中:  $EI'$  ——圈梁的侧向抗弯刚度,  $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ ;

$l$  ——圈梁的计算跨度,  $\text{m}$ ;

$S$  ——相邻挡土桩的桩间距,  $\text{m}$ 。

若将圈梁作为简支梁来处理, 则相应的刚度为:

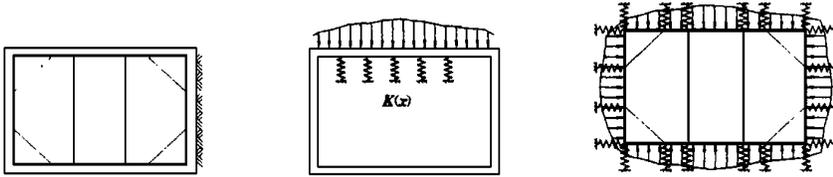
$$K_T = \frac{384 \cdot EI'}{5 \cdot l^3} \cdot \frac{S}{l} \quad (3)$$

上两式是针对直线圈梁的, 对以压弯为主或只承受压的曲线拱圈梁则当别论了。

### 2 内支撑结构体系的水平刚度系数

图 1a 所示的围护体系, 将围护墙和内支

撑结构分开计算时, 各部分的计算模型如图 1b 和 1c 所示, 图中的弹性支座即是考虑围护墙和内支撑结构之间的相互作用而设置的, 弹性支座的弹簧刚度系数就定义为支撑结构的水平刚度系数。



(a) 围护结构体系 (b) 围护墙计算 (c) 内支撑结构计算

图 1 基坑围护结构的简化计算模型

根据刚度定义有:  $K_T(x) = \frac{q(x)}{\delta(x)}$  (4)

式中:  $K_T(x)$ ——内支撑结构上任意点对围护墙的刚度系数,  $kN/m^2$ ;

$q(x)$ ——围护墙对内支撑结构上任意点的水平作用力,  $kN/m$ ;

$\delta(x)$ ——内支撑结构上任意点的法向位移,  $m$ 。

假定  $q(x)$  沿内支撑结构周边均匀分布, 则可求得内支撑结构在均布荷载作用下的变形, 由此可得内支撑结构任意点的水平刚度系数为:

$$K_T(x) = \frac{q}{\alpha(x)} \quad (5)$$

当基坑形状为长条形, 且内支撑型式为对撑时, 其支撑刚度系数的计算方法如下。图 2 是均匀布置对撑的长条形基坑的示意图, 根据对称性将其简化成图 3a 所示的计算简图, 由静力平衡条件得:

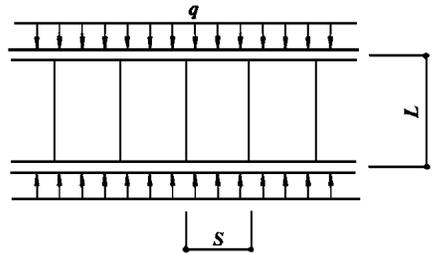


图 2 内支撑结构水平刚度系数的计算

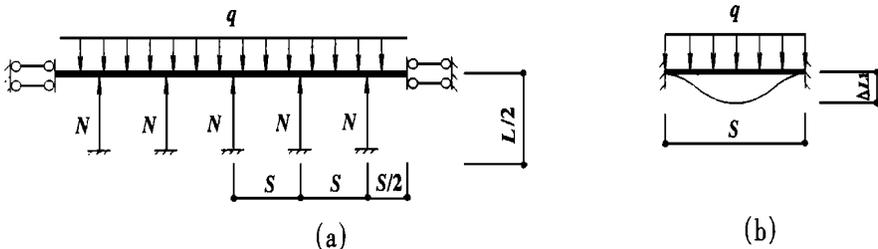


图 3 内支撑结构水平刚度系数计算公式的推导

$$\sum Y=0 \text{ 即 } n \cdot N=n \cdot q \cdot S \quad (6)$$

$$\text{支撑的轴力 } N=q \cdot S \quad (7)$$

$$\text{支撑的压缩变形 } \Delta L=\frac{N \cdot L / 2}{E_z \cdot A_z} \quad (8)$$

由此可得支撑点的水平刚度系数

$$K_T=\frac{q}{\Delta L}=\frac{2 \cdot E_z \cdot A_z}{S \cdot L} \quad (9)$$

对图 3b 所示的单跨梁, 其中点挠度为

$$\Delta L_1=\frac{q \cdot s^4}{384 \cdot E_j \cdot I_j} \quad (10)$$

故两支支撑中点的水平刚度系数等于:

$$K_T=\frac{q}{\Delta L+\Delta L_1}=\left[\frac{S \cdot L}{2 \alpha E_z \cdot A_z}+\frac{S^4}{384 \cdot E_j \cdot I_j}\right]^{-1} \quad (11)$$

当内支撑布置为角撑或角撑加对撑时, 水平刚度系数  $K_T$  可按下式计算:

$$\text{支撑点处: } K_T=\frac{2 \cdot a \cdot E_z \cdot A_z}{L \cdot S} \sin \theta \quad (12)$$

两支支撑中点:

$$K_T=\left[\frac{S \cdot L}{2 \cdot E_z \cdot A_z} \sin \theta+\frac{S^4}{384 \cdot E_j \cdot I_j}\right]^{-1} \quad (13)$$

将式(11)和式(13)合并, 并注意到实际工程中的施工效率问题, 可得到以下统一的内支撑结构水平刚度系数计算公式为:

$$K_T=\frac{2 \cdot a \cdot E_z \cdot A_z}{L \cdot S} \times \left[\frac{1}{1+\frac{a \cdot E_z \cdot A_z \cdot x^4}{12 \cdot L \cdot S \cdot E_j \cdot I_j}} \sin \theta\right] \quad (14)$$

式中:  $\alpha$ ——与支撑松弛有关的折减系数, 量

纲一的量; 它取决于施工误差、圈梁的变形以及混凝土蠕变引起的内支撑梁刚度的降低, 一般取  $\alpha=0.5 \sim 1.0$ ;

$E_z$ ——支撑构件材料的弹性模量, kPa;

$A_z$ ——支撑构件断面积,  $\text{m}^2$ ;

$L$ ——支撑构件的受压计算长度, m;

$S$ ——支撑的水平间距, m;

$E_j$ ——腰梁材料的弹性模量, kPa;

$I_j$ ——腰梁断面惯性矩,  $\text{m}^4$ ;

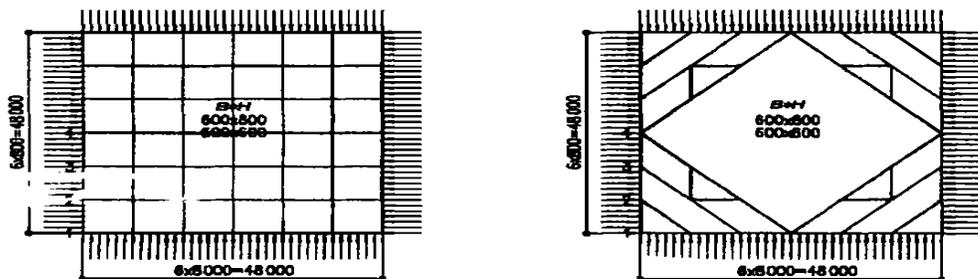
$x$ ——计算点到支撑点的距离, m;

$$(0 \leq x \leq L)$$

$\theta$ ——角撑与腰梁之间的夹角, 当内支撑系统为对撑时  $\theta=90^\circ$ 。

图 4 为两种典型的支撑结构布置形式即对撑结构和角撑结构。腰梁和支撑均为钢筋混凝土, 标号 C30, 弹性模量 30 000 MPa, 腰梁断面尺寸为 0.6m×0.8m, 支撑断面尺寸为 0.6m×0.6m。在对撑结构中, 支撑间距 8m, 支撑计算长度 48m, 取折减系数 1.0, 将有关数据代入式(14)计算得到水平支撑刚度系数为 31.58MN/m<sup>2</sup>。在角撑结构中, 支撑间距 8m, 支撑计算长度 33.94m, 取折减系数 1.0, 支撑与腰梁夹角 45°, 将有关数据代入式(14)计算得到水平支撑刚度系数为 26.72MN/m<sup>2</sup>。

对于简单的对撑或角撑的情况, 式(14)



(a)对撑结构 (b)角撑结构  
图 4 两种常用的支撑结构型式

无疑是采用手算来计算内支撑结构水平刚度系数的快捷有效的方法。但是,对于内支撑结构布置形式复杂的情况,该计算公式就无能为力了。比较有效的方法是将整个内支撑体系当成一个平面框架体系,在其周边作用一个单位荷载,运用有限单元法计算腰梁各点的法向位移,各点位移的倒数就是要求的该点的水平刚度系数。

### 3 外拉锚杆体系的水平刚度系数

锚杆的水平刚度系数应根据锚杆基本试验确定;当无试验资料时,可按式(15)估算:

$$K_T = \frac{3 \cdot A \cdot E_s \cdot E_c \cdot A_c}{(3 \cdot l_f \cdot E_c \cdot A_c \cdot E_s \cdot A \cdot L_a) \cdot \cos \theta} \quad (15)$$

式中:  $K_T$ ——锚杆的水平刚度系数, kN/m;

$A$ ——杆体截面面积,  $m^2$ ;

$E_s$ ——杆体弹性模量, kPa;

$E_c$ ——锚固体组合弹性模量,

$$E_c = \frac{A \cdot E_s + A_m \cdot E_m}{A + A_m}$$

其中:  $A_m$ ——锚固体中浆体截面积,  $m^2$ ;

$E_m$ ——锚固体中浆体弹性模量, kPa;

$A_c$ ——锚固体截面面积,  $m^2$ ;

$l_a$ ——锚固体锚固段长度, m;

$l_f$ ——锚杆自由段长度, m;

$\theta$ ——锚固体水平倾角, 量纲一的量。

镇江国贸大厦基坑支护采用钻孔灌注桩加两道锚杆, 施工之前先进行了4根锚杆的锚拉试验<sup>[2]</sup>。其中1#锚杆长19.1m, 锚固段长度14.1m, 自由段长度5m, 锚固段桩径230mm, 锚杆采用2根 $\phi 28$ mm钢筋, 锚杆与水平面夹角 $25^\circ$ 。将数据代入式(15)计算得到单根锚杆的水平刚度系数为33.34MN/m。图5是1#锚杆锚拉试验的荷载-位移曲线。根据试验曲线得到的锚杆刚度系数为31.2MN/m, 计算结果和试验结果基本一致。

广东东莞市太平洋广场花园基坑支护用钻孔灌注桩加一道锚杆, 在锚杆施工后7天

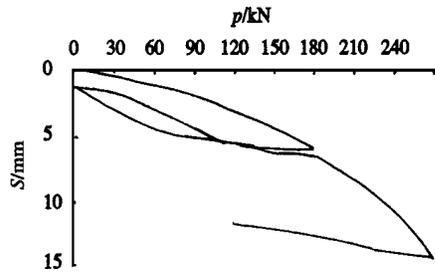


图5 1#锚杆锚拉试验荷载-位移曲线图

进行了3根锚杆的锚拉试验<sup>[3]</sup>。锚杆长12.0m, 锚固段长度4.0m, 自由段长度8.0m, 锚固段桩径100mm, 锚杆采用2根 $\phi 25$ mm钢筋, 锚杆与水平面夹角 $15^\circ$ 。将数据代入式(15)得到单根锚杆的水平刚度为22.13MN/m。根据图6试验曲线1#、2#、3#锚杆刚度分别为: 21.51MN/m; 22.67MN/m; 25.58MN/m。计算结果和试验结果基本一致。

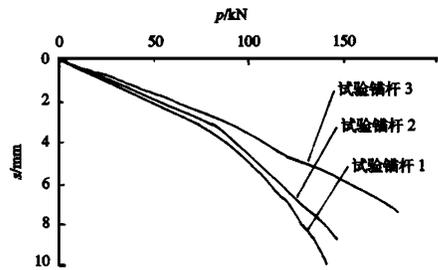


图6 锚拉试验荷载(p)-位移(s)曲线图

### 参 考 文 献

- 1 陈世鸣. 深基坑支护体系圈梁的弹性支撑效应. 见: 侯学渊, 杨敏主编. 软土地基变形控制设计理论和工程实践. 上海: 同济大学出版社, 1996. 95~99
- 2 韩选江, 李钧民, 岳俊生. 镇江国贸大厦深基坑支护结构的设计、施工与监测. 见: 黄强, 惠永宁主编. 深基坑支护工程实例集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 16~31, 129~136
- 3 张振国. 太平洋广场花园淤泥软土地基基坑锚拉护壁支护的设计、施工与监测. 见: 黄强, 惠永宁主编. 深基坑支护工程实例集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997

收稿日期: 1998-09-14