

文章编号:1671-6833(2004)04-0004-04

基于位移控制的单支点桩锚支护结构的优化设计

郭院成<sup>1</sup>, 王立明<sup>2</sup>, 曾力<sup>1</sup>

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 考虑单支点桩锚支护结构的刚体位移和弯曲变形, 建立了锚杆锚固点和支护桩顶的水平位移计算方法. 通过分析水平位移的各个影响因素对位移的作用, 指出锚杆位置下移会增加锚杆的拉力并进而加大其配筋, 但可以减小桩顶在锚杆张拉锚固后的水平位移变形. 以位移控制为目标, 通过调整锚杆的位置, 对单支点桩锚支护结构的设计进行优化.  
**关键词:** 岩土工程; 基坑; 单支点桩锚支护结构; 水平位移; 位移控制; 优化设计  
**中图分类号:** TU 378 **文献标识码:** A

0 引言

深基坑工程中, 当周围环境比较复杂, 既有建筑物或市政管线距离坑边较近时, 基坑的变形对周边建筑物的影响较为明显. 此时, 基坑设计不仅要满足承载力要求, 更为重要的是其变形的计算和控制. 基坑变形可以分为地面竖向沉降和土体水平位移, 二者是密切相关的. 在桩锚支护结构中, 如果不考虑坑外水位的下降对地面引起的沉降, 支护结构水平位移是地面竖向沉降的主要原因. 作者在研究支护结构水平位移及位移控制的基础上, 以位移控制为目标, 进一步研究支护结构的优化设计问题.

1 支护结构水平位移的计算

要计算支护结构的水平位移, 首先就要计算预应力锚杆拉力的增量, 然后按照内力与变形的关系, 求得锚杆锚固点的水平位移.

1.1 单支点桩锚支护结构锚杆拉力增量的计算模型和方法<sup>[1]</sup>

将单支点桩锚支护结构简化为图 1 所示的计算模型<sup>[1]</sup>: 上部锚杆简化为水平弹簧支座; 桩的入土端可以简化为铰支座, 其位置在第一个水平位移为零的点处.  $L_i$  为锚固点以上桩长. 在第  $i$  工况下:  $L_i (i = 1, 2, \dots, n)$  为锚杆锚固点到坑底的距离;  $L_{di}$  为坑底到铰支座的长度;  $E_i$  是支护桩所受的土压力  $e_i$  的合力; 当地基反力系数采用 ‘m’ 法, 且假定

坑底以下桩体的形状为直线时, 支护桩因桩体变形引起的坑底土反力呈抛物线分布(如图 1 所示);  $q$  为支护桩下端相对于初始位置绕转动点  $O$  的转角,  $\theta_q$  为支护桩相对于初始位置绕转动点  $O$  的刚体转角,  $q_w$  为桩体本身相对于初始位置的弯曲转角, 且有  $q = \theta_w + \theta_q$ ;  $q$  引起的坑底土反力  $e_{is}$  的合力为  $F_{is}$ , 其作用线位置位于  $O$  点往上处,  $\theta_q$  引起的土反力合力为  $F_{isg}$ ;  $q_w$  引起的土反力合力为  $F_{isw}$ (如图 2、图 3 所示). 易知,  $F_{isg}$ ,  $F_{isw}$  的作用线均位于  $O$  点往上  $\frac{1}{2}L_d$  处, 且有  $F_{is} = F_{isg} + F_{isw}$ <sup>[1]</sup>. 为计算简便, 下文以坑底土反力的合力代替其分布力进行计算. 通过叠加弯曲变形和刚体转动而引起的坑底土反力和锚杆拉力, 建立平衡方程, 可解得坑外主动土压力作用下锚杆拉力的增量:

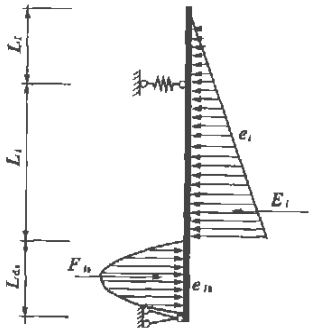


图 1 简化的计算模型  
Fig. 1 Simplified calculation model

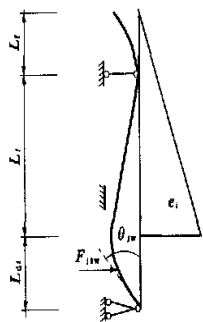


图 2 支护桩的弯曲变形与受力

Fig. 2 Bending deformation and loading of retaining pile

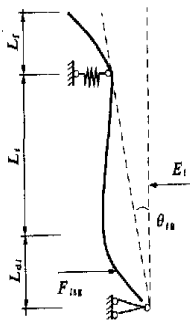


图 3 桩的刚体转动与受力

Fig. 3 Rigid rotation and loading of retaining pile

$$T_{ig} = \frac{4EI [L_1 + (1+3\eta)L_2] - 6F_{isw} \cdot \eta \cdot L_i}{12(1+\eta)L_i + \frac{\eta^4}{k(1+\eta)}mL_i^3} \quad (1)$$

$$F_{isw} = \frac{1}{6}mL_{di}^3\theta_w = \frac{1}{6}m\eta^3L_i^3\theta_w = \eta^3 \cdot$$

$$[3\alpha \cdot L_1 \cdot L_i^6(1+4\eta+2\eta^2) + 0.8\alpha \cdot L_i^7(2+10\eta+5\eta^2) - 2\alpha \cdot L_1^3 \cdot L_i^4(1+2\eta+\eta^2)] [432 \cdot \frac{EI}{m} \cdot (1+\eta) + 6L_i^5 \cdot (2\eta^4+2.5\eta^5+0.75\eta^6)] \quad (2)$$

其中： $m$  为地基土反力系数； $EI$  为支护桩的刚度； $\alpha = \gamma \tan^2 \left[ \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right]$ ， $\gamma$  为土的容重； $\eta = L_{di} / L_i$ ，为桩的计算深度系数。

考虑到坑外土体侧压力受锚杆锁定值水平的影响，以  $T_{1g}$  表示锁定后扣除主动土压力对应拉力后的锚固力，则有：

$$T_{1g} = T^* - T_{11},$$

式中： $T^*$  为锚杆拉力锁定值； $T_{11}$  为为张拉状态下对应主动土压力的锚杆拉力。

第  $i$  工况下锚杆拉力相对于锚杆锁定后的增量为

$$\Delta T_i = T_{ig} - T_{1g} \quad (3)$$

1.2 单支点桩锚支护结构的水平位移计算

1.2.1 锚杆锚固点的水平位移计算

第  $i$  工况锚杆锚固点相对于锚杆锁定后的水

平位移增量为

$$\Delta x_i = \frac{T_{ig} - T_{1g}}{k} \quad (4)$$

式中： $k$  为预应力锚杆的水平抗拉刚度系数。

1.2.2 桩顶的水平位移计算

(1) 基坑开挖结束时，支护桩悬臂段上作用的荷载按主动土压力计算。根据材料力学的理论，可得集中荷载作用下的桩顶的水平位移  $f = \frac{P^3}{3EI}$  在桩的悬臂段上积分，由此可得桩顶相对于锚固点的水平位移为

$$\Delta = \int_0^{L_1} \frac{\alpha(L_1 - z)^3}{3EI} dz = \frac{\alpha L_1^4}{12EI} = \frac{\gamma \cdot K_a \cdot L_1^4}{12EI} \quad (5)$$

(2) 如果在锚杆张拉结束时作用在支护桩悬臂段上的荷载近似按静止土压力系数  $k_0$  取值（考虑到未确知土压力的影响），则同理可得张拉结束时桩顶相对于锚固点的水平位移应为

$$\Delta_0 = \frac{\gamma \cdot K_0 \cdot L_1^4}{12EI} \quad (6)$$

(3) 第  $i$  工况桩顶相对于锚杆张拉结束时的水平位移为

$$\Delta_i = \Delta x_i - (\Delta_0 - \Delta) = \frac{T_{ig} - T_{1g}}{k} + \frac{\gamma \cdot (K_a - K_0) \cdot L_1^4}{12EI} \quad (7)$$

如果实际工程不能得到计算  $K_0$  的土性参数，则取  $K_0 = K_a$ 。

2 变形及位移控制的分析

2.1 各影响因素对锚固点水平位移的影响

(1) 支护桩内侧坑底土越好， $m$  值越大，坑底土反力增量越大，锚杆的拉力增量越小，锚杆变形越小，桩顶水平位移越小；

(2) 锚杆的刚度  $k$  越大，锚杆变形越小；

(3) 土的内摩擦角越大（即  $\alpha$  值越小），土压力越小，锚杆的拉力越小，锚杆变形越小，桩顶水平位移越小。

(4) 其它因素不变时，锚杆位置越靠下，支护桩悬臂段  $L_1$  就越大，相应的桩顶相对于锚固点的位移也越大，但其在锚杆锚固以后的后期水平位移却未必增大，相反由式 (7) 的第二项可知桩顶相对于锚杆锚固点的水平位移变形反而会变小。

与此同时，桩的跨中水平位移却变小，坑底土反力也变小，锚杆拉力变大，但拉力增量变小，锚固力锁定值上限就可以变大，如果增加锚杆的锚固力锁定值，锚杆张拉锁定后锚固点的水平位移

(式 7) 的第一项) 就变小.

总之, 锚杆位置下移会增加锚杆的拉力并进而加大其配筋, 但可以减小桩顶在锚杆张拉锚固后的水平位移变形.

2.2 位移控制

由变形计算与分析结果可知, 要减少桩顶(或锚杆锚固点) 的水平位移有以下几项措施:

(1) 提高坑底土的水平抗力系数  $m$  值, 或者说提高其强度参数  $c$ 、 $\Phi$  值. 具体工程措施可为: 在支护桩内侧作地基处理(提前施工水泥土桩、CFG 桩等); 进一步降低坑底的地下水位至  $L_d$  以下, 从而提高坑底土的  $c$ 、 $\Phi$  值和  $m$  值, 但对于砂土的效果相反.

(2) 提高桩外侧土体的强度参数  $c$ 、 $\Phi$  值, 从而减小桩外侧的荷载值. 具体工程措施可为: 在支护桩外侧土体中做土钉, 形成桩锚与土钉的联合支护; 在支护桩外侧土体中插管注浆, 或施工水泥土桩墙止水帷幕.

(3) 增加锚杆的截面, 或采用低强度钢材, 从而增加锚杆的刚度, 可以减小变形; 另一方面, 由于锚杆截面积的增加, 其强度设计值也得到提高, 从而可以增加锚杆的锚固力锁定值, 减小锚固点向坑内的水平位移.

(4) 增加桩悬臂段的长度, 可以减小桩顶和锚固点在锚杆张拉锚固后的水平位移变形. 但另一方面, 在施工预应力锚杆之前的桩顶位移却会增大. 因此, 需要对桩悬臂段的长度进行优化.

3 基于位移控制的优化

桩顶的水平位移由两部分叠加而成: 锚杆锚固点的水平位移和悬臂段的弯曲变形引起的桩顶相对于锚杆锚固点的水平位移. 由上述的变形计算方法可知, 锚杆位置的变化而引起的这两部分位移的变化方向相反, 因而应存在一个合适的悬臂段长度, 使得桩顶的水平位移最小. 不难理解, 当桩顶相对于初始位置的水平位移最小时, 其相对于锚杆锁定时的水平位移也最小, 因此两者的最优化条件是一致的. 由式(1)可得桩顶相对于初始位置的水平位移为

$$x_i^D = \frac{4E_i[L_i + (1+3\eta)L_i] - 6F_{isw}\eta_i}{12(1+\eta)kL_i + \frac{\eta^4}{(1+\eta)mL_i^3}} + \frac{\gamma(K_a - K_0) \cdot L_i^4}{12EI} \tag{8}$$

将  $F_{isw}$  的表达式(2) 代入上式, 可知水平位移值  $x_i^D$  是桩的悬臂断段长度  $L_i$  的四次函数, 通过试算或迭代计算, 可以得到最终工况( $L_i = L_n$ ) 时的  $L_i$  的最优取值, 从而实现桩顶水平位移最小的优化设计目标.

4 结束语

作者主要针对桩顶的水平位移最小的目标研究了单支点桩锚支护结构的优化问题. 另一方面, 由理论研究和工程实践的经验可知, 基坑外地面的竖向沉降主要由这几方面的原因引起: 基坑侧壁的水平变形(即支护结构的水平位移); 基坑外水位的下降引起土体中有效应力增大, 使得土体再固结; 基坑底土体隆起引起的坑外地面下降. 当仅考虑第一个原因时, 如果假定土体不发生压缩变形, 那么支护结构的整个水平变形(包括支护桩的刚体转动和弯曲变形) 将会反映到坑外地面的沉降上. 当锚杆锚固点水平侧移的计算方法确定后, 就可以通过材料力学的方法进而计算出支护桩上各个位置的水平位移, 算出最终工况和初始工况的支护桩位置之间的面积. 通过调整锚杆的上下位置, 就可以使得整个基坑侧壁的水平变形最小(即最终工况和初始工况的支护桩位置之间的面积最小), 从而实现对地面沉降控制的最优化设计.

参考文献:

[1] 王立明. 单支点桩锚支护结构的变形计算及变形控制的反演分析[D]. 郑州大学, 2004.  
[2] 华南理工大学, 东南大学, 浙江大学, 等. 地基及基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.  
[3] JGJ 120—99, 建筑基坑支护技术规程[S].  
[4] 黄强. 建筑基坑支护技术规程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.  
[5] 高大钊. 深基坑工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

The Opti mization Based on the Displacement Controlling on Single Fulcrum  
Hle anchor Retaining Structure

GUO Yuan —cheng<sup>1</sup>, WANG Li —ming<sup>2</sup>, ZENG Li<sup>1</sup>

( 1.College of Civil Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002,China ;2.Department of Geotechnical Engineering , Tongji University , Shanghai 200092,China)

**Abstract :** The approach is established to calculate the displacement of the anchor pre —tensioned point and the top end of the retaining pile taking into consideration the bending deformation and rigid displacement of single fulcrum pile anchor retaining structure . By analyzing the influence on the displacement among every factors the approach proposes that the downward anchor can increase its tension and reinforcement ,but it also can reduce the horizontal displacement of the top end of the pile after the anchor is pre tensioned . Finally , the design about the single ful — crum pile anchor retaining structure is opti mized by adjusting the position of anchor to make the displacement of the top end of the pile the smallest .

**Key words :** geotechnical engineering foundation pit ;single fulcrum pile anchor retaining structure ;horizontal dis — placement ;displacement controlling opti mization