

# 预应力锚索抗滑桩结构计算方法

桂树强

中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 预应力锚索抗滑桩作为一种实用有效的支挡工程措施已在地质灾害治理中得到广泛的应用。然而, 其设计与计算方法仍然是一个亟待深入研究的课题。这种技术是在抗滑桩的基础上发展起来的。相对于普通抗滑桩, 其受力状态更加合理。从这种治理措施的地质与物理模型出发, 建立了其力学与数学模型, 并最终得到其内力分布的解析解, 为其结构设计奠定了基础。将双参数法引入到土抗力模数或地基系数的计算中, 并贯穿到整个结构计算中。分别按刚性桩和弹性桩2种物理模式, 将锚索视为弹性铰支座, 利用抗滑桩和锚索位移变形协调条件, 计算出锚索的设计拉力及桩身的内力分布。结合三峡库区秭归县水田坝乡土地岭滑坡治理工程介绍了这种滑坡治理措施的应用, 并与原普通抗滑桩设计方案进行了技术与经济对比分析, 体现出这种抗滑结构的优越性。

**关键词:** 预应力锚索; 抗滑桩; 滑坡治理; 双参数法。

**中图分类号:** P64

**文章编号:** 1000—2383(2005)02—0233—08

**收稿日期:** 2004—07—15

## Design Method for Using Stabilizing Piles with Pre-stressed Anchored Cables in Landslide Remediation Works

GUI Shu-qiang

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The technique of stabilizing piles with pre-stressed anchored cables is an effective measure in landslide remediation works, which nowadays has a wide application in many fields. However, the design and calculating methods of this technique need more attention and urgent research work. Stabilizing piles with pre-stressed anchored cables are a development of the technique of using stabilizing piles. Compared to the use of stabilizing piles alone, anchored cables make the state of the forces on piles more reasonable. A mechanical and mathematical model of piles with pre-stressed anchored cables has been set up, based on a geological and physical model of this landslide stabilizing system. This model establishes the foundation of the calculations for the structural design of the system. The analytical and numerical solutions of the established mathematical model have been achieved. The “two-parameter method” is employed to calculate the coefficient of subgrade reactions or subgrade modulus. The two models, of rigid and elastic piles respectively, are discussed, in which the anchored cable is regarded as an elastic hinge. Under the consideration of deformation harmony between anchored cables and the pile body, the tensile force of anchored cables has been obtained, as well as a solution for internal force distribution along the pile body. A case study in the reservoir areas of the Three Gorges Project is presented in the last part of the paper, in which the application of this technique in landslide remediation works is analyzed and discussed in detail.

**Key words:** pre-stressed anchored cable; stabilizing pile; landslide remediation; two-parameter method.

预应力锚索抗滑桩是滑坡治理工程措施之一, 排预应力锚索, 借助于锚索所提供的锚固力和抗滑它在抗滑桩的基础上发展起来的。其基本概念是: 桩所提供的阻滑力并由二者组成的桩—锚支挡体系在普通抗滑桩的桩顶或桩身一定位置设置一排或多 共同阻挡滑坡的下滑(图1)。

**基金项目:** 教育部博士生基金资助项目(No. 20030491004)。

**作者简介:** 桂树强(1974—), 男, 工程师, 中国地质大学地质工程专业博士研究生, 主要从事地质灾害防治工程设计研究。

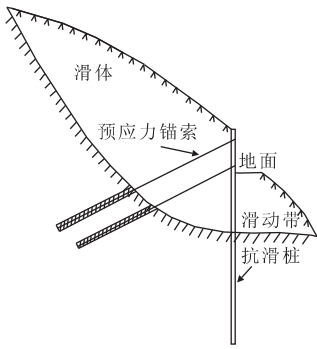


图 1 预应力锚索抗滑桩结构体系示意

Fig. 1 Sketch map of the structure of stabilizing piles with pre-stressed anchored cables

预应力锚索抗滑桩在公路、铁路以及水利水电工程的边坡整治工程中以及各种类型的滑坡治理中都得到了广泛的应用(王化卿等, 1990; 徐邦栋, 2001; 陈占, 2001). 在目前三峡工程库区地质灾害治理中也大量采用了这种支挡结构.

预应力锚索抗滑桩相对于普通的抗滑桩支挡结构而言, 其受力状态更加合理(王化卿等, 1990; 陈占, 2001; 周德培和王建松, 2002). 普通抗滑桩一般来说其力学模式类似于锚固于滑床中的悬臂梁. 按这种力学模式计算后, 桩身弯矩、剪力都相对较大, 由此造成桩身截面尺寸很大, 配筋量也十分可观. 在桩顶或桩顶下一定位置设置一排或多排预应力锚索后, 桩身受力状况大大改善, 其基本力学模式可以等价于简支梁或其他超静定结构. 随着约束的增加, 桩的位移控制相对容易许多, 进而其桩身内力也在一定程度上大大降低. 简言之, 预应力锚索抗滑桩变一般抗滑桩的被动抗滑结构为主动抗滑结构.

本文从预应力锚索抗滑桩结构桩身与锚索的变形协调原理出发, 推导出了锚索拉力设计值的计算公式, 进而求解出桩身的内力分布, 为其结构设计奠定了基础.

## 1 预应力锚索抗滑桩结构计算思路

预应力锚索抗滑桩的结构计算一般包括 2 部分: 其一为计算锚索的设计拉力; 其二为抗滑桩的桩身内力计算; 关于后者大量的文献(铁道部科学研究院西北研究所, 1977; 铁道部第二勘测设计院, 1983; 吴恒力, 2000)都对其进行了详细的论述, 本文不再详述; 前者是本文论述的重点. 本文将按照刚性桩和

弹性桩两种计算模式并利用锚索和桩身之间的位移变形协调原理计算出锚索的设计拉力.

### 1.1 基本假定

(1) 桩与锚索按弹性受力进行分析, 锚索按弹性绞支座考虑. 桩在滑动面以上部分按静力结构计算, 桩在滑动面以下部分按弹性地基梁设计. (2) 预应力锚索抗滑桩所承受的滑坡推力按桩“中—中”的滑体推力进行计算, 可依据具体情况将其简化为三角形、矩形或梯形分布荷载作用于滑动面以上的桩体上, 不考虑桩与周围岩土间的摩擦力. 桩前滑坡体的被动抗力视为安全储备而不予计取. (3) 滑动面在整个工作过程中不会改变. (4) 锚索与桩的变形相协调, 即锚索伸长量在水平方向的分量与锚索作用点处桩在同样力系作用下的位移量相等. (5) 按弹性桩进行计算时, 忽略了锚索、滑坡推力或岩土压力的竖向分量对桩身内力的影响. 而按刚性桩进行计算时则没有对其予以忽略.

### 1.2 基本计算力学模式

一般而言, 为方便计算可将预应力锚索抗滑桩结构中的抗滑桩划分为刚性桩和弹性桩 2 种计算力学模型. 抗滑桩属刚性桩或弹性桩, 除按桩周岩、土的性质及其松散程度定性外, 试验表明, 当埋入滑动面以下的计算深度(桩的嵌固深度  $h$  与桩的变形系数  $\alpha$  的乘积)小于某一临界值时, 可视桩的刚度为无限大, 其在水平荷载作用下的极限承载能力只取决于地层弹性抗力的大小, 而与桩的刚度无关. 若对计算深度为此临界值的桩, 分别按弹性桩和刚性桩计算, 结果二者的水平承载力及传递到地层地压应力图形均比较接近. 为此, 通常将这个临界值作为判定桩为刚性桩或弹性桩的标准. 临界值规定如下:

当  $\alpha h \leq 2.0$ , 即为短桩时, 属刚性桩;

当  $\alpha h > 2.0$ , 即为中长桩或长桩时, 属弹性桩.

有些文献(铁道部科学研究院西北研究所, 1977)则规定  $\alpha h \leq 2.5$  属刚性桩,  $\alpha h > 2.5$  属弹性桩.

上述  $\alpha$  的基本定义为:

$$\alpha = \left( \frac{m B_p}{EI} \right)^{\frac{1}{4 + \frac{1}{n}}}.$$

其中:  $E$  桩的弹性模量;  $I$  桩的截面惯性矩;  $B_p$  桩的计算宽度. 其中:  $m$  和  $1/n$  是 2 个待定参数, 因故这种计算模式又被称作双参数法.  $m$  是除 0 以外的一切正数, 当按“ $m$ ”法进行计算时,  $m$  又称作地基系数随深度而变化的比例系数.  $1/n$  是任意实数, 通常采用  $1/n \geq 0$ . 当  $1/n = 0$  时, 在工程界中被称作“ $K$ ”

法,当  $1/n=1$  时为“ $m$ ”法,而当  $n=2$  时则被称作“ $c$ ”法.

1.3 基本计算思路

预应力锚索抗滑桩的基本计算思路是:首先根据地质条件和工程的规模与重要性,确定地基土抗力模数分布形式和数值,并初步拟定抗滑桩的截面尺寸和锚固段的长度、锚索的设置排数和初始预应力值.然后根据前述的判定条件确定采用哪一种计算模式.在某一种计算模式下,首先求解出滑动面处桩身弯矩、剪力、转角以及挠度的表达式,然后利用位移变形协调原理求解出锚索拉力设计值.进一步计算出桩顶的位移值,看是否满足桩顶位移控制标准.如果满足,则计算出桩身的内力;否则应调整预应力值或增加锚索排数重新进行计算直至满足桩顶位移控制标准,进而计算出桩身内力分布.

1.4 桩顶位移控制标准

桩顶位移的控制标准应根据治理工程的重要性以及与周边建筑物的关系加以确定,而不应该是一个不变的量.例如,当周边建筑物对滑坡体的变形十分敏感或周边建构筑物对预应力锚索抗滑桩结构体本身变形要求应较小时,桩顶位移应该控制在一个较小的值.

本文参考有关文献(深圳市勘察测绘院等,1996)认为桩顶的位移一般应该控制在  $0.01h_t$  ( $h_t$  为抗滑桩的全长)以内,当周边建筑物对抗滑桩的变形较敏感时,则应控制在  $0.005h_t$  以内.

2 抗滑桩与锚索位移变形协调原理

锚索伸长量  $\Delta_i$  和锚索所在点桩的水平位移  $f_i$  之间存在变形协调条件.从实用的角度认为锚索与桩的变形协调条件(图 2)为:  $\Delta_i = f_i \cos \theta_i$ .

3 刚性桩模式计算方法

3.1 锚索拉力设计值计算

由图 3 不难看出滑动面以上桩身各点的位移为:

$f_i = (x_0 + L_i) \varphi$ .  
而:  $\Delta_i = \delta_i (R_i - R_{i0})$ .  
其中:  $x_0$ . 桩体围绕旋转的中心轴距滑动面的距离;  
 $\varphi$ . 桩体绕旋转中心旋转的角度(以弧度为单位);

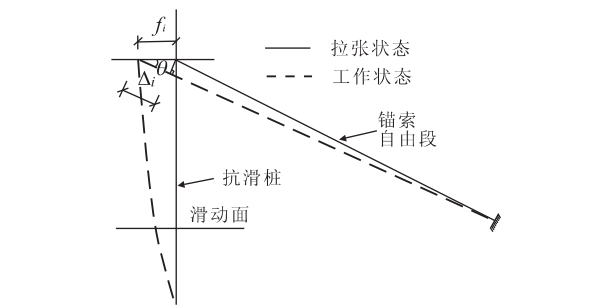


图 2 预应力锚索抗滑桩变形协调原理示意

Fig. 2 Sketch map of deformation harmony principle of the structure of stabilizing piles with pre-stressed anchored cables

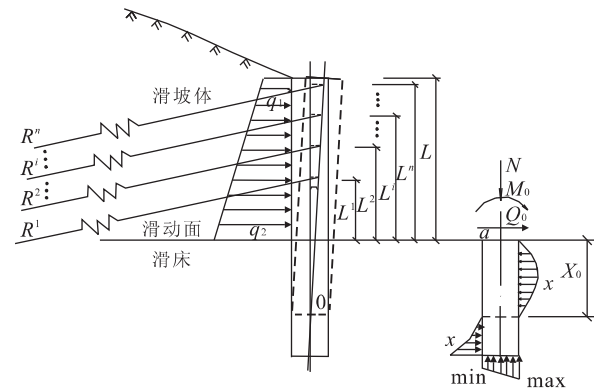


图 3 预应力锚索抗滑桩结构计算示意(刚性桩)

Fig. 3 Sketch map of the structure of stabilizing piles with pre-stressed anchored cables for calculation (rigid pile model)

$R_{i0}$ . 第  $i$  根锚索的预应力;  $R_i$ . 第  $i$  根锚索的拉力设计值;  $L_i$ . 为  $i$  点距滑动面的距离;  $\delta_i$ . 第  $i$  根锚索的柔度系数. 其值由下式求得:

$$\delta_i = \frac{4l_i}{NE_g \pi d_i^2} \cdot$$

其中:  $l_i, d_i$  为锚索自由段长度及每束锚索的直径;  $E_g$  为锚索的弹性模量;  $N$  为每孔锚索钢绞线的束数.

锚索的设计拉力可由以下方程式求得:

$$\sum_{j=1}^n \zeta_{ij} R_j + \delta_i \cdot \sec \theta_i \cdot R_i = C_i \cdot \tag{1}$$

(1) 式中:

$$\zeta_{ij} = (G_1 + L_i G_3) L_j + (G_2 + L_i G_1),$$
$$C_i = (G_1 + L_i G_3) M + (G_2 + L_i G_1) Q +$$
$$\delta_i \cdot \sec \theta \cdot R_{i0} \cdot$$

而  $G_1, G_2, G_3$  分别由以下各式求得:

$$G_1 = \frac{(t+1)h}{B_p m h^{t+3} \left( \frac{t+2}{t+3} - \frac{t+1}{t+2} \right) + \frac{1}{2} C_0 \cdot H \cdot W(t+2)};$$
$$G_2 = \frac{\frac{(t+1)(t+2)}{(t+3)} h^2 + \frac{(t+1)(t+2) C_0 \cdot H \cdot W}{2 B_p m h^{t+1}}}{B_p m h^{t+3} \left( \frac{t+2}{t+3} - \frac{t+1}{t+2} \right) + \frac{1}{2} C_0 \cdot H \cdot W(t+2)};$$
$$G_3 = \frac{(t+2)}{B_p m h^{t+3} \left( \frac{t+2}{t+3} - \frac{t+1}{t+2} \right) + \frac{1}{2} C_0 \cdot H \cdot W(t+2)}.$$

其中:  $t=1/n$ ;  $M$  和  $Q$  分别为滑坡推力或岩土压力作用于滑动面处的弯矩和剪力;  $H$ . 桩截面的高度;  $W$ . 桩身抗弯截面系数, 对于矩形截面桩(高为  $H$ , 宽为  $B$ ),  $W=(BH^3)/6$ ; 而对于圆形截面桩(直径为  $d$ ),  $W=(\pi H^3)/32$ ;  $C_0$ . 桩底岩层的竖向地基系数;  $B_p$ . 桩的计算宽度(铁道部科学研究院西北研究所, 1997).

式(1)是一个线性方程组, 很容易用数值计算的方法求解出  $R_i$ .

3.2 桩身内力的计算方法

(1) 滑动面以上桩身内计算(周德培和王建松, 2002).

令  $L_0=0, L_{n+1}=L, R_{n+1}=0$ . 当  $x=L-L_i$  时, 取  $k=n+1-i(i=1, 2, 3, \dots, n)$ , 有:

$$Q_x^{-1} = Q(x) - \sum_{j=1}^k R_{n+2-j} \cdot \cos \theta_{n+2-j}, x < L-L_i, \quad (2a)$$

$$Q_x^{+1} = Q(x) - \sum_{j=1}^k R_{n+1-j} \cdot \cos \theta_{n+1-j}, x \geq L-L_i, \quad (2b)$$

$$M_x = M(x) - \sum_{j=1}^k R_{n+1-j} \cdot \cos \theta_{n+1-j} [x - (L-L_{n+1-j})]. \quad (2c)$$

式(2)中:  $Q_x, M_x$  分别为非嵌固段桩身剪力和弯矩;  $Q(x), M(x)$  分别为滑坡推力或岩土压力作用于桩上的剪力和弯矩;  $k$  为从桩顶往下数到第  $i$  根锚索支承点的个数.

(2) 滑动面以下内力计算

剪力:  $Q_x = Q_0 - B_p \varphi \cdot m \cdot x^{t+1} \left( \frac{x_0}{t+1} - \frac{x}{t+2} \right);$

弯矩:  $M_x = M_0 + Q_0 x - \frac{B_p \varphi \cdot m \cdot x_0 \cdot x^{t+2}}{(t+1)(t+2)} + \frac{B_p \varphi \cdot m \cdot x^{t+3}}{(t+2)(t+3)}.$

其中:

$$Q_0 = Q - \sum_{j=1}^n R_j \cos \theta_j;$$
$$M_0 = M - \sum_{j=1}^n R_j L_j \cos \theta_j;$$

$$x_0 = \frac{\frac{M_0 h}{t+2} + \frac{Q_0 h^2}{t+3} + \frac{C_0 \cdot H \cdot Q_0 \cdot W}{2 B_p m h^{t+1}}}{\frac{M_0}{t+1} + \frac{Q_0 h}{t+2}};$$
$$\varphi = \frac{M_0(t+2) + Q_0 h(t+1)}{B_p m h^{t+3} \left( \frac{t+2}{t+3} - \frac{t+1}{t+2} \right) + \frac{1}{2} C_0 \cdot H \cdot W(t+2)}.$$

4 弹性桩模式计算方法

4.1 锚索设计拉力计算方法

弹性桩模式下滑动面以上桩身各点的位移(周德培和王建松, 2002)为:

$$f_i = y_0 - \varphi_0 L_i + \Delta i q - \sum \Delta \delta_{ij}.$$

其中:  $\Delta i q$ . 滑坡推力或岩土压力作用于  $i$  点桩的水平位移;  $\Delta \delta_{ij}$ . 锚索拉力  $R_i$  的水平分量作用于  $i$  点桩的水平位移,  $\Delta \delta_{ij} = R_j \cos \theta_j \delta_{ij}$ , 而  $\delta_{ij}$  为锚索拉力  $R_j$  的水平分量作用于桩上  $i$  点的位移系数,  $\theta$  为锚索轴线与水平面的夹角(图 4).

$\Delta_i$  的计算方法同前述刚性桩模式.  
 $\Delta_i q$  可按悬臂梁由结构力学计算确定:

$$\Delta_i q = \frac{L^4}{120EI} (5q_1 \alpha_i^4 + q_0 \alpha_i^5 - 20q_1 \alpha_i - 5q_0 \alpha_i + 15q_1 + 4q_0).$$

式中:  $\alpha_i = 1 - \frac{L_i}{L}$ ,  $q_0 = q_2 - q_1$ .  $q_1$  和  $q_2$  分别为滑坡推力或岩土压力在桩顶和滑动面处的水平分量. 假设滑坡推力或岩土压力与水平面的夹角为  $\beta$ , 此力在桩顶和滑动面处的值分别为  $Q_1$  和  $Q_2$ , 则

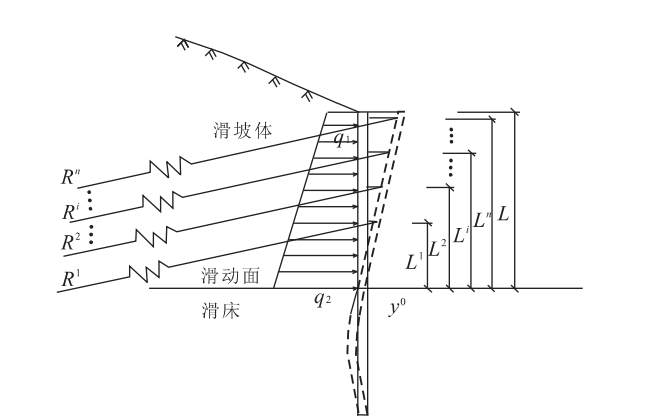


图 4 预应力锚索抗滑桩结构计算示意(弹性桩)  
Fig. 4 Sketch map of the structure of stabilizing piles with pre-stressed anchor cables for calculation (elastic pile model)

$q_1=Q_1\cos\beta, q_2=Q_2\cos\beta.$

$\delta_{ij}$  可按结构力学中的图乘法予以确定:

当  $j\geq i$ , 则  $\delta_{ij}=\frac{L_j^3\gamma_i^2}{6EI}(3-\gamma_i), \gamma_i=\frac{L_i}{L_j}, L_i\leq L_j;$

当  $j< i$ , 则  $\delta_{ij}=\frac{L_j^3}{6EI}(3\gamma_i-1),$  此时,  $L_i>L_j.$

将锚索伸长量  $\Delta i$  和锚索所在点桩的水平位移  $f_i$  的表达式代入到位移变形协调条件中, 有:

$$\sum_{j=1}^n R_j \cos^2 \theta_j \delta_{ij} + \delta_i R_i = \delta_i R_{i0} + y_0 \cos \theta_i - \varphi_0 L_i \cos \theta_i + \Delta i q \cos \theta_i. \tag{4}$$

因为:  $y_0=Q_0\delta_{QQ}+M_0\delta_{QM};$   
 $\varphi_0=-(Q_0\delta_{MQ}+M_0\delta_{MM}).$

所以:

$$y_0-\varphi_0 L_i=(\delta_{QQ}+\delta_{MQ} L_i) Q_0+(\delta_{QM}+\delta_{MM} L_i) M_0;$$

令:  $A_i=\delta_{QQ}+\delta_{MQ} L_i; B_i=\delta_{QM}+\delta_{MM} L_i.$

则:  $y_0-\varphi_0 L_i=A_i Q_0+B_i M_0$

$$=A_i(Q-\sum_{j=1}^n R_j \cos \theta_j)+B_i(M-\sum_{j=1}^n R_j L_j \cos \theta_j)$$
$$=A_i Q+B_i M-A_i \sum_{j=1}^n R_j \cos \theta_j-B_i \sum_{j=1}^n R_j L_j \cos \theta_j.$$

将上式代入到式(4)中, 则:

左式=  $\sum_{j=1}^n R_j \cos^2 \theta_j \delta_{ij} + \delta_i R_i ;$

右式=  $\delta_i R_{i0} + A_i Q \cos \theta_i + B_i M \cos \theta_i - A_i \cos^2 \theta_i \sum_{j=1}^n R_j -$

$$B_i \cos^2 \theta_i \sum_{j=1}^n R_j L_j + \Delta i q \cos \theta_i .$$

此时, 令:

$$\zeta_{ij}=A_i \cos^2 \theta_i+B_i L_j \cos^2 \theta_i+\delta_{ij} \cos^2 \theta_j ;$$
$$C_i=\delta_i R_{i0}+A_i Q \cos \theta_i+B_i M \cos \theta_i+\Delta i q \cos \theta_i .$$

由此可得到方程:  $\sum_{j=1}^n \zeta_{ij} R_j + \delta_i R_i = C_i .$

这也是一个线性方程组, 很容易用数值计算的方法求解出  $R_i$ . 其中:  $\delta_{QQ}$ . 单位横向力  $\bar{Q}_0$  单独作用时引起的与  $\bar{Q}_0$  对应的位移, 即地面处的挠度;  $\delta_{MQ}$ . 单位横向力  $\bar{Q}_0$  单独作用时引起的与  $\bar{M}_0$  对应的位移, 即地面处的转角;  $\delta_{QM}$ . 单位力矩  $\bar{M}_0$  单独作用时引起的与  $\bar{Q}_0$  对应的位移, 亦为地面处的挠度;  $\delta_{MM}$ . 单位力矩  $\bar{M}_0$  单独作用时引起的与  $\bar{M}_0$  对应的位移, 亦为地面处的转角.

可利用桩底条件对其进行求解.

当  $ah\geq 4.5$  时称为长桩. 长桩的特点是与桩底条件无关. 其基本出发点是不论桩底实际情况如何,

均可按桩底固定 ( $y_h=\varphi_h=0, h$  代表桩底深度) 处理. 通过计算可得到此时  $\delta_{QQ}, \delta_{MQ}=\delta_{QM}$  和  $\delta_{MM}$  的规律, 详见吴恒力(2000). 例如:

当  $1/n=1.0$  时:

$$\delta_{QQ}=\frac{2.42}{\alpha^3 EI}, \delta_{QM}=\delta_{QM}=\frac{1.61}{\alpha^2 EI}, \delta_{MM}=\frac{1.74}{\alpha EI}.$$

当  $2.0<ah<4.5$  时称作中长桩. 中长桩的性质与实际桩底条件密切相关. 当桩底无实测资料或实测资料没有把握时, 常需对桩底支承情况作适当的假设. 一般有 8 种假设可供选择, 分别是: 桩底为弹性定向支承、桩底自由、桩底为弹性铰支承、桩底为固定铰支承、桩底为固定端、桩底为考虑摩阻力的直径桩以及桩底为考虑摩阻力的小直径桩(吴恒力, 2000). 这种情况下, 计算过程十分复杂, 且计算结果的可靠度差. 因而, 当桩底边界条件不明时, 最好避免采用中长桩, 而改用长桩. 中长桩模式下各种桩底条件下的  $\delta_{QQ}, \delta_{MQ}=\delta_{QM}$  和  $\delta_{MM}$  值可参照吴恒力(2000)和桂树强(2003).

4.2 弹性桩模式下桩身内力的计算方法

- (1)滑动面以上桩身内力的计算方法同刚性桩.
- (2)滑动面以下桩身被视作插入地基中的弹性梁, 在水平推力作用下其挠度曲线微分方程式为:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -KB_p y.$$

由于采用双参数法的土抗力模数通用表达式为:

$$K=mx^{\frac{1}{n}}.$$

则可得到求解水平推力桩挠度曲线的变系数线性齐次常微分方程式:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -mB_p x^{\frac{1}{n}} y .$$

上式可通过采用幂级数方法求得其解析解.

由于桩在滑动面处的挠度、转角、弯矩和剪力, 即:  $y_0, \varphi_0, M_0, Q_0$  等初参数很容易在锚索拉力设计值计算出后加以确定, 则抗滑桩锚固段各点的挠度、转角、弯矩、剪力可由上述 4 个初参数予以确定, 详见下式. 公式中深度自滑动面处起算.

$$y=y_0 A(\alpha x)+\frac{\varphi_0}{\alpha} B(\alpha x)+\frac{M_0}{\alpha^2 EI} C(\alpha x)+\frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D(\alpha x);$$
$$\frac{\varphi}{\alpha}=y_0 A'(\alpha x)+\frac{\varphi_0}{\alpha} B'(\alpha x)+\frac{M_0}{\alpha^2 EI} C'(\alpha x)+\frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D'(\alpha x);$$
$$\frac{M}{\alpha^2 EI}=y_0 A''(\alpha x)+\frac{\varphi_0}{\alpha} B''(\alpha x)+\frac{M_0}{\alpha^2 EI} C''(\alpha x)+\frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D''(\alpha x);$$



$$\frac{Q}{\alpha^3 EI} = y_0 A'''(\alpha x) + \frac{\varphi_0}{\alpha} B'''(\alpha x) + \frac{M_0}{\alpha^2 EI} C'''(\alpha x) + \frac{Q_0}{\alpha^3 EI} D'''(\alpha x).$$
  
 $A(\alpha x) \sim D'''(\alpha x)$  等为系数, 具体计算表达式参见吴恒力(2000).

5 工程实例

5.1 工程概况

水田坝乡下土地岭滑坡位于三峡库区湖北省秭归县水田坝乡新址规划区北部. 该滑坡为一正在活动的滑坡. 滑坡体及其影响区内的建筑物明显变形, 后部为在建中的初级中学宿舍楼场地挡土墙及一栋建成的宿舍楼基础下沉变形, 在建中的沿江大道路基发生较大的下沉. 三峡水库 175 m 水位蓄水后, 滑坡体的中下部将被淹没在正常蓄水位之下, 滑坡的稳定性将受到严重影响, 威胁到该滑坡区及周边已有建筑物、后部中学以及新集镇沿江大道的安全(吴益平和汪洋, 2002).

5.2 滑坡区水文地质与工程地质条件

滑坡体物质以紫红色泥岩碎石和长石石英砂岩块石夹粘土为主, 而滑床则以上侏罗系蓬莱镇组紫红色泥岩、泥质粉砂岩和灰白色长石石英砂岩为主. 滑动带为粉质粘土, 其强度计算参数为:  $C=11\text{ kPa}$ ,  $\varphi=11^\circ$ . 滑坡区地下水类型可分为基岩裂隙水及第四系沉积物和崩塌堆积物孔隙水.

因滑床为结构完整性较好的岩层, 其土抗力系数可视为常数. 本例综合有关资料, 其地基系数取为:  $K=m=3\times 10^6\text{ kN/m}^3$ , 此时认为  $1/n=0$ , 也即按“K”法计算.

5.3 治理工程措施简述

根据原初步设计文件, 滑坡体后壁陡坎拟布置 3 排锚杆+格构梁进行加固. 滑体中前部 177 m 高程附近设置大截面悬臂抗滑桩, 桩型分别为 A 型、B 型, 桩长分别为 16 m 和 14 m, 桩截面为  $2.5\times 3.5\text{ m}^2$ , 间距 5.0 m, 总根数为 33 根. 同时对整个滑坡区设置地表排水系统. 本文将用预应力锚索抗滑桩代替悬臂抗滑桩进行设计, 同时进行对比分析, 以了解前者的优越性.

5.4 预应力锚索抗滑桩设计方案

本例将预应力锚索抗滑桩设置在第 11 条块上, 按照刚体极限平衡理论计算得到的作用在其上的滑

坡推力为 1 818.08 kN/m. 考虑到滑坡体为松散堆积体, 滑坡推力按三角形分布作用在抗滑桩上. 桩间距设定为 6 m, 桩长初步取为 13 m(其中滑动面以下桩长为 3 m), 桩身截面  $B\times H=1.5\text{ m}\times 2\text{ m}$ , 桩身混凝土采用 C30. 本工程实例中拟布设两排锚索, 锚索与水平面的夹角均按  $30^\circ$  考虑. 上排锚索位于桩顶下 0.6 m, 自由段长 18 m, 施加预应力 600 kN; 下排锚索位于桩顶下 2.6 m, 自由段长 15 m, 施加预应力 800 kN(图 5).

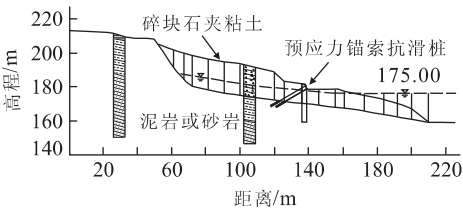


图 5 下土地岭滑坡治理工程剖面示意

Fig. 5 Sketch map of the profile of remediation work of Xiatudiling landslide

经计算:  $\alpha_0 = \left(\frac{kB_p^{\frac{1}{4}}}{EI}\right) = 0.707.$

由此:  $\alpha_0 h = 2.12$ , 故按刚性桩考虑.

(1) 计算锚索设计拉力: 根据前述公式不难计算出以下参数:

$(G_1, G_2, G_3)^T = (7.5\times 10^{-8}, 1.58\times 10^{-8}, 5.0\times 10^{-8})^T.$

进而可得:

$(\zeta_{ij}) = \begin{pmatrix} 4.0\times 10^{-6}, 4.9\times 10^{-6} \\ 4.9\times 10^{-6}, 5.98\times 10^{-6} \end{pmatrix};$

$(C_1, C_2)^T = (9.37\times 10^{-2}, 9.2\times 10^{-2})^T.$

将以上结果代入到公式:

$$\sum_{j=1}^n \zeta_{ij} R_j + \delta_i \cdot \sec \theta_i \cdot R_i = C_i.$$

可得:

$$\begin{cases} 91.4R_1 + 4.9R_2 = 93\,700 \\ 4.9R_1 + 110.63R_2 = 92\,000 \end{cases}.$$

解此方程得:

$R_1 = 983, R_2 = 788.$

即上排锚索的设计拉力为 788 kN, 而预应力为 600 kN; 下排锚索的设计拉力为 983 kN, 而预应力为 800 kN.

(2) 计算桩身内力: 桩身内力计算结果详见图 6, 7. 从已计算出的数据不难看出:

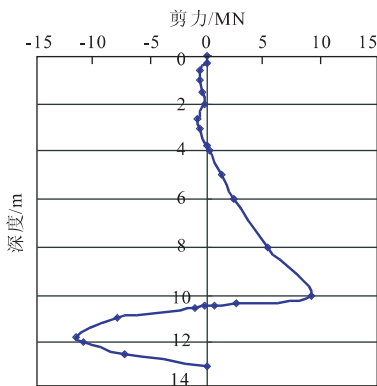


图 6 桩身剪力

Fig. 6 Shear forces diagram of the pile body

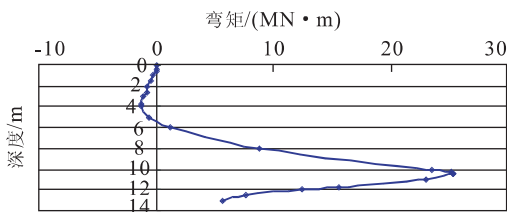


图 7 桩身弯矩

Fig. 7 Bending moments diagram of the pile body

$Q_{x \cdot \max} = -11\,540.4\text{ kN}$ ,  $M_{x \cdot \max} = 25\,436.88\text{ kN} \cdot \text{m}$ .  
(3)桩顶位移:  $f_3 = (x_0 + L) \cdot \varphi = 2.2 \times 10^{-2}\text{ m} = 22\text{ mm}$   
而桩顶位移的控制标准为:

$0.005\,h_t = 0.005 \times 13 = 65 \times 10^{-3}\text{ m} = 65\text{ mm}$   
可见,计算出的桩顶位移满足桩顶的位移控制标准.

(4)与普通抗滑桩的对比分析:方案的对比分析应该是综合考虑多因素,包括技术可行性、经济合理性、施工的难易程度等等.预应力锚索抗滑桩相对于普通抗滑桩而言,在施工中显然比后者复杂.但是其经济优势也是显而易见的.

这里仅列出抗滑构筑物原设计方案与预应力抗滑桩方案在工程量方面的差异,详见表 1.

从表 1 中不难看出,采用预应力锚索抗滑桩后混凝土和钢筋用量相对于普通抗滑桩来说大大减小了,而前者尚包括锚索工程,其施工难度与复杂程度均大于后者.但从综合经济因素分析来看,前者明显优于后者.

6 结论

预应力锚索抗滑桩已被大量工程实践证明是一

表 1 预应力锚索抗滑桩与普通抗滑桩设计方案工程量对比

Table 1 Comparison of project work components between stabilizing piles with pre-stressed anchor cables and ordinary stabilizing piles

| 项目                       | 普通抗滑桩<br>(原方案)       | 预应力锚索抗滑桩<br>(刚性桩方案) |
|--------------------------|----------------------|---------------------|
| 总桩数/个                    | 33                   | 28                  |
| 桩长/m                     | A 型:16.0<br>B 型:14.0 | 13.0                |
| 截面尺寸/m <sup>2</sup>      | 3.5×2.5              | 1.5×2.2             |
| 理论砼方量/m <sup>3</sup>     | 4287.50              | 1201.20             |
| 理论钢筋用量/T                 | 344.75               | 244.22              |
| 锚索长度/m(每束<br>由 6 根钢绞线组成) | —                    | 1316.0              |

种行之有效的滑坡治理工程措施.其相对于普通抗滑桩而言,大大改善了结构体的受力状况,使结构体更加主动地发挥阻滑作用.

本文力图从滑坡地质体与抗滑桩、预应力锚索的相互作用出发,找到这种结构体的力学模型,以及相应的数学模型,从而求解出锚索设计拉力和桩身的内力分布.文中将双参数法引入到土抗力模数或地基系数的计算中,并贯穿到整个结构计算中.从锚索与抗滑桩的位移变形协调条件出发,推导出了刚性桩模式和弹性桩模式下的锚索设计拉力的计算表达式,进而推导出桩身嵌固段的内力表达式.文中提出了桩顶位移的控制标准,并按此标准来控制预应力锚索抗滑桩的结构计算.结合三峡库区秭归县水田坝乡土地岭滑坡治理工程介绍了这种滑坡治理措施的应用,并与原普通抗滑桩设计方案进行了技术与经济对比分析,体现了这种抗滑结构的优越性.

References

Chen, Z., 2001. Designing and calculating prestressed anchor cable-pile. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(4):352—356 (in Chinese with English abstract).  
Gui, S. Q., 2003. Calculating and design method and their applications of stabilizing piles with pre-stressed anchored cables in landslides remediation works (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).  
Institute of Exploration and Surveying in Shenzhen City, Geotechnical Engineering Company of Shenzhen City, 1996. Technical code for retaining and protection of deep building foundation excavation in Shenzhen area

(SJG05—96), Institnte of Exploration and Surverying in Shenzhen (in Chinese).

No. 2 Survey and Design Institute of Ministry of Railways, 1983. Design and calculation of stabilizing pile. China Railway Publishing House, Beijing (in Chinese).

Northwest Branch of China Academy of Railway Sciences, 1997. Landslide prevention and remediation. China Railway Publishing House, Beijing (in Chinese).

Wang, H. Q. , Li, C. Z. , Liu, L. Z. , et al. , 1990. Design and construction of stabilizing pile with pre-stressed anchored cables. Proceedings of landslide in China, Vol. 7. China Railway Publishing House, Beijing (in Chinese).

Wu, H. L. , 2000. Composite stiffness principle and biparameter method for laterally loaded pile. Second edition. People's Communication Press, Beijing (in Chinese).

Wu, Y. P. , Wang, Y. , 2002. Preliminary design report of Xiatudiling landslide in Zigui County, Hubei Province, China. China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese).

Xu, B. D. , 2001. Landslide analysis and control. China Railway Publishing House, Beijing, 699—721 (in Chinese).

Zhou, D. P. , Wang, J. S. , 2002. Design method of retaining pile pre-stressed cable. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(2): 247—250 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈占, 2001. 预应力锚索桩设计与计算. 地球科学——中国地质大学学报, 26(4): 352—356.

桂树强, 2003. 预应力锚索抗滑桩设计与计算方法研究及工程应用(硕士学位论文). 武汉: 中国地质大学.

深圳市勘察测绘院, 深圳市岩土工程公司, 1996. 深圳地区建筑深基坑支护技术规范(SJG 05—96). 深圳: 深圳市勘察测绘院出版. 6—7.

铁道部第二勘测设计院, 1983. 抗滑桩设计与计算. 北京: 中国铁道出版社.

铁道部科学研究院西北研究所, 1977. 滑坡防治. 北京: 人民铁道出版社, 304—472.

王化卿, 李传珠, 刘励忠, 等, 1990. 预应力锚索抗滑桩设计与施工. 滑坡文集, NO. 7. 北京: 中国铁道出版社, 34—41.

吴恒力, 2000. 计算推力桩的综合刚度原理和双参数法(第二版). 北京: 人民交通出版社.

吴益平, 汪洋, 2002. 秭归县水田坝乡下土地岭滑坡初步设计报告. 武汉: 中国地质大学.

徐邦栋, 2001. 滑坡分析与防治. 北京: 中国铁道出版社, 699—721.

周德培, 王建松, 2002. 预应力锚索桩内力的一种计算方法. 岩石力学与工程学报, 21(2): 247—250.

\*\*\*\*\*

(上接 176 页)

贾荃希, 1992. 地下热水调查的物探化探方法. 北京: 地质出版社.

李建威, 李紫金, 傅昭仁, 等, 2000. 遂川—热水走滑断裂带热异常与热液铀成矿作用. 地质科技情报, 19(3): 39—43.

李学礼, 1992. 论热源、水源、矿(铀)源三源成矿问题. 华东地质学院学报, 15(2): 101—112.

邱爱金, 郭令智, 郑大瑜, 等, 2002. 大陆构造作用对相山富大铀矿形成的制约. 北京: 地质出版社.

邵飞, 2000. 邹家山矿床低温热水成因及其与铀矿化关系. 华东地质学院学报, 23(1): 24—27.

张荣华, 胡书敏, 王军, 等, 2002. 长江中下游典型火山岩区水—岩相互作用. 北京: 中国大地出版社.

周涛发, 袁峰, 岳书仓, 等, 2002. 安徽月山矿田矽卡岩型矿床形成的水岩作用. 矿床地质, 21(1): 1—9.

周文斌, 孙占学, 李学礼, 2000. 古水热系统与铀成矿作用. 北京: 地质出版社.