

# 锚索抗滑桩系统内力变形研究

李凯玲, 门玉明

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 在对锚索抗滑桩系统内锚索与抗滑桩受力状态综合分析的基础上, 认为锚索的拉伸变形对锚索抗滑桩系统的内力及变形存在一定影响, 基于锚索与抗滑桩的变形协调原理, 提出了锚索拉力及其变形的计算方法, 推导了抗滑桩桩身位移和内力的计算公式, 并将该方法用于工程实例分析。通过与其他方法比较, 说明使用该方法计算锚索抗滑桩的合理性和经济价值, 并分析了锚索变形以及拉力大小对锚索抗滑桩系统内力变形的影响, 所得结果已得到后期模型试验的数据支持。

**关键词:** 锚索抗滑桩; 内力; 变形; 普通抗滑桩

**中图分类号:** P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2007)04-0400-04

## Research on Internal Force and Deformation of Anchor Anti-Slide Piles System

LI Kai-ling, MEN Yu-ming

(School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Comprehensive study on the force undergoing force of the anchor and anti-slide pile in the anchor anti-slide piles system shows that the deformation of the anchor has a close connection with the internal force and deformation of piles. According to the deformation consistence principle, a method is presented to calculate the tensile force and deformation of anchor as well as displacement and internal force of the anti-slide, and the corresponding formula is derived in detail. Compared with the other methods by an engineering example, it indicates that the calculation method has the economic value. Meanwhile, the example shows that the tensile force and deformation of the anchor has a great influence upon the internal force and deformation of the anchor anti-slide piles, and the calculation result is validated by the data of the later experiment.

**Key words:** anchor anti-slide piles; internal force; deformation; normal anti-slide pile

## 0 引言

滑坡是一种危害严重的地质现象, 常会造成严重的人身伤亡或财产损失, 滑坡防治研究已成为地质工程的热点<sup>[1]</sup>。在目前的滑坡治理工程中, 抗滑桩已成为一种常用的支挡结构物。在早期滑坡治理中, 主要采用悬臂抗滑桩, 近年来, 随着锚固技术的发展, 将锚索与抗滑桩相结合而形成的锚索抗滑桩结构已为工程技术人员所青睐。与悬臂抗滑桩

的被动受力相比较, 锚索抗滑桩作为一种主动受力结构, 可以给滑坡体施加一个相当大的预应力, 对于正在活动的滑坡来说, 锚索抗滑桩体系具有快速阻止滑坡体滑动的作用。此外, 由于桩顶锚索的拉力作用, 滑动面(带)以上的桩身受力状态将由普通抗滑桩的悬臂式变为简支梁式, 从而使整个桩身的弯矩与剪力大为减少, 分布也更加合理。

随着预应力锚索抗滑桩在工程中的广泛应用, 对其计算模型研究也受到人们的关注。王化卿、李

收稿日期: 2006-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40272116); 陕西省自然科学基金项目(2005D04)

作者简介: 李凯玲(1972-), 女, 陕西西安人, 讲师, 博士研究生, 从事地质工程教学与研究。E-mail: dcdgx21@chd.edu.cn

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

传珠等将锚索抗滑桩受力图简化为顶端铰支、下端为弹性联结的弹性地基梁式结构, 未考虑锚索受力后出现的弹性变形, 同时锚索拉力也是根据经验给出的<sup>[2]</sup>。前苏联 Л. К. 金布格等提出用控制桩顶水平位移的方法计算锚索拉力, 该方法考虑了桩周岩土的共同作用以及桩的变形, 但把桩顶变形作为已知条件, 忽略了锚索变形与桩的共同作用<sup>[3]</sup>。针对在变形及受力分析中将锚索与抗滑桩分开计算的缺陷, 笔者以锚索与抗滑桩的共同作用理论为基础, 通过对锚索以及抗滑桩变形与受力的全面分析, 建立起新的锚索抗滑桩内力及变形计算方法。

### 1 作用在锚索抗滑桩系统上的外力

作用在锚索抗滑桩上的外力主要包括滑坡推力、受荷段和锚固段的地层抗力、桩侧摩阻力和粘结力、桩底应力和锚索的锚固力等(图 1)<sup>[4]</sup>。其中桩侧摩阻力和粘结力不仅可以产生平衡弯矩, 帮助抗滑桩抵抗一部分滑坡推力, 还可以抵消一部分由自重引起的桩底应力, 但由于其计算复杂, 所以通常不考虑桩侧摩阻力和粘结力的影响。同时由于桩侧摩阻力和粘结力的存在, 减小了桩底应力, 为简化计算, 对桩底应力通常忽略不计。从总体效果来看, 这样计算的结果较安全, 但对整个结构的内力及变形影响不大。

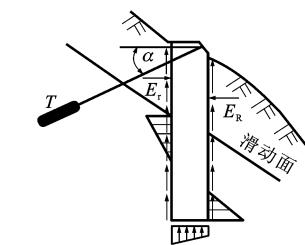


图 1 抗滑桩上的作用力  
Fig. 1 Flavor Undergoing Force of the Anchor Anti Slide

综上所述, 在对抗滑桩计算时应主要考虑滑坡推力、受荷段和锚固段地层抗力和锚索的锚固力。

### 2 锚索抗滑桩系统的受力及变形

将抗滑桩与锚索视为一个整体, 桩简化为受横向变形约束的弹性地基梁, 由于锚索沿 y 轴的分力对抗滑桩的弯矩影响可忽略, 因此只考虑锚索沿 x 轴的分力  $R_{h1}$ , 且将锚索与抗滑桩连接处的 1 点(以下简称桩锚连接点)视为弹性支座, 以考虑锚索变形对抗滑桩的影响(图 2)<sup>[5]</sup>。

由位移变形协调关系可知, 锚索变形沿 x 轴的分量  $\Delta_{h1}$  与桩锚连接点 1 处桩的水平位移  $f_1$  相等, 即有

$$\Delta_{h1} = f_1 \quad (1)$$

式中:  $\Delta_{h1} = \Delta_1 \cos \alpha$ ,  $\alpha$  为锚索与水平面的夹角。

#### 2.1 锚索水平伸长量 $\Delta_{h1}$ 的计算

以往计算模型中通常只考虑锚索在自由段的伸长量, 而未考虑锚固段锚索的变形。由于锚索在岩土体中受到预应力张拉荷载  $R_1$ 、砂浆对锚索束体的握裹力、砂浆与孔壁的粘聚力等力的共同作用, 因此其伸长也应包括这几部分力所引起的变形。

单根锚杆非锚固段的伸长量为

$$\Delta_1 = \frac{R_1 l_1}{E_s A_1} \quad (2)$$

式中:  $R_1$  为锚索拉力;  $l_1$  为锚索非锚固段长度;  $A_1$  为锚索束换算面积;  $E_s$  为锚索束材料弹性模量。

为达到一定的锚固力, 处于锚固段的锚索应有足够的锚固长度, 以便通过这段长度上粘结应力的积累, 使锚索有足够能力承受拉力<sup>[6]</sup>。

锚固段锚索的力学模型见图 3, 考虑到锚索材料与锚固用水泥砂浆的粘结应力以及砂浆与孔壁粘聚力的共同作用, 利用整体平衡与局部平衡的相互关系, 可以得出锚索的总变形包括锚索的自由伸长量、锚索与砂浆的握裹力影响下的变形、砂浆与孔壁的粘聚力影响下的变形式

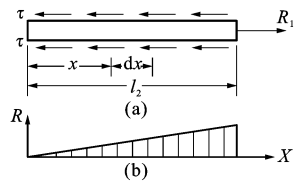


图 3 锚索计算简图及轴力图  
Fig. 3 Calculation Model and Tensive Force of Anchor

$$\Delta_1 = \frac{R_1 l_1}{E_s A_1} + \frac{R_1 l_2}{2E_s} \left( \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right)$$

式中:  $l_2$  为锚索锚固段长度;  $A_2$  为锚索孔面积。

因此, 锚索的整体变形量除了应考虑锚索自由段的变形, 还应该考虑砂浆与锚孔壁的作用。

#### 2.2 桩在滑面 O 点处的剪力及弯矩

根据平衡条件, 桩在滑面 O 点处剪力  $Q_o$  及弯矩  $M_o$  计算为

$$M_o = M - R_{h1} H_1 \quad (3)$$

$$Q_o = Q - R_{h1} \quad (4)$$

式中： $Q$ 、 $M$  分别为滑坡推力或岩土压力作用于滑面处的弯矩和剪力； $R_{h1}$  为桩锚连接点处 1 点锚索拉力的  $x$  分量， $R_{h1} = R_1 \cos \alpha$ ； $H_1$  为桩锚连接点处 1 点距  $O$  点的距离。

2.3 桩锚索连接处桩的水平位移

桩锚连接点处桩的水平位移  $f_1$  应包含桩在锚固段由于地基抗力产生的位移  $x_o$ 、 $\varphi_o$  以及非锚固段由滑坡推力和锚索拉力产生的位移<sup>[7]</sup>，即

$$f_1 = x_o + \varphi_o H_1 + \Delta_{lq} - R_{h1} \hat{q} \tag{5}$$

式中： $x_o$ 、 $\varphi_o$  分别为抗滑桩锚固段顶端  $O$  点处的位移、转角，可由地基系数法计算得出<sup>[6]</sup>； $\Delta_{lq}$  为滑坡推力（或岩土压力）、其他层锚杆拉力  $R_1$  作用于 1 点桩的水平位移，其数值可由结构力学方法求得； $\hat{q}$  为锚杆的柔度系数。

2.4 确定锚索拉力、变形及抗滑桩的内力及变形

将式（1）~（5）联立求解，即可确定锚索拉力、锚索变形以及滑面处的位移、转角、剪力和弯矩。

抗滑桩锚固段桩身内力采用地基系数法按普通抗滑桩计算<sup>[5]</sup>；非锚固段的桩身内力可以根据截面法求得，即距离滑面  $y$  处的内力为

$$\begin{aligned} F_{Sy} &= Q_1(y) - R_1 \cos \alpha \\ M_y &= M_1(y) - R_1 \cos \alpha y \end{aligned} \tag{6}$$

式中： $F_{Sy}$ 、 $M_y$  分别为桩身剪力和弯矩； $Q_1(y)$ 、 $M_1(y)$  分别为岩土压力作用于桩上产生的剪力和弯矩。

最后利用挠曲线近似微分方程，可得到非锚固段的位移及转角。

3 计算实例

陕西延安宝塔山西北部斜坡上的 1 号滑坡治理工程，其桩位布置与滑坡剖面见图 4。宝塔山 1 号滑坡存在于以中更新世黄土为主的高耸斜坡中，岩性单一，结构比较简单。通过对勘察岩土参数<sup>[8]</sup>及滑坡稳定性反算结果的综合分析，需对滑坡进行防治<sup>[9]</sup>。选定滑面以上土体内聚力为  $16.9 \text{ kN/m}^2$ 、内摩擦角为  $28.1^\circ$ 、重度为  $18 \text{ kN/m}^3$ 。滑面以下为砂岩，地基系数为  $3.0 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$ ，且沿深度不变。治理方案是在滑坡下部现人行便道内侧设置一排抗滑桩。通过计算，滑坡推力为  $982.04 \text{ kN/m}$ ，按矩形分布。设计中取桩间距为  $6 \text{ m}$ 。对该滑坡运用多种方法进行了计算，比较结果如下：

（1）按普通抗滑桩设计<sup>[10]</sup>，截面用  $2 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  的矩型截面桩，桩间距为  $6 \text{ m}$ ，桩全长为  $23 \text{ m}$ ，基岩面上  $16 \text{ m}$ ，基岩面以下  $7 \text{ m}$ 。混凝土标号采用

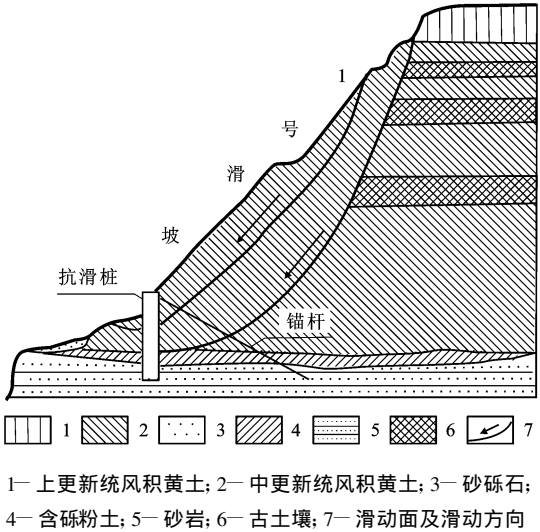


图 4 滑坡剖面  
Fig. 4 Cutaway Figure of Landslide

C30。计算出桩顶位移为  $0.155 \text{ m}$ ，滑面以下  $1 \text{ m}$  处存在最大弯矩，为  $49\,950 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

（2）按锚索抗滑桩设计，桩全长  $21 \text{ m}$ ，其中基岩以上  $16 \text{ m}$ 。采用  $2 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$  的矩形截面桩，桩身仍采用 C30 混凝土。锚索在距桩顶  $1 \text{ m}$  高度上布置，锚索与水平面夹角为  $30^\circ$ ，锚索全长  $40 \text{ m}$ ，其中自由段长度  $30 \text{ m}$ 。采用 16 股  $\varphi_j^{15}$  钢绞线组成锚索束，每桩设一束，用 M20 砂浆锚固。

采用将抗滑桩与锚索分开的传统计算方法<sup>[7]</sup>进行计算，得出锚索拉力为  $1\,696 \text{ kN}$ ，最大剪力和弯矩分别为  $4\,196 \text{ kN}$ 、 $2\,3190 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。与普通抗滑桩相比较，锚索抗滑桩的最大弯矩要比普通抗滑桩小得多，更节约材料。

（3）利用本文计算方法，计算出锚索拉力为  $2\,181 \text{ kN}$ ，最大剪力和弯矩分别为  $3\,635 \text{ kN}$ 、 $14\,710 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。锚索的总变形量为  $0.116 \text{ m}$ ，其中在锚索与砂浆握裹力影响下的变形占  $13\%$ ，砂浆与孔壁岩土之间的内聚力影响下的变形仅占  $2\%$ 。由此看出，砂浆与孔壁岩土之间的内聚力对锚索变形的影响较小，可忽略不计，但由锚索与砂浆之间的握裹力引起的锚索变形应该考虑。

将本文方法与传统分开计算方法作比较，由于在本文方法中考虑了锚索变形与桩顶位移的相互关系，所得的最大弯矩和最大剪力值比较小<sup>[11]</sup>。

对计算成果进行分析，此时抗滑桩全段出现两个弯矩较大值，即滑面以上  $10 \text{ m}$  处和滑面以下  $1 \text{ m}$  处，而最大弯矩是在滑面以下，为  $14\,590 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ，抗滑桩的最大水平位移仍出现在桩顶。虽然最大弯矩

以及桩顶位移都有所减小, 但抗滑桩整体的破坏位置仍类似于悬臂桩(图5)。

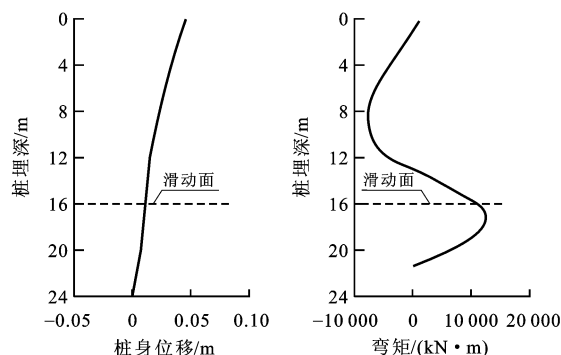


图5 锚索抗滑桩内力及位移计算

Fig. 5 Calculated Results of Internal Forces and Displacement of Anchor Anti-Slide Pile

(4)为解决上述问题, 试将锚索拉力设为2 879 kN, 这时滑面处的水平位移和转角分别为0.004 m和-0.001 3 rad, 最大剪力和弯矩分别为3 199 kN和6 894 kN·m, 计算结果见图6。对内力结果进行分析发现, 通过加大锚索拉力, 不仅使桩顶的水平位移减小, 而且抗滑桩的水平位移最大值已不再出现在桩顶。同时, 抗滑桩的最大弯矩也出现在滑面以上, 为7 954 kN·m。由此可见, 通过调整锚索拉力, 可将抗滑桩的内力及变形调整到相对理想的状态。这一调整可通过遗传算法实现, 优化设计过程将另文分析。

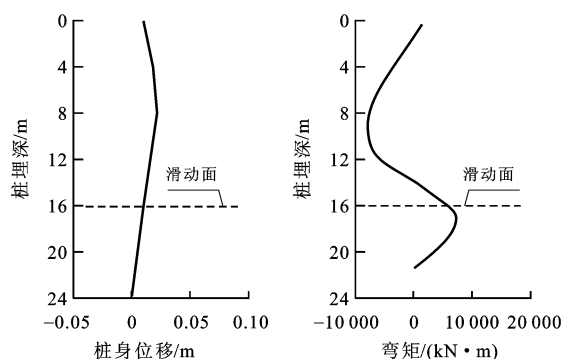


图6 调整锚索后锚索抗滑桩内力及位移计算

Fig. 6 Calculated Results of Internal Forces and Displacement of Anchor Anti-Slide Pile after Adjusted Anchor

(5)尝试利用增加抗滑桩埋置深度的方法, 改善受力情况。通过计算发现, 当埋深增大为8 m时, 锚索拉力、锚索变形以及抗滑桩的内力变化不大。计算结果与项目后期模型试验<sup>[12]</sup>得出的分析结果进行比较可以得出相同的结论, 即当锚索抗滑

桩处于正常工作状态时, 其滑动面以下的锚固长度为非锚固段长度的1/3~1/5。

## 4 结语

(1)基于锚索抗滑桩与岩土体的相互作用原理, 在考虑锚索变形与抗滑桩变形相互协调关系的基础上, 通过对锚索抗滑桩系统的整体分析, 可确定锚索拉力、变形以及抗滑桩全段的位移和内力。计算结果较好地反映了桩的受力状态, 计算过程较简便, 结论更精确, 并可建立相应的计算程序。

(2)锚索总的变形受到锚索拉力、锚索与砂浆的握裹力以及砂浆与孔壁的内聚力影响。其中, 砂浆与孔壁岩土之间的内聚力对锚索变形的影响较小, 可忽略不计, 但由锚索与砂浆之间的握裹力引起的锚索变形应该考虑。

(3)对锚索抗滑桩, 通过调整锚索拉力, 可以进一步改善锚索抗滑桩的整体受力状态, 明显减小抗滑桩的变形及其最大弯矩, 因此可以通过优化设计, 调整锚杆设定位置, 使结构设置更加合理; 但是, 试图通过增加埋置深度来改善其受力情况的做法, 效果不明显。

## 参考文献:

- [1] 卢全中. 略阳县地质灾害发育特征及其危害性初步评价[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(1): 52-56.
- [2] 王化卿, 李传珠. 预应力锚索抗滑桩设计与施工[C]. //滑坡文集编委会. 滑坡文集: 第七集. 北京: 中国铁道出版社, 1990.
- [3] [俄]П. К. 金布格, В. И. 依申柯. 锚杆抗滑桩组合结构计算[C]. //滑坡文集编委会. 滑坡文集: 第五集. 北京: 中国铁道出版社, 1986.
- [4] 吴家惠. 公路支挡构造物[M]. 西安: 西北大学出版社, 1996.
- [5] 周德培, 王建林. 预应力锚索桩内力的一种计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 247-250.
- [6] 蓝宗建. 混凝土结构[M]. 南京: 东南大学出版社, 1998.
- [7] 田景贵, 范草原. 预应力锚索抗滑桩的机理初步分析及设计[J]. 重庆交通学院学报, 1998, 17(4): 59-64.
- [8] 吕成安. 陕西省延安市宝塔山滑坡勘察报告[D]. 西安: 陕西省地质勘察局九零八水文地质工程大队, 2000.
- [9] 毛新虎. 某滑坡稳定分析及处理方案探讨[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(2): 22-26.
- [10] 史良, 张哲, 李寻昌, 等. 316国道K25+040~+140段滑坡治理中的抗滑桩结构设计[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3): 44-47.
- [11] 李凯玲, 门玉明. 锚杆抗滑桩与岩土体相互作用研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(1): 20-22.
- [12] 李寻昌. 锚杆抗滑桩系统的模型试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.