

# 考虑预应力的锚杆支护结构的稳定性计算

王邓岐<sup>1</sup>, 朱彦鹏<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 对于锚杆支护结构的稳定性计算, 在考虑预应力对稳定性的影响时, 尚没有有效的方法, 尤其是采用圆弧滑移面计算支护结构的稳定性时, 都是将锚杆当作土钉, 采用规范中计算土钉墙的方法计算安全系数。将预应力作为集中力考虑, 给出计算预应力锚杆支护结构安全系数的简化方法, 并通过有限元分析软件验证该算法的可行性。

**关键词:** 预应力; 锚杆; 安全系数

中图分类号: TU476.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0125-04

**作者简介:** 王邓岐(1986-), 男, 安徽六安人, 兰州理工大学博士, 从事支挡结构研究与设计工作。E-mail: wdqking@sina.com。

## Calculation of stability of anchor support considering prestress

WANG Deng-qun<sup>1</sup>, ZHU Yan-peng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology

Lanzhou 730050 China; 2. Northwest Center for Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou 730050 China)

**Abstract:** There are no effective ways to calculate the stability of prestressed anchor support considering the effect of prestress. Usually, the anchor is treated as a soil nail, and the safety factor is calculated by the same method of calculating soil nailing provided in standards. A simplified method is provided for calculating the safety factor of prestressed anchor support by treating the prestress as a concentrated force. Its feasibility is verified by finite element software.

**Key words:** prestress; anchor; safety factor

## 0 引言

锚杆加固边坡时, 依赖其与周围土体之间的相互作用传递锚杆拉力, 改善土体的力学参数及应力状态, 减小了坡面位移, 以保持稳定<sup>[1]</sup>。对于锚杆支护结构的稳定性计算, 尚没有有效的方法, 尤其是采用圆弧滑移面计算支护结构的稳定性时, 都是将锚杆当作土钉, 采用规范中计算土钉墙的方法计算安全系数<sup>[2-4]</sup>。这就存在两个问题: 一是虽然锚杆的自由段设计时穿过滑移面, 但是与土体是无黏结的, 并不能等效成土钉; 二是忽略了自由段预应力的作用。其实锚杆的主要作用是将预应力传递到土体中<sup>[5]</sup>。对于稳定性的评价, 准确的方法需要计算出边坡土体的应力及变形, 但目前很难实现这一方法, 且多采用大型有限元软件数值模拟, 不利于工程应用。实际工程中常用搜索潜在滑移面的方法评价边坡的稳定性。对于预应力锚杆支护结构, 根据摩尔-库仑破坏理论:

$$\tau_f = \sigma \tan \phi + c, \quad (1)$$

若  $\sigma$  增大, 则抗剪强度  $\tau_f$  将增大, 而预应力在潜在滑移面处引起附加应力, 正是增加了  $\sigma$ , 因此提高了土体的抗剪强度。分析表明, 预应力锚杆支护结构中的

预应力能够提高边坡的稳定性。

## 1 单根锚杆对滑体的作用分析

### 1.1 基本假设

对于土钉墙, 假定潜在滑移面是圆弧面, 计算该面上土体达到抗剪极限, 同时土钉达到拉伸极限时, 抗滑力矩与滑力矩的比值作为安全系数。但是对于预应力锚杆支护结构, 由于锚杆自由段与土体无黏结, 又由于预应力引起的滑移面处的附加应力, 提高了土体的抗剪强度, 为此本文假设: ①潜在滑移面为圆弧面, 计算该面上土体达到抗剪极限时, 抗滑力矩与滑力矩的比值作为安全系数, 保守计算, 此时锚杆自由段轴力仍取预应力值。②为简化计算, 将滑体看作刚体作用在弹性地基上。

### 1.2 滑体受力分析

根据假设①本文将预应力作为一集中力  $P$  作用在滑体上, 根据假设②将滑体看作刚体作用在弹性地基

上, 取锚杆间距为计算宽度, 采用圆弧滑移面, 并采用条分法计算安全系数, 如图1所示。

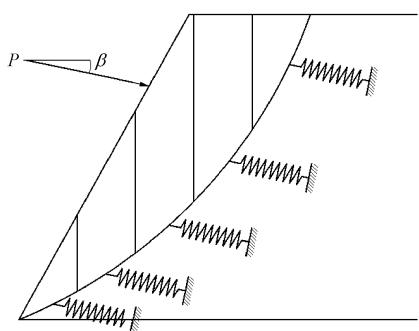


图 1 锚杆支护结构计算简图

Fig. 1 Diagram for calculating anchor support

根据弹性地基梁及土力学与地基基础中的相关理论, 集中力  $F$  作用在弹性地基上的刚体受到地基反力如图2所示, 则

$$q(x) = \frac{F}{lb} + \frac{Mx}{I} \quad , \quad (2)$$

式中,  $b$  为计算宽度,  $M$  为偏心力矩,  $M = Fe$ ,  $e$  为偏心距, 以  $x$  向为正,  $I_z$  为刚体绕垂直纸面的  $z$  轴截面惯性矩,  $I_z = bl^3/12$ 。

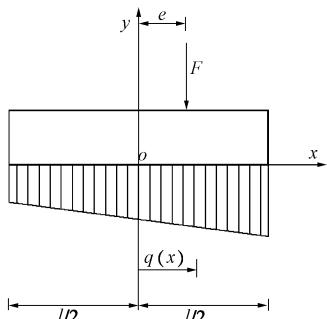


图 2 刚体受弹性地基反力

Fig. 2 Counter force on rigid body from elastic foundation

集中力只引起地基中的附加应力，不影响自重应力，因此，边坡滑体受到的地基反力  $q_p$  如图3所示，图中  $l$ 、 $l_i$ 、 $l_p$  均可根据几何关系求得。

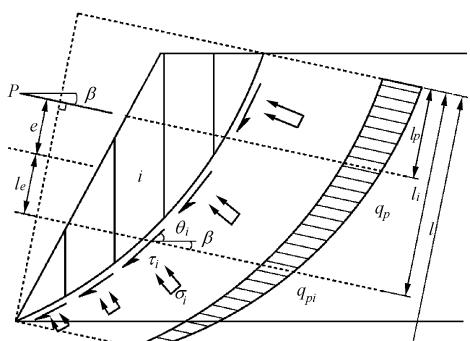


图 3 边坡滑体受地基反力计算简图

Fig. 3 Diagram for calculating counter force applied on slip mass by elastic foundation

根据式 (2) 得

$$q_{pi} = \frac{P}{Sb} + \frac{Pel_{ie}}{bh^3} \quad , \quad (3)$$

式中,  $S$  为圆弧长度,  $b$  为锚杆水平间距,  $e$  为偏心距,  $e = l/2 - l_p$ ,  $l_{ie}$  为  $q_{pi}$  到中心线的距离,  $l_{ie} = l_i - l/2$ , 由于土体不能提供拉力, 因此, 若  $q_{pi} < 0$ , 则取  $q_{pi} = 0$ 。

由于滑移面是个圆弧, 因此将反力  $q_{pi}$  按照对应的圆弧段分解成沿圆弧切向的  $\tau_i$  和沿径向的  $\sigma_i$ , 则

$$\begin{cases} \sigma_i = q_{pi} \sin(\theta_i + \beta) \\ \tau_i = q_{pi} \cos(\theta_i + \beta) \end{cases} , \quad (4)$$

式中,  $\theta_i$  为第  $i$  弧条切线水平倾角,  $\beta$  为锚杆水平倾角。

将所有力对圆弧圆心  $O$  取矩, 如图 4 所示, 根据力矩平衡, 则

$$Rb \sum_{i=1}^n \tau_i s_i = Ph_p \quad , \quad (5)$$

式中,  $s_i$  为弧条长度,  $h_p$  为  $P$  对圆心  $O$  的力臂,  $R$  为圆弧半径。

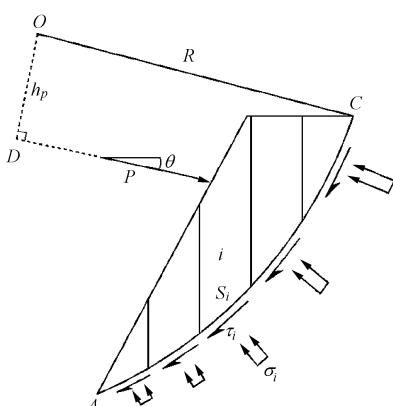


图 4 滑体受力分析

Fig. 4 Force analysis of slip mass

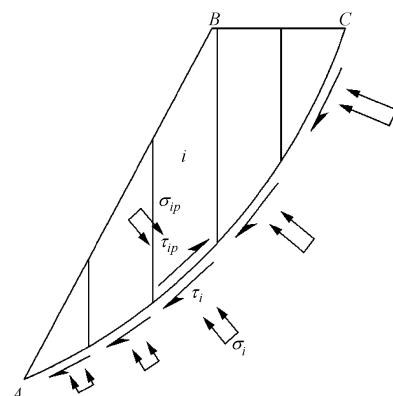


图 5 预应力等效示意图

Fig. 5 Schematic diagram of equivalent prestress

根所式(4)、(5)及图5,由作用力和反作用力的关系,预应力 $P$ 对滑体的作用可以等效成沿圆弧切向的 $\tau_{ip} = \tau_i$ 和沿径向的 $\sigma_{ip} = \sigma_i$ 的共同作用,如图5所示,且

$$Rb \sum_{i=1}^n \tau_{ip} s_i = Rb \sum_{i=1}^n \tau_i s_i = Ph_p \quad , \quad (6)$$

$$\sigma_{ip} = \sigma_i = q_{pi} \sin(\theta_i + \beta) \quad . \quad (7)$$

## 2 单根锚杆作用下边坡稳定性计算

由以上分析可知, 集中力对滑体产生积极的抗滑作用。条分法计算无支护边坡安全系数简图如图 6 所示, 安全系数

$$K = \frac{R \sum_{i=1}^n \left( \frac{N_i}{s_i b} \tan \varphi_i + c_i \right) s_i b}{R \sum_{i=1}^n T_i \sin \theta_i} \quad , \quad (8)$$

式中,  $N_i = W_i \cos \theta_i$ ,  $T_i = W_i \sin \theta_i$ ,  $W_i$  为第  $i$  土条重力,  $\varphi_i$  为第  $i$  土条处土体的内摩擦角,  $c_i$  为第  $i$  土条处土体的黏聚力。

因此, 有预应力锚杆支护边坡, 除了自重应力分力  $N_i$  作用下的抗滑作用, 还应该在式 (8) 中增加  $\tau_{ip}$ 、 $\sigma_{ip}$  的抗滑作用, 即安全系数

$$K_s = \frac{R \sum_{i=1}^n \left( \left[ \frac{N_i}{s_i b} + \sigma_{ip} \right] \tan \varphi_i + c_i \right) s_i b + \tau_{ip} s_i b}{R \sum_{i=1}^n T_i \sin \theta_i} \quad , \quad (9)$$

根据式 (6) 并化简, 则得

$$K_s = \frac{Ph_p + R \sum_{i=1}^n [(W_i \cos \theta_i + \sigma_{ip} s_i b) \tan \varphi_i + c_i s_i b]}{R \sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \quad . \quad (10)$$

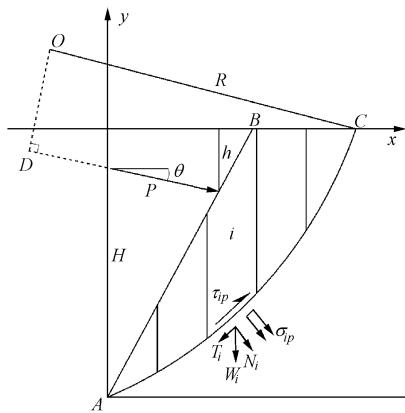


图 6 预应力锚杆支护结构安全系数计算简图

Fig. 6 Diagram for calculating safety factor of prestressed anchor support

## 3 多根锚杆作用下边坡安全系数计算

对于  $m$  根锚杆作用, 忽略后施工的锚杆在施加预应力后对之前的锚杆预应力造成的损失, 因此, 只需

将各锚杆分别作为集中力计算其  $\tau_{ip}$ 、 $\sigma_{ip}$ , 然后叠加, 则式 (10) 变为

$$K_s = \left\{ \sum_{j=1}^m P_j h_{pj} + R \sum_{i=1}^n [(W_i \cos \theta_i + \sigma_{ip_i} s_i b + \dots + \sigma_{ip_m} s_i b) \tan \varphi_i + c s_i b] \right\} / R \sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i \quad . \quad (11)$$

## 4 与现有边坡分析软件对比验证

本文的方法为简化计算方法, 手算与机算均可, 本文已将上述算法采用 MATLAB 编制成程序。

目前用以分析或设计预应力锚杆支护结构的软件不是很多, 已有的大型有限元分析软件如 ANSYS、ADINA 等, 对于分析预应力锚杆支护结构不是很理想, 尤其是对锚杆自由段的建模以及自由段预应力的加载非常困难, 本文采用的 GEOSTUDIO\_SLOPE 软件可以很好解决以上问题, 事实上该软件是将预应力作为集中力作用滑移面与锚杆的交点<sup>[6]</sup>, 与本文方法具有可比性, 因此采用此软件对本文算法进行对比验证。

算例: 某边坡土体参数见表 1, 锚杆布置见图 7。该工程处于厚度约 17 m 黄土层。

表 1 某边坡土体参数

Table 1 Soil parameters of a slope

重度 $\gamma$	内摩擦角 $\varphi$	黏聚力	高度 $H$	坡角 $\alpha$
16 kN/m <sup>3</sup>	24°	20 kPa	10 m	90°

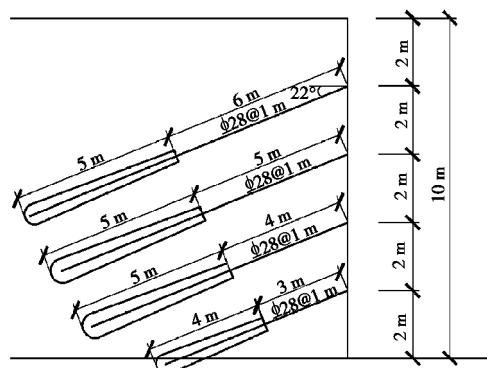


图 7 某边坡锚杆布置图

Fig. 7 Layout of a prestressed anchor support

采用 GEOSTUDIO\_SLOPE 建模分析, 将所有锚杆施加相同的预应力, 分别从 10 kN 增加到 60 kN, 算得安全系数见表 2 和图 8。

由表 2 及图 8 可以看出, 本文算法虽然是简化算法但与 GEOSTUDIO\_SLOPE 所得结果较为接近。图 9 和图 10 所示同为 30 kN 预应力时, 滑移面搜索结果 (编程时未将锚杆在图形中输出, 但计算时已考虑)。

表 2 不同预应力下边坡安全系数

Table 2 Safety factor of slope with different prestresses

预应力值/kN	GEOSTUDIO_SLOPE	本文算法
0	0.820	0.843
10	0.873	0.899
20	0.938	0.955
30	0.993	1.011
40	1.070	1.066
50	1.147	1.121
60	1.248	1.177

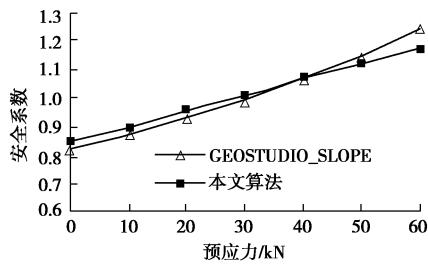


图 8 安全系数对比曲线

Fig. 8 Curves of safety factors calculated by two methods

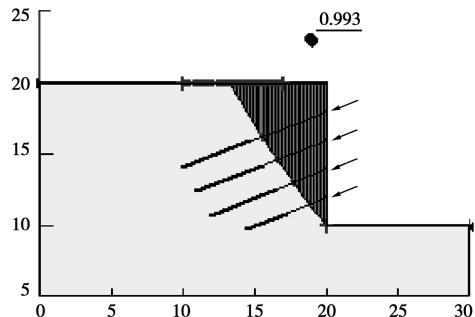


图 9 GEOSTUDIO\_SLOPE 滑移面搜索结果

Fig. 9 Slip surfaces searched by GEOSTUDIO\_SLOPE

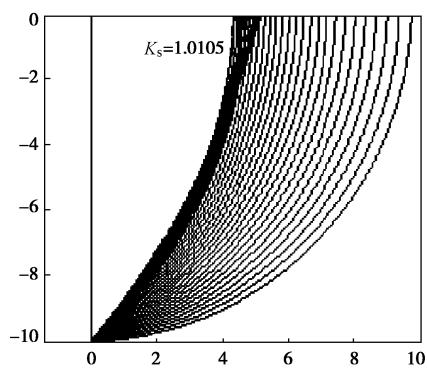


图 10 本文算法滑移面搜索结果

Fig. 10 Slip surfaces searched by proposed method

实际上笔者对比了三个算例, 结果都是二者计算的安全系数较为接近, 限于篇幅, 未将其它算例列出。尽管如此, 由于本文算法是基于自由段穿过滑移面的, GEOSTUDIO\_SLOPE 计算时考虑了滑移面穿过锚杆锚固段的情况, 所以若滑移面穿过自由段, 两者结果较为相近, 若滑移面穿过锚固段, 则相差较大。

## 5 结 论

(1) 对于预应力锚杆支护结构的稳定性计算, 将锚杆当作土钉计算是不合理的, 且忽略了预应力的作用。采用圆弧滑移面评价边坡的稳定性时, 预应力起到极强的抗滑作用。

(2) 本文给出一个简化的计算方法, 将预应力作为集中力考虑, 采用圆弧滑移面计算边坡的安全系数, 对边坡稳定性进行评价, 并给出安全系数计算式, 尽管是简化的, 通过软件验证了该算法的可行性。

## 参 考 文 献:

- [1] 林杭, 曹平. 锚杆长度对边坡稳定性影响的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 470-474. (LIN Hang, CAO Ping, Numerical analysis for effect of bolt length on stability of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 470-474. (in Chinese))
- [2] 张发明, 刘汉龙, 赵维炳. 预应力锚索加固岩质边坡的设计实例[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 177-179. (ZHANG Fa-ming, LIU Han-long, ZHAO Wei-bing. Design practice of reinforcing rock slope with prestressed cables[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(2): 177-179. (in Chinese))
- [3] 李忠, 朱彦鹏. 框加预应力锚杆边坡支护结构稳定性计算方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3922-3926. (LI Zhong, ZHU Yan-peng. Stability calculation methods for grillage supporting structure with prestressed anchor and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3922-3926. (in Chinese))
- [4] 贾金青, 郑卫锋. 预应力锚杆柔性支护法的研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1257-1261. (JIA Jin-qing, ZHENG Wei-feng. Study and application of flexible retaining method with prestressed anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1257-1261. (in Chinese))
- [5] 韩爱民, 李建国. 预应力锚杆框架梁的支护力学行为研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2894-2900. (HAN Ai-min, LI Jian-guo. Mechanical behaviors of frame beam supporting structure with prestressed anchors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2894-2900. (in Chinese))
- [6] GEO\_SLOPE International Ltd. Stability modeling with slope/W: 2007ed[CP]. Canada, 2008.

(本文责编 明经平)