

预应力锚杆布置参数与边坡安全系数相关解算^{*}

朱欣荣, 吕力行

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:通过预应力锚杆加固后边坡安全系数和锚固力的计算,得出预应力锚杆布置参数对于计算边坡安全系数的作用至关重要。在边坡例证搜集数据的基础上,运用FLAC3D软件对锚杆支护效果进行数值模拟,运用Matlab软件对模拟数据进行拟合,得出相应的曲线图。利用回归分析中的多元线性回归进行计算,从而确定了锚杆布置参数与边坡安全系数的相关性。

关键词:边坡安全系数;预应力锚杆;多元线性回归;最小二乘估计

中图分类号:TD854⁺.6 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0076(2015)02-0018-04

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2015.02.005

The Solution of the Relationship between Prestressed Bolt Installation Parameters and Slope Safety Coefficient

ZHU Xinrong, LV Lixing

(School of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The calculation of slope safety and the anchoring force of the prestressed bolt show that bolt installation parameters are crucial for calculating slope safety coefficient. Based on the collection of a set of data, using FLAC3D software for numerical simulation of the bolt support and Matlab software to fit the data, the corresponding curve was gotten. By using multivariable liner regression to calculate the fitting curve, the correlation between bolt installation parameters and slope safety coefficient was determined.

Key words: safety coefficient of slope; prestressed bolt; multivariable linear regression; liner least squares estimate

在大量的岩土工程中,锚杆作为一种有效的边坡加固手段已得到广泛运用,锚杆支护边坡理论发展的历史很长,但却缓慢,其理论有待完善。蔡淑静在锚杆参数对桩锚支护结构安全影响方面的研究中重点涉及了锚杆安装角度与边坡安全系数的影响^[1];陈尤等对岩质边坡锚杆布置参数进行优化设计^[2];彭文祥等研究边坡的锚杆支护角度、间距、锚杆长度等对边坡稳定性的影响^[3];林杭等分析了锚杆安装角度、布置形式等对边坡安全系数的影

响^[4];房有师等分析了新型锚杆布置角度对土体工程锚固性能的影响^[5];祁磊等用数值分析中的插值法分析了锚杆安装角度与边坡安全系数的相关性^[6]。本文作者在前人研究的基础上,采用锚杆数值计算单元,利用FLAC3D建立某露天矿台阶边坡的计算模型,分析锚杆布置角度、间距、布置位置与边坡安全系数的相关性,利用多元线性回归计算得到锚杆布置参数与边坡安全系数的定量关系。

^{*} 收稿日期:2015-01-06

作者简介:朱欣荣(1990-),女,甘肃兰州人,在读硕士研究生,安全工程专业,主要研究方向为边坡工程。

1 预应力锚杆加固边坡原理

刚体极限平衡分析方法是比较成熟、应用最多的边坡稳定性分析方法,滑塌是否发生,取决于滑体有多大的滑动力(致滑力)和滑床能提供多大的阻滑力(抗滑力)。因此定义边坡安全系数:

$$[F_s] = \frac{\text{抗滑力(矩)}}{\text{致滑力(矩)}} \tag{1}$$

采用预应力锚杆加固边坡,主要是利用锚杆与岩体的共同作用,大大地改善了边坡岩体的稳定条件。首先,由于预应力的作用,使不稳定滑体处于较高围压的三向应力状态,岩体强度和变形特征比单轴压力及低围压条件下高得多。其次,锚杆的锚固力直接改变了滑面上的应力状态和滑动稳定条件,由图1和图2可知,由预应力锚杆的锚固力所增加的抗滑阻力增量为 Q_{fi} 为:

$$Q_{fi} = Q_m \tan \varphi + Q_{tv} = Q_t [\sin(\alpha + \theta) \tan \varphi + \cos(\alpha + \theta)] \tag{2}$$

- 式中, Q_t — 锚杆设计拉力值;
 Q_{tm} 、 Q_{tv} — Q_t 沿滑面的法向分力和沿滑面的切向分力;
 α — 滑动面倾角;
 θ — 锚杆与水平方向的夹角;
 φ — 滑动面上的内摩擦角。

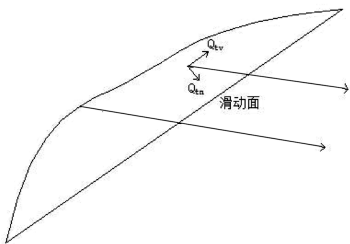


图1 预应力锚杆的抗滑作用图

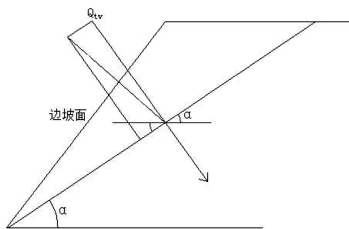


图2 滑面上的锚固力图

由式(2)可知,预应力锚杆一方面直接在滑动面上产生抗滑阻力 Q_{tv} ;另一方面通过增大滑面上

的正应力 Q_{tm} ,来增大抗滑摩擦阻力。
合理的选用边坡安全系数的需用安全系数值 $[F_s]$,即边坡允许的最小安全系数,是边坡锚固工程设计需首先解决的问题^[7]。

2 应用实例

某边坡地处云贵高原向江南丘陵的过渡地带,地势北、西、南三面高,中间低并向东倾斜,区内地貌形态以山地为主。此边坡位于这种地形中,且其地层为白垩系泥质粉砂岩、粉(细)砂岩、间夹薄层状泥岩和页岩,属软质岩石,受多期构造地质作用,节理裂隙极发育,风华破碎强烈,岩体完整性和边坡稳定性差(边坡数值模型如图3所示)。

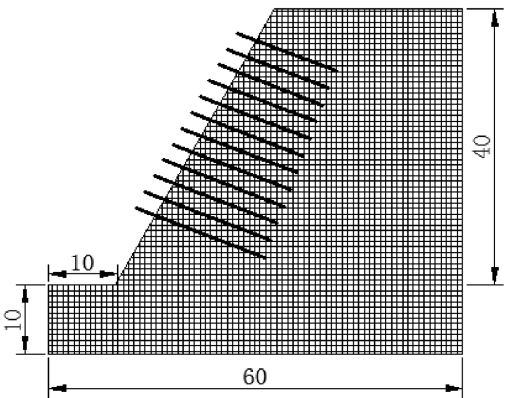


图3 边坡数值模型

此边坡坡面高40 m,水平长度为60 m,竖直高度为40 m,倾角为60°。根据其岩性物理参数(表1)运用 Flac3D 软件建立模型(图4),其中含有1 500个单元,3 000个节点,采用考虑剪切与拉伸破坏的库伦-摩尔强度准则。边界条件为下部固定约束,左右两侧水平约束,上部为自由边界;初始应力场按自重重力考虑;计算收敛准则为不平衡力比率(节点平均内力与最大不平衡力的比值)的求解要求。

表1 边坡岩性物理力学参数

重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /MPa	切变模量 /MPa	内摩擦角 /°	内聚力 /kPa	抗拉强度 /MPa
2 000	100	30	20	200	1

从图4中计算得到边坡安全系数为1.05,且可以明显看到塑形贯通区域即潜在滑动面,速度矢量图则有力地佐证了这一判断;因滑动面外侧区各网

格点速度明显大于其他区域,说明这一区域已经出现明显滑动,即发生了破坏。

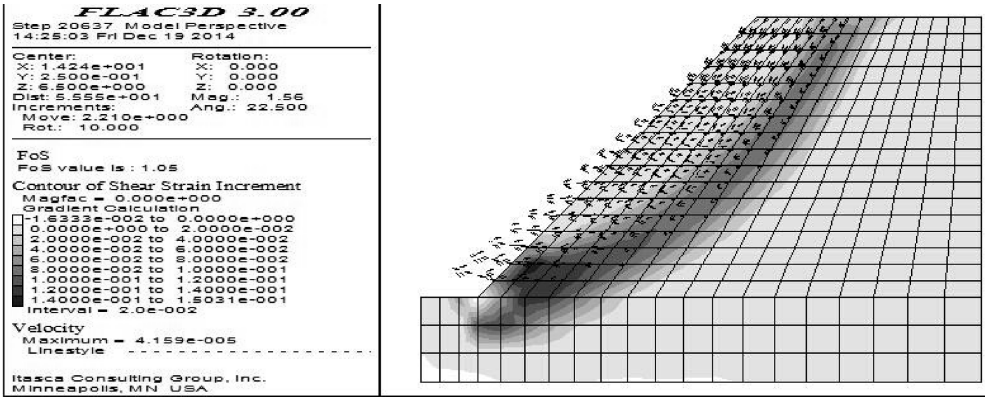


图4 边坡安全系数、剪应变增量云图及速度矢量图

表2 锚杆物理参数					
横截面 面积/mm ²	弹性模 量/GPa	抗拉强 度/GPa	单位面积上水 泥刚度/MPa	单位长度水泥 浆粘聚力/GPa	周长 /mm
706	200	10	7	1	314

选用多组方案综合分析,锚杆物理参数见表2。选择方案如下:以7 m 锚杆为例,锚杆间距选择0.5、1、1.5、2 m 四种方案;布置角度由10°依次增加到35°;锚杆布置位置(锚杆距坡面的距离,即砂浆厚度)距离取为0.5 m。采用上述方案进行数值模拟,得到各布置参数与边坡安全系数关系,运用 matlab 软件拟合关系曲线,见图5~图7,相关数据见表3。

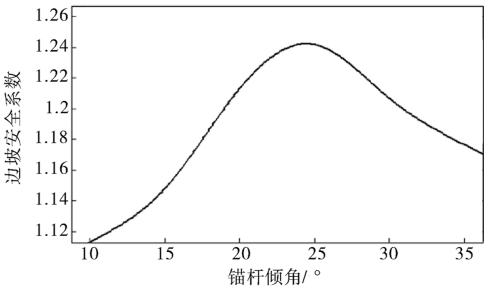


图5 锚杆倾角与边坡安全系数的关系

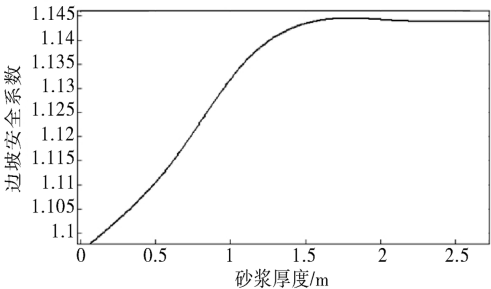


图6 砂浆厚度与边坡安全系数的关系

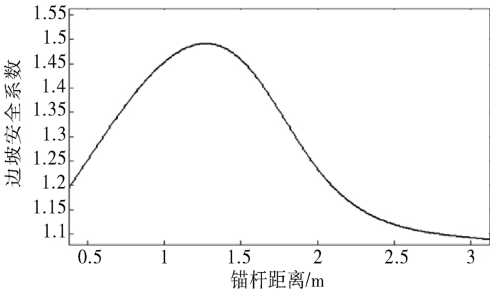


图7 锚杆间距与边坡安全系数的关系

表3 锚杆布置参数与边坡安全系数				
方案编号	倾角/°	间距/m	砂浆厚度/m	边坡安全系数
1	10	0.5	0.1	1.23
2	15	1	0.6	1.32
3	20	1.5	1.1	1.39
4	25	2	1.6	1.27
5	30	2.5	2.1	1.24
6	35	3	2.6	1.22

3 多元线性回归求解

多元线性回归具有很大的实用意义,一般设有 k 个影响因素 $X_1, X_2, \cdots, X_k$ 与因变量 Y 有如下相关关系:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_k x_k + \varepsilon \tag{3}$$

$$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2) \tag{4}$$

称式(2)和式(3)为多元回归函数, $\beta_i (i = 0, 1, \cdots, k)$ 称为回归系数, $\beta_i (i = 0, 1, \cdots, k)$ 与 σ^2 均未知^[8]。

设 $(x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{ik}, y_i) (i = 1, 2, \cdots, n)$ 为 $(X_1, X_2, \cdots, X_k, Y)$ 的试验数据,且

$$X = \begin{cases} y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \cdots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon, i = 1, 2, \cdots, n \\ \varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2), i = 1, 2, \cdots, n \\ \text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0, i \neq j, j = 1, 2, \cdots, n \end{cases} \quad (5)$$

记 $\beta = (\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_k)^T, Y = (y_1, y_2, \cdots, y_n)^T, \varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \cdots, \varepsilon_n)^T$

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

则式(4)表示为

$$\begin{cases} Y = X\beta + \varepsilon \\ \varepsilon \sim N_n(0, \sigma^2 I_n) \end{cases}$$

因为 $\text{rank}(X^T X) = \text{rank}(X) = k + 1$, 所以 $(X^T X)$ 存在, 故得到 β 的 LS 估计

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (6)$$

令锚杆倾角为 x_1 , 厚度为 x_2 , 间距为 x_3 , 边坡安全系数 y , 将表4数据带入上述公式, 求得回归系数的估计值

$$\hat{\beta}^T = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3) = (2.2392, -0.0585, 0.0151, 0.3100)$$

多元样本线性回归方程为

$$y = 2.2392 - 0.0585x_1 + 0.015x_2 + 0.31x_3$$

即边坡安全系数 F_s 与锚杆倾角 α 、间距 d 及砂浆厚度 l 的定量关系式为

$$F_s = 2.2392 - 0.0585\alpha + 0.0151l + 0.31d \quad (7)$$

4 结论

(1) 运用数值模拟和拟合曲线可以看出, 边坡安全系数随着锚杆倾角的增加呈先增大后减小的关系, 锚固角度在 $20^\circ \sim 25^\circ$ 时锚固效果最好; 安全系数随着锚固厚度的增大, 到 1.5 m 时呈缓慢增长趋

势, 考虑成本问题, 锚固厚度在 1.5 m 时较为合理; 安全系数随着锚杆布置间距的增大呈二次抛物线曲线, 且在间距大于 1.5 m 后安全系数急剧减小, 因此锚固间距为 1 ~ 1.5 m 为最佳。

(2) 运用多元线性回归得出了锚杆布置参数与边坡安全系数的函数关系, 该算法构筑了边坡安全系数与锚杆倾角、间距、布置位置的定量关系, 为判断锚杆支护边坡提供了直观简明的依据, 经验算该方法的误差为 3.4%, 在可接受范围内需要指出的是该算法是基于有限数据对曲线的拟合, 有一定范围内的误差, 有待于更多的工程实例来验证。

参考文献:

- [1] 蔡淑静, 严平. 锚杆参数对桩锚支护结构安全性影响分析[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(6): 97-100.
- [2] 陈尤, 韦秉旭, 唐辉湘. 基于 FLAC3D 的岩质边坡锚杆优化设计[J]. 中外公路, 2011, 31(6): 85-89.
- [3] 彭文祥, 赵明华, 袁海平. 基于拉格朗日插值法的全长注浆锚杆支护参数优化[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(5): 1002-1007.
- [4] 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.
- [5] 房有师, 刘汉龙, 柯结伟. 新型回收锚杆不同布置角度锚固效应[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 686-690.
- [6] 祁磊, 吕力行. 锚杆安装角度与边坡安全系数相关性解算[J]. 矿产保护与利用, 2014(4): 18-21.
- [7] 仵磊, 徐燕, 代树林. 边坡工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 177-178.
- [8] 杨虎. 数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 125-132.