

文章编号: 1000-7598-(2005) 08-1338-04

层状岩质边坡预应力锚索加固工程应用分析

赵静波¹, 高 谦², 李 莉²

(1. 中冶集团建筑研究总院 地基及地下工程技术研究所, 北京 100088; 2. 北京科技大学 土木工程系, 北京 100083)

摘 要: 对平庄西露天煤矿边坡滑移模式进行了分析, 得出软弱层面是控制滑坡的主因。针对抗滑桩埋设深度受限、不能对边坡深部的潜在软弱层滑移面进行控制而形成随深增加潜在滑移体积累的特点, 对采用预应力长锚索加固深部弱层面的方式进行分析研究, 结果表明采用预应力锚索加固可以明显提高岩体强度, 消除沿弱层面滑移的安全隐患。在矿山的实际应用证明, 预应力锚索加固深部弱层面效果良好, 达到预期结果。

关 键 词: 滑移模式; 预应力锚索; 数值分析

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Engineering application analysis of prestressed anchor rope reinforcing layered rock slope

ZHAO Jing-bo¹, GAO Qian², LI Li²

(1. Ground and Foundation Engineering Branch, Central Research Institute of Building and Construction, Mcc Group, Beijing 100088, China;

2. Department of Civil Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Through analyzing the landslide pattern of the slope in West Open Pit Coal Mine of Pingzhuang, a conclusion can be drawn that the weak interfaces is the main controlling factor of landslide. Considering the depth of anti-sliding pile is limited so that it can not control the potential deep-stated weak interfaces which will accumulate the potential sliding mass with the increase of mining depth, so another reinforcement method, using prestressed anchor rope to reinforce the deep-stated weak interfaces, is analyzed. The results show that this method can improve the strength of the whole rock mass obviously and erase the incipient fault of slipping along the weak interfaces. The practice of the mining area also proves that the prestressed anchor rope reinforcement is in good working order and meets the expectant result.

Key words: pattern of landslide; prestressed anchor rope; numerical analysis

1 引 言

层状岩质边坡是煤矿露天矿经常遇到的一类岩体结构。顺层岩石边坡, 尤其是缓倾角岩层, 边坡的稳定性主要受层理和弱面所控制, 顺层滑坡是此类边坡失稳的主要模式。为了确保矿山的安全生产, 同时为提高煤矿开采的经济效益, 因此进行层状岩质边坡的稳定性分析和加固技术研究, 对于矿山的安全、高效开采是必要的。

尽管目前锚固技术已经广泛应用于水电边坡、深基坑以及地基基础的加固, 但在煤矿边坡却很少应用, 多数煤矿边坡的整治采用抗滑桩加固。例如, 海州露天矿是采用钢筋混凝土抗滑桩, 并辅助疏干

排水等措施的综合整治方案, 以治理非工作帮E9+50~E11+50 范围内不稳定边坡, 取得了显著效果^[1]。抚顺西露天北帮E-800滑坡采用钢轨抗滑桩进行边坡加固^[2]。实际上, 很多金属矿山的边坡整治都采用抗滑桩加固措施^[3-4]。

在实际工程中发现, 采用抗滑桩加固时由于多采用人工开挖, 桩基稍深, 在施工过程中就存在着安全隐患。如果桩深达不到设计要求, 岩层弱面没有得到加固, 使桩随上部岩体沿弱面的下滑而移动, 达不到预计加固效果, 甚至加固失效。即使达到设计深度, 但随着工程开挖的进展, 边坡向下延伸, 潜在的滑移面深度下移, 也可能导致坡体沿深部滑面失稳。同时, 相对于锚固技术, 抗滑桩加固

成本较高，施工期延长，而施工质量和工期还受天气和季节的影响，不良的施工质量也影响边坡的加固效果，致使很多边坡在加固后仍出现较大变形而失稳破坏。

预应力锚固技术在岩质边坡中的应用与发展是近几十年岩土工程发展的一个重要标志，已在道路工程、港口码头、电站大坝及地下工程中得到了广泛的应用，锚索锚固深度达到 60 余米，预应力可达 6 000 kN，并取得了巨大成功。锚索加固技术可以通过调节预应力起到主动加固滑移体，充分调动岩土体自身强度和自稳能力、提高施工过程的安全性和时效性、有效控制岩体及工程结构的变形以及显著降低工程造价，但目前还很少在煤矿边坡加固中得到应用。

2 矿区地质条件与岩性指标

自 1983 年以来，平庄西露天煤矿非工作帮和工作帮相继发生多次大规模滑坡。从矿区的地质条件综合分析，地质条件复杂，组成边坡的岩石松软，软弱夹层分布密集，局部区段边坡受断层影响较大。2 个台阶以至于 3 个台阶组合边坡不仅稳定性差，而且滑坡的规模大，滑坡坡面倾角一般都在 $17^{\circ} \sim 27^{\circ}$ 。

露天煤矿非工作帮 464 站边坡高度为 12 m，由 2 个 6 m 的台阶组成，在纵向剖面中存在有 4 个不连续弱层岩体，且弱层较薄，边坡岩体为顺层结构，如图 1 所示。构成台阶的岩性为泥岩、砂岩和砂泥岩互层，多为泥质胶结，层理发育，含水则岩性变软，尤其是泥岩易风化破碎，遇水泥化，力学强度降低。根据岩体的风化程度，可划分为：强风化带、弱风化带和微风化带。

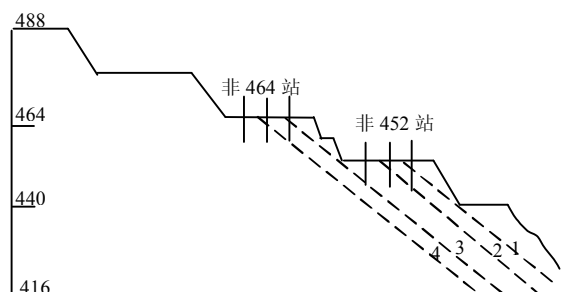


图 1 非工作帮边坡 I-I 剖面示意图

Fig. 1 Sketch map of the profile I-I of footwall slope

3 边坡稳定性评价与破坏因素分析

西露天矿边坡高度不大，但地质条件极为复

杂。取 I-I 剖面单台阶边坡开挖进行稳定性分析研究。在该处有 4 个较薄的弱层存在，且粘聚力很低，在建立相应的数值计算模型时充分考虑了岩层划分、弱层面单元的处理，给不同岩层赋予相应的强度、变形参数值，在自重作用下形成初始应力场，考察模拟开挖边坡岩体的变化过程。

在形成初始应力场后位移归零，一次开挖形成 6 m 台阶边坡，台阶坡面角为 65° 左右，边坡角约为 49° ，未采取锚索支护时，进行数值模拟分析。数值分析参数见表 1 和表 2。

表 1 稳定性分析中各岩层力学参数
Table 1 Mechanical parameters for stability analysis of the slope

岩层	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	粘聚力 /MPa	内摩擦角 / $(^{\circ})$	变形模量 /GPa	泊松比 μ	剪切模量 /GPa	体积模量 /GPa
强风化带	20.28	0.21	14.0	0.150	0.25	0.60	1.00
弱风化带	20.78	0.53	22.0	0.263	0.24	1.06	1.69
微风化带	22.54	1.22	28.0	0.358	0.22	1.47	2.13

表 2 稳定性分析中弱面节理单元的计算参数
Table 2 Calculating parameters for joint elements of weak plane in stability analysis

弱层号	间距 s/m	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	法向刚度 k_n/GPa	切向刚度 k_s/GPa
3	0.05	0.01	8.0	45.0	13.5
4	0.36	0.02	14.5	11.3	3.52

模拟结果表明，边坡在坡底线处失稳滑移，如图 2 所示。边坡滑坡特征表现为上部岩体的位移矢量几乎平行于 3 号弱面，在近坡脚局部才出现极小范围的弧形滑面，边坡失稳方式主要为以 3 号弱面为滑动面的弱面-圆弧复合滑坡模式。

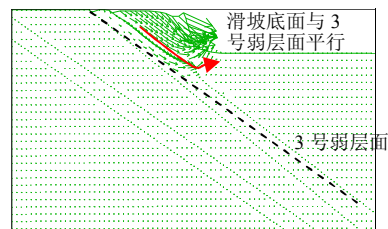


图 2 边坡失稳位移矢量

Fig. 2 Displacement vectors of the slope landslide

由边坡的宏观破坏特征可逆推其主控因素：

(1) 3 号缓倾斜层为 5 cm 薄层软岩，含水，滑腻，将上下部岩体分开，使上部岩体形成一潜在的滑移体，为上部岩体的剪切破坏提供了构造与岩体条件。

(2) 3 号弱层岩体粘聚力仅为 0.02 MPa, 内摩擦角 $\phi=14.5^\circ$, 长期强度 $\phi=8^\circ$, 岩层倾角为缓倾角 (26° 左右), 只考虑在 3 号弱面的影响下上部岩体发生顺层平面滑动的可能性, 采用极限平衡分析法计算 (见式 (1))。在干坡状态下取弱层面内摩擦角 $\phi=14.5^\circ$ 时, 安全系数为 0.80, 边坡处于不稳定状态; 考虑山坡汇水作用和弱面长期强度, 计算得其稳定安全系数为 0.62, 3 号弱面上部岩层处于极不稳定状态。由于 3 号弱面岩体的抗剪切强度较低, 使上部岩体具有沿弱面发生平面滑移的趋势。

$$K=\frac{Q\cos\alpha\tan\phi+cL}{Q\sin\alpha}\tag{1}$$

(3) 对边坡发生的平面圆弧滑坡可分解为平面滑坡和圆弧滑坡两部分, 如图 3 所示。把顺层平面滑坡的作用力视为在圆弧滑面上的质点 P 的作用力, P 点的抗滑力和下滑力分别为

$$N_p=Q\cos\alpha\tan\phi+cL;\quad T_p=Q\sin\alpha\tag{2}$$

则台阶边坡稳定安全系数为

$$K=\frac{M_R}{M_T}=\frac{R\tan\phi\sum_{i=1}^nQ_i\cos\alpha_i+RcL+RN_p}{R\left(T_p+\sum_{i=1}^nQ_i\sin\alpha_i\right)}=\frac{\tan\phi\sum_{i=1}^nQ_i\cos\alpha_i+cL+N_p}{T_p+\sum_{i=1}^nQ_i\sin\alpha_i}\tag{3}$$

计算得台阶边坡稳定安全系数为 0.69, 大于 3 号弱层面平面滑坡安全系数。由于在台阶边坡开挖形成后, 3 号弱层面距台阶边坡坡底线距离缩短, 抗剪切强度减低, 小于 3 号弱层面以上岩体主动下滑产生的不平衡下滑力, 圆弧面岩体产生剪切破坏如图 4 所示, 造成被动滑移。分析表明, 边坡内的弱层面是边坡岩体滑移破坏的控制面。弱层面岩体滑腻, 抗剪强度参数 c 、 ϕ 值小, 汇水则更明显, 在开挖形成边坡时, 弱面距坡底线的距离减小, 至不足以抵抗弱面上层岩体沿弱面产生的下滑力时, 导致边坡失稳; 要控制矿山边坡的滑坡, 就要控制弱层面的主动滑移, 对弱层进行加固。

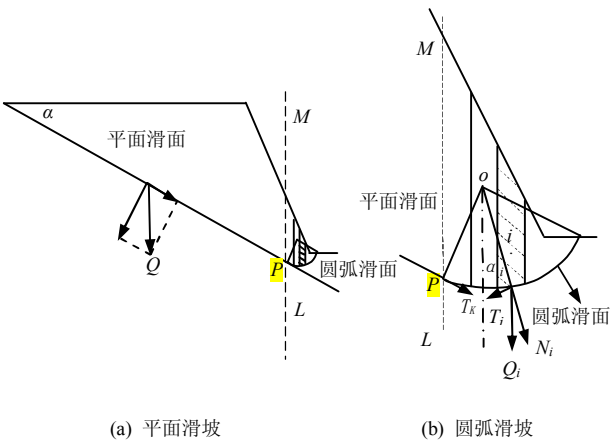


图 3 平面-圆弧复合滑坡分解示意图
Fig. 3 Decomposition sketch map of the plane and circular combined landslide

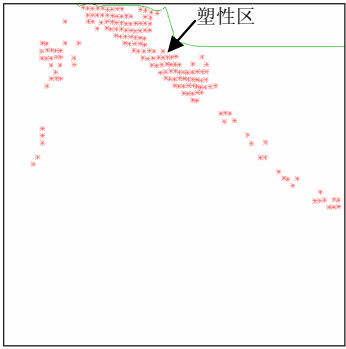


图 4 边坡失稳岩体塑性区
Fig. 4 Rock mass plastic zones of the slope landslide

4 预应力锚索加固作用

为了对边坡进行加固, 控制弱层面的主动滑移, 采取能够对弱层滑移进行有效控制的合理方式。设计采用预应力锚索进行加固, 设计参数见表 3。根据锚索设计参数, 对边坡进行加固后数值模拟, 模拟 5 700 步, 达到应力平衡, 锚索加固后的岩体边坡最大滑移量只有 14 mm, 由于预应力锚索作用力均匀地分布于加固的岩体上, 提高岩土体自身强度和自稳能力, 使边坡保持完整, 边坡附近的 3 号弱层塑性区全部消失, 而在边坡远处的弱层内还存在剪切塑性破坏区 (如图 5 所示)。

表 3 预应力锚索参数表
Table 3 Parameters of prestressed anchor ropes

位置 / 排	长度 l/m	直径 ϕ/mm	间距 a/m	排距 t/m	锚固长度 l_m/m	弹性模量 E/GPa	锚固屈服值 Y_{ie}/MN	灰浆抗压强度 R/MPa	灰浆剪切模量 G/GPa
1	23.5	80	3	2.5	6.5	98.6	0.548	20.0	9.0
2	22	80	3	2.5	6.5	98.6	0.548	20.0	9.0

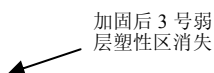


图 5 预应力锚索加固塑性区
Fig.5 Plastic zones of the prestressed anchor rope reinforcement

锚索的加固作用对弱层岩体的影响可近似表示为

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= c_0 + \eta \frac{\frac{\tau S}{\sin \theta} + F \sin \theta \tan \phi_1 \pm F \cos \theta}{ab} \\ \phi_1 &= \phi_0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 c_0 , ϕ_0 为加固前岩体的粘聚力和内摩擦角； c_1 , ϕ_1 为加固后岩体的粘聚力和内摩擦角； τ 为锚杆(索)材料的抗剪强度； S 为锚杆(索)的截面积； η 为综合经验系数； F 为锚索对弱层面的作用力； θ 为锚索与弱层面的夹角； a , b 为加固锚索间、排距。取 $\eta=1$ 时，计算得 $c_0=0.042$ MPa，弱层的抗剪切强度有了显著的提高，加固后边坡稳定安全系数达到 1.73。

对 464 站边坡采用预应力锚索加固后，2003 年用 010B 经纬仪配 REDZL 红外线测距仪进行了地面岩移观测，来监测边坡表面变形发展。监测结果说明：边坡既没有发生水平位移；也没有发生沉降（表 4）。预应力锚索加固边坡，达到了预期效果，该区域边坡处于稳定状态。

表 4 边坡观测高程数据

Table 4 The observed data of elevations of the slope

实测高程/mm	观测时间/月-日	实测高程/mm	观测时间/月-日
464.608	1-17	464.607	2-27
464.608	1-22	464.609	3-14
464.608	1-28	464.610	3-25
464.608	2-11	464.610	3-31

5 结 语

通过对西露天非工作帮 464 站台阶边坡稳定性分析和模拟开挖锚固研究，证明层状结构边坡的弱层面，其抗剪强度、抗拉伸强度较低，对边坡稳定

性影响很大，成为层状边坡稳定性受控的主因。

在岩质边坡加固工程中，由于锚索加固深度大，使用预应力长锚索加固，可使作用力均匀地分布于需加固的岩体上，保持边坡的完整；同时可以充分发挥岩土自身的能量，提高岩土体自身强度和自稳能力、提高施工过程的安全性和时效性，可以有效控制边坡沿弱层的滑移；预应力加固同抗滑桩加固相比，当锚索体施加预应力后，对被锚固的岩体立即产生主动压力，发挥锚固效应，这对于滑体处于动与不动的临滑状态时，稍微施加点预应力就有可能制止边坡滑动，因此其发挥作用快，而抗滑桩是在岩体发生位移后，下滑力才作用于抗滑桩上，属于被动施加应力加固；抗滑桩开挖土、石方工程量大，施工期长，而锚索与抗滑桩相比，施工期短，工程造价明显降低。预应力锚索加固层状边坡明显优于抗滑桩加固方式。

参 考 文 献

- [1] 郭增涛, 崔治光. 海州露天煤矿滑坡综合整治[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1992, 11(2): 32—37.
GUO Zeng-tao, CUI Zhi-guang. Combinative support of landslide in Haizhou Open Pit Coal Mine[J]. *Journal of Fuxin Mining Institute (Natural Science)*, 1992, 11(2): 32—37.
- [2] 刘志斌, 吕培印, 吴学民. 组合式钢轨抗滑桩应力状态的数值模拟[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1996, 15(4): 418—421.
LIU Zhi-bin, LU Pei-yin, WU Xue-min. Numerical simulation for stress behavior of rails-combined anti-slide pile[J]. *Journal of Fuxin Mining Institute (Natural Science)*, 1996, 15(4): 418—421.
- [3] 许东俊, 任伟中, 任清平. 永平铜矿岩质边坡中的滑坡整治[J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 1—10.
XU Dong-jun, REN Wei-zhong, REN Qing-ping. Harnessing of landslide for the rock slope in Yongping Copper Mine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1994, 15(1): 1—10.
- [4] 张楚灵, 罗王桂. 云浮硫铁矿采场边坡管理[J]. 化工矿物与加工, 1999, (2): 13—14.
ZHANG Chu-lin, LUO Wang-gui. Management of open-pit slope in Yunfu Pyrite Mine[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 1999, (2): 13—14.