

[文章编号] 1004- 0609(2000) 03- 0451- 04

边坡残余构造应力引起的宏观破坏特征及机制^①

杜炜平¹, 古德生¹, 颜荣贵²

(1. 中南工业大学 资源环境与建筑工程学院, 长沙 410083; 2. 长沙矿冶研究院, 长沙 410012)

[摘 要] 针对某采场软岩边坡大型滑坡破坏体罕见的宏观破坏特征, 研究了边坡开挖时残余构造应力释放对岩体的作用机制和泥化夹层水膜化效应的力学原理。研究表明, 该矿软岩边坡的破坏特征受控于残余构造应力释放及泥化夹层水膜化效应。

[关键词] 软岩边坡; 残余构造应力; 歪斜滑移; 泥化夹层; 水膜效应

[中图分类号] TD854. 6

[文献标识码] A

矿山边坡稳定性分析及稳坡对策一直为矿山岩土工程界所关注, 人们已从不同侧面并借助于不同的工具方法进行了大量的研究工作^[1~ 5], 解决了许多重大矿山边坡问题。但是对于深凹露天边坡开挖过程中岩体残余构造应力释放而引起的边坡稳定性问题, 国内外公开报道的研究甚少。本文结合乌拉嘎金矿团结沟西采场南坡大型滑坡破坏体的不对称变形、歪斜滑移等宏观破坏特征以及钻孔揭示的泥化夹层滑面与紧邻滑面下方的岩饼化岩层, 分析研究了边坡开挖时残余构造应力释放的作用机制, 以期对深凹露天软岩边坡稳定性分析及防治对策拓宽思路。

1 乌拉嘎金矿团结沟西采场滑坡体

乌拉嘎团结沟金矿位于鹤岗凸起太平沟复背斜西缘与中生代乌拉嘎拗陷带接壤处, 近矿围岩蚀变多为高岭土化、绢云母化、绿泥石化。西采场南坡滑坡体为凝灰质砂岩, 属低强度、大变形软岩体。南坡构造除小背斜外, 有 4 条断裂(如图 1 所示): F_1 属压性断裂, 走向 17° , 倾向 287° , 倾角 33° , 延长 200 m 后转向东南, 全长 360 m; F_2 属压性断裂, 产状同前, 延长 200 m; F_3 位于 F_1 与 F_2 之间, 走向 NE, 距边坡线约 200 m; F_4 位于 127° 线以东, 属拉性正断层, 走向与勘探线平行, 陡倾角, 长 120 m。1996 年 9 月 26 日在露天采场 194 m 平台发现南帮滑坡破坏体, 破坏体沿南帮边坡长 280 m。在南帮自然坡上沿勘探线有三条大裂缝: 东裂缝 A_1A_2 沿张性断裂面 F_4 发展, 长 120 m, 宽 2~ 3 cm, 裂缝两

边无高差; 中央裂缝 $B_1B_2B_3$ 沿压性断裂面 F_2 发展, 长 160 m, 与 F_3 断裂面相交; 西裂缝 $C_2C_3C_4C_5$ 沿压性结构面 F_1 发展, 长 160 m, 缝宽 0.4~ 0.5 m, 裂缝两边有高差, 破坏区内侧比外侧低 0.3~ 0.5 m。在该裂缝后部长约 40~ 50 m 的区间 C_2C_3 内, 变形及破坏异常强烈, 形成宽 4~ 5 m 的楔形错动带。在其后缘西半部沿 F_3 断裂构造形成了平行于边坡线的环开裂 C_2B_1 。同时由钻孔资料可见: 滑坡体滑面为凝灰质砂岩内部破碎的泥化夹层, 紧邻滑面下伏有 2 m 厚的连续岩饼化凝灰质砂岩; 滑体厚度约 30 m, 总量约 130 万 m^3 。

根据上述地质及钻探资料可总结该滑坡体的宏观特性如下:

1) 大变形值。边坡滑移使 194 m 平台产生底鼓变形, 底鼓量与边坡垂高之比值为 16.7×10^{-3} ; 西开裂缝两边高差与滑坡体厚度之比值为 $(10 \sim 17) \times 10^{-3}$; 软岩变形破坏体具有 $(10.0 \sim 20.0) \times 10^{-3}$ 的大应变;

2) 渐进破坏。开裂缝 $C_2C_3C_4C_5$ 长度由 1996 年 9 月的 160 m 发展到 1996 年 12 月的 300 m; 平台底鼓量由 1996 年 6 月的 0.5 m 发展至 1997 年 3 月的 0.8~ 1.0 m;

3) 滑面倾角小于岩体内摩擦角。滑面倾角为 $9^\circ \sim 13^\circ$, 岩体内摩擦角为 $21^\circ \sim 26^\circ$, 这是只有软岩滑面特殊水化与物理作用才可能出现的罕见特例;

4) 歪斜滑移与不对称开裂破坏。边坡滑移方向为边坡面倾向偏东 38° , 滑坡破坏体的变形与破坏在西边界及后缘开裂交汇处最为集中, 导致滑体向 NE 歪斜。

① [收稿日期] 1999- 04- 28; [修订日期] 2000- 01- 04

[作者简介] 杜炜平(1970-), 男, 博士研究生。

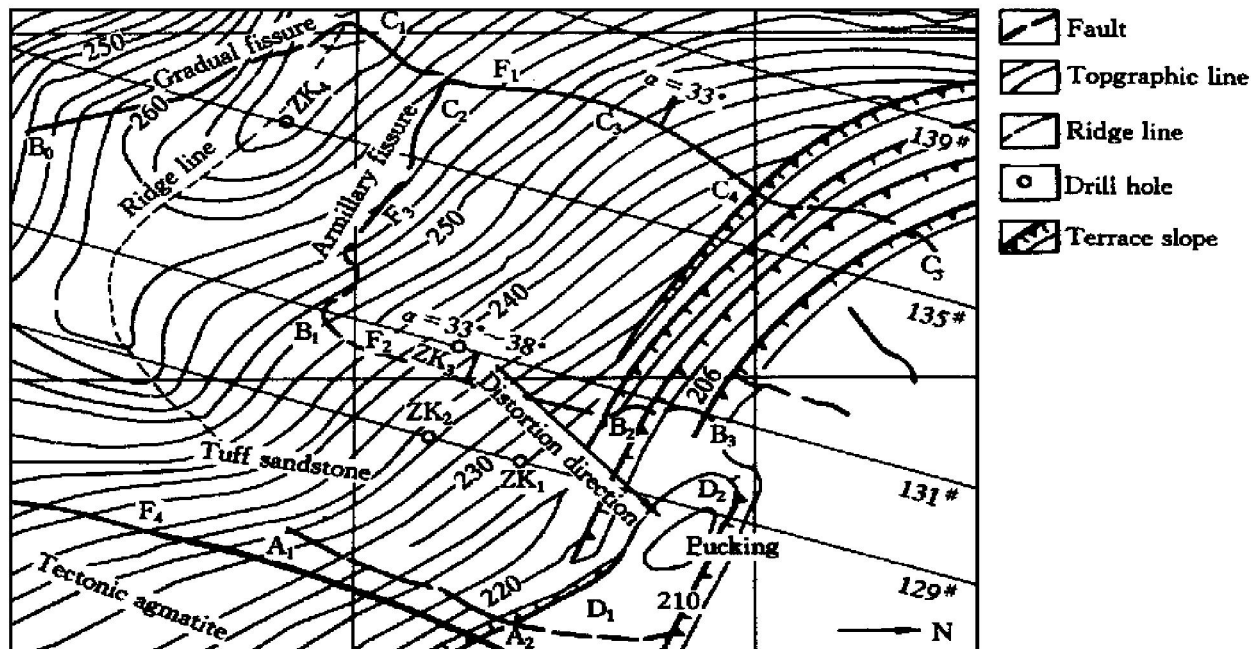


图 1 团结沟西采场南帮大滑坡破坏区域平面图

Fig. 1 Plan view of large landslide of Tuanjiegou west mining area

2 滑面的泥化夹层水膜效应

2.1 泥化夹层分析

我国水利水电部门与中国科学院对泥化夹层进行了深入研究^[6]。研究表明：泥化夹层多位于软硬岩体交接面附近，其组分为粘土矿物、粘粒物质及少量含碳酸钙类胶结物；该软弱层经受地质构造力作用而成为层间错动带，经地下水作用而成泥化夹层。在国内已发现多种泥化夹层类别^[7~9]，乌拉嘎团结沟金矿西采场南坡经钻孔证实，在凝灰质砂岩内部离地表30m深处存在一个破碎松散岩层。此软弱岩层多含粘粒与粘土矿物，具有接受大气降水渗入的良好条件，并在地下水作用下而成泥化夹层。据现场实测，泥化夹层的强度指标为： $C_s = (0.011 \sim 0.013) \text{ MPa}$ ， $\varphi_s = 21^\circ \sim 26^\circ$ 。

2.2 泥化夹层水膜化效应

水是影响泥化夹层强度的最主要因素。一般情况下，水以结晶水的形式赋存于泥化夹层中，在爆破振动等外在因素触发下，结晶水则在泥化夹层表面游离成自由水而形成水膜面，使泥化夹层抗剪强度急剧下降；当外界干扰因素消失后，泥化夹层水膜面的自由水又能逆转而成为结合水，泥化夹层强度又回升。日本学者曾测得水膜面强度指标： $C_w = 0.0055 \text{ MPa}$ ， $\varphi_w = 2^\circ 10'$ ；水膜面消失后泥化夹层强度指标： $\varphi_s = 9^\circ 30' \sim 16^\circ 30'$ ，恢复原来状态^[10]。由此可见水膜面化部分的泥化夹层抗剪强度降低至

近于零。

因此，只要确定泥化夹层局部水膜化的等效不连续系数及水膜面强度指标，并结合工程地质工作，便可对泥化夹层局部水膜化的软岩边坡体进行稳定性分析。现场分析结果表明，只有软岩边坡中泥化夹层局部水膜化，才可能使滑体沿着倾角小于内摩擦角的泥化夹层面滑动。

3 应力释放及构造断裂面的作用

3.1 残余构造应力引起的边坡斜歪滑移

在坐标系 $O-xyz$ 中， y 轴为边坡面走向， x 轴为边坡面倾向。 xOz 为进行极限平衡分析的纵剖面。当边坡体应力场以自重应力为主时， x 和 y 方向的应力相等，即 $\sigma_x = \sigma_y = \lambda$ ， $\sigma_z = \lambda H$ ，故在 xOy 水平面内 $\tau_{xy} = 0$ ，因此计算平面 xOz 即为主平面。在露天坑封闭圈以上，边坡开挖导致边坡体自重应力消失并引起 σ_x 的释放，如果有变形与破坏，则在主平面 xOz 内展开，不会发生歪斜滑移。在露天坑封闭圈以下， σ_x 于潜在滑面以上全部释放，则边坡稳定性可按滑体重力来进行极限平衡分析。根据长期的工程与生产实践经验，对硬岩边坡体不考虑此因素不会出现任何可感的影响。

当边坡体应力场以构造应力为主时，边坡开挖对其稳定性影响有独特性。现以 σ_1 、 σ_3 及 σ_2 三个主应力方向组成三维直角坐标系 $O-x_1y_1z_1$ ，其中 z_1 与 z 重合， x_1 为 σ_1 指向， y_1 为 σ_3 指向， x_1 与

x 轴夹角 α (见图 2)。乌拉嘎团结沟西采场南坡赋存有连续的岩饼化岩层, 据分析这是燕山期构造运动产物, 存在有残余构造应力。据现场岩饼化岩层形态分析可知, 残余构造主应力 σ_1 与 σ_3 均为近水平方向, 铅垂向自重应力为 σ_2 。根据坐标变换方程, 在西采场南坡条件下, 可得出决定于 σ_1 , σ_2 , σ_3 及 α 值的应力分量, 由式(1)表示, 此处 $\alpha \approx 38^\circ$, 取沿 x 轴转到 x_1 轴的顺时针方向为正方向。

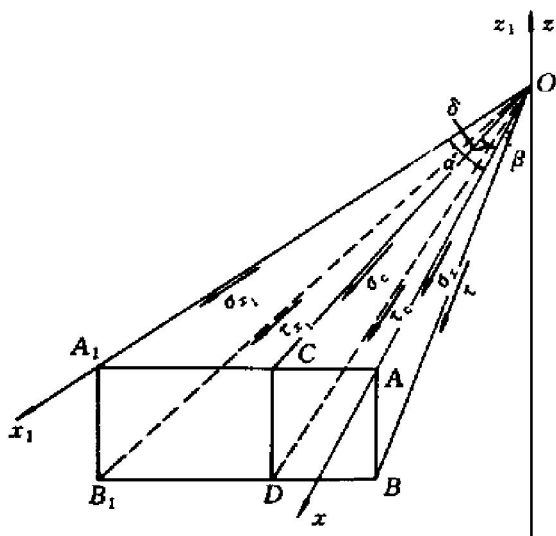


图2 边坡稳定性分析剖面图

Fig. 2 Sectional view of slope stability analysis

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_1 \cos^2 38^\circ + \sigma_3 \sin^2 38^\circ \\ &= 0.62 \sigma_1 + 0.38 \sigma_3 \\ \sigma_y &= \sigma_1 \sin^2 38^\circ + \sigma_3 \cos^2 38^\circ \\ &= 0.38 \sigma_1 + 0.62 \sigma_3 \\ \sigma_z &= \sigma_{z_1} = \gamma H \\ \tau_{xy} &= (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 76^\circ \\ &= 0.49 (\sigma_1 - \sigma_3) \\ \tau_{yx} &= \tau_{xz} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由式(1)可知, 由于残余构造应力的存在, 边坡开挖使原岩应力释放便产生了水平面内剪切应力 τ_{xy} , 使计算剖面 xOz 扭曲, 坡体滑移方向由此而歪斜, 故使采场平台底鼓区不在边坡体正前沿而在边坡面倾向偏东位置, 滑坡体后缘西开裂缝加剧加宽。在图2中, 取稳定性分析剖面 zOx 与主应力纵剖面 z_1Ox_1 之间的夹角为 α ; OB_1 为倾斜滑面, 倾角 β ; OC 为与计算纵剖面 zOx 夹角为 δ 的垂直剖面; σ_{x_1} ($\sigma_{x_1} = \sigma_1$) 为沿 x_1 向水平应力, τ_{x_1} 为层面剪切应力。任意纵剖面 OCD 上层面对剪应力 τ 及直于层面应力 σ 由式(2)和式(3)表示。

$$\tau = \left[\sigma_1 \cot^2(\alpha - \delta) + \sigma_3 \sin^2(\alpha - \delta) \right] \cdot$$

$$\left[1 - \frac{\tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \beta + \tan^2 \delta} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\sigma = \left[\sigma_1 \cot^2(\alpha - \delta) + \sigma_3 \sin^2(\alpha - \delta) \right] \cdot$$

$$\left[\frac{\tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \beta + \tan^2 \delta} \right]^{1/2} \quad (3)$$

为取极值, 令

$$\frac{\partial \tau}{\partial \delta} = 0, \quad \frac{\partial \sigma}{\partial \delta} = 0 \quad (4)$$

可得

1) 在最大主应力 σ_1 剖面上 $\delta = \alpha$, τ 和 σ 有极大值:

$$\tau_{\max} = \sigma_1 \left[1 - \frac{\tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \beta + \tan^2 \alpha} \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$\sigma_{\max} = -\sigma_1 \left[\frac{\tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \beta + \tan^2 \alpha} \right]^{1/2} \quad (6)$$

2) 在沿计算纵剖面上 $\delta = 0$, τ 和 σ 有极小值:

$$\tau_{\min} = \left[\sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha \right] \cdot \left[1 - \frac{\tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \beta} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$\sigma_{\min} = \left[\sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_3 \sin^2 \alpha \right] \cdot \left[\frac{\tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \beta} \right]^{1/2} \quad (8)$$

由上述分析可知, 边坡开挖导致残余构造应力释放, 在最大主应力 σ_1 的纵剖面上, 下滑力最大, 垂直于层面的上向力最大; 在原稳定性分析剖面上, 沿层面下滑力最小, 同时垂直于层面的上向力最小, 故而滑体产生偏离边坡体倾向的歪斜滑移。

3.2 拉压构造断裂面的卸载引起不对称开裂

边坡开挖引起的残余构造应力释放使构造体近侧的侧向应力、侧压系数产生规律性变化。对压性构造面而言, 应力释放使侧压系数由被动土压力侧压系数 K_p 变至静止状态 K_0 ; 对拉性构造面而言, 侧压系数由主动侧压力系数 K_a 变至静止状态 K_0 , 分别由式(9)表示:

$$\left. \begin{aligned} K_p &= \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_s}{2} \right) \\ K_a &= \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_s}{2} \right) \\ K_0 &= \frac{\mu}{1 - \mu} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

对于乌拉嘎团结沟西采场软岩, 三种侧压系数分别是: K_0 为 0.33~0.43, K_a 为 0.40~0.45, K_p 为 2.10~2.60, 由此可得; $(K_p - K_0)/(K_a - K_0)$ 为 10~20。现场滑坡体东边拉性断层处卸载缝宽 2~3 cm, 西边压性断层处卸载缝宽 40~50 cm, 二者比值与理论分析值相符。同时, 岩体水平方向

残余构造应力最大值 σ_1 设定与抗拉强度相近, 即 σ_1 为 2.7~4.0 MPa。对于此处弹模为 1×10^3 MPa 岩体, 应力释放时应变值为 $2700 \times 10^{-6} \sim 4050 \times 10^{-6}$ 。对于距边坡线 160 m 的后缘, 若拉伸应变全部在裂缝处集中, 则开裂缝宽可达 0.43~0.65 m。理论分析与现场实况相符。

4 结论

对于原岩应力场以残余构造应力为主的软岩边坡体, 边坡开挖可能会发生大型滑坡破坏, 导致拉压构造面不等程度开裂, 并伴随显著的不对称卸载变形, 变形与开裂渐进式发展, 滑坡体滑移方向显著斜歪。边坡体中泥化夹层的水膜效应是滑坡体沿特缓滑面滑动的主要原因, 因此采取疏排水措施至关重要。乌拉嘎金矿团结沟西采场南坡大滑坡体据此采取的疏排水为主的治理措施, 收效十分显著。

[REFERENCES]

- [1] SUN Yur-ke(孙玉科). The Analysis of Stability of Rock Slope(岩石边坡稳定性分析) [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [2] YAN Rong-gui(颜荣贵). 露天煤矿随机裂隙边坡稳定性研究的概率积分法[J]. Journal of China Coal Society(煤炭学报), 1983, 5(3): 65-77.
- [3] YAN Rong-gui(颜荣贵), LIU Bao-chen(刘宝琛), et al. 国外露天矿山与边坡技术[J]. Metal Mine(金属矿山), 1986, 6(4): 10-23.
- [4] Bishop A W. The use of the slope circle in the stability analysis of slopes [J]. Geotechniques, 1995, 5(1): 7-17.
- [5] YAN Rong-gui(颜荣贵) and LI Zhen-zong(李振宗). 大新锰矿软岩边坡研究[J]. China's Manganese Industry(中国锰业), 1991, 9(5): 20-24.
- [6] TAN Luo-rong(谭罗荣). 葛洲坝泥化夹层的物质组成特性[J]. Rock and Soil Mechanics(岩土力学), 1984, 5(2): 27-34.
- [7] DONG Zui-de(董遵德) and YUAN Cheng-wen(袁澄文). 岩体软弱夹层慢剪切试验研究[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering(岩石力学工程学报), 1994, 13(2): 149-159.
- [8] XIAO Shu-fang(肖树芳). 泥化夹层蠕变全过程的模型及微结构的变化[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering(岩石力学工程学报), 1987, 6(2): 113-124.
- [9] FENG Xia-ting(冯夏庭) and WANG Yong-jia(王泳嘉). 泥化夹层错动带残余强度的人工神经网络[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1995, 5(3): 17-21.
- [10] Humigo Tamata. The study on mechanism of formation of the continental lake facies in the quaternary period [J]. Soid and Basement, (in Japanese), 1973, 21(7): 33-39.

Mechanism and macrocharacters of landslide caused by relief of residual tectonic stress

DU Wei-ping¹, GU De-sheng¹, YAN Rong-gui²

(1. College of Resource, Environment and Civil Engineering, Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China;

2. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha 410012, P. R. China)

[Abstract] As for rare macrocharacters of landslide of soft rock slope in a mine, the mechanism that the residual tectonic stress impacted the slope and the mechanics of waterfilm of intercalated clay layer were studied. The result verifies that the macrocharacter of the slope slide is controlled by the relief of residual tectonics stress and waterfilm of the weak layer.

[Key words] soft rock slope; residual stress; slope sliding; intercalated clay layer; effect of water film

(编辑 何学锋)