

文章编号: 1001-1986(2004) 03-0049-03

# 青藏高原融冻泥流型滑坡灾害及其稳定性评价方法

靳德武<sup>1,3</sup>, 牛富俊<sup>2</sup>, 陈志新<sup>3</sup>, 倪万魁<sup>3</sup> (1. 煤炭科学研究总院西安分院, 陕西 西安 710054;  
2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;  
3. 长安大学地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 青藏高原多年冻土地区融冻泥流型滑坡属于长度与深度之比为无限大的浅层滑坡, 应用无限斜坡分析方法研究滑坡的稳定性是完全合适的。考虑渗流方向与斜坡方向一致的情况, 应用有效应力原理, 本文推导出不同含水条件下融冻泥流型滑坡安全系数的解析表达式, 绘制出了干土坡和完全饱水土坡稳定性分析图表, 并对青藏公路 K3035 里程融冻泥流型滑坡进行了稳定性分析及评价。

**关键词:** 融冻泥流; 滑坡; 稳定性; 无限斜坡; 青藏高原

**中图分类号:** P642.22 **文献标识码:** A

## 1 引言

青藏高原地区冻土分布面积达  $1.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 近年来随着大规模岩土工程活动, 在冻土区进行土方开挖、填土及其他对地质环境的扰动, 多年冻土区斜坡稳定性日益受到威胁。在青藏公路沿线多年冻土区, 开始逐渐出现融冻泥流和滑塌等一系列由冻土热融作用与特殊的地形相结合形成的斜坡失稳问题。如青藏公路 K3035、K3057 段附近的融冻泥流型滑坡, 214 国道达日县境内的冻土斜坡稳定问题等。

在越岭或靠近斜坡地段, 由于施工过程中削坡或取土, 使地下冰暴露而融化, 形成泥流滑塌, 规模较大。如青藏公路 K3035 滑塌体在 5 a 内已向山顶后退约 100 m 左右, 泥流滑塌体逐渐影响和正在威胁着青藏公路的正常运营。总之, 在青藏高原多年冻土地区, 由人类工程、经济活动触发的融冻泥流型滑坡, 是工程活动中必须解决的问题之一, 对其灾害稳定性评价方法的研究, 将会为多年冻土地区融冻泥流滑坡灾害的预测提供一条有效的途径。

收稿日期: 2003-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 50008016)

作者简介: 靳德武(1996—), 男, 陕西蓝田人, 煤炭科学研究总院西安分院高级工程师, 博士生, 从事工程地质科研工作。

**要贡献者:** 煤矿酸性水中的  $\text{SO}_4^{2-}$  含量与其电导率具有良好的对应关系; Eh 随  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  比值的增加而增加,  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  比值决定着煤矿酸性水的电势。

**c** 煤矿 AMD 中含有众多重金属及其他微量元素。其中 Ni、Co、Zn、As 等主要有毒微量元素来源于黄铁矿的氧化分解, 而 Pb、Sr 等则来源于酸性水对地层中物质的溶滤作用。煤矿酸性水的酸度大大增加了环境中有害化学物质的出溶率和迁移性。

## 参考文献

- [1] Nicholson R V, Gillham R W, Reardon E J. Pyrite oxidation in carbonate buffered solution; 1. Experimental Kinetics[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1988, 52: 1007—1085.
- [2] Holmstrom H, Salomon U J, Carlsson E, *et al.* Geochemical investigations of sulfide-bearing tailings at Kristineberg, northern Sweden, a few years after remediation[J]. *The Science of the Total Environment*, 2001, (273): 111—133.
- [3] 文冬光, 沈照理, 钟佐耀. 水—岩互相作用的地球化学模拟理论及应用[M]. 中国地质大学出版社, 1998.
- [4] 赵广涛, 李玉瑛, 曹钦臣等. 青岛西北地区矿泉水的水化学特征与形成机理[J]. *青岛海洋大学学报*, 1998, 28(1): 135—141.

## The environment geochemistry information of the coal mine acid mining drainage

YUE Mei<sup>1,2</sup>, ZHAO Feng-hua<sup>1</sup>, REN De-yi<sup>1</sup> (1. Department of Resource & Earth Sciences, University of China Mining & Technology(Beijing); Key Laboratory of Coal Resource,

Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Anhui University of Sciences & Technology, Huai'an 232001, China)  
**Abstract:** The chemical characteristic and its formation of the coal acid mining drainage are discussed in this paper based on the spot investigation, samples examination, applied the correlation analysis method, and combined with the geology and hydrogeology background information. Coal AMD formed in the specific substance and environment condition. And when the condition is meet, the AMD can be produced in both high or low sulfur in the coal. Low pH and high Eh, TDS, hardness are the important characteristic of coal AMD. There are good relation between  $\text{SO}_4^{2-}$  and EC,  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  ratio and Eh. Some trace elements and harmful heavy metal such as Ni, Cu, Co, Zn in the AMD come from pyrite dissolution while some others like Pb, Sr are mainly come from the AMD eluviation to the coal and rocks.

**Key words:** coal AMD; chemical characteristic; trace elements; correlation analysis

## 2 融冻泥流稳定性评价方法—无限斜坡分析法

大量的岩土工程经验表明,在气候温和的地区,对于长度与深度比为无限大的浅层滑坡(或长浅滑坡),应用无限斜坡分析方法是完全合适的<sup>[1]</sup>。例如:在挪威北部粉细砂层冻土地区,应用无限斜坡分析方法,活动层浅层滑坡预测破坏坡角和实际破坏坡角取得很好的一致<sup>[1]</sup>;美国阿拉斯加中部费尔班克斯城附近地区多年冻土斜坡,应用无限斜坡分析方法对 B、D 两个剖面进行的稳定性分析,得出完全符合实际的结论,并将该方法与其他方法进行了比较,验证了无限斜坡稳定性分析方法结果更接近实际情况<sup>[2]</sup>。

如图 1 所示,假定:

- a 滑坡面为平面且近似平行于斜坡面;
- b 滑坡面的发育深度远远小于坡体高度;
- c 滑动面无限长,不考虑坡顶、坡底部分滑面,即忽略“端部效应”。

取单位宽度的土条,分析作用于平行四边形  $abcd$  上的力,作用在  $ab$ 、 $cd$  边上的力大小相等,方向相反,可以忽略不计;除此之外,还有土条所受的重力  $W$ 、滑动面上的摩擦力  $T$  以及垂直于滑动面的支承力  $N$ 。

考虑渗流方向与斜坡方向一致的情况,根据有效应力的原理,沿滑动面的抗剪强度(抗滑力)为:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \varphi', \quad (1)$$

式中  $c'$  为有效粘聚力;  $\varphi'$  为有效内摩擦角或水下内摩擦角( $^\circ$ );其中  $c'$ 、 $\varphi'$  为采用固结慢剪试验的抗剪强度指标;  $\sigma$  为总应力;  $u$  为孔隙水压力。

其中  $\sigma = [(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}]z \cos^2 \alpha$ ;

$$u = mz\gamma_w \cos^2 \alpha,$$

式中  $z$  为滑动面的深度(m);  $mz$  (或  $z_w$ ) 为滑面以上的水位高度值(m);  $m = z_w/z$ ,  $m$  为无量纲量,且  $0 < m < 1$ ;  $\alpha$  为斜坡坡度( $^\circ$ );  $\gamma$  为斜坡土天然容重( $N/m^3$ ),  $\gamma_{sat}$  为斜坡土的饱和容重( $N/m^3$ );  $\gamma_w$  为水的容重( $N/m^3$ )。

对于滑坡分析而言,我们只关心的是安全系数 ( $F = \frac{\tau_f}{\tau}$ , 即抗滑力与滑动力之比),当  $F > 1$  时,土体不会滑动,否则,  $F < 1$  时土体滑动。由于滑动力

$$\tau = [(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}]z \sin \alpha \cos \alpha, \quad (2)$$

具体到上述条件所对应的融冻土体安全系数  $F$  可表示为:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + (\sigma - u) \tan \varphi'}{[(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}]z \sin \alpha \cos \alpha} =$$

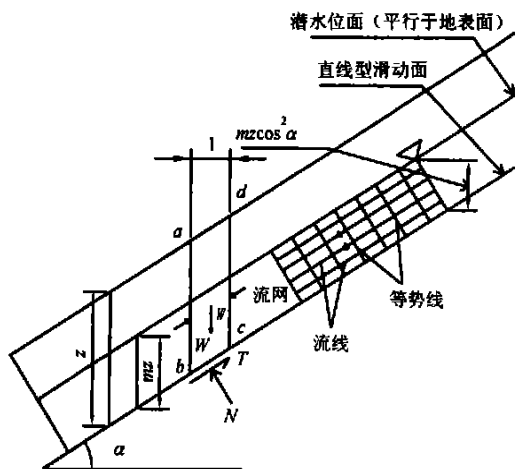


图 1 渗流方向与斜坡方向一致时斜坡稳定性分析模型

$$\begin{aligned} & \frac{c' + \{[(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}]z \cos^2 \alpha - mz\gamma_w \cos^2 \alpha\} \tan \varphi'}{[(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}]z \sin \alpha \cos \alpha} \\ &= \frac{c' + \{[(1-m)\gamma + m(\gamma_{sat} - \gamma_w)]\}z \cos^2 \alpha \tan \varphi'}{[(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}]z \sin \alpha \cos \alpha}. \end{aligned} \quad (3)$$

上式为  $c' \neq 0$  时的安全系数计算式。

对于饱和土坡,即  $c' \neq 0$  时:

$$\begin{aligned} F &= \frac{[(1-m)\gamma + m(\gamma_{sat} - \gamma_w)] \tan \varphi'}{[(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}] \tan \alpha} \\ &= \frac{[(1-m)\gamma + m\gamma'] \tan \varphi'}{[(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}] \tan \alpha} = \frac{[(1-m)\gamma + m\gamma'] \tan \varphi'}{[\gamma + m(\gamma_{sat} - \gamma)] \tan \alpha}. \end{aligned} \quad (4)$$

在某些特殊情况下,融冻土层滑坡安全系数的表达式还可以进一步简化:

- a 当  $c' = 0$  及  $m = 0$  (地表面与滑动面之间完全没有地下水) 时:

$$F = \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha}. \quad (5)$$

此时有效内摩擦角应由一般土的内摩擦角取代。

- b 当  $c' = 0$  及  $0 < m < 1$  时,对于饱和粘土土坡,同时考虑到  $\gamma_{sat} \approx \gamma$ ,

$$F = \frac{[(1-m)\gamma + m\gamma'] \tan \varphi'}{\gamma \tan \alpha} = [(1-m) + m \frac{\gamma'}{\gamma}] \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha}. \quad (6)$$

- c 当  $c' = 0$  及  $m = 1$  (坡体表面作为地下水位面) 时:

$$F = \frac{\gamma' \tan \varphi'}{\gamma_{sat} \tan \alpha}. \quad (7)$$

## 3 青藏高原融冻泥流型滑坡稳定性评价

—以 K3035 斜坡为例

青藏公路 K3035 处斜坡为阳坡,地表植被稀疏,斜坡坡度为  $7^\circ$ 。根据 2001 年 6 月在斜坡上的钻孔和探槽勘察资料,该处地层主要为上第三系湖相沉

积及第四系全新统冲洪积层。自地表而下土层剖面为: 0.0~1.1 m, 为红褐色潮湿松散的细砂层, 局部为红褐色粉质粘土夹层(塑限 11.4%—16.8%, 液限 18.9%—26.9%); 1.10~1.3 m, 为灰白色松散的粉砂、细砂层; 1.3~2.0 m, 为红色粉质粘土层(塑限 14.56%, 液限 25.48%), 该层下部 20 cm 范围内含有块状冰包裹体; 2.0~4.0 m, 为厚层地下冰, 对该层曾经进行地质雷达勘探, 表明在未滑动的原斜坡体中, 厚层地下冰表面平整, 埋深 2.0 m 以下, 厚度 2~3 m, 而在滑坡体中, 雷达图象波形紊乱, 地下冰表面不平整, 这说明该层在滑坡影响下受到了极大的扰动; 4.0~11.8 m, 为强风化的红褐色泥岩, 裂隙发育, 常年冻结; 11.8~13.3 m, 为灰白色砂岩, 坚硬, 局部发育细小的裂隙冰; 13.3 m 以下为泥质砂岩。

按照冻土含冰量、冻土构造特征, 该处冻土类型自上而下划分为: 0.0~2.0 m 为季节融化层, 2.0~4.0 m 为含土冰层, 4.0 m 以下为多冰冻土。冻土上限为厚层地下冰的表面发育深度, 即 2.0 m 左右。该处年平均地温根据实测资料为  $-1.75^{\circ}\text{C}$ , 属低温冻土。

在融化季节地下冰融化, 融化水使冰面之上的塌落土体处于饱和、过饱和状态, 而地下冰面又提供了良好的滑动面, 饱和、过饱和的粉质粘土, 在聚集在冰面与土层间的水的润滑作用下产生滑动。滑坡进一步引起地下冰的暴露, 斜坡土体进一步开裂、坍塌和滑动。

上述分析表明, 该滑坡可看成是长度与深度之比为无限大的浅层滑坡。

图 2、图 3 为该斜坡处两类特殊土坡(干土坡、饱水土坡)的稳定性分析图表, 以坡角  $\alpha$  为横坐标, 安全系数  $F$  (式 5 和式 7) 为纵坐标。要得到该斜坡一定坡角和土体有效内摩擦角条件下的安全系数, 只要通过查找图表即可对边坡的稳定性做出评价。

对于青藏高原 K3035 公路里程的滑塌体而言, 由于冰—土间剪切试验难以实现(我们试图通过直接剪切试验测定冰面与土之间的抗剪强度参数, 终因环境温度所限, 在试验进行过程中, 因冰块融化过快, 没有能够测出相应条件下的抗剪强度参数), 因此我们选取其中 6 组粉质粘土试样, 在液限条件下测得  $\varphi'$  值在  $14^{\circ}$ ~ $15^{\circ}$  之间(平均值为  $14.5^{\circ}$ ), 由图 2 所示完全饱和土坡稳定性分析图表查得: 对应  $7^{\circ}$  坡角,  $\varphi' = 14.5^{\circ}$ ,  $F$  在 1.02~1.09 之间, 略大于 1; 实际上, 此时坡角  $7^{\circ}$ , 已接近  $\frac{\varphi'}{2}$  ( $7.25^{\circ}$ ), 这对于有渗流情况下的无粘性土坡是极为不利的<sup>[4]</sup> 显然该融冻

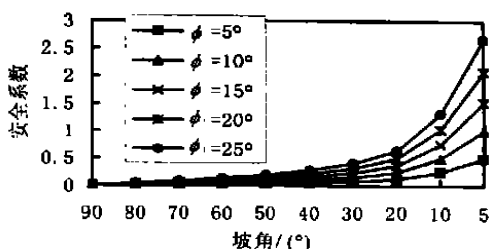


图 2 完全饱和土坡稳定性分析图表

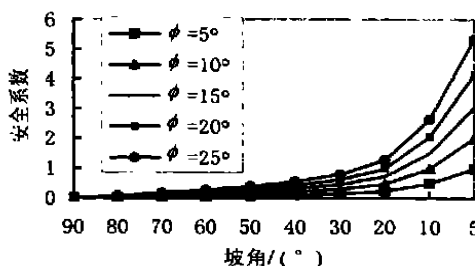


图 3 干土坡稳定性分析图表

土坡实际上已经处于极限平衡状态, 具有滑动趋势。由于实际的冰—土内摩擦角小于土体液限条件下的内摩擦角 ( $14.5^{\circ}$ ), 在完全饱和土坡稳定性分析图表上, 对应  $7^{\circ}$  坡角,  $\varphi' < 14.5^{\circ}$ , 安全系数必然小于 1, 因此, 在上述条件下, 青藏公路 K3035 融冻泥流型滑坡的发生是不可避免的。

#### 4 结论

a 冻土地区存在滑坡属于具有平面滑动面的浅层滑坡, 此类滑坡发育在多年冻土的活动层中。土体一般为含土冰层或饱冰冻土, 春融季节, 随着土层进一步融化, 水分下渗、聚集, 使孔隙压力增加, 坡体的安全储备系数<sup>[3]</sup>减小。加之人类工程活动作用, 使厚层地下冰暴露, 加快了冻土的融化速度, 从而诱发滑坡的发生。

b 大量的岩土工程经验表明, 对于长度与深度之比为无限大的浅层滑坡, 应用无限斜坡分析方法是完全合适的。考虑渗流方向与斜坡方向一致的情况, 应用有效应力原理, 本文推导出不同含水条件下融冻泥流型滑坡安全系数的解析表达式, 绘制了干土坡和完全饱水土坡稳定性分析图表。在此基础上, 对青藏公路 K3035 里程融冻泥流型滑坡进行了稳定性分析及评价, 取得了较好的实际应用效果。

#### 参考文献

- [1] McRoberts E C, Morgenstern N R. The stability of thawing Slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1974, 11(4): 467.
- [2] Tien H W. Soil movements on permafrost slopes near Fairbanks, Alaska [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1984, 21: 609—709.
- [3] 王旭升等. 斜坡地下水渗透力计算与稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(2): 41—45.
- [4] 杨英华. 土力学[M]. 北京: 地质出版社, 1987.

# ·煤田物探·

文章编号: 1001-1986(2004) 03-0052-03

## 陷落柱地震响应特征分析

吴守华, 周国兴, 杨素霞, 何黄生 (江苏煤炭地质物测队, 江苏 南京 210046)

**摘要:** 通过分析研究陷落柱地震响应特征, 提出判别陷落柱的依据, 并与实例进行验证比较, 对于今后正确分辨和圈定陷落柱具有一定指导意义。

**关键词:** 陷落柱; 绕射波; 地震响应; 叠加剖面; 偏移剖面

**中图分类号:** P631.4      **文献标识码:** A

### 1 引言

陷落柱在我国煤矿分布极为广泛, 对煤矿生产所造成的危害十分巨大。利用三维地震勘探技术, 在许多矿区已经开展过相应的地震探测工作。但是, 由于缺乏对陷落柱地震响应特征的分析研究, 从而出现了把断层解释为陷落柱或把陷落柱解释为断层的错误。因此, 分析研究陷落柱的地震响应特征, 具有特别重要的意义。在广泛收集了包括山西、河北、安徽、江苏、山东等地地震探测陷落柱的典型时间剖面的基础上, 运用山西阳泉五矿陷落柱解释的成功经验, 对其进行认真的分析研究, 归纳和总结出不同规模陷落柱特殊的地震响应特征, 作为判别陷落柱的依据, 并针对钻探、巷探验证中发现的问题, 在技术措施上进行了改进, 又在山西成庄煤矿进行了同样以探测陷落柱为主要目标的三维地震勘探工作, 使成果精度得到进一步提高。

### 2 陷落柱地质特征及其分类

一般认为, 陷落柱就是煤系基底厚灰岩中, 古岩溶的塌陷物及上覆岩层塌陷物形成的塌陷体。陷落柱在形成过程中, 是由下而上逐渐冒落的, 内部空间

多为比周围岩层时代较新的岩块或第四纪的沉积物所充填, 在层序上有时有一定的顺序, 但多由一些杂乱无章的碎岩块和不同性质的胶结物组成。

陷落柱的分类方式有很多, 如按形成时代、赋存状态、几何形态、导水性等分类的, 在煤矿中多按陷落柱的规模来分类。陷落柱的长轴和横切面的面积通常可作为评定陷落柱规模的基本指标。根据陷落柱对采掘生产的影响程度和目前地震勘探所能达到的程度, 大致可划分出大型、中型和小型 3 个类型或等级(表 1)。

### 3 不同规模陷落柱地震响应特征分析

通过对收集的各地地震探测陷落柱的典型时间剖面的分析, 发现不同规模陷落柱的地震响应特征不尽相同, 各有特点。

#### 3.1 大型陷落柱

图 1(a)、(b) 反映的是山西阳泉煤矿轴长超过 250 m 的 3 号陷落柱。图中,  $T_0$  为第四系底反射波,  $T_3$  为 3 号煤层反射波。

表 1 陷落柱按规模分类表

分类指标	大型陷落柱	中型陷落柱	小型陷落柱
长轴/m	> 200	200—60	< 60
面积/m <sup>2</sup>	> 5 000	5 000—500	< 500

收稿日期: 2003-07-17

作者简介: 吴守华(1969—), 男, 江苏沐阳人, 江苏煤炭地质物测队工程师, 从事物探方法研究和应用工作。

### Landslide hazard from gelifluction in Qinghai-Tibet plateau and stability analysis method

JIN De-wu<sup>1,3</sup>, NIU Fu-jun<sup>2</sup>, CHEN Zhi-xin<sup>3</sup>, NI Wan-kui<sup>3</sup> (1. Xi'an Branch, Central Coal Research Institute, Xi'an 710054, China;

2. State Key Lab of Frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 73000, China;

3. Department of Geology Engineering & Surveying Engineering Changan University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Landslide in gelifluction is a new geological hazard caused by human activity in permafrost region of Qinghai-Tibet plateau. It belongs to shallow landslide with small length-width ratio. In general, infinite slope analysis method is applied to it. According to identical seepage direction to slope surface, with the effective stress principle, the analytical expression of safety factor of the landslide in gelifluction with different water content conditions is derived and stability analysis chart of dry and fully saturated water soil are plotted. Lastly, taking the Landslide in gelifluction in milestone K3035 of Qinghai-Tibet highway as an example, the paper analyzes and evaluates the stability of the landslide.

**Key words:** gelifluction; landslide; stability analysis and evaluation; infinite slope; Qinghai-Tibet plateau