

文章编号:1671-8879(2009)06-0064-05

# 黑河水库坝肩岩质边坡变形破坏特征及失稳判据

于德海<sup>1,2</sup>, 彭建兵<sup>2</sup>, 孙治国<sup>1</sup>

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026;

2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:**针对西安黑河水库坝肩岩质边坡的地质条件,分析了该坡体的变形破坏特征,认为滑坡主要受顺坡向的片理结构面与后缘宽大裂隙渗入水的汇集两大要素控制。以地质力学模型为基础,基于突变理论,建立了一个新的边坡尖点突变模型,推导并计算出后缘张裂隙的临界充水深度,从而构建了边坡突变的失稳判据。结果表明:计算得出的坡体后缘张裂隙临界充水高度为 2.2 m,实地勘察得到的滑坡体后缘张裂隙充水高度为 2.3 m,计算结果与实际情况较为一致。

**关键词:**岩土工程;岩质边坡;变形破坏特征;失稳判据;临界充水深度

**中图分类号:**TU457

**文献标志码:**A

## Deformation failure characters and instability criterion of abutment rock slope in Heihe reservoir

YU De-hai<sup>1,2</sup>, PENG Jian-bing<sup>2</sup>, SUN Zhi-guo<sup>1</sup>

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China;

2. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** According to the geological condition of abutment rock slope in Heihe reservoir, combining deformation failure characters of the slope, it is indicated that two control factors of the landslide are the schistosity along slope and water gather in top splay fracture. Based on geomechanics model of the slope, a new cusp-catastrophic model on slope stability is established. The equations for calculating the critical water highness in top splay fracture are developed by adopting catastrophic theory, thus instability criterions of the slope are put forward. The results show that the critical water highness in top splay fracture obtained by calculation is 2.2 m, and the water highness in top splay fracture obtained by field survey is 2.3 m. Thus, the calculation results keep coincidence well with the actual ones. 6 figs, 12 refs.

**Key words:** geotechnical engineering; rock slope; deformation failure character; instability criterion; critical water highness

## 0 引 言

岩质边坡稳定性问题在交通、水电、矿山等工程

领域中普遍存在,是制约工程建设进程与成败的关键环节<sup>[1-5]</sup>。同时,岩质边坡是一个开放的、复杂的耗散结构非线性系统,与外界环境存在物质和能量

收稿日期:2008-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(40902075);大连海事大学青年教师科研基金资助项目(022263)

作者简介:于德海(1977-),男,辽宁朝阳人,大连海事大学讲师,长安大学工学博士研究生,E-mail:ydhdy1977@163.com。

交换,边坡岩体失稳的力学行为实际上是非线性的、动态的和不可逆的演化过程。如何在此演化过程的基础上,将传统的力学模型与现代的数学方法相结合,从而达到对边坡突变失稳的定量描述,一直是困扰岩土工程界多年的问题,也是急待解决的重要课题之一。许多学者将非线性科学中的突变理论应用于边坡稳定性的研究中,并获得了一定的成果<sup>[6-9]</sup>。然而,在边坡建模过程中,他们均未考虑后缘张裂隙水力效应的影响,实际上,后缘张裂隙水力效应恰恰是影响边坡稳定性的重要因素之一。为此,本文依托西安黑河水利枢纽工程,在深入研究坝肩岩质边坡变形破坏特征的基础上,建立了一个新的考虑后缘张裂隙水力效应的边坡突变模型,定量揭示水对边坡的触发作用,这对深化边坡失稳机制的认识具有深刻的理论意义。

## 1 概况

自2004年起,西安黑河水利工程靠近放水塔的右坝肩坡体发生了明显的变形破坏现象,尤其是2005年夏季以来,由于雨量较往年增多,坡体渗水量明显增加,导致边坡变形加速,使得坡体后缘出现多处深大张裂缝与错动,导致部分地段喷护层发生严重的开裂与脱落,坡体局部地段甚至发生严重滑塌<sup>[10-11]</sup>。因此,该边坡已发展成为一个对库区安全,尤其是对放水塔构成严重威胁的不稳定坡体,如图1所示。



图1 放水塔附近的滑坡体

## 2 边坡变形破坏特征及成因分析

边坡变形破坏特征是研究边坡失稳的基础和前提,本研究进行了实地勘测、探槽和平洞揭露等大量的现场工作,用以精细描述和分析滑坡体的变形破坏特征和成因。

### 2.1 变形破坏特征

不同区域滑坡体变形破坏程度有所不同。滑坡右边界跨过坝体右岸坡体上的喷护层,并将其错断、拉裂,尤其是在坡体的中间—右翼区段,地表拉张裂缝相当发育。其中,在喷护层上发现的竖向裂缝多

达12条,最长超过30 m;裂缝水平走向 $130^{\circ}$ ,相互间基本平行,并与滑坡体总体滑动方向近于垂直,反映了这些裂缝与滑坡体的变形破坏密切相关。滑坡左边界的岩层受到坡体滑动的影响,往往被折断或揉皱,岩体结构松散、破碎,产状变化复杂,一部分岩层已显示为整体的滑动。滑坡上部—后缘的地表裂缝与错台相当发育,其中,除了喷护层中所见到的裂缝外,其他地段的裂缝也多达20多条,宽度为3~20 cm,最宽处可达32 cm。在地表有裂缝出现的地方,受坡体向下滑动的影响,多数伴有不同程度的垂直错动,部分地段甚至出现了明显的错台,最大错距达1.5 m。

为了进一步了解和掌握滑坡体的内部情况,选取探槽 TC-2 和平洞 PD-1 为范例来揭示坡体的内部组成和结构特征。探槽 TC-2 位于滑坡体的后缘,两壁拉张裂缝十分显著。其中,探槽 2 m 处的后缘拉张面非常清楚,裂缝宽 5~10 cm,形态复杂,倾角较陡,大致为 $75^{\circ}$ ,且部分已被上部的碎石土填充,如图2所示;滑坡后壁基岩为云母石英片岩,产状相对稳定,为 $175^{\circ}/38^{\circ}$ ,但由于受坡体滑动的影响,岩层完整性不好,存在较多的节理裂隙,其整体结构特征如下页图3所示。



图2 地表的后缘拉张裂缝

据平洞 PD-1 揭露,位于平洞深部的后缘拉张裂缝宽 2~8 cm,近直立,走向 $65^{\circ}$ ,如下页图4所示。裂缝内充填的碎石土,主要为来自地表的强风化物,用手可捻碎,其中也包括少量的粘土和腐殖土,表明该裂缝与地表连通。因刚降雨不久,裂缝带内渗入了较多的水分,经实地测量,其裂隙中充入的水分距地表 2.3 m 左右,并与周围的岩石形成明显的反差,如下页图5所示。

从上述坡体的变形破坏特征不难看出,该边坡体的变形破坏模式,就破坏面形式来说,在宏观上具有顺层滑动的特点;从力学方面来讲,坡体沿中缓片理结构面发生剪切滑移,而沿后缘陡倾角结构面发生拉张,属于表生作用下的滑移-拉裂。

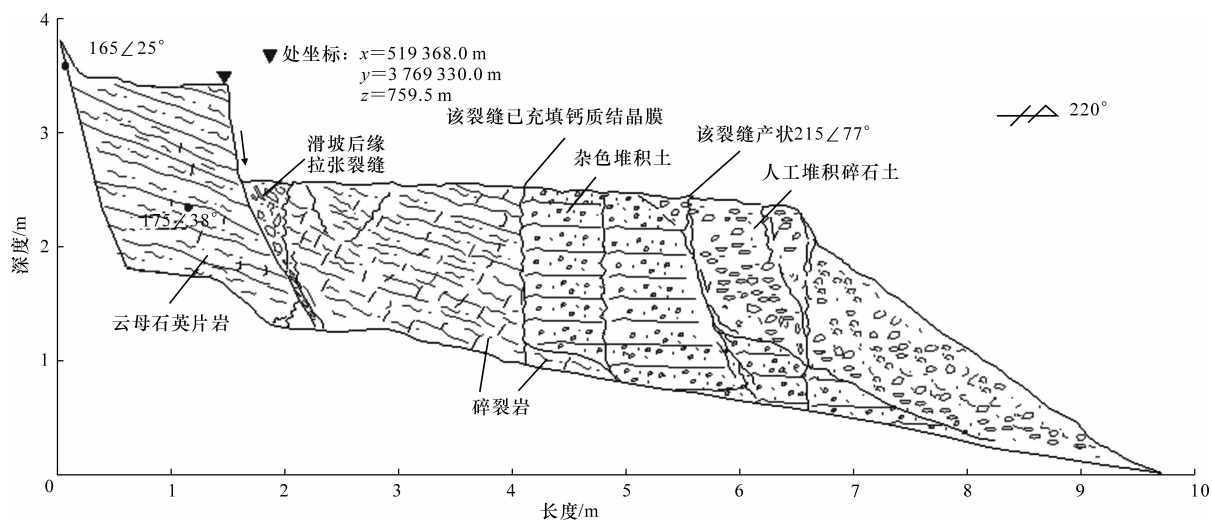


图3 探槽 TC-2 的实测剖面

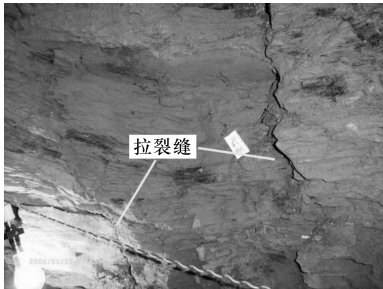


图4 平硐深部的后缘拉张裂缝



图5 后缘裂隙中的渗水

2.2 成因分析

根据勘探及地质测绘结果,产生滑坡的原因主要有以下几个因素。

- (1)构造因素。本研究区位于秦岭东西向构造带北缘西骆峪-田峪背斜南翼,长期受近 SN 向(南北向)挤压应力的作用,致使岩体结构面非常发育。
- (2)地层岩性因素。滑坡地段除了表层的残坡积物外,基岩云母石英片岩的片理结构面发育,其物理力学性能较差,在长期的区域构造应力及岩体自重应力作用下很容易失稳滑移,成为坡体内基岩部分的滑动控制面。
- (3)降雨因素。2005 年 9 月 19 日~10 月 3 日,一场历时 15 d 的强降雨,使该地区平均降雨量达 274.8 mm,接近该地区半年的总降雨量,这自然增

大了滑坡体内的渗水量,尤其是后缘宽大张裂隙中降水的汇入,使得此处形成高压水流,极大地危害了边坡的稳定性。

3 边坡失稳判据分析

3.1 力学模型

由上述分析可知,该滑坡的产生主要受两大要素控制,即近于顺坡向的软弱片理结构面与后缘宽大裂隙中渗入水的汇集。因此,本文建模主要考虑了边坡岩体自重应力以及后缘张裂隙静水压力的作用,建立了如图 6 所示的地质力学模型。

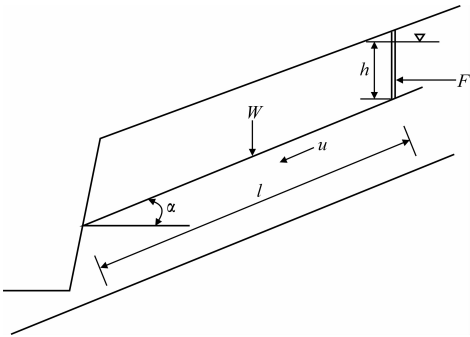


图6 地质力学模型

由本研究的室内试验可知,边坡基岩云母石英片岩属于应变软化介质,并具有局部化剪切渐进破损的性质,可用式(1)来描述它的本构关系<sup>[12]</sup>。

$$\tau = \frac{Eu}{2t(1+\mu)} \exp\left(-\frac{u}{u_c}\right) \tag{1}$$

式中: $\tau$ 为剪应力; $E$ 为岩石的弹性模量; $\mu$ 为岩石的泊松比; $t$ 为局部化剪切带(滑动带)的厚度; $u$ 为带内的实际剪切位移; $u_c$ 为剪切带的平均临界剪切位移。

3.2 突变模型

由突变理论可知,要想建立系统的突变模型,就

必须知道该系统的总势能。对图6所示的边坡系统来说,总势能 $V$ 为局部化剪切带的应变能 $V_1$ 与滑动势能 $(V_2 + V_3)$ 之差。即

$$V = V_1 - (V_2 + V_3) \quad (2)$$

$$V_1 = l \int_0^u \frac{Eu}{2t(1+\mu)} \exp(-\frac{u}{u_c}) du \quad (3)$$

沿局部化剪切带的重力势能 $V_2$ 为

$$V_2 = W u \sin(\alpha) = m g u \sin(\alpha) \quad (4)$$

沿局部化剪切带的水力势能 $V_3$ 为

$$V_3 = F u \cos(\alpha) = \frac{1}{2} \gamma_w h^2 u \cos(\alpha) \quad (5)$$

式中: $W$ 为滑体重力; $F$ 为后缘垂直张裂隙的静水压力; $\alpha$ 为局部化剪切带(滑动带)的倾角; $l$ 为局部化剪切带(滑动带)的长度; $\gamma_w$ 为水的重度; $h$ 为后缘张裂隙充水高度; $m$ 为岩体质量; $g$ 为重力加速度。

结合式(2)、式(3)、式(4)和式(5),可得边坡系统的总势能为

$$V = l \int_0^u \frac{Eu}{2t(1+\mu)} \exp(-\frac{u}{u_c}) du - m g u \sin(\alpha) - \frac{1}{2} \gamma_w h^2 u \cos(\alpha) \quad (6)$$

这样,可按尖点突变理论的方法,从系统总势能表达式出发,选取 $u$ 为状态变量进行分析。

首先,根据 $V' = 0$ ,可以得到平衡曲面 $M$ 的方程为

$$V' = \frac{Elu}{2t(1+\mu)} \exp(-\frac{u}{u_c}) - m g \sin(\alpha) - \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \cos(\alpha) = 0 \quad (7)$$

进一步根据平衡曲面的光滑性质,可求得尖点。在尖点处有 $V'' = 0$ ,即

$$V'' = \frac{El}{2t(1+\mu)} (\frac{u}{u_c} - 1) \exp(-\frac{u}{u_c}) = 0 \quad (8)$$

于是,可得到在尖点处有

$$u_1 = u_c \quad (9)$$

式中: $u_1$ 为尖点处的状态变量。

然后,将平衡曲面的方程式(7)相对于尖点处的状态变量作Taylor展开,截取至3次项;并将式(8)、式(9)代入化简,可以得到

$$\frac{Elu_1 e^{-1}}{3t(1+\mu)} \left[ \left( \frac{u-u_1}{u_1} \right)^3 - \frac{3}{2} \left( \frac{u-u_1}{u_1} \right) + \frac{3}{2} (1 - \frac{2mg \sin(\alpha) + \gamma_w h^2 \cos(\alpha)}{Elu_1} t(1+\mu)e) \right] = 0 \quad (10)$$

将式(10)作变量代换,可得到尖点突变理论标准形式的平衡方程为

$$x^3 + px + q = 0 \quad (11)$$

其中

$$x = \frac{u-u_1}{u_1} \quad (12)$$

$$p = -\frac{3}{2} \quad (13)$$

$$q = \frac{3}{2} (1 - \xi) \quad (14)$$

$$\xi = \frac{2mg \sin(\alpha) + \gamma_w h^2 \cos(\alpha)}{Elu_1} t(1+\mu)e \quad (15)$$

式中: $x$ 为系统的状态变量; $p$ 、 $q$ 均为系统的控制变量;参数 $\xi$ 与 $mg$ 、系统的几何尺寸( $l$ 、 $h$ 、 $t$ )、介质的力学参数( $E$ 、 $\mu$ )等有关。

由式(14)、式(15)可知,系统控制变量 $q$ 由参数 $\xi$ 决定,并且 $\xi$ 不是一成不变的,会随着边坡孕育环境(如 $h$ )的改变而变化。

对于尖点突变模型,要求系统满足其分叉集方程为

$$4p^3 + 27q^2 = 0 \quad (16)$$

由式(16)可知,仅当 $p \leq 0$ 时,判别式才可能等于0,故 $p \leq 0$ 是系统发生突变的必要条件;又由式(13)可得,边坡系统控制变量 $p = -3/2$ ,满足 $p \leq 0$ 的必要条件。因此,式(16)为边坡突发失稳的充要力学条件。

将式(13)、式(14)代入式(16)可得

$$9(1 - \xi)^2 - 2 = 0 \quad (17)$$

再将式(15)代入式(17)中,就可求得后缘张裂隙临界充水高度 $h_{cr}$ 的表达式为

$$h_{cr} = \left[ \frac{1}{\gamma_w} \left( \frac{(3 - \sqrt{2})Elu_c}{3et(1+\mu)\cos(\alpha)} - 2mg \tan(\alpha) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

本研究对滑坡现场进行了多次勘测,并做了大量的室内力学试验,依据获得的结果,得出计算参数如下: $E = 2.56 \text{ GPa}$ ,  $\mu = 0.28$ ,  $\gamma_w = 22.6 \text{ kN/m}^3$ ,  $u_c = 3.5 \text{ mm}$ ;滑坡体积为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,  $l = 87 \text{ m}$ ,  $\alpha = 38^\circ$ ,  $t = 0.23 \text{ m}$ 。将上述参数代入式(18),可得出边坡后缘张裂隙临界充水高度 $h_{cr} = 2.2 \text{ m}$ 。经实地勘察,由于坡体后缘张裂隙充水高度已达 $2.3 \text{ m}$ ,故边坡发生滑坡破坏。

## 4 结 语

(1)将突变理论引入到岩石边坡的失稳机理研究中,并结合西安黑河水库的实际,建立一个新的考虑坡体后缘张裂隙充水高度的尖点突变模型,提出以后缘张裂隙临界充水高度作为边坡滑坡失稳的判据,具有一定的理论价值。

(2)以西安黑河水库右坝肩高陡边坡为例,对所建立的公式进行了实例运算,计算得出坡体后缘张裂隙临界充水高度为 2.2 m;经实地勘察,坡体后缘张裂隙充水高度达 2.3 m,边坡发生滑移,其计算结果与实际情况较为一致,表明该方法具有一定的合理性和良好的应用前景。

(3)由于边坡问题的复杂性和多样性,失稳影响因素众多,要得到准确的破坏判据十分困难;目前,突变理论一般仅用于简单地质模型的处理,对于较复杂的情况,尚有待于进一步研究。

## 参考文献:

## References:

- [1] 黄高花,王 飞,杨勤科. 陕西北部山丘区公路开挖边坡侵蚀调查与评价[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006,26(2):31-33.  
HUANG Gao-hua, WANG Fei, YANG Qin-ke. Evaluation of cutting-slope erosion of highway in north Shaanxi[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006,26(2):31-33.
- [2] 邓卫东,吴光勇,唐树名. 路堑边坡破坏机理的试验与计算分析[J]. 中国公路学报, 2001,14(3):21-24.  
DENG Wei-dong, WU Guang-yong, TANG Shu-ming. Test and calculation on the failure of cutting slope[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001,14(3):21-24.
- [3] 郑书彦,李占斌. 公路滑坡侵蚀运动过程的仿真分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2007,27(2):21-25.  
ZHENG Shu-yan, LI Zhan-bin. Simulation on moving process of landslide erosion in highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(2):21-25.
- [4] 张 明,刘金勇,麦家煊. 土石坝边坡稳定可靠度分析与设计[J]. 水力发电学报, 2006,25(2):103-107.  
ZHANG Ming, LIU Jin-yong, MAI Jia-xuan. Reliability analysis and design of slope stability of earth-rock dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(2):103-107.
- [5] 孙世国,冉启发,李国柱. 露天边坡与山坡复合体变形随机介质预测方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3):340-342.  
SUN Shi-guo, RAN Qi-fa, LI Guo-zhu. Study of prediction method in random medium theory for combined body deformation of open pit slope and hillside [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,24(3):340-342.
- [6] 秦四清. 斜坡失稳的突变模型与混沌机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2000,19(4):486-492.  
QIN Si-qing. Nonlinear catastrophe model of slope instability and chaotic dynamics mechanism of slope evolution process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000,19(4):486-492.
- [7] 刘 军,秦四清,张俤元. 缓倾角层状岩体失稳的尖点突变模型研究[J]. 岩土工程学报, 2001,23(1):42-44.  
LIU Jun, QIN Si-qing, ZHANG Zhuo-yuan. Study on catastrophic model with cusp point for failure of stratified rock mass with a gentle inclination[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1):42-44.
- [8] 秦四清. 斜坡失稳过程的非线性演化机制与物理预报[J]. 岩土工程学报, 2005,27(11):1241-1248.  
QIN Si-qing. Nonlinear evolutionary mechanisms and physical prediction of instability of planar-slip slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005,27(11):1241-1248.
- [9] 孙 强,刘天霸,秦四清,等. 斜坡失稳的燕尾突变模型[J]. 工程地质学报, 2006,14(6):852-855.  
SUN Qiang, LIU Tian-ba, QIN Si-qing, et al. Analysis of coattail catastrophe model of slope failures using stiffness ratio[J]. Journal of Engineering Geology, 2006,14(6):852-855.
- [10] 马润勇,彭建兵,毛彦龙. 西安金盆水库放水塔附近滑坡特征及成因分析[J]. 工程地质学报, 2006,14(4):438-442.  
MA Run-yong, PENG Jian-bing, MAO Yan-long. Features and causes of a landslide near discharge water tower of Jinpen reservoir in Xi'an[J]. Journal of Engineering Geology, 2006,14(4):438-442.
- [11] 于德海,彭建兵. 三轴压缩下水影响绿泥石片岩力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1):205-211.  
YU De-hai, PENG Jian-bing. Experimental study on mechanical properties of chlorite schist with water under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1):205-211.
- [12] 于德海. 软弱变质岩力学性质及其边坡失稳机制的研究[D]. 西安:长安大学, 2007.