

# 岩质边坡水力驱动型顺层滑移破坏机制分析

刘才华<sup>1</sup>, 徐健<sup>2</sup>, 曹传林<sup>2</sup>, 陈从新<sup>1</sup>, 冯夏庭<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 湖北沪蓉西高速公路建设指挥部, 湖北 恩施 445000)

**摘要:** 顺层边坡的稳定性主要取决于滑动面的物理力学性质和地下水对边坡岩体的水压力。在分析顺层边坡水力驱动型滑移破坏的形成与演变的基础上, 探讨了地下水对顺层边坡稳定性的影响机制; 指出地下水在边坡后缘张裂隙和滑动面形成的渗流通道中运动时, 对滑体将产生 3 个方面的力学作用: 张裂隙静水压力、滑动面扬压力和拖曳力; 推导了边坡极限平衡状态下张裂隙临界充水高度和临界降雨强度的计算公式。分析结果表明, 边坡后缘张裂隙充水高度直接决定了 3 种水压力的大小, 当张裂隙充水高度达到临界值后, 边坡在水压力作用下发生滑移破坏; 且张裂隙充水高度与降雨强度呈线性关系。最后建立了顺层边坡水力驱动型滑移破坏判据。

**关键词:** 边坡工程; 岩质边坡; 顺层滑移破坏; 水力驱动

**中图分类号:** TD 824.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)19-3529-05

## ANALYSIS OF BEDDING-SLIP FAILURE MECHANISM OF ROCK SLOPE DUE TO HYDRAULIC DRIVE

LIU Cai-hua<sup>1</sup>, XU Jian<sup>2</sup>, CAO Chuan-lin<sup>2</sup>, CHEN Cong-xin<sup>1</sup>, FENG Xia-ting<sup>1</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Office of Hurongxi Highway Construction, Enshi 445000, China)

**Abstract:** The stability of bedding rock slope is mainly affected by two factors, which are physico-mechanical properties of slide face and groundwater pressures. Based on analysis of formation and evolvement of rock slope bedding-slip failure due to hydraulic drive, the effect mechanism of groundwater on bedding rock slope stability is discussed. It is pointed out that groundwater flows through the passage that consists of the slide face and the top splay fracture of a rock slope produces static water pressure of splay fracture, flottage and haulage of slide face. Equations for calculating the critical water highness in the splay fracture and the critical rainfall intensity are developed. It is shown that: (1) water pressures above increase with increasing the water highness of the splay fracture; (2) the slope will lose its stability once the water highness of the splay fracture reaches to a critical value; and (3) the water highness of the splay fracture is linear with the rainfall intensity. The bedding-slip failure criterions of rock slope are put forward at length.

**Key words:** slope engineering; rock slope; bedding-slip failure; hydraulic drive

## 1 引言

岩质边坡稳定性问题在交通、水电及矿山等工程领域普遍存在, 是制约工程建设进程与成败的重

要因素之一。随着近年来我国高速公路网的建设, 沿线岩质边坡的灾变问题正日益成为人们重点关注的对象, 岩质边坡失稳机制研究已成为一个急需解决的重大科研与工程课题。

顺层边坡作为岩质边坡的一种类型, 其失稳模

**收稿日期:** 2005-01-31; **修回日期:** 2005-03-23

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50239070); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412704); 中国科学院武汉岩土力学研究所领域前沿基金项目(Q110217)

**作者简介:** 刘才华(1974-), 男, 1997年毕业于重庆建筑大学建筑工程系岩土工程专业, 现任助理研究员, 主要从事岩土工程及裂隙岩体渗流方面的研究工作。E-mail: chliu@whrsm.ac.cn.

式一般可分为 3 种：顺层滑移破坏、溃曲破坏及弯折—崩塌破坏。顺层滑移破坏多发生在坡脚具有临空面的缓倾或中倾层状边坡，溃曲破坏发生在所谓的插入式的顺层边坡，而弯折—崩塌破坏为直立或近直立的顺层边坡破坏方式。目前，一些学者对顺层边坡稳定性机制进行了研究<sup>[1-3]</sup>，但主要是针对溃曲破坏和弯折—崩塌破坏 2 种模式，由于顺层边坡滑移破坏可以采用刚体极限平衡法等传统方法进行分析，其研究工作反而开展得不多。一般情况下，岩质边坡的顺层滑移破坏根据其变形破坏的力学机制可分为 2 种模式：滑移—拉裂型和水力驱动型。前者受边坡中的软弱层面控制，由于岩层层面粘聚力相对较小，层面抗剪强度主要取决于其内摩擦角。当软弱层面倾角大于其等效内摩擦角时，软弱层面上坡体的下滑力将超过其抗剪强度，一旦坡脚揭露临空，边坡极有可能因蠕变作用在后缘形成拉裂缝，进而导致失稳破坏。后者多发生在岩层倾角小于层面内摩擦角且具有后缘张裂隙的缓倾层状边坡，天然状态下，此类边坡在坡脚开挖后仍能保持稳定状态。岩质边坡变形破坏不仅取决于软弱层面的产状和力学性质，而且受边坡中地下水的活动控制<sup>[4,5]</sup>。在降雨条件下，此类边坡受后缘张裂隙和潜在滑面中的水压力驱动，有可能发生滑移失稳破坏。本文在分析顺层边坡中地下水水力作用特性的基础上，对顺层边坡水力驱动型滑移破坏机制及其稳定性判据进行了探讨。

## 2 顺层滑移破坏机制

### 2.1 边坡岩体水力作用

地下水对边坡的作用包括 3 个方面：地下水对边坡的物理化学作用(降低了潜在滑动面的抗剪强度)、静水压力作用和渗透压力作用<sup>[6,7]</sup>。对于如图 1 所示具有后缘张裂隙的典型岩质边坡<sup>[8,9]</sup>，静水压力包括后缘张裂隙静水压力和潜在滑动面上的扬压力，滑带的渗透压力最终表现为作用在滑面沿渗径方向的面力——拖曳力。

后缘张裂隙静水压力和滑面扬压力呈三角形分布，其极值为  $\gamma_w h$  ( $\gamma_w$  为水的重度， $h$  为张裂隙充水高度)，拖曳力  $t$  在滑面上均匀分布，下面推导其计算公式。

地下水在岩层层面中流动时，对其周围骨架会产生渗透压力，取如图 2 所示一沿渗流方向的单宽

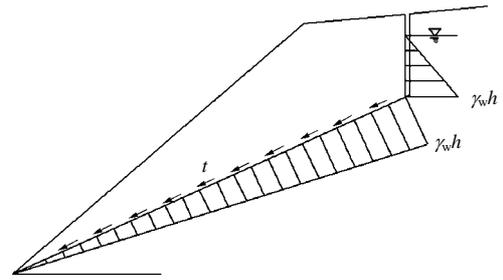


图 1 水压力作用模型  
Fig.1 Model of water pressure

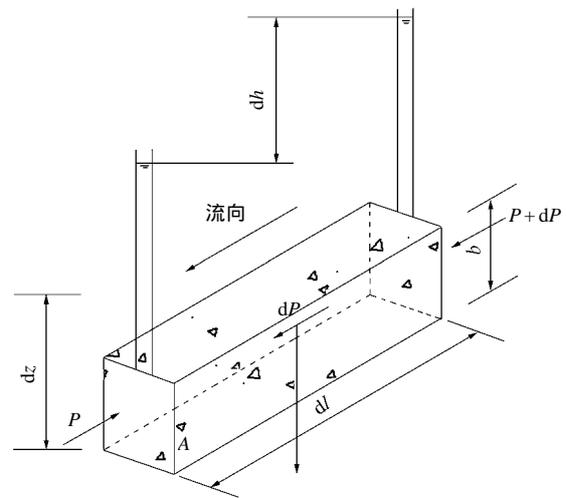


图 2 拖曳力计算单元  
Fig.2 Calculation unit of haulage force

微元体，以该微元体中的水体作为研究对象，微元体长  $dl$ ，截面面积  $A$ ，孔隙率为  $n$ ，高取层面宽度  $b$ ，则沿流线方向作用在微元体内水流上的力有：

#### (1) 孔隙水压力

微元体两端面所受的孔隙水压力分别为  $P$  和  $P + dP$ ，其差量为

$$dP = (dh - dz)\gamma_w A = (dh - dz)\gamma_w b \quad (1)$$

式中： $dh$ ， $dz$  分别为两端面的水头差和高度差； $\gamma_w$  为水的重度。

#### (2) 水流自重

微元体水流自重沿渗流方向的分力为

$$dT = \gamma_w n b d l \frac{dz}{dl} \quad (2)$$

#### (3) 骨架浮力

微元体骨架浮力的反作用力沿渗流方向的分力为

$$dS = \gamma_w(1-n)bdl \frac{dz}{dl} \quad (3)$$

(4) 渗透压力

骨架对微元体水流施加的阻力，其反作用力即水流对骨架的渗透压力，记  $f$  为微元体水流受到的单位阻力，则骨架对微元体水流的阻力为

$$dF = -f b d l \quad (4)$$

不考虑地下水流动时的惯性力，建立如图 2 所示微元体水流的静力平衡关系，有

$$dP + dT + dS + dF = 0 \quad (5)$$

即

$$(dh - dz)\gamma_w b + \gamma_w n b d l \frac{dz}{dl} + \gamma_w(1-n)b d l \frac{dz}{dl} - f b d l = 0 \quad (6)$$

可以求出骨架施加的单位阻力为

$$f = \gamma_w \frac{dh}{dl} \quad (7)$$

则水流对骨架的单位渗透压力为

$$f' = f = \gamma_w \frac{dh}{dl} = \gamma_w I \quad (8)$$

式中： $I$  为沿渗流方向的水力梯度。

对于岩层结构而言，无论是否有充填物，地下水产生渗透压力最终转化为作用在岩层上下壁面上的拖曳力，即

$$t_0 = b f' = \gamma_w b I \quad (9)$$

在边坡稳定性分析中，本文所关心的是地下水渗流对层面上部岩体的拖曳力，精确的计算该力的大小比较困难，也没有太大意义。由于岩层上下面的物理力学特征近似，取地下水渗流对层面上部岩体的拖曳力为总拖曳力的一半比较符合工程实际。

则地下水渗流对层面上部岩体的拖曳力为

$$t = \frac{1}{2} t_0 = \frac{1}{2} \gamma_w b I \quad (10)$$

2.2 边坡滑移破坏的形成与演变

由于工程切坡开挖，边坡坡脚出现临空面，改变了边坡岩体的平衡状态。同时，边坡后缘存在与岩层层面贯通的垂直张裂隙，使边坡具备了顺层滑移破坏的条件。由于水力驱动型顺层边坡层面倾角小于其内摩擦角，边坡在自身重力作用下还不具备失稳的可能，其滑移破坏的实现取决于外界的触发

因素，而降雨尤其是暴雨的作用最为突出。在降雨条件下，边坡后缘张裂隙之上的地表径流汇流于张裂隙中，在贯通的岩层层面和张裂隙中形成承压水流，这种承压水对贯通面上的岩体产生的孔隙水压力和动水压力增加了边坡的下滑力，从而降低边坡的稳定性。从上面的分析可以看出，边坡后缘张裂隙中充水高度越大，边坡中地下水的下不利作用越强烈，而边坡后缘高度又取决于降雨雨强的大小。当降雨雨强达到一个临界值后，边坡中承压水就产生足够的驱动力，导致边坡发生失稳破坏。

3 滑移失稳判据

图 3 为顺层边坡水力驱动滑移破坏的力学模型，作用在潜在滑体上的力有：滑体自重  $W$ 、后缘垂直张裂隙静水压力  $T_1$ 、滑动面孔隙水扬压力  $T_2$  和拖曳力  $D$ 、滑面倾角  $\alpha$ 、滑面长  $L$ 、张裂隙充水高度  $h$ 。沿滑动方向的极限平衡关系式为

$$\frac{(W \cos \alpha - T_2 - T_1 \sin \alpha) \tan \varphi + cL}{W \sin \alpha + T_1 \cos \alpha + D} = 1 \quad (11)$$

式中： $c$ ， $\varphi$  分别为滑面的饱和粘聚力和内摩擦角。

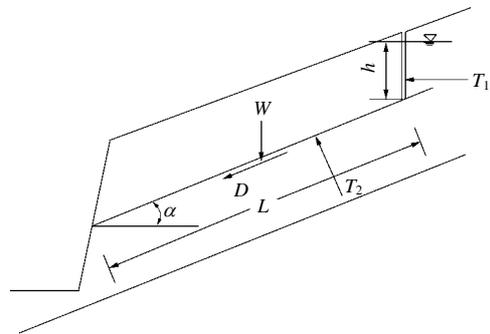


图 3 稳定性分析力学模型

Fig.3 Mechanical model for stability analysis

由前面的分析可知：

$$T_1 = \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \quad (12)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \gamma_w h L \quad (13)$$

$$D = \frac{1}{2} \gamma_w b L I = \frac{1}{2} \gamma_w b h \quad (14)$$

将式(12)~(14)代入式(11)中，可求出关于极限平衡状态下坡体后缘张裂隙临界充水高度  $h_{cr}$  的表达式：

$$h_{cr} = \frac{1}{2(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi)} \cdot \left\{ \left[ (b + L \tan \varphi)^2 + \frac{8}{\gamma_w} (\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi) (W \cos \alpha \tan \varphi + cL - W \sin \alpha) \right]^{\frac{1}{2}} - (b + L \tan \varphi) \right\} \quad (15)$$

由岩体水力学理论可知，图 3 所示顺层边坡地下水在层面中渗流时的流量为

$$Q = bkl = bk \frac{h}{L} \quad (16)$$

式中： $k$  为层面渗透系数。

可以看出，层面渗流流量与张裂隙充水高度成正比。当边坡处于临界稳定状态时，其临界流量为

$$Q_{cr} = bk \frac{h_{cr}}{L} \quad (17)$$

一旦张裂隙的补给水量—汇流量  $Q_0$  大于临界流量  $Q_{cr}$ ，则张裂隙充水高度  $h$  大于其临界高度  $h_{cr}$ ，边坡即发生滑移破坏。

边坡后缘张裂隙和滑动面形成了一个完整的截排水体系，按文[10]中有关水文计算的规定，张裂隙汇流量可按如下公式计算：

$$Q_0 = 16.67\psi qA \quad (18)$$

式中： $\psi$  为径流系数， $q$  为降雨强度， $A$  为面积。

令

$$Q_0 = Q_{cr} \quad (19)$$

将式(19)代入式(18)，可得出临界降雨强度  $q_{cr}$  和张裂隙临界充水高度  $h_{cr}$  的关系式：

$$q_{cr} = \frac{bk}{16.67\psi LA} h_{cr} \quad (20)$$

将式(15)代入式(20)，可得

$$q_{cr} = \frac{bk}{33.34\psi LA(\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi)} \cdot \left\{ \left[ (b + L \tan \varphi)^2 + \frac{8}{\gamma_w} (\cos \alpha + \sin \alpha \tan \varphi) (W \cos \alpha \tan \varphi + cL - W \sin \alpha) \right]^{\frac{1}{2}} - (b + L \tan \varphi) \right\} \quad (21)$$

至此，可以根据临界降雨强度  $q_{cr}$  或张裂隙临界充水高度  $h_{cr}$  的关系提出边坡滑移破坏的判据：

$$\left. \begin{aligned} q < q_{cr} \text{ 或 } h < h_{cr} & \text{ (边坡稳定)} \\ q = q_{cr} \text{ 或 } h = h_{cr} & \text{ (边坡临界稳定)} \\ q > q_{cr} \text{ 或 } h > h_{cr} & \text{ (边坡发生滑移破坏)} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

上述分析是针对顺层边坡表层岩体的滑移破坏，对于潜在破坏面为下部岩层层面的边坡，其滑移破坏体不是单一表层岩层，而是由多个岩层组成，此时，本文对潜在滑体稳定性的力学分析及张裂隙临界充水高度  $h_{cr}$  的计算式(式(15))仍然适用，但渗流流量应按下式计算：

$$Q = \sum b_i k_i \frac{h_i}{L_i} \quad (23)$$

式中： $b_i$ ， $k_i$ ， $h_i$ ， $L_i$  分别为潜在滑动面以上第  $i$  个有效计算层面的层面宽度、渗透系数、张裂隙充水高度和滑面长度。

### 4 算例分析

滑坡地点位于沪蓉西高速公路(宜昌—恩施段)K58+795~K59+030，该边坡为硬岩顺向坡，基岩出露，岩性为弱风化微晶灰岩，NW352° 25°，滑坡侧边界节理陡立，风化严重，内充填 20~40 cm 的粘土，滑体后缘张裂隙近似陡立，倾角 85°，滑动层面平直，可见明显的风化痕迹如图 4 所示。该边坡在便道开挖后，因降雨产生顺层滑脱，滑体厚 2 m 左右。各计算参数如下：滑动层面天然粘聚力  $c = 25$  kPa，天然内摩擦角  $\varphi = 21^\circ$ ；饱和粘聚力  $c = 12$  kPa，饱和内摩擦角  $\varphi = 18^\circ$ 。滑面长度  $L = 16$  m，层面渗透系数从上至下依次为 0.23，0.17 和 1.53 m/s，层面宽度分别为 0.5，0.4 和 1.3 cm，张裂隙横向汇流宽度 9.25 m、径流系数  $\psi = 0.75$ ，滑坡发生时 10 min 降雨强度  $q = 1.37$  mm/min。

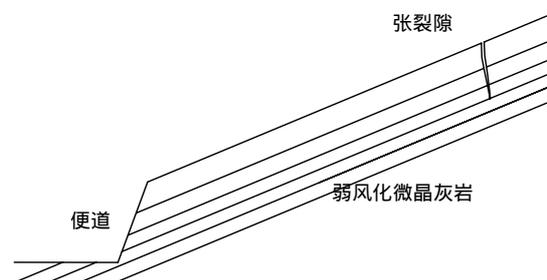


图 4 边坡失稳模型

Fig.4 Instability model of a bedding rock slope

由稳定性分析可知，天然状态下，该边坡的稳定系数为 1.96，而在滑坡发生时的强降雨条件下，其稳定系数仅为 0.91，边坡的稳定系数降低了 54%。若不考虑降雨条件下边坡中的水力作用，仅考虑滑

面的力学参数取饱和值,则边坡的稳定系数为 1.11,边坡中的水力作用使其稳定系数降低了 0.20。

根据文中所给的计算模型进行计算,边坡后缘张裂隙临界充水高度  $h_{cr} = 1.26$  m, 临界降雨强度  $q_{cr} = 0.98$  mm/min, 小于滑坡发生时 10 min 降雨强度  $q = 1.37$  mm/min, 从而导致滑移破坏的发生。

## 5 结 语

(1) 顺层边坡的水力驱动型滑移破坏多发生在由于人为开挖坡脚后形成临空面的坡体,边坡岩层面和后缘张裂隙形成了贯通面,地表水汇流于张裂隙中形成承压水流,产生指向坡外的驱动力,导致滑移破坏发生。

(2) 地下水在顺层边坡中运动时将对坡体施加 3 种作用力:张裂隙静水压力、潜在滑面扬压力和拖曳力,这些作用力的大小直接取决于张裂隙的充水高度。一旦张裂隙的充水高度达到某个临界值,边坡即发生顺层滑移破坏。

(3) 降雨是顺层边坡滑移破坏的直接诱发因素,当边坡后缘形成贯通的张裂隙时,张裂隙和潜在滑面(软弱层面)形成了一个完整的截排水系统,降雨强度越大,张裂隙汇流量越大,此时张裂隙充水高度也随之增大。

(4) 本文通过分析张裂隙充水高度和降雨强度的关系,提出了以临界降雨强度作为边坡顺层滑移失稳的判据,具有一定的工程应用价值。

## 参考文献(References):

- [1] 张天军,李云鹏. 直立顺层边坡的黏弹性稳定分析[J]. 力学与实践, 2003, 25(6): 51-54.(Zhang Tianjun, Li Yunpeng. Linear viscoelasticity stability analysis of bluff rock slope[J]. Mechanics in Engineering, 2003, 25(6): 51-54.(in Chinese))
- [2] 李云鹏,杨治林,王芝银. 顺层边坡岩体结构稳定性位移理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6): 747-750.(Li Yunpeng, Yang Zhilin, Wang Zhiyin. Displacement analysis of structure stability for rock mass bedding slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6): 747-750.(in Chinese))
- [3] 谷拴成,张士兵. 岩石高边坡弯曲破坏的力学分析[J]. 西安科技学院学报, 2003, 23(1): 10-13, 26.(Gu Shuancheng, Zhang Shibing. A force analysis of flexural failure of high rock mass slope[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2003, 23(1): 10-13, 26.(in Chinese))
- [4] 何满朝,姚爱军,鹿粗. 边坡岩体水力学作用的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 662-666.(He Manchao, Yao Aijun, Lu Cu. Study of mechanical functions of underground water in slope rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 662-666.(in Chinese))
- [5] 杨治林. 地下水作用下复合介质边坡岩体的位移判据研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 820-823.(Yang Zhilin. Research on displacement criterion for compound rock mass slope affected by groundwater[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 820-823.(in Chinese))
- [6] 刘才华,陈从新,冯夏庭. 地下水对库岸边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 419-422.(Liu Caihua, Chen Congxin, Feng Xiating. Effect of groundwater on slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 419-422.(in Chinese))
- [7] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003.(Mao Changxi. Seepage Computation Analysis and Control[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003.(in Chinese))
- [8] Hoek E, Bray J W. 岩石边坡工程[M]. 卢世宗,李成村,夏继祥,等译. 北京:冶金工业出版社,1983.(Hoek E, Bray J W. Rock Slope Engineering[M]. Translated by Lu Shizong, Li Chengcun, Xia Jixiang, et al. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1983.(in Chinese))
- [9] 许光祥. 饱水岩石边坡倾覆稳定系数计算[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 227-229.(Xu Guangxiang. Calculation of stability factor against overturning for saturated rock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 227-229.(in Chinese))
- [10] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路排水设计规范(JTJ018-97)[S]. 北京:人民交通出版社,1997.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Specifications of Drainage Design for Highways(JTJ018-97)[S]. Beijing: China Communications Press, 1997.(in Chinese))