

# 水力作用下缓倾顺层岩质边坡滑移破坏机制分析

谭龙金<sup>1</sup> 张海娜<sup>2</sup> 盛韩微<sup>3</sup> 夏开宗<sup>4</sup>

(1. 贵州大学 土木建筑工程学院, 贵阳 550003; 2. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 武汉 430070;

3. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 4. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学

与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘要:** 顺层岩质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。通过对缓倾顺层岩质边坡中的地下水力作用进行分析, 在建立出流缝未被堵塞和出流缝被堵塞 2 种情况下的边坡水力学分析模型的基础上, 推导出了边坡稳定系数和张裂隙临界充水高度的表达式, 从而建立了边坡滑移破坏判据, 认为当张裂隙充水高度或临界降雨强度达到临界值后, 边坡在水力作用下将发生滑移破坏。选取实际边坡进行计算和分析, 验证了公式的合理性。结果表明顺层边坡滑移破坏的实现取决于外界水力作用的触发, 边坡稳定性系数的降低主要与张裂隙中的静水压力和滑动面上的静水压力有关, 而动水压力的影响很小。其成果对设计和施工有重要的指导意义。

**关键词:** 边坡工程; 岩质边坡; 缓倾顺层; 水力作用; 稳定性

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2014)09-0047-07

## 1 研究背景

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<sup>[1]</sup>。近年来, 随着“西电东送”、南水北调工程、高速和高等级公路网等一系列举世瞩目的重大工程的建设, 岩质边坡灾变问题正日益成为人们重点关注的对象, 其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<sup>[2]</sup>。

缓倾顺层岩质边坡作为岩质边坡的一种类型, 自然界中是相当多的, 天然状态下, 此种边坡由于岩层倾角小于层面内摩擦角且具有后缘张裂隙, 边坡在坡脚开挖或河流切割后仍能保持稳定状态, 但在降雨条件下往往引起边坡的滑移破坏, 具有突发性和隐蔽性, 常常因没引起人们的注意而造成大规模的地质灾害。目前, 一些学者对此种边坡的滑移破坏机制进行了研究: 刘军<sup>[3]</sup>、杨治林<sup>[4]</sup>、龙辉<sup>[5]</sup>等应用弹性理论在建立此种类型边坡的尖点突变模型的基础上, 认为地下水主要通过物理化学作用软化了软弱岩层面带岩体, 使软弱岩层面带岩体刚度比降低, 特别是弹性段岩体, 从而使边坡突发失稳, 但分析过程中没有考虑水力作用对边坡稳定性的影响。事实上, 此种类型的

边坡变形破坏不仅取决于软弱层面的力学性质, 而且受边坡中地下水力作用控制<sup>[6-8]</sup>, 包括边坡后缘张裂隙和潜在滑动面中的静水压力以及潜在滑动面上的动水压力作用。所以, 缓倾顺层岩质边坡滑移破坏的实现取决于外界水力作用的触发。

本文通过对缓倾顺层岩质边坡中的地下水力作用进行分析, 在建立了出流缝未被堵塞和出流缝被堵塞 2 种情况下的边坡水力学分析模型的基础上, 推导出了边坡稳定系数和张裂隙临界充水高度的表达式, 建立了顺层边坡滑移破坏判据, 认为当张裂隙充水高度或临界降雨强度达到临界值后, 边坡在水力作用下发生滑移破坏, 并选取实际边坡进行计算和分析, 以验证公式的合理性。

## 2 边坡的力学模型

### 2.1 水对边坡的静水压力作用

静水压力是指液体对其接触面上所作用的压力。强降雨时, 地下水在边坡后缘张裂隙和潜在滑动面形成的渗流通道中运动时, 对滑体将产生 2 个方面的静水压力作用: 张裂隙静水压力、潜在滑动面静水压力。

然而, 这 2 种静水压力的大小均取决于滑动面

收稿日期: 2013-07-08; 修回日期: 2013-08-12

作者简介: 谭龙金(1979-) 男, 贵州盘县人, 讲师, 硕士研究生, 主要从事水利工程、岩土工程等方面教学与研究工作。(电话) 13809480336 (电子信箱) tlj5553@163.com。

通讯作者: 张海娜(1992-) 女, 河北邢台人, 本科生, 主要从事边坡稳定性、矿山沉降方面的研究工作。(电话) 18271825180(电子信箱) xia-kaizhong1988@sina.com。

上的水压分布假设,由于水在边坡中的实际运动状态是未知的,如土壤、杂草或其它原因等可能使得边坡的出流缝被堵塞,而改变滑动面的水压分布假设。鉴于此,为了研究地下水力作用对缓倾顺层岩质边坡稳定性的影响,建立了出流缝未被堵塞和出流缝被堵塞 2 种情况下的边坡水力分析模型。对于出流缝被堵塞的情况,考虑静水压力的边坡水力模型是比较明确的,如图 1 所示。

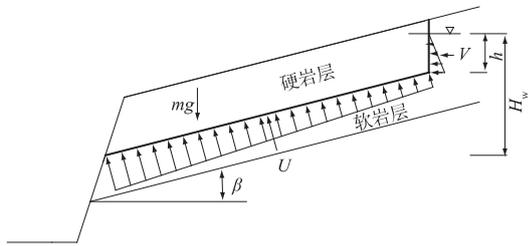


图 1 出流缝被堵塞的边坡静水力分析模型  
Fig. 1 Model of hydrostatic pressure on rock slope when the outflow seam is blocked

此时,静水压力  $V$  和  $U$  的表达式为

$$\begin{cases} V = 0.5\gamma_w h^2, \\ U = 0.5(\gamma_w h + \gamma_w H_w)(H_w - h) / \sin\beta. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $h$  为张裂缝充水高度,  $\beta$  为岩层倾角;  $H_w$  是从滑体剪出口算起的水位高度。

对于出流缝未被堵塞的情况,其水压分布假设目前存在着不同假设<sup>[9-11]</sup>。1977 年在 E. Hoek<sup>[12]</sup> 提出最大水压在后缘竖直张裂缝底部的假设之后,刘才华、何满潮等<sup>[13]</sup> 沿用了这一假设,见图 2。

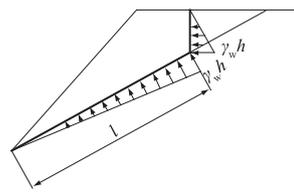


图 2 岩石边坡静水压力假设  
Fig. 2 Assumption of hydrostatic pressure distribution of rock slope

根据图 2 的假设,则岩层面上的静水压力表达式为

$$U = \frac{1}{2}\gamma_w hl. \quad (2)$$

式中  $l$  为岩层面长度。这样的假设存在明显的不合理之处。当后缘张裂缝中的水位高度  $h$  接近或等于 0 时,按照式(2)计算出岩层面上的静水压力  $U$  就接近或等于 0。而事实上,只要岩层面上水位不等于 0,  $U$  就不会等于 0。舒继森等<sup>[14]</sup> 给出了比较合理的假设,如图 3 所示。

新的水压分布假设是:  $A$  点静水压力为 0;  $D$  点是  $1/2$  水位高点,静水压力达到最大,为  $0.5H_w\gamma_w$ ; 当  $h < 0.5H_w$   $B$  点的静水压力为  $h\gamma_w$ 。

根据上述的假设,作用在岩层面上的静水压力为

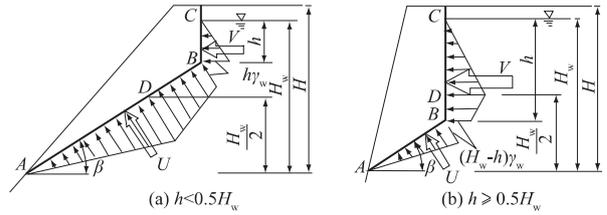


图 3 静水压力分布的新假设  
Fig. 3 New assumption of hydrostatic pressure distribution

$$\begin{cases} V = 0.5\gamma_w h^2, \\ U = \frac{\gamma_w}{4\sin\beta} H_w^2 \left[ 1 - 2\left(\frac{h}{H_w}\right)^2 \right]. \end{cases} \quad (3)$$

当边坡后缘张裂缝深度很大,张裂缝中水高  $h \geq 0.5H_w$ , 此时  $B$  点静水压力为  $(H_w - h)\gamma_w$ , 则后缘张裂缝上和岩层面和的静水压力分别为

$$\begin{cases} V = \left( hH_w - \frac{H_w^2}{4} - \frac{h^2}{2} \right) \gamma_w, \\ U = \frac{(H_w - h)^2}{2\sin\beta} \gamma_w. \end{cases} \quad (4)$$

舒继森等<sup>[14]</sup> 对 2 种假设的结果进行了对比研究,证明了新的水压分布假设的合理性。本文对于出流缝未被堵塞的情况,采用新的水压分布假设。

### 2.2 水对边坡的动水压力作用

对于岩层结构来讲,无论是否有充填物,地下水在岩层层面中流动时,对其周围骨架会产生动水压力作用。刘才华<sup>[9-11]</sup> 针对水对边坡的动水压力作用进行了详细推导,得出水流对骨架的单位动水压力为

$$f' = f = \gamma_w \frac{dh}{ds} = \gamma_w i. \quad (5)$$

式中  $i$  为沿渗流方向的水力梯度,力的方向与渗流方向一致。

由于动水压力是一种体积力,在用式(5)计算动水压力时,渗流的总体积可用给定范围内岩土体体积与其给水度的乘积值<sup>[15]</sup>。即

$$T = nbf' = n\gamma_w lbi. \quad (6)$$

式中:  $n$  为岩层面壁上岩体的给水度;  $l$  为滑动面的长度;  $b$  为岩层面的开度;  $i$  为沿程水头损失,对于如图 3(a) 所示的水压分布,文献[8]推出其表达式为

$$i = \sin\beta + \frac{h}{l}. \quad (7)$$

式中  $h$  为后缘张裂缝充水高度。把式(7)代入式(6)可得

$$T = nb\gamma_w l \left( \sin\beta + \frac{h}{l} \right) = nb\gamma_w (l\sin\beta + h). \quad (8)$$

对于出流缝被堵塞的情况,由于岩层面上的水头损失为 0,所以  $T=0$ 。

可以看出,当张裂隙充水时,不管是出流缝被堵塞还是出流缝未被堵塞的情况,缓倾顺层岩质边坡后缘张裂隙上的和层面上的静水压力及动水压力的均取决于张裂隙的充水高度。因此,在对边坡稳定性进行分析时,后缘张裂隙充水高度是一个极其重要的参数。

### 2.3 边坡力学模型

对于出流缝被堵塞情况下的水力学分析模型,由于滑动面上的动水压力  $T=0$ ,所以与考虑静水压力的水力分析模型相同,见图1。对于上述分析,建立了适合缓倾顺层岩质边坡出流未被堵塞的水力学分析模型,见图4。

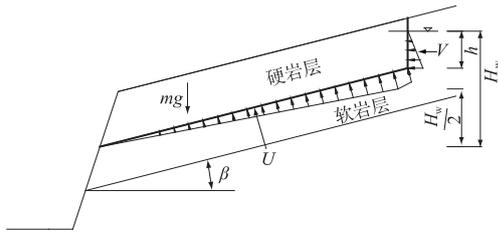


图4 出流缝未被堵塞的边坡水力模型

Fig.4 Model of hydrostatic pressure of rock slope when the outflow seam isn't blocked

### 3 边坡滑移破坏的形成和演变

由于工程河流切割或切坡开挖,不仅使边坡高度或岩层厚度(指滑动面之上所有的岩层厚度之和,下同)增加,而且边坡坡脚出现临空面成为了无约束的自由边界,导致边坡的应力状态重新分布,使得边坡岩体原有的平衡状态被打破。同时,边坡后缘与岩层层面贯通的垂直张裂隙,使边坡具备了沿着软弱岩层顺层滑移破坏的条件,这种张裂隙也成为了地下水运动的重要地质载体<sup>[6]</sup>。但由于边坡内摩擦角比岩层层面倾角大得多,边坡在自身重力作用下抗滑力大于下滑力,所以还不具备失稳的可能,其失稳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,地表径流汇流于边坡后缘张裂隙中,将在贯通的岩层面处和张裂隙处形成承压水流,如果内部的水得不到及时扩散,这种承压水中的静水压力具有将滑体“楔裂”和“拖裂”趋势,使张裂隙宽度和层面开度增加,同时张裂隙静水压力沿滑面向下的分力和动水压力增加了边坡的下滑力;而张裂隙上的静水压力沿滑面向上的分力和层面上的静水压力减小了滑面的有效法向应力,降低了边坡的抗滑力。所以地下水力作用不仅对边坡产生一个明显的扰动,还使得边坡

稳定性系数大大降低。

从上面的论述和分析可以看出,边坡中水力作用的大小与边坡后缘张裂隙中充水高度存在正相关关系,即边坡后缘张裂隙充水高度越大,水力作用对边坡的稳定性表现得越强烈。因此,边坡后缘张裂隙充水高度是一个十分重要的参数,当降雨增大时,边坡后缘张裂隙充水高度也增大,所以当降雨强度达到一个临界值后,边坡中的水力作用就产生一定的水平驱动力,使边坡沿着软弱岩层面的发生滑移破坏。

### 4 边坡的稳定性系数及失稳判据

对于如图1和图4所示的边坡水力模型。设作用在边坡滑体上的力有自重  $W$ 、后缘张裂隙中的静水压力  $V$ 、岩层面上的静水压力  $U$  和动水压力  $T$ 、岩层面的长度为  $l$ 、岩层倾角为  $\beta$ 、滑面内黏聚力为  $c$ 、摩擦角为  $\varphi$ 。边坡平面滑动采用刚体滑移模型进行分析,则坡体在重力作用下的抗滑力  $N$  和下滑力  $R$  分别为

$$\begin{cases} N = W\cos\alpha + cl, \\ R = W\sin\alpha. \end{cases} \quad (9)$$

边坡稳定性系数定义为坡体抗滑力和下滑力的比值,则边坡在重力作用下的稳定性系数  $F_s$  可表示为

$$F_s = \frac{W\cos\beta + cl}{W\sin\beta}. \quad (10)$$

考虑水力作用时,则边坡的稳定性系数  $F_s$  为

$$F_s = \frac{(W\cos\beta - U - V\sin\beta)\tan\varphi + cl}{W\sin\beta + V\cos\beta + T}. \quad (11)$$

将  $U, V, T$  代入式(11),对于出流缝未被堵塞的情况,可求得边坡的稳定性系数  $F_s (h \leq 0.5H_w)$  表达式为

$$F_s = \left\{ \left[ W\cos\beta - \frac{\gamma_w}{4\sin\beta} H_w^2 \cdot \left( 1 - 2\left(\frac{h}{H_w}\right)^2 \right) - \frac{1}{2}\gamma_w h^2 \sin\beta \right] \tan\varphi + cl \right\} / \left[ W\sin\beta + \frac{1}{2}\gamma_w h^2 \cos\beta + nb\gamma_w (l\sin\beta + h) \right]. \quad (12)$$

而当  $h > 0.5H_w$  时,  $F_s$  为

$$F_s = \left\{ \left[ W\cos\beta - \frac{(H_w - h)^2}{2\sin\beta} \gamma_w - \left( hH_w - \frac{H_w^2}{4} - \frac{h^2}{2} \right) \sin\beta \right] \tan\varphi + cl \right\} / \left[ W\sin\beta + \frac{1}{2}\gamma_w h^2 \cos\beta + nb\gamma_w (l\sin\beta + h) \right]. \quad (13)$$

并令式(12)和式(13)等于1。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  $h_{cr}$  ( $h \leq 0.5H_w$ ) 的表达式为

$$h_{cr} = \frac{1}{\left(\cos\beta + \sin\beta\tan\varphi - \frac{\tan\varphi}{2\sin\beta}\right)} \cdot$$

$$\left\{ \left[ \left( nb + \frac{l}{2}\tan\varphi \right)^2 + \left( \cos\beta + \sin\beta\tan\varphi - \frac{\tan\varphi}{2\sin\beta} \right) \cdot \left( \frac{2W\cos\beta\tan\varphi}{\gamma_w} + \frac{2cl}{\gamma_w} - \frac{nbl\sin\beta}{2} - \frac{2W\sin\beta}{\gamma_w} - \frac{1}{2}l^2\sin\beta\tan\varphi \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \left( nb + \frac{1}{2}\tan\varphi \right) \right\} \quad (14)$$

当  $h > 0.5H_w$  时,

$$h_{cr} = \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\cos\beta + \frac{1}{2}\sin\beta\tan\varphi\right)} \left\{ \left[ \left( nb + \frac{l}{2}\sin^2\beta\tan\varphi + \frac{1}{2}\sin\beta\cos\beta \right)^2 + \left( \frac{1}{2}\cos\beta + \frac{1}{2}\sin\beta\tan\varphi \right) \cdot \left( \frac{2W}{\gamma_w}\cos\beta\tan\varphi - 2nbl\sin\beta + \frac{2cl}{\gamma_w} - \frac{2W\sin\beta}{\gamma_w} - l^2\sin\beta\tan\varphi + \frac{l^2}{2}\sin^3\beta\tan\varphi + \frac{l^2}{2}\sin^2\beta\cos\beta \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \left( nb + \frac{l}{2}\sin^2\beta\tan\varphi + \frac{1}{2}\sin\beta\tan\varphi \right) \right\} \quad (15)$$

对于出流缝被堵塞的情况,边坡的稳定性系数  $F_s$  为

$$F_s = \left[ \left( W\cos\beta - \frac{1}{2\sin\beta}\gamma_w(H_w^2 - h^2) - \frac{1}{2}\gamma_w h^2 \sin\beta \right) \tan\varphi + cl \right] / \left[ W\sin\beta + \frac{1}{2}\gamma_w h^2 \cos\beta \right] \quad (16)$$

同理也可以求得坡体后缘张裂隙临界充水高度  $h_{cr}$  的表达式为

$$h_{cr} = \frac{1}{\left(\cos\beta + \sin\beta\tan\varphi\right)} \cdot \left\{ \left[ \left( l\tan\varphi \right)^2 + \left( \cos\beta + \sin\beta\tan\varphi \right) \left( \frac{2W\cos\beta\tan\varphi}{\gamma_w} - l\sin\beta + \frac{2cl}{\gamma_w} - \frac{2W\sin\beta}{\gamma_w} \right) \right]^{\frac{1}{2}} - l\tan\varphi \right\} \quad (17)$$

从式(14)(或(15))和式(17)可以看出,决定边坡稳定性的后缘张裂隙临界充水高度与边坡的外形、层面的开度、层面的给水度、滑面内的内摩擦角、黏聚力等有关。

另外,对于出流缝未被堵塞的情况,由岩体力学理论可知,图4所示顺层边坡地下水在层面中渗流时的流量为

$$Q = bkI = bk \frac{h}{l} \quad (18)$$

式中  $k$  为层面渗透系数。

可以看出,滑动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

$$Q_{cr} = bkI = bk \frac{h_{cr}}{l} \quad (19)$$

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

边坡后缘张裂隙和潜在滑动面形成了一个完整的截排水体系,按《公路排水设计规范》<sup>[16]</sup> 中有关水文计算的规定,张裂隙汇流量可以按如下公式计算:

$$Q_0 = 16.67\psi qA \quad (20)$$

式中:  $\psi$  为径流系数;  $q$  为降雨强度;  $A$  为汇水面积。令

$$Q_0 = Q_{cr} \quad (21)$$

将式(19)及式(20)代入式(21),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:

$$q_{cr} = \frac{bk}{16.67\psi l A} h_{cr} \quad (22)$$

将式(14)或式(15)代入式(22),可得临界降雨强度  $q_{cr}$  ( $h \leq 0.5H_w$ ) 的表达式为

$$q_{cr} = \frac{bk}{16.67\psi l A \left( \cos\beta + \sin\beta\tan\varphi - \frac{\tan\varphi}{2\sin\beta} \right)} \cdot \left\{ \left[ \left( nb + \frac{l}{2}\tan\varphi \right)^2 + \left( \cos\beta + \sin\beta\tan\varphi - \frac{\tan\varphi}{2\sin\beta} \right) \cdot \left( \frac{2W\cos\beta\tan\varphi}{\gamma_w} + \frac{2cl}{\gamma_w} - \frac{nbl\sin\beta}{2} - \frac{2W\sin\beta}{\gamma_w} - \frac{1}{2}l^2\sin\beta\tan\varphi \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \left( nb + \frac{1}{2}\tan\varphi \right) \right\} \quad (23)$$

当  $h > 0.5H_w$  时

$$q_{cr} = \frac{bk}{16.67\psi l A \left( \frac{1}{2}\cos\beta + \frac{1}{2}\sin\beta\tan\varphi \right)} \cdot \left\{ \left[ \left( nb + \frac{l}{2}\sin^2\beta\tan\varphi + \frac{1}{2}\sin\beta\cos\beta \right)^2 + \left( \frac{1}{2}\cos\beta + \frac{1}{2}\sin\beta\tan\varphi \right) \cdot \left( \frac{2W}{\gamma_w}\cos\beta\tan\varphi - 2nbl\sin\beta + \frac{2cl}{\gamma_w} - \frac{2W\sin\beta}{\gamma_w} - l^2\sin\beta\tan\varphi + \frac{l^2}{2}\sin^3\beta\tan\varphi + \frac{l^2}{2}\sin^2\beta\cos\beta \right) \right]^{\frac{1}{2}} - \left( nb + \frac{l}{2}\sin^2\beta\tan\varphi + \frac{1}{2}\sin\beta\tan\varphi \right) \right\} \quad (24)$$

式中:  $\psi$  为径流系数;  $A$  为汇水面积;  $k$  为层面渗透系数。

至此,可以根据降水强度  $q_{cr}$  或张裂缝临界充水高度  $h_{cr}$  的关系提出出流缝被堵塞和未被堵塞的缓倾顺层岩质边坡滑移破坏的判据:当张裂缝中水位高度  $h < h_{cr}$  或  $q < q_{cr}$  时,边坡将失稳;当  $h = h_{cr}$  或  $q = q_{cr}$  时,边坡处于极限平衡状态;当  $h > h_{cr}$  或  $q > q_{cr}$  时,边坡处于稳定状态。

## 5 计算分析

以某一顺层岩质边坡为算例进行计算分析。各计算参数如下:岩体天然重度为  $26.46 \text{ kN/m}^3$ ,饱和重度取  $26.66 \text{ kN/m}^3$ ,后缘张裂缝高度  $Z = 43.6 \text{ m}$ ,剪出口到后缘张裂缝坡面的高度  $H = 87.4 \text{ m}$ ,岩层倾角  $\beta = 16^\circ$ 。滑动面的抗剪强度参数为:天然黏聚力  $c = 54.75 \text{ kPa}$ ,内摩擦角  $\varphi = 22.89^\circ$ ;饱和黏聚力  $c = 47.26 \text{ kPa}$ ,饱和内摩擦角  $\varphi = 20.38^\circ$ 。层面渗透系数为  $0.20 \text{ m/s}$ ,层面开度为  $1.3 \text{ cm}$ ;张裂隙横向汇流宽度  $18 \text{ m}$ ,径流系数  $\psi = 0.40$ ,滑坡发生时  $10 \text{ min}$  降雨强度  $q = 1.37 \text{ mm/min}$ 。

在天然状态下,由式(10)计算得边坡的稳定性系数为  $1.650$ ,饱水状态(仅考虑滑面力学参数取饱和值,不考虑边坡中的水力作用)下的稳定性系数为  $1.449$ ,比天然状态下降低了  $0.201$ 。在饱和状态+水力作用下(不仅考虑滑面力学参数取饱和值,而且还考虑边坡中水力作用,包括后缘张裂缝的静水压力、滑动面上的静水压力和动水压力),计算出流缝未被堵塞情况下边坡稳定性系数为  $0.966$ ,水力作用使得边坡稳定性系数降低了  $33.33\%$ ;而出流缝被堵塞情况下边坡稳定性系数为  $0.508$ ,水力作用使得边坡稳定性系数下降  $64.94\%$ ,比滑动面出留未被堵塞的情况降低  $0.458$ 。所以,对于这种缓倾顺层岩质边坡来说,水力作用对边坡稳定性影响较为显著。此种类型的边坡在天然状态下即使坡脚开挖(或河流切割)后仍能保持稳定状态,但在降雨条件下,在后缘张裂隙和潜在滑面中的水力驱动作用下,将发生滑移破坏,边坡滑移破坏的实现取决于外界水力作用的触发。

再根据式(14)和式(17)计算了解到,对于出留缝被堵塞的情况  $h_{cr} = 12.46 \text{ m}$ ;而对于未被堵塞的情况  $h_{cr} = 40.4 \text{ m}$ ,再借助式(23)求得临界降雨强度  $q_{cr} = 0.156 \text{ mm/min}$ ,小于滑坡发生时  $10 \text{ min}$  降雨强度  $q = 1.35 \text{ mm/min}$ ,从而导致滑移破坏的发生。

下面阐述对于出留缝未被堵塞的情况下( $h < 0.5H_w$ )边坡后缘张裂缝静水压力、滑动面上的静水

压力以及动水压力对边坡稳定性的影响。比较式(3)和式(8)可得岩层面上的动水压力和后缘张裂缝静水压力在沿滑动岩层面方向的分力为

$$T: V_1 = nb(l \sin \beta + h) : 0.5h^2 \cos \alpha \quad (25)$$

式中:  $V_1$  为张裂缝处静水压力在沿滑动岩层面方向的分力。

$$V_2: U = 0.5h^2 \sin \alpha : \frac{1}{4 \sin \beta} H_w^2 \left[ 1 - 2 \left( \frac{h}{H_w} \right)^2 \right] \quad (26)$$

式中:  $V_2$  为张裂缝处静水压力在垂直于滑动沿层面方向的分力。

由式(25)可以看出,场区岩层处的动水压力  $T$  远小于后缘张裂缝处静水压力沿滑动岩层面方向的分力  $V_1$ ,因为此时层面开度  $b$  比张裂隙充水高度  $h$  要小  $2 \sim 5$  个数量级;而从式(26)可以看出,后缘张裂缝处的静水压力在垂直于沿滑动岩层面方向的分力  $V_2$  和岩层面上的静水压力  $U$  的数量级基本相同。所以,在触发边坡失稳的3种水力作用中,动水压力  $T$  对边坡稳定性的影响远小于后缘张裂缝静水压力  $V$  和岩层面上的静水压力  $U$ ,边坡失稳主要是由后缘张裂缝静水压力  $V$  和滑动面上的静水压力  $U$  所致。

上述的讨论都是发生在强降水时,即后缘张裂缝中充满水后,地下水的水力作用对边坡稳定性的影响,而大多数情况下,边坡后缘的张裂缝中不一定都充满水。现在来讨论边坡对水力作用的敏感性,也就是假设后缘张裂缝在不同程度的充水情况下(出留缝未被堵塞)水力作用对边坡稳定性的影响,滑面取饱和强度参数,计算4个设定条件下边坡稳定性系数:(B)不考虑水力的作用;(C)只考虑静水压力  $U$  和  $V$  影响;(D)只考虑动水压力  $T$  的影响;(E)同时考虑静水压力  $U$ ,  $V$  和动水压力  $T$  的影响。当不考虑边坡中地下水的水力作用时,边坡的稳定系数  $F_s$  为  $1.449$ ,当考虑张裂缝中水深变化时水力作用对边坡稳定性的影响时,计算结果如图5所示。

由图5可知,边坡的稳定系数在静水压力影响下随张裂缝中水深的变化而急剧下降,而在动水压力的影响下随张裂缝中水深的变化基本没变化。当水位深度为  $10 \text{ m}$  时,静水压力使稳定系数降低了  $14.28\%$ ,动水压力使稳定系数降低了  $0.185\%$ ;当水位深度为  $20 \text{ m}$  时,静水压力  $U$  和静水压力  $V$  使稳定系数降低  $19.55\%$ ,动水压力  $T$  使稳定系数降低了  $0.365\%$ ;当水位深度为  $30 \text{ m}$  时,静水压力  $U$  和静水压力  $V$  使稳定系数降低了  $25.16\%$ ,动水压力  $T$  使稳定系数降低了  $0.546\%$ ;当水位深度为  $40 \text{ m}$  时,

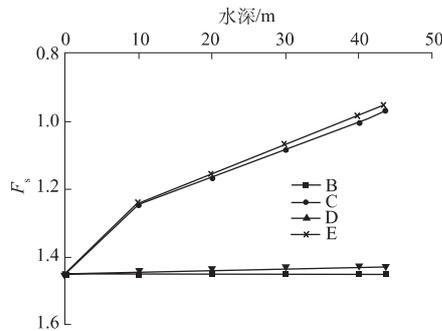


图5 不同条件下边坡稳定系数与张裂缝水深的关系  
Fig.5 Curves of factor of safety vs. water depth in tension crack under different conditions

静水压力  $U$  和静水压力  $V$  使稳定系数降低了 30.77%。动水压力  $T$  使稳定系数降低了 0.727%。所以,静水压力对边坡稳定性的影响较大,是触发边坡失稳的关键因素,动水压力对边坡的稳定性影响很小,这与公式(25)和公式(26)所得的结论是一致的。

## 6 结论

通过对水力作用下缓倾顺层岩质边坡滑移破坏机制研究,以及结合具体的工程实例计算分析,可以得出以下结论:

(1) 建立了出流缝未被堵塞和出流缝被堵塞 2 种情况下的边坡水力学分析模型;推导出了边坡稳定系数和张裂隙临界充水高度的表达式;建立了可以根据降水强度或张裂隙临界充水高度的关系提出边坡滑移破坏的判据。

(2) 滑动破坏中控稳的软弱岩层不仅决定了顺层边坡的变形及破坏模式,同时也是地下水运动的重要地质载体。一旦边坡后缘与软弱岩层面贯通的垂直张裂隙中的水位达到临界水位时,在水力的驱动作用下,将导致边坡滑移破坏发生,边坡滑移破坏的实现取决于外界水力作用的触发。

(3) 水力作用对边坡稳定性影响较大,如对于出流缝未被堵塞的情况,水力作用使边坡稳定性系数降低 33.33%;且出流缝被堵塞情况下水力作用对边坡稳定性影响要比出流缝未被堵塞大得多。若地下水不能正常通过滑体底部流出,边坡稳定性可能会超出计算结果的预期。

(4) 地下水力作用下边坡稳定性系数的降低主要由静水压力  $U$  和  $V$  所致,而动水压力  $T$  的影响很小。如在给定边坡条件下,当水位深度为 40 m 时,静水压力  $U$  和静水压力  $V$  使稳定系数降低了 30.77%,动水压力使稳定系数降低了 0.727%。

所以,在缓倾顺层岩质边坡处治和优化时,应

尽量避免坡顶裂隙的水流渗入,同时必须做好坡体内部的渗水出排工作。

## 参考文献:

- [1] 夏开宗,陈从新,鲁祖德,等. 软硬岩互层边坡稳定性的敏感性因素分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, (4): 729 - 732. (XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, LU Zu-de, et al. Analysis of Sensitivity Factors to Stability of Inter-beddings of Soft and Hard Rock Slope [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2013, (4): 729 - 732. (in Chinese))
- [2] 夏开宗,盛韩微,江忠潮. 声发射的边坡灾害无线智能监控预警系统[J]. 中华建设, 2011, (11): 131 - 133. (XIA Kai-zong, SHENG Han-wei, JIANG Zhong-chao. The Intellectual Monitoring and Pre-warning System of Sloping Disaster Based on Acoustic Emission [J]. China Construction 2011 (11): 131 - 133. (in Chinese))
- [3] 刘军,秦四清,张倬元. 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. (in Chinese))
- [4] 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 Zhi-lin. 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))
- [5] 龙辉,秦四清,万志清. 降雨触发滑坡的尖点突变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 502 - 508. (LONG Hui, QIN Si-qing, WAN Zhi-qing. Catastrophe Analysis of Rainfall-induced Landslides [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 21(4): 502 - 508. (in Chinese))
- [6] 胡其志,周辉,肖本林,等. 水力作用下顺层岩质边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3594 - 3598. (HU Qi-zhi, ZHOU Hui, XIAO Ben-lin, et al. Analysis of Stability Rock-bedded Slope under Hydraulic Pressure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3594 - 3598. (in Chinese))
- [7] 于德海,彭建兵. 降雨触发山区公路边坡失稳的气象判据研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 125 - 128. (YU De-hai, PENG Jian-bin. Meteorological Criterion of Highway Slope Failure Induced by Rainfall in Mountainous Areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2010, 30(4): 125 - 128. (in Chinese))
- [8] 舒继森,唐震,才庆祥. 水力学作用下顺层岩质边坡

- 稳定性研究[J]. 中国矿业大学学报 2012, 41(4): 521 - 525. (SHU Ji-sen, TANG Zhen, CAI Qing-xiang. Research on Stability of Bedding Rock Slopes under Hydraulic Pressure [J]. Journal of University of Mining & Technology, 2012, 41(4): 521 - 525. (in Chinese))
- [9] 刘才华, 徐健, 曹传林, 等. 岩质边坡水力驱动型顺层滑移破坏机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3529 - 3533. (LIU Cai-hua, XU Jian, CAO Chuan-lin, et al. Analysis of Bedding-slip Failure Mechanism of Rock Slope due to Hydraulic Drive [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(19): 3529 - 3533. (in Chinese))
- [10] 刘才华, 陈从新. 层状岩质边坡稳定性 [R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2012. (LIU Cai-hua, CHEN Cong-xin. Stratified Rock Slope Stability [M]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics of Chinese Academy of Sciences 2012. (in Chinese))
- [11] 刘才华. 岩质顺层边坡水力特性及双场耦合研究 [D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006. (LIU Cai-hua. Research on Hydraulic and Sires-seepage Coupling Properties of Rock Bedding Slopes [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics of Chinese Academy of Sciences 2006. (in Chinese))
- [12] HOEK E, BRAY J W. Rock Slope Engineering (Revised Second Edition) [M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1977.
- [13] 何满朝, 姚爱军, 鹿粗, 等. 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 Man-chao, YAO Ai-jun, LU Cu, et al. 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))
- [14] 舒继森, 王兴中, 周义勇. 岩石边坡中滑动面水压分布假设的改进[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(5): 509 - 512. (SHU Ji-sen, WANG Xing-zhong, ZHOU Yi-yong. Improving on Assumption for Water Pressure Distributing on Failure Surface in Rock Slope [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(5): 509 - 512. (in Chinese))
- [15] 雷谦荣. 边坡中地下水压力问题的探讨[J]. 工程勘察, 1997, (1): 29 - 32. (LEI Qian-rong. Discussion on the Issue of Underground Pressure in Slope [J]. Engineering Survey, 1997, (1): 29 - 32. (in Chinese))
- [16] JTJ018—97 公路排水设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1997. (JTJ018—97, Specifications of Drainage Design for Highways [S]. Beijing: China Communications Press, 1997. (in Chinese))

(编辑: 王 慰)

## Mechanism of Bedding-Slip Failure of Gently Inclined Rock Slope Due to Hydraulic Pressure

TAN Long-jin<sup>1</sup>, ZHANG Hai-na<sup>2</sup>, SHENG Han-wei<sup>3</sup>, XIA Kai-zong<sup>4</sup>

(1. College of Civil and Architecture Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China;  
 2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;  
 3. School of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;  
 4. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** The stability of bedding rock slope is mainly affected by the physico-mechanical properties of slide face and the groundwater pressures on slope rock. On the basis of analysing the groundwater pressure, we established the hydrostatic pressure model of rock bedded slope in two cases (blocked outflow seam and unblocked outflow seam). Subsequently we derived the formulas for calculating slope stability coefficient and critical water height in separation fracture, and put forward the criterion for bedding-slip failure of rock slope. According to the criterion, slope will lose its stability once the water height of separation fracture or the critical rainfall intensity reaches a critical value. Calculation example verified the rationality of the proposed formulas. Results also reveal that the decrease in slope stability under the influence of groundwater is mainly related to hydrostatic pressure and uplift force instead of groundwater penetration. The results provide important guide for engineering design and construction.

**Key words:** slope engineering; rock slope; gently inclined bedded; hydraulic pressure; stability