

基于 Barton-Bandis 准则下水力驱动型 岩质边坡的稳定性分析

师华鹏, 余宏明, 韩文奇, 李雄峰

(中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘要:为了将水力作用下岩质边坡稳定性的评价方法与 Barton-Bandis 非线性破坏准则相结合,探讨了 Barton-Bandis 准则参数到 Mohr-Coulomb 准则参数转换的两种常用方法,并推导出了不同计算方法下边坡抗滑稳定性的表达式,然后进行算例分析。结果表明:直接利用 J_{RC} - J_{CS} 模型计算水力作用下边坡的稳定性是可行的;且在单因素影响下,边坡抗滑稳定性系数与裂隙水深 h 、坡高 H 和层面倾角 α 呈负相关,可分别用线性函数、幂函数来描述,而与 J_{CS} 、 J_{RC} 和 φ_b 呈正相关,可分别用对数、指数方程来描述;对于裂隙水深 h 而言,其等效 c 、 φ 值的影响恰好相反,但均可用线性函数拟合,而临界裂隙水深 h_{cr} 与 J_{CS} 和 J_{RC} 的关系分别符合对数、指数特征。

关键词:岩质边坡;水力作用;稳定性分析;Barton-Bandis 准则

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)03-0338-05

Analysis on Stability of Hydraulic-Driven Rock Slope Based on Barton-Bandis Failure Criterion

SHI Huapeng, YU Hongming, HAN Wenqi, LI Xiongfeng

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to combine evaluation method of rock slope stability under the hydraulic pressure and the Barton-Bandis nonlinear failure criterion, two common transfer methods from Barton-Bandis criterion parameters to the Mohr-Coulomb criterion parameters were explored. Following this idea, the anti-sliding stability formula was deduced by different calculation methods. Ultimately, according to the calculation example analysis, the results show that study on the anti-sliding stability factor of rock slope by J_{RC} - J_{CS} model is feasible; and under the single factor influence, there is a negative correlation among anti-sliding stability factor of fissure water depth in rock slopes, slope height and plane angle. This can be respectively described by linear function and power function, and they show positive correlations among anti-sliding stability factor and J_{CS} and J_{RC} and φ_b , which can be respectively described by Logarithm and exponential equation; as to fissure water depth, the influence that casts upon equivalents of c , φ is opponent, but the relationship between them also can be fitted by linear function, and the relationships between critical fissure water depth and J_{CS} , J_{RC} are respectively fitted by logarithmic and exponential.

Keywords: rock slope; hydraulic pressure; stability analysis; Barton-Bandis criterion

节理岩质边坡的稳定性分析是岩土工程的重要研究领域,边坡的变形与破坏主要受结构面的特征和抗剪强度的控制,因此,如何有效地对节理岩体结构面的强度进行预测是正确评价边坡稳定性所面临的问题。目前,对结构面强度的预测无论是理论公式还是数值分析大多是基于 Mohr-Coulomb 线性准则进行的^[1]。然而,通过研究发现,当法向应力 σ_n 较大或较小时,岩体结

构面的抗剪性能并不能很好的满足 Mohr-Coulomb(简称 M-C)准则。因此,许多学者在试验的基础上,提出了不同的强度预测准则和稳定分析方法。如 Ladanyi 等^[2]提出利用扩张性和估测被剪切的凸出部分的表面积方法来确定剪切强度的复杂模型;李永红等^[3]通过 Barton-Bandis 模型描述岩体特征,探讨 Barton-Bandis 参数到 Mohr-Coulomb 准则参数的转换,并研究了 Barton-

Bandis 参数对 Mohr-Coulomb 参数的影响;赵坚^[4]在提出的 J_{RC} - J_{MC} 模型中综合考虑了节理吻合度和节理粗糙度的关系,更好的解释与估测了各类岩石节理的特性;罗强等^[5]利用 Barton-Bandis 模型对锚固边坡的稳定性进行了研究;谭龙金等^[6]利用 Mohr-Coulomb 准则对水力作用下边坡的稳定性进行了研究;林永亮等^[7]利用 J_{RC} - J_{MC} 模型对锚固边坡在地震、结构面参数等方面对稳定性的影响进行了分析;刘自由^[8]利用 J_{RC} - J_{MC} 模型与极限平衡法相结合的方法,建立了计算边坡稳定性的公式。

在上述预测与分析模型中,Barton-Bandis 提出的 J_{RC} - J_{CS} 模型是目前工程实践最常用的确定结构面抗剪参数的方法,但基于此非线性破坏准则下水力作用对边坡稳定性的研究较少。为此,本文考虑水的作用,利用理论推导建立基于 J_{RC} - J_{CS} 模型下水力作用对边坡稳定性拟静力的分析方法,推导水力作用下平面型节理岩体边坡的稳定性表达式,并重点分析裂隙水深、结构面参数对控制边坡稳定性的影响,并给出相应的工程建议。

1 Barton-Bandis 参数到 Mohr-Coulomb 参数的转换

1.1 J_{RC} - J_{CS} 模型

Barton 等在大量人工拉断结构面的直剪试验基础上,提出了估算岩体结构面抗剪强度的经验公式,即著名的 J_{RC} - J_{CS} 模型:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left[\varphi_b + J_{RC} \cdot \lg \left(\frac{J_{CS}}{\sigma_n} \right) \right] \quad (1)$$

式中: τ ——结构面剪应力; σ_n ——作用于结构面上的法向应力; φ_b ——基本摩擦角,其值多为 $25^\circ \sim 35^\circ$,并当结构面处于较低的法向应力,结构面风化且厚度不足 1 mm 时,基本摩擦角 φ_b 应由残余摩擦角 φ_r 代替;当结构面处于饱和状态时,残余摩擦角会有不同程度的降低,范围为 $5\% \sim 30\%$; J_{RC} ——节理粗糙系数; J_{CS} ——节理压缩强度。式中参数 φ_b , J_{RC} , J_{CS} 的取值可参见文献[9]。

1.2 等效抗剪强度参数 c , φ 的获取

对于岩质边坡稳定性的计算方法和数值模拟大多基于 M-C 破坏准则进行的,如利用非线性的 B-B 破坏准则对边坡稳定性进行评价,就需致力于将 B-B 破坏准则参数转化为 M-C 破坏准则参数的研究,并将其应用于工程实践中。在基于极限平衡的基础上^[5,10-11],探讨了利用 J_{RC} - J_{CS} 模型获取 M-C 模型参数的两种方法:切线等效法和等效线性拟合法。

切线等效法是利用 J_{RC} - J_{CS} 模型上特定法线应力所对应的切线方程来求对应的等效 c , φ 。公式如下:

$$\varphi = \tan^{-1} (\omega_a - \omega_b) \quad (2)$$

$$c = \tau - \sigma_n \tan \varphi = \sigma_n \omega_b \quad (3)$$

$$\text{式中: } \omega_a = \tan \left[\varphi_b + J_{RC} \cdot \lg \left(\frac{J_{CS}}{\sigma_n} \right) \right], \quad \omega_b = \frac{\pi J_{RC}}{180 \ln 10} (\omega_a^2 + 1)。$$

等效线性拟合法是对 J_{RC} - J_{CS} 模型上一系列不同法向应力及对应的剪应力的拟合来得到等效 c , φ 的方法。为了进行数据拟合,根据文献[3—5]将 M-C 公式写成如下形式:

$$Y = \lg A + BX \quad (4)$$

式中: $Y = \lg \left(\frac{\tau}{\sigma_{ci}} \right)$; $X = \lg \left(\frac{\sigma_n - \sigma_{tm}}{\sigma_{ci}} \right)$; σ_{tm} ——岩石的抗拉强度, σ_{ci} ——岩块的抗压强度。在计算得到一组 σ_n , τ 后可按照下式进行拟合求出材料参数 A , B :

$$A = 10^{[\sum Y/T - B(\sum X/T)]} \quad (5)$$

$$B = \frac{\sum XY - (\sum X \sum Y)/T}{\sum X^2 - (\sum X)^2/T} \quad (6)$$

2 岩质边坡水力学分析模型

利用 J_{RC} - J_{CS} 剪切破坏模型对 Hoek 和 Bray 给出的典型岩质边坡进行分析,其几何要素主要为:坡高 H 、张裂缝深度 Z 、滑面 α 、坡角 β 和张裂缝距坡顶边缘 L 。当边坡受水力作用影响时,边坡的受力状态如图 1 所示。本文在考虑水对边坡稳定性影响时,采用了舒继森改进后的水压分布假设,即在边坡最高水位的中间位置静水压力达到最大,如图 2 所示,其中 U , V 分别为滑面和张裂缝所受的静水压力;据文献[5]可知,动水压力 T 对边坡稳定性的影响远小于 U , V 的影响,因此在进行边坡稳定性计算时,常忽略动水压力 T 的影响。

由图 1 的几何关系知,滑体的重量 $W = (\gamma H^2/2) \{ [1 - (Z/H)^2] \cot \alpha - \cot \beta \}$;滑面的长度 $L_{AB} = (H - Z)/\sin \alpha$;进行受力分析知,坡体在重力和水力作用下的抗滑力 F_r 、下滑力 F_i 及作用在滑动面上的正应力 σ_n 分别为:

$$\begin{cases} F_r = (W \cos \alpha - U - V \sin \alpha) \tan \varphi + cl \\ F_i = W \sin \alpha + V \cos \alpha \\ \sigma_n = \frac{W \cos \alpha - U - V \sin \alpha}{L_{AB}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: V , U ——静水压力,当出流缝未堵塞且 $h < 0.5 H_w$ 时(图 2), V , U 分别为:

$$\begin{cases} V = \frac{\gamma_w h^2}{2} \\ U = \frac{\gamma_w}{4 \sin \alpha} H_w^2 \left[1 - 2 \left(\frac{h}{H_w} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (8)$$

当 $h \geq 0.5 H_w$ 或出流缝堵塞时,静水压力 V , U 的计算公式可参考文献[5]。

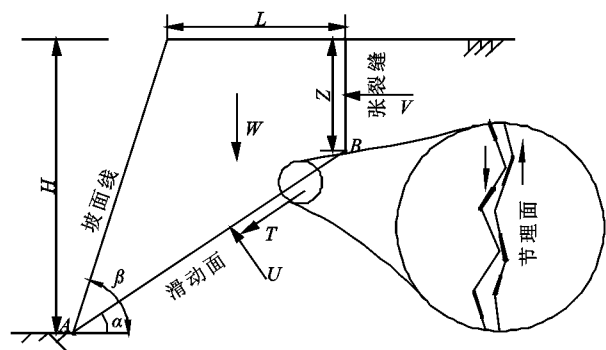


图 1 水力作用下岩质边坡受力状态

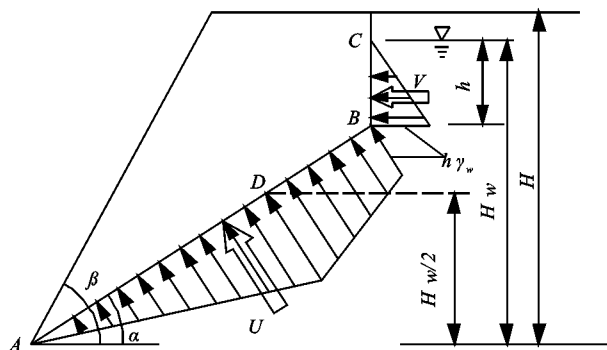


图 2 改进后的静水压力分布假设

3 基于 J_{RC} - J_{CS} 模型下边坡的稳定性分析

3.1 边坡稳定性系数

根据岩质边坡抗滑稳定性系数的计算公式知： $F_s = F_t / F_i$ ，为得到水力作用下基于非线性 J_{RC} - J_{CS} 模型下的边坡稳定性系数，将公式(1)带入公式(7)可得：

$$F_s = \frac{(W \cos \alpha - U - V \sin \alpha) \cdot \tan \left\{ \varphi_b + J_{RC} \cdot \lg \left[\frac{J_{CS}}{W \cos \alpha - U - V \sin \alpha} \right] \right\}}{W \sin \alpha + V \cos \alpha} \quad (9)$$

由于工程实践及数值模拟中常利用 M-C 强度破坏准则，利用前文分析的切线等效法可将边坡在水力作用下的稳定性系数按 $\tau = \sigma_n \tan \varphi + c$ 的形式表达如下：

$$F_s^* = \frac{(W \cos \alpha - U - V \sin \alpha) (\omega_a - \omega_b) + \sigma_n \frac{\pi J_{RC}}{180 \ln 10} (\omega_a^2 + 1) \frac{H - Z}{\sin \alpha}}{W \sin \alpha + V \cos \alpha} \quad (10)$$

同时，也可将线性拟合得到的等效 c^{**} ， φ^{**} 按照 $\tau = \sigma_n \tan \varphi + c$ 的表达形式将边坡的稳定性系数表达如下：

$$F_s^{**} = \frac{(W \cos \alpha - U - V \sin \alpha) \cdot \tan \varphi^{**} + c^{**} \frac{H - Z}{\sin \alpha}}{W \sin \alpha + V \cos \alpha} \quad (11)$$

表 1 不同的边坡稳定性计算方法在不同假设下的计算结果

稳定性 系数	A	B	C	D	A 与 B		A 与 C		A 与 D	
					A-B	(A-B)/A/%	A-C	(A-C)/A/%	A-D	(A-D)/A/%
F_s	2.065	1.858	1.553	1.396	0.207	10.02	0.512	24.79	0.699	32.4
F_s^*	2.065	1.858	1.553	1.396	0.207	10.02	0.512	24.79	0.699	32.4
F_s^{**}	2.055	1.850	1.533	1.377	0.205	9.98	0.522	25.40	0.678	32.3
F_s	1.650	1.449	—	0.996	0.201	12.18	—	—	0.654	39.6

从表 1 可以看出， F_s 、 F_s^* 和 F_s^{**} 计算的结果比较接近，但利用等效线性拟合方法求得的边坡稳定性系数 F_s^{**} 偏小，计算结果偏保守；且在 4 种不同的假设下，无论是利用 J_{RC} - J_{CS} 模型求出的水对边坡稳定性的影响，还是利用非线性准则参数到线性准则参数转换的方法求出的水对边坡稳定性的影响都与文献[5]

而对于边坡倾覆稳定性，由其定义知其值为绕坡脚的阻倾力矩和倾覆力矩之比。可见，强度准则对边坡的倾覆稳定性无影响，本文对其不做探讨，仅对边坡的抗滑稳定性进行研究。

3.2 算例分析

以某顺层岩质边坡为例，其简图如图 1 所示：裂隙垂直发育，结构面的壁岩处于弱风化状态。基本参数为：裂隙高度 Z 为 8；坡角 β 为 60° ；天然残余摩擦角 φ_r 为 28° ，饱和残余摩擦角 φ_r 为 25° ；重度 γ 为 23 kN/m^3 。变化的基本参数为： H 为 $16 \sim 60 \text{ m}$ ；层面倾角 α 为 $10^\circ \sim 40^\circ$ ； J_{CS} 为 $5 \sim 90 \text{ MPa}$ ； J_{RC} 为 $0 \sim 18$ ；裂隙水位高度 h 为 $0 \sim 8 \text{ m}$ ；饱和残余摩擦角 φ_r 为 $20^\circ \sim 35^\circ$ 。

将上文分析的利用 J_{RC} - J_{CS} 模型获取线性 M-C 准则下强度参数的方法应用到该实例边坡中，获得了线性拟合的等效强度参数 c ， φ ，天然状态时分别为： 15.43 kPa ， 47.21° ；饱和状态时分别为： 12.93 kPa ， 44.39° 。现为验证直接利用 B-B 准则计算水力作用下边坡稳定性的可靠度，分别利用公式(9)—(11)计算了 4 种不同假设下的边坡稳定性系数：A 表示不考虑水的作用；B 表示仅考虑水对结构面的软化作用；C 表示仅考虑水力作用；D 表示水的软化作用+水力作用，计算结果如表 1 所示。

中直接利用 M-C 准则求出的结果一致，这表明直接利用 B-B 破坏准则计算节理岩体边坡在水力作用影响下的边坡稳定性是可行，且避免了参数转化时的繁琐计算，更为简便、直观。直接利用 J_{RC} - J_{CS} 模型求取边坡稳定性的可行性的基础上，根据公式(9)讨论单一因素的变化对边坡稳定性的影响(图 3)。

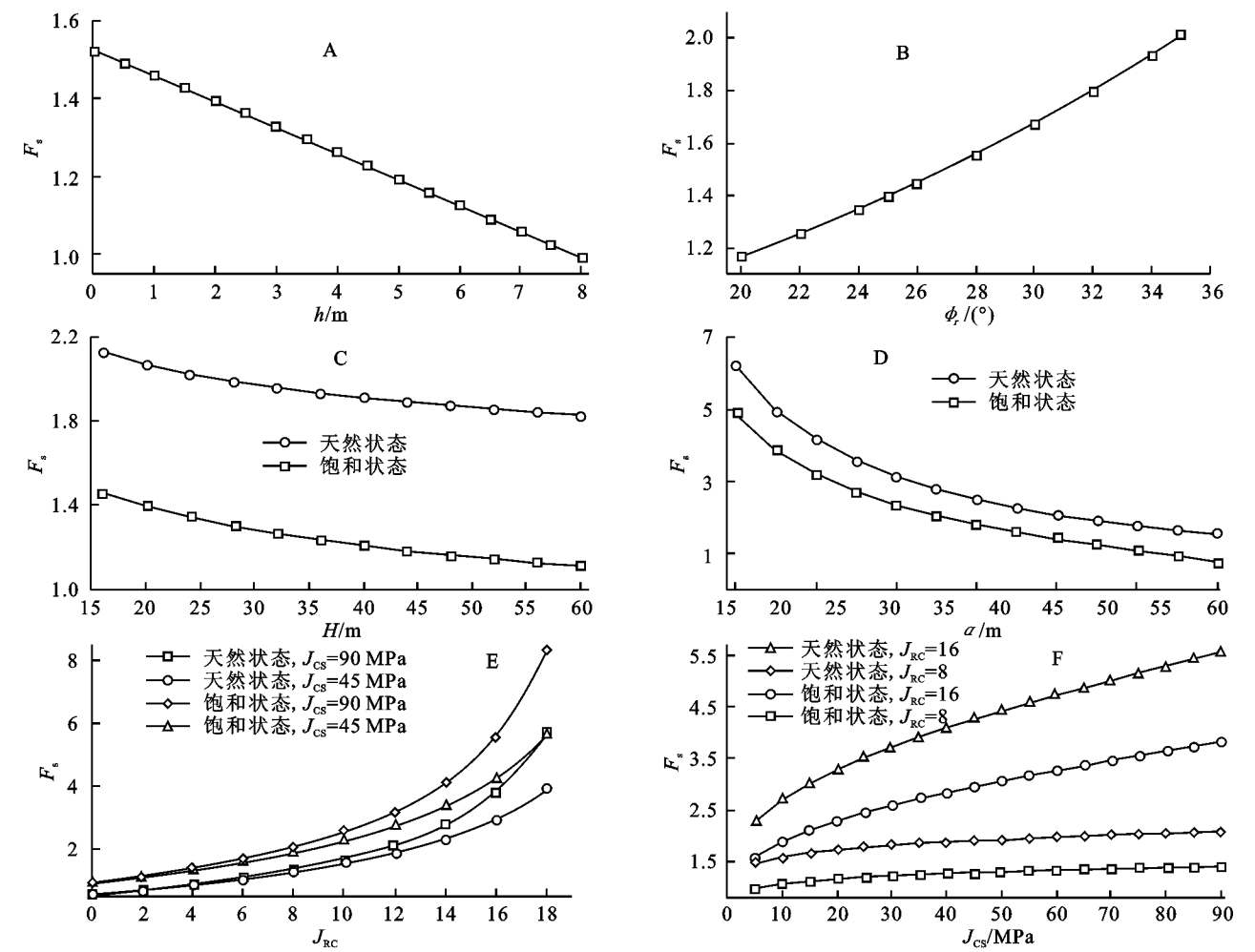


图 3 边坡抗滑稳定性与坡体参数的关系

从图 3 可以看出,在水力作用影响下,处于饱和状态时的边坡抗滑稳定性比处于天然状态时的降低了 30%~40%,且都随着边坡高度、滑面倾角、裂隙水位深度的增加呈下降趋势;随着残余摩擦角 F_s , J_{RC} , J_{CS} 的增加,呈现非线性的显著上升趋势;其中在 J_{RC} 与 F_s 和 φ_r 与 F_s 的关系曲线中,曲线斜率随着 J_{RC} , φ_r 增加而逐渐增大,表明稳定性系数 F_s 受到它们影响的敏感度逐渐增大,即对稳定性的影响程度也逐渐增加;而在 J_{CS} 与 F_s 的曲线中,曲线斜率随着 J_{CS} 的增加逐渐趋近于零,这表明当 J_{CS} 较大时其对 F_s 的影响较 J_{RC} , φ_r 对 F_s 的影响小,这正是由于 J_{CS} 在公式(1)中以 $\lg J_{CS}$ 的形式出现,从而降低了其对稳定性影响的程度。

由上文分析知,在水力作用的影响下,边坡抗滑稳定性系数受很多因素的影响,现为得到单一因素变化时稳定性系数 F_s 。与 $h, \varphi_r, H, \alpha, J_{RC}$ 和 J_{CS} 的定量关系,建立了不同的拟合模型对其进行拟合分析,如表 2 所示。

从表 2 中的单因素拟合结果可知,拟合结果的相关系数 R 均接近 1,说明拟合是有效的。其中边坡抗

滑稳定性系数 F_s 与残余摩擦角 φ_r , J_{RC} 呈指数函数关系,与 J_{CS} 呈对数函数关系,且都对边坡的稳定性有着明显的影响,因此准确的获取节理的相关参数对评价节理岩体边坡的稳定性有着重要的影响。

表 2 边坡抗滑稳定性系数与坡体参数的拟合关系

关系	拟合方程	拟合参数		相关系数 R	备注
		a	b		
F_s 和 h	$F_s=a+bh$	1.5267	-0.0667	0.9998	—
F_s 和 φ_r	$F_s=ab^{\varphi_r}$	0.5672	1.0368	0.9999	—
F_s 和 H	$F_s=aH^b$	2.5988	-0.2081	0.9998	—
F_s 和 α	$F_s=aa^b$	73.4166	-1.1664	0.9957	—
F_s 和 J_{CS}	$F_s=a\ln(b+J_{CS})$	0.4730	9.8488	0.9995	$J_{RC}=8$
F_s 和 J_{RC}	$F_s=ab^{J_{RC}}$	0.5343	1.1148	0.9970	$J_{CS}=45\text{ MPa}$

如图 1—2 所示,在一定的水压分布假设下,边坡稳定性受水力作用影响的程度,主要体现在后缘裂隙水位的深度 h 对边坡稳定性的影响,如图 3A 所示。当水位 h 发生变化时,基于参数转化方法下的线性强度参数也会产生不同的变化趋势,如图 4 所示,粘聚力 c 随着 h 的增加呈减小的趋势,而对内摩擦角 φ 的影响正好相反,这是由于随着裂隙水位 h 的增加, σ_n , ω_a 变化的幅度较 ω_b 的大造成的。可建立拟合模型

对 h 与 c, φ 的关系进行拟合, 如表 3 所示。

根据 B-B 破坏准则, 裂隙水位 h 对边坡稳定性的影响, 除受坡体的几何特征的影响外, 还主要受 J_{CS} 和 J_{RC} 的影响。图 5—6 分别表示 J_{CS}, J_{RC} 与后缘裂隙临界水深 h_{cr} 的关系, 从中可以看出: h_{cr} 随着 J_{CS} 和 J_{RC} 的增加呈非线性增加, 这是由于节理面越粗糙, 岩

体压缩强度越大, 边坡的稳定性就会越高, 从而导致了 h_{cr} 的增加; 在 J_{CS}, J_{RC} 和 h_{cr} 的关系曲线中, 两曲线斜率都发生了不同程度的降低, 这表明 h_{cr} 随着 J_{CS}, J_{RC} 值的增加受其影响的敏感度都逐渐降低, 且 J_{CS} 比 J_{RC} 对 h_{cr} 敏感度的影响更显著。据此建立拟合模型, 对 J_{CS}, J_{RC} 与 h_{cr} 的关系进行拟合, 如表 3 所示。

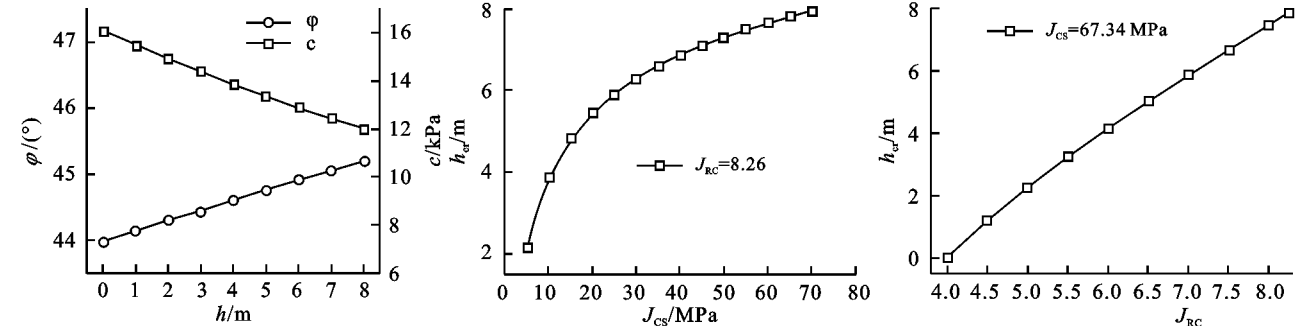


图 4 后缘裂隙水深与粘聚力和内摩擦角的关系 图 5 裂隙临界水位深度与 J_{CS} 的关系 图 6 裂隙临界水位深度与 J_{RC} 的关系

从表中各因素之间关系的拟合结果可知, 拟合结果的相关系数 R 均接近 1, 说明拟合是有效的。其中后缘水深 h 对线性参数的影响正好相反, 且基本符合线性的变化规律; 而 J_{CS}, J_{RC} 对临界水深 h_{cr} 的影响与其对边坡稳定性 F_s 的影响均呈现出相同的变化规律, 即分别可以用对数、指数函数来拟合。

考虑地震、地面荷载等多荷载共同作用下的边坡稳定性情况。而往往边坡的实际受力状态是较复杂, 因此对边坡的稳定性需进一步研究。

参考文献:

[1] 何忠明, 曹平. 考虑应变软化的地下采场开挖变形稳定性分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(4): 641-646.

[2] Ladanyi B, Archambault G. Simulation of the shear behaviour of a jointed rock mass[C]// Proceedings of the 11th US Symposium of Rock Mechanics. Berkeley, 1970.

[3] 李永红, 彭振斌, 钟正强, 等. 基于 Barton-Bandis 非线性破坏准则的岩体强度预测[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(5): 1388-1391.

[4] 赵坚. 岩石节理剪切强度的 J_{RC} -JMC 新模型[J]. 岩石力学与工程学报 1998, 17(4): 349-357.

[5] 罗强, 赵炼恒, 李亮, 等. 基于 Barton-Bandis 准则的锚固边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1351-1359.

[6] 谭龙金, 张海娜, 盛韩微, 等. 水力作用下缓倾顺层岩质边坡滑移破坏机制分析[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(9): 47-53.

[7] 林永亮, 李新星. 基于 J_{RC} -JMC 模型的锚固边坡稳定性拟静力分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(S1): 269-273.

[8] 刘自由. 边坡 J_{RC} - J_{CS} 极限平衡安全系数的计算[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(5): 2088-2092.

[9] 杜时贵. 岩体结构面抗剪强度经验估算[M]. 北京: 地震出版社, 2005.

[10] 钟正强, 彭振斌, 彭文祥. 基于非线性破坏准则的岩体剪切强度参数确定方法[J]. 科技导报, 2009, 27(15): 64-66.

[11] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 基于广义 Hoek-Brown 准则的边坡安全系数间接解法[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1147-1151.

表 3 后缘裂隙水深与 $c, \varphi, J_{CS}, J_{RC}$ 之间关系的拟合

关系	拟合方程	拟合参数			相关系数 R
		a	b	c	
c 和 h	$c=a+bh$	15.9681	-0.5089	—	0.9987
φ 和 h	$\varphi=a+bh$	43.9963	0.1512	—	0.9999
h_{cr} 和 J_{CS}	$h_{cr}=a\ln(b+J_{CS})$	1.8821	-1.9397	—	0.9999
h_{cr} 和 J_{RC}	$h_{cr}=a-bc^{J_{RC}}$	21.7032	32.8401	0.9008	0.9999

4 结论

(1) 通过对不同方法计算得到的边坡稳定性系数的对比分析, 表明了直接利用 J_{RC} - J_{CS} 模型计算水力作用下边坡的稳定性是可行的。

(2) 在水力影响下, 边坡的抗滑稳定性出现了明显的降低; 从单因素角度分析可知, 坡高、层面倾角均与稳定性呈负相关性, 且均呈幂函数关系; J_{CS} 、残余摩擦角和 J_{RC} 均与边坡稳定性呈正相关性, 且分别呈对数、指数函数关系。因此, 在工程实践中要准确考虑结构面的蚀变程度和表面粗糙度, 避免因过高估计结构面的抗剪强度而导致工程安全性降低。

(3) 后缘裂隙水深与边坡抗滑稳定性和粘聚力呈负相关性, 与内摩擦角呈正相关性, 并且两者均呈线性函数关系; 裂隙临界水深 h_{cr} 随着 J_{CS} 和 J_{RC} 的增加分别呈对数、指数函数的形式增加。

本文仅是考虑了水力作用下边坡的稳定性, 没有