



## 拱坝坝肩抗滑稳定分析中岩体 抗拉强度初探

韩凤禹、汤阳

能源部  
水利部  
(西北勘测设计院 西安 710001)

### 提 要

本文介绍了岩体抗滑稳定计算中的抗拉强度指标及其实用方法。

### 一、不宜无条件地认为“岩体是不抗拉介质”

岩体可看成是由断裂和岩石所构成。岩石可以抗拉而岩体中的断裂对工程而言则视为不抗拉面。岩体的力学性质由这两者所决定。两者之中究竟谁起主导作用，要看受力性质、岩石和断裂的力学特性、断裂的多少、长短和分布而定。如果在所研究的范围内断裂不是很多，而且又远没有连通，则岩体将会因其中存在着错综复杂的“岩桥”而表现出一定的抗拉能力。

因此，巴彻 (Pacher) 和米勒 (Mueller) 三十年前就曾指出：节理岩体在某个断面上抵抗拉伸破坏的阻力  $R = \sigma_c + \sigma_t$ ，其中  $\sigma_c$  为摩尔圆上的正应力， $\sigma_t$  为破坏包络线上的抗拉强度；并且指出：岩体在垂直于节理面方向上的抗拉强度  $\sigma_t$  为

$$\sigma_t = S_r \left( 1 - \frac{\sum A_i}{A} \right) \quad (1)$$

式中  $\sum A_i = A_1 + A_2 + \dots + A_n$  是每条裂隙在断面上所占的面积，

$A$ —断面总面积

$S_r$ —岩石的抗拉强度

尽管这是十分简化的，但它已反映了裂隙岩体具有抗拉强度的主要本质。



在工程实践中, 例如在山岩中挖掘的大跨度洞室的拱顶部位、在预应力岩锚的内锚头前面的岩体中、在混凝土高坝坝踵部位的岩体中, 就常常存在拉应力。当然, 在少数工程中曾由于岩体抗拉能力弱等原因而发生过破坏, 但大多数岩体却承受住了所受的拉应力而使工程正常运行着。

总之, 有些岩体是具有一定抗拉强度的。抗拉强度的大小与岩石的性质、裂隙的多少、长短、分布、胶结物的性质以及胶结(或固结)的程度有关, 对此, 人们已逐渐展开了研究。一些岩样的抗拉强度见表 1。

表 1 有结构面的岩样的抗拉强度

Tab. 1 The tensile strength of rock samples containing a structural plane

岩 性	抗 拉 强 度 (MPa)				注
	//	∠	⊥	不 分	
片麻岩 (马尔巴塞坝址)	—	—	—	4.4~7.3	高处(1)
片麻岩 (马尔巴塞坝址)	—	—	—	7.7~8.8	低处(1)
砂 岩	8.07~11.8	—	8	—	(1)
云母片岩	5	—	0.9	—	(a)*
石英云母片岩	5.9	—	0.8	—	(a)
绿泥石石英片岩	7.7	2.4	1.6	—	(a)
绿泥石云母片岩	4.4	2.8	0.59	—	(a)
大 理 岩	3.4	2.4	1.4	—	(a)
风化砂岩 (巴克拉坝)	—	—	—	2.5~5	(1)
紫色粉砂岩	—	—	—	0.28	(b)*
页 岩	—	—	—	3.8	(1)

注: 表中//、∠、⊥是指拉力与岩样中结构面的关系。

虽然表 1 的资料大多是室内测定的, 但所用的岩样都是带有层理、片理或节理的, 因此可以用来说明裂隙岩体具有一定的抗拉强度, 岩块的抗拉强度还会更高一些(见表 2)。

表 2 岩石的抗拉强度

Tab. 2 The tensile strength of intact rock samples

岩 性	抗拉强度 (MPa)	注
辉 绿 岩	8~12	(1)
花 岗 岩	7~10 (9.7~15.3)	拉西瓦坝址 ((3))
玄 武 岩	7.7~8	(1)
石 英 岩	8.4	(1)
砂 岩	6.3 (8.2~9.9)	(1) ((3))
灰 岩	1.5~5 (3.5~5.5)	(1) ((3))
粉 砂 岩	(4.2~4.7)	((3))
白 云 岩	1	(1)

\* (a) 林天健, 岩石各向异性力学效应的试验研究, 应用岩石力学, 1981。

(b) 林伟平、罗渝堂, 三维应力状态下半坚硬岩体的变形与强度, 应用岩石力学, 1981。



最后,在表3中列出黄土( $Q_{II}$ 、 $Q_{III}$ 黄土)的抗拉强度,其数值是用拉伸试验测定的<sup>[2]</sup>.

表3 黄土的抗拉强度<sup>[2]</sup>

Tab.3 The tensile strength of loess

组号	试样组数	含水量 (%)	干容重 (g/cm <sup>3</sup> )	抗拉强度 $\sigma_t$ (MPa)		
				均值	变化范围	有裂隙时
A	6	16.4~17.9	1.6~1.67	0.041	0.023~0.047	0.023~0.026
B	6	10.2~16.2	1.5~1.57	0.04	0.025~0.056	0.007
C	7	10.2~14.4	1.31~1.38	0.016	0.011~0.021	—
E	6	8~9	1.57~1.63	0.023	0.015~0.029	0.009

## 二、拱坝坝肩抗滑稳定分析中的抗拉强度研究

对拱坝的坝肩岩体需要进行稳定分析,其中包括抗滑稳定分析.目前主要采用极限平衡法,对由底滑面、侧滑面以及上游切割面所围成的块体(岩体)(见图1)进行抗滑稳定性分析,计算其强度储备安全系数 $K_s$ (剪摩)或 $K_f$ (纯摩,取各结构面的粘聚力 $c=0$ ).上述块体如果滑移,可能是沿底面的单面滑移( $K_{单}$ )类型,也可能是沿底、侧两个面发生双面滑移( $K_{双}$ )类型.目前是按P·隆德(Picere Londe)等人归纳的八种滑移类型判别来判别,然后按相应的公式计算其稳定安全系数 $K_{单}$ 或 $K_{双}$ <sup>[4]</sup>.这种判别方法的一个前提是:不计任何边界面的抗拉能力.因此本文称这类计算为“不抗拉计算”.

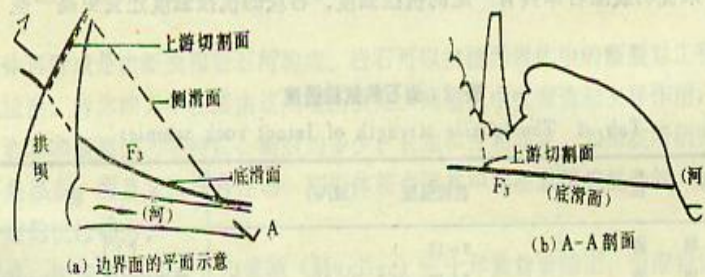


图1 边界面的平、剖面示意图

Fig.1 Schematic plan view and profile showing the sliding boundaries

在分析坝肩稳定的时候,往往要对多个可能的底滑面进行计算,而且要将每个底面分别与不同方向的侧滑面(例如图2中的a、b、c、d等侧面)组合起来进行计算,以便了解有哪些组合不满足规范要求的稳定系数 $[K]$ ,并从中筛选出最低安全系数的“控制性”组合.如果各种组合都已满足 $[K]$ ,坝肩抗滑稳定就是合格的.一般假定计算中采用的上游切割面为拉裂面,底面和侧面有时是具体的断层或大裂隙;但有时侧面只



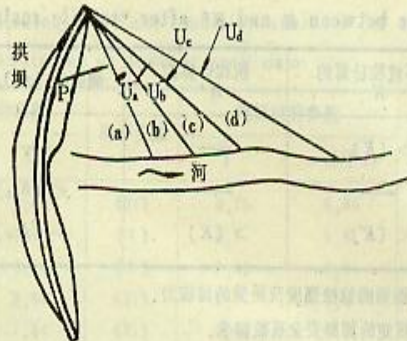


图2 不同方向的侧面及其渗压示意

Fig.2 Side surfaces in different directions and associated seepage pressures

是按一般的中等裂隙组来确定的, 以图2为例, 如果沿侧面(b)方向的裂隙较发育、连通率高, 侧面(b)的抗剪参数就低; 如果沿(d)方向的裂隙不多、连通率低, 在坝肩的岩石比较坚硬的条件下, 侧面(d)的抗剪参数就比较高(比如  $f=0.75-0.85$ ,  $c=0.8-1\text{MPa}$ )。我们认为, 像(d)这样的侧面不但抗剪参数高, 而且还具有不应忽略的抗拉强度  $[\sigma_t]$ 。这个观点无论是按照米勒的、损伤力学的或是弹塑性理论的观点都是成立的。

还是以图2为例, 并假定底滑面为缓倾角弱面, 按照“不抗拉计算”(按隆德的判式), 当底面与侧面(b)组合时, 一般是沿底、侧两个面的双面滑型, 计算后得安全系数  $K_{\text{双}}^b$ ; 当底面与侧面(d)组合时, 往往由于渗压  $U_d$  大、合力  $R$  向河心方向偏转而使(d)面受拉, 因而将被判为沿底面的单面滑型——得到  $K_{\text{单}}^d$ 。如果不按隆德所判的滑型而“强迫”按底面与侧面(d)的双面滑型进行计算, 可得到  $K_{\text{双}}^d$ , 且  $K_{\text{双}}^d > K_{\text{单}}^d$ , 但此时(d)面(取其  $f=0$ ,  $c$  值则仍按规定选用或折减)将产生拉应力  $\sigma_t$ 。如果(d)面的抗拉强度  $[\sigma_t]$  较小, 就会被拉裂而发生单面滑移, 自然应选用  $K_{\text{单}}^d$  而舍弃  $K_{\text{双}}^d$ ; 如果(d)面的  $[\sigma_t]$  较大, 致使  $[\sigma_t]/\sigma_t$  大于或等于规范所规定的剪摩安全系数  $[K_c]$ , 那么(d)面将不会被拉裂, 于是所进行的双面滑移计算成立(当  $K_c \geq [K_c]$  时), 或者说所得的  $K_{\text{双}}^d$  可取, 这时就应舍弃较小的  $K_{\text{单}}^d$  而选用  $K_{\text{双}}^d$ 。以上“强迫”计算  $K_{\text{双}}^d$  的过程(即在“不抗拉计算”之后, 对未发挥抗滑作用的侧面“强迫”进行双面滑移计算)以及通过分析选用  $K_{\text{单}}^d$  或  $K_{\text{双}}^d$  的过程, 我们称之为“抗拉分析”; 对  $K_{\text{单}}^d$ 、 $K_{\text{双}}^d$  则按表4取舍。

提出“抗拉分析”的目的是为了弥补“不抗拉分析”有时造成的过于保守的缺点, 或者说“抗拉分析”的结果会更符合于岩体的实际稳定状况。当然最终是为了合理地减少加固工程从而降低费用。

在拱坝坝肩的抗滑稳定分析中, 不少工程都遇到与(d)面类似的侧“滑”面, 这是因为常常要对多个侧面进行搜寻或筛选计算的缘故。这也是拱坝坝肩抗滑稳定分析的一个特点。因此, 增加“抗拉分析”常常是很有必要的。下面举两个实例。

其一是某双曲拱坝(250m高)坝肩抗滑稳定计算的部分成果, 见表5。



表 4 “抗拉计算”后选用 $K$ 或 $K'$ 的原则Tab. 4 Choice between  $K$  and  $K'$  after “tensile resistance calculation”

计算方法 行号	不抗拉计算的 $K$	抗拉计算的 $K'$	侧面的 $(\sigma_t)/\sigma_t$	选用的安全系数
1	$> [K]$	—	—	不抗拉计算的 $K$
2	—	—	$< [K_c]$	不抗拉计算的 $K$
3	$< [K]$	$> [K]$	$> [K_c]$	抗拉计算的 $K'$

注:  $(\sigma_t)$ 、 $\sigma_t$ —侧面的抗拉强度及所受的拉应力,

$[K_c]$ —规范规定的剪摩安全系数标准,

$[K]$ —规范规定的安全系数,采用 $[K_c]$ 或 $[K_f]$ 按规范执行

表 5 拱坝坝肩抗滑稳定分析实例

Tab. 5 Sliding-resistant stability analysis for the abutments of an arch dam

岸 别	序 号	侧面方位角	抗滑安全系数		滑移类型	侧面抗剪参数		侧面拉应力(MPa)	
			$K_c$	$K_f$		$f$	$C$ (MPa)	计算值	允许值
左 岸	1	SE 140°	5.1	2.7	(23)	0.9	0.9	0	0.31
	2	SE 130°	4.9	2.5	(23)	0.9	1.0	0	0.35
	3	SE 115°	3.6	2.6	(3)	0.9	1.0	0	0.35
	3'	SE 115°	5.1	2.6	(23)	0.9	1.0	0.044	0.35
右 岸	4	NE 20°	3.92	2.0	(31)	0.7	0.75	0	—
	5	NE 30°	3.51	1.8	(31)	0.75	0.85	0	—
	6	NE 40°	3.6	1.76	(31)	0.8	0.95	0	—
	7	NE 50°	2.66	2.13	(3)	0.8	0.95	0	0.33
	7'	NE 50°	4.41	2.18	(31)	0.8	0.95	0.08	0.33

注: 1. 带·的是“抗拉计算”成果, 余为“不抗拉计算”成果,

2. ( ) 中的数字是抗滑面的面号, 3号面是底面, 1、2是侧面(与左右岸有关)。

在左岸, 因 3 号的  $K_c=3.6$ , 已满足规范的  $[K_c]$ , 故按表 4 的第 1 行, 采用 3 号而舍弃 3' 号的  $K_c$ 。在右岸, 如果只做“不抗拉计算”, 可能要造成人为的复杂化: 从 NE20°到 NE50°,  $K_c$  有两个低值, 而且 7 号的  $K_c=2.66 < [K_c]$  (按现行规范应加固); 按“抗拉分析”, 因第 7 和 7' 两行满足表 4 第 3 行, 因而选用“抗拉计算”的第 7' 行结果—— $K_c=4.41 > [K_c]$ 。这样不但不需加固, 而且也正确地揭示了右岸稳定性的变化规律, 通过综合分析, 认为这个结果是合理的。

在拱坝的抗滑稳定分析中, 类似的情况是比较普遍的, 这个问题应该解决, 否则有可能错判最不利的侧面方向及稳定系数, 或者使问题复杂化, 有时甚至导致不必要的工程处理。

另一实例是某 70m 的拱坝, 两岸地下水位较高, 其右岸的部分半整体计算结果见表 6。



表 6 拱坝坝肩抗滑稳定分析实例  
Tab. 6 Sliding-resistant stability analysis for the  
abutment of another arch dam

序 号	侧面方位角	抗滑安全系数		滑移类型	侧面抗剪参数		侧面拉应力(MPa)	
		$K_0$	$K_f$		$f$	$c$ (MPa)	计算值	允许值
1	NW355°	4.23	1.02	《31》	0.75	0.85	0	—
2	NE 5°	1.62	0.98	《3》	0.7	0.8	0	—
3	NE 15°	1.89	1.14	《3》	0.65	0.7	0	—
2'	NE 5°	4.32	0.99	《31》	0.7	0.8	0.033	0.23
3'	NE 15°	4.99	1.24	《31》	0.65	0.7	0.1	0.2

从表 6 看到, 由于 2 和 2' 两行符合表 4 中第 3 行, 因而沿 NE5° 方向的侧面的稳定性满足规范要求 (底滑面是缓倾角夹层)。对底面与 NE15° 的组合, 表 6 的第 3' 行与表 4 的第 2 行一致, 因而只能选用第 3 行的“不抗拉计算”结果, 即  $K_0=1.88$ 。由于采用“抗拉分析”, 最低的安全系数已从第 2 行的恶劣情况转为第 3 行,  $K$  值有所增加, 所需的处理量相应减少。

在选择加固方法时, 第 3' 行的成果提示我们: 如果加强排水以减小侧渗压, 使合力方向向岸里偏转, 那么以 NE15° 为侧面的滑型可改变为侧面受压 (或使  $\sigma_t < 0.05$  MPa) 的双面滑移,  $K_0$  即可满足要求, 这是最合理的处理措施, 它比一般的通过减小渗压以减小下滑力的思路又进了一步。当然, 该工程的基础处理还有其它因素, 此处不再赘述。

刚体极限平衡方法、极射赤平投影方法乃至块体理论, 以往都是不计界面抗拉强度的。增加“抗拉分析”, 可以使刚体极限平衡方法计入侧面的抗拉能力。从这一点看, “抗拉分析”是在原基础上的一点前进, 所得的结果会与实际更好地符合。“抗拉分析”既没有违背刚体极限平衡的原则, 也没有改变这种方法比较简捷的优点, 而且又是在“不抗拉计算”之后才进行的, 也无损于“不抗拉计算”, 它是属于补充性的改进。

### 三、关于侧面的抗拉强度 $[\sigma_t]$

由于长期未重视对  $[\sigma_t]$  的测定和研究, 因而至今没有一个令人满意的方法来确定这项参数。为了进行“抗拉分析”, 下面介绍几个推断侧滑面的抗拉强度的现有方法。

1. 把损伤力学引入有限元, 用岩石的力学强度、裂隙的力学性质及其分布的几何参数等, 采用非线性有限元的方法去预测岩体在某个方向上的抗拉强度\*。
2. 沿某组裂隙法向的岩体抗拉强度  $[\sigma_t]$ :

$$[\sigma_t] = \left(1 - \frac{\sum A_i}{A}\right) S_t \quad (\text{符号同式(1)})$$

3. 岩石的抗拉强度  $S_t$ ;

\* 周维垣、杨岩琼等, 节理岩体的损伤力学模型分析, 二滩电站岩体力学参数研究 (一), 1988.6



$$S_t = 2mc^{(6)} \quad (2)$$

$$m = \sqrt{S_t/S_c} = \sqrt{t} \quad (3)$$

对脆性岩石,

$$S_t = m'c^{(7)} \quad (4)$$

$$m' = \left(f + \frac{1}{f}\right)^{-1}$$

式中:  $c$ —岩石抗剪断粘聚力,

$f$ —岩石摩擦系数,

$S_c$ —岩石的单轴抗压强度.

式(3)中的  $t$  一般为10%—2.5%<sup>[6]</sup>, 裂隙岩体的  $t$  一般比较小. 表7中列了一些完整岩石的  $t$ . 表8中列了一些带有明显结构面的岩样的  $t$ , 这些岩样与裂隙岩体已比较近似了.

表7 岩石的  $t$

Tab.7  $t$ -values of intact rocks

岩 性	$t = \frac{S_t}{S_c}$ (%)
花 岗 岩	2—5.4
石 英 岩	11.6
大 理 岩	22.6
砾 岩	15
砂 岩	5—17
灰 岩	4—10
风化砂岩	4.8—9.7
紫红色粉砂岩	3.8
黄土 (Q <sub>II</sub> 、Q <sub>III</sub> 黄土)	15—23

注: 引自(1)、(2)、[6]

表8 岩样的  $t$

Tab.8  $t$ -values of rock samples with obvious structural planes

岩 性	$t = S_t/S_c$ (%)	
片麻岩 (马尔巴塞须)	9.9—11.7	
砂质页岩	17	
	//层理	⊥层理
石 英 岩	4.6	2.3
大 理 岩	6	3.5
砂 岩	3—6.6	2.5—4.5
云母片岩与石英片岩互层	8.2	0.9
石英云母片岩	16.4	0.95
粘土页岩	1	0.7

注: 引自(1)、(a)

把式(1)与式(2)、(4)归并改写后可得:

$$[\sigma_t] = 2\eta Mc \quad (5)$$

式中  $\eta = \left(1 - \frac{\sum A_i}{A}\right) \left(\frac{\sum A_i}{A} \text{裂隙的面连通率}\right)$

$$M = \sqrt{t} \text{ 或 } M = \frac{1}{2} \left(f + \frac{1}{f}\right)^{-1}$$

符号意义同前.

## 四、结 论

1. 有些裂隙岩体是具有一定抗拉强度的。
2. 在进行拱坝坝肩抗滑稳定分析时, 建议增加“抗拉分析”。现已有相应的程序。
3. 推断岩体抗拉强度的方法尚待大力研究。目前还只能估算, 宜留有余地。
4. 本文建议的方法尚不很成熟, 发表出来作为抛砖引玉, 希望引起大家的讨论。

## 参 考 文 献

- (1) 陶振宇, 《水工建设中岩石力学的国外实例与经验数据》, 水利电力出版社, 1976。
- (2) 殷玉堂、楚华栋, 黄土的抗拉特性, 全国首届工程地质学术会议论文集, 1983。
- (3) 袁继国, 岩石物理力学性质若干规律探讨, 陕西水力发电, (4), 1989。
- (4) 王瑜泰、周维垣, 《拱坝坝肩岩体稳定分析》, 贵州人民出版社, 1983。
- (5) 韩凤禹、汤喆, 抗滑稳定计算中分层面剪力方向的计算公式, 混凝土坝技术, (1), 1989。
- (6) 潘家铮, 完整基岩的抗剪强度及其在围岩稳定分析中的应用, 岩土工程学报, (7) 1984。
- (7) K.G. 斯塔格, O.C. 晋基维茨主编, 《工程实用岩石力学》, 地质出版社, 1978。

## A STUDY ON THE SLIDING-RESISTANT STABILITY ANALYSIS OF ARCH DAM ABUTMENTS CONSIDERING THE TENSILE STRENGTH OF ROCKMASSES

Han Fengyu      Tang Yang

(Northwest China Institute of Exploration and  
Design, Ministry of Energy Resources, Ministry  
of Water Resources, Xian 710001)

### Abstract

The index for assessing the tensile strength of rockmasses in the sliding-resistant stability analysis of arch dam abutments has been described in this paper and the method of applying it to engineering practice has been demonstrated.