

风化岩体工程特性、分带、 利用和改善的探讨

水利电力部成都勘测设计院 唐少甫

水利水电工程勘察中的坝址、坝型选择,枢纽布置;以及坝址选定后的基岩利用标高和相应开挖深度的确定等,都与岩体的风化、卸荷等因素有密切关系。研究风化岩体的工程特性、分带标准,对合理地利用岩体与拟定坝基开挖后的防护或改善措施;避免施工过程中的盲目被动,以加快水电建设步伐,缩短勘察设计周期等,都具有十分重要的意义。其它如边坡稳定性预测,天然建筑石料的质量与有效储量的评价等,也都与岩体的风化程度有直接关系。但十分完善而又未经改善处理的地质条件是非常罕见的,往往都要在工程地质与岩体力学研究的基础上,对一些薄弱地段予以加固改善,甚至改变上部结构藉以适应不良地基的要求。水工建筑物因地基不良而导致失事的实例,“据统计,国外重力坝失事中,有45%是由于基础地质条件所造成”(1)。其中,也包括了地基的不均一性和沉陷变形的影响。作为坝基岩体的工程地质条件研究,则是不容忽视的。而风化岩体的力学特性、防护和改善措施,又是它研究的主要课题之一。本文试就以上问题,作些初步探讨。

一、岩体风化的主要影响因素与工程特性

(一) 矿物成分和组织结构的影响

岩体受风化营力的作用,是一种普遍的物理地质现象。岩石之所以能为化学分解和物理机械作用而破坏,则主要取决于岩石中某些矿物的物理性质和化学成分。由于岩石系各种矿物的集合体,岩石的抗风化能力,则主要视不同矿物的抗风化能力而异(2)。在长期的地质历史进程中,尤以地质构造变动的破坏,使岩石的风化作用加剧,促进岩石解体。

在研究风化作用和划分岩体的风化程度上,次生矿物的形成与演变规律,对掌握岩石的风化程度和分带上具有很重要的意义。

因矿物成分上的差异,在同一环境中的自然营力作用下,所形成岩体的风化程度和厚度也有明显差异。如长江三峡(3)地区的石英闪长岩和黑云母石英闪长岩,后者深于前者。辽宁参窝水库(4)对石英变粒岩的三种不同岩性风化带的研究(表1),亦有类似变化。

表 1 不同岩性风化厚度表

厚度 (米)	岩性	石英变粒岩	云母石英变粒岩	云母绿泥石片岩
全风化		0.2—0.4	0.8—1.0	1.8—2.4
强风化		1.5	2.5—3.0	3.2—4.8
弱风化		2.0—2.3	3.5—4.3	6.0—7.5
微风化		4.0—5.0	8.5	10.0

(二) 构造破裂的影响

岩体受构造破坏后，为水的渗透、冰雪楔入、植物根系的扩展等物理、生物和化学作用提供了条件，加速岩体的风化进程和机械破坏。沿裂隙、断层破碎带等形成的不均一风化带的实例极为普遍，通常为某些深层风化的直接影响因素。故在研究风化带的形态特征方面，先着手于构造破裂规律的研究尤为必要。

据 D. T Currey 报导(5)，节理控制风化作用在维多利亚 Tarago 和 Bellfield 两坝址表现甚为典型。Tarago 坝址为泥岩，在沉积过程中形成的黄铁矿微粒，由于地下水沿节理循环，使黄铁矿氧化，节理面随之被褐铁矿浸染；地下水进一步地渗透，以及季节性的干湿交替等原因，使节理面表层渐次崩解。地下水流往往在两相交节理间积聚，铁的硫化物和其他含铁矿物的氧化物成为活化剂，为形成槽形风化带提供了条件，根据其漂白效应可指示出活动作用情况。在节理面上的粉末状物质，被沉淀的褐铁矿交代，使水能进一步向深处渗透，并使之逐渐扩大和加深，节理面上所沉淀的褐铁矿层可厚达 8 厘米。在 Bellfield 坝址，河谷左半部的砂岩，泥岩交互层中，由节理面控制而形成的强烈风化槽深达 30 米。

我国的许多水电工程，坝区深风化槽的形成规律，都反映了构造破坏起着控制作用。如淮河干流水库(6)坝址区的花岗岩风化槽，主要沿断层或断层交汇处发育(图 1)。类似实例较普遍，不一一举例。

(三) 卸荷松弛的影响

岩体的卸荷松弛，实质上属于物理风化的范畴。绝大部分岩体处于三向受力的高压状态，且因构造变动的影 响，积蓄一部分弹性应变势能，当上复盖层一经侵蚀剥离，岩体则以卸荷回弹开裂的方式释放所积聚的能量，使一些原生或构造的隐蔽裂面扩大，风化作用也随之增强，控制了风化作用的深度。尤以在峡谷深切后，兼受重力作用，这种现象表现得更为突出(表 2)。故河谷急剧下切、地应力较高

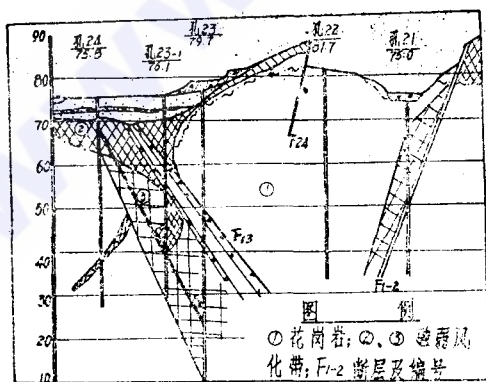


图 1 风化槽与断层的关系(据文献[6])

表2 四川三个水电站卸荷深度

工程	岩性	坡高(米)	自然边坡(度)	卸荷深度(米)
龚咀	花岗岩	100±	30—45	50—60
二滩	正长岩	300—400	40—50	30—80
渔子溪一级	闪长岩	200±	45—75	70—100

地区,在坝基开挖时反映特显。笔者在北京白河青石岭水电站施工地质工作中,目睹坝基开挖时,当上复约17米的冲积层清除后,河床左半部比较完整的片麻状花岗岩在暴露不长的时间后,岩体上部即以近水平略倾向下游的方式突然裂开,响声振耳,厚约25~40厘米;裂开层被清除后,下部又平行开裂,缝宽一厘米左右。当时拟灌浆固结,以弥补其缺陷,但灌入的水泥砂浆四溢,未能奏效。嗣后,略修整成阶状,即浇筑坝块。但该河床右半部,因受 f_4 、 f_2 两断层交切,岩体完整性差,则未出现上述现象,这与断层破坏了岩体的完整性使弹性势能获得释放有关。葛洲坝水利枢纽(7)基坑开挖时,卸除上复岩层仅 $11\text{kg}/\text{cm}^2$,不仅产生垂直卸荷回弹,且水平错动最大达9厘米。尤以残余地应力较大地区,确定坝基利用岩体(特别是比较完整的岩体)和开挖过程中的防护至为重要。

(四) 水的影响

岩体风化蚀变过程中,水是重要因素。岩体风化速度与扩展深度,很大程度上取决于水活动的自由空间。渗透过程中对某些矿物的溶蚀交代,又为风化营力扩大了作用范围。水的浸透,也直接地降低了岩体强度。

据对葛洲坝(8)粘土岩类软弱夹层的研究认为,地下水沿构造破坏的岩层渗透,主要导致岩层胶结物的变化。试验表明,水与夹层接触,可发生一系列的可逆反应——易溶盐和钙镁盐的溶解 \rightleftharpoons 沉淀(重结晶),阳离子交换反应,高铁 \rightleftharpoons 高铁氧化还原反应,以及溶胶 \rightleftharpoons 凝胶反应等。尤以起胶结作用的钙镁碳酸盐和游离的无定形 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 的变化相对明显。因地下水的溶解作用,各种夹层部位的 CaCO_3 含量都比相邻上下层位的要低。起胶结作用的钙镁碳酸盐含量降低,削弱了岩石结构的物理化学联结,导致强度和水稳性降低。参窝水库(4)混合岩类的化学成分(表3)自全风化至弱风化,其钙镁依次增大;而 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等则趋于减少。

表3 混合岩不同风化带的化学成分

含量 % 化学成分	风化带			
	全	强	弱	微
CaO 、 MgO	2.72	3.79	5.29	5.3
SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 酸不溶残渣	69.59	96.32	92.33	90.13

诚然，水对岩体的物理化学风化作用是一个漫长的历史过程。但水工建筑物建成后，有压水流的渗透对岩体所产生的冲刷，侵蚀和劈裂更成为直接的破坏因素。干湿交替对粘土岩类的强度降低特别明显，风化崩解极快。淇河盘石头水库紫红色页岩干抗压强度可达847公斤/厘米²，浸水后再风干则很快崩解，强度损失殆尽。类似这种岩体，在坝基开挖过程中的防护将成为首要问题。

二、风化岩体的力学特性

岩体的力学特性，是研究风化岩体质量和风化分带的定量依据；也是评价坝基岩体利用和开挖清基的主要标准之一。岩体本身由于形成过程中的种种缺陷——矿物的定向排列，结晶的不均一性和晶体颗粒边界的裂痕，岩浆分异以及某些岩体的层状、片状构造等；尤以后期的构造破坏，风化卸荷等使得岩体在大多数情况下呈现出各向异性的不连续介质的特征。然而，在较完整，新鲜的岩石，其力学特征了解颇详；对于不同风化程度的岩石，尤其是结合岩石内部缺陷的力学特性的研究还很不够。

(一) 岩石和岩体的抗压强度

岩石的抗压强度，在目前是进行岩石质量评价的基础，也是风化分带的主要指标之一。笔者搜集国内逾千组试验成果予以分类统计，但归纳结果相当分散。离散度大的原因初步归结为：

1. 岩石风化程度的标准划分不一；
2. 标本选择的代表性差，标本定向与不均一性注意不够；
3. 岩石结构特性掌握不详——晶粒缺陷、微破裂状况；某些沉积岩的胶结物成分与其胶结类型伴随研究不够；
4. 饱和程度的控制标准；
5. 加荷速率与尺寸效应；
6. 制样的影响。

关于风化带划分标准不一是众所周知的，同一带称的风化带在不同工程，其抗压强度几乎差一个量级。岩石结构对抗压强度的影响亦很明显（表4），如以细粒花岗岩为1，则中细粒和粗粒花岗岩渐次降低为0.86、0.76。

表4 东江坝址实测花岗岩抗压强度

岩 性	饱和抗压强度 (公斤/厘米 ²)	
	平 均 值	小 值
细粒花岗岩	2085	1977
中细粒花岗岩	1786	1508
粗粒斑状花岗岩	1584	1119
微风化中细粒斑状花岗岩	1340	1034

岩石微破裂 (<1mm级) 密度, 对抗压强度的影响尤为明显⁽⁹⁾, Dixon 提出: 微破裂密度增高, 抗压强度随之降低。微破裂的成因与盖层剥蚀, 卸荷、长石受风化后的膨胀等因素有关。从工程观点看, 微破裂的影响尤应注意, 马尔帕塞 (Malpasset) 坝的溃决, 表明坝基稠密的微细破裂至关重要。

其它如岩石饱水程度, 尺寸效应等的影响可见诸于不少文献。单纯从试验成果分析而忽视地质基础, 是不可能得到满意的结果的。

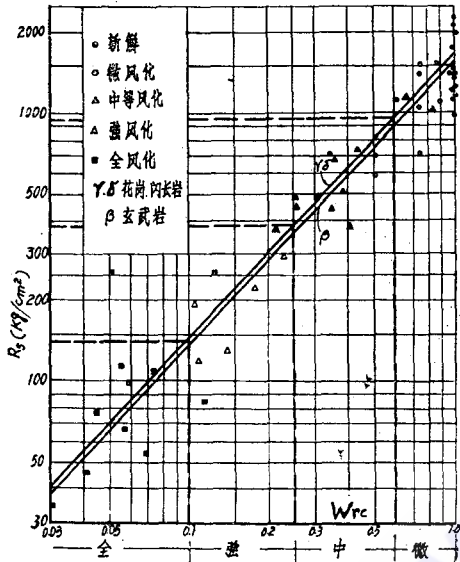


图2 岩石抗压强度随风化程度折减关系图

就花岗岩类岩石而言, 有的弱风化强度远比其它的微风化强度还高。尽管目前在划分风化带上可能有它的相对性, 但从岩体力学和工程实用的角度来观察和评价岩体的利用上则缺乏一致的标准。

笔者试图从岩石风化后不同风化带抗压强度的折减规律, 将花岗岩、闪长岩和玄武岩的饱和抗压强度 (R_s) 和其风化折减系数 (Wrc 为风化岩石饱和抗压强度 R_{sw} 与新鲜岩石饱和抗压强度 R_{sf} 之比值) 整理如图 2, 初步得出如下结果:

- 微风化岩石 $Wrc \geq 0.6$
- 中等风化岩石* $Wrc = 0.6 \sim 0.25$
- 强风化岩石 $Wrc = 0.25 \sim 0.1$
- 全风化岩石** $Wrc < 0.1$ 。

根据二滩坝址各平硐间的穿透 (岩体) 波速测定结果⁽¹⁰⁾与岩体完整性系数列于表 5。

表 5、 岩体完整性系数与波速关系表

完整性系数与纵波速度 风化带	正长岩		正长岩和部分蚀度玄武岩	
	V_p 米/秒	K_p	V_p 米/秒	K_p
新鲜	5500	0.84	5600	0.87
微风化	5250	0.77	5010	0.70
中(等)风化	4900	0.67	4470	0.56
强风化	4450	0.55	3280	0.30

* 参见三岩体风化分节

** 指石质核心部分

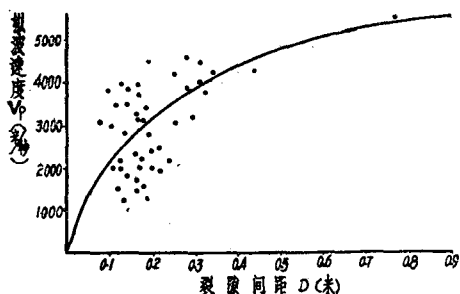


图3 纵波速度与裂隙间距对应关系

按各平硐硐壁测定的连续波速与笔者从硐壁裂隙估测平均间距的对应关系绘于图3。从图3可以看出：裂隙愈密，测点分散愈大，纵波速度受硐壁岩体松弛程度、裂隙张开度与充填情况，含水程度等的影响较大；当裂隙间距大于0.8米时，上述影响对纵波速度渐趋减小。但其减小程度与裂隙疏密有关。从以上结果，将岩体完整性系数（ K_p ）、裂隙间距（ D ）归纳如表6。

表6 岩体完整性系数与裂隙间距

完整性系数 (K_p)	岩体的完整状况	裂隙间距 D (条/米)
$K_p \geq 0.75$	较完整岩体	> 0.6
$0.75 > K_p \geq 0.65$	不够完整岩体	0.4—0.6
$0.65 > K_p \geq 0.4$	不完整岩体	0.2—0.4
$K_p < 0.4$	很不完整岩体	< 0.2

统计裂隙的平均间隔，如能将裂隙张开程度、填充物厚度与其性状，反复测试会得到更有意义的结果。

风化岩体的抗压强度，笔者建议按下式表征：

$$R_m = W_{rc} \cdot K_p \cdot R_{sf}$$

式中：

W_{rc} ——岩体抗压强度的风化折减系数；

K_p ——岩体完整性系数 ($= V_p / V_p$ 。 V_p —岩体纵波速度 米/秒； V_p —岩石纵波速度 米/秒)；

R_{sf} ——新鲜岩石饱和抗压强度公斤/厘米²。

(二) 风化岩体的变形特征

各风化带的变形特征，充分利用有限的静力法试验成果和大范围动力测试相结合的研究，会收到事半功倍的效果。从已有动力法测试的弹性模量 (E_d) 统计，尽管在岩性上不同和岩体各向异性的影响，其风化后的弹性模量折减系数 ($W_{ec} = \text{各风化带岩体的动力弹性模量 } E_d / \text{新鲜完整岩体的动力弹性模量 } E_{df}$)，反映了如下规律：

微风化岩体动力弹模折减系数 $W_{ec} \geq 0.5$

中等风化岩体动力弹模折减系数 $W_{ec} = 0.3—0.5$

强风化岩体动力弹模折减系数 $W_{ec} = 0.07—0.3$

全风化岩体动力弹模折减系数 $W_{ec} < 0.07$

图4为笔者据二滩坝址*正长岩的部分静弹模(Ez)整理结果,与上述规律亦相当吻合。从变形特性曲线看,大体可分如下三种类型(图5):

1. 直线型:又可分两种亚型。一为图5-a所示,直线不通过原点,低应力时变形几无法察觉,似乎岩体残余应力起一定作用。当应力增大到足以抵消残余应力时,变形始突然出现。这是一般在新鲜、完整、裂隙少而闭合情况下的应力变形特性;另一种是直线通过原点,变形较大(应力100公斤/厘米²时,全变形大于0.07厘米),一般是比较均匀的强风化和裂隙发育的近似均质的岩体的变形特征。

2. S型(塑-弹-塑型): (图5-b)反映在强风化或断层破碎带的不均一岩体;或者属中等风化邻近裂隙密集带的岩体。

3. 凹型(塑-弹型): (图5-c)为风化卸荷带或裂隙充填软层岩体的变形特征。由于岩体变形特征除风化因素外,很大程度上取决于邻近试点的裂隙性状、开挖时的人为表层卸荷等的影响。分析变形性质必须结合试点与其邻近的详细地质描述和试点处的开挖,试件加工条件等进行判断。

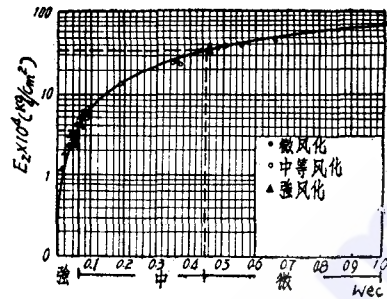


图4 各风化带静弹模(Ez)折减关系图

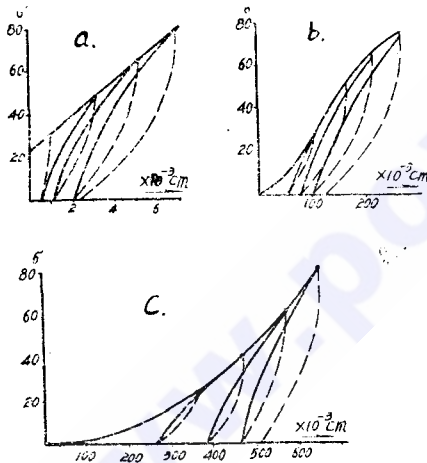


图5 岩体应力-变形曲线

式中: τ ——峰值抗剪强度;
 σ_n ——有效正应力。

上式中裂隙面抗压强度(JCS),在新鲜完整岩石中等于新鲜岩石的无侧限抗压强度;随岩体风化程度的加剧,裂面抗压强度亦随之降低,抗剪强度相应减小。当裂隙面抗压强度低于50公斤/厘米²时,裂隙面的起伏差不再起控制作用。

据富春江水电站(12)坝基火山岩不同风化带抗剪强度实测成果表(7)可以看出,微风化抗

(三) 风化岩体的抗剪强度

岩体受风化作用,首先反映在裂隙面受风化蚀变的影响;地下水渗透加强并伴随裂面软化和次生充填的软弱物质形成,原有裂面粗糙起伏的不平整部分易于剪断,因此,抗剪强度降低最为突出。

N. Barton等(11)研究了八种类型的岩石,经100余组裂隙岩石标本的试验,建立了下述三项指标为基础的经验方程:

- 1、裂隙面粗糙系数(JRC);
- 2、裂隙面抗压强度(JCS);
- 3、基本摩擦角(ϕ_b)·(即平整光滑面的摩擦角)经验关系式:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right]$$

* 引用成都院科研所二滩岩体试验报告

表7 流纹班岩、凝灰岩与凝灰角砾岩抗剪强度

试验条件	抗剪断强度				抗剪强度			
	f		C(公斤/厘米 ²)		f		C(公斤/厘米 ²)	
	破坏强度	比例极限	破坏强度	比例极限	破坏强度	比例极限	破坏强度	比例极限
微风化岩体	1.58		5.6		1.17	0.78	2.30	1.2
弱风化岩体	0.85	0.81	11.5	2.1	0.71	0.63	6.30	1.6
强、弱风化混杂岩体	0.68		7.9		0.55		6.30	
强风化岩体	0.64	0.61	8.3	3.3	0.56	0.50	6.60	2.5
强风化岩体下限	0.31	0.31	3.6		0.31	0.30	3.70	

剪强度的破坏极限与新鲜岩体相近，弱风化岩体则明显降低，约为微风化岩体的60%；强风化岩体约只占微风化的26%，而强风化岩体抗剪断强度与抗剪强度几乎相等，说明岩体风化程度增强，裂隙面的粗糙部分则不起多大作用。

三、岩体风化分带

岩体由于所处地形条件，埋藏深度的差异，在接受风化营力的作用上有强有弱，总的表现在垂直剖面上由强到弱而至新鲜的分带规律。为工程目的的岩体风化分带，不仅是工程地质勘察工作者现场划分风化带的一般标准，也是认识和反映岩体风化规律，利用和改善不良岩体的参考依据。分带要求：

- a. 较为统一的地质描述；
- b. 具有判定风化程度的定量指标；
- c. 包含一定工程内容的应用标准。

但分带也应考虑习惯用法而又应注意：

- (一) 能反映各带间明显差异与公认的分带顺序；
- (二) 分带命名明确，不能含混不清；
- (三) 突出重点，不过于复杂。

考虑以上三点，对于块状岩笔者建议如表8：

微风化与弱风化在实际应用中易给其它专业人员以含混不清的感觉，故将“弱”改称为“中等风化”。

表9采用术语说明如下：

1. 新鲜——岩石无明显风化痕迹，原生或构造裂隙面很少或没有变色；
2. 变色——岩石原生色（包括继承色或同生色）受风化作用（氧化、还原、水化、脱水等）形成次生矿物的颜色，以及黑云母褪色、其它矿物漂白等；

表8 岩体风化分带与判别因素

分带、(代号)	图 示	色 泽	浸 染	矿 物 蚀 变	组 构 变 化	岩 体 纵 波 速 度 V_p (米/秒)	岩 体 强 度 指 标	岩 心 获 得 率 %	锤 击 声 与 其 它
风化残积带 (VI)		全部变色 土状光泽	分解的碎屑呈弥漫性浸染	石英碎裂并浑圆化、其它全部蚀变	全部分解	<1000	类似松散土强度		土
剧风化带 (V)		全部变色、仅石质核心可见 原岩光泽	弥漫性浸染	除石英外,大部蚀变	外观尚保持原岩特征,遇水解体崩解	<2000	$R_m \leq 0.1 \cdot K_p \cdot R_{sdf}$ $E_d \leq 0.07 \cdot E_{df}$ $f \leq 0.35$	<40%	土
强风化带 (IV)		大部变色、岩块断口新鲜	大部弥漫性浸染	除部分岩块外,大部蚀变	砌石状,结构松散	2000 3500	$R_m \leq 0.25 \cdot K_p \cdot R_{af}$ $E_d \leq 0.07 \cdot 0.3 \cdot E_{df}$ $f \leq 0.5$	40% 60%	哑
中等风化带 (III)		裂面或岩块表面大部变色	裂面大部弥漫性浸染,岩块流痕网状浸染	裂面大部蚀变,厚可达1~10厘米,长石裂纹,黑云母褪色	结晶连结构弱,大部结构无变化	3000 4500	$R_m \leq 0.6 \cdot K_p \cdot R_{sf}$ $E_d \leq 0.3 \cdot 0.5 \cdot E_{df}$ $f \leq 0.65$	60% 80%	油
微风化带 (II)		仅裂面部分变色、岩块新鲜	裂面局部浸染,或流痕网状浸染	裂面蚀变厚小于0.5厘米	基本无变化	3500 5000	$R_m \geq 0.6 \cdot K_p \cdot R_{sf}$ $E_d \geq 0.5 \cdot E_{df}$ $f \leq 0.75$	>80%	脆
新鲜带 (I)		新鲜、裂面偶见轻微变色	偶见裂面斑点状浸染	未蚀变	无变化	4500 6000	$R_m = K_p \cdot R_{sf}$ $E_d \geq 40 \text{ 万 kg/cm}^2$ $f \geq 0.75$	>90%	清脆

注: E_{df} —新鲜岩石动力强度 f —摩擦系数

3. 浸染——次生氧化物（常见铁、锰氧化物）沉淀于裂隙或岩块表面；或含铁矿物风化后呈锈般状敷于岩石表面；
4. 蚀变——原生矿物经风化后形成次生矿物，如橄榄石→蛇纹石→伊丁石，长石→高岭石；斜长石→绢云母等；
5. 分解——主要指矿物被风化后蜕解解体呈土状，部分外观可保持原结构状态；
6. 崩解——岩石迁水后瓦解溃散。

四、风化岩体的利用和改善

（一）基岩利用标准

基岩利用标准，应视水工建筑型式、规模以及适应变形范围和可能处理方法的经济合理性等而定。

1. 对混凝土坝而言

(1) 坝基岩体具有足够强度和均一性，完整性亦较好。水库满载运行的情况下，坝基岩体的

表 9 国内部分工程基岩利用标准

工程名称	坝高 (米)	坝 型	岩 性	坝基利用基岩的风化程度		
				左 肩	右 肩	河 床
长 湖	52	宽缝重力坝	千 枚 岩	强风化		弱 风 化
佛 子 岭	54	连 拱 坝	石英岩、石英板岩			新鲜~轻风化
欧 阳 海	58	双曲拱坝	花 岗 岩			新 鲜
陈 村	73	重力拱坝	花 岗 岩	轻、微风化		微~新鲜
流 溪 河	78	拱 坝	花 岗 岩	坝高5~20米坝高1~5米 半风化		微 风 化
泉 水	80	双曲薄拱坝	中粗粒斑状花岗岩	弱风化		微 风 化
梅 山	88	连 拱 坝	花 岗 岩	轻、微风化		微~新鲜
枫 树 坝	95	宽缝重力坝	安 山 玢 岩	弱、强风化		微 风 化
拓 溪	104	大 头 坝	变质砂岩、板岩	坝高25-30米坝高10-25米 新鲜		新 鲜
新 丰 江	105	大 头 坝	花 岗 岩	微风化		新 鲜
新 安 江	105	宽缝重力坝	砂 岩			新鲜完整
风 滩	112.5	拱 坝	石英、长石砂岩			弱风化下限
安 康	115	重 力 坝	千 枚 岩			弱风化上部
白 山	150	重力拱坝	混 合 岩	半风化		微 风 化

变形不应大到足以危害其安全运行的程度。尤以不均沉陷所产生的不良影响。

(2) 坝基岩体透水性低, 不致产生化学、机械潜蚀和软化, 崩解。

(3) 处理后的岩体经充分论证可以满足上部建筑物的要求。

2. 在开挖和利用风化岩体上应考虑:

(1) 确定利用岩体的控制性指标: 如 R_m 、 E (E_o 或 E_d)、 f 、 C 、 ω (或 $K\phi$)、 V_p 等。划分出: ①直接 (或略经处理) 可以利用; ②经固结灌浆可以利用; ③经复杂处理 (锚固、换填、抗滑桩等) 可以利用; ④必须挖除 (处理不可能或无把握)。

(2) 不致因开挖卸荷开裂、崩解而增加隐患。或破坏坝肩地形 (尤以拱坝坝肩), 影响坝肩与斜坡稳定。

(3) 易风化岩体防护的可能性。

(4) 开挖回填与少挖处理 (包括改善上部结构的可行性与经济合理性的比较)。

过于笼统地规定“利用新鲜基岩”是不全面的。

3. 基岩利用工程示例

表10 混凝土坝开挖与浇筑量比较表

坝名	国家	坝高 (米)	坝型	岩性	坝基开挖量 (万 m^3)	混凝土浇筑量 (万 m^3)	开挖/浇筑
泉水	中	80	拱坝	花岗岩	4.1	6.0	0.68
石门	中	88	拱坝	云母石英片岩、石英岩	11.43	20.03	0.57
新安江	中	105	宽缝重力坝	砂岩、石英砂岩	69.41	138.0	0.50
凤滩	中	112.5	空腹重力坝	花岗岩	53.0	113.0	0.47
白山	中	105	重力拱坝	混合岩	57.3	168.0	0.34
乌江渡	中	160	拱形重力坝	石灰岩	126.3	192.0	0.66
英古里	苏	271.5	拱坝	石灰岩白云岩	254.0	410.0	0.60
契尔克	苏	236	双曲拱坝	石灰岩	136.0	132.0	1.03
格兰峡	美	216.4	重力拱坝	砂岩	100.0	374.0	0.26
巴勒提诺	罗马尼亚	108	拱坝	砂岩、片麻岩	25.0	28.0	0.89
戈登	澳	140.2	拱坝	干枚岩	14.3	15.3	0.93

从国内部份已建或在建的水电工程看 (表9), 基岩利用标准与坝高、坝型似乎有一定关系, 但也不全部相同。总的随着岩体力学研究的逐步完善, 工程处理措施的改进, 勘测设计水平的提高, 将会更进一步发挥岩体强度的潜力, 充分利用不良岩体。从国内外部分混凝土坝坝基开挖方量与混凝土浇筑量比较 (表10) 似乎接近, 总的趋势与坝型有关。诚然, 开挖量

表11

岩体工程地质特性表

工程特性	新 (I)	微风化 (II)	中等风化 (III)	强风化 (IV)	剧风化 (V)	风化残积土 (VI)
纵波速度 V_p (米/秒)	4500~6000	3500~5500	3000~4500	2000~3500	<2000	≤ 500
完整性系数 K_p	≥ 0.75	0.65~0.75	0.40~0.65	<0.4		
力学介质	连续	连续或不连续	不连续	不连续	似连续	
抗压强度 R_m (公斤/厘米 ²)	≥ 1000	≥ 600	≥ 400	≥ 50	≤ 50	
动弹性模量 $E_d 10^4$ (公斤/厘米 ²)	≥ 40	≥ 18	≥ 8	≥ 2	<2	
抗剪强度	≥ 0.75	≤ 0.75	≤ 0.65	≤ 0.5	≤ 0.35	≤ 0.2
基础条件	≥ 10	2~10	0.5~2.0			
边坡设计	适于混凝土坝或其它坝型 1:0.1~1:0.25 1:0.25~1:0.35		适于中、低混凝土坝 1:0.25~1:0.5	适于土坝 1:1	一般不宜建坝 1:1.25	1:1.5
隧洞衬砌参数	f_k	8~12	6~8	3~6	<0.5	
	k_0 (公斤/厘米 ³)	1000~1400	800~1000	300~800	<40	
施工支护	一般不必支护		木排架或轻型钢排架	钢排架(间距0.6~1米)	密集重型钢排架	
开挖方式	爆破或掘进机			爆破与撬挖	不需爆破	
渗透性	ω (升/分米)	<0.01	<0.03	0.1~0.01		
	K_ϕ (厘米/秒)			10^{-3}		$10^{-3} \sim 10^{-6}$

注: (1)不适于贯穿性顺坡裂隙; (2)坡高于8~15米应留马道; (3)(IV~VI)应预防护坡面冲刷。

不一定全系风化而不可利用的岩体,有的还包括结构要求与其它因素,故表10可供一般参考。过多依靠开挖不仅影响施工工期,同时又可能破坏岩体的完整性,增加填筑方量。在初设研究阶段参考表11基岩利用的各项内容。技施阶段,基岩的利用与开挖、改善应按以下三项内容认真进行比较决定:

- (1) 岩体工程特性: 主要反映在岩体完整性,均一性与岩石强度的控制性指标;
- (2) 上部结构对基础岩体的制约条件: 坝体与坝基的应力状况、渗透控制、安全系数;
- (3) 坝基不良岩体改善的可行性与经济合理性的比较。

上述三条是影响开挖深度的函数,只有勘测、设计、基础处理等各方共同研讨,才能较为全面合理地确定开挖或利用岩体标准,不能一概而论。

(二) 岩体的改善与防护

不良岩体的改善与防护是水工建筑物工程地质勘测的重要工作内容,它关系到施工能否顺利进行与工程建成后的正常运行等问题。无论何种坝型,不经任何处理的岩体是极少的,对混凝土坝而言更为重要。目前应用广泛而行之有效的为固结灌浆,实践上可收到如下效果:

- (1) 提高岩体完整性、均一性,减少坝基开挖方量

例如广东省几个水电工程(表12),每个坝址的坝基都有一岸的坝块置于弱风化岩体上,采取固结灌浆后,提高了基础岩体强度,并减少开挖,对加快电站建设起到积极的作用。

表12 广东省四个工程坝基岩体灌浆处理情况

工程	坝块数	加固范围	加固原因	灌浆孔深(米)
流溪河	21	左岸1~4坝块	弱风化缓倾角风化夹层,厚2~8厘米	5~10
新丰江	19	右岸14~18坝块	弱风化缓倾角裂隙风化带,强透水 ($\omega=0.03\sim0.09$)	11~25
泉水	11	右岸1~3坝块	卸荷张开,透水性强	20~30
谭岭	13	左岸8~9坝块	弱风化及平缓裂隙	5~15

- (2) 提高岩体强度

采用固结灌浆措施提高岩体强度,国内外不少文献均有报导。尤以风化岩体经固结灌浆后弹性模量提高(表13),均一性也有改善。石门拱坝原设计时,石英片岩E垂直/E水平为1:1.7;灌后二者比值实测为1:1.16~1:1.21,接近所设想的各向同性。由此可见,风化岩体采用固结灌浆亦能收到较好的效果。

表13 石门坝址灌浆前后动弹模变化表

测试点 数与计 算结果	强 风 化			弱 风 化	
	固 结 前 E 水平 (公斤/厘米 ²)	固 结 后		固 结 前 E 水平 (公斤/厘米 ²)	固 结 后 E 垂直 (公斤/厘米 ²)
		E 水平 (公斤/厘米 ²)	E 垂直 (公斤/厘米 ²)		
点数	8	8	9	4	4
平均	7.3万	17.1万	10.5万	21.1万	24.4
离差	28.8%	24.1%	26.7%	32.2%	22.9%

注：固结灌浆岩石为云母石英片岩、石英岩。

易风化岩体开挖时的防护，是保持岩体固有强度的主要措施。防护方法有预留保护层、喷混凝土、砂浆或沥青、堆砂压土和防止开挖面干湿交替的不良环境等（表14）。更积极的措施还在于选定合理的开挖程序，防止长期裸露，合理确定爆破孔深与炸药量，以及采取诸如予裂、防震等措施。

表14 易风化岩体防护方法

工 程	坝高 (米)	坝 型	岩 性 与 防 护 措 施
康特拉 (瑞士)	230	双曲拱坝	片麻岩，风化层厚，动弹性模量平行片理15~32万公斤/厘米 ² ；垂直片理8~15万公斤/厘米 ² 。岸坡挖深10~15米（右岸30米）。拱座预留保护层0.5米，待浇混凝土时再用风镐撬挖清除。
莫西罗克 (美)	184	拱 坝	防止玄武岩迁空气风化预留0.61米，浇筑混凝土前24小时清除，然后铺一层水泥浆，并进行固结灌浆。
具雅诺 (巴拿马)	74	重力坝	软石灰岩、砂砾岩、粉砂岩和凝灰岩等，迁空气很快风化，喷薄层混凝土防护。
加提路赫 (印尼)	100	心墙堆石坝	粘土岩砂岩互层易崩解，铺湿粘土，人工夯实。

五、结 语

实践证明，利用并改善一部分风化岩体作为坝基利用基岩面是可行的。这对加快水电建设步伐、缩短建设周期，降低工程造价都具有很重要的意义。随着岩体力学研究进一步深化和测试手段更趋完善，预期在工程地质条件研究的基础上，为充分挖掘基岩潜力，发挥岩体固有强度可以开拓更加广阔的前景。

风化岩体的工程特性与分带的研究,是由定性地质描述,走向定量评价工程地质条件的重要环节。本文所探索的块状岩体强度指标的折减规律,由于掌握的基本资料 and 水平所限,以及风化岩体的复杂性,在使用上会有一定的局限性,目的在于促进这方面的研究,起个“抛砖引玉”的作用,希工程地质工作能向前迈进一步。

主要参考文献

- 1、陶振宇:《水工建设中岩石力学的国外应用实例与经验数据》水利电力出版社 1975
- 2、R·D Lama 等《Handbook mechanical properties of Rock》vol IV P270 1978
- 3、长江流域规划办公室:《某结晶岩区风化壳工程地质条件研究与体会》1978
- 4、吴耀权:《对参窝水库利用弱风化岩基筑坝的研究与实践》1980.5
- 5、D·T Currey《Deely Weathered Rock at Victorian Damsites》Eng Geol Vol 11 No.4 P314 1977
- 6、河南省水电勘测设计院:《信阳淮河干流水库坝基花岗岩深风化槽及其工程地质特征》1978
- 7、程开庠:《葛洲坝水电工程二江基坑垂直变形观测》《人民长江》1980.6
- 8、长江水利水电科学研究所:《基岩软弱夹层泥化问题的物理化学探讨》《科研成果选篇》第四期 1978.11
- 9、W·R Dearman等:《Engineering Grading of Weathered Granite》Eng Geol Vol 12 No.4 P340 1978
- 10、水利电力部成都勘测设计院物探队:《水电工程岩体弹性波试验》1980.3
- 11、N Barton & V Choubey:《The shear strength of rock joint in theory and Practice》Rock mech P1-P54 1977.10
- 12余朝庄:《富春江水电站火山岩坝基缓倾角裂隙工程地质研究》《水文地质工程地质》1979.4
- 13、水利电力部第三工程局技术组:《用地震波—声波法测定石门拱坝岩体固结灌浆效果》1976.10