

试论岩体三维地应力状态

陶 振 宇

(武汉水利电力学院)

提 要

本文根据金川矿区、二滩水电站的实测地应力成果,分析了上述两工程的三维地应力状态,提出以下初步认识:

- 1、工程建设场地的原岩应力状态,直接关系到工程建设的安全和经济问题,尤应注意较系统的研究工作;
- 2、不应单纯将原岩应力场,看作一个初始应力值作为计算之用,而应进一步把这种应力场与岩体特性结合起来研究;
- 3、利用一定的岩石模型理论,可以计算其相应的原岩强度,如以二滩为例的计算结果经进一步验论,将是探索原岩强度的一种新途径。

工程建设中,尤以大型水利水电建设、矿山建设等,都需要了解所处场地的地应力状态。一般地说,地应力(岩体初始应力)是三维的,如果用主应力系统来表示,通常的情况有: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$; $\sigma_1 > \sigma_2 \approx \sigma_3$; $\sigma_1 \approx \sigma_2 > \sigma_3$ 和 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 等几种。这里 σ_1 , σ_2 和 σ_3 ,分别表示最大、中间和最小主应力,一般取压应力为正。

工程建设之前岩体内的天然应力场,对其力学行为有重要的影响,我们曾以二滩工程为例,作过一些初步探讨〔1〕。事实上,天然岩体在经历漫长的地质构造运动的过程中,产生变形、褶皱、断裂等情况,现存的三维地应力场,是一种复杂的应力途径所造成的结果,是地质历史的产物,并决定其所能承受的荷载作用和卸荷作用的行为以及岩体的变形和强度特性。因此,我们推想,也许可以借助于岩石的屈服模型来探讨具有三维地应力的岩体力学性状〔2〕。

但是,过去由于实测资料不多,特别是空间应力实测资料甚少,因而没有人对工程场地处在什么样的应力状态进行研究;而一个具体工程即使取得一点或几点实测资料,由于测点太少,无法作进一步的分析和研究;对工程场地的初始应力状态没有一个明确的概念,因而无法或难于加以充分利用。目前最通常的办法,是以少量的实测数据作为校核,而借助于有限元法以形成一个等效的初始应力场,以作工程设计计算的依据。笔者尝试对金川矿区和二滩水电站作一些初步探讨,以供参考。

一、金川矿区的三维地应力状态

金川矿区位于甘肃西部龙首山东南段北坡,与潮水盆地相毗连,处于活动性构造体系阿拉善弧形构造边缘主旋褶带与祁吕——贺兰山字型西翼,陇西系外围部分的斜接复合部位。矿区的地层有前震旦系及第四系,前震旦系主要为混合岩、大理岩、片岩及片

麻岩等, 岩层走向北西或北西西, 多向南西倾斜, 倾角一般在 45° 度以上。侵入岩有含矿超基性岩、肉红色花岗岩及各种脉岩。含矿超基性岩侵入前震旦系, 产状与围岩大体一致, 被一组近东西向扭断裂平错为几段。矿区的断裂 F_1 、 F_{10} 等为挤压性断裂, 走向北西西, 其中 F_1 分布在龙首山和潮水盆地的交界地带, 是矿区最大的断裂。整个矿区, 断

表 1 金川矿区原岩应力实测结果

序号	岩石	测点位置	测点深度 (米)	主应力(公斤/厘米 ²)			p 公斤/厘米 ²	q 公斤/厘米 ²	$\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3$	附注
				σ_1	σ_2	σ_3				
1	大理岩	龙首矿1580中段14行穿脉巷道测点	120	168	121	58	115.7	95.6	1:0.72:0.35	
2	大理岩	二矿东副井1300中段测点	460	500	334	282	372	197.2	1:0.67:0.56	
3	富矿体	龙首矿1460中段12行穿脉测点	240	344	211	26	193.7	276.6	1:0.61:0.08	
4	特富矿体	二矿1250中段38.5行沿脉巷道测点	480	320	214	206	246.2	110.2	1:0.67:0.64	
5	富矿体	二矿1250中段38行测点	480	341	114	31	162	278	1:0.33:0.09	
6	富矿体	二矿1250中段	480	275	155	40	156.7	203.5	1:0.56:0.15	
7	贫矿体	二矿1250中段19行穿脉巷道测点		192.21	129.71	114.04	145.3	71.7	1:0.67:0.59	贫富矿体交接处
8	大理岩	二矿1250中段44行巷道测点		181.0	156.0	142.19	159.7	34.1	1:0.86:0.79	
9	花岗岩	二矿西主井1250中段测点	480	245	154	130.0*	176.3	105.1	1:0.63:0.53	
10	大理岩	二矿1200水平11行穿脉巷道	500	333.5	211	207.5	250.7	124.3	1:0.63:0.62	
11	大理岩	二矿区东主井1350中段测点	375	198	108	75.0*	127	105.3	1:0.55:0.38	
12	大理岩	二矿区东部18公里处地表46行	20	24	23	5.4*	17.5	18.1	1:0.96:0.23	
13	大理岩	同上	44	42	35	12.0*	29.7	27.2	1:0.83:0.29	
14	花岗岩	青山堡测点	14.7	29	22	4.0*	18.3	22.3	1:0.76:0.14	矿区外围
15	花岗岩	平口峡测点	37.0	84	30	10.0*	41.3	66.3	1:0.36:0.12	矿区外围

*原资料无 σ_3 , 这是按 γH ($\gamma=2.7$ 吨/米³)的计算值补上的。

裂、节理及层间错动等发育。其中，北西西、东西及北北西方向的断裂都程度不同的受过挤压，破碎带一般较宽，破碎的岩石多未胶结。这些地质因素对矿区巷道的稳定性影响颇大。

为了解决巷道变形和矿山开采设计有关的问题，从1973年开始至1980年止，冶金工业部长沙矿冶研究所等单位先后在金川矿区进行原岩地应力测量，取得较多的实测数据（表1）〔3-7〕，为我们分析金川矿区岩体力学性状，提供了宝贵的第一性资料。

从表1中可以看出：

1. 矿区是以水平应力为主导，并且都是压应力，这一点与矿区巷道的变形破坏调查结果是一致的。例如，二矿区西副井1150中段的双轨巷道位于F₁断层影响带中，围岩为黑云母片麻岩和石墨片岩。北京钢铁学院等单位曾用机械式多点位移计对巷道位移进行了观测，结果如图1所示〔3〕，可见水平位移远大于垂直位移。



图1 多点位移计实测位移 (1979年8月14日-18日埋点 安装至1979年11月3日止)

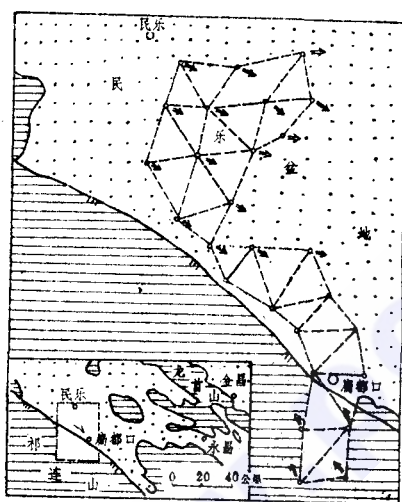


图2 扁都口地形变位移测量结果

2. 实测范围内的地应力值随深度增加而增大，且水平应力远大于垂直应力，正是高地应力区的一个基本特征。并与现今构造运动方式有关。根据国家地震局西安地震测量大队1970年以来在河西走廊地区所进行的地形变测量，祁连山北麓的北西西走向断裂带现今表现为挤压和右旋活动〔3〕，龙首山地区的断裂也具有相同的活动趋势。

3. 集聚地应力的必要条件是岩石的坚硬性和完整程度。岩石愈坚硬完整，弹性模量愈大，则积聚的地应力也愈大。就金川矿区的情况而言，含矿超基性岩的完整程度由大到小的次序是：特富矿体>富矿体>贫矿体，不含矿的围岩则最破碎，这个次序正是矿体的层次，特富矿体在最内层，不含矿的围岩在最外层。值得注意的是：二矿区最内层的特富矿体的 $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : 0.67 : 0.64$ ，三者的差别不算太大，与外层贫富矿体交接处的 $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : 0.67 : 0.59$ 及最外层的围岩——大理岩的 $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : 0.86 : 0.79$ 或 $1 : 0.67 : 0.56$ 较为接近；而界于特富矿体与贫矿体之间的富矿体则为 $1 : 0.33 : 0.09$ 及 $1 : 0.56 : 0.15$ ，看来富矿体似乎是含矿岩体的一个应力集中带，很可能与侵入时的热应力有关。

值得注意的是，1250中段19~20行矿体为海绵晶状铁的构造富矿石，性硬脆，裂隙发育，抗压强度为583~1055公斤/厘米²。1976年中国科学院地质研究所在19行穿脉打钻进行应力解除，曾得到饼状岩芯。而36~37行为块状特富矿石，其完整性看来比富矿石好，肉眼所见节理很少，但抗压强度却只有444.9~748公斤/厘米²，比富矿石要低23.7~29.1%，乍看起来似不合理，实际上这正是高地应力区岩体的另一个重要特征。因为这一地区的岩石，曾经历过高的地应力作用，产生许多微节理，在原位条件下，由

于地应力的存在,是完整的,但一经脱离母岩,其岩石试件在抗压过程中,许多微节理便显现出来,故抗压强度降低。这种物理现象我们在好几个工程中,例如鲁布革水电站、故县水库工程等,都观察到了。

4. 为了考察实测地应力在主应力空间的情况,我们把表1中的实测资料,按照公式

$$p = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1)$$

$$q = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$

进行整理,并把p、q的计算结果列入表1;然后点绘于图3中。可以看出,除富矿体应力集中区的三个测点外,其余各测点可以用一条包络线表示,此包络线为微向上凸的曲线(图3的虚线)。这一点与岩石室内三轴试验的结果颇为一致,但为了简便,可以用一条直线代替,即

$$q = 27 + 0.5p \quad (3)$$

按照 Drucker-Prager, 有

$$F = \alpha I_1 + J_2^{\frac{1}{2}} - k = 0 \quad (4)$$

其中 $I_1 = 3p$ ——应力第一不变量

$J_2 = \frac{1}{3} q^2$ ——应力偏量的第二不变量

α 和 k ——与岩石的粘结力 c 及内摩擦角 φ 有关的系数,且

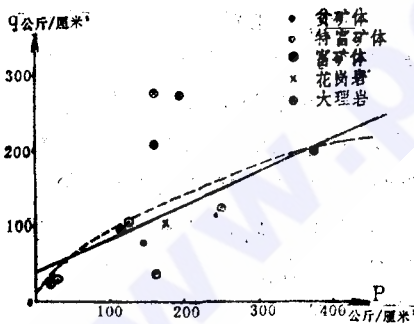


图3 金川矿区实测地应力的p/q关系曲线

$$\alpha = \frac{\tan \varphi}{(9 + 12 \tan^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

$$k = \frac{3c}{(9 - 12 \tan^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

由(5)及(6)得

$$\frac{\alpha}{k} = \frac{\tan \varphi}{3c} \quad (7)$$

大家知道,对于岩石来说, φ 与 c 并不是彼此独立,而是有一定的相关性。据我们对40多个工

程现场的岩体剪力试验结果的统计分析,得到如下的经验关系:

$$c/Rc = 0.324 - 0.118 \tan \varphi \quad (8)$$

这里, Rc 为岩石的抗压强度(公斤/厘米²)。

根据金川矿区岩石抗压试验,取 $Rc = 800$ 公斤/厘米²,于是由式(3)、(7)及(8)可得

$$\left. \begin{aligned} \tan \varphi &= 1.74 \\ \varphi &= 60^\circ \\ c &= 94 \text{ 公斤/厘米}^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

二、二滩水电站岩体的力学性状

二滩坝址在勘探中发现处在高的岩体天然应力状态以来,国内许多单位在那里进行了实测〔9-12〕,所取得的资料基本上可以相互比较和印证。这里将根据现有的实测资料,对二滩坝址岩体所处的力学性状作进一步的考察。

二滩坝址位于我国著名的南北向构造带中段的共和断块上,断块四周均为深大断裂带。共和断块内部构造破坏相对微弱,岩体完整,岩性坚硬,没有发现差异活动。虽然二滩坝址附近的南北断裂带地震强烈,但该坝址所在的共和断块本身却是地震比较弱的地带,从而构成工程建设的“安全岛”。坚硬完整的岩体,是这个“安全岛”能够经受住多次构造运动而又能积聚高的地应力的客观物质条件;而一经积聚了高的地应力的岩体,反过来又会增强其抗断裂的能力,使其经受后续的构造运动时提高其抵抗能力,这就是共和隆起在地史活动中为什么会起中流砥柱作用的内在原因。

根据水电部成都勘测设计院等单位的实测结果(表2)〔9-12〕,我们可以看出:

1. 二滩坝址岩体的地应力已作过较多的工作,所得的结论大体是:①该坝址处在高地应力区,有岩芯饼化和岩爆现象;②在地表下30米左右的深度内,由于岸坡卸荷和风化作用,资料分散性大;③河谷地应力可分为:应力释放区、应力集中区和原岩应力区,这与国内外一般测试结果无异;④左岸正长岩内最大主应力约为200~250公斤/厘米²,方位角约N30°E,右岸玄武岩内最大主应力约为300公斤/厘米²,方位角约N20°E。

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所河谷左岸坡脚处No.10钻孔应力测量时〔12〕,在深度37.5米处获得应力解除的岩芯有环形裂纹,局部张开,表现为受拉破坏特征,采取33厘米长的岩芯有10条环形裂纹,以3厘米的间距均匀分布,但只在岩芯外面有此裂纹,其内部并未完全裂开。这时得到 $\sigma_1=650$ 公斤/厘米², $\sigma_2=291$ 公斤/厘米²。

3. 国内有人按饼状岩芯的剪切破坏进行估算,得到 $\sigma_1=600\sim 800$ 公斤/厘米²〔13-14〕,这个结果与前述测试结果颇为接近。但是这种估算方法,完全忽视了饼状岩芯形成过程中的拉裂现象的存在,却又能与这次应力解除结果很接近,其原因待进一步探讨。因为,虽然在实测应力为 $\sigma_1=650$ 公斤/厘米²的地方获得环状裂纹的岩芯,但就在该测点之下3米处, $\sigma_1=659$ 公斤/厘米²的相邻测点,却没有这种现象;其次,就所获得的环状裂纹的岩芯来说,并没有完全裂成饼状,而且是起源于拉裂,与计算简图只考虑为剪切并不一致;第三,二滩发现饼状岩芯的钻孔,有些却是在地应力远低于 $\sigma_1=650$ 公斤/厘米²的地方获得的。我们曾利用饼状正长岩芯的拉裂坎的范围,采用断裂力学的方法,得到 $\sigma_1=250\sim 240$ 公斤/厘米²,与现在实测的坝区地应力场(正长岩区)约为200~250公斤/厘米²也很一致〔15〕。因此,我们推测,岩芯断裂成饼状是属于拉剪断裂,当剪断破坏占的份额越大时,则所得的 σ_1 越大;而拉断破坏占的份额越大时,所得的 σ_1 越小。用断裂力学计算的只是启裂状态时的数值,而单纯用剪切图式计算所得的值则又未考虑拉裂的影响。问题在于拉剪断裂目前研究的还不多,是需要进一步工作的。

4. 如果我们按公式(1)及(2)来整理所得的实测资料, 这样便可得到 p , q 的计算值, 并把它们列入表2中。在这里, 考虑到No.10及No.11两孔测点的资料缺 σ_3 , 我们假定 $\sigma_3 \approx \gamma h$, 且 $\gamma = 2.7$ 吨/米³, 但在30米以下则用 $\sigma_3 \approx 3\gamma h$, 以与实测值的天然增加的情况相一致〔12〕, 然后把 p , q 值点绘于图4中。可以看出, No.10和No.11两孔测点资料, 是河谷应力集中区的地应力, 明显地与其它测点的地应力情况不同, 如果都用直线关系式表示, 则在河谷应力集中区地应力的 p - q 曲线为:

$$q = 25 + 1.61p \quad (10)$$

考虑(8)式, 且 $R_c = 1500$ 公斤厘米², 可得

$$\tan \varphi = 3.00$$

$$\varphi \approx 72^\circ$$

$$c = 46.6 \text{ 公斤/厘米}^2$$

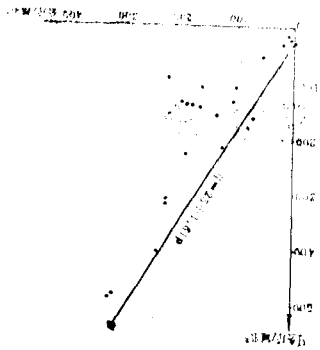
(11)

表2 二滩水电站岩体地应力实测值

岩石	测点位置	序号	测点深度(米)	主应力 公斤/厘米 ²			$\sigma_1:\sigma_2:\sigma_3$	公斤/厘米 ²		附注
				σ_1	σ_2	σ_3		p	q	
正长岩	左岸2号平洞	1	200	264	89	25	1:0.34:0.09	126	214.3	
		2	200	195	67	57	1:0.34:0.29	106.3	133.3	
		3	200	222	152	44	1:0.68:0.20	139.3	155.3	
		4	200	250	169	82	1:0.68:0.33	167	145.5	
		5	200	188	75	-19 (拉应力)	1:0.40:0.10	81	179.5	
	左岸24号平洞	6	50	96	45	43	1:0.45:0.45	61.3	52.0	
	左岸4号平洞	7		295	221	187	1:0.75:0.63	234.3	95.6	
		8		256	244	111	1:0.95:0.43	203.7	139.2	
		9		244	231	98	1:0.95:0.40	191	140.0	
		10		384	173	104	1:0.45:0.27	220.3	252.7	
		11		296	117	74	1:0.40:0.25	162.3	203.9	
玄武岩	左岸23号平洞	12		266	163	108	1:0.63:0.41	180.7	138.1	
	右岸11号平洞	13		303.1	219.7	41.3	1:0.72:0.14	188.0	231.6	
正长岩	No10钻孔测点	14	17.6	18	5	4.75*	1:0.28:0.26	9.3	13.1	此点岩芯外部饼状破裂
		15	24.5	50	12	6.6*	1:0.24:0.13	22.9	31.4	
		16	30.0	180	30	8.1*	1:0.17:0.05	72.7	162.1	
		17	37.5	650	291	30.3**	1:0.45:0.05	323.8	538.9	
		18	40.5	659	259	33.0**	1:0.39:0.05	317	549.1	
		19	45.0	494	202	36**	1:0.41:0.07	243.7	401.6	
		20	55.3	600	315	45**	1:0.53:0.08	320	480.7	
	21	59.4	610	320	48**	1:0.52:0.08	326	486.8		
	No11钻孔测点	22	21.9	15	5.9*	-10 (拉应力)	1:0.39:-0.67	3.6	21.9	
		23	26.8	11	7.2*	-20 (拉应力)	1:0.65:-1.81	-0.6	29.3	
		24	38.0	145	126	30.8**	1:0.88:0.21	100.6	106	
		25	45.0	394	248	36.5**	1:0.63:0.09	226.2	311.3	
		26	53.5	407	226	43.3**	1:0.56:0.11	225.4	315	

*这是按 γh 计算值补上的, $\gamma = 2.7$ 吨/米³。

**这是按 $3\gamma h$ 计算值补上的, $\gamma = 2.7$ 吨/米³。



根据二滩水电站岩体现场实测, $\varphi = 60^\circ - 70^\circ$, $c = 30 - 80$ 公斤/厘米², 两者颇为一致。

三. 结 束 语

综上所述, 我们得到的初步认识是:

1. 应注意研究具体工程建设场地的原岩应力状态, 因为它直接关系到工程建设的安全和经济问题。目前在这方面还很少有人作较系统的工作, 本文的研究也是初步的。

2. 我们认为, 不要单纯把原岩应力(地应力场)场看作一个初始应力值以作数值计算之用, 而还应进一步把这种地应力场与岩体特性结合起来研究。金川矿区特富矿体的单轴抗压强度比富矿体低四分之一左右, 单从肉眼可见的节理裂隙来说, 就不好理解。而且这种情况就笔者所接触过的几个工程来说, 又有大体相同的规律性, 看来不是偶然的。

3. 利用一定的岩石模型理论, 可以计算其相应的原岩强度。虽然金川矿的计算结果无法与实验结果比较(因为没有进行这种试验), 但二滩水电站的计算结果却与现场测试结果相当一致。如果这个结果为进一步的实测应力结果所验证的话, 将是探索原岩强度的一种良好的新途径。

参 考 文 献

- [1] 陶振宇、杨子文: 地应力-岩体特性的一个主要因素, 水利学报, 1981年, 第10期
- [2] 陶振宇: 岩石的屈服模型, 岩土工程学报, 1983年, 第5卷, 第3期,
- [3] 中国地质科学院地质力学研究所等: 金川矿区原岩应力测量及构造应力场研究(总结报告), 1981年
- [4] 曾宪启: 金川矿区的地压研究及其在设计中的应用, 北京有色冶金设计研究总院, 1978年
- [5] 姚宝魁: 岩体应力测量与三轴应变计的应用, 中国科学院地质研究所, 1979年
- [6] 廖椿庭: 地应力测量及其在矿区中的应用, 中国地质科学院地质力学研究所, 1979年
- [7] 冶金工业部矿冶研究所矿山压力研究室: 岩体初始应力及岩体应力测量, 工程地质勘测(岩石地下建筑技术座谈会资料选编), 中国建筑工业出版社, 1977年9月
- [8] 陶振宇: 试论高地应力区的岩体特性, 地下工程, 1983年, 第10期,
- [9] 孙宗远: 二滩水电站坝区河谷岩体应力分带及其工程意义的探讨, 水电部成都勘测院科研所, 1982年9月
- [11] 孙宗远: 二滩水电站局部地段地应力试验, 岩石力学, 1982(6)
- [12] 白世伟、李光远: 二滩水电站坝区岩体应力研究, 中国科学院武汉岩土力学所, 1982年9月
- [13] 石金良: 高地应力区岩石的脆性断裂, 水电部成都勘测设计院勘测总队, 1979年10月
- [14] 成都地质学院工程地质教研室岩体稳定研究组: 块状火成岩体中岩芯“裂成饼状”现象和某些表生结构面的形成机制
- [15] Tao Zhen-yu: A Preliminary Study on the Phenomenon of Core Discing, Proc. 4th Congress IAEG, vol. 4 New Delhi 1982, Dec. 10-15