

文章编号：1006-6616 (2002) 02-0136-05

贵州思林电站 AE 法与套心法 地应力测量结果的比较

汪西海

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要：为了研究思林电站地下厂房区地应力状态，作者采用声发射法（AE）和现场套心应力解除法对拟建的思林电站进行地应力测量。声发射法测得最大主应力值为 15.9MPa，套心法测得的最大主应力方向为 NE 70.9°，最大主应力值为 16.03MPa，表明在同一测点用两种不同的测量方法所测的结果一致。

关键词：声发射；AE；地应力测量；地应力解除法

中图分类号：TU459+.4

文献标识码：A

0 引言

拟建的思林电站位于贵州省乌江中游，思南县城上游 23km 的河段，是一个以发电为主、兼顾航运、防洪和灌溉综合效益的水利枢纽。水库正常蓄水位高程 440m，库容量 16.54m³，控制流域面积 51270km²，最大坝高 113.8m，设计装机容量 84 万 kW。总体工程由拦河坝、引水隧道、尾水隧道、主变洞、调压洞和地下厂房等水工建筑群组成。为了研究思林电站地下厂房区地应力状态、了解岩体深部三维空间地应力场的分布，采用声发射法和现场应力解除法进行地应力测量，为地下建筑群的设计与施工提供依据。

1 库坝区地质背景及构造特征^①

思林电站库坝区范围包括思林粮店至下游的 F₄ 断层。由思林粮站起，乌江流向由 N45°E 转 S65°E。枯水季节河水水位高程 364.10m ~ 364.60m，水面宽 70m ~ 120m；汛期河水水位变幅可达 25m。左岸分水岭四角山制高点高程 1050m，右岸分水岭铜鼓砣一带高程 870.60m，两岸谷坡基本对称。坝区内河流阶地发育，两岸 500m ~ 525m 高程为乌江宽谷期形成的宽 40m 左右的长条形缓坡台地（坡度 20° ~ 25°），其上、下则为 45° ~ 70° 之陡坡地形。由上游至下游，坝区展布的地层为二叠系至三叠系下统，岩性大部分为灰岩和泥页岩；由于灰岩和泥页岩间互成层，灰岩地层往往呈鼻状凸梁，而泥页岩层则成凹槽，较硬岩层界面附近形成陡壁地形；另外平行河流的一组裂隙

收稿日期：2002-04-11

作者简介：汪西海（1952-），男，高级工程师，主要从事同位素、工程地质、地应力测量等方面的研究工作。

① 水电部贵州勘察设计院科研所. 思林电站工程地质勘察报告. 1993.

十分发育,河谷斜坡上又形成一系列顺谷向的小陡壁。第四纪堆积物分布零星。代表性岩石产状 $N40^{\circ}E, NW\angle 70^{\circ}$ 。向斜轴见于 F_4 断层下游 120m 的乌江两岸,轴面向上游倾斜 17° 。 F_4 断层为坝区唯一规模较大的断层,压扭性,产状 $N43^{\circ}E, NW\angle 60^{\circ}$ 。破碎带宽 1m 许,角砾岩为钙质胶结,影响带宽百余米,其内岩层产状紊乱,层间小褶曲发育。

2 测量方法概述

2.1 声发射粗估法地应力测量

声发射(简称 AE)法地应力测量是利用岩石声发射的凯瑟效应(Kaiser effect)和声发射抹录不净现象来实现的。所谓凯瑟效应是指材料在经过一次或多次加载或卸载后,如果再次以同样方式对其进行加载时,只要未达到以前所施加的载荷值,则很少发生声发射;而只有超过此值时,才有显著的声发射活动^[1]。日本学者金川忠^[2]以木筷弯曲实验为例。先将木筷稍加弯曲(初次),木筷发生声音(AE);将其还原后再作弯曲,达到初次弯曲程度前不发生 AE,一旦超过这个程度时又发生 AE。

所谓声发射抹录不净现象^[3]是指第一次对试样加载时,出现凯瑟效应的外加压应力处,卸载后在特定技术条件下再次对试样作第二次加载时,还会在该应力处出现明显可辩的声发射信号,即声发射抹录不净信号^[3]。

由声发射累积数与外加压应力响应曲线上的斜率陡增点,可判断凯瑟效应的出现以及所对应的应力^[4]。丁原辰^[5]认为声发射凯瑟效应既对应于试样取样方向的正应力值,又对应于测点最大主应力值。当对岩石试样进行加载时,从声发射的记录曲线上可以看出有两处声发射信号显著增加,反映在 AE 累积数与外加压应力的响应曲线上则有两个对应的斜率陡增点(通常称之为凯点并以 K 表示)。第一个斜率陡增点即 K_1 点对应于取样方向的正应力值,第二个斜率陡增点即 K_2 点对应于测点的最大主应力值。但实践证明取样方向正应力测值不十分可靠,而不同取样方向试样皆可测得测点处最大主应力值,并有相对较好的一致性^[5]。

从现场采集的岩心或新鲜石块,在三个以上的任意方向上取直径 25mm 高 50mm~70mm 的岩石试样,测得各试样的初压(指第一次加载)复压(指特定技术条件下第二次加载)AE 率记录曲线,并分别绘制出它们的 AE 累积数与外加压应力响应曲线。分别找出初压 AE 累积数和外加压应力响应曲线上的 K_1 和 K_2 点及复压 AE 累积数和外加压应力响应曲线上的 K_1 和 K_2 点,二次结果予以平均,便可求出试样取样方向的正应力值及测点三维地应力状态的最大主应力值。鉴于取样方向正应力测值不太可靠,而从三个以上方向上所取的 10 个以上岩石试样测得的测点三维最大主应力值则相近,因而可只统计出测点处的最大主应力值。这种不能确定方向,只能给出最大主应力大小的方法以前曾称之为声发射粗估法地应力测量^[6]。

2.2 套心法地应力测量

套心法地应力测量使用的探头是地质力学所研制的 KX-81 型空心包体式三轴地应力计。现场测量时,在巷道壁上钻一个直径为 130mm 的大孔,在大孔中心钻一个直径 36mm 的测量小孔,测孔中安装测量探头,探头引线 with 孔外测量仪器相接。记下偏角(应力计的标记与铅直方向的夹角)各应变片的初始读数以及钻孔的方位角和倾角,然后进行套心应力解除。套心时在测量小孔外用直径 130mm 的钻头同心钻进,开挖应力解除槽。随着应力解除槽的加深,岩心逐渐与外界应力场相隔离,岩心发生弹性恢复,仪器测值随之发生变化。仪器读数随解除深度的变化曲线,称之为应力解除曲线。在套孔深度达到应变片部位之前,各应变片所测应变值都是很小的;

当套孔深度达到应变片部位时，各应变片值均发生急剧变化；当套孔深度超过应变片部位一定距离后，应变片值逐渐趋于稳定。解除工作结束后，取出带有测量探头的完整岩心，放入围压率定机中，给岩心加围压进行率定。根据围压率定曲线，可以计算出岩石的弹性模量 E 和泊松比 ν ，进而计算测点的三维应力状态：即三个主应力大小和它们各自的方位角和倾角^[7]。

3 测量结果

3.1 AE 法实测结果

岩心取自套心法应力解除孔，测点埋深 105m，钻孔方位角 S85°W，倾角 6°，地层为三叠系下统夜郎组第二段，岩性为白云质灰岩。岩心完整，无明显肉眼可见裂纹。AE 法测量结果如表 1 所示。从表 1 可以看出由该测点 10 个试样初、复压测试结果，可求得测点的平均最大主应力值为 15.9MPa，正负相差 15% 左右，其偏差在声发射测量误差范围之内。

表 1 声发射法测值表
Table 1 Statistical magnitudes of AE estimating method

试样编号	取样方向	试样端面不平行度误差	$\sigma_{\text{正}}$ (MPa)	σ_{m} (MPa)
SL _{22-1c}	x	$\leq 10\mu\text{m}$	11.6	16.3
SL _{22-1f}	x	$\leq 10\mu\text{m}$	11.4	—
SL _{22-2c}	y	$\leq 10\mu\text{m}$	11.0	17.9
SL _{22-2f}	y	$\leq 10\mu\text{m}$	—	16.3
SL _{22-3c}	z	$\leq 10\mu\text{m}$	9.8	13.4
SL _{22-3f}	z	$\leq 10\mu\text{m}$	10.0	16.7
SL _{22-4c}	x	$\leq 10\mu\text{m}$	10.8	14.7
SL _{22-4f}	x	$\leq 10\mu\text{m}$	12.2	15.9
SL _{22-5c}	y	$\leq 10\mu\text{m}$	9.2	13.9
SL _{22-5f}	y	$\leq 10\mu\text{m}$	8.4	14.1
SL _{22-6c}	z	$\leq 10\mu\text{m}$	13.4	16.9
SL _{22-6f}	z	$\leq 10\mu\text{m}$	13.4	—
SL _{22-7c}	x	$\leq 10\mu\text{m}$	10.4	16.1
SL _{22-7f}	x	$\leq 10\mu\text{m}$	12.6	18.1
SL _{22-8c}	y	$\leq 10\mu\text{m}$	13.2	17.1
SL _{22-8f}	y	$\leq 10\mu\text{m}$	8.6	14.1
SL _{22-9c}	z	$\leq 10\mu\text{m}$	7.3	14.9
SL _{22-9f}	z	$\leq 10\mu\text{m}$	—	14.1
SL _{22-9c}	x	$\leq 10\mu\text{m}$	14.1	18.3
SL _{22-9f}	x	$\leq 10\mu\text{m}$	9.3	18.3
平均				15.9

图 1 和图 2 分别为试样 SL_{22-5c} 初压和复压（SL_{22-5f}）AE 累积数与外加压应力响应曲线。

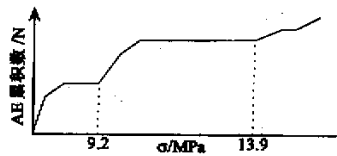


图 1 试样 SL_{22-5c} 初压 AE 累积数与外加压应力响应曲线

Fig.1 Response of applied compressive stress to total AE counts of specimen No. SL_{22-5c} during the fist loading

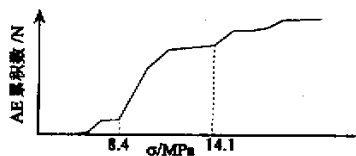


图 2 试样 SL_{22-5f} 复压 AE 累积数与外加压应力响应曲线

Fig.2 Response of applied compressive stress to total AE counts of specimen No. SL_{22-5f} during the second reloading

3.2 套心法地应力测量结果

根据现场取得的原始资料，采用最小二乘法对测量数据进行处理是获得最接近该点所测地应力真实值的最好方法。最小二乘法的实质就是由许多可能的解答中找出一组解答是最可信赖的。在室内进行整理时，利用已编制的程序，输入测点埋深、大孔底深度、钻孔方位角、钻孔的倾斜角、探头的安装角、应变片的读数、岩石的弹性模量和泊松比等有关参数，便可计算出测点处的最大、中间、最小主应力的大小、方向和倾角^[7]。套心法测量结果如表 2 所示。最大主应力近于水平，其数值为 16.03MPa，方位角为 250.9°，倾角为 13.1°。

表 2 套心法地应力测量结果

Table 2 The result of stress relief by overcoring

σ_1/MPa	方位角 $\alpha/^\circ$	倾角 $\beta/^\circ$	σ_2/MPa	方位角 $\alpha/^\circ$	倾角 $\beta/^\circ$	σ_3/MPa	方位角 $\alpha/^\circ$	倾角 $\beta/^\circ$
16.03	250.9	13.1	7.53	1.81	51.77	6.46	151.6	35.2

4 结果与分析

（1）表 3 列出了同一测点分别用套心法和 AE 法测量结果的比较，表中绝对误差和相对误差都是以 AE 法测值相对套心法而言。从表中可以看出 AE 法和现场应力解除法（套心法）测值显示出良好的一致性。两种方法互相验证，表明测值的可靠性和正确性。

表 3 AE 法和套心法测量结果对比表

Table 3 Comparison of mensurementing result of AE and overcoring methods

最大主应力值		绝对误差 (MPa)	相对误差
套心法 (MPa)	AE 法 (MPa)		
16.03	15.9	- 0.13	0.8%

（2）根据我国地应力随深度变化的统计规律^[8]

$$S = 7.36 + 0.0225H$$

式中，S 为水平最大主应力值（MPa）；H 为深度（m）。按此公式推算测点处水平最大主应力值应为 9.7MPa。而实测显示最大主应力值约为 16.03MPa，高于我国其他地区同样深度的地应力值 63.9%，显示测区现今地应力偏高，为高地应力区。

（3）测点上覆岩层的垂直应力通常按 γH 来计算（ γ 表示容重，H 表示深度）。测点上覆岩

层厚度为 105m, 白云质灰岩容重为 $2.73\text{g}/\text{cm}^3$, 据此可计算出垂直应力 $\sigma_v = 2.8\text{MPa}$ 。

(4) 地下硐室围岩的稳定性主要取决于垂直于硐轴方向的水平应力 σ_h 与铅直应力 σ_v 的比值以及它们的绝对值的大小。对于圆形硐室来说, 当地应力的绝对值不太大, 且 $\sigma_h/\sigma_v = 1$ 时, 岩石中的应力分布较均匀, 围岩稳定性较好; 当 $\sigma_h/\sigma_v < 1/3$ 时, 硐室顶部将出现拉应力, 硐壁将会出现大于 $2.67\sigma_v$ 的压应力; 当 $\sigma_h/\sigma_v > 3$ 时, 硐壁将会产生拉应力, 硐顶将会产生大于 $8\sigma_v$ 的压应力。测点处 $\sigma_{AE} = 15.9/2.8 = 5.7 > 3$ 。故硐壁将出现拉应力。因此在选择硐室的方向、横截面几何形状以及顶板跨度时, 要考虑这一因素。尽量使地下厂房轴线选择在最大水平主应力方向上, 否则将会影响到坑道或硐室岩壁剥落、变形、甚至崩塌。

现场地应力测量工作由水电部贵州勘察设计院完成, 参加现场测量工作的有徐志纬、曾文学、刘宏杰等同志, 中国地质科学院地质力学研究所进行现场指导工作。丁原辰研究员在两种地应力测试方法上均给予作者细心指导, 并认真修改此文, 对此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] 丁原辰, 张大伦. 以声发射估计岩石试样先存应力的新方法 [J]. 现代地质, 1989, 3 (2): 359 ~ 368.
- [2] Kanagawa T, Hayashi M, Nakasa H. Estimating of spatial geostress components in rock samples using Kaiser effect of acoustic emission [A]. Third Acoustic Emission Symposium [C]. 1976, Tokyo, 229 ~ 248.
- [3] 丁原辰, 张大伦. 声发射抹录不净现象在地应力测量中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10 (4): 313 ~ 327.
- [4] 丁原辰, 张大伦, 付芳才. 岩石试样凯瑟效应的实验研究 [A]. 中国地质科学院地质力学研究所刊 [C]. 1989, 第 12 号, 171 ~ 183.
- [5] 丁原辰. 矿区地应力状态的声发射粗估法及其应用 [J]. 煤炭工程师, 1992, (4): 50 ~ 56.
- [6] 丁原辰, 汪西海, 王红才. 地应力状态声发射粗估法工程实测检验 [J]. 有色金属, 1995, 4 (1): 10 ~ 15.
- [7] 王连捷, 等. KX-81 型空心包体式三轴地应力计 [A]. 地质力学文集 [C]. 第八集. 北京: 地质出版社, 1988.
- [8] 王连捷, 王薇, 袁嘉音. 中国地应力测量的进展 [A]. 地质力学文集 [C]. 北京: 地质出版社, 1989, 171 ~ 231.

COMPARISON OF GEOSTRESS MEASUREMENT BETWEEN AE METHOD WITH STRESS RELIEF BY OVERCORING IN SILIN POWER STATION, GUIZHOU PROVINCE

WANG Xi-hai

(Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the stress condition of the underground area at Silin power station, Guizhou Province, which will be constructed, the geostress measurements by acoustic emission (AE) and stress relief methods are carried out here. The results show that the magnitude of maximum principal stress by AE is 15.9MPa, and the direction of the maximum principal stress is NE70.9° and its magnitude 16.03MPa by overcoring, suggesting that at the same position the results obtained by two methods are very similar and believable.

Key words: acoustic emission; AE; measurement of geostress; stress-relief method