

水压致裂法三维地应力测量及其修正和工程应用

3-D geostress measurement by hydrofracturing technique and its engineering application

刘允芳 罗超文 景 锋
(长江科学院, 武汉, 430010)

文 摘 叙述了水压致裂法三维地应力测量在水布垭枢纽中的具体应用, 并对经典理论(钻孔轴向就是地应力的一个主方向的假定)整理的实测成果, 进行了修正。

关键词 地应力测量, 水压致裂法, 修正

中图法分类号 TU 459

作者简介 刘允芳, 1936 年 4 月生, 1961 年上海交通大学工程力学系毕业, 教授级高级工程师, 主要从事岩石力学、地应力测量研究, 以及地下洞室稳定性分析研究工作。

Liu Yufang Luo Chaowen Jing Feng

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, 430010)

Abstract The method and modification of 3-D geostress measurement by hydrofracturing technique is proposed in this paper. Unlike the conventional hydrofracturing method, it does not adopt the hypothesis that one of the principal stress direction is parallel to the borehole axis. This method has been applied in the Shuibuya Hydroelectric Project.

Key words geostress measurement, hydrofracturing technique, modification

1 引 言

水压致裂法地应力测量, 以它的测量深度深, 操作简单, 测量周期短等优点, 在国内外得到了广泛应用。但是在单个钻孔中进行测量, 只能获得钻孔横截面上的二维应力状态。为了扩大这种测量方法的应用范围, 笔者曾提出了在现有的勘探平洞内, 采用不同方向的 3 个(或 3 个以上)钻孔, 进行交汇测量, 获得三维地应力状态的理论和方法, 已经在国内十几个水利枢纽工程中得到推广应用。

水压致裂法地应力测量经典理论的基本假设中, 有一个假定是测量钻孔的轴向, 就是地应力场中的一个主应力方向。这个假定对需要测量 3 个或 3 个以上不同方向的钻孔来确定三维地应力状态, 完全不能适用。实际上, 这个假定对于单个钻孔的测量也不是完全必要的。目前水压致裂法地应力测量, 是在这个假定下进行数据整理的, 为此我们需要对它们进行修正。

本文通过水布垭枢纽的具体测量, 来说明这种三维地应力测量的具体实施和修正计算情况。

水布垭水利枢纽位于湖北省境内的清江中游河段, 是以发电为主, 兼顾防洪和航运等综合利用的水利工程。下距隔河岩水利枢纽 92 km。地下厂房区地质条件较差, 并有 F2 和 F3 两个大断层通过, 自然高边坡的稳定性问题较突出, 其中尤以马崖自然高边坡岩体的危险性最大, 并潜有近时代发生崩塌的危险。为了地下厂房和边坡稳定性分析以及支护的设计计算, 地应力场是不可缺少的重要资料。1998 年 4 月我院在右岸地下厂房区 12 号勘探平洞内采用水压致裂法进行了三维地应力测量。

2 水压致裂法三维地应力测量

水压致裂法三维地应力测量的测试原理和方法已发表在文献[1]中, 本文不再赘述, 只引出它的观测值方程组:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{Aij} + \sigma_{Bij} &= \sigma_x [1 - \cos^2 \alpha \cos^2(\beta_0 - \beta_i)] + \sigma_y [1 - \cos^2 \alpha \sin^2(\beta_0 - \beta_i)] + \sigma_z \cos^2 \alpha - \\
 &\quad \tau_{xy} \cos^2 \alpha \sin 2(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{yz} \sin 2\alpha \sin(\beta_0 - \beta_i) - \tau_{zx} \sin 2\alpha \cos(\beta_0 - \beta_i) \\
 (\sigma_{Aij} - \sigma_{Bij}) \cos 2A_{ij} &= \sigma_x [1 - (1 + \sin^2 \alpha) \cos^2(\beta_0 - \beta_i)] + \sigma_y [1 - (1 + \sin^2 \alpha) \sin^2(\beta_0 - \beta_i)] - \sigma_z \cos^2 \alpha - \\
 &\quad \tau_{xy} (1 + \sin^2 \alpha) \sin 2(\beta_0 - \beta_i) + \tau_{yz} \sin 2\alpha \sin(\beta_0 - \beta_i) + \tau_{zx} \sin 2\alpha \cos(\beta_0 - \beta_i) \\
 (\sigma_{Aij} - \sigma_{Bij}) \sin 2A_{ij} &= \sigma_x \sin \alpha \sin 2(\beta_0 - \beta_i) - \sigma_y \sin \alpha \sin 2(\beta_0 - \beta_i) - 2\tau_{xy} \sin \alpha \cos 2(\beta_0 - \beta_i) + \\
 &\quad 2\tau_{yz} \cos \alpha \cos(\beta_0 - \beta_i) - 2\tau_{zx} \cos \alpha \cos(\beta_0 - \beta_i)
 \end{aligned} \tag{1}$$

* 到稿日期: 1998

表1 3个钻孔地应力实测成果表
Table 1 The measured results for 3 boreholes

孔号	孔深 /m	压力参数/MPa			应力值/MPa		破裂缝方向 (垂直孔)	破裂缝产状 走向/倾向/倾角 (水平孔 45°斜孔)
		P_b	P_r	P_s	σ_A	σ_B		
水平孔	4.71~ 5.91	6.83	5.55	3.62	5.31	3.62	N46°E/ SE/ 60°	
	6.71~ 7.91	5.33	3.83	2.83	4.66	2.83		
	9.50~ 10.70	7.66	5.66	3.37	4.46	3.21		
	13.00~ 14.20	8.33	6.33	3.66	4.66	3.66		
45°斜孔	5.84~ 7.04	3.16	2.17	1.62	2.71	1.62	N46°E/ NW/ 60°	
	10.35~ 11.55	5.00	4.33	2.32	2.63	2.32		
	16.11~ 17.31	4.66	4.27	2.58	3.47	2.58		
	21.46~ 22.66	3.16	2.78	2.05	3.39	2.05		
垂直孔	6.94~ 8.14	2.77	2.46	1.49	2.00	1.49	N76°E N80°E	
	15.09~ 16.29	2.16	1.85	1.49	2.62	1.49		
	17.23~ 18.43	4.31	3.49	2.16	3.00	2.16		
	21.21~ 22.41	7.24	6.01	3.39	4.16	3.39		
	36.02~ 37.22	3.23	2.77	2.16	3.70	2.16		
	38.00~ 39.20	4.16	4.00	3.08	5.24	3.08		

式中 β_0 为大地坐标系 $O-xyz$ 轴 X 的方位角, 轴 X 取某个工程建筑物的轴向; i 为测量钻孔序号, $i = 1 \sim n$, $n \geq 3$; j 为测段序号; α_i 和 β_i 为测量钻孔的倾角和方位角; σ_{Aij} 和 σ_{Bij} 为第 i 钻孔第 j 测段上所测得的钻孔横截面上的大、小主应力; A_{ij} 为钻孔坐标系 $O-x_iy_iz_i$ 水平轴 X_i 起算逆时针向到所测得的第 i 钻孔第 j 测段破裂缝的角度。把观测值方程组(1)统一表达为

$$\sigma_k^* = A_{k1}\sigma_x + A_{k2}\sigma_y + A_{k3}\sigma_z + A_{k4}\tau_{xy} + A_{k5}\tau_{yz} + A_{k6}\tau_{zx} \quad (2)$$

式中 k 为观测值方程的序号, 为运算方便, 把有破裂缝记录的测段(序号为 j) 排列在没有破裂缝记录的测段(序号为 j_1) 的前面, $k = 1 \sim 3n_j + n_{j1}$; n_j 和 n_{j1} 为有破裂缝记录 and 没有破裂缝记录的测段个数; σ_k^* 和 A_{k1}, \dots, A_{k6} 为相应于方程组(1)的观测值和应力系数。

分析方程组(1)可知, 有破裂缝记录的测试结果, 可提供3个观测值方程(方程组(1)的第1、第2和第3式), $k = 3j - 2, k = 3j - 1, k = 3j$; 而没有破裂缝记录的测试结果, 仅提供1个观测值方程(方程组(1)的第1式), $k = 3n_j + j_1$ 。

水压致裂法三维地应力测量属于多值测量, 观测值方程数目多于未知量(6个应力分量)的数目, 利用数理统计的最小二乘法原理, 得到求解应力分量最佳值的正规方程组

$$\begin{pmatrix} \sum_{k=1}^{n_0} A_{k1}^2 & \sum_{k=1}^{n_0} A_{k2}A_{k1} & \dots & \sum_{k=1}^{n_0} A_{k6}A_{k1} \\ \sum_{k=1}^{n_0} A_{k1}A_{k2} & \sum_{k=1}^{n_0} A_{k2}^2 & \dots & \sum_{k=1}^{n_0} A_{k6}A_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{k=1}^{n_0} A_{k1}A_{k6} & \sum_{k=1}^{n_0} A_{k2}A_{k6} & \dots & \sum_{k=1}^{n_0} A_{k6}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \dots \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^{n_0} A_{k1}\sigma_k^* \\ \sum_{k=1}^{n_0} A_{k2}\sigma_k^* \\ \dots \\ \sum_{k=1}^{n_0} A_{k6}\sigma_k^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 n_0 为观测值方程的个数, $n_0 = 3n_j + n_{j1}$, 求解方程组(3)后, 得到6个岩体应力分量, 从而再求得地应力的3个主应力大小及其方向(倾角, 方位角)。

文献[1]对钻孔坐标系 $O-x_iz_iz_i$ 作如下约定: 轴 Z_i 为钻孔轴线方向, 指向孔口为正, 轴 X_i 为水平向, 以按右手系确定的轴 Y_i 位于上半空间的指向为正。

水布垭水利枢纽地下厂房区的水压致裂法三维地应力测量, 是在地下厂房区12号勘探平洞洞深300m处布置了水平向(微上倾3°), 45°斜向和铅垂向三个钻孔, 组成了一个三维地应力测量剖面。在3个钻孔中共进行了14个测段的测量, 其中对破裂缝印模定向的有6个测段, 可建立18个观测值方程, 未对破裂缝印模定向的有8个测段, 可建立8个观测值方程, 共建立26个观测值方程。14个测段的实测成果见表1。

水布垭枢纽水压致裂法三维地应力测量布置的3个测量钻孔的空间位置如图1所示, 它们的倾角 α_i 和

方位角 β_i 列于表 2, 由印模器记录的 6 个测段的破裂缝方向列表 3。

表 2 3 个测量钻孔的倾角和方位角

钻孔方向	水平向	45°斜向	垂直向
倾角 $\alpha_i/(\circ)$	3	45	90
方位角 $\beta_i/(\circ)$	226	226	90

表 3 印模器记录的破裂缝方向

	测段/m	$A/(\circ)$	轴 X_1 方位/ (\circ)
水平孔	4.71~ 5.91	120	136
	13.0~ 14.2	110	
45°斜孔	5.84~ 7.04	60	136
	16.11~ 17.31	70	
垂直孔	21.21~ 22.41	- 76	0
	36.02~ 37.22	- 80	

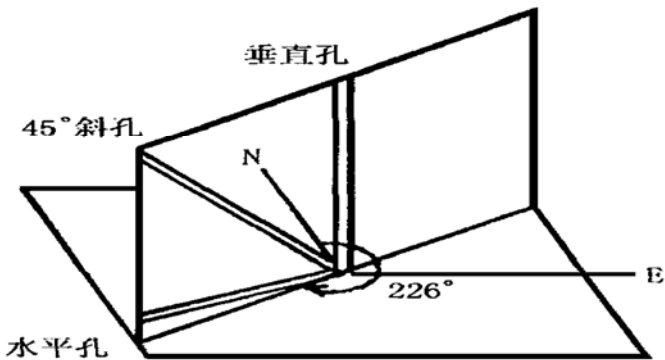


图 1 3 个测量钻孔的相对位置

Fig. 1 The relative position of three measuring boreholes

垂直向钻孔的方位角是不定数, 它与印模器记录的破裂缝方位角 A_{ij} 紧密相关, 如果破裂缝方向为 $NE76^\circ$, 钻孔坐标系的轴 X_i 取在正北向, 则垂直钻孔的方位角为 90° , A_{ij} 为 -76° 。

2.1 三维地应力测试成果

根据表 1 所列的 3 个钻孔所测得的钻孔横截面上二维应力状态和表 2、表 3 所列的 3 个钻孔的倾角、方位角、破裂缝方向进行计算, 获得三维应力状态, 即 6 个应力分量和 3 个主应力的值及其倾角、方位角列于表 4。

表 4 三维地应力实测成果

应力	实测值/MPa	倾角/ (\circ)	方位角/ (\circ)
σ_x	3.30		
σ_y	2.55		
σ_z	4.85		
τ_{xy}	0.55		
τ_{yz}	- 0.99		
τ_{xz}	- 0.82		
σ_1	5.62	58.9	253.5
σ_2	2.97	26.4	108.0
σ_3	2.13	15.2	10.2

注: 应力分量采用的坐标系为地下厂房坐标系, 即轴 X 为厂房轴线方向 (115.5°), 轴 Z 为铅垂向上方向。

2.2 各钻孔横截面上由三维测量成果换算到二维应力状态与二维实测成果的比较

三维地应力实测成果换算到各钻孔横截面上的二维应力状态与各钻孔实测成果的比较列于表 5。表 5 中所列的各钻孔二维应力状态实测成果, 是对作了破裂缝印模记录的两个测段实测成果的平均值。

由表 5 可见, 由三维测量成果换算的各钻孔横截面上二维应力状态值与二维实测值相当一致, 相对差的绝对值, 主应力量值为 $0.12 \sim 0.87$ MPa, 平均为 0.42 MPa, 方向为 $9.6^\circ \sim 30.4^\circ$ (45° 斜孔相差较大), 平均为 18.0° 。

表 5 各钻孔横截面上由三维测量成果换算到二维应力状态与二维实测成果的比较

Table 5 A comparison between the 2-D stress states obtained from 3-D measured results and the 2-D measured results in cross sections of all boreholes

钻孔方向	三维实测成果			各钻孔测量成果		
	$\sigma_{A_{ij}}/MPa$	$\sigma_{B_{ij}}/MPa$	A_{ij}	$\sigma_{A_{ij}}/MPa$	$\sigma_{B_{ij}}/MPa$	A_{ij}
水平向	4.80	2.77	101.1	4.99	3.64	115
45°斜向	2.97	2.60	34.6	3.09	2.10	65
垂直向	3.59	2.26	- 87.6	3.93	2.78	- 78

注: 破裂缝方向 A_{ij} 以钻孔坐标系轴 X_i 为起始轴逆时针向度量的角度。

2.3 由三维测量成果换算的最大和最小水平主应力及其方向与垂直钻孔的二维实测成果的比较

由三维测量成果换算的最大和最小水平主应力及其方向与垂直钻孔的二维实测成果的比较, 列于表 5 的最后一行中, 由表 5 最后一行可知, 最大和最小水平主应力的量值及方向, 由三维测量成果换算的值和二维实测值也是非常一致的, 相对差的绝对值, 应力量值平均为 0.43 MPa, 方位角为 9.6° 。

由上述两点对三维和二维应力状态实测成果的比较可知, 由 3 个钻孔横截面上二维应力实测值, 推算三维地应力状态是可行的, 有较高精度。

3 对钻孔轴向为其中一个主应力方向假定下的实测成果的修正

测量钻孔轴向是地应力场中的一个主应力方向的假定, 就是在钻孔岩壁上剪应力 τ_θ 为零的假定。 σ_θ , σ_z , σ_r 都为应力, 切向应力 σ_θ 随注液压力 P_w 增大而减小, 再由压应力变为拉应力, 当达到或超过围岩的抗拉强度 T 时, 围岩产生纵向破裂缝。所以水压致裂法经典理论以最小切向应力达到单轴抗拉强度作为破裂准则, 所产生的破裂缝总是与轴向平行的纵向破裂缝。

一般情况, 水压致裂法地应力测量在钻孔岩壁上的应力状态为:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\theta &= (\sigma_A + \sigma_B) - 2(\sigma_A - \sigma_B) \cos 2(\theta - \alpha) - P_W \\ \sigma_z &= -2\mu(\sigma_A - \sigma_B) \cos 2(\theta - \alpha) + \sigma_{z0} \\ \tau_\theta &= P_W \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\begin{aligned} \tau_\theta &= 2\tau_z \cos \theta - 2\tau_x \sin \theta \\ \tau_r &= \tau_\theta = 0 \end{aligned}$$

式中 σ_{z0} 为原始轴向正应力分量, θ 和 α 为研究点和横截面上大主应力的极角, 由轴 X 逆时针向度量; μ 为岩石的泊桑比; P_W 为注液压力。

因此, 在钻孔孔壁上有剪应力 τ_θ 存在, 也即孔周岩壁上还存在比切向应力 σ_θ 还小的小主应力 σ_M :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_M &= (\sigma_\theta + \sigma_z) / 2 - \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 / 4 + \tau_\theta^2} \\ \gamma_M &= \frac{1}{2} \arctan[2\tau_\theta / (\sigma_\theta - \sigma_z)] \end{aligned} \right\} (5)$$

式(5)第二式是指小主应力 σ_M 的方向与钻孔轴向的夹角。因此最小切向应力并不是真正的最小, 还存在比它更小的最小的小主应力。

根据这一理论, 水压致裂法测量时, 当液压增加到孔周岩壁上最小的小主应力 σ_m 达到围岩的抗拉强度 T 时, 孔周岩壁应该在 σ_m 所处的极角 θ_m 上产生一组与孔轴相交 γ_m 的平行微裂隙. 这些微裂隙总体上与钻孔轴向平行. 在实际测量中所见到的破裂缝, 并不是微倾斜的断断续续的微裂隙雁行缝, 而是由它们贯穿起来的一条平行于轴向的纵向缝, 这是由于雁行缝产生于较小的极角范围, 超过此范围, 岩壁上的小主应力不再是最小. 它与最小切向应力达到围岩抗拉强度形成的纵向破裂缝不在同一位置上, 两者之间相隔一个小角度, 它们的破裂缝示意图如图 2 所示。因此, 由印模器或钻孔电视记录的破裂缝位置, 并不是孔周岩壁上最小切向应力的位置(也即不是钻孔横截面上大主应力的极角), 而是最小的小主应力的位置。

针对水布垭地下厂房区地应力测量进行分析, 压裂段注液压力采用所有 14 个测段破裂压力的平均值, 即 $P_W = 5.0 \text{ MPa}$ 。水平向 45° 斜向和垂直向的 3 个钻孔的切向应力和小主应力沿孔周分布如图 3 所示。由图 3 可知, 在孔周岩壁上应力沿孔周的变化形态, 小主应力与切向应力相类似。在水平孔和垂直孔中, 应力量值的变化幅度, 小主应力比切向应力小得多, 两者的最大值相差较大, 随着孔周变化, 两者逐渐靠近, 最后, 最小值及其所处的位置, 两者相当接近; 而在 45° 斜孔中, 小主应力与切向应力的变化形态与水平孔和垂直孔相反, 但应力量值的变化幅度比水平孔和垂直孔小得多。

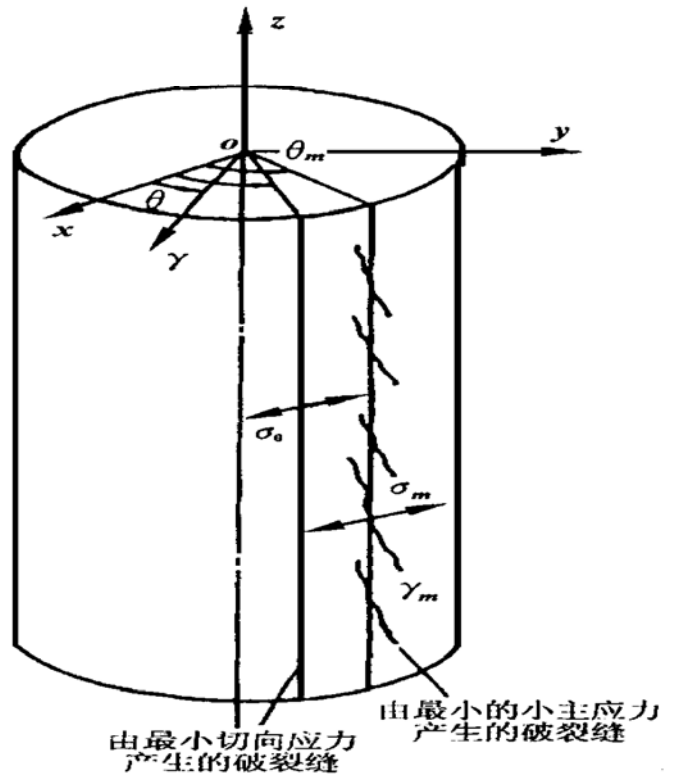


图 2 由最小切向应力和最小的小主应力产生的破裂缝示意图
Fig. 2 Breaking fractures caused by the minimum tangential stress and the minimum minor principal stress

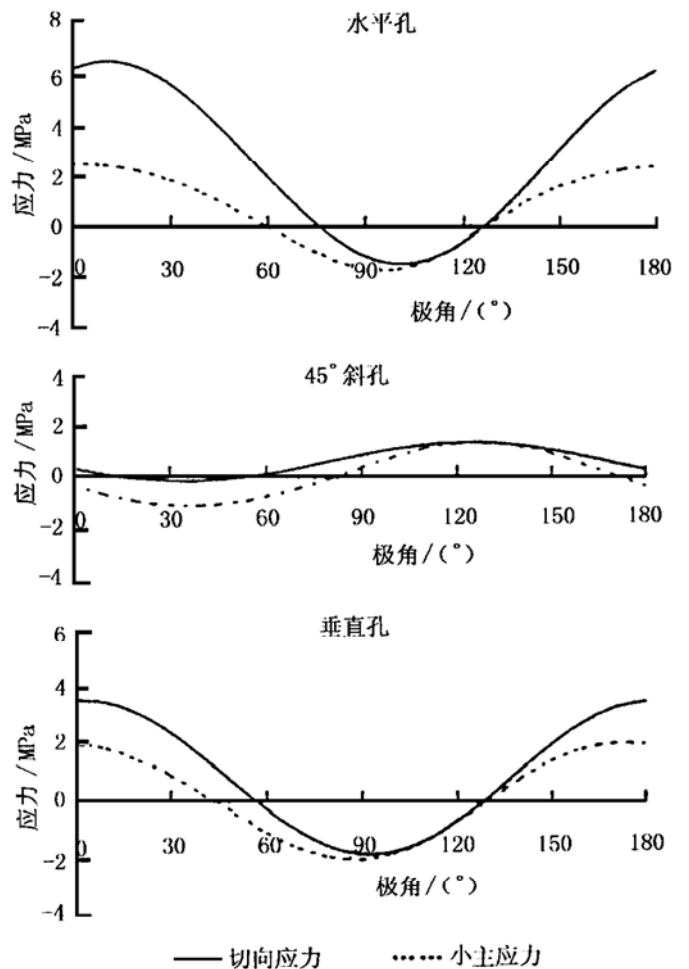


图 3 $P_W = 5.0 \text{ MPa}$ 时, 各钻孔岩壁上切向应力和小主应力沿孔周的分布
Fig. 3 Distributions of the tangential stress and the minor principal stress along the hole wall in 3 types of boreholes with $P_W = 5.0 \text{ MPa}$

表 6 在液压 $P_w = 5 \text{ MPa}$ 情况下各钻孔孔壁上最小切向应力和最小的小主应力的比较

Table 6 A comparison between minimum tangential stresses and minimum minor principal stresses at the hole wall of 3 types boreholes with $P_w = 5.00 \text{ MPa}$

方向	最小切向应力			最小的小主应力			相对差值	
	量值/MPa	所处极角/(°)	与孔轴夹角/(°)	量值/MPa	所处极角/(°)	与孔轴夹角/(°)	量值/MPa	所处极角/(°)
水平向	- 1.473	101.1	0	- 1.730	95.4	- 16.8	- 0.257	- 5.7
45°斜向	- 0.177	34.6	0	- 1.121	36.5	21.6	- 0.944	1.9
垂直向	- 1.808	92.4	0	- 2.000	87.7	- 11.0	- 0.192	- 4.7

最小切向应力和最小的小主应力及其所处的极角列于表 6。由表 6 可知, 最小的小主应力比最小的切向应力小, 平均小 0.464 MPa, 所处极角也有所差异, 平均相对差 4.1°, 由最小的小主应力产生的倾斜微裂隙, 与孔轴夹角平均为 - 16.5°。

把式(4)代入式(5)得到孔周岩壁上小主应力 σ_m 的表达式, 利用 $\partial \sigma_m / \partial \theta = 0$ 求极值的条件, 得到最小的小主应力 σ_m 所处的极角 θ_m , 也即得到横截面上大、小主应力 σ_A , σ_B 以及 σ_A 所处极角 α 与压裂参数的关系式^[2]

$$(B_1^2 - B_2^2)[A + B_2 \cos 2(\theta_m - \alpha)]^2 \sin 2(\theta_m - \alpha) + B_1^2 D_1^2 \sin 2(\theta_m - \alpha) + 2B_2 D_2 [A + B_2 \cos 2(\theta_m - \alpha)] \sin 2(\theta_m - \alpha) + D_2^2 = 0 \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} A = (-\sigma_A - \sigma_B + \sigma_{z0} + P_b) / 2 \\ B_1 = (1 + \mu)(\sigma_A - \sigma_B) \\ B_2 = (1 - \mu)(\sigma_A - \sigma_B) \\ D_1 = 2\tau_{yz} \cos \theta_m - 2\tau_{zx} \sin \theta_m \\ D_2 = (\tau_{zx}^2 - \tau_{yz}^2) \sin 2\theta_m - 2\tau_{yz} \tau_{zx} \cos 2\theta_m \end{cases} \quad (7)$$

把由式(6)求得的 α 代入式(5)第 1 式, 即得到最小的小主应力 σ_m 的表达式, 再根据经典的水压致裂法地应力测量的破裂准则, 以 $\sigma_m = -T$ 代入式(5)第 1 式, 得到横截面上大主应力 σ_A 与小主应力 σ_B 和压裂参数的关系式, σ_A 以二次函数求解方式给出

$$\sigma_A = (-b + \sqrt{b^2 - 4ac}) / 2a \quad (8)$$

表 7 对钻孔横截面上大主应力 σ_A 和小主应力 σ_B 以及 σ_A 所处极角 α 进行修正结果

Table 7 Modification of value and direction of major principal stress σ_A and minor principal stress σ_B in cross section of 3 types boreholes

测段 /m	经典理论			修正计算			
	大主应力 σ_A /MPa	小主应力 σ_B /MPa	大主应力极角 α /(°)	大主应力 σ_A /MPa	小主应力 σ_B /MPa	大主应力极角 α /(°)	
水平孔	4.71~ 5.91	5.31	3.62	120	5.31	3.62	123.0
	13.00~ 14.20	4.66	3.66	110	4.62	3.66	113.7
45°斜孔	5.84~ 7.04	2.71	1.62	60	2.04	1.57	80.0
	16.11~ 17.31	3.47	2.58	70	2.70	2.57	76.9
垂直孔	21.21~ 22.41	4.16	3.39	- 76	4.41	3.29	- 93.0
	36.02~ 37.22	3.70	2.16	- 80	4.07	2.04	- 94.3

注: 截面上大主应力极角以它们的钻孔坐标系水平轴 X_i 为起始轴逆时针向度量

式中

$$\begin{aligned} a &= -2\mu \cos 2(\theta_m - \alpha) [1 - 2\cos 2(\theta_m - \alpha)] \\ b &= (\sigma_{z0} + T - P_0) - 2[\sigma_{z0} - \mu P_b + (1 + \mu)(T - P_0)] \cos 2(\theta_m - \alpha) - 8\mu \sigma_B \cos^2 2(\theta_m - \alpha) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c &= [(\sigma_B - P_b + T - P_0)(\sigma_{z0} + T - P_0) - D_1^2] + 2[\sigma_{z0} + \mu(\sigma_B - P_b) + (1 + \mu)(T - P_0)] \cdot \sigma_B \cos 2(\theta_m - \alpha) + 4\mu \sigma_B^2 \cos^2 2(\theta_m - \alpha) \quad (9) \end{aligned}$$

横截面上小主应力 σ_B 由维持裂缝张开的瞬时关闭压力 P_s 与裂缝面相垂直的法向应力 σ_n 相平衡的应力条件 $\sigma_n = P_s$ 得到

$$\sigma_B = \frac{1}{\cos^2(\theta_m - \alpha)} [P_s - \sigma_A \sin^2(\theta_m - \alpha)] \quad (10)$$

这样, 钻孔横截面上大主应力 σ_A 、小主应力 σ_B 以及 σ_A 所处的极角 α , 通过联立求解式(6), (8)和(10)3个方程得到。由式(6)可见, 横截面上大主应力 σ_A 以及所处的极角 α , 与压裂参数的关系式以隐函数的形式给出, 不能用显式表示, 也即 α 不能直接求得。因此, 方程组的求解, 在计算技术上采用逐次逼近计算法。 σ_A 和 σ_B 的初始值为经典理论(假定钻孔轴向为其中的一个主应力方向)计算的值。

根据以上理论和式(4)~(10), 对水布垭水利枢纽地下厂房区的 3 个测量钻孔中有破裂缝印模资料的两个压裂段的实测成果进行修正, 修正后的成果列于表 7。

由表7可见,对钻孔轴向就是其中一个主应力方向的假定(此假定不再适用)下计算结果的修正,是不可忽视的,修正量的绝对值,钻孔横截面上大主应力 σ_A 在0~0.77 MPa之间,平均为0.35 MPa,小主应力 σ_B 在0~0.12 MPa之间,平均为0.05 MPa,大主应力 σ_A 所处的极角 α 修正量的绝对值在 $3.0^\circ \sim 20.0^\circ$ 之间,平均为 10.8° 。

经过校核修正后的各钻孔横截面上大主应力 σ_A 、小主应力 σ_B 以及 σ_A 所处的极角 α ,是摆脱了钻孔轴向就是其中一个主应力方向假定的束缚,比经典理论数据整理的成果更精确。把修正后的 σ_A 、 σ_B 和 α ,再代入式(1)~(3)进行运算,会得到比以前结果更精确的三维地应力状态。

4 结 语

水压致裂法三维地应力测量的不同方向的3个(或3个以上)钻孔,有两种布置形式,一是像套钻孔应力解除法中孔径变形法和孔底应变法那样布置成交汇于“一点”的形式,因此三维地应力实测成果非常接近于“点应力状态”的情况,不存在测量深度差异的影响问题;另一是象水布垭枢纽那样布置成散射状,这实际上对各个钻孔测段,都作了处于同一均匀应力场的假定,也就是三维地应力实测成果,是这些测段范围内的

综合性应力状态。后一种布置形式钻孔施钻容易,并在水工建筑中非常实用,例如高压引水隧洞衬砌设计中,需要测求不同方位的围岩破裂压力,测量钻孔布置成散射状,求得各方向围岩破裂压力的同时,也求得了三维地应力状态。这种布置形式的应用非常广泛。

在水压致裂法三维地应力测量中,经典理论对测量钻孔轴向就是地应力场中的一个主应力方向的假定,不再适用。钻孔轴向与主应力方向以不同的角度相交。这样钻孔孔周岩壁上存在剪应力,孔壁上最小切向应力并不是真正最小,围岩的破裂缝由最小的小主应力(其方向与孔轴斜交)达到围岩抗拉强度后产生。在实际测量中所见到的破裂缝,并不是在同一极角中断断续续与钻孔轴向斜交的雁形缝,而是由它们贯穿起来的平行于轴向的纵向缝。因此,对钻孔横截面上的大主应力 σ_A 、小主应力 σ_B 以及 σ_A 所处极角 α 的修正,不可能依据与钻孔轴向斜交 γ_m 雁形缝的资料进行计算。笔者建议采用文中的方法进行修正。

参 考 文 献

- 1 刘允芳. 水压致裂法三维地应力测量. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(3): 246~ 256
- 2 刘允芳. 水压致裂法地应力测量的校核和修正. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 297~ 304