

水压致裂法地应力测量的校核和修正

刘允芳

(长江科学院 武汉 430010)

摘要 研究了水压致裂法地应力测量的经典理论,对不完全符合实际的钻孔轴向与主应力方向一致的假定和所采用的最大单轴拉应力破裂准则,进行全面的分析和研究,提出了对实测成果进行校核和修正的建议,推导了具体计算公式,并附有实例。

关键词 地应力测量,水压致裂法,破裂准则,校核,修正

分类号 TU453

1 引言

水压致裂法地应力测量是目前深钻孔地应力测量中最主要的方法之一,已被国内外广泛应用。此法最深测量深度,国外为 5 105 m(美国),国内为 2 000 m(大港油田),它是研究深层岩体地应力场的主要测量手段。

水压致裂法地应力测量的经典测试原理,以下列 3 个假设条件为前提:围岩为线性、均匀、各向同性的弹性体;围岩为多孔介质时,注入的流体按达西定律在岩石孔隙中流动;岩体中地应力的一个主应力方向与钻孔轴向平行。除此以外,围岩破裂判据的经典理论,采用最大单轴拉应力破裂准则。

对水压致裂法地应力测量的测试原理的进一步研究,发现地应力场的一个主应力与钻孔轴向平行的概率并不多,尤其在水压致裂法三维地应力测量中,这个假定存在的问题更多,该方法需要在三个不同方向的钻孔中分别进行测量;同时发现钻孔压裂段破裂处的孔周岩壁,是在拉-拉-压或拉-压-压的三维应力状态下破裂的,并不符合最大单轴拉应力破裂准则的应力条件。本文深入探讨了这两个问题,提出了对地应力实测值进行校核和修正的建议,推导了具体计算公式。

水压致裂法地应力测量,是对钻孔横截面上二维地应力状态的测量。由于本文对地应力不作它的一个主应力与钻孔轴向平行的假设,为了与三维应力状态中的大、中、小主应力相区别,把钻孔横截面上大、小主应力称为大次主应力和小次主应力,如果钻孔为铅垂向,则它们为最大和最小水平次主应力。在水压致裂法地应力测量中,唯有小次主应力的量值,不需要经过任何假设和运算直接由测试时获得。因此,对地应力实测值的校核和修正,主要是对大次主应力的量值和方向的校核和修正。

1996年6月14日收到初稿,1996年9月3日收到修改稿。

作者刘允芳简介:男,61岁,1961年毕业于上海交通大学工程力学系固体力学专业,现任教授级高级工程师,主要从事岩石力学、地应力场的测量和研究工作。

2 测量钻孔围岩的应力分析和经典理论

水压致裂法地应力测量钻孔围岩的应力状态,是地应力二次应力场与液压引起的附加应力场的叠加。孔周岩壁($r = a$)上应力状态为^[1]

$$\begin{cases} \sigma_{\theta} = (\sigma_A + \sigma_B) - 2(\sigma_A - \sigma_B)\cos 2(\theta - \alpha) - P_w \\ \sigma_z = -2\mu(\sigma_A - \sigma_B)\cos 2(\theta - \alpha) + \sigma_{z_0} \\ \sigma_r = P_w \\ \tau_{\theta z} = 2\tau_{yz}\cos\theta - 2\tau_{zx}\sin\theta \\ \tau_{rz} = \tau_{r\theta} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_A, σ_B 为钻孔横截面上大、小次主应力; σ_{z_0} 为原始轴向正应力分量; θ 和 α 为研究点和最大主应力的极角; P_w 为钻孔压力段承受的液压; μ 为岩石的泊桑比。

水压致裂法地应力测量的破裂缝产生在钻孔岩壁上拉应力最大的部位,也即产生在最小切向应力 σ_{θ} 的部位,根据式(1)第一式可知,在极角为 $\theta = \alpha$ 和 $\pi - \alpha$ 的孔周岩壁上, σ_{θ} 为最小。

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_B - \sigma_A - P_w \quad (2)$$

切向应力 σ_{θ} 随液压 P_w 不断增大,由压应力转变为拉应力状态,再由拉应力逐渐增大,达到围岩抗拉强度 T ,孔周岩壁沿径向产生纵向破裂,这时压力段的液压 P_w 就达到破裂压力 P_b 。

考虑到在深层岩体中,还存在孔隙压力 P_0 ,岩体有效应力为 $\sigma - P_0$,因此,对非渗透性岩石,岩壁产生破裂的应力条件,根据式(2)有^[2]

$$P_b - P_0 = 3(\sigma_B - P_0) - (\sigma_A - P_0) + T \quad (3)$$

钻孔周壁围岩破裂以后,立即关闭加压泵,这时维持裂缝张开的瞬时关闭压力 P_s 与裂缝面相垂直的小次主应力 σ_B 达到平衡,也即

$$\sigma_B = P_s \quad (4)$$

根据式(3),大次主应力 σ_A 为

$$\sigma_A = 3\sigma_B - P_b + T - P_0 = 3P_s - P_b + T - P_0 \quad (5)$$

围岩抗拉强度 T 也可根据围岩破裂以后,再重复注液施压至破裂缝继续开裂而取得的重张压力 P_r 确定。这时由于围岩已经破裂,它的 T 近似为零,类似式(3)近似得到重张压力 P_r 为

$$P_r = 3P_s - \sigma_A - P_0 \quad (6)$$

与式(5)比较,得到 $T = P_b - P_r$,因此 σ_A 也可表示为

$$\sigma_A = 3P_s - P_r - P_0 \quad (7)$$

大次主应力 σ_A 的方向,可由钻孔电视或印膜器记录的破裂缝的方向确定。

3 对钻孔轴向为主应力方向的校核和修正

研究这个问题时,为使问题简化,围岩的破裂准则,仍采用最小单轴拉应力破裂准则。

水压致裂法地应力测量的经典理论假定钻孔轴向就是地应力场中一个主应力方向，这实际上假定了岩壁上剪应力 $\tau_{\theta z} = 0$ 。既然水压致裂法地应力测量的破裂缝在孔周岩壁上最小应力处并在其垂直方向上形成，而最小切向应力，在一般的情况下并不是真正的主应力，那么就必须研究孔周岩壁上最小应力的量值和产生的位置以及形成破裂缝的形式。

由式(1)可知，孔周岩壁上剪应力分量 $\tau_{r\theta}$ 和 τ_{rz} 都为零，故孔周 θZ 面为一主平面。孔周岩壁上小主应力 σ_M 及其方向 τ_M 为

$$\begin{aligned} \sigma_M &= (\sigma_z + \sigma_\theta)/2 - \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2/4 + \tau_{\theta z}^2} \\ \tau_M &= \frac{1}{2} \tan^{-1}[2\tau_{\theta z}/(\sigma_z - \sigma_\theta)] - 90^\circ \end{aligned} \tag{8}$$

式中：应力分量 σ_θ , σ_z 和 $\tau_{\theta z}$ 用式(1)代入，可知 σ_M 和 τ_M 是应力状态 σ 和极角 θ 、液压 P_w 的隐函数。其中第二式是针对产生纵向破裂缝的应力状态 $\sigma_z - \sigma_\theta > 0$ 而言，而另一状态 $\sigma_z - \sigma_\theta < 0$ ，则右边不减 90° 。

根据这一理论，当液压增加到孔周岩壁上最小的小主应力 σ_m 达到围岩抗拉强度 T 时，孔周岩壁上应该在 σ_m 所处的极角 θ_m 上产生一组与孔轴微倾斜的平行微裂隙，这些微裂隙总体上与钻孔轴向平行。它与由最小切向应力 σ_θ 形成的破裂缝如图1所示，两者相差一个小角度。在实际测量中，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平行于轴向的破裂缝，这是由于雁行缝产生于较小的极角范围。因此，由印膜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，而是最小的小主应力的位置。

根据以上分析，钻孔横截面上围岩的小次主应力 σ_b 和孔周岩壁上最小的小主应力的极角 θ_m ，由水压致裂法测量时直接测得，而大次主应力 σ_A 及其所处的极角 α ，需要校核与修正。

将式(1)代入小主应力 σ_M 表达式(8)，利用 $\frac{\partial \sigma_M}{\partial \theta} = 0$ 求极值的条件，得到最小的小主应力 σ_m 所

处的极角 θ_m ，也即得到大次主应力 σ_A 所处极角 α 与压裂参数的关系式

$$\begin{aligned} (B_1^2 - B_2^2)[A + B_2 \cos 2(\theta_m - \alpha)]^2 \sin 2(\theta_m - \alpha) + B_1^2 D_1^2 \sin 2(\theta_m - \alpha) + \\ 2B_2 D_2 [A + B_2 \cos 2(\theta_m - \alpha)] \sin 2(\theta_m - \alpha) - D_2^2 = 0 \end{aligned} \tag{9}$$

式中：

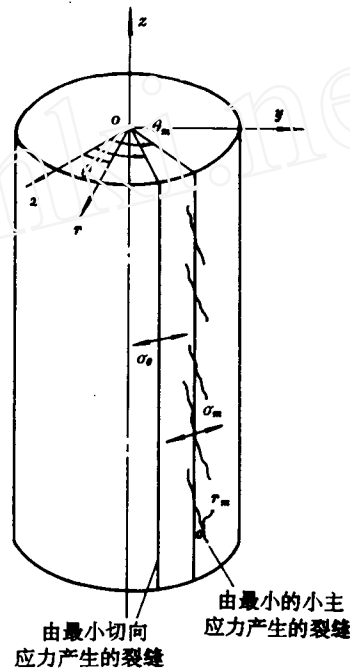


图1 由最小切向应力和最小的小主应力产生的破裂缝示意图

Fig. 1 Breaking fracture caused by minimum tangential stress and minimum minor principal stress

$$\begin{cases} A = (-\sigma_A + \sigma_{z0} - P_s + P_b)/2 \\ B_1 = (1 + \mu)(\sigma_A - P_s) & B_2 = (1 - \mu)(\sigma_A - P_s) \\ D_1 = 2\tau_{yz}\cos\theta_m - 2\tau_{zx}\sin\theta_m & D_2 = (\tau_{zx}^2 - \tau_{yz}^2)\sin 2\theta_m - 2\tau_{yz}\tau_{zx}\cos 2\theta_m \end{cases} \quad (10)$$

由式(9)可见大次主应力 σ_A 的方向 α 以隐函数形式给出, 不能用显式表示, 在计算机上用逐次逼近算法求得, 初始值为 θ_m 。

把由式(9)求得的 α 代入式(8), 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, 得到类似于式(5)的大次主应力 σ_A 与压裂参数的关系式。 σ_A 以二次函数求解方式给出

$$\sigma_A = (-b + \sqrt{b^2 - 4ac})/2a \quad (11)$$

式中:

$$\begin{cases} a = -2\mu\cos 2(\theta_m - \alpha)[1 - 2\cos 2(\theta_m - \alpha)] \\ b = (\sigma_{z0} + T - P_0) - 2[\sigma_{z0} - \mu P_b + (1 + \mu)(T - P_0)]\cos 2(\theta_m - \alpha) - 8\mu P_s \cos^2 2(\theta_m - \alpha) \\ c = [(P_s - P_b + T - P_0)(\sigma_{z0} + T - P_0) + D_1^2] + 2[\sigma_{z0} + \mu(P_s - P_b) + (1 + \mu)(T - P_0)]P_s \cos 2(\theta_m - \alpha) + 4\mu P_s^2 \cos^2 2(\theta_m - \alpha) \end{cases} \quad (12)$$

4 对最大单轴拉应力破裂准则的校核和修正

同样, 研究这个问题时, 作了地应力场的一个主应力方向与钻孔轴向平行的假设。水压致裂法地应力测量在钻孔压裂段岩壁产生裂缝位置上的应力状态, 根据式(1)为

$$\begin{cases} \sigma_\theta = 3\sigma_B - \sigma_A - P_b \\ \sigma_x = -2\mu(\sigma_A - \sigma_B) + \sigma_{z0} \\ \sigma_r = P_b \end{cases} \quad (13)$$

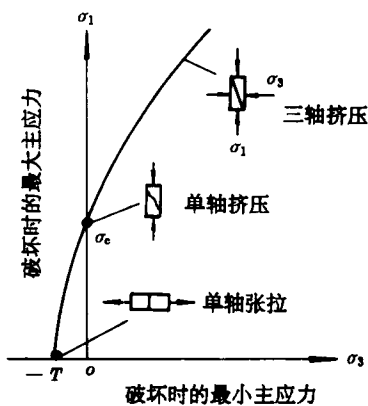
霍克(Hoek E.)和布朗(Brown E. J.)于1980年提出了脆性岩石非线性破坏准则, 已在节理岩体工程中得到广泛应用。其破坏准则形式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + S\sigma_c^2} \quad (14)$$

式中: σ_1 和 σ_3 为岩体破坏时的有效大主应力和小主应力; σ_c 为完整岩石的单轴抗拉强度; m 为描述岩石性质的材料常数, 由实验室测定或现场试验估算; S 为岩体的完整系数, 对完整岩体, $S = 1$ 。为解决 m 由实验测定的麻烦, 霍克和布朗建议按岩体分类指标 RMR 近似估算^[3]。霍克和布朗破坏准则的强度包络线如图2所示。

从霍克和布朗破坏准则基本关系式(14)中, 以 $\sigma_1 = 0$ 和 $\sigma_3 = -T$ 代入, 导出 T 与 σ_c 关系式

$$T = \frac{\sigma_c}{2}(\sqrt{m^2 + 4S} - m) \quad (15)$$



花岗岩: $\sigma_c = 130\text{MPa}$, $m = 25$

图2 Hoek 和 Brown 强度准则的破坏包络线
Fig.2 Breaking envelop curve of Hoek and Brown strength criterion

在式(15)中, 由于 $T > 0$, 因此代数二次方程求根的公式中取正号。根据式(15) 建立 σ_c 和 m 与 T 的关系

$$\sigma_c = 2T / (\sqrt{m^2 + 4S} - m) \tag{16}$$

$$m = S\sigma_c/T - T/\sigma_c \tag{17}$$

式(16)和(17)对新的破裂准则理论的应用非常有用。

在钻孔压裂段产生破裂缝的岩壁上, 由式(13)表达的3个主应力 $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta$ 的大小顺序有6种可能的状态。由于径向应力 σ_r 始终大于零, 所以 σ_r 为小主应力的两种状态是三向均受压的压剪性破坏, 不属于水压致裂法地应力测量的范畴, 本文不予讨论。其余的4种应力状态为

状态 1 ($\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\theta$): $\sigma_r = \sigma_\theta + \sqrt{m\sigma_c\sigma_\theta + S\sigma_c^2}$ (18a)

状态 2 ($\sigma_z > \sigma_r > \sigma_\theta$): $\sigma_z = \sigma_\theta + \sqrt{m\sigma_c\sigma_\theta + S\sigma_c^2}$ (18b)

状态 3 ($\sigma_r > \sigma_\theta > \sigma_z$): $\sigma_r = \sigma_z + \sqrt{m\sigma_c\sigma_z + S\sigma_c^2}$ (18c)

状态 4 ($\sigma_\theta > \sigma_r > \sigma_z$): $\sigma_\theta = \sigma_r + \sqrt{m\sigma_c\sigma_r + S\sigma_c^2}$ (18d)

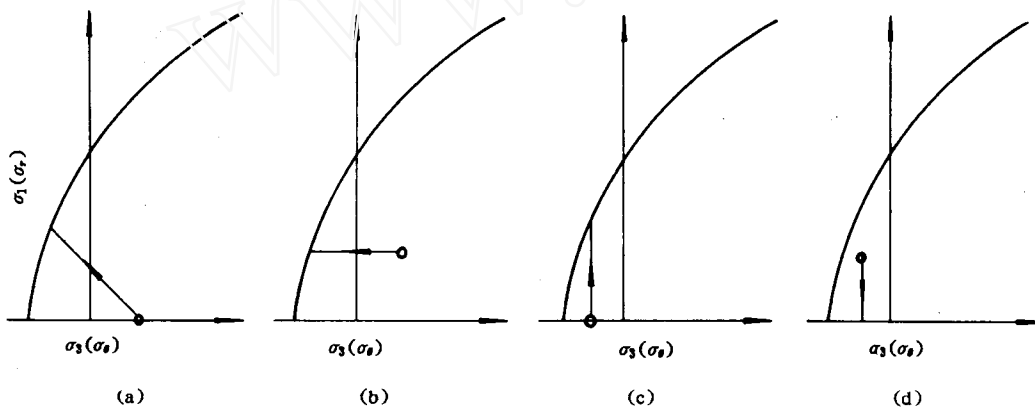


图3 破裂缝岩壁上4种应力状态达到破裂的应力轨迹线

Fig. 3 Stress locus curves of 4 kinds of stress state on rock wall with breaking fracture

产生破裂缝的岩壁上, 4种应力状态随液压 P_w 增加达到破裂的应力轨迹如图3所示。应力状态4的最小主应力 σ_z 不受液压大小的影响, 而最大主应力 σ_θ 随液压增加而减小, 最后达到零, 如图3(d)所示。它的应力轨迹线并不切过强度包络线, 因此不发生破裂。应力状态3, σ_z 为最小主应力的另一状态, 在压裂段岩壁上产生垂直于钻孔轴向的横向破裂缝, σ_{z0} 按维持裂缝张开时的瞬时关闭压力 P_s 确定, 即 $\sigma_{z0} = P_s$ 。而 σ_A 和 σ_B 不能按式(18c)完全确定, 从式(18c)只能得到应力差值 ($\sigma_A - \sigma_B$), 然后根据主应力大小顺序的附加条件, 确定它们的范围。对此, 本文也不再讨论。

应力状态1和2, 切向应力 σ_θ 为最小主应力的两种状态, 在压裂段岩壁上产生平行于钻孔轴向的纵向破裂缝, 与破裂缝方向垂直的 σ_B 由 P_s 确定, 即式(4)。而 σ_A 要按式(18a)和式(18b)计算, 也即对经典理论的计算结果进行校核和修正。

把3个主应力 $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_\theta$ 的表达式(13)代入霍克和布朗破坏准则关系式(18a)和式

(18b), 简化后得到 σ_A 为未知量的代数二次方程, 其解为

$$\sigma_A = (-b + \sqrt{b^2 - 4c})/2 \tag{19}$$

式中: 系数 b, c 根据不同应力状态导出, 其中 b 和 $b^2 - 4c$ 为^[4]

对应力状态1 $[P_b > \sigma_{x0} - 2\mu(\sigma_A - P_s) > 3P_s - \sigma_A - P_b]$:

$$\begin{cases} b = m\sigma_c + 4P_b - 6P_s \\ b^2 - 4c = (m^2 + 4)\sigma_c^2 + 4mP_b\sigma_c \end{cases} \tag{20}$$

对应力状态2 $[\sigma_{x0} - 2\mu(\sigma_A - P_s) > P_b > 3P_s - \sigma_A - P_b]$:

$$\begin{cases} b = m\sigma_c - 2(1 - 2\mu)[(3 - 2\mu)P_s - P_b - \sigma_{x0}] \\ b^2 - 4c = [m^2 + 4(1 - 2\mu)^2]\sigma_c^2 + 4[(1 - 2\mu)\sigma_{x0} + 2\mu(1 - 2\mu)(P_b - 2P_s)]m\sigma_c \end{cases} \tag{21}$$

在式(19)~(21)的推导过程中, 由于水压致裂法地应力测量在完整岩体中进行, 故取 $S = 1$ 。

5 实例

5.1 对钻孔轴向为主应力方向的校核和修正

广州抽水蓄能电站二期工程曾经进行了三维地应力测量, 在高压岔管的勘探平洞中布置垂直、15°倾斜和水平的3个钻孔, 以相同的3个深度分别进行了测量, 获得三维地应力状态的实测资料。以第二测段(测段深度20.93 m)所测得的三维地应力状态为例, 3个钻孔孔壁上切向应力和小主应力沿孔周的变化如图4所示^[5]。由图4可知, 孔周岩壁上小主应力与切向应力沿孔周的变化形态相类似, 但变化幅度前者比后者小, 它们的最大值相差较大, 当沿孔周递减时, 两者逐渐靠近, 最后, 最小值及其所处的极角, 两者比较接近。而应力量值, 最小的小主应力比最小切向应力小0.28~2.10 MPa, 平均小1.14 MPa, 极角平均相对差4.7°, 由最小的小主应力产生的倾斜微裂隙, 与孔轴夹角平均为14.6°。

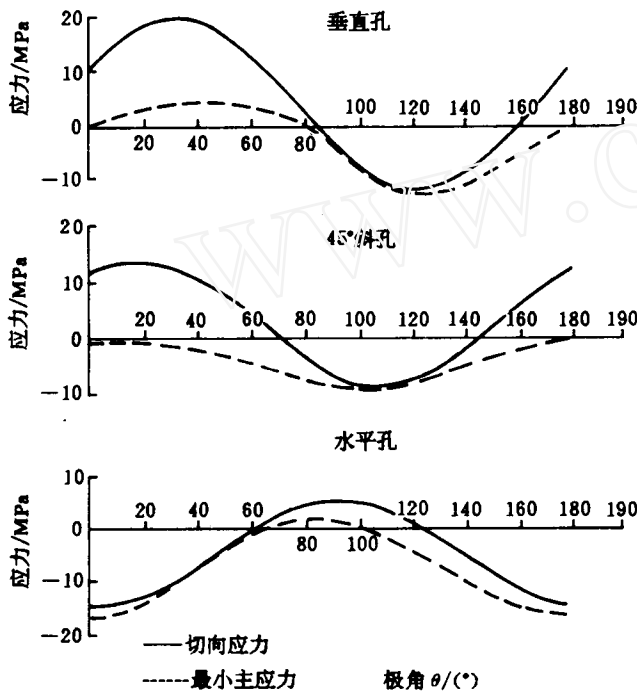


图4 $P_w = 16.08$ MPa 时, 各钻孔岩壁上切向应力和小主应力沿孔周的分布

Fig. 4 Distributions along hole wall of tangential stress and minor principal stress on various bore hole with $P_w = 16.08$ MPa

根据以上理论和式(9)~(12), 对钻孔横截面上大次主应力 σ_A 及其产生的位置 α 进行校核和修正, 其中垂直孔和45°斜孔的修正量列于表1。由表1可见, 大次主应力的量值有0%~22.45%的修正量, 平均为9.76%, 它的极角有0.04~12.82°的修正量, 平均为6.99°。

5.2 对最大单轴拉应力破裂准则的校核和修正

三峡工程永久船闸三闸室中部南边墙2514号钻孔, 进行水压致裂法地应力测量, 获得从高程154.1~94.2 m 共8个测段的二维地应力实测资料。最大测深达104.9 m, 达到三闸首底板高程。

根据8个测段的实测成果, 压裂段产生破裂缝的岩壁上3个主应力的顺序都为 $\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\theta$, 也即都属应力状态1。根据以上理论和式(18)~(21), 对最大水平主应力 σ_H 进行校核和修正。

校核计算与钻孔压裂段围岩的单轴抗压强度 σ_c 和材料常数 m 密切相关, 它们在各测段各不相同, 所以都应采用测段部位的强度和材料常数。可是它们在水压致裂法地应力测量时都没有直接测得, 而测得了测段围岩的抗拉强度 T 值。因此, 对最大水平主应力 σ_H 的校核计算, 可采用两种形式: 一是岩石抗压强度采用室内测定, $\sigma_c = 130 \text{ MPa}$, 而 m 采用现场测定(根据实测的抗拉强度计算); 二是岩石抗压强度 σ_c 采用现场测定(根据实测的抗拉强度计算), 而 m 采用岩体分类指标 RMR 确定, $m = 25$ 。这两种校核计算结果列于表2。由表2可知, 用新的水压致裂法地应力测量的破裂理论, 对 σ_H 进行校核计算, 有大约为0.5%~8.3%的修正量, 同时可知这两种校核计算结果非常接近, 平均修正量, 前者为4.69%, 后者为4.37%。

表1 对 σ_λ 的量值和方向的校核计算

Table 1 Check calculation of value and direction for σ_λ

小次主应力 σ_B / MPa	经典理论			校核计算		修正量	
	大次主应力 $\sigma_\lambda / \text{MPa}$	大次主应力 极角 $\alpha / (^\circ)$	大次主应力 $\sigma_\lambda / \text{MPa}$	大次主应力 极角 $\alpha / (^\circ)$	大次主应力 $\sigma_\lambda / \text{MPa}$	大次主应力 极角 $\alpha / (^\circ)$	
垂直孔	7.7	14.93	55	14.54	54.96	0.39	0.04
	7.7	15.10	59	11.71	47.13	3.39	11.87
	7.2	13.60	50	11.50	43.90	2.10	6.10
45°斜孔	7.1	11.57	135	9.72	125.07	1.85	9.93
	7.4	12.70	116	12.37	117.17	0.33	-1.17
	7.9	14.47	106	14.47	93.18	0	12.82

表2 对 σ_H 的量值的校核计算

Table 2 Check calculation of value for σ_H

测段深度 /m	破裂缝岩壁的应力状态			经典理论 计算的 σ_H	校核计算 I		校核计算 II	
	σ_r	σ_z	σ_θ		σ_{H1}	修正率/%	σ_{HII}	修正率/%
1~44.97	13.0	0.85	-1.30	7.20	7.78	7.99	7.62	5.84
2~50.00	16.0	0.81	-4.55	7.75	8.08	4.24	8.07	4.11
3~61.93	14.0	1.07	-1.25	8.64	9.36	8.34	9.19	6.41
4~77.46	16.3	0.99	-5.40	9.59	10.12	5.57	10.17	6.05
5~83.95	15.4	1.09	-6.10	9.09	9.52	4.69	9.59	5.45
6~92.02	16.8	1.33	-5.70	9.90	10.22	3.26	10.28	3.79
7~98.85	15.8	1.19	-6.10	10.40	10.63	2.19	10.69	2.78
8~104.87	14.5	1.31	-3.30	11.30	11.44	1.20	11.36	0.53

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 Kim K and Franklin J A 编. 地应力测量与研究. 丁健民译. 北京: 地震出版社, 1982
- 3 霍克, 布朗. 霍克-布朗破坏准则(1988年修正). 见: 水利和水电边坡工程信息网编. 高边坡工程. 1993, (2): 35~42
- 4 刘允芳, 刘 鸣. 水压致裂法地应力测量破裂准则的探讨. 长江科学院院报, 1995, 12(2): 36~43
- 5 刘允芳, 高建理. 水压致裂法三维地应力测量的原理和在广州抽水蓄能电站的实践. 见: 第三届全国地应力会议专辑. 北京: 地震出版社, 1994, 26~37

CHECK AND MODIFICATION FOR GEOSTRESS MEASUREMENT BY HYDRAULIC FRACTURING TECHNIQUE

Liu Yunfang

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010)

Abstract The classical theory of geostress measurement by hydraulic fracturing technique is further explored. A thorough study is made for the assumption of borehole direction consistent with principal stress direction and the breaking criterion of maximum uniaxial tension stress, which doesn't accord entirely with practice. The suggestions are made to check and modify the measured data of geostress and the specific calculation formulas are derived with some examples for illustration.

Key words geostress measurement, hydraulic fracturing technique, breaking criterion, check, modification

第一届结构工程与力学进展国际会议 明年在汉城召开

正值国际杂志《结构工程与力学》创刊5周年之际, 计划1999年8月10~13日在汉城召开第一届结构工程与力学进展国际会议。会议主题含专家系统、复合材料、结构力学、地震工程、软件开发、岩土力学、土-结构物相互作用、生物力学、本构关系等丰富内容。今年10月31日为论文摘要截止日期。会议注册费为400美元, 只有至少预交50%注册费的论文才收入会议论文集。

有关此次会议的进一步信息可通过下列地址获取: Secretariat, ASEM'99, Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea.

(王可钧译自该会议通知)