

文章编号: 1001-1986(2007)03-0042-04

水压致裂法测量裂隙岩体的地应力研究

刘文剑, 吴湘滨, 王东

(中南大学地学与环境工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要:通过对水压致裂法形成的钻孔印模分析,运用Taylor公式和最小二乘法迭代算法,计算纵向和横向裂隙岩体地应力大小及其误差。首先确定大地、裂隙和钻孔坐标系,根据印模曲线确定裂隙方位;然后用Taylor公式和最小二乘法迭代算法,计算应力分量;最后计算出主应力大小及其误差。将此方法应用于雪峰山隧道区ZK6钻孔的地应力场计算,得出其最大水平应力为13 MPa,方位113°左右,这与地质构造法实测的应力场相吻合,说明这一方法合理可行,具有较好的实用价值。

关键词:裂隙岩体;水压致裂;应力计算;误差分析

中图分类号: TU459.4 文献标识码: A

Study on the geo-stresses measurement of fracture rock-mass with hydro-fracturing of borehole

LIU Wen-jian, WU Xiang-bin, WANG Dong

(School of Geoscience and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on moulage analysis of bore-hole formed by hydro-fracturing, a method of account and error reliability analysis on longitudinal and transverse fracture rock-mass is proposed with Taylor expressions and iterative least-squares fitting. First, the bore-hole, fracture plane and earth coordinate system are confirmed, and cranny azimuth is confirmed by moulage curve. Then, stress component are calculated with Taylor expressions and iterative least-squares fitting. Lastly, principle stress and its error are done. According to calculative method and geodesic datum, the maximal horizontal stress (13 MPa, 113° or so) at Borehole ZK6, Xuefeng Mountain, is educed. The result is similar to that of geologic reconnaissance and illuminates that the method is logical and applicable.

Key words: fracture rock-mass; hydro-fracture; stress determination; error analysis

近20年来,水压致裂法由于其测量深度深,操作简单,测试周期短,以及不需要岩石力学参数参与计算等优点,在国内外得到广泛应用。但由于岩层和岩体受地应力长期作用,形成诸如褶皱、节理、断层、劈理以及其它各种面状和线状构造等,从而在岩体中存在大量张开裂隙或闭合裂隙。而传统的水压致裂方法假设围岩是线性、均质、各向同性的弹性体,岩体渗流符合Darcy定律,3个主应力方向之一与钻孔轴向平行,这与岩体赋存特征不符。为此,国内外专家学者对裂隙岩体地应力分布计算模型作了大量的研究^[1-4]。笔者利用雪峰山隧道区钻孔水压致裂法原地应力测量结果,运用Taylor公式和最小二乘法迭代算法,推导出新的计算方法,并通过实测数据加以验证及误差判断。

1 水压致裂法的常见破裂形态

测量地应力的水压致裂法是借助封隔器在垂直

钻孔中测点处封隔一段,作为压裂段,通过加压段的水压力,使孔壁岩石破裂,然后用印模器或通过安装电视照相机,得出压裂裂缝,借助罗盘测定压裂裂缝方向,并根据压裂时的水压力计算岩体初始应力。由于不同的裂隙和应力赋存状态,产生出不同的印模形态。根据雪峰山隧道区测孔资料,可归纳出4种不同印模形态(图1—图4)。

图1中水压裂痕为纵向裂缝,可以把这一部分

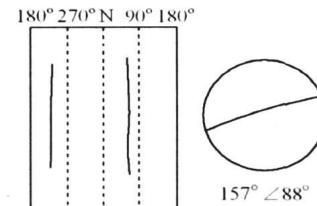


图1 纵向裂痕

Fig. 1 Longitudinal cracks

收稿日期: 2006-12-06

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目(2003-318-789-02)

作者简介: 刘文剑(1970-),男,湖南桃江人,博士,主要从事地下水和地质灾害研究

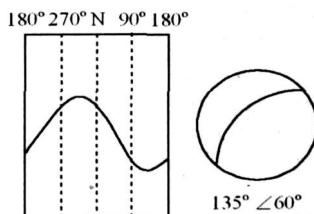


图 2 横向裂痕

Fig. 2 Transverse cracks

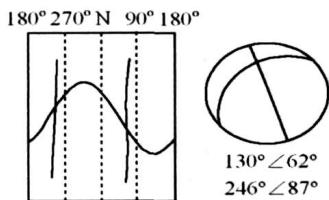


图 3 纵向与横向裂痕

Fig. 3 Longitudinal and transverse cracks

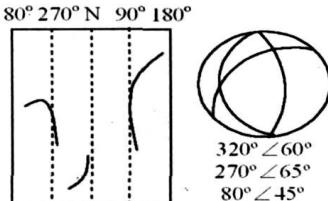


图 4 不规则裂痕

Fig. 4 Anomalous crack

作为线性、均匀、各向同性的弹性体考虑, 破裂裂痕产生在孔壁拉应力最大的部位, 根据常规的水压致裂方法可测出最大、最小水平主应力。图 2 中水压裂缝为横向裂痕, 主要由于裂隙方位和内部主应力状态不同, 而且在钻孔中测量也不能忽视剪应力的影响, 如果还用传统的水压致裂公式就不合适, 下文将详细推导新公式。图 3 中有纵向和横向裂痕相互交叉, 可以假设, 如果横向裂缝先生成, 那么, 在横向裂痕附近应力场被改变, 不可能形成图 3 中交叉裂缝。所以, 只有先形成纵向裂痕, 在形成过程中带动横向裂隙的扩展。图 4 中裂缝方位杂乱, 无法判断从某个软弱面上的一点先发展成纵向或横向裂痕, 所以类似测点无法判断应力场。

2 裂隙岩体地应力计算^[5-7]

设观测值方程组在大地坐标系建立而成, 大地坐标系为 X 、 Y 、 Z , 其中 Z 为铅直方向, X 轴指向北, Y 轴指向东; 设钻孔坐标系 x 、 y 、 z , z 为钻孔轴线方向(指向孔口为正), 轴 x 为水平方向, 轴 y 按右手坐标系定向, 钻孔倾角为 α'_k , 走向为 β'_k 。根据裂隙面走向、倾向和倾角投影到大地坐标系中, 设裂

隙面走向为 β_k , 倾角为 α_k , 取裂隙面走向轴为 x_k , 裂隙面倾向轴为 y_k , 裂隙面上与走向相垂直的线为轴 z_k (见图 5)。

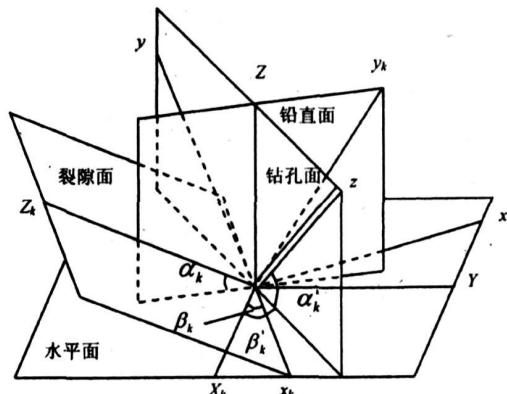


图 5 钻孔坐标系、裂隙面坐标系与大地坐标系相对关系

Fig. 5 The relation of bore-hole, joint plane

and earth coordinate systems

设大地坐标系上对应的应力表示为 σ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$), 裂隙面坐标系中对应的应力为 $\sigma_y^{(k)}$ ($i, j = 1, 2, 3$), 钻孔坐标系中对应的应力为 $\sigma_z^{(k)}$ ($i, j = 1, 2, 3$), 根据裂隙面坐标系, 大地坐标系几何关系, 可得相对方向余弦。实际上, 由于裂痕处强度相对其他部位低得多, 瞬时关闭应力通常对应于垂直裂痕的方向, 因此, 可得如下等式:

$$\sum_{i,j=1}^3 \sigma_{ij} n_i^{(k)} n_j^{(k)} = p_s^{(k)} = \sigma_y^{(k)} \quad (k = 1, 2, \dots, K), \quad (1)$$

式中 K 为被水压激活的张开裂隙总数; $p_s^{(k)}$ 为在第 k 条裂痕的瞬时关闭应力; $n_i^{(k)}$ 为方向余弦; $\sigma_y^{(k)}$ 为第 k 条裂痕的法向应力。

通常水压致裂法测量地应力时, 采用垂直钻孔测量地应力, 可以把钻孔坐标系和大地坐标系重合, 从而简化实测数据的处理, 即: $\sigma_x = \sigma_z^0$, $\sigma_y = \sigma_y^0$, $\sigma_z = \sigma_z^0$, $\beta_k = \theta_0$ 。为了确定地应力方位, 裂隙段需多次重张试验, 以便计算应力的 6 个未知量。根据上述裂痕形态分析, 破裂裂痕可分为横向和纵向裂痕。

对于横向裂痕而言, 根据式(1), 为了便于计算可以写成:

$$p_s^{(k)} = f_k(n_1^{(k)}, n_2^{(k)}, n_3^{(k)}, s_1, s_2, \dots, s_6), \quad (2)$$

式中 $s_1 = \sigma_x$, $s_2 = \sigma_y$, $s_3 = \sigma_z$, $s_4 = \tau_{xy}$, $s_5 = \tau_{yz}$, $s_6 = \tau_{xz}$, τ 为剪切应力。

设已知点 s_j^0 ($j = 1, 2, \dots, 6$), 用 Taylor 公式将式(2)的非线性问题化为线性问题:

$$p_s^{(k)} = f_k(n_1^{(k)}, n_2^{(k)}, n_3^{(k)}, s_1^0, s_2^0, \dots, s_6^0) + \sum_{j=1}^6 \frac{\partial f_k(n_1^{(k)}, n_2^{(k)}, n_3^{(k)}, s_1, s_2, \dots, s_6)}{\partial s_j} \times (s_j - s_j^0). \quad (3)$$

由上式可得:

$$\Delta p_s^k = \sum_{j=1}^6 G_{kj} \Delta s_j, \quad (4)$$

式中 $\Delta p_s^k = p_s^k - p_s^0$, $\Delta s_j^k = s_j^k - s_j^0$;

$$G_{kl} = -\frac{\partial f_k(n_1^{(k)}, n_2^{(k)}, n_3^{(k)}, s_1, s_2, \dots, s_6)}{\partial s_j}. \quad (5)$$

为解式(3), 设目标函数为 Q , Q 为数据残差平方和:

$$Q = \sum_{k=1}^M \left(\sum_{j=1}^6 \Delta p_s^k - G_{kj} \Delta s_j \right)^2, \quad (6)$$

可得:

$$s_j = s_j^0 + \sum_{l=1}^6 G_l^{-g} \sum_{k=1}^M G_{kl} (p_s^k - p_s^0), \quad (7)$$

$$\text{式中 } G_l^{-g} = \left(\sum_{k=1}^M G_{kl} G_{kl} \right)^{-1}. \quad (8)$$

重复迭代上述过程, 直到 Q 值达到最小, 算出应力分量, 由此再算出主应力 σ_i ($i=1, 2, 3$) 和方向余弦 l_i ($i=1, 2, 3$)。

对于纵向裂痕而言, 如图 1、图 3 所示, 在实际测量中, 往往很难判断这些是否是垂直的裂隙面造成的, 还是完整岩体最大主应力方位。一般而言, 根据测点埋藏深度, 或抽取岩芯的结构完整, 可采用常规的水压致裂法计算法, 即:

$$p_s = \sigma_2, p_r = 3\sigma_2 - \sigma_1 - p_0, \quad (9)$$

式中 p_s 为瞬时关闭应力; p_r 裂隙重张应力; p_0 为岩石空隙压力; σ_1, σ_2 为水平主应力, 最大水平主应力 σ_1 的方位为孔壁破裂方位 θ_0 。

3 地应力的方位和误差分析

通过上述分析, 产生横向和纵向裂痕的瞬时关闭应力 p_s^k 和孔壁破裂方位 θ_0 , 决定了岩体应力状态。而在实测当中, p_s^k 和 θ_0 往往有一些测量误差, 下面对横向裂痕和纵向裂痕分别讨论。

3.1 横向裂痕几何分析

钻孔横向裂痕印模展开后, 可以在印模上建立以钻孔轴某一条轴向线为竖轴 h , 钻孔印模圆周 C_t 为横轴, 并测出该轴向线与钻孔圆心轴组合平面的走向 β'' , 见图 6。图 6 中 S_0 为钻孔印模圆周长, S_m 为破裂面最高点的方位处的圆周长, A 为裂痕曲线振幅。根据 S_0, S_m, A 的几何关系, 可求出裂痕面相对裂痕倾角 r' , 钻孔圆柱坐标中的相对走向 θ_0' , 如果钻孔是铅垂方向, 则裂痕面裂隙倾角为 r , 裂痕走向为 θ_0 。

为了计算 S_m, A , 把圆周 S_0 分为 8 等份, 这样在

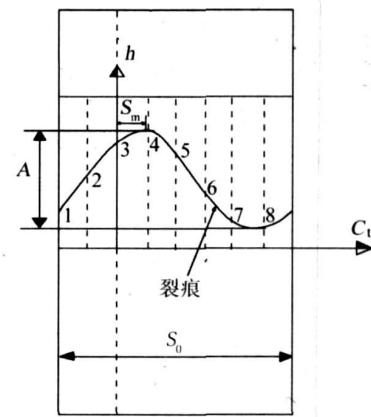


图 6 钻孔横向裂痕展开图

Fig. 6 Transverse crack traces on the bore-hole surface

裂痕曲线上有 8 个点, 可以量测到测点($h_i, c_t^{(i)}$) ($i=1, 2, \dots, 8$), 可以得 $h_i, c_t^{(i)}, S_m, S_0, A$ 的函数关系式:

$$h_i = \frac{A}{2} \cos \left\{ \frac{c_t^{(i)} - (S_m + \frac{S_0}{4})}{S_0} 2\pi \right\} \quad (i=1, 2, \dots, 8), \quad (10)$$

式(10)可化为:

$$h_i = \alpha a_t^{(i)} + \beta b_t^{(i)} \quad (i=1, 2, \dots, 8), \quad (11)$$

$$\text{式中 } \alpha = \cos \left\{ \frac{S_m}{S_0} 2\pi \right\}; \beta = \sin \left\{ \frac{S_m}{S_0} 2\pi \right\}; \quad (12)$$

$$a_t^{(i)} = \frac{A}{2} \cos \frac{c_t^{(i)} - \frac{S_0}{4}}{S_0} 2\pi, \quad ,$$

$$b_t^{(i)} = \frac{A}{2} \sin \frac{c_t^{(i)} - \frac{S_0}{4}}{S_0} 2\pi. \quad (13)$$

用量测点数据代入式(10), 然后用最小二乘法求得 S_m, A 和曲线上的任意位置数据, 从而可得裂隙相对倾角 r' 和钻孔圆柱坐标中的相对走向 θ_0' :

$$r' = \arg \left\{ \frac{A S_0}{S_0} \right\}, \theta_0' = \frac{\pi}{2} + \frac{S_0' S_m}{S_0} + \beta'', \quad (14)$$

式中 S_0' 为对应圆周 S_0 的总圆弧度。

3.2 裂隙组误差分析

设测量段有裂隙 K 条($K \geq 6$), Δp_s^k 为压应力 p_s^k 的增量, 则根据 Taylor 公式可得主应力 σ_i ($i=1, 2, 3$) 增量为:

$$\Delta \sigma_i = \sum_{k=1}^{3K} \frac{\partial \sigma_i}{\partial p_s^k} \Delta p_s^k. \quad (15)$$

如果压应力 p_s^k 的增量范围为 $\pm \epsilon_k$, 则主应力误差范围 E_i 为:

$$E_i = \sum_{k=1}^{3K} \left| \frac{\partial \sigma_i}{\partial p_s^k} \right| \epsilon_k. \quad (16)$$

同理可推出主应力方位和误差范围:

$$l_i = l_{0i} + \sum_{k=1}^{3K} l_{i,k} \Delta \theta_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (17)$$

3.3 纵向裂隙面误差分析

纵向裂痕展开图与横向裂痕展开图类似, 如图 7 所示, 根据裂缝曲线可得裂隙面在钻孔圆柱坐标中的相对走向 θ_0' , 如果钻孔是铅垂方向, θ_0 为裂隙面走向, 主应力大小和方位与裂隙组误差分析类似。

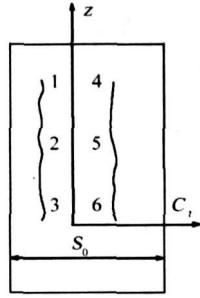


图 7 钻孔纵向裂隙展开图

Fig. 7 Longitudinal crack traces on the bore-hole surface

3.4 迭代分析

应力在式(3)一式(8)计算过程中都设有已知初值, 并通过已知初值反复迭代, 使目标函数 Q_i 达到最小值, 从而算出应力分量。具体步骤如下:

a. 确定已知条件: 大地、裂隙和钻孔坐标系, 以及钻孔倾角为 α_k' , 走向为 β_k' 。测量出 p_s^k 和用最小二乘法求得 S_m 、 θ_0' 、 r 的平均值, 以及误差范围, 设 S_m 、 p_s^k 、 θ_0' 、 r 的平均值为固定初始值, 相应误差为固定增量, 应力 s_j^0 ($j = 1, 2, \dots, 6$) 初始值为 0, 再分别给应力一个适当可变增量, 分别代入式(6)、(7), 得到第 1 次迭代结果 s_j^1 、 Q^1 。

b. 以前一次迭代结果 $s_j^{(k-1)}$ 、 $Q^{(k-1)}$ 为初始值, 重复第 a 步, 得到 s_j^k 、 Q_k 值, 对比 $Q^{(k-1)}$ 和 Q^k 大

小, 当 $Q^{(k-1)} \geq Q^k$, 则重复计算; 当 $Q^{(k-1)} < Q^k$, 则迭代结果 $s_j^{(k-1)}$ 为所要求的应力分量。

c. 用 b 步结果计算主应力 σ_i ($i = 1, 2, 3$), 将 p_s^k 、 r 、 θ_0' 的误差范围分别代入式(16)、(17), 即可得主应力和方位的误差范围。

4 应用实例

中国地震局地壳应力所承担雪峰山隧道区地应力测量工作^[8], 采用铅垂钻孔水压致裂法, 分别对 ZK2、ZK3、ZK4、ZK6、ZK7 5 个钻孔进行测试。本文以 ZK6 来说明裂隙岩体地应力计算模型是否符合实际情况。ZK6 水压致裂法测量应力数据、钻孔裂痕展开图几何分析量测和 S_m 、 S_0 、 A 的计算结果见表 1。

表 1 中, 由于序号 1 裂痕曲线杂乱, 无法判断应力场的结果, 序号 2、3、7、8 为纵向裂痕, 其余为横向裂痕。根据前文推导, 可以得出最大水平应力 σ_H 、最小水平应力 σ_h 、最大水平应力方位 θ 和自重应力 $\sigma_{\text{自}}$, 结果如表 2。

表 2 中, 纵向裂痕和横向裂痕计算结果略有不同, 主要是因为原生裂隙在形成过程中原有的应力场局部改变等因素引起的。计算出最大水平主应力方位为 113° 左右, 这与地质勘察的结果类似, 说明上述推导具有实用性。但是在运用过程中, 常出现无法判断应力场的方位, 而且不能计算应力大小的情况, 主要是因岩体具有大量的原生裂隙, 导致岩体粘聚力和摩擦力降低, 在水压致裂过程中, 岩体可能在试验前或试验中崩塌, 这是有些曲线不能利用的原因, 需进一步研究。

表 1 ZK6 钻孔水压致裂法量测和裂痕计算结果

Table 1 Geo-stress testing and calculative results of bore hole ZK6 with hydro-fracturing

序号	深度 m	压裂参数 MPa				裂痕曲线参数/mm		
		P_b	P_r	P_s	P_0	S_0	S_m	A
1	227.00	12.7 ± 0.2	8.22 ± 0.1	6.72 ± 0.2	1.96 ± 0.1	228		
2	274.28	14.69 ± 0.1	10.19 ± 0.1	7.94 ± 0.1	2.42 ± 0.1	228	73.4 ± 1	
3	277.48		7.22 ± 0.2	6.47 ± 0.1	2.45 ± 0.1	229	75.2 ± 1	
4	356.00	17.74 ± 0.3	11.74 ± 0.2	9.47 ± 0.1	3.22 ± 0.1	231	91.5 ± 1	26.8 ± 1
5	434.00	16.25 ± 0.2	11.75 ± 0.2	11.0 ± 0.1	3.99 ± 0.1	227	85.6 ± 1	104.5 ± 1
6	445.00	17.11 ± 0.4	14.11 ± 0.2	12.61 ± 0.3	4.1 ± 0.1	230	74.2 ± 1	117.1 ± 1
7	495.00		9.35 ± 0.1	9.35 ± 0.1	4.59 ± 0.1	224	76.8 ± 1	
8	498.00	19.13 ± 0.1	11.63 ± 0.1	10.1 ± 0.1	4.62 ± 0.1	225	68.4 ± 1	
9	554.00	15.93 ± 0.1	11.43 ± 0.1	10.68 ± 0.2	5.16 ± 0.1	220	91.5 ± 1	138.7 ± 1
10	627.00	18.89 ± 0.2	12.89 ± 0.2	11.39 ± 0.1	5.88 ± 0.1	218	94.1 ± 1	150 ± 1
11	637.00	14.49 ± 0.1	11.49 ± 0.1	10.74 ± 0.1	5.98 ± 0.1	224	83.9 ± 1	132 ± 1
12	654.00	18.41 ± 0.1	14.66 ± 0.2	12.4 ± 0.1	6.14 ± 0.1	226	94.7 ± 1	121.9 ± 1

注: P_b —— 岩石破裂压力, P_r —— 裂缝重张压力, P_s —— 瞬时关闭压力, P_0 —— 岩石空隙压力, S_0 —— 钻孔印模圆周长,

S_m —— 破裂面最高点的方位处的圆周长 A —— 裂痕曲线振幅。

文章编号: 1001-1986(2007)03-0046-03

粘土的杨氏模量试验研究

李建中, 何盛, 徐力生

(中南大学地学与环境工程学院勘查与基础工程研究所, 湖南长沙 410083)

摘要: 三轴试验被应用于评定未扰动和重塑 Kitan 粘土的弹性性质。Kitan 粘土的杨氏模量分别在最初加载、蠕变后, 小的周期加载和滞回圈时测定。为了测定在应变小于 0.01% 时的准确性, 试验采用局部位移测量传感器(LDT)。试验结果显示: 在相同应力水平条件下, 未扰动 Kitan 粘土的杨氏模量大于重塑土; 对于同一种粘土, 在应变率大的情况下, 它的杨氏模量同样大; 在应变小于 0.01% 时, 未扰动 Kitan 粘土呈线弹性。

关键词: 杨氏模量; 应变率; 应力水平

中图分类号: TU432 文献标识码: A

Experimental research on Young Modulus of clay

LI Jian-zhong, HE Sheng, XU Li-sheng

(College of Geoscience and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Triaxial compression tests were performed on undisturbed and reconstituted Kitan clay to investigate elastic property of clay. Young Modulus of Kitan clay was measured during initial loading, after creep deformation, within small cyclic loading and global unloading-reloading. In order to measured strain smaller than 0.01% accurately, local displacement transducer (LDT) was used during the tests. The test results showed that: Young Modulus of undisturbed Kitan clay is much bigger than that of reconstituted one under the same stress level; Young Modulus of the same clay under high strain rate is bigger than that of small strain rate; Undisturbed Kitan clay showed perfect linear elastic property within small strain (smaller than 0.01%).

Key words: Young Modulus; strain rate; stress level

收稿日期: 2006-10-08

作者简介: 李建中(1966—), 男, 湖南岳阳人, 博士, 教授, 从事土力学和岩土工程方面的教学科研工作.

表 2 地应力大小和方位

Table 2 Magnitude and orientation of geo-stresses

	σ_H /MPa	σ_h /MPa	σ_z /MPa	$\theta/(^\circ)$
纵向裂隙	12.28±2.5	8.465±2	10.04±2.3	115±2
横向裂隙	13.56±2.4	7.624±1.8	9.4±2.1	112±2.8

5 结论

a. 通过对水压致裂法形成的钻孔印模分析, 提出用 Taylor 公式和最小二乘法迭代算法, 计算纵向和横向裂痕岩体地应力大小及其误差。首先确定大地、裂隙和钻孔坐标系, 根据印模曲线确定裂隙方位; 然后用最小二乘法迭代算法, 算出应力分量; 最后算出主应力大小及其误差。

b. 根据推导的计算方法, 结合 ZK6 钻孔实测数据, 对雪峰山隧道区应力场计算, 得出最大水平应力在 13 MPa, 方位 113° 左右, 这与地质勘察结果基本吻合, 说明方法的实用价值。

在研究中得到王兰生教授、张志龙博士、王跃飞主任工程师 黄辉高级工程师、蒋成海高级工程师等

的指导和帮助, 在此表示感谢。

参考文献

- [1] 陈群策, 毛吉震, 侯砚和, 等. 原生裂隙对水压致裂应力测量结果的影响[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 279—282.
- [2] 孙宗顾, 张景和. 地应力在地质断层构造发生前后的变化[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 3964—3969.
- [3] 尤明庆. 水压致裂法测量地应力方法的研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 350—353.
- [4] ASK D. New developments in the Integrated Stress Determination Method and their application to rock stress data at the Aspo HRL, Sweden[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43: 107—126.
- [5] 刘允芳. 在单钻孔中水压致裂法的三维地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 192—196.
- [6] 王建军. 应用水压致裂法测量三维地应力的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 19(2): 229—233.
- [7] HAYASHI K, SATO A, ITO T. In situ stress measurements by hydraulic fracturing for a rock mass of weakness with many planes[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1997, 34(1): 45—58.
- [8] 成都理工大学. 邵阳至怀化高速公路雪峰山隧道详细工程地质勘察说明书[R]. 2004.