

文章编号:1006-7329(2001)06-0109-05

声发射凯塞效应结合岩体结构 分析测量地应力的新进展

周小平, 邓 梦, 章福生

(1. 上海交通大学 建工学院, 上海 200030; 2. 重庆大学 建筑城规学院, 重庆 400045; 3. 重庆大学 建设管理与房地产学院, 重庆 400045)

摘要: 本文论述了用岩体结构分析结合声发射 Kaiser 效应试验测量地应力的问题。通过和传统现场地应力测量方法比较, 说明该法具有更为简单、更为经济、准确度高等优点, 便于大量测量, 以寻求区域性应力变化规律。

关键词: 结构分析; 地应力; 声发射; Kaiser 效应

中图分类号: TU112.5; TU459+.4

文献标识码: A

自从凯塞(Kaiser)效应问世以来。国内外许多专家、学者不断探索和研究各种应用凯瑟效应来测量原地应力的方法。张景和^[1]利用岩石声发射 Kaiser 效应测量地应力; 日本的金川中^[2]等(1981)为 Kaiser 效应的实际运用做了卓越的研究, 他们利用此法测定日本真鹤半岛应力被公认为声发射 Kaiser 效应的成功实例。

岩石声发射 Kaiser 效应测量地应力与传统的应力解除法、水力压裂法相比, 具有简单、直观、经济的优点, 便于大量测试, 以寻求区域性地应力变化规律。因此, 该法是一种很有前途的测量地应力方法。

但是凯塞效应测量地应力还存在许多的问题尚待进行深入的研究, 其中与生产实际联系最为密切也是最关键的是地应力的方向如何确定的问题。以往人们使用 Kaiser 效应测量原岩应力需要在 180° 的范围内进行全方位测试(一般每隔 5° 取样)。因此试样数量多, 测试工作量大, 费用高; 同时, 由于多周期构造运动的作用, 使岩体的构造发生了变化, 也使区域内的构造应力或原岩应力的大小、方向发生了量和质的变化。而以往所进行的 Kaiser 效应测定原岩应力均在水平或垂直方向取样, 故可能所取得试样中无一是真正处在主应力方向上的。由此测试所得的结果就应是地应力场的一个分力, 与真正的原岩应力值就会有一定的差别, 甚至相去甚远。正是这些原因, 大大影响了 Kaiser 效应测量原岩应力这一种方法在实际中的运用, 不能充分发挥其简单、经济、便于多点测量以寻求区域地应力变化规律的优点。

为此作者在前人工作经验的基础上, 将岩体结构分析与声发射 Kaiser 效应测量原岩应力这两种各自独立的方法有机的结合起来, 利用岩体结构分析方法确定原岩应力的主方向, 运用声发射 Kaiser 效应在室内测定原岩应力的大小, 以推动 Kaiser 效应在工程中的运用和发展。

1 地应力场分析原理

岩体在构造应力作用下, 发生两种形式的断裂: 张性断裂与剪切断裂。

张性断裂产生于最小主应力(σ_3), 即最大引张方向的垂直面上。也就是说, 张性断裂面与 σ_1 和

• 收稿日期: 2001-09-21

作者简介: 周小平(1970-), 男, 江西瑞金人, 博士后, 主要从事岩土工程方面的研究。

σ_2 应力轴面的方向一致。

剪切断裂产生于与最大主应力(σ_1)方向呈 $(45^\circ - \psi/2)$ 角的平面上, (ψ 是岩体的内摩擦角, 大致是 30°), 与 σ_1 和 σ_3 轴面互相垂直, 并且呈共轭发育, 其夹角之锐角的等分面为与 σ_1 和 σ_2 轴面, 其夹角之钝角得等分面为 σ_2 和 σ_3 轴面, 它们的组合交线的方向与中间主应力轴(σ_2)的方向平行。

1.1 X 断裂的应力场分析

1) 平面 X 断裂应力场分析

当岩层为水平时, 它们所形成的应力场特征是: (a) 层面的赤平极射坐标与基圆重合, 平面 X 节理的赤平极射投影为两条过圆心的直线; (b) 两组节理相交形成的锐角的等分面为应力场的最大主应力所在方向, 其钝角的等分面为应力场的最小主应力所在方向; (c) 两组节理的组合交线在赤平极射投影面上为一点, σ_2 就在两节理面的交线方向上。

当岩层为倾斜、褶皱时, 平面 X 断裂的产状也随之变化, 这时利用赤极射影方法将岩层以其走向线为轴旋转至水平位置, 断裂也随之旋转, 从而恢复 X 断裂的原始产状和组合特征, 由此就可以方便地判断出平面 X 断裂。

2) 侧面 X 断裂的应力场分析

为了说明侧面 X 断裂的应力场的特征, 下面举利用赤平投影方法来分析之。

设有一倾斜岩层, 产状为 $N20^\circ E, SE, \angle 20^\circ$, 沿层面发育一系列层间错动(上盘向上错动)。同时, 还发育有反倾向的冲断层, 它们的产状为 $N10^\circ W, SW, \angle 60^\circ$ 。层间错动与冲断层两者组成侧面 X 断裂。

作层间错动面和冲断层的赤平极射投影图(图 1), OQ 方向即为最大主应力轴(σ_1)的方向, PQ 方向就是中间主应力轴(σ_2)方向, OH 即为最小应力轴(σ_3)的方向。

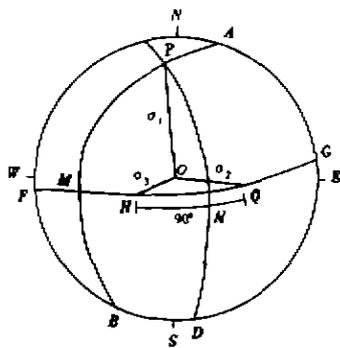
1.2 断层的应力分析

关于断层形成的应力场特征, 我们举例说明之。

设断层的产状为 $N10^\circ E, SE, \angle 60^\circ$, 断层面上擦痕倾向方位为 $S50^\circ E$, 并显示上盘向下错动, 为俯冲断层, 求其形成的应力场特征。

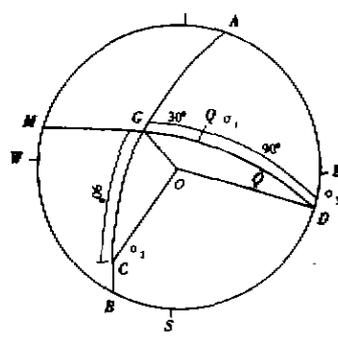
1) 作断层面及其擦痕的赤平极射投影, 如图 2。大圆 AGB 为断层面, GO 为断层面上的擦痕, 箭头表示断层上盘岩层的移动方向;

2) 为了便于形象地理解, 先作出该断层形成的力学机制的立体示意图, 根据赤平极射投影可知: QO 即为 σ_1 的投影, CO 即为 σ_2 投影, DO 即为 σ_3 的投影。



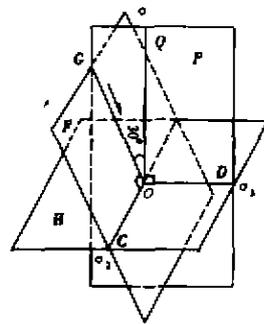
(1)

图 1 层间错动面积冲断层的赤平投影投影图



(2a)

图 2 断层面及其擦痕的赤平投影图



(2b)

2 凯塞效应测试地应力

2.1 试验基本原理

凯塞效应是材料(如岩石)在重复加载时出现的一种声发射异常现象。它表明岩石具有“记忆其应力历史的能力”。凯塞效应测量地应力的基本方法是对岩芯进行单轴压缩,同时接收其声发射信号。在应力较低时声发射率很低,并与应力近似成直线关系。但当作用力达到某一临界值时,声发射活动则突然增加,并按照一个比原来大得多的比例,与应力保持线性关系。声发射活动突然增加时所对应的这个临界值,就是岩心试件压缩时最大应力的大小。

2.2 试验方法

试件的岩样自6 m以外的原岩应力区,岩芯样直径 $\phi 52-55$ mm,每个方向上取7个(长度100 mm);岩芯加工成 $\phi 50-55 \times 100$ mm的圆柱形试件,侧面磨平一块面积约为 15×100 的平面以放置探头。为了消除岩石试件端部由于应力集中及端面摩擦所引进的信号干扰,试件端面垫两层聚氯乙烯和一层2 mm厚硬橡胶皮片。

设备测试包括:

加载系统—200吨压力试验机,BHR-4/15T电阻时荷载传感器。

AE测试系统—探头、SQ-1型前置放大器、滤波器、SFS-4B型四通道声发射信息分析仪、XD-2型信号发生器。

变形测量系统—YD-15动态电阻应变仪。

数据记录系统—LZ4-304型函数记录仪。

2.3 测试结果分析

试件加载之初,往往亦有较密集的声发射活动和能量反映,除噪声干扰外,其主要原因是由于试件端部的摩擦效应所引起所造成的,当然还包括岩石内原有裂纹闭合期间的结构调整而发出的噪音。所以,加载之初的声发射活动给我们带来了正确判断岩石“Kaiser”效应的难度,但是只要处理好端部,同时把门坎电频调好,以保证声发射检测系统达到最大的灵敏度,情况就会大改善。

“初射点”AK,是表征岩石微破裂的开始,是试件受力后出现的第一个声发射活动高峰。国家地震局地壳应力研究室等单位的研究结果表明:在低应力水平,岩石在不同方向荷载作用下声发射的Kaiser效应,能够彼此独立地各自记忆各自方向的应力历史,从而认为AK与岩体构造应力场存在密切的关系。“初裂点”即是选取的Kaiser效应点。

2.4 效果分析及优化

1) 以AE发射率和荷载P的关系为基础,找出AK点,计算出各个试件 σ_k 的值。

2) 参照AE能率与荷载的关系,就其AK的AE能率发生情况进行比较,AE能率下AE发射率基本同步的程度,分别考虑各实验值的权数(M),AE能率与AE发射率基本同步的就认为其凯塞效应明显,记凯塞效应的实验结果权数为1;不明显的取为0.5;

3) 按下式计算最优值:

$$\sigma = (\sigma_1 M_1 + \sigma_2 M_2 + \dots + \sigma_n M_n) / (M_1 + M_2 + \dots + M_n)$$

3 实例验证

某矿山应力场分析结果:

根据对细脉带所做的工程地质分析结果^[4],便知层面走向为 $N80^\circ E$ 倾向 NW ,倾角 25° 。而将岩层恢复到原水平位置翻转后可判断出同序次的成对的X共轭节理 J_{14} 和 J_{15} 。这两组节理相交的锐角平分线为最大主应力(σ_1)的方位,钝角平分线为最小主应力(σ_3)的方位,两节理的交线所示的方向即为中间主应力(σ_2)的方位。当岩层倾角为 25° 时,地应力的方位又如何呢?经作图分析之后得出该矿山的原岩主应力方向为:

σ_1 :走向 $N27^\circ W$,倾角 -24° ; σ_2 :走向 $S9^\circ E$,倾角 -64° ; σ_3 :走向 $N66^\circ E$,倾角 -6° 。

由于该矿山的原岩应力场是以水平构造应力为主的,水平应力值大大超过垂直应力。其最大主

应力 σ_1 为 22.53 MPa, 方位 333°, 倾角 -24°; 最小主应力 σ_3 为 6.23 MPa, 方位 171°, 倾角 -64°; 中间主应力 σ_2 为 15.57 MPa, 方位 66°, 倾角 -6°, 见表 1。

将以上结果与长沙矿山设计研究院 1985 年对该矿山所进行的现场原岩应力解除法测量的结果相比较分析如下(矿山院对 91# 矿体的原岩应力测试结果见表 2 所示):

1) 原岩应力场的方位与倾角差别问题

长沙矿山设计院所进行应力解除法的测量地点为 91# 矿体(405 m 水平), 该处岩层层面倾角为 5~15°, 故其为了便于计算分析, 其原岩应力场的倾角问题被忽略了, 故而给出的为绝对水平应力场。而细脉带矿体的岩层倾角为 20~25°(实际为 25°)。一般说来, 主应力轴将随着岩层发生变化。从前面分析的结果, 若将该处的主应力场随岩层转至水平位置, 可知 σ_1 方位为 333°, σ_2 方位为 66°, σ_3 方位为 171°, 与长沙院实测结果相比较仅差 5°。由此可见是与长沙山设计研究院的测试结果相一致的。

表 1 原岩应力值优化结果表

应力符号	应力值 (MPa)	应力方位	
		方向角	倾角
σ_1	22.53	N27°W	-24°
σ_2	15.57	N66°E	-6°
σ_3	6.23	S9°E	-64°

表 2 应力解除法测试结果

应力符号	应力值 (MPa)	方向角 (°)	倾角 (°)
σ_1	25.4	333	0
σ_2	17.1	63	0
σ_3	7.3	325	90

2) 原岩应力量值差别问题

由于两次测量地点不同, 距离地表的标高不同, 深度相差达 180 m。水平应力按构造应力与自重应力叠加计算, 以 405 水平为基准计算的结果为 $\sigma_1=23.78$ MPa, $\sigma_2=15.48$ MPa, 这与本次测试结果($\sigma_1=23.53$ MPa, $\sigma_2=15.57$ MPa)是基本相符的。同时按自重应力反推, $\sigma_3=2.44$ MPa 与本次测试的结果差别较大, 这是因为本次测试的结果($\sigma_3=6.23$ MPa)考虑了构造应力场与自重应力场的迭加, 故而可以认为是一致的。同时, 应该指出的是, σ_1 可以认为是地质历史上承受的最大应力(先存应力), 而 σ_2 被认为是现存应力, 故而两者会有一定的差别。但这种差别对于指导矿山的地压稳定性, 即是微不足道的。而且, 实际上现场所做的应力解除法和凯塞效应法所测试的点都不太多, 而这两者的结果殊途同归, 正好说明铜坑矿的原岩应力取得如上值是可行的。

4 结论

1) 本文首次将结构分析方法与 Kaiser 效应测量原岩应力方法有机结合起来, 把赤平投影法引入到原岩应力场的主应力方向分析中, 确定了原岩应力的方向, 并通过比较证明是可靠的;

2) 运用结构分析法推断原岩应力场的特征, 使用 Kaiser 效应测量原岩应力的取样量为减少, 测试工作量及费用也大为降低, 准确度也可以随之提高, 有利于 Kaiser 效应测量原岩应力方法的推广使用;

3) 利用岩石的 Kaiser 效应声发射信号, 可在室内较准确地测出岩体的三个方向主应力值;

4) Kaiser 效应测量原岩应力的方法(特别是与结构分析法分析应力场特征的方法相结合), 比传统的现场地应力解除法具有更为简单、更为经济等优点, 便于大量测量, 以寻求区域性的原岩应力变化规律。

参考文献:

- [1] 张景和. 利用岩石发射 Kaiser 效应测定低应力的新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, (6): 347-355.
- [2] 金川忠, 北原义浩, 林正夫(日本). 利用岩石发射的凯塞效应测定应力[J]. 地下工程, 1981.

[3] 孙玉科,古迅.赤平极投影在岩体工程地质力学中的运用[M].北京:科学出版社,1980.

[4] 周小平.大厂铜坑矿细脉带采场尺寸的优化研究[D].昆明:昆明理工大学,1995.

New Method to Study In-situ Stress of Rock Mass by AE and Structure Analysis of Rock Mass

ZHOU Xiao-ping¹, DENG Meng², ZHANG Fu-sheng³

(1. Faculty of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030; 2. Faculty of Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400045; 3. Faculty of Construction Management & Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In this paper, the authors adopt a method of structural analysis and stereography in combination with acoustic emission Kaiser Effect test in laboratory to find out the main direction of initial stresses. For overcoming the shortcomings of Kaiser effect by comparing it with traditional methods of measuring in-situ stresses, it is shown that this method is simpler, more economical and convenient for a large number of measurements and for studying the law of changes of regional in-situ stresses.

Keywords: structural analysis and stereography; initial stresses; acoustic emission, Kaiser effect

(上接第98页)

Discussion on the Restrictions and Limits of Investment and Financing System to BOT Model with Folk Capital

ZHANG Li¹, ZHANG Bin-bin¹, TAO Quan-jun²

(1. Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Faculty of Construction Management & Real Estate, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Based on analyzing the BOT model, this paper discusses the restrictions and limits of investment and financing system to BOT model with folk capital. According to the characters of BOT model with folk capital, the authors give some suggestions.

Keywords: BOT model with folk capital; investment and financing system; restriction and limits; reform