

第二届国际岩石力学会议论文

选 集

一九八〇年七月十四日

冶金工业出版社

第二届国际岩石力学 会议论文选集

连志升 田良灿等译

冶金工业出版社

内 容 简 介

这本论文选集共包括42篇论文，介绍了现代岩石力学在理论和试验两方面研究的主要成果，并列举许多工程应用实例。

文集中着重介绍了岩石或类岩材料物理力学特性的研究。这些研究有数学上的推演，也有实验室或现场试验。所列举的工程应用实例包括岩石边坡稳定性、地下开采结构、竖井、隧道、电站大坝和地下贮气库等。此外，还选译了一些关于岩石爆破机理和可钻性研究等方面的论文，内容相当广泛。

本书主要读者对象为岩石力学工作者，也可供矿山、水电、铁道、地震等部门的设计和研究人员以及有关高等院校师生参考。

第二届国际岩石力学会议论文选集

连志升 田良灿等译

*

冶金工业出版社出版

(北京市市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 23 3/4 字数 567 千字

1980年6月第一版 1980年6月第一次印刷

印数00,001~3,000册

统一书号: 15062·3497 定价2.65元

译 者 的 话

国际岩石力学会议至今已经开过三届。第一届于1966年在里斯本举行；第二届于1970年在贝尔格莱德举行；第三届于1974年在丹佛（美国）举行。这几届会议的召开被认为是现代岩石力学发展的重要标志。

这本论文选集是根据第二届会议刊印的论文集选译的。在这届会议上，有43个国家提出900篇论文，经选择，分三卷刊出了33个国家的学者所写的287篇（其中包括9篇一般性报告），内容涉及现代岩石力学各方面的成就。迄今为止，这是一部内容最丰富的岩石力学著作。

我们从这287篇中挑选出42篇翻译出版（目录中括号内的数字表示原文编号），内容着重于岩石和岩体的物理力学特性的研究，包括理论与试验（现场的和实验室的）的基础研究，特别选择了现代声波探测技术方面的论文。与此同时，还考虑了岩石力学在许多工程实际问题上的需要，选入了有关露天边坡的稳定性、地下矿山的结构和地质研究、隧道开挖和衬砌、大坝的设计和坝基稳定性、水库地震问题以及地下贮气库的稳定性等方面的论文。此外，还选入了岩石爆破机理和可钻性基础研究等方面的论文。

这些内容，对从事矿山、水电、地质、地震、铁道以及其他地下工程等的设计和研究人员，均有所裨益。译文的选择也考虑了有关高等院校的需要。

本书由冶金部长沙矿山研究院、长沙矿冶研究所、水电部长江水电科学院、中国科学院岩土力学所、北京钢铁学院和东北工学院等六个单位的有关同志译校，最后由长沙矿山研究院连志升、田良灿两同志作了统一审核。

必须指出，在确定这本论文选集的内容时，虽力求满足国内的普遍需要和尽可能反映本届会议的精神，但限于译者水平，可能选得不尽恰当或存在某些局限性。由于时间仓促，译文中也可能有许多不妥甚至是错误之处，谨请读者批评指正。

译 者

1978年3月

4342/07

目 录

一 (1—5)、深部岩体原始应力状态的测量 (南非) G.F.帕里斯特等	1
二 (1—8)、用微震声学法研究岩体原始应力分布 (苏) A.И.萨维奇等	6
三 (1—25)、岩石的动力物理特性 (第一部分——理论与方法) (伊拉克) Y.Y.尤亚斯	16
四 (1—26)、岩石的动力物理特性 (第二部分——实验结果) (伊拉克) Y.Y.尤亚斯	32
五 (2—5)、岩石的蠕变 (苏) C.C.弗雅罗夫	45
六 (2—19)、岩体流变特性的确定 (德文) (东德) M. 朗格	52
七 (2—14)、岩体的应力分布和变形特性的力学研究 (日) 饭田隆一等	65
八 (2—24)、地壳褶皱形成的数学原理 (苏) И.С.依尔查诺夫	77
九 (2—37)、现场和实验室试验测得的动弹模和静弹模的相互关系的研究 (土) A.E.提姆尔等	84
十 (2—41)、关于测定岩石蠕变性质的若干经验 (挪) A.米尔万格	92
十一 (3—4)、利用简单的硬度试验进行岩石分类 (挪) A.C.范得弗里斯	95
十二 (3—11)、节理岩体模型的破坏形式 (美) J.L.罗生布拉迪	105
十三 (3—17)、大块岩石的现场剪切试验 (苏) П.Д.依夫多启莫夫等	113
十四 (3—28)、节理岩体现场直接剪切试验中的应变能分析 (日) 君岛博次等	118
十五 (3—29)、确定岩石抗拉强度的圆盘试验、圆环试验、矩形板和不规则试件的试验 (日) 平松良雄、冈行俊	125
十六 (3—30)、多轴应力状态下砂岩破坏机理的研究 (德文) (日) 赤井浩一等	135
十七 (3—37)、岩石脆性破裂开始和最终破坏准则及其在预测破裂区中的应用	

(加) K.巴隆	143
十八 (3-47)、三向应力状态下岩体抗剪强度的现场确定 (法文)	
(罗) V.杜马等	154
十九 (4-6)、全世界使用CSIR“门塞”技术进行岩石应力测量的经验	
(南非) E.R.黎曼	161
二十 (4-20)、粘弹-塑性介质中隧道的稳定性	
(日) 樱井春辅	169
二十一 (4-23)、应用符拉索夫变分法研究岩体力学的若干问题	
(保) I.V.狄莫夫等	182
二十二 (4-24)、建设一个大型地下电站的地质力学探测	
(意) E.曼多梵尼	194
二十三 (4-25)、地下开挖工程渐进松弛的粘塑性分析	
(日) 林正夫	208
二十四 (4-26)、岩爆危险区的岩石应力测定	
(日) 铃木光、石岛洋二	220
二十五 (4-34)、钻孔孔壁上集中力的作用	
(苏) Д.И.米亚里克等	225
二十六 (4-39)、硬岩中圆形深竖井的稳定性	
(澳大利亚) D.H.查洛帕	228
二十七 (4-41)、美国加利福尼亚州Crestmore矿节理发育岩石中矿房矿柱结构的设计	
(美) F.E.赫尤济等	234
二十八 (4-42)、地下天然气贮藏库力学稳定性的模型研究	
(美) H.R.哈尔迪	245
二十九 (4-48)、采矿巷道周围岩石裂隙或应力状态的微震现场研究	
(日) 山口梅太郎	252
三十 (4-64)、隧道中岩石压力的确定方法	
(苏) И.Г.加兹耶夫	259
三十一 (5-3)、岩石爆破的基本机理	
(瑞典) P.A.帕尔松等	264
三十二 (5-8)、冲击钻进时岩石可钻性的研究	
(挪) R.塞尔马奥尔森等	280
三十三 (5-13)、岩石的高速冲击破碎	
(美) M.M.辛格	287
三十四 (8-4)、层状岩基应力和应变的近似解法	
(苏) P.M.拉波帕尔特等	298
三十五 (7-2)、岩石边坡设计的最佳分析	
(南非) T.舒克	306
三十六 (7-8)、加拿大采矿设计中的岩石边坡稳定性研究	
(加) C.O.布劳纳	314

三十七 (8—2)、大坝和电站机房结合结构的变形研究	
(英) R.G.T.兰尼	325
三十八 (8—12)、水库载荷对地震活动的影响	
(南斯拉夫) M.M.罗科萨迪奇	329
三十九 (7—16)、利用参考半球进行三维稳定性问题的工程分析	
(西德)、K.W.焦恩	336
四十 (8—18)、岩基上堆石高坝的动力稳定性	
(苏) S.A.皮特罗维奇等	344
四十一 (8—27)、关于准均质、各向异性或不连续性岩体中混凝土坝基的应力、 变形和断裂状态的若干研究结果	
(南斯拉夫) D.米罗万诺维奇	351
四十二 (8—14)、特别考虑到节理岩系的岩石力学非线性问题分析	
(英) O.C.辛基威茨等	362

一、深部岩体原始应力状态的测量

(南非*)G.F.帕里斯特等

摘 要

在南非三个金矿的四个不同地点,用“门塞”技术测定了岩体的原始垂直应力和水平应力。测量地点距地表的深度由1300米到2400米不等。所测得的垂直应力值与理论计算的覆盖岩层应力值非常一致,仅有一点例外,该点岩石节理高度发育,使测得的垂直应力值低于理论预计值的40%。各点测得的水平应力都比预计的要大得多。水平应力与垂直应力之比为0.49~0.72。

引 言

对于许多地下开采设计来说,必须了解岩体的原始应力状态,而这种了解在地质学上也是非常重要的。本文假设岩体的应力状态介于Heim准则^[1]和Price理论^[2]之间。Heim准则是:所有应力处于静力平衡状态,即由于上覆岩层的重量所引起的应力在各个方向均相等;而Price理论则认为隆起引起水平应力。

本文报导了在南非维瓦特斯兰(Witwatersrand)盆地所作的岩体原始垂直应力和水平应力的测量,测量是在相距甚远的三个金矿的四个不同地点进行的。

用主要是由黎曼(Leeman)^[3]研究的“门塞”技术进行测量。这种方法是在磨平的钻孔孔底粘贴一个电阻应变花,然后,用与原钻孔直径相同的岩芯钻头在孔底套孔,使应力释放。若已知岩石的弹性常数和孔底的应力集中系数,根据至少在三个不同方向上进行应力解除所测得的应变,可以计算出该点的应力状态。

至目前为止,还没有孔底平面附近应力分布的精确解可供利用。但是,Crouch^[4]用轴对称有限单元分析法,就不同的泊松比求出了孔底附近的应力集中系数。

在每个测量地点,至少打三个钻孔,用“门塞”测量来确定该点的垂直应力和水平应力。钻孔每钻进0.3米到6米测量一次,直到孔深30米。总共约进行了250次测量。将取出的岩芯在实验室进行试验,以确定各段岩芯的杨氏模数及泊松比。除一点例外,所有测点都远离矿山主要巷道,故实际上并无扰动应力。

奥伦治(Orange)自由洲,弗吉尼亚(Virginia),
汉蒙尼(Harmony)金矿公司的测点

Barron^[5]在1500米深的下盘运输巷道内距矿脉底板约35米处进行了应力解除**测量。

* 南非——阿扎尼亚(白人种族主义者统治下),下同。——译注

** 原文的strain relief系指用应力解除法进行应变测量,故全译为应力解除,以便统一。——译注

测点附近的岩石主要是维瓦特斯兰系Main-Bird期硅质和粘土质底盘石英岩与一些砾石层。这些沉积岩层倾角约 5° 。虽然靠近测点有两组大致平行的岩脉横过运输巷道,以及存在一些小的断层面,但从地质构造上说,它仍是稳固的地区。

测点上部覆盖了约900米的上维瓦特斯兰沉积岩,300米的温特斯朵 (Ventersdorp) 沉积岩和熔岩,以及300米的凯罗 (Karoo) 砂岩、页岩、粗玄武岩。理论覆盖岩层压力约为412公斤/厘米²。然而,在测量期间,最近的采矿作业点离测点仅90米,因此正如相似解^[6]所确定的,扰动应力的集中系数为1.7。

利用Barron在三个钻孔中的测量值和Crouch的应力集中系数,再计及邻近采矿影响的应力集中系数1.7,求出测得的垂直应力和水平应力平均值分别为338公斤/厘米²和169公斤/厘米²,水平应力与垂直应力之比为0.5。

特兰斯瓦尔 (Transvaal), 波克斯堡 (Boksburg),

East Rand Proprietary 采矿公司测点

该测点位于地表以下2400米,在上维瓦特斯兰系Jeppestown统的上部岩层的主矿脉下约52米,距最近采场约1600米处。测点周围的母岩主要是薄层粘土质石英岩与页岩互层,倾角 38° 。岩层中的节理方向甚为一致;同时,节理上的擦痕光面表示出岩石是沿着这些层面移动的。

由于岩石节理相当发育,在不同方向打七个钻孔进行测量。应力解除测量结果的特点是,在坚硬均质的岩石中测得的应变值一般是常数,而在被滑移面所横切的岩体中,应变值一般是变化的。

该点理论覆盖岩层压力为648公斤/厘米²,而实测的平均垂直应力为381公斤/厘米²,水平应力为275公斤/厘米²,水平应力与垂直应力之比为0.72。如不计入破碎岩石中的所测数据,垂直应力和水平应力的平均值分别为469公斤/厘米²和305公斤/厘米²,水平应力与垂直应力之比为0.65。

特兰斯瓦尔西部Doornfontein金矿公司——深部测点

该测点位于地表以下2300米,在一运输巷道的末端。测点周围地区仅有少量开拓,但在距测点300米远处有一个正在回采的采场。

测点附近的岩层倾角为 20° ,主要是上维瓦特斯兰系Main-Bird期的粘土质、硅质石英岩。另外,还有几条砾石带和一条与沉积岩整合的页岩或糜棱岩带。然而,从地质构造上看,岩体还是没有受到破坏的。测点附近有两条错距很小的正交断层和两组主要节理;一组是走向变化的急倾斜张力节理,另一组大致平行于层面,同时沿层面可能已有稍许移动。

测点上方有1000米厚的上维瓦特斯兰系岩层和1300米厚的特兰斯瓦尔系白云岩。因此,理论覆盖岩层压力约为633公斤/厘米²。

根据三个钻孔测量所确定的平均垂直应力和水平应力分别为596公斤/厘米²和324公斤/厘米²。水平应力与垂直应力的比值为0.54。

特兰斯瓦尔西部Doornfontein金矿公司

——浅部测点

该测点在地表下1300米处，位于上述深部测点以西约5000米的斜上方。测点设在一条石门内，距最近的采区600米，附近有少量开拓。

该测点恰好位于页岩或糜棱岩层的上方，比深部测点处于较高层位。沉积岩层倾角 20° ，比深部测点的岩层含有较多的砂质，并有很多的砾石带。从地质构造上看，该测点要比深部测点受到更大的扰动。此处岩石为很多节理所切割，且在测点100米以内有几条大断层。该处节理可分为三组：一组大致平行岩层面；一组走向变化且是急倾斜的；最后一组是为石英所充填的平面状或弯曲状的张力裂缝，也可说是断层。在测点上方有1100米厚的白云岩层和约200米厚的维瓦特斯兰沉积岩。理论覆盖岩层压力为366公斤/厘米²。

在五个钻孔中测得的平均垂直应力和水平应力分别为396公斤/厘米²和193公斤/厘米²，因此，水平应力与垂直应力的比值为0.49。

讨 论

维瓦特斯兰沉积岩生成于二十亿年以前，其上部覆盖了好几千米厚且年代较新的Ventersdorp、特兰斯瓦尔和Karoo系岩层^[7]。在这个地质年代的某一时期内，维瓦特斯兰沉积岩中的应力看来似乎可能接近Heim准则所述的静力平衡状态。在East Rand Proprietary采矿公司，这种地质年代较新的覆盖岩层估计有6000米左右因侵蚀而移至它处，而形成现今的地表。Doornfontein金矿与Harmony金矿则至少有4500米的上覆岩层被侵蚀。

地表侵蚀的结果必然会造成垂直应力分量的减少。因此地貌平坦的区域，垂直应力值总是由其上覆岩层的重量决定。由于地表的侵蚀与隆起，提出了水平应力分量变化的两种可能形式：第一种，假定岩石是属于弹性的，且没有水平运动，在各种深度上水平应力的减小可以用一个常数 $g\rho h\nu/(1-\nu)$ 来表示。这里 g 是重力加速度， ρ 是岩石密度， h 是侵蚀量， ν 是泊松比；第二种，隆起使岩层在水平方向伸长，导致水平应力减少，减少量接近常数 εE ，这里 ε 是隆起造成的水平应变， E 是岩石的杨氏模数^[8]。因此，侵蚀和隆起若发生在岩体的静力状态下，则认为，垂直应力在地表为零，随深度成直线增加，与覆盖岩体的重量一致；水平应力以同样的比率随深度增加而增加，但在地表，其值 $\sigma_0 = g\rho h[1-\nu/(1-\nu)] - \varepsilon E$ 。

这四个地点测出的平均垂直应力和水平应力与距地表深度的函数关系如图1—1所示。直线OA表示覆盖岩层重量引起的理论应力值。除East Rand Proprietary矿以外，所有测得的垂直应力值都与这一理论值很一致。在Harmony金矿测得的垂直应力平均值比OA线所表示的理论值低17%，而在Doornfontein金矿的深部测点和浅部测点测得的垂直应力平均值分别比OA线的理论值低6%和高14%。以上偏差都在此类测量所要求的精度范围

($\pm 20\%$) 之内。

在East Rand Proprietary矿测得的垂直应力比理论覆盖岩层应力值低40%。若不计入节理发育岩石中的实测值, 则垂直应力低于覆盖岩层应力不到27%。为什么测出的垂直应力如此偏低, 有几种可能:

(1) 测量值实际上反映了真实的垂直应力。虽然看起来似乎是不可信的, 而且只能基于这样的解释, 即测点处有节理, 可能产生岩石移动, 使上覆岩层的重量在别处发生了变化。

(2) 应力集中系数比假设的要低, 这或者是由于频繁的地质破坏, 或者是由于类人所熟知的那些诱发性的破坏使岩石变成片状的缘故。假若不计节理发育岩层中的实测值, 则平均垂直应力值由理论覆盖岩层应力值的60%增加到73%, 这表明节理是一个影响因素。

测出的水平应力值接近 OB 线, 它与理论预计值有两个重要方面的差别。第一, 该直线通过原点, 这就是说, 现在的地表水平应力等于零, 这就要求侵蚀作用、泊松松弛以及隆起的影响要明显的一致。第二, 该点水平应力随深度的增加值仅为该点垂直应力增加值的一半左右, 然而, 从理论上说, 两者增加的比率应该相同。显然, 这个理论是不合适的。在1300米~2400米深度范围之内, 水平应力与垂直应力之比趋近常数, 其值略大于0.5, 见表1-1。该比值也大大超过了弹性值 $\nu/(1-\nu)$ 和通常所假定的0.37——这个由水压所引起的值。后两种比值在图1-1中分别用直线 OC 和 OD 表示。

实测的水平应力仅为垂直应力的一半, 最简单的解释也许是: 作为一个整体的岩体可以看成是饱和的没有凝聚力的库仑材料。甚至在相当大块的维瓦特斯兰沉积岩中, 也能观察到多次产生的节理, 使得这一观点似乎有些道理。在这种材料中, 水平应力 σ_h 由下式给出:

$$\sigma_h = gH[1000 + (\rho - 1000)/q]$$

式中 H ——距地表深度 (米);

1000——水的密度 (公斤/米³);

g ——重力加速度 (9.81米/秒²);

$q = [(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu^2]^2$;

μ ——内摩擦系数。

用 $\rho = 2700$ 公斤/米³, $q = 5$ 代入上式, 计算出在任一深度下, 水平应力与垂直应力之比均为0.5。

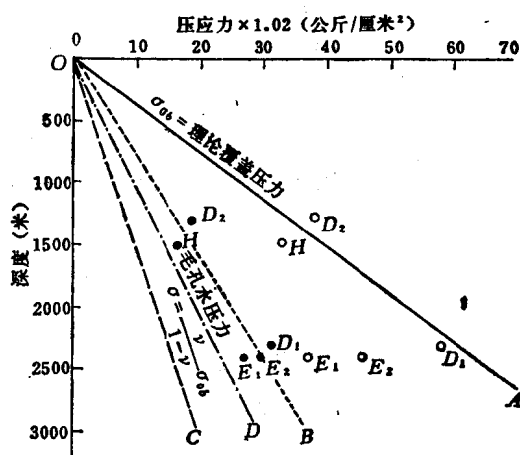


图 1-1 在南非三个金矿测得的垂直应力和水平应力

○—垂直应力; ●—水平应力; H—H.G.M. 公司;
E₁—E.R.P.M. 公司; E₂—E.R.P.M. 公司 (除去节理岩石中的测量结果); D₁—D.G.M. 公司 (深部); D₂—D.G.M. 公司 (浅部)

表 1-1

测 量 地 点	深 度 (米)	$\frac{\text{水平应力}}{\text{垂直应力}}$
Harmory	1500	0.50
E.R.P.M.	2400	0.72
E.R.P.M. (不计节理岩石中的测值)	2400	0.65
Doornfontein	2300	0.55
Doornfontein	1300	0.49

参 考 文 献

- (1) JAEGER, J.C., and COOK, N.G.W., Fundamentals of Rock Mechanics, Methuen, London, 1969, p. 355.
- (2) PRICE, N.J., Fault and Point Development in Brittle and Semi-brittle Rock, Pergamon, Oxford, 1966, pp. 131—132.
- (3) LEEMAN, E.R., The measurement of stress in rock, Part I, The principles of rock stress measurements, Part II, Borehole rock stress measuring instruments, Council for Scientific and Industrial Research, National Mechanical Engineering Research Institute, Pretoria, 1964, R. MEG 160, R. MEG 161.
- (4) CROUCH, S.L., A note on the stress concentrations at the bottom of a flat-ended borehole, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., (In Press).
- (5) BARRON, K., Proc. of the First Congress of the International Society of Rock Mechanics, Lisbon, 1967, p. 351.
- (6) SALAMON, M.D.G., RYDER, J.A., and ORTLEPP, W.D., An analogue solution for determining the elastic response of strata surrounding tabular mining excavations, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 1964, 65, (2), pp. 115—137.
- (7) HAUGHTON, S.H., Geological History of Southern Africa, Geological Society of South Africa, 1969, pp. 468—490.
- (8) PRICE, N.J., Fault and Point Development in Brittle and Semi-brittle Rock, Pergamon, Oxford, 1966, pp. 132.
- (9) JAEGER, J.C., and COOK, N.G.W., Pinching-off and diskings of rocks, J. Geophys. Res., 1963, 68, (6), 1759—1765.

关胜兰译 连志升、田良灿校

二、用微震声学法研究岩体原始应力分布

(苏) A. И. 萨维奇等

摘 要

本文根据静载试验时岩石变形机理的实验研究, 阐明岩体内的应力 σ 与弹性波速度间关系特性的主要参数。显然, 对于用弹性波速度来准确确定应力, 必须了解加载前和加载时的波速(V_0 和 V_σ), 以及 V_0 、 V_σ 与 σ 间的关系特性。本文根据大量的现场和实验室研究介绍了确定 $\sigma = f(V_0, V_\sigma)$ 的结果。绘出的通用曲线确切地综合了实验数据, 并且可以获得由参数 V_0 、 V_σ 所决定的应力校正曲线。叙述了求算 V_0 和 V_σ 的方法。

文中提出用超声测量弹性波在探井和探巷周围应力重新分布区内的传播速度来确定 V_0 和 V_σ 值的方法。由此所得的结果可计算任意方向上的应力分量, 因而可求出全应力矢量。在一个正在建设的水电站工地, 按预定方案对河谷边坡上应力分布的复杂性进行了研究。

由于岩体不同部分的弹性(变形)性质具有明显的非均匀性, 故应力场也表现出非均匀性。弹性波参数值愈高, 则 σ 值也越高。后者是由下述因素引起的, 即岩体可视为一个刚度很大的结构, 由它支承着原始应力的绝大部分。离地表越深, 则岩体内的原始应力越大, 但是, 这种应力增长并不是均匀的, 而在岩体的某些部位可观测到 σ 的极值。

对于所研究的岩体, 水平应力大于垂直应力。应力的绝对值及其分布方式是由微震声学法所测定的, 这些数值与卸载法所得的值相当一致。

近来, 在建设大型建筑物时, 非常重视岩体内原始应力及其空间分布状态的定量研究。当按其应力状态进行结构计算时, 必须考虑到这些应力, 以及估计原始应力对岩体性质、状态和稳定性的影响^{[1][2]}。许多研究经验表明, 只有联合使用直接地质探测和间接应力测定, 才可能对岩体应力进行综合性研究^[9]。微震法或地声法是最有前途的间接测定法之一。这种方法是根据不同频率下诱发的弹性波参数*与岩体中应力的关系所建立的; 这里, 弹性波可指微震波、声波和超声波。最近, 已有一系列文献^{[3][4][5][6][8][9]}叙述成功地应用这些方法进行深竖井的岩石压力分析。但是, 实际上这些方法在水坝、隧道、露天矿和类似的工程结构的工程地质勘探方面仍未采用。这一点可以作出部分解释: 即以上情况中的岩体具有明显的非均质性和各向异性, 并掺杂有高度破碎的、被风化的和近地表岩体的不稳定含水层, 所以用微震法是难以探测的。

本文详细叙述了用微震法测定原岩应力的最近进展, 可用于解决非均质和各向异性岩体的应力测定问题。文中的内容是根据一个水电站的建筑工地所进行的现场试验和实验室

* 这里指的不同频率是可调节的, 而参数的含义可理解为波速等。——译注

试验的结果来描述的。现场试验是在一条长 200 米的勘探巷道和它周围的专门硐室内进行的。探巷位于河谷的陡坡岸边, 围岩由相当均质的、致密的以及原来完整的前白垩纪白云石化的石灰岩组成, 但这类岩石由于后来的内因和外因过程的作用而高度变质了。这类岩石的典型特征是具有明显的裂隙、非均质和弹性各向异性的性质。岩体中纵波速度 V_p 的平均值与极限值($V_{p\min}=1000$ 米/秒 $\sim V_{p\max}=7000$ 米/秒)相差 3~4 倍。主要裂隙组决定了岩体的各向异性, 这在中等破碎的岩体中就尤其明显, 由它引起纵波速度的变化相差 1.5 倍。

在上述条件下, 在完善应力测定方法的同时, 进行了岩石变形性质的研究, 而且指出了一般求解方式: 确定岩体或试件中岩石的应力与弹性波波速的关系; 得到进行定量的应力分析时所需的初始微震参数的计算方法。为得到试验数据和计算原始应力, 进行了综合性研究, 其中包括微震波和超声波的发射和接收。采用了 CC-24П 型微震仪、ИПА-59 型超声微震仪以及带有风动夹紧装置的浅孔地音仪。这些仪器及使用方法提供了完整的观测系统, 使能测出弹性波速度的相对变化, 其精度对超声波是 1%, 对微震波是 3%。

1. 岩体变形机理的分析和解题的一般方式

众所周知, 用于评价岩体内的应力的微震声学的物理基础是: 受力岩体中的弹性波速度及其衰减特性的关系*。研究试验表明, 实际上上述关系的表示形式完全取决于变形介质的性质。这样一来, 如果对变形机理没有完整的概念, 要选择合适的求解方式是不可能的。因此, 这项研究工作的第一阶段是对岩石变形机理进行实验性研究, 建立描述这类介质变形发展状况的近似力学模型; 对此, 将所得到的公式进行分析, 以明了介质中的微震参数和应力的关系特性, 最后, 选择用微震方法测定应力的通用方式。

变形机理的试验研究是在这样的基础上进行的, 即在受载(逐渐增加静载)平板**的作用下, 在一组互相平行的浅孔中, 用超声观测仪详细研究弹性波波速的变化情况, 如图 2-1(a) 所示。在最靠近加载板下方, 每向下 0.1 米(直至 0.8~1.2 米的整个深度)就进行一次测量。当沿浅孔进行声发射并在载荷作用的垂直方向上接收时, 测量载荷作用方向上波速的变化。测量时的加载范围为 0~80 公斤/厘米², 每隔 5~10 公斤/厘米²***测量一次。

根据得到的数据, 绘出弹性波波速及其相对变化 $\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V - V_0}{V_0}$ 与载荷的关系, 这里, V_0 是未受载时的波速。该曲线表明, 在载荷作用下, 弹性波波速增高, 相应地在载荷减小时, 波速下降。但是上述变化在整个深度内并不均匀, 甚至在每个平板下局部的、近平面的区域内可发现这一情况, 此处可遇到最大的 $\frac{\Delta V}{V_0}$ 值。在那些随截面的变化波速变化较小的区域, 在较低的初始速度 V_0 下, 将在裂隙岩体中找到最大的 $\frac{\Delta V}{V_0}$ 值, 而在较高的

* 在确定衰减参数时, 因遇到技术上的困难, 所以实际上并未应用。——原注

** 所用的加载板为刚性圆板, 面积为 1 米², 静载试验在 K.L.Termikaeljan 和 L.V.Lapin 指导下完成的。

*** 原文误为 5~1 公斤/厘米²。——译注

V_0 下, 在完整岩体中得到最小的 $\frac{\Delta V}{V_0}$ 值。如图2—1(b)和(c)所示。

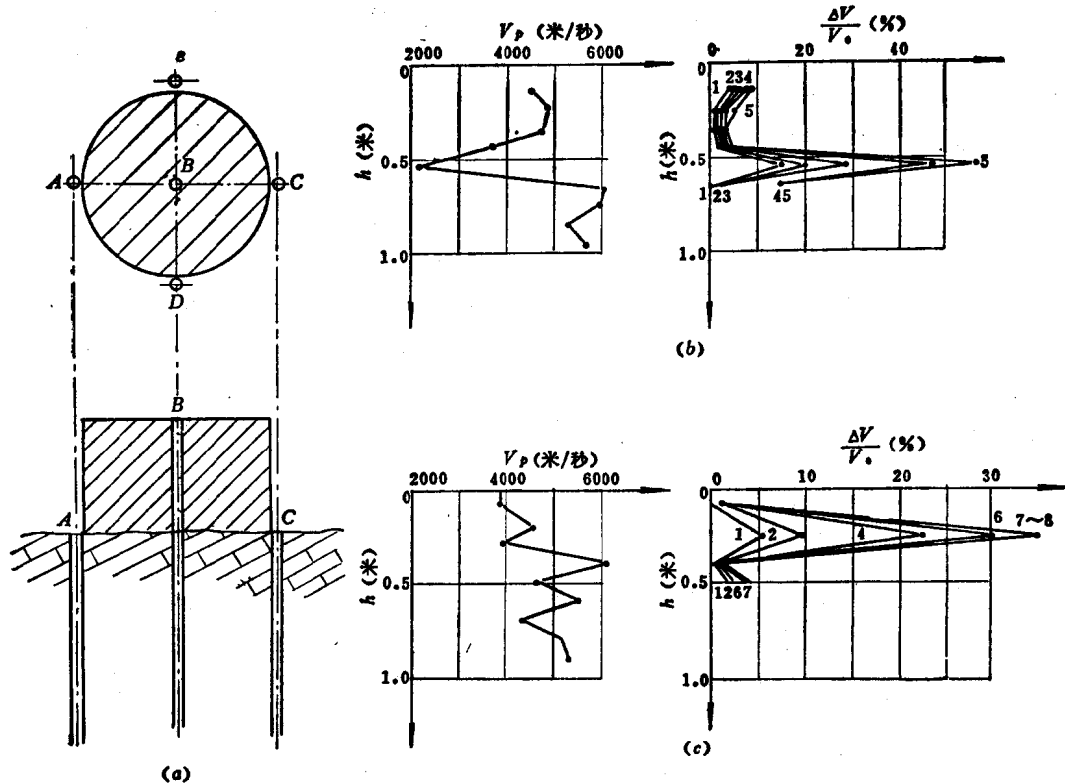


图 2—1 研究在平板加载试验下浅孔中的压力与岩体波速的关系

(a) 试验顺序图, A、B、C、D、E——浅孔; (b) 在第6号加载板下根据纵向超声发射结果而绘制的典型 $V_p - \frac{\Delta V}{V_0}$ 关系图; (c) 在第2号加载板的 $V_p -$

$\frac{\Delta V}{V_0}$ 关系图

综合这些结果, 作为第一次近似, 可将所研究的介质视为横观各向同性岩层, 它由许多相当均质的单独岩层叠合而成, 并在岩层的法线方向上具有可压缩性。所述岩层表现出由特殊的破裂特性引起的不同弹性性质和变形性质所表征的岩体规则变化。通常, 岩层的总变形由岩层中各构造单元的单独变形的总和来确定。这种岩层根据其破坏程度可分为两类: 相当容易变形的节理碎片和完整岩石的坚固单元体。由此可见, 当一般不考虑坚固的单元体的变形时, 总变形是由比较松散部分的变形所决定的。在这种情况下, 岩石单元体之一的相对变形 ϵ 可以用加载前和加载时的节理体积 m_0 和 m_σ 之差表示 (即 $\epsilon = m_0 - m_\sigma$)。 m_0 和 m_σ^* 由微震声学法容易测出^[11], 同时, 如果已知 ϵ 和变形模数 D , 则容易求出应力 σ 。然后, 即可求得介质的微震声学参数与作用于介质中的应力的关系方程式:

$$\sigma \approx \frac{DS(Kq-1)}{Kq+DS\alpha(1-KqQ)} \quad (2-1)$$

* 原文误为 m_σ 。——译注

式中, 引用了下列符号:

$$S = \frac{V_{30}^2 \rho_{30}}{V_0^2 \rho_0}; \quad q = \frac{V_\sigma^2 \rho_\sigma}{V_0^2 \rho_0}; \quad Q = \frac{V_0^2 \rho_0}{V^2 \rho} \quad (2-2)$$

V_0, ρ_0 ——当 $\sigma=0$ 时, 破裂岩体中纵波的传播速度和岩体密度;

V_{30}, ρ_{30} ——当 $\sigma=0$ 时, 变形岩层中纵波的传播速度和岩层密度;

α ——由随压力而变的 $V_{30}^2 \rho_{30}$ 这个乘积的变化所确定的系数;

V_σ, ρ_σ ——当 $\sigma=\sigma_i$ 时, 破裂岩体中纵波的传播速度和岩体密度;

V, ρ ——当 $\sigma=0$ 时, 完整岩体中纵波的传播速度和岩体密度;

K ——考虑到变形岩体内应力分布的不均匀性的系数, 它与加载条件有关。

在方程2-1中所出现各参数的物理性质使我们可以将下列六个参数作为决定 σ 值的变量来考虑, 它们是: $V_0, V_\sigma, V, V_{30}, \rho_{30}$ 和 K 。对实验数据的分析表明下述事实, 即在一种岩石内, 当其含水条件和风化条件变化不大时, 参数 $V, V_{30}^2, \rho_{30}, \alpha$ 和系数 K 变化很小。在这种条件下, 应力的相对变化完全取决于 V_0 和 V_σ , 因此, 为了求出应力, 必须应用 σ, V 和 V_0 的率定曲线。

由上所述, 用微震声学法测定应力的一般步骤可概括如下:

- 1) 根据微震声学法和地质力学的详细研究^[11], 划分所给岩体的类型, 并确定参数 $V, V_{30}^2, \rho_{30}, \alpha$ 和 K 的变化*。
- 2) 对于上述各参数比较稳定的岩体, 绘出 σ, V_0 和 V_σ 关系的率定曲线。
- 3) 确定在岩体中 V_0 和 V_σ 值的分布, 然后进行计算。

2. 弹性波波速和压力间关系的研究和率定曲线的绘制

现时, 确定岩石试件或局部区域的压力与弹性波波速的独立关系曲线所使用的微震法是很先进的方法^{[3][4][8]}, 仅当岩石的波速接近 V_0 时, 用上述方法绘制的曲线和表明 σ 和 V_σ 之间关系的曲线才可用来计算岩石应力, 而在静止状态则不能用。当需要绘出上述的关系曲线 (即 σ 值和两个参数 V_0 和 V_σ 的关系) 时, 必须在一定的 V_0 下, 求出大量的 σ 和 V 的单独关系。在现场, 要得到这些数据是比较困难的, 如果参数 $V, V_{30}^2, \rho_{30}, \alpha$ 和 K 在现场和在实验室都是常数, 则利用实验室研究的结果似乎更为方便。在使用实验室数据时, 必须引入一定的修正系数。在本文中, 是根据实验室和现场试验所得的关系曲线 $\sigma=f(V_\sigma, V_0)$ 来求修正系数的。

为了确定 $\sigma=f(V_\sigma, V_0)$ 的关系, 在实验室按标准方法用不同直径 (由试验巷道的钻孔取出) 的岩芯进行单轴压缩试验^[7]。基于试验所得的结果, 对于每个固定的 V_0 值, 绘出 $V_\sigma=f(\sigma)$ 和 $\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_\sigma - V_0}{V_0} = f(\sigma)$ 的曲线。正像预计的那样, $V_\sigma=f(\sigma)$ 关系曲线在很大程度上随 V 而变, 并且应该记住, 当 V_0 很小时, 速度和压力的关系有较大的变化。这一点从物理观点上是很易理解的, 因为岩体节理较发育且内部裂隙较多, 则 V_0 较小, 当压力

* 如实验所表明^[11], 某些相似条件保证了岩体的静力学参数和动力学参数 α 间关系的稳定性, 所以以后在指明特性时, 即可以用 σ, V_σ 和 V_0 的关系来考虑。

加大时, 许多节理和裂隙便闭合起来。

所得到的 $V_\sigma = f(\sigma)$ 的单独关系可用于绘制表示 σ 、 V_σ 和 V_0 的关系曲线综合图。这个图在 σ 、 $\frac{\Delta V}{V_0}$ 和 V_0 坐标系中是一个很复杂的曲面, 见图 2-2(a)。为此, 首先需绘出 $\frac{\Delta V}{V_0} = f(V_0)$ 与参数 σ 的所有关系曲线, 如图 2-2(b) 所示, 图中的试验点仅表示当 $\sigma = 70$ 和 300 公斤/厘米² 时所得到的数据, 恰好落在粗实线以外。将 $\frac{\Delta V}{V_0} = f(V_0)$ 的曲线进行变换, 容易绘出 $\frac{\Delta V}{V_0} = f(\sigma)$ 曲线, 如图 2-2(c) 所示。

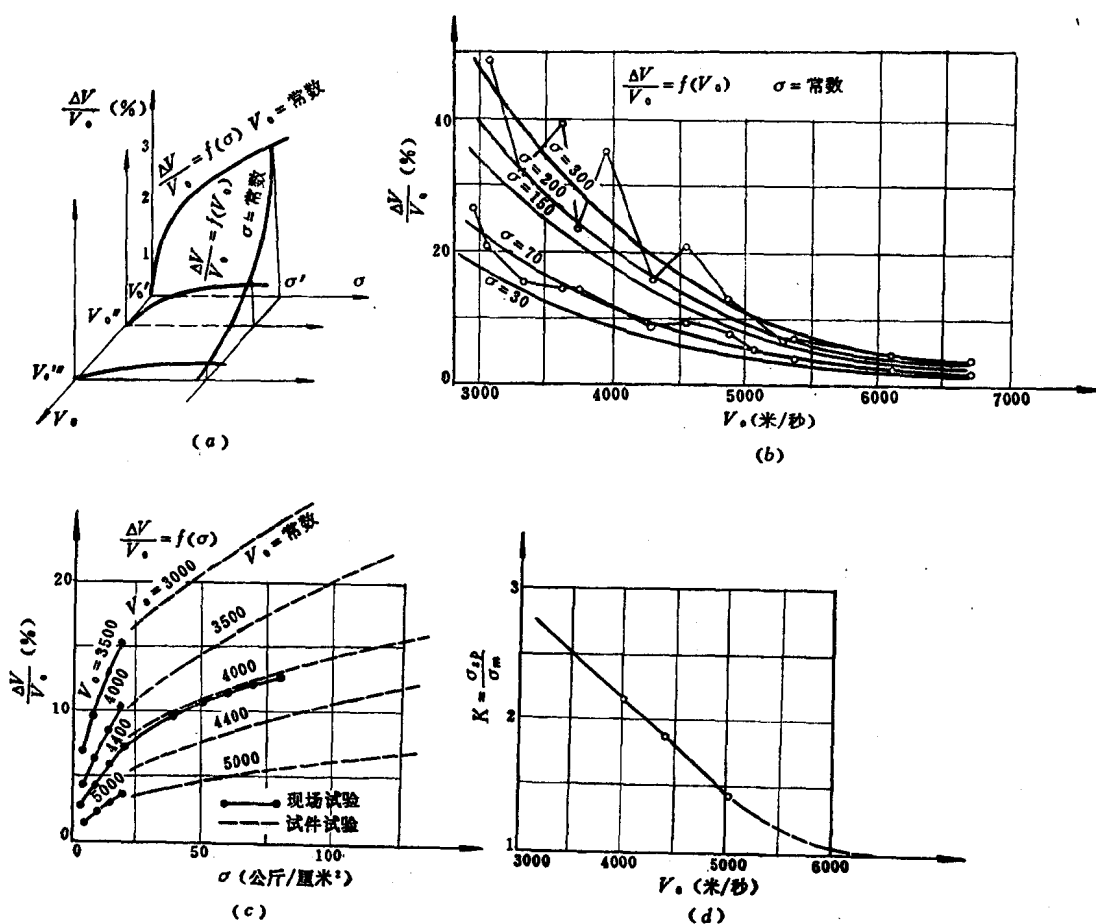


图 2-2 求波速与压力之间关系的试验结果

(a) 在三维空间中的 $\frac{\Delta V}{V_0} = f(\sigma, V_0)$ 关系曲线; (b) 根据试件试验, 当 $\sigma^* =$

常数时, $\frac{\Delta V}{V_0} = f(V_0)$ 的关系曲线; (c) 试件试验和现场试验的关系曲线比较;

(d) 当 V_σ 不变时, 试件和现场岩体中压力之比

* 原文误为 V_0 。——译注