

地应力测量与研究

〔美〕 B. C. 海 姆 森

等著

丁健民 等译

〔苏〕 И. А. 图尔恰尼诺夫

地应力测量与研究

[美] B. C. 海姆森 等著
[苏] И. А. 图尔恰尼诺夫

丁健民 高莉青 祁英男 译

张崇寿 校

地震出版社

1982

内 容 提 要

本文集包括选译的国外有关地应力测量和研究文献 28 篇及编写的两篇。共分为原地应力测量、水力压裂应力测量、地震波各向异性应力测量和震源机制解应力分析及地应力研究综述五部分。其中重点介绍了水力压裂应力测量的仪器设备和具体测量方法,以及室内试验和野外测量结果。同时还介绍了与地震有关的深部应力场的探测和分析方法,以及在工程地质、地质勘探、矿业和土工隧道工程方面可以采用的新的浅部地应力测量仪器和技术。

本文集可供地震地质、地质构造、岩石力学、工程地质、地质勘探、矿业和土工隧道工程等科研和工程技术人员以及有关大专院校教学人员参考。

地 应 力 测 量 与 研 究

[美] B. C. 海 姆 森 等著

[苏] H. A. 图尔恰尼诺夫

丁健民 高莉青 祁英男 译

张崇寿 校

地震出版社出版

北京复兴路 63 号

建国门外印刷厂印刷

北京新华书店发行所发行

各地新华书店经售

787×1092 1/16 16 印张 389 千字

1982 年 8 月北京第一版 1982 年 8 月北京第一次印刷

印数: 0000—3,000

统一书号: 13180·169 定价: 1.70 元

目 录

一、原地应力测量

深钻孔三轴岩石应力测量及其在巷道设计和建设中的应用	R. Hilscher 等 (1)
原地测量应力与深度关系的趋势	E. T. Brown 等 (11)
岩体中测量应力的方法	И. А. 图尔恰尼诺夫等 (17)
根据近地表现场测量得出的加利福尼亚帕姆代尔地区圣安德烈斯断层附近的应力图象	M. L. Sbar 等 (27)
非洲南部的原地应力测量	N. C. Gay (37)
非洲南部的水平主应力	N. C. Gay (45)
奥地利的原地应力测量	F. Kohlbeck 等 (50)
印度卡利纳迪水电工程纳格贾里隧道的岩石应力测量	P. C. Saxena 等 (55)
根据矿山隧道应力测量和地震观测资料研究澳大利亚地壳上部的应力状态	G. Worotniki 等 (62)
根据实地勘测的结果和地壳现代运动的资料研究德意志民主共和国东南部的应力状态	П. 克诺尔等 (78)
使用平行钻孔法测定岩体应力的理论和结果	А. П. 科列斯尼科夫等 (82)
决定岩体应力状态的地质因素	Г. С. 佐洛塔列夫 (86)

二、水力压裂应力测量

水力压裂法应力测量	B. C. Haimson (93)
测定深部原地应力的一种简单方法	B. C. Haimson (101)
沃特卢石英岩中近地表和深部水力压裂应力测量	B. C. Haimson (115)
加利福尼亚中部圣安德烈斯断层附近的原地应力测量	W. S. Keys 等 (123)
圣安德烈斯断层附近的深部应力测量——关于深部剪切应力大小的推论	M. D. Zoback 等 (131)
根据原地应力测量结果推断地壳上部的应力(评述)	F. Rummel (150)

三、地震波各向异性应力分析

地震波速度各向异性与原地应力的关系	I. A. Turchaninov 等 (157)
-------------------	---------------------------

根据实验资料研究地壳和上地幔弹性性质的各向异性
.....E. M. 切斯诺科夫 (161)

体波速度各向异性实验资料和理论资料的对比.....E. M. 切斯诺科夫 (178)

小高加索地区的地壳各向异性..... M. K. 波尔什科夫等 (185)

莫涅朗岛深井岩石中纵波速度各向异性的变化与构造应力的关系
.....M. 伊. 斯科丽科娃 (189)

测定岩体应力的地震波方法.....B. M. 普罗库里亚科夫 (192)

亚美尼亚地区地震波速度各向异性和地壳应力状态
.....Г. B. 耶戈尔基娜等 (195)

日本海大爆破揭示的波速各向异性..... 冈田 广等 (204)

四、震源机制解应力分析

帕米尔地区的震源机制(震源深度100--200公里).....E. И. 希罗科娃 (211)

太平洋地震带的震源应力方向与板块构造理论.....Л. M. 巴拉基娜 (218)

五、地应力研究综述

水力压裂应力测量方法简介.....丁健民 高莉青 祁英男 (230)

国外地应力研究中的几个问题.....丁健民 高莉青 祁英男 (237)

一、原地应力测量

深钻孔三轴岩石应力测量及其在巷道设计和建设中的应用

R. Hiltcher J. Martna L. Strindell

一、引言

瑞典的基岩，总的说来是优质岩石。因而，人们对它的要求很高，总是希望用最少的支架或甚至不用支架来构筑大型地下巷道(Hiltcher, 1972)。

由于岩石是优质的，也就比较易于准确测出岩石的初始应力，即构造应力和重力应力。考虑到岩体物理性质引起的偏差、工程地质环境以及建筑和安全上的实际需要，也可以根据测量所得出的初始应力分布状况来研究岩体巷道的稳定性，因为可以设想不很均匀的岩体中的应力只会稍微偏离理想的应力状态。

过去十五年间，瑞典电力部在一些建筑工地进行了若干次岩石应力测量；特别是在几条著名的长隧道中，如在索瓦-维塔斯隧道(7.5 公里)、里特塞姆隧道(18 公里)和朱克陶隧道(25 公里)中，测量了岩石的应力状态。

观测结果表明，初始应力的大小和方向一般说来是不能预测的，因为各处可能有相当大的变化，甚至在表面上看来是均匀的岩体中也是如此。要了解大型岩体的应力，就需要进行全面的测量。

迄今为止，已在一些隧道和一些岩体巷道的浅孔中(最深约 15 米)进行了应力测量，但测量时挖掘工程已在进行。因此，对巷道设计能起的作用已是很小。通常是当开挖中出现了困难，以及要决定所需支架的尺寸大小和采取安全措施已成为问题时才进行测量。

如果在规划和设计巷道时要利用岩体的应力状态，那么在建筑工程动工前，也就是在挖掘坑道和凿井之前，必须测量岩石中的应力。因此，就必须在深孔中进行测量。

许多构筑设施，如地下发电站、石油存储库、防空洞等等，常常位于地表以下 30 至 150 米的深处。对于另一些构筑设施，如核废料贮藏隧洞和地下泵房、发电站，则需要测量到 500 米左右的深度。

瑞典电力部研究出一种特殊的方法，以进行这样的岩体应力测量。在这方面，有两个主要的问题必须解决，一个是要研制出遥控的自动化测量装置；另一个是由于所选定的方法，需要掌握水下粘贴应变计的技术，因为深钻孔通常是充水的。

二、方法选择

对于岩体应力测量来说，我们选择了人们所熟悉的 Leeman 和 Hayes(1966)方法。使用这类方法时，将图 1 所示的三个玫瑰花应变计，粘贴在大孔底部的小孔壁上(见图 3)。根据用大口径金刚石钻头对应变计进行套心卸载时，九个独立的应变计(三个纵向的、三个切

向的和三个 45° 的)测量应变的结果,便可以测定所钻得的管状岩心中的三轴应力张量。

之所以选择这类方法,是因为它的理论原则是严格的,而不是近似的方法,并且计算公式简单,材料常数 E 和 ν 的测量也很容易。

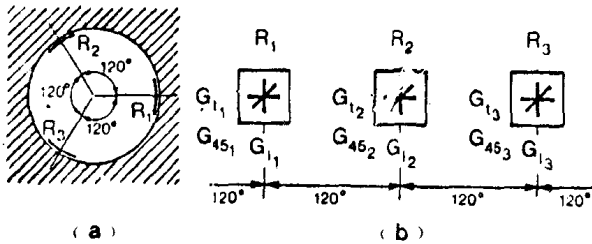


图 1 按照 Leeman 和 Heyes 的方法在小钻孔中布置的应变计

- (a) 安置在钻孔中的玫瑰花应变计 R_1 、 R_2 和 R_3 ;
(b) 由外侧所见的岩心壁展开图,表示出 9 个应变计 G_{11} 到 G_{453} 的位置

三、在充水钻孔中粘贴应变计的问题

市场上有一些建筑工业用的粘合剂,例如环氧树脂和丙烯树脂,这些粘合剂可用来进行水下粘贴。用机械的方法,能够把粘合剂涂在湿的岩石上,或者凝结在岩石上。通过这样的操作,水就被树脂所取代。然而,在钻孔里,环氧树脂只能在低温(大约 $+6^\circ\text{C}$)下缓慢地固结。并且,在这样的温度下,加速

粘合剂的固结速率实质上是不可能的,更谈不上快速固结的问题。另一方面,丙烯树脂的固结易于控制,即使在低温下也可以通过调节催化剂(过氧化苯酰)的数量来控制。进行必要的操作所需的粘合剂适用时间约为 20 分钟,因此粘贴之后总的固结时间为 2 小时左右。仿照大家所熟悉的玻璃纤维技术,使用象硅烷那样的固结剂也是有效的。

所有的塑料粘合剂与水接触,将会吸附一定程度的水,从而它们的性质就会改变。由于这一原因,研究了一种粘贴的方法,就是将应变计浸没在装有粘合剂的罐子里,再放进钻孔中,直至到达测量的位置上,才将应变计从装有粘合剂的罐子里取出来,并用“鼓风”的力量,将它压在钻孔壁上。鼓风的力量基本上将应变计和钻孔之间的水层排除掉。遗憾的是,粘合剂并不能经由压力而渗透进湿的钻孔面中。现已观察到,对湿的钻孔面使用一种聚合力和粘性更大的粘合剂所得出的粘合力比用流体粘合剂所得出的要高得多。使用厚度约为 2 毫米、孔隙直径也为 2 毫米的一种聚氨基甲酸乙酯泡沫塑料层,也能在一定程度上达到使用高粘度粘合剂时明显出现的“捏和与清除的效果”。当应变计浸没在装有粘合剂的罐子里时,泡沫塑料层贴在应变计上并浸入粘合剂中。当应变计受压贴附在钻孔壁上时,这一泡沫塑料层几乎全部被压出粘合剂的接合面。

在圆柱形钻孔中,粘贴应变计的作业本身仅就纯几何原因来说已是困难的。要使圆柱形钻孔表面与应变计及其托座正确地发生联系就不容易。由于有一个夹在中间的橡皮层,粘合剂接合面上的压力将是不均匀的,这可能使得粘合剂接合面的质量不高。一种由塑性形变材料构成的中间层[即,能自熔的异丁(烯)橡皮胶布],中间部分比四周厚,可以使压力的分布非常均匀,并且使粘合剂和水由玫瑰花应变计的中央部位挤压出来。

要使粘贴应变计的结果可靠,其先决条件是必须使圆柱体的形状十分精确,钻孔内侧面的质量要尽可能好些。因此,孔壁必须绝对平滑,不能有任何不平整。用一种专门的装置进行小金刚石钻头的准确定心(± 0.5 毫米)和采用一种扩孔器可大大有助于达到此目的。

四、仪器装置

在钻孔中粘贴玫瑰花应变计的仪器是由一个管形探头构成的,探头的直径为 60 毫米,长为 1500 毫米左右。仪器放入钻孔里,用承载和测量两用的电缆悬挂着。探头的下端是玫瑰花应变计的托座。它主要由三个塑料舌簧组成,舌簧的顶部互相连结(图 2)。玫瑰花应变计

安装在这些舌簧的下端，并且（如第3节所述）浸没在一个装有粘合剂的罐子里，当探头放入钻孔时，这个罐子在托座上滑动。一个中心圆锥在探头的管子内受自重的驱动，在适当的时候。贴着钻孔壁施压于带有应变计的托座舌簧。本文第5节将更详细地描述这种仪器的使用方法。

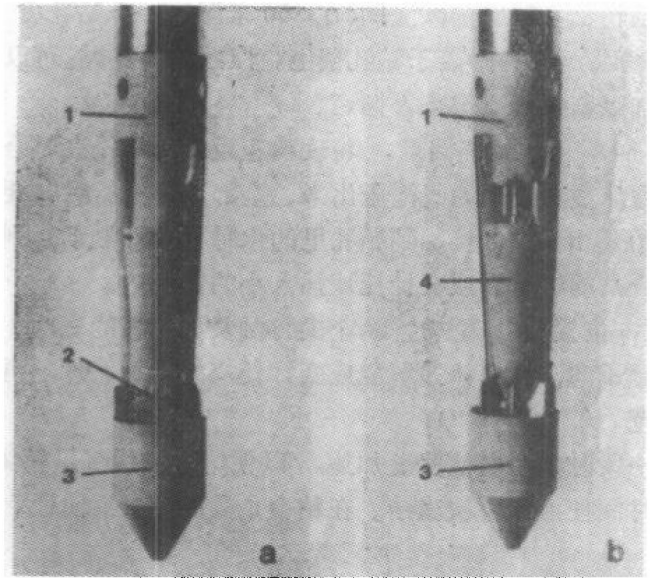


图2 应变计托座、装粘合剂的圆罐和压力圆锥
(a) 总视图，(b) 被切开的一个舌簧。(1) 托座，
(2) 具有聚氨基甲酸酯泡沫塑料层的玫瑰花应变计，
(3) 装粘合剂的罐子，(4) 压力圆锥

为确定探头的方位和被粘贴的应变计的方位，可将一罗盘推进探头里。当温度在 $+15^{\circ}\text{C}$ 以下时，专用的罗盘液冻结，将罗盘指针凝固在一定的位置上。当探头再次被提取上来之后，就可以读出罗盘指针相对于应变计的位置。显然，随后还必须对钻孔进行检验，看看是否有磁性干扰。

五、测量程序

图3以图解的形式表示出测量的程序。

1. 在所需要的深度上，打一个直径为76毫米的钻孔。最后一段岩心必须是拉断的，而不是扭断的。这样，岩心的断裂面与钻孔轴垂直，使得钻取较小的钻孔格外方便。
2. 把一个直径为36毫米的小钻孔非常准确地确定在大钻孔的中心，并钻进大约400毫米。
3. 根据小的岩心，可以判断岩石是否有节理，是否符合测量的质量要求。通过岩心的鉴定，还可以判断钻孔不平整的程度或在其它方面是否符合质量要求。如果条件（见第3

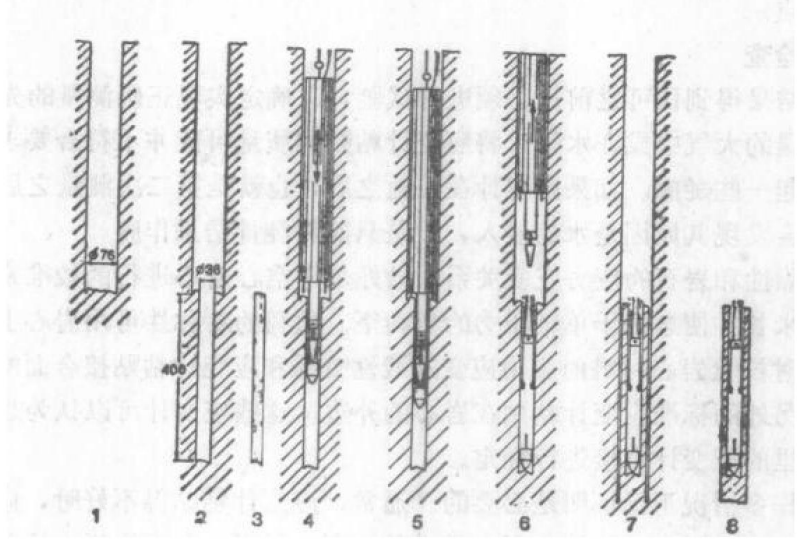


图3 粘贴与测量的工作程序

1. 76毫米的钻孔， 2. 36毫米的钻孔， 3. 小岩心的鉴定， 4. 机械装置启动前的探头位置，
5. 粘贴，第一次测量， 6. 托座脱离与探头提升， 7. 套心， 8. 第二次测量

节)不完备,那么必须继续在76毫米的钻孔中往下重复上述工序。为了使打孔时产生的岩石粉末全部除掉,在提取小岩心之前,必须将钻孔彻底加以洗刷(在300米深的一个钻孔里,用2兆帕的围压洗刷约30分钟)。否则,岩粉将沉淀并附着于钻孔壁上,以致妨碍粘贴。可以通过检查小孔的底部和装粘合剂的圆罐来加以鉴定洗刷得是否彻底。

4. 将探头挂在钻孔上,调制丙烯粘合剂,使之装满圆罐,将玫瑰花应变计浸没在粘合剂中,再将粘合剂罐子里聚氨基甲酸乙酯泡沫塑料层中的气泡压出来。全部工序进行时,要不断核对时间。然后将探头放入钻孔,开始要相当快(接触到钻孔里的水时要立即制动),到最后几米时要特别小心。最后,要使装粘合剂的罐子和应变计托座插入小的钻孔内。

5. 当探头到达粘贴的准确位置时(这一位置可以调整),两个尖钉触及大钻孔的底面。启动机械装置,探头的重量将装粘合剂的罐子向下推掉,并解脱应变计托座的舌簧。然后再向下移动,这样中心圆锥将舌簧压向钻孔壁。

粘合剂凝固期间(大约2小时),要有一段时间用电使罗盘加热,以便熔化液体(见第4节),并使罗盘指针能自动调节。还有一段时间使液体再次冻结。在粘合剂凝固的最后阶段,开始对9个应变计进行测量。

长导线的电阻很大,使得应变计的灵敏度降低,对此必须进行校正。如果在超过300米的深度上测量,最好采用专门的测量电路,在这种情况下,测量将不受导线电阻的影响。

6. 提升探头。运转开始时,使应变计托座脱开并切断导线。将托座与应变计一起留在钻孔中,用软的异丁(烯)橡皮胶布将应变计固定住(见第3节)。

7. 用76毫米的钻头套心,得出一个装有应变计的空心岩心,这时应力被解除。

8. 岩心提出后,立即将应变计的导线再同探头的导线连接起来。用完全是原来钻孔中的导线,对现已松弛了的岩心上的应变计再次进行测量。第二次测量时,必须小心地使岩心保持着与它在钻孔中时一样的温度。为了观测是否有蠕变和浸入水的影响,要连续测量约两个小时。如果没有什么事故发生,那么,包括现场的钻探和2—3小时的凝固时间在内,完成一次200米左右深度的测量,大约需要5个小时。因此,在一个较长的工作日内,可以测量彼此相近的两个点。

六、试验的检查

在一次测量结果得到认可之前,必须进行试验,以确定实现正确测量的先决条件是否已得到满足。在潮湿的大气中或在水下,将应变计粘贴到质量可能并不符合要求的圆柱体钻孔壁上时,总会引起一些疑虑。如果应变计在松弛之后,也就是第二次测量之后,表现出强烈的蠕变,人们常会发现其原因是水的浸入,于是只能将测量结果作废。

应变计的可靠性和岩石的应力应变关系,最好是用空心岩心进行的校准来检验。把这些岩心截成300毫米长并使之处于单轴压力的负荷下。负荷的对称性可用岩心上的纵向应变计来检查。需要同时检验岩心材料的应力应变的线性关系和应变计粘贴接合面的可靠程度。为此目的,必须将另外的标准应变计粘贴在岩心的外边。这些应变计可以认为是可靠的,因此,可以对贴在钻孔里的应变计直接进行标定。

这种检验在许多情况下已证明是必要的。通常,应变计粘贴得不好时,应力与应变的关系既不是线性,也不显示出重复性,所以很容易辨别。然而,在起伏不平的曲面上,应变计可能表现出连续的和再现的应力应变关系,但得出的是过份小的应变值(因为应变计的应变灵敏度系数太小)。这样的应变计通过标定试验即可以鉴别出来,通过标定还可以验证岩石应

力应变的线性关系,从而得出岩心在纵向上的弹性模量和泊松比。

同时,还可以研究岩石中的蠕变。在相当于测得的初始应力的某一负荷下,片麻状花岗岩试样(见图4和图5)的蠕变与测量结果的总精度相比是可以忽略不计的。

七、岩石中局部应力、自动补偿应力和残余应力的影响

通过上述检验之后,对岩心的应力测量结果才能认为是可靠的。然而,观测表明,粘贴在钻孔里的三个平行的、纵向的玫瑰花应变计,几乎没有象理论所要求的那样表示出相等的数值。这表明,局部的差应力在36毫米孔壁里由于套心而释放。由于这三个纵向的应变计在标定试验里反映的恰恰是相同的应力应变线性曲线图,观测到的差异,不可能是三个应变计的粘连接合面在质量上的差异或岩心的不均匀性引起的。

看来合理的一点是,这些测得的纵向应变值中的差异,是由岩石中的局部应力、自动补偿应力和残余应力引起的(Hiltscher, 1976),这些应力在打小钻孔时已有一部分被释放并在套心时又重新分布。因此,套心时释放的不仅是当前我们所研究的初始构造应力和重力应力,而且还有方向和大小都有变化的局部残余应力。残余应力往往会干扰构造应力和重力应力的测量结果,由于这些干扰应力是无规律的,所以无法校正。

如果能预先测定岩石中这些成问题的残余应力的强度,那么,就可以粗略估算出它的干扰与测得的总应力相比是大还是小。在每次测量中,通过观测三个纵向应变值的分散度也取得了一些有关这一问题的资料。

关于残余应力,曾在一些不同的岩块中做过初步研究。测量是通过在岩石表面粘贴玫瑰花应变计,并用锯切的方式使应力释放而进行的。石灰岩、大理岩和板岩显示出的局部残余应力为 $\pm 1-2$ 兆帕;而花岗岩为 $\pm 5-15$ 兆帕。

八、应力的计算

最后,根据检验过的测量数据(见第6节),基本上按照Leeman和Hayes的公式(1966),可以计算出岩心应力张量的三个主应力的方向和大小。在大多数情况下,岩石材料并不完全是各向同性的,就其弹性模量和泊松比而言,大体上是正交各向异性的。这种正交各向异性在计算应力时可大致地加以考虑(Hiltscher, 1969)。但是最简单的近似计算法是采用弹性常数的平均值,就好像材料是各向同性的一样。

在钻孔深处,还需要对测量点之上水柱引起的附加应力和提取岩心时卸载的应力加以校正。钻孔四周的这些附加应力以及每个应变计的方向上产生的应变可以根据弹性理论计算出来。在校正应力测量结果时,必须在计算应力之前将上述应变值从测量出的应变值中减去。

九、关于测量结果的讨论

到目前为止,这种方法已在9个钻孔中经过试验,其中3个钻孔是为进行研究而打的,其余6个钻孔是为实用的目的而打的,钻孔的深度达到320米。图4和图5表明从斯德哥尔摩东北福斯马克核电站附近250米深的钻孔中取得的一些测量结果。岩体是优质片麻花岗岩,节理甚少。由于预计到测得的数值会非常分散,所以在每一个测量深度上都先后进行了三次测量。图4表示测得的主应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 (规定 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$,张力为正量)。图4中两个大的压应力 σ_2 和 σ_3 接近于水平,主应力 σ_1 接近于垂直,平均偏差约为 12° 。虽然计算了三维应力张量,但图中未表示。

图4中,在每一测量深度上测出的应力值的分散情况,部分是由岩体应力的实际变化引起的,部分是由岩石的不均匀性和不连续性以及上述的局部应力、自动补偿应力和残余应力

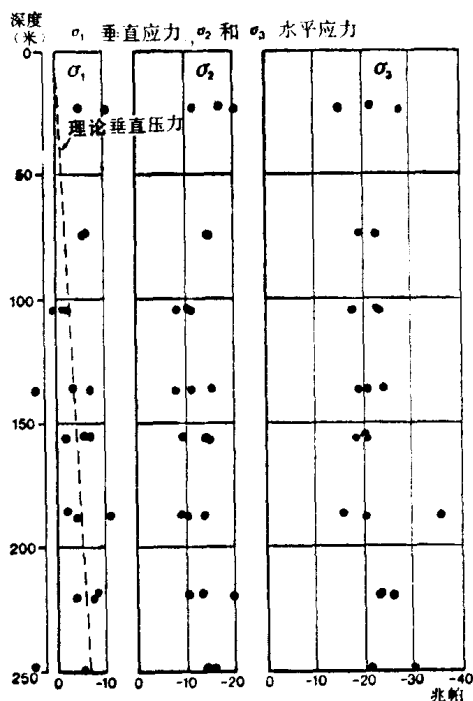


图 4 DBT-3 号钻孔测得的主应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 随深度的变化
在每个测量深度上进行了三次全套的测量。规定 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ，张应力为正量

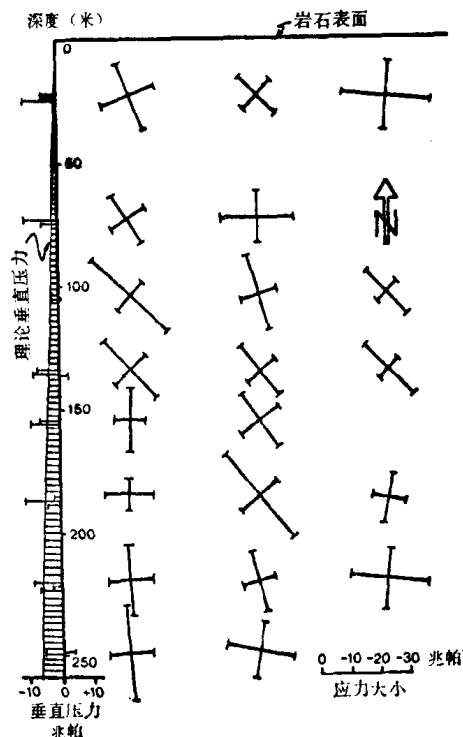


图 5 DBT-3 号钻孔测得的水平面上的次级主应力和垂直压力与深度的关系

引起的。在福斯马克花岗片麻岩中，以上提到的这些应力看来不是十分重要的。

是否能根据对单个岩心进行的应力测量来确定每一测量深度上的平均值，并把它当作该深度上的平均岩体应力，这取决于测量的次数和测量结果的分散程度。

图 5 以简化的形式表示出水平面 (xy 平面) 上“次级主应力” σ_{2xy} 与 σ_{3xy} 的大小和方向。这些应力对实际应用来说是最重要的应力。图中显示的垂直应力并不是在每一个单独的点上都与上覆岩石的重量一致。这些偏低和偏高的数值可能是由上述岩体的不均匀性和岩石材料的残余应力引起的。

就实际应用而言，从图 5 中可得出有关岩石主应力的一个非常良好的概念。

这一资料是从一个研究钻孔中获取的。实际上，从上到下以等距离在不同的深度上作应力测量通常是很耗费时间的。在这种情况下，可将钻孔打到计划开挖巷道的深度上，而在那些对于岩体巷道的稳定性很重要的深度上进行必要的应力测量。

十、应用上述方法的先决条件

要使用这一方法，必须具备以下先决条件：

(1) 必须有可能从岩石中取得管状的空心岩心，并且要求岩心没有节理，长度不小于 300 毫米。

(2) 要测的岩石应力必须明显大于所预计的分散应力，即大于由上述岩石材料的残余应力引起的分散度和初始岩石应力分散度的总和。

(3) 另一方面，要测的岩石应力相对于岩石的抗张强度不得过大。否则，打孔时岩心将

分裂成圆盘状或圆环状，测量也就不可能了。

十一、巷道周围的应力

对于巷道的稳定性来说，巷道周围感应产生的边界应力是很重要的。这些应力可以从理想的、均匀的、各向同性和弹性的介质中，根据弹性理论和实际测出的初始应力计算出来。边界应力是巷道周围应力场中最大的应力；从边界到介质内部应力衰减的速率基本上是了解的。边界应力与巷道和边界弯曲部分的相对宽度 w/h 有关，显然与巷道的大小无关。所以，一个小巷道和一个大巷道如果几何形状一样，它们顶部的应力是相等的。

图 6 a、b 表示出初始应力是单轴垂直的和单轴水平的两种极个别情况下巷道周围的应力分布。很明显，岩石的垂直单轴初始应力造成巷道顶部的张力和巷道壁上的压力，而水平单轴初始应力造成巷道顶部的压力和巷道壁上的张力。在这两种极个别的情况下得出的张应力可能是最大的应力。例如，从图 6 c 中可以看出，在垂直应力与水平应力相等的双轴情况下，不出现张性的边界应力。然而，与上述单轴的情况相比，底边棱角的压应力增大了。在一定的环境中，由于巷道壁底部过度破碎的扩展，可能会造成巷道的不稳固。

图 6 d 表示的是索瓦-维塔斯隧道中非垂直单轴初始应力的一个实例。在这一实例中，一些大的初始应力区内出现了一种特殊类型的过度破碎现象(Martna, 1972)。

让我们来区别一下两种不同的张力状态。一种是表现为边界应力的感应张力。这一种张力，在巷道挖掘之前是不存在的。它在理想模型中表现为张力，但在实际岩石中表现为节理的逐渐张开和岩石的逐渐松散。第二种是原始张力，这种张力象地质证据（张开节理，正断层）表明的那样，在巷道挖掘之前早就存在于原来的岩体中。在这种情况下，张开的节理有时为粘土或其它物质所充填，它们和松散的岩石可在挖掘巷道时遇见。

由于初始张应力可能因节理张开而迅速解除，所以用岩石应力的测量方法来探测它并不合适。另外有一些方法，如地质观测和水压试验，更适合于对这种连接岩石的研究。

关于这两种张力状态的实际结论有一些差别。初始张力造成的张开节理就感应产生的应力造成的张开程度来说，明显地不受巷道几何形状的影响。由于

挖掘巷道之前存在着初始的张开节理，那么，在掘进过程中，张节理的不利影响就会立即显示出来，同时，由于感应张力而张开的节理将有一个更为滞后的作用。

十二、与应力有关的岩石拱顶

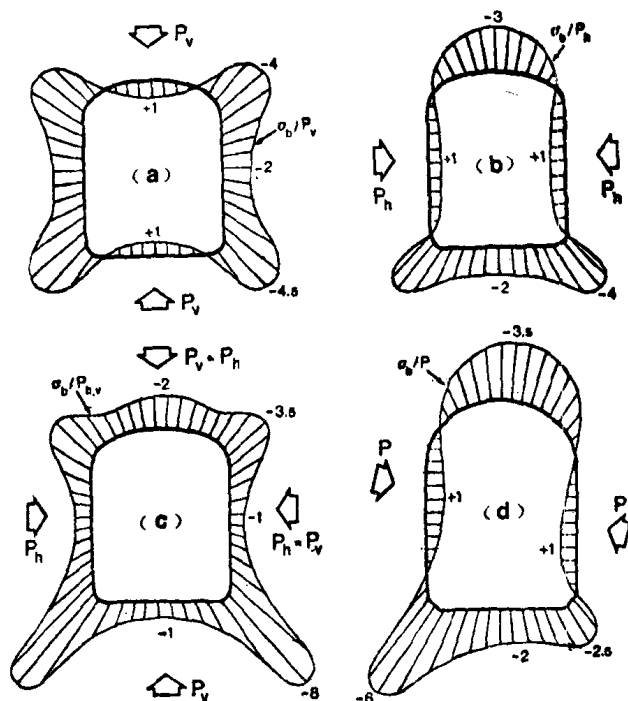


图 6 在初始应力不同的情况下，巷道边界切应力 σ_s/P 的理论分布

(a) 单轴垂直应力，(b) 单轴水平应力，(c) 双轴的垂直应力和水平应力，(d) 索瓦-维塔斯隧道中一个非垂直单轴应力的实例（参阅图 8）

正如引言中所提到的，在瑞典由于普遍存在优质岩石和良好的岩石应力状态，所以坚固的巷道仅需稍加支护就行了。

要使巷道坚固，最重要的因素是要有一个坚固的拱顶。对于巷道的两壁来说，采取支架的措施比较容易，所以其稳固性如何就不那么重要。

顶部坚固的先决条件是要筑成一个天然岩石的拱顶。这对于节理发育和松散的岩石来说是困难的，甚至是不可能的。这在理想的理论模型中就相当于张力带。有了这种主导的初始垂直压应力，就很难筑成一个坚固的顶部。另一方面，主导的初始水平压应力，在很大程度上将有助于拱顶的筑造。由于岩石受压，节理发生摩擦运动，在限定的岩体内，拱顶将受到反压力。

如上所述(第 11 节)，边界应力并不随巷道规模的增大而增加。另一方面，节理或复合节理(不利于筑造拱顶)发生的机率将随着拱顶的跨度而增加。不过，如有占优势的水平压应力，通常在节理稀少、连接良好、强度较大的岩石中形成拱顶。我们知道，有一些很大的天然洞穴，没有任何支撑，其跨度超过了 100 米(Barton, 1976; Bjurström, 1976)。

要使拱顶能够存在，就象在一个坚固的岩石巷道的顶部所必须的那样，一定不能有正应力和剪应力的复合以及节理的连通发生。一定的节理方向就其本身而言没有害处，这很容易说明。以一个砌筑的拱顶为例，如果节理的方向与巷道和应力轨迹的关系适当，那么，这些节理的方向是可以允许的，并不影响巷道的稳固。对某一节理或组合节理来说，其摩擦力和内聚力必须超过出现的剪切力。

然而，岩石拱顶有相当大的自动稳定的能力也是同等重要的。据悉在这方面有两种不同的现象。如果节理的性质是适宜的，但反压力不够，那么拱顶在一定程度上能够因沉降而自我稳固。另一种情况，如果反压力是足够的，但节理的几何形状是不适当的，而且条件不显太坏，那么就能够通过岩崩产生另一个稳固的拱顶。

如果条件良好，在任意的节理方向上，岩石中可能形成一个内含的坚固的拱顶，这一拱顶高于原来的拱顶或与之对称。图 7 根据实际情况举出了几个例子。值得注意的是，自动稳固的拱顶是以这样一种方式产生的，即拱顶(应力轨线)与主要的节理方向之间的夹角趋于增大。我们认为，当单独节理之间的距离变得太小时，这种坚固的内含的拱顶不可能存在。

在瑞典坚硬岩石里挖掘的实际情况表明，由于有占优势的水平初始压应力，在中等有节理的岩石里，岩崩几乎总是有限的，挖出的巷道也是稳固的。

图 8 根据索瓦-维塔斯隧道的上层巷道 5×040 米横剖面上的实际情况说明了这一原理。在挖掘当中，这一地段曾出现过一些岩爆，那里的岩石承受着横跨隧道的相当大的近似单轴和近似水平的压应力。如图 8 所示，理论上的拱顶 1，即设计的隧道，曾有过瞬时的过度破碎，立刻超越了挖掘的限度。形成的隧道轮廓相当于理论的拱顶 2，加以岩栓之后，外表上看起来是稳固了，最后用钢筋混凝土灌浆锁定。当挖掘 10 米高的台阶时，由于岩块 A 脱落(或可能是被挤压出去的)，就出现了理论的拱顶了。距离此地段约 20 至 30 米的 5×010 到 5×020 米的一些剖面上，相当于图 8 中 B 例的一些岩块在挖掘上层巷道时脱落。但在这些地段没有再发生什么情况。

图 8 还说明了这样一种情况，一个岩石的顶部看起来不一定像一个拱顶。事实上，在坚硬岩石的隧道里，许多情况并非如此，一些横剖面有着不同程度的独特形状是普通的事。经验表明，它们几乎全是稳固的，尽管需要采取一些岩栓措施以防止局部的岩崩。由此可以推

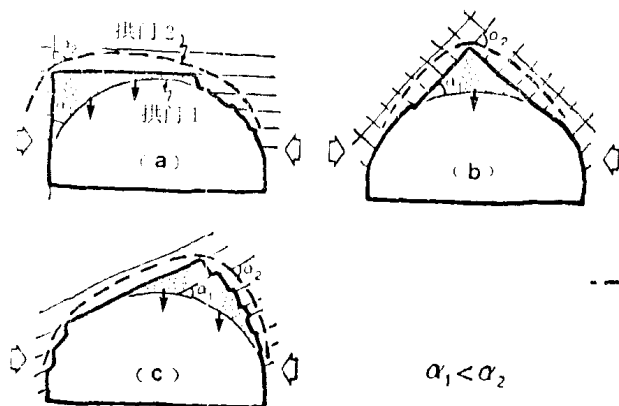


图 7 从初始设计的拱顶开始，节理方向对构筑稳固的拱顶的影响实例

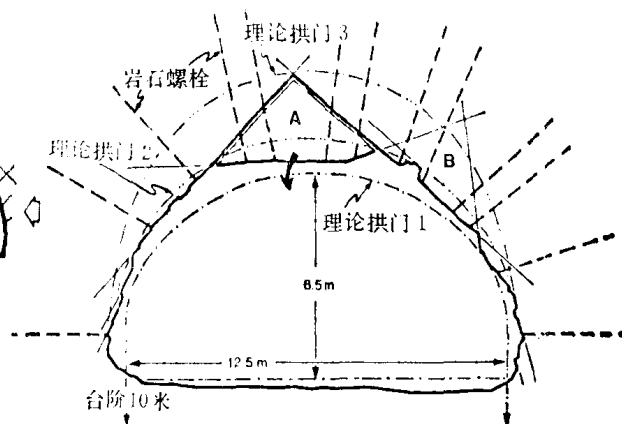


图 8 索瓦-维塔斯进水渠隧道的上层巷道，剖面为 5×040 米

断，在离岩石表面可能最短的距离上，应力会造成一个拱顶。

另一方面，如果我们考虑一下单轴应力或初始垂直压应力占优势的情况，就可以看出在这样的条件下，可能存在着一个哥德式尖峰状高拱顶(Sonderegger, 1963; Jaecklin, 1966)。由于这种类型的拱顶在挖掘工程中不实用，所以，在一般情况下常选择比较平的顶部。而且在顶部和支承拱顶之间还会产生大量的解除了应力的岩石，即所谓“特罗姆彼得带”。这种类型的顶部是不稳定的，因此需要支承。

在里特塞姆地区曾有这种顶部不稳定的例子。在这个例子中，人们在岩石表面之下 130 米深的断层一侧测出了 20 兆帕的初始单轴垂直压应力，此应力值比岩石覆盖层的重量大得多。近似垂直的断裂斜切隧道，从断层开始，在 30 米长的隧道顶部显示出岩石的连续破裂和松动，在隧道壁一侧上发生了岩石薄片状压性剥落。这种现象由于采取了岩栓和网结而暂时中止；永久性的支承则是岩栓和强力的混凝土灌浆。由于隧道是弯曲的，所以相隔 150 米又会遇到这一断层。一些剪切节理大概表明了它的位置，但是在挖掘过程中没有遇到什么麻烦。在那里的一次应力测量结果表明，双轴应力几乎是相等的(垂直应力为 12 兆帕，水平应力为 10 兆帕)。

十三、结 论

在斯堪的纳维亚有许多跨度约 25 米的岩石巷道，这些巷道需要少量的支承或不需要支承。岩石应力测量结论表明，水平压应力占优势时对岩石的拱顶是有利的。

然而，也有例外的情况。现已观测到岩石巷道顶部初始垂直压应力或早期初始水平张应力所造成的张开节理和松动的岩石。

并不是所有的巷道都是稳固的，其中有些巷道需要相当多的支撑。这种情况，在许多场合可以用这样的事实来解释，即某些岩体的物理性质对于建筑坚固的巷道来说并不适合。然而，由于巷道的数目有限，所以岩石应力测量进行得并不多。

尽管如此，我们在研究中型和大型巷道时已作了相当多的试验。然而，在研究跨度达 35—40 米以上的特大巷道方面，经验还很少。明显的是，在使用的方法和挖掘这种巷道的费用上有很大差别，这取决于我们所设想的巷道顶部是否基本上稳固。

适用于特大型岩体巷道初期设计和勘察的深钻孔岩石应力测量方法现已初步研究出来。其目的在于确定某个测点上是否存在有益的水平压应力以及这些应力的大小和方向，或者由于出现不适宜的垂直压应力或有早期的水平张应力的影响而排除掉一些预期的测点。

丁健民译自：Fourth Congress of the International Society for Rock Mechanics, 1979.

原地测量应力与深度关系的趋势

E. T. Brown E. Hoek

在地壳某一给定位置上,了解未挖掘前的应力状态,对地下岩体中大规模挖掘工程的合理设计是一个必要的条件。完善地测量原地应力状态可能是件困难的事,有时耗资巨大,而往往又不能奏效。因此,长期以来,人们十分关心能够发展用来预测原地应力的理论和经验关系,这就不是什么奇怪的事。这些理论中最为人们所熟悉的是,把某一测点的垂直应力当作上覆岩层重量引起的应力来计算,或者把水平应力当成这一垂直应力作用于某一弹性物体并完全制约该物体横向形变所需要的应力来计算。这一理论预示,水平应力相当于垂直应力或覆盖层应力的十分之几,并取决于岩石的泊松比。

1958年,Hast报道说,在斯堪的纳维亚的一些测点上,已经测量出水平应力是垂直应力的几倍,当时,人们对这样的结果产生了很大的怀疑。然而,在过去的20年间,有那么多研究工作者。在那么多的不同地点和不同的地质环境里,由地壳的浅层记录到了同样的图象,所以现在这一图象已成为一条规律而很少有疑议。讨论这些高水平应力的起因不是本文的目的,但应该指出的是,一般认为这样高的水平应力是由于种种不同的原因引起的,如:地壳板块运动、塑性形变和在局部剥蚀作用下卸荷后的弹性形变(J. S. Seagar, 1964)、某一地质时期里持续荷载下的蠕变、地形变化(B. Voight, 1966)、有时难以肯定其起因的构造力和地壳的总体结构等(Hast, 1969)。

如所预料,在数学上还没有一种理论能用来计算已记录到的变化范围较大的原地应力图象。然而,已有许多研究工作者能够确定出以某个地区或某个次大陆为基础的经验关系式。例如,Hast (1969)曾经证明,在芬兰斯堪的亚地块,有40次水平应力测量的结果符合于下面的关系式:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = (18.73 \pm 0.10) + Z(0.097 \pm 0.003), \quad (1)$$

式中 σ_1 和 σ_2 为水平主应力,单位是兆帕; Z 为测量点的深度,单位是米。Hast发现,世界其它一些地区取得的数据,其相关直线的斜率与方程(1)的直线斜率相同(仅在 $Z=0$ 时,具有不同的截距)。克罗波特金(1972)发现,方程(1)适合于在苏联的一些地区和其它一些国家取得的数据,同时提出,这样的关系式不适合于沉积覆盖层和裂隙发育的岩石。Hast (1972)声称已发现方程(1)类型的关系式适合于一切强度高的岩石。他并且提出,方程(1)还可以改写成:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = 18.63 + Z(\text{兆帕}). \quad (2)$$

Herget (1973)发现,从水平应力大于垂直应力的不同地区取得的几组数据,可以用下面的方程式表示:

$$\sigma_{h,v} = (8.16 \pm 0.54) + Z(0.042 \pm 0.002), \quad (3)$$

$$\sigma_v = (1.88 \pm 1.23) + Z(0.026 \pm 0.003), \quad (4)$$

式中 $\sigma_{h,v}$ 和 σ_v 为平均水平应力和垂直应力,单位是兆帕; Z 为深度,单位是米。需要注意的是Herget也发现了几组数据,其中 $\sigma_{h,v} < \sigma_v$ 和 $\sigma_{h,v} \approx \sigma_v$ 。

最近, Haimson (1978) 发现, 在美国运用水力压裂测量原地应力的结果适合于以下的关系式:

$$\sigma_{h,v} = 4.90 + 0.020 Z, \tag{5}$$

$$\sigma_v = 0.025 Z. \tag{6}$$

Worotnicki 和 Denham (1976) 发现, 澳大利亚一些地区的水平应力比 Hast (1969, 1972)、Kropotkin (1972) 和 Herget (1973) 所报道的水平应力低, 可以表示为:

$$\sigma_{h,v} = 7.26 + Z(0.0215 \pm 0.0028). \tag{7}$$

象 Herget 一样, Worotnicki 和 Denham 也发现澳大利亚一些地区的水平应力有小于或等于垂直应力的情况。

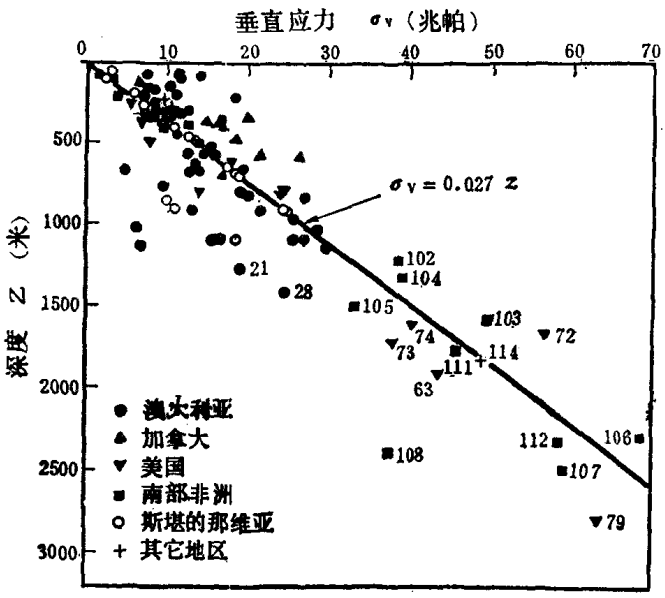


图 1

根据以上对这一问题的研究结果, 并根据对文献报道过的许多测点和测量方法的了解, 作者制作了一个广泛的应力测量数据表(表 1), 并将这些数据标绘在图 1 和图 2 中。制作这一表格时, 在非常特殊的地质环境中取得的测量结果, 以及对测量方法和现场数据处理方法缺乏详细说明的测量结果, 均已省略不用。总的说来, 只是那些既包括垂直应力又包括平均水平应力或者包括在两个互相垂直的方向上测出的几组水平应力数据才被采用。Hast 和其他一些学者在斯堪的纳维亚取得的大量水平应力测量结果以及那些使用水力压裂法时必须根据覆盖层的重量计算垂直应力的测量结果, 对于这些规律来说则是例外。

根据 Gay (1975) 的报道, 已用不同于一般的汇编方法将经过选择的数据标绘成图。图 1 中画的是垂直应力 σ_v 对深度 Z 的关系曲线, 而图 2 则是 $k = \sigma_{h,v} / \sigma_v$ 对深度的曲线图。如图 3 所示, 之所以采用这一方法, 是因为地下坑道设计中通常的做法是利用垂直应力 σ_v 和横向应力 $K\sigma_v$ 进行的二维应力计算。其中经常包含着不合理的假设, 使垂直应力和水平应力实际上都成了主应力。由于一个测点上不同方向的水平应力可能很不相同, 所以采用平均水平应力不总是合适的。

图 1 表明, 测出的垂直应力普遍具有以下简单关系式所表示的趋势:

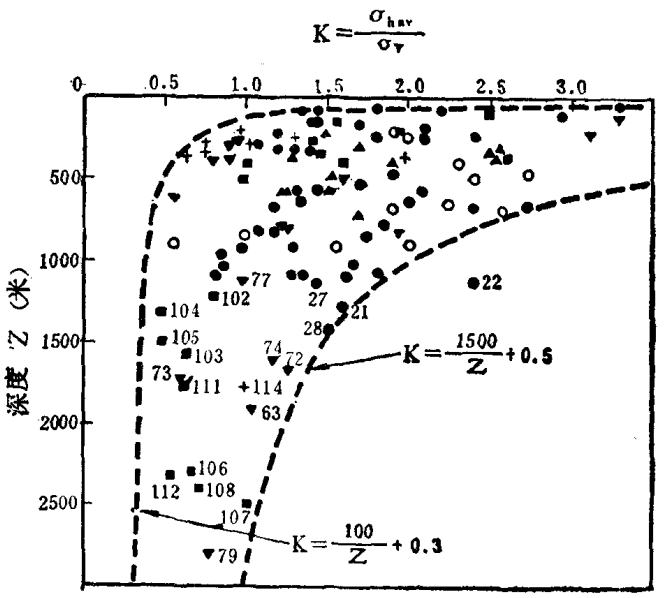


图 2