

地壳应力研究的新进展

国家地震局地壳应力研究所 编译



**ROCK
STRESS**

AND ROCK STRESS MEASUREMENTS

北京出版社

地壳应力研究的新进展

国家地震局地壳应力研究所

情报资料室 编译

北京出版社

内容提要

本书较全面地介绍了近年来地壳应力测量研究的新成果和新进展,主要包括:地壳应力状态、岩石应力测量方法、岩石应力状态的解释、岩石应力测量在采矿业、水电及地下工程建设中的应用等方面的新技术及研究成果。本书共计 29 篇论文,其中 26 篇论文选自 1986 年 9 月在瑞典斯德哥尔摩召开的国际岩石应力和岩石应力测量专题讨论会。

本书可供工程地质、水文地质、地震地质、地球物理、水电工程以及石油、冶金、煤炭等采矿业方面的科技人员及有关大专院校的师生参考。

地壳应力研究的新进展
国家地震局地壳应力研究所编译
责任编辑:王文清

北京出版社出版

(北京北三环中路 6 号)

东方印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 362,000

1990 年 6 月第一版 1990 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 7-200-01137-1/P·3

定价: 6.65 元

前 言

地壳的应力(应变)状态是地壳最重要的性质。地壳表面和内部发生的各种各样的构造现象(包括浅源地震的发生)及其伴生的各种物理化学现象都与地壳应力的作用密切相关。因此,研究地壳应力状态,对于地球动力学问题和工程应用问题均有十分重要的意义。

通常,与地壳应力状态有关的地球动力学问题主要涉及两大问题,即地球物理学问题和地质学问题。前者涉及诸如岩石圈板块的驱动机制、地球的能量平衡、板内与板缘地震发生的机制、区域地壳稳定性、地震的预测与控制、震源物理学和构造应力场研究等;而后者则涉及诸如褶皱变动与断裂变动的力学机制、各种地质现象的解释等。实际的工程应用问题,主要涉及诸如矿山开采、水电、工程、地下挖掘、油气田和地热能的开发、地下建筑的设计与施工、工程地质稳定性评价、核电站建设等。所有这些研究与应用均需要具体了解地壳表层与(或)中、深部的应力状态。

1932年在美国胡佛水坝下面的一个隧道中成功地测定了岩石中的绝对应力,从而开始了地壳应力测量。1958年瑞典的N.哈斯特取得了地壳浅部应力状态的第一批资料。他在斯堪的那维亚半岛的应力测量结果表明,地下介质中存在现今的应力,这种应力以压应力为主,其值随深度呈线性增加,在小于200米的地壳中,水平向应力明显大于垂直向应力。这一重要结果打破了原来的传统认识,得到全世界科学家的普遍重视。在此后大约十年的时间里,许多学者用不同的方法在不同地区进行了数万次实地测量,基本肯定并进一步丰富了哈斯特的结果。1975年N.C.盖伊等人建立了临界深度的概念:在临界深度以上,水平应力值大于垂直应力,而在临界深度以下,水平应力值小于垂直应力。现已知道临界深度值因地而异,例如冰岛约为200米,法国中、西部约为400米,日本约为600米,南非约为1000米,美国约为1000米。1977年美国的B.C.海姆森采用水压致裂方法在5100米深的钻孔中成功地进行了应力测量,并根据美国的水压致裂等方面资料,绘制了北美大陆最大主应力方向分布图。

由于地应力测量在地球科学的研究中和实际工程的生产实践中具有重要的意义和广泛的应用,因此,近二十几年来地应力测量工作日益受到国内外学术界和工程界的重视,获得了迅速的发展。目前,已有二十多个国家开展了地应力测量工作,测量方法有十余类,测量仪器达近百种。

地应力测量从原理上可分为直接测量与间接测量两大类。前者通过测量岩石的破裂直接确定应力,例如七十年代发展起来的水压致裂就是一种直接测量的方法。后者通过测量岩石的变形和物性变化确定介质的受力状态,例如五十年代发展起来的应力解除法就是一种间接测量法。地应力测量从内容上可分为绝对值测量与相对值测量。前者是测量岩石所承受的应力数值与方向,后者是测量固定点上随时间变化的应力状态。地应力测量从仪器安装的形式可分为钻孔法和非钻孔法。前者将测量仪(探头)牢固地贴附于钻孔底部,测量钻孔附近的应力状态。非钻孔法能了解较大空间岩体的应力状态,能避免由于钻孔开挖而带来的应力变化的影响,但由仪器读数换算为岩石应力时影响因素较多。因此,较常用的地应力测量方法大多是钻孔法。为了在近地表和地壳岩石中直接进行绝对地应力测量,获得主应力的方向和大小等资料,目前世界上主要采用应力(与应变)解除法和水压致裂

法两种测量方法。前者是目前应用最广泛的地应力测量方法，它简便易行，测量精度高，数据可靠，适用于水中与温差大的各种条件，是了解地壳浅部和工程地区应力状态的主要方法。后者是七十年代迅速发展起来的方法，它操作方便，不需要精密的井下电子仪器，无需知道岩石的弹性参数，测量应力的空间范围较大，是目前能够进行深部应力测量的唯一方法。

了解地壳应力状态最直接最有效的方法是进行实地测量。五十年代以来，世界各国开展了大量的地应力实测工作，使人们对地壳上部的应力状态有了一定的认识。概括起来，主要有以下几点：

1. 地壳应力状态的性质

国内外大量实测资料表明，三个主应力中，一个近铅直方向，另外两个近水平方向（与水平面夹角小于 30° ），但在有些地区（如地热异常区、边坡、溶洞附近）则有 $10^\circ \sim 20^\circ$ 的倾斜，有时甚至可达 40° 左右。铅直应力近似于复盖层重量。绝大多数测点的测量结果表明，其应力状态是压应力，所测到的少数张应力，大都是因岩石裂隙、破碎、岩体边坡、采空区及某些地形影响所致。

2. 地壳应力状态的区域特征

国内外的研究表明，在一个相当大的区域内，现今构造应力的方向是相对稳定的，并具有一定的分布规律，这与地质构造和现代地壳运动有一定的关系。大陆上的地壳应力状态具有明显的分区性。M.L.佐巴克（1980）得出美国有 10 余个应力区，各个区的应力作用方向或应力性质都不相同。我国的地壳应力分布也有分区性，不仅方向差异甚大，而且其数值亦不相同。

3. 地壳应力状态随深度的变化

一般情况下，实测的最大与最小水平主应力明显不同（ $\sigma_{Hmin} / \sigma_{Hmax}$ 一般介于 0.2~0.8 之间），而且两个水平主应力亦很少与铅直应力相等。如果排除地形的影响，水平主应力的方向随深度变化不大，但水平应力和垂直应力值却均随深度的增加而增大，但增大的速率因地而异。

4. 活动断层和地震断层附近的应力状态

在美国圣安德烈斯断层和我国郯庐断裂带附近的测量结果表明，水平主应力和最大水平剪应力随离断层距离的增加而增大。对我国唐山、龙陵、海城等大震震区震后的应力测量表明，大震后震中区的应力值比周围地区的应力值要低。应当指出，这些测量结果同弹性静位错理论的数值计算结果（M.A.Chinnery, 1963；黄福明等，1980）是一致的。

七十年代以来，地应力测量在实际工程中日益获得广泛的应用。所谓实际工程问题，主要是如何确保工程在施工过程中和工程在使用期限内的安全问题，以尽可能避免（或减少）人员伤亡和不必要的经济损失。从科学的角度讲，这实质上是一个局部地壳的稳定性问题。国内外的许多研究表明，地壳的应力状态是影响工程稳定性的重要因素之一。因此，正确进行实地的地应力测量，弄清工程场地的地应力作用方式与分布规律，就可以为工程设计部门进行安全而周密的设计提供重要的科学依据，从而加快建设的速度。

我国的地应力测量工作是在李四光教授的倡导下于六十年代初期开展起来的，至今已有二十多个单位开展地应力测量工作，业已取得一批研究成果。目前，我国地应力测量已在地震、地质、冶金、煤炭、石油和水电等部门得到广泛的应用，获得良好的经济效益和

社会效益。

迄今，地应力测量已有 50 多年的历史。在这半个多世纪中，地应力测量的理论、方法及其应用等方面获得了迅速的发展。然而，从科学发展的实际需要来看，目前地应力测量尚存在一些问题。其中最主要的问题是测量的精度远不能满足科学研究的实际需要（尤其是地球科学的需要）。无论是应力解除法，还是水压致裂法，都是假设岩体是线弹性的、各向同性的、连续的和均一的介质。这种假设仅是初级近似，并不完全符合岩体的实际情况。为了进一步提高地应力测量精度，尚需进一步考虑岩体是非线性的、非均匀的、各向异性的和不连续的情况。这样才能满足不同研究领域与实际应用的进一步需要。

1986 年 9 月 1 日至 3 日，在瑞典斯德哥尔摩召开了岩石应力和岩石应力测量国际讨论会。《地壳应力研究的新进展》一书主要就是根据这次讨论会的“岩石应力和岩石应力测量论文集”的有关论文翻译编辑而成的。本译文集共包括四方面内容，即（一）地壳应力状态；（二）岩石应力测量方法；（三）岩石应力解释以及（四）地应力测量在矿山、水电等地下工程中的应用。这些研究结果内容比较丰富，基本反映了国际上八十年代地壳应力研究的水平，它们对我国地学界和工程界的同仁无疑具有重要的参考价值。本书的出版定会受到有关读者的重视和欢迎。笔者希望今后能及时出版更多更好的译著，以促进我国地应力研究工作更加蓬勃向前发展。

黄福明

一九九〇年四月十四日

目 录

前言.....	黄福明 (III)
---------	-------------

一、地壳应力状态

芬诺斯堪的亚古陆的应力状态 (O.斯蒂芬森 等)	陈彭年 (1)
加拿大地盾地应力随深度的变化 (G.赫格特)	高建理 (9)
引张与压缩构造环境中原地应力测量的形变 修正 (H.S.斯沃尔夫斯等)	陈 睿 (15)
各向异性岩石中的水压致裂应力测量和理论 分析 (M.G.卡法基斯)	李方全 (23)
多节理和多裂隙岩体中的应力测量 (B.H.G.布雷迪等)	王廷韞 (32)
大陆地壳上部的构造和应力 (F.鲁梅尔)	赵国光 (39)

二、岩石应力测量方法

低成本的应变监测法 (F.科尔贝克等)	候 湛 (48)
瑞典国家电力部进行的岩石应力测量 (L.哈尔勃乔)	丁旭初 (53)
半球形孔底绝对岩石应力测量方法 (菅原等)	李立球 (63)
近地表应力* (D.I.高夫)	韦 伟 (75)
一种新型的钻孔应力计及其安装工具的研制 (杜克——冯帕克)	刘长义 (88)
利用钻孔液压元件测量岩石应力的新方法 (P.H.鲁)	翟青山 (94)
利用水利压裂、孔壁崩落和斯通利波的偏振进行深孔 原地应力测量 (M.D.佐巴克)	高建理 (102)
根据孔壁崩落确定新墨西哥芬顿地热区的原地应力方向 及大小* (K.A.巴顿)	苏怡之 (111)
钻孔过程中的原地应力测量* (A.A.德内希等)	高建理 (117)
一种确定岩体应力状态和弹性特征的新方法 (Ph.查利等)	李方全 (126)
测定原地岩石变形和应力的钻孔套筒致裂法 (C.杨格伦等)	张 超 (134)
采用水压致裂法和差异应变曲线分析法测量深部 花岗岩体的应力 (T.N.迪等)	翟青山 (141)
凯赛效应测量: 根据钻取岩心用声发射确定原地应力 的一种新方法 (D.R.修森等)	张伯崇 (146)

三、岩石应力的解释

在卡恩梅利斯花岗岩中用七种方法进行 (深 2500m)

- 原地应力测量的结果 (A.S.巴特勒等) 孙世宗 (155)
IRAD 振弦式应力计标定与解释的新方法 (毛乃兴) 关伟沂 (165)

四、地应力测量在矿山、水电等地下工程中的应用

- 煤矿的原地应力测量 (K.W.米尔斯等) 杨增学 (174)
应力解除法测量朝鲜某些地区的岩石原地应力 (Han-Uklin 等) ... 候 湛 (181)
LUT 三轴套芯技术在瑞典矿井中的应用 (B.A.莱乔恩) 邬慧敏 (187)
尼亚加拉瀑布区高水平应力及其测量和新电台的
设计 (B.C.海姆森) 刘凤麟 (195)
地下掘进面附近的应力变化 (P.K.凯泽等) 王福江 (204)
原地应力测量在地下贮藏库设计中的重要性 (C.M.库林) 丁旭初 (215)
水压致裂法测量得的玄武岩中核废料库的原地应力
状态特征 (K.金等) 李方全 (222)
残余应力和孔径对套芯法原地应力测量的影响 (P.A.兰等) 王文清 (229)

* 带星号的文章选自别的文献资料, 文章结尾给了出处。

芬诺斯堪的亚古陆的应力状态

O.斯蒂芬森等

一、引言

在掘进地下坑道之前,了解地壳内部原地应力状态,对于矿山设计和掘进地下坑道是非常需要的。探明原地应力状态还可以使我们深入了解地壳动力学的应用范围,如板块构造、地震危险性评价和地震预报等。因此,在过去的三十年间,为了有效的采矿和土木工程建设及科学研究项目,世界各国进行了大量的原地应力测量。

现已出版许多世界各地原地应力测量资料的汇编。1958年,哈斯特(Hast)首次发表了全球性的地应力资料,这是最有代表性的文献之一。他的测量结果表明,地壳内部存在着高水平应力。十年以后(1969年),哈斯特又发表了新的岩石应力测量结果,进一步证明,在芬诺斯堪的亚以外的地区,北起斯匹次卑尔根,南至赞比亚,都存在着高水平应力。1976年默范发表了芬诺斯堪的亚岩石应力状态的资料汇编。

比较新一些的岩石应力状态资料是欧洲各地的资料,取自于阿尔卑斯—地中海地区(Greiner和Lonr, 1980),西欧(Schmitt, 1981)和德国西南地块(Rummel等, 1983);最新的则是西欧的资料(Klein和Barr, 1986)。

1980年佐巴克夫妇根据地质资料、震源机制解和原地应力测量结果推断出的主应力方向,编制成美国境内水平应力方向图。他们发现,在某些地区内,主应力方向是一致的。赫格特分析54组地应力张量之后,了解到加拿大地盾中应力的正常分布和极限分布。

北欧国家开展岩石应力测量工作已有很长的历史。因此,本文将对芬兰、挪威和瑞典的原地应力测量工作做一历史回顾。由于这三个国家进行过大量的岩石应力测量工作,人们便有可能将所得资料纳入芬诺斯堪的亚岩石应力数据库。该数据库于1986年建成,它可提供该区全面的应力测量资料。数据库的主要任务是,收集芬诺斯堪的亚地区岩石原地应力测量资料,查找芬诺斯堪的亚地区岩石原地应力测量资料和根据地质构造、岩石强度及弹性参数等确定应力的系统误差,并确定应力状态是否有区域性的趋势以及以前在波罗地海地盾观测到的应力场特点是否有变化。数据库也是为进一步开展研究工作打下基础。

二、芬诺斯堪的亚岩石应力测量发展史

在北欧诸国,用套芯法进行岩石应力测量已有很长历史。自从哈斯特(1958)等在瑞典中部格兰耶斯贝里矿山中首次进行“岩石压力”测量以来至这次岩石应力测量专题讨论会为止,已整整35年。最近几年,挪威和芬兰使用哈斯特发明的利用磁致伸缩原理测量应力的套芯法。下面将简单叙述岩石应力测量在瑞典、挪威和芬兰的发展历史。

1. 瑞典

1951年哈斯特利用磁伸缩原理研制的应力计,首次在瑞典中部格兰耶斯贝里铁矿山的特拉菲卡克蒂博拉格特·格兰耶斯贝里—乌克塞勒松德矿区,使用套芯法测量岩石应力。哈斯特在学术讨论会上向瑞典采矿学会的会员做了上述应力测量工作的初步报告,后来又在瑞典的杂志上发表了文章。

哈斯特在瑞典和挪威的六个矿区完成应力测量之后,发表了经典性的论文《矿山岩石压力测量》(Hast, 1958)。在陆续发表的一些论文中,他补充了在世界各地进行应力测量的结果(Hast, 1974)。他的测量结果,尤其是他在地壳上部测出的高水平应力,曾经是近五十年来地球科学界所争议的问题。

为了确定岩石的应力状态,古斯塔夫森等人于1951年最先做了一次试验,研究在岩石表面粘结应变计的可能性。他们在瑞典北部莱斯瓦尔铅矿区,使用应变计进行套芯测量测定砂岩矿柱的载荷。1964年,瑞典国家电力局研究出门塞式二维应力测量方法(Hiltscher, 1969),随后又研究出使用应变计的套芯三维应力测量方法。1979年,瑞典国家电力局一个研究小组在500m深的垂直钻孔中进行了应力测量(Hiltscher等, 1979)。

1976年吕勒欧技术大学岩石力学组使用利曼的三轴应变计进行应力测量(Carlsson, 1978及Leijon等人, 1981)。莱乔恩改进了利曼早期研制的应变计,并对钻孔清洁法、仪器安装工具、数字式显示装置及4分量应变计作了改进(Leijon等, 1981)。

几年来,为了判断在花岗岩中储存放射性废料的可行性,在瑞典中部斯特里帕矿区建立了岩石力学野外试验点。1981年至1982年,多伊(Doe)等人(1983)采用水压致裂法,并结合几种套芯法进行原地应力测量。这是第一次在同等深度上进行水压致裂法和套芯法试验,也是瑞典最早一次的水压致裂应力测量。1982年,吕勒欧技术大学的岩石力学组初步研制出水压致裂野外实验的仪器(Stephansson等, 1986),1985年又制造出新型的水压致裂仪器。总共在芬诺斯塔的亚基岩中的五个测点进行了水压致裂试验(Bjarnason等, 1986)。波鸿(Bochum)大学和查尔米尔(Chalmers)工学院地质系为瑞典的干热岩研究项目联合进行了水压致裂岩石应力测量(Sundqvist, 1985)。

瑞典岩石应力测量技术最新成就是套筒破裂法(Stephansson, 1983)。使用此种方法时,是使膨胀计在钻孔中膨胀,同步记录增压液的压力和体积变化,便可计算出岩石应变和应力。

2. 挪威

1958年哈斯特教授在挪威首先进行应力测量。1964年挪威工学院采矿系使用美国矿务局(USBM)早期研制的应变计首次进行应力测量(Gevold等, 1976)。这是在1965年至1976年门塞式方法大发展之后进行的(Li, 1967)。这一试验的倡导者是已故李·布约恩(Bjorn Li)教授。他在岩石力学方面的贡献具有重要意义。1968年开始用三轴应力计进行试验(Myrvang, 1970)。这一仪器是利曼应变计的改进。它与门塞式应变计至今仍为挪威工学院所采用,但近几年来,这两种仪器继续得到改进,已是具有较高精度的可靠测量工具。

现在,挪威的大多数矿业公司都将岩石应力测量和岩石力学作为矿山规划和开采的重要手段(Myrvang和Grimstad, 1981)。挪威采矿工业的规模小,所以挪威工学院与该

学院的技术研究基金会合作起着矿山岩石力学中心实验室的作用。最近 10 年间, 岩石应力测量在土木工程建设中日益显得重要。挪威的许多隧道工程受到高应力的影响, 并常遇到岩石崩落和岩爆的问题, 所以测量原地应力状态非常重要。正如 1984 年默范 (Myrvang) 所证实的, 及早分析岩石力学问题便可以做出预测。挪威有许多水力发电站采用不砌壁压力井筒。那里有一条非常重要的准则是, 岩体中的最小主应力需大于水的压力。因此, 在最终决定施工前, 无论作为一般资料或输入数值模型的最重要资料, 应力测量结果都极为重要。最近几年间, 挪威工学院科学技术研究基金会使用三轴应变计, 挪威工学院单独使用水压致裂法, 曾联合进行岩石应力测量。

目前, 挪威正在对无衬砌岩洞内储存高压天然气问题进行一系列研究 (Roald 等,) 在此情况下, 或在此之前了解有关岩石的应力状态是极为重要的。

3. 芬兰

哈斯特教授领导的应力测量组于 1961 年在芬兰洛查科斯蒂蒂里 (Lohjacos Tytyri) 石灰岩矿山首次测量了基岩中的应力状态。矿山公司随后于 1961 年进行应力测量所使用的仪器设备是从哈斯特那里买来的。

六十年代, 洛查科斯 (Lohja Co's) 应力测量组是芬兰唯一进行应力测量的小组。他们在 9 座矿山进行过约 60 次应力测量。这些应力测量的结果主要应用于矿山规划。1970 年, 挪威特龙黑姆工学院 (NTH) 改进了利曼的应变计, 采矿公司购买了此仪器进行三维应力测量。

1971 年应力测量承包商和设备都转归 Suomen malmi OY Finnprospecting 国家矿山公司。七十年代, 由于计算机对稳定性计算结果的广泛应用, 使得人们对应力测量产生了较大的兴趣。

1977 至 1979 年赫尔辛基工业大学采矿工程实验室, 采用软包体装置进行过几次应力测量试验。这一方法在技术上是可行的, 但不适于工业上应用 (Sarkka, 1978)。

本世纪八十年代, 所有大型地下工程 (例如矿山、民用建筑) 的应力状态的测量都成为规范化测量, 所用仪器是利曼—挪威工学院研制的。马蒂凯南 (Matikainen) 于 1981 汇编了芬兰 1981 年以前的应力测量资料。

现在, 对于测量 200—300m 深度上, 在某些情况下达到 1000m 深度上的应力状态日趋需要。几种新的应力测量方法已被实验成功。在这些方法中有水压致裂法和利曼—希尔特斯彻 (瑞典国家电力局) 的方法。他们正在研究的一种方法是差应变分析 (DSA) 法, 这种方法使得测量应力工作可在实验室内进行。

到 1986 年夏为止, 芬兰在 45 个不同的地区共进行过 170 次应力测量, 地应力测量点主要集中在采矿区、大型土木工程及设有地下器材库的工业区。

三、芬诺斯堪的亚岩石应力数据库

芬兰、挪威和瑞典的应力数据已被汇集起来存入计算机内。我们把它称为芬诺斯堪的亚岩石应力数据库 (FRSDB)。该数据库是 1986 年初建立的, 由芬兰赫尔辛基、挪威特龙黑姆和瑞典吕勒欧采矿系共同承担, 以提供有关地区全面的应力测量资料。

1. 岩石应力数据库的技术特性

计算机数据库可用来迅速地、大量地传递数据。因此我们决定选择一个微机通用的数据处理软件。设计了岩石应力数据库，并用 1.07 型智能人加以实现，该智能人借助于现代化的小型计算机获得广泛应用。数据库磁带可以从瑞典吕勒欧 87, S—951, 勒欧工业大学的岩石力学组 K·伯格斯特龙 (Bergstrom) 购买。

已建成的 FRSDDB 由 36 个矿区的资料组成，它可以记录、打印和绘制应力资料。图 1 示出数据库中 62 号表所包括的内容。有些矿区的资料需进一步说明。

微机打印出的地应力数据库中 62 号记录的内容

国家：瑞典

时间：1977

测点：纳斯利登

测量单位：勒欧大学岩石力学小组

方法：利曼

数据来源：吕勒欧大学和 BEFO, 瑞典岩石工程财团。数据是由 O. 斯蒂芬森输入的

参考文献：Stress measurements in Nasliden Mine. Leijon B., Carlsson,

H. and Myrvang, A.

测量位置：水平巷道到 2 号回采工作面底部 (BH2)

坐标：X=2257 Y=1501 Z=261 (32.8, 44.4)

覆盖厚度 (m)：260

地形：稍有些起伏

测孔方位 (°)：5°

测孔倾斜度 (°)：0

地层：主要为长英质火成岩 (瑞芬系，卡列瓦统和

岩石类型：石英岩

主构造：走向 (°) = 110; 倾角 (°) = 70

密度 (kg/m^3)：3000

单轴压缩强度 (MPa)：抗张度 (MPa)：点载荷系数：

杨氏模量 (GPa)：68.1

泊松比：0.22

地震波速：(m/s)

主应力大小和方向：

σ_1 (MPa) = 22.2

方向 (°) = 245

倾角 (°) = 25

σ_2 (MPa) = 14.4

方向 (°) = 156

倾角 (°) = 20

σ_3 (MPa) = 5.8

方向 (°) = 35

倾角 (°) = 80

垂直应力 (MPa)：60

最大水平应力 (MPa)：21.0

最小水平应力 (MPa)：14.0

最大水平应力方向 (°)：245

图 1 芬诺斯基的亚岩石应力数据库 (FRSDDB) 的数据记录实例

说明：应力测量方法是利曼的套芯法，使用仪器是 CSIR 应变仪。 $\sigma_1 = 6.1 + 0.045Z$ ，相关系数为 0.75，该资料用于纳斯里登工程有限元分析。其中的五个测点是在钻孔内而不是在水平巷道里。

现在，数据库大多数的资料都可以自由查阅。每个国家的资料都可以补充，可以分别提取，或联合提取。芬兰、挪威和瑞典每个应力测量研究组分别为 FRSDB 收集资料，并把它输入该数据库。芬兰和挪威的应力测量数据存入一个或二个存储器内；瑞典的数据库必须存入多个存储器内。公开发表的数据的参考文献也要输入数据库。数据库内也含有表示测点坐标的经（东经）、纬（北纬）度，也包括地形因素，它用 5 个数字表示，1 代表平坦地形 5 代表陡峭地形。根据波罗的地盾地质图标出测点的地质层。记录数据中包括 90 种不同类型的岩石和不同地质构造的资料用于描述测点的地质情况。为了多次进行岩石应力测量，已经完成岩石性质的试验，这些试验得出的数据被储存在数据库内。每次测量的最后一项要表示出水平主应力的方向和大小。用于每条记录数据的说明文字共 5 行，每行不超过 76 个字符。

2. 地应力数据库现状

到 1986 年 6 月为止，瑞典芬兰和挪威的地应力数据库包括 102 个测点的 487 条记录。每条记录中说明项详细地阐述了应力特性。数据库内只记录岩石原地应力测量结果。应力数据受到地下构筑物（如，采矿隧道和平硐）的影响通常被忽略。根据震源机制解和地质构造得出的应力资料未放入数据库。表 1 列出数据库内选用的芬诺斯堪的亚岩石应力测量的方法、各种测量方法获得的数据的数目及测量深度。

表 1 数据库的概况

地应力测量方法	应力数据数目	最大深度 (m)
门塞法	3	900
利曼, NTH, LUT	142	1250
哈斯特	136	880
利曼—希尔特斯切	87	665
水压致裂法	120	501
软包体	1	570

3. 结果

现在正在改进数据库的输出程序和统计资料中的各个记录。在这一时期，可以在数据库内选取单一的和组合式的数据。采用利曼三轴应变计进行套芯应力测量得出主应力与深度的关系示于图 2。该图表明，应力分量随深度而增大，这与许多学者已经得出的结果是相同的。特别重要的是基岩地盾中 500m 深度显示出较大的应力梯度特征，这对于芬兰和瑞典选择放射性废料储存库的位置具有重要意义。

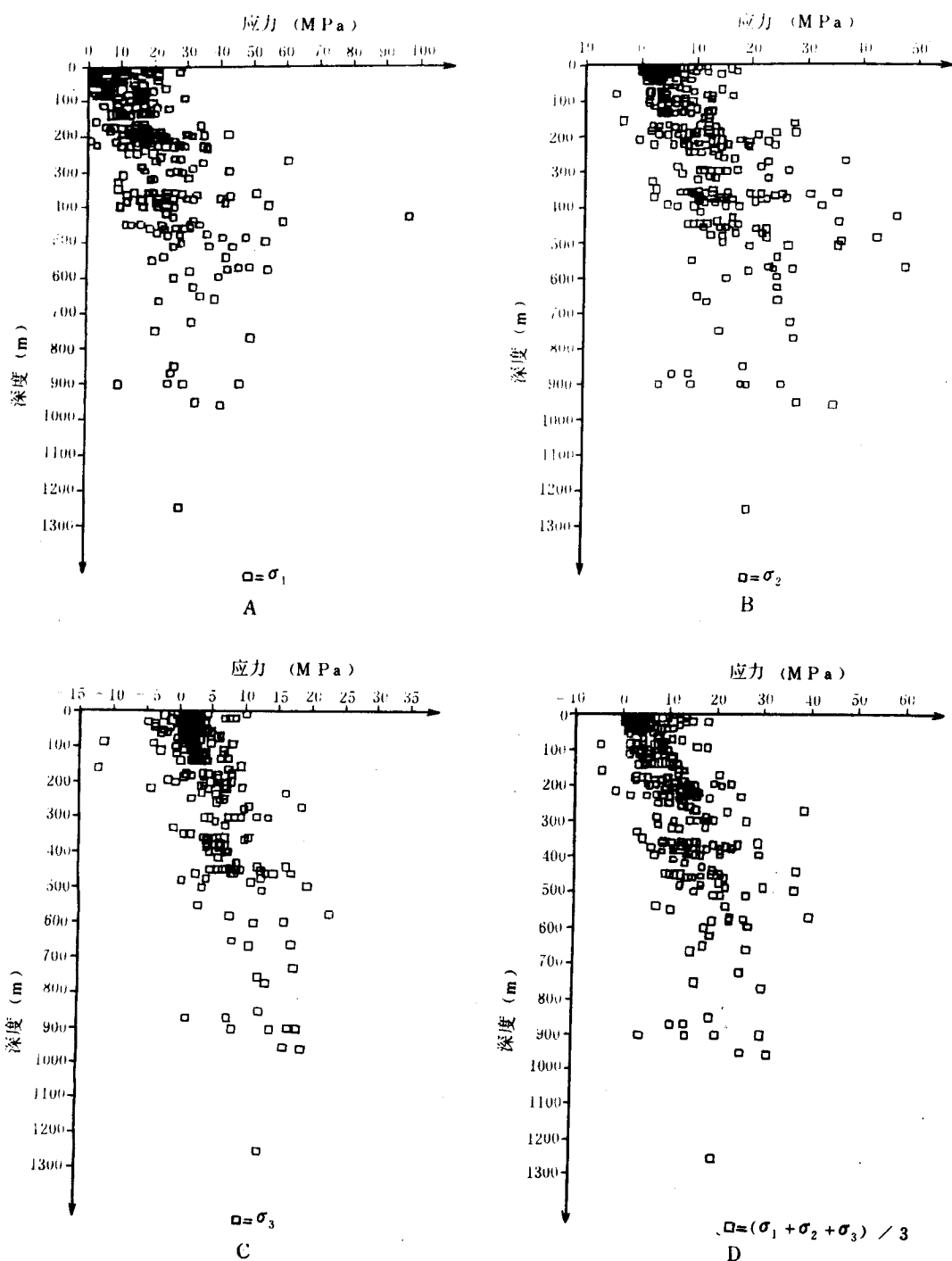


图2 使用利曼、利曼—NTH、利曼—LUT、利曼—希尔特斯切方法进行三轴应变测量得出的主应力随深度的变化。A：最大主应力；B：中间主应力；C：最小主应力；D：平均主应力

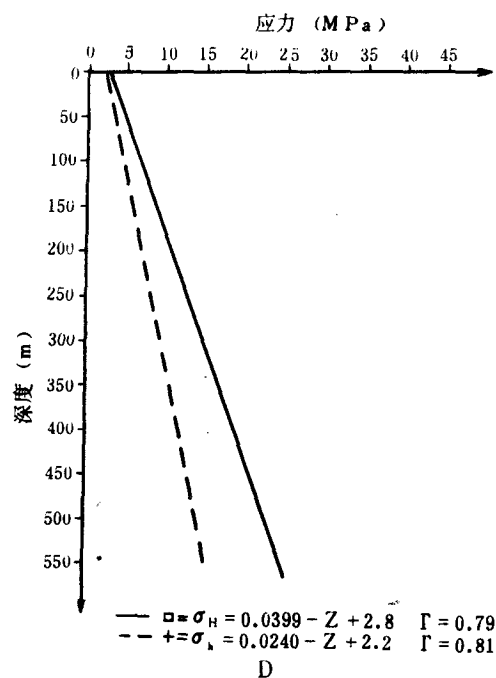
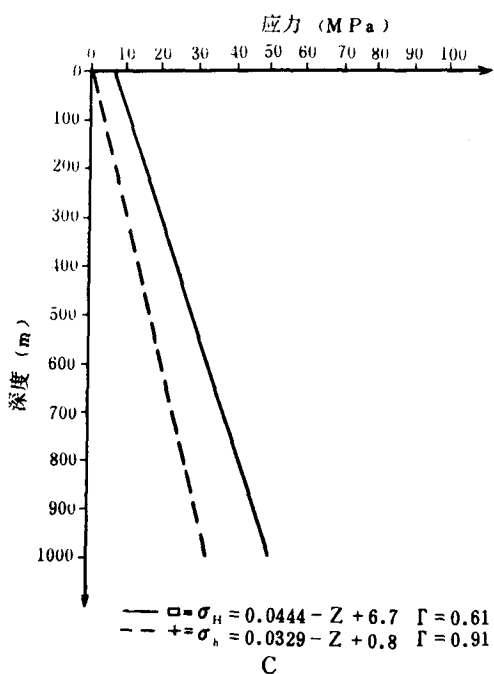
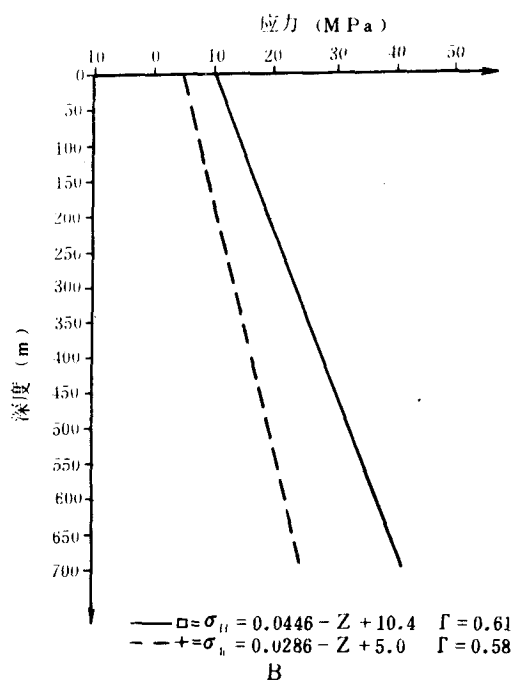
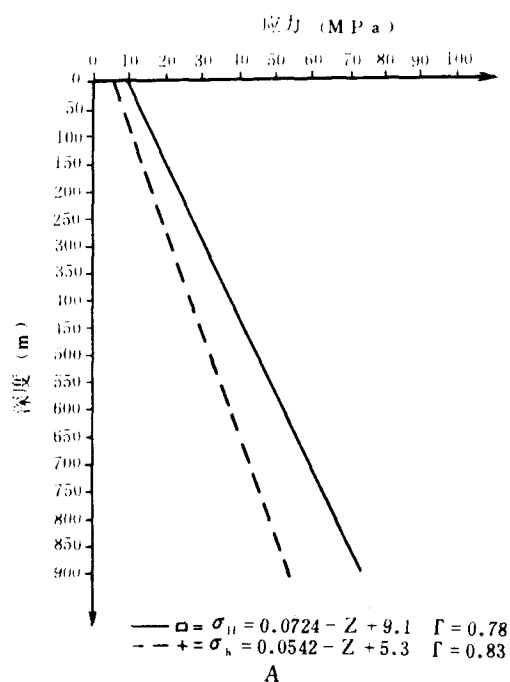


图3 采用四种不同的岩石应力测量方法得出的最大水平主应力和最小水平主应力随深度变化的回归分析。(a) 哈斯特套芯法；(b) 利曼—希尔特斯切（瑞典国家电力局）套芯法；(c) 利曼，利曼—NTH，利曼—LUT，套芯法 (d) 水压致裂法，LBL，CTH，LUT

用四种不同方法获得的最大和最小水平主应力随深度变化的回归分析结果示于图 3。采用哈斯特套芯法提出应力与深度的线性关系，由此得到的最大应力梯度和应力值大得多。伯格曼为了制定瑞典放射性废料储存规划于 1977 年搞的岩石应力资料汇编也得出相同的结论。水压致裂法获得的应力梯度和应力值比其他几种方法得出的都小（见图 3d），这与多伊等人（1983）根据斯特里帕矿山应力测量结果得出的最终结论相反。他们根据初始破裂方法并考虑水头压力来计算应力。而数据库内的水压致裂应力资料都是根据第二次破裂的方法计算出来的。

本文进行的研究，可看作是证明不同方法测出的地应力具有较大差异和离散性的首次尝试。每 100m 深度上的应力方向都表现出相似的变化。

翻译：陈彭年

校对：张崇寿 王廷福

加拿大地盾地应力随深度的变化

G·赫格特

一、引言

在加拿大首次发表仅由北美的资料得出的应力梯度时,资料的来源很有限且其中部分结果还有不少质量问题。

过去十年中,不少加拿大的采矿公司、政府有关部门和咨询组织贡献了许多资料。本文将提供迄今发表的应力结果汇编 (Herget, 1973; Brown 和 Hoek, 1978; Hreget, 1982)。

资料主要出自安大略 (Ontario)、马尼托巴 (Manitoba) 和魁北克 (Quebec) 等省的矿区。大多数测点位于加拿大地盾以上和以南的构造区内,其中包适由太古代和元古代的火成岩、变质沉积岩以及花岗岩组成的岩系。最年轻的造山变形运动出现在格林维尔 (Grenville) 造山期 (9 亿 5 千 5 百万年以前)。

二、测量仪器

矿区的地应力测定采用套芯法,测量仪表有双轴仪器 (如 USBM 计数器和 CSIR 门塞器) 和三轴仪器 (如由南非 CSIR 研制的三轴应变计和澳大利亚 CSIRO 发展的另一种三轴应变计)。

值得庆幸的是加拿大地盾的岩石强度一般很高。这一点很重要,因为用上述仪器所能测定的最大地应力取决于岩石呈弹性状态的应力范围。在 2100m 深处,所测定的地应力值容许达到 130MPa 的量级。

当岩石应力达到如此大时,钻孔岩心会给应力解除带来困难,并存在测量不到完全的应变恢复值的可能性 (Hast, 1979)。实验证明门塞器已被成功地用于高应力区,而一些要求套芯解除后剩有 30—30cm 环空的方法却是不成功的。

在细粒、各向同性和无破裂的岩石中,距坑道边界 10 m 到 20m 之内使用套芯法非常成功。可是在更深的钻孔中,套芯法成功的比例会下降,并变得既耗时间又费钱。

在许多测点上测量了套芯解除后的应变恢复值,并通过剩余应变恢复值求出各个张量。于是,可用最小二乘法对结果进行误差估计。应力分量测定的误差通常在 10—15%。关于套芯法的细节与获得高可信度数据的质量检验步骤以及测定岩石物理参数的方法在另外的文献中已有论述 (Leemen, 1969; Gray 和 Barron, 1969; Herget, 1973)。

三、垂直应力随深度的增加

许多研究人员已经注意到垂直应力分量 (S_v) 随深度线性增加,且这种增加与上覆岩层的重量有关。以石英和长石为主的岩石密度约为 2650kg/m^3 ,基性和超基性岩石为