

中国地应力测量的进展

王连捷 王 薇 袁嘉音

(中国地质科学院 地质力学研究所)

内 容 提 要

地应力测量是地质力学的一个重要方面。它对构造应力场的研究,地壳运动问题的探讨,矿山、水工和其他地下工程的设计以及地震预报问题的研究,区域地壳稳定性评价都有很大的理论意义和实际意义。

李四光教授生前对地应力测量工作非常重视。早在20年代,就曾经指出地壳中水平应力起主要作用。在他的倡导下,我国于60年代初结合地震预报和工程设计开始了地应力测量工作。70年代有较大的进展。发展了多种测量方法,进行了大量的现场实测和工程上的成功应用。80年代开展了水压致裂法应力测量,单孔全应力测量等,研制了用于地震预报监测的高灵敏度、高稳定性的钻孔变形计。

现将主要进展情况概括如下

一、地应力测量方法

在中国的地应力测量中,广泛使用应力解除法(套心法)和水压致裂法。发展了以下测量技术:

(一) YG-73型压磁地应力计

YG-73型压磁地应力计(图1)是由地质力学所,地壳应力研究所等单位研制的。它

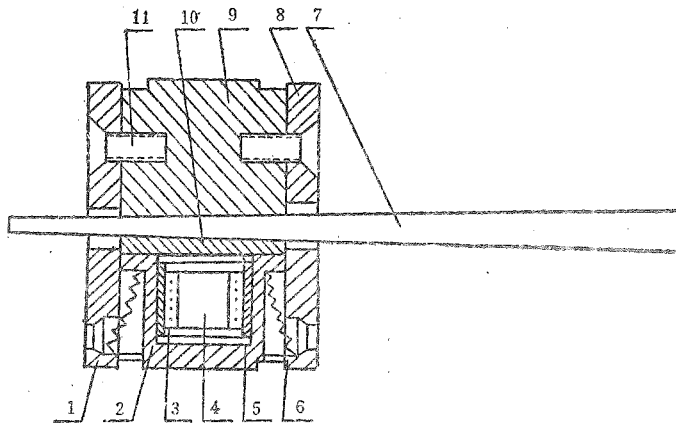


图 1 YG-73型压磁地应力计

1,8—上下盖板; 2—元件盒; 3—线圈; 4—磁心; 5—屏蔽套; 6—弹簧; 7—楔子; 9—支撑; 10—垫板; 11—螺钉

是根据磁致伸缩原理设计的。可安装在直径36mm的小钻孔中。用直径130mm或150mm的钻头套心。通过预加应力系统（图2）可对互成60°的三个元件施加预应力。

该应力计具有较高的测量精度。室内检验，主应力幅度误差小于3%；现场测量，主应力幅度的标准误差小于10%，方向误差小于3°（王连捷等，1977）。

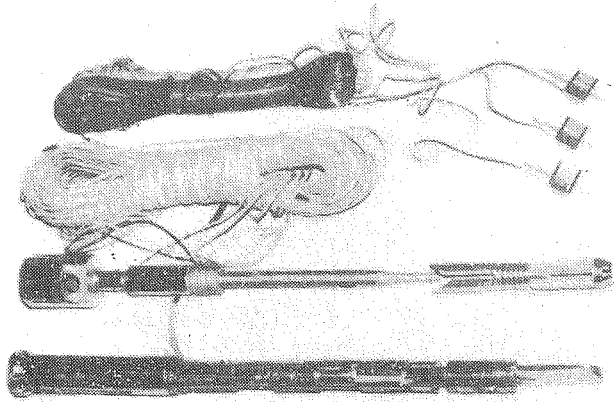


图2 YG-73型压磁地应力计及其预加力系统

在一个钻孔中测量，可以得到二维应力状态。在三个互相正交的钻孔中，可以得到三维应力状态（潘立宙，1981，王连捷等，1979）。

为了得到更加可靠的结果，通常要在一个测点上进行多次重复测量，用最小二乘法进行处理（王连捷等，1977）。

为了进行主应力的计算，需要将仪器读数换算成为“折算位移”。为此，发展了元件围压率定机（图3）。使用率定机进行率定，可以克服岩石弹性模量和安装条件的影响，提高测量换算的精度。

YG-73型压磁、应力计具有一定的刚度和预加应力。这种预加应力对测量结果有影响。

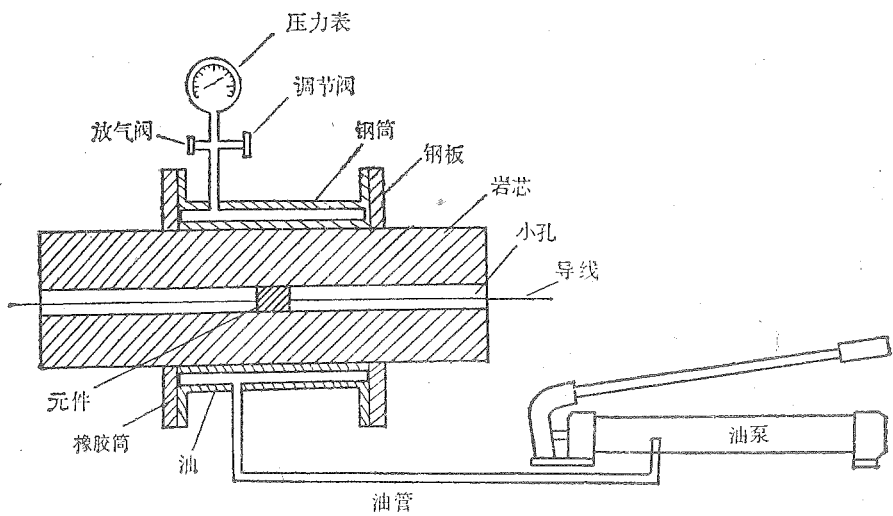


图3 传感器围压率定机

对这种影响已经进行了讨论（潘立宙，1985，王连捷，1986），给出了对这种影响进行校正的公式。

YG-73型压磁应力计在理论和方法上比较完善，应用比较广泛。

（二）36-2型钢环式钻孔变形计

该变形计是由武汉岩土力学所研制的（李光煜，1979）。变形计中有4个钢环，互成45°。钢环上有应变片，可以测量钻孔直径的变化。该变形计可安装在36mm直径的岩石小孔中，套心直径为130mm。

该方法需要测量岩石的弹性模量和泊松比，以便计算主应力。图4为36-2型钢环式钻孔变形的结构。

（三）单孔全应力计（三轴应变计）

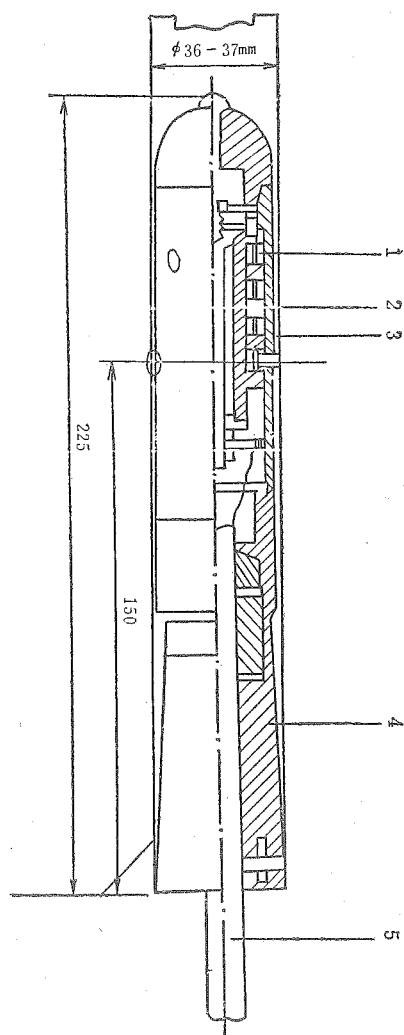


图4 36-2型钢环式钻孔变形计

1—钢环传感器；2—传感器支架；3—底座；4—锥形体；5—电缆

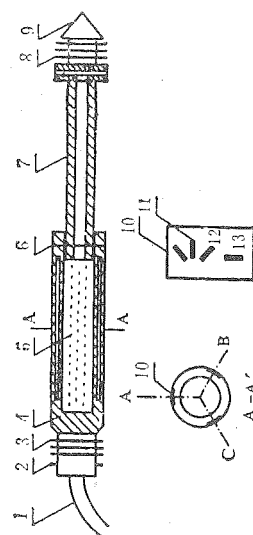


图5 KX-81型空心包体三轴应力计

1—电缆；2—定向销钉；3、10—密封；4—环氧树脂筒；5—粘胶剂；6—销钉；7—柱塞；8—柱塞内孔；9—出胶孔；11—异向头；12—应变花；13—应变片的排列

单孔全应力测量是高效率，低成本进行地应力测量的一种方法。它可在一次套芯过程中测到三维应力状态。国内外都在发展这种应力测量。自从1965年南非李曼（Leeman）提出他的单孔三轴应力计以来，相继出现了各种型式的全应力计。中国也有各种的改进型式。但是得到成功应用的是空心包体式全应力计（王连捷，廖椿庭等，1986）。它是澳大利亚CSIRO应变计的一个改进。

这种应力计由环氧树脂做成的腔体，由柱塞棒和应变片组成（图5）。应力计的外径为36mm。沿圆周方向贴有三组应变花，它们互成120°角，以反应钻孔在套心过程中的变形。每组应变花由四个应变片组成，它们互成45°角。这些应变花是浇铸在腔体内的，所以防水性能良好。为了减少温度的影响，还装有温度补偿片。

使用时，在腔体内装入粘胶剂，通过柱塞内孔和出胶孔，将粘胶剂压入钻孔中，使应力计与孔壁牢固地粘结在一起。

这种应力计操作简单，使用方便，测值可靠。

（四）门塞式孔底应变计

这种应变计是李曼在1964年提出的。它是将应变计贴在孔底上，通过套心测量孔底应变来计算应力。虽然在理论上不完善，但使用很广泛，特别适用于高应力区使用。因为在高应力区岩心成饼状，取心困难。

这种应变计在我们国家进行了两项改进：一是改成可以在套心过程中进行监测^①；二是改成全应力计，方法是贴八个应变片（图6）^②。

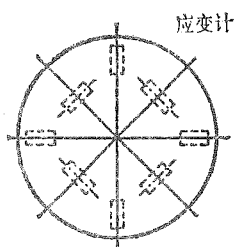


图6 改进的孔底应变计电阻片的排列

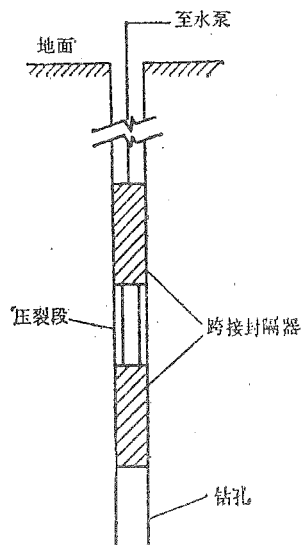


图7 水压应力测量装置

（五）水压致裂法

用应力解除法，一般只能在较浅的钻孔中进行。而水压致裂法可在深孔中测量。该方法于50年代由哈伯特等人提出，60年海姆逊等人用于实际测量。该方法是在钻孔中利用封

① 孙成明等，孔底应变测试元件的改进及其初步实测成果。岩石力学。水利水电岩石力学情报网。第5期，1982；

② 洪长发，孔底应变解除法测试地应力的力学问题。岩石力学。水利水电岩石力学情报网。第6期，1982

隔器将要测量的井段封隔起来(图7)。然后,注水加压,直至孔壁破裂。根据破裂压力,或重张压力,关系压力和破裂方位(由印模器或井下电视确定),计算主应力的方向和大小。

该方法要求钻孔轴与一个主应力平行;要求压裂段岩石尽可能完整,避开裂隙和节理。

我国是在80年代初开始水压致裂应力测量的。已经在华北,云南等地震区成功地进行孔深为500m的水压应力测量。

值得提出的是,利用油田油井压裂资料确定地应力得到了成功的尝试(陈家庚等,1982,丁健民,1985),利用这些资料,确定了大范围的,广大油田地区的深达4000m的应力。这是一项十分值得重视的工作。尽管存在有套管的影响,但从测量结果的统计来看,这种影响是不明显的,资料基本上是可信的。

为了更好地利用油田资料,对套管的影响问题应该进行研究。

一些作者提出,在利用油田资料时,要注意克服充填砂子对地应力测量精度的影响(丁健民,1985)。

对水压致裂应力测量的误差问题,一些作者进行了估计。对最小主应力,其误差约为 $\pm 10\%$,对最大主应力,其误差可为 $\pm 25\%$ 左右(陈家庚,1982)。

(六) 钻孔崩落椭圆法

70年代以来,发现钻孔常常产生孔壁岩石剥落现象,使圆形钻孔成为椭圆。这种崩落现象与地应力状态有关。由于孔附近产生剪应力集中,形成剪切研裂(Gough, 1981)。钻孔崩落后,形成椭圆。其长轴方向与最小主应力方向平行。

根据钻孔孔壁上的应力分布,可以看出这种崩落椭圆形成的机理。钻孔孔壁上的应力分布如下:

$$\begin{cases} \sigma_r = Z_{r\theta} = 0 \\ \sigma_\theta = \sigma_1 + \sigma_2 - 2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \end{cases}$$

式中: σ_1 及 σ_2 为两个主应力; σ_r 、 σ_θ 、 $Z_{r\theta}$ 为应力分量; θ 为从 σ_1 方向(最大主压应力)沿反时针测量的角度。

由上式可以看出,在M和N点附近,应力差取最大值

$$\sigma_\theta - \sigma_r = 3\sigma_1 - \sigma_2$$

即在M和N点附近形成了剪应力集中。当应力达到破裂强度时,就会在M和N点及其附近产生井壁破裂或崩落,形成椭圆孔段。

丁健民等(丁健民,1986)在一些油田中利用该方法确定主应力方向,进行了大量工作,取得了满意的结果。

目前这种方法只能给出主应力的方向,不能给出大小。但它能给出几千米深处主应力方向,这是很有意义的。

将油田油井压裂资料与钻孔崩落椭圆相结合,可以给出主应力的方向和方向的全面资料,是研究地壳应力场的有效方法之一。

(七) 震源机制解

震源机制解被广泛用来确定应力场的主应力方向。但是,对于这个方法有不同看法。为了更好地讨论这个问题,我们回顾一下该方法的原理。很长时间以来,就已发现,地震

的 P 波初动在一些地区是压缩的,在另一些地区是疏张膨胀的(Byerly, 1926)。(Nakano, 1923)指出,单力偶点源可以产生 P 波初动符号按象限分布(图8a)。

后来又提出双力偶点源模型(图8b)(Burridge, 1964),两个节面AA和FF中的一个

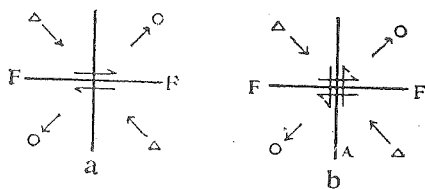


图8 压缩区和膨胀区的分布
a—单力偶模型; b—双力偶模型; Δ —膨胀区;
○—压缩区

是断裂面。并且认为波长与震源体积相比足够大,以致于断裂端点的影响和介质的不均匀性不影响 P 波初动符号。这样,根据尽可能多的地震台站观测资料,确定 P 波初动符号的分布,求出节面。然后就可以求出压缩轴(P 轴),张力轴(T 轴)和中间轴。 P 轴位于疏张象限内,与节面成 45° 角并垂直于节面的交线。 T 轴位于压缩象限内与 P 轴正交,中间轴与节面交

线平行。

这种方法实际上是建立在断裂面即为最大剪应力面的假定的基础之上的。即屈瑞斯加(Tresca)准则。事实上,这种假定对脆性岩石是不合适的。因为脆性岩石的破裂遵循摩尔—库仑准则。破裂面的方向与最大主应力方向为 $20^\circ-45^\circ$ (Mckenzie, 1969)。另外,由于岩体中事先存在有软弱面和破裂面而呈现出强裂的各向异性。麦肯奇(Mckenzie)还指出,由于软弱面和破裂面的存在,主应力方向的确定的误差可高达 90° 。地震地质大队(地震地质大队, 1979)根据模拟实验的结果指出,震源机制解与构造应力场之间没有唯一的确定关系。瑞雷(Raleigh, 1972)指出,即使有断裂面存在,新的断层仍可以产生,只要满足破裂条件。他认为所确定的主应力方向误差最大不过 $20^\circ-30^\circ$ 。

对于深地震的情况,由震源机制解来确定主应力可能是合理的。因为在高围压下,岩石的破坏接近屈瑞斯加准则。但是,无论对深地震还是浅地震,震源机制解所确定的断层面的方向应该是正确的。

(八) 电容式、振弦式、体积式钻孔应变计

这些应变计是用来监测震前地应力变化的仪器。他们具有高的灵敏度和长时间的稳定性,具有 $10^{-9}-10^{-12}$ 地应变变化的分辨率(池顺良, 1982; 欧阳祖熙^①, 1986; 苏凯芝, 1985),能够观测到固体应变潮。这种高灵敏度的仪器对地震预报是十分有用的。

应力解除法和水压致裂法都是以线弹性为基础的。实际上,岩石具有粘弹性性质。粘弹性岩石中应力测量方法的基础已经有人进行了讨论(王武, 1987)。

地壳应力状态形成机理的某些研究也已经有人进行过,如重力作用下,考虑地球的不均匀性引起的应力场的理论分析(张小平, 1986)。分析的结果,水平应力场随深度的变化规律与实际观测结果很相似。

二、某些测量结果

(一) 水平地应力的主导性

^① 欧阳祖熙, 1985, RZ-B1型电容式钻孔应变计, 研究报告

我国的地应力测量结果表明,水平应力大于铅直应力,而且处处是压应力。两个水平应力大小不等,反应了水平应力的各向异性。最大水平应力与最小水平应力的平均比值,在浅部为2.1,在深部为1.4(4000m深)。在浅部铅直应力小于两个水平主应力;在约800m以下,铅直应力介于两个水平应力之间。

500m以下主要根据油田油井资料给出(陈家庚,1982,丁健民,1985),500m以上的资料来自水压致裂法和应力解除法(李方全,1980,1986,廖椿庭,1984,丁旭初,1981,白世伟,1983)。铅直应力系由复盖层的重量算出。

(二) 地应力随深度的变化

可以看出,在几公里深度的范围内,地应力幅度随深度线性增加。并可用下式表示:

$$\text{最大水平主应力 } S_1 = 7.36 + 0.0225H \text{ (MPa)}$$

$$\text{最小水平主应力 } S_2 = 3.51 + 0.0167H \text{ (MPa)}$$

$$\text{最大剪应力 } \tau_{\max} = 1.93 + 0.00293H \text{ (MPa)}$$

$$\text{铅直应力 } S_v = 0.021 \text{ (MPa)}$$

式中 H 为深度,单位为米。

图9是最大水平主应力与最小水平主应力的平均值 $\left(\frac{S_1 + S_2}{2}\right)$ 与铅直应力之比随深度变化。在浅部比值比较分散,为0.8到4.5,在大约2000米以下接近于1。

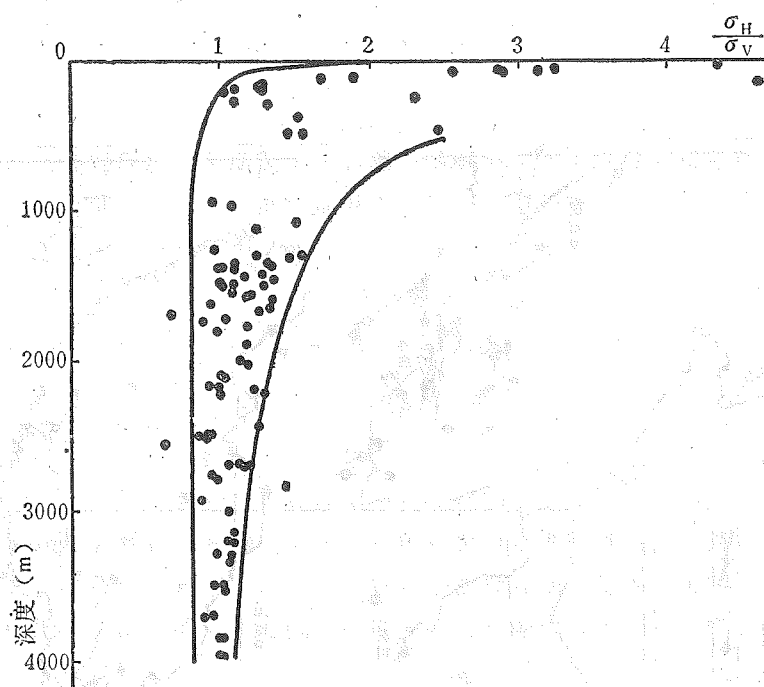


图9 水平主应力的平均值与铅直应力之比随深度的变化

(三) 地应力的横向变化

地应力的分布是不均匀的,用一个地点的地应力状态推断另一个地点的应力状态是困难的。对于工程目的来讲,必须通过实测来了解各个点的应力状态。但是,从总体来看,地应力的分布仍有一定的规律性。从总体来看,主应力的方向在一个地区大体上是稳定

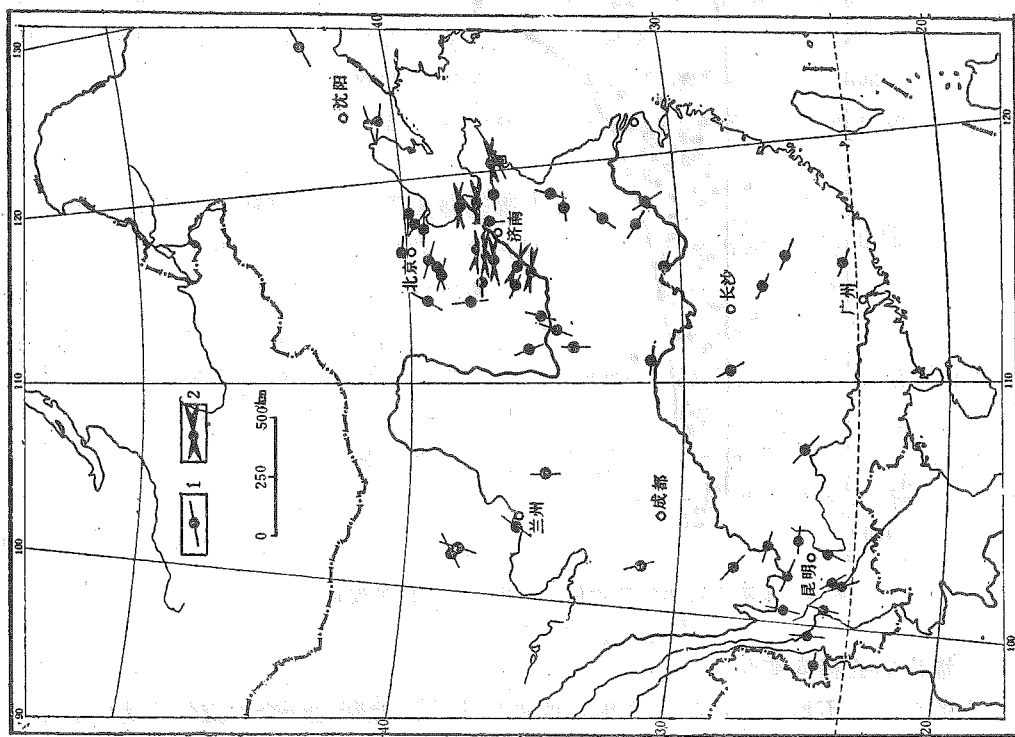


图 10 水平主应力方向的分布
● 应力解除和水压法测定； $\times$ 钻孔崩落椭圆法测定

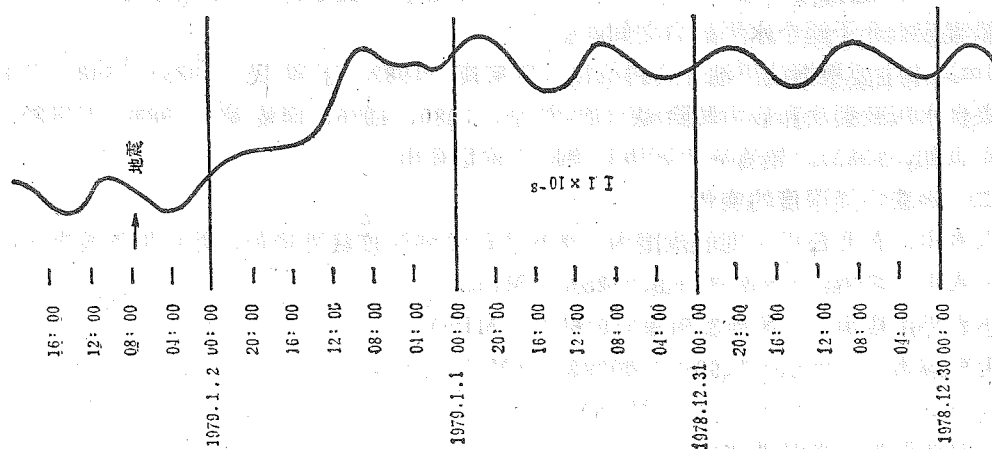


图 11 一次地震之前观测到的剪应变变化

的。例如，在华北地区，水平主应力的优势方向近于北西西到近东西；在太行山以西近于南北向；东南地区（秦岭以南）近于北西向；在西北地区近于北北东向（图10）。

（四）地应力随时间的变化

地质力学认为地震是由于地应力活动的结果。由于地应力的作用，在地壳的某些部位，超过其强度而发生突然破坏，造成地震。因此，监测地应力的变化，是实现地震预报的重要手段。已经观测到震前地应变的变化（图11）（池顺良，1982）。

对远离震源的观测点处，在地震前后，地应力变化的规律，包括量级和方向的变化的研究应该加强，以便更好地实现地震预报。

三、地应力测量在矿山及其他工程上的应用

在我国地应力测量愈来愈广泛地应用于矿山及其他工程稳定性设计中。一个成功的例子是在金川镍矿的应用。该矿位于我国西北甘肃省内。矿区在建设和开采过程中，巷道变形破坏严重，为此，进行了地应力测量（廖椿庭，1983）。测量结果表明，该矿存在较大的水平压应力。该矿过去所使用的直墙半圆拱形断面巷道，在水平应力为主导的情况下，容易发生变形和破坏。而椭圆形或似椭圆形断面巷道是比较稳定的。实践证明，似椭圆巷道施工容易而且稳定。现在该矿已普遍采用这种巷道。

另外，该矿的应力测量还为巷道轴方向的选择，支护方式，充填料的选择和采场跨度设计提供了依据。

另外，在大坝和电站工程中，地应力已成为工程设计的重要基础资料。

在煤矿中，已经发现煤和瓦斯突出，岩爆、矿震等灾害与地应力状态有密切关系。

在石油工业中，油气的运移，油田油井的破坏等，也与地应力有密切关系。现在，地应力测量已经开始应用于这些领域。

四、展 望

地应力测量今后要注意以下工作：

（1）在矿山、水工等工程中，应该注意发展可靠的，高效率，低成本的三轴应力计及有关轻便设备。并开展开采和开挖过程中应力变化的监测。

（2）在区域稳定性评价和地壳应力状态的研究以及地震预报中，应开展深部水压致裂应力测量，并发展相应的轻便设备。开展钻孔崩落椭圆法确定地应力的研究。

（3）扩大地应力测量的应用范围。在能源开发和地质灾害的研究中，加强地应力的工作。

（4）加强理论研究工作，包括方法的理论基础，地壳应力状态的理论研究等。在这方面的主要工作有：

① 地应力解除法的理论基础是假定岩石为弹性，均匀、各向同性材料，实际上岩石是不均匀的各向异性体。因此，需要研究不均匀性及各向异性对测量结果的影响以及在这种岩石中的地应力测量和解释方法。

② 目前，在我国水压致裂法只用于铅直钻孔中的二维应力测量，今后应开展三维水

压致裂法的应力测量，并在克服原有裂隙的影响和测量结果的解释方法等方面开展工作。以扩大水压致裂应力测量法的适用范围。

③ 开展利用钻孔崩落法确定地应力大小的研究。过去，钻孔崩落法只用来确定地应力的主方向，而不能确定地应力的方向。如果这种方法既能确定主应力方向也能确定主应力大小，它就会成为深部地应力测量的更有效的方法。美国已经开始了这方面的工作，但尚未应用于实际。我们应该加强这方面的工作。

参 考 文 献

- 〔1〕 潘立宙,地应力测量的钻孔变形法。地应力测量的原理和应用。地质出版社,1981。
- 〔2〕 王连捷等,地应力测量的实验研究。地质力学论丛,第4号,1977。
- 〔3〕 王连捷等,地应力测量结果的最小二乘方整理方法。地质力学论丛,第4号,1977。
- 〔4〕 王连捷等,三维地应力测量的计算。地质力学论丛,第5号,1979。
- 〔5〕 潘立宙,采用接触预压式元件的钻孔变形法地应力测量的全过程力学分析。地球物理学报,第27卷,第6期,1984。
- 〔6〕 王连捷,刚性元件预加压力对地应力测量结果的影响。中国地质学院,地质力学所刊,第8号,1986。
- 〔7〕 李光煜等,岩体应力的现场研究。岩体力学,第1期,1979。
- 〔8〕 王连捷等,用于地应力测量的单孔全应力计。研究报告,1986。
- 〔9〕 陈家庚等,水力压裂法测定华北地区地下深部应力。地震学报,4,1982。
- 〔10〕 丁健民等,唐山、天津和沧州地区的油井水力压裂应力测量。地震学报,4,1985。
- 〔11〕 苏凯芝,地应力测量方法。地震出版社,1985。
- 〔12〕 池顺良,压容式钻孔应变仪的初步试验结果。地震学报。Vol.4, No.1, 1982。
- 〔13〕 丁健民,山东,渤海沿岸地区深部应力测量—主应力方向的确定。地震学刊, No.1. 1986。
- 〔14〕 李方全,我国现今地应力状态及有关问题。地震学报, Vol.8, No.2, 1986。
- 〔15〕 廖椿庭,金川矿区地应力测量与构造应力场。研究报告。地质出版社,1985。
- 〔16〕 丁旭初等,滇西地区地应力绝对值测量及龙陵地震区地应力场初步分析。地质力学文集,第三集。地质出版社,1979。
- 〔17〕 白世伟等,二滩水电站坝区岩体应力场研究。岩石力学与工程学报。Vol.1, No.7, 1982。
- 〔18〕 国家地震局地震地质大队,震前应力场与P波辐射场的模拟实验。研究报告,1975。
- 〔19〕 王武等,岩石钻孔衬套与孔壁随时间相互作用问题的三维流变学解法。水文地质与工程地质论丛,第3期。地质出版社,1987。
- 〔20〕 Zhang Xiaoping, 1986. Three dimensional finite element modeling of the crustal stress on a global scale. Int. Symp. Rock Stress And Rock Stress Measur. STOCKHOLM, SWEDEN.
- 〔21〕 Nakano M. 1923. Notes on the nature of the forces which give rise to the earthquake motions. Centre, Meteor. observ. Japan Seism. Bull. Vol. 1.
- 〔22〕 Burridge R, 1964. Bodyforce equivalents for seismic dislocations. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 54.
- 〔23〕 Gough, D. I., 1981. Stress orientation from oilwell fractures in Alberta and Texas. Canadian Journal of Earth sciences, 18.
- 〔24〕 MC Kenzie D. P. 1969. The relation between fault plane solutions for earthquakes and the direction of the principal stresses. Bull. scienc. Soc. An. Vol. 59.
- 〔25〕 Raleigh C. B. 1972. Faulting and Crustal Stress at Rangely, Colorado, in Flow and Fracture of Rocks. Geophysical Monogr. Series.
- 〔26〕 Byerly, P. 1926, The montana earthquake of June 28, 1925. Bull. seism. Soc. An. Vol. 16.

PROGRESS OF STRESS MEASUREMENT IN CHINA

Wang Lianjie Wang Wei, Yuan Jiayin

(Institute of Geomechanics, CAGS)

Abstract

In situ stress measurement forms an important part of geomechanics and is of great significance in the design of mining, dam, power station and other rock engineering, and in the study of regional crustal stability, prediction of earthquakes and geodynamics.

Great importance had been attached by the late Prof. Lee to in situ stress measurement and considerable progress has been achieved in China under his directions.

This paper summarizes mainly advances in the methods of stress measurement and the results obtained including variation of stress with depth, lateral distribution of stress and their successful application to engineering. Finally, some suggestions on the future study of in situ stress measurement are proposed.