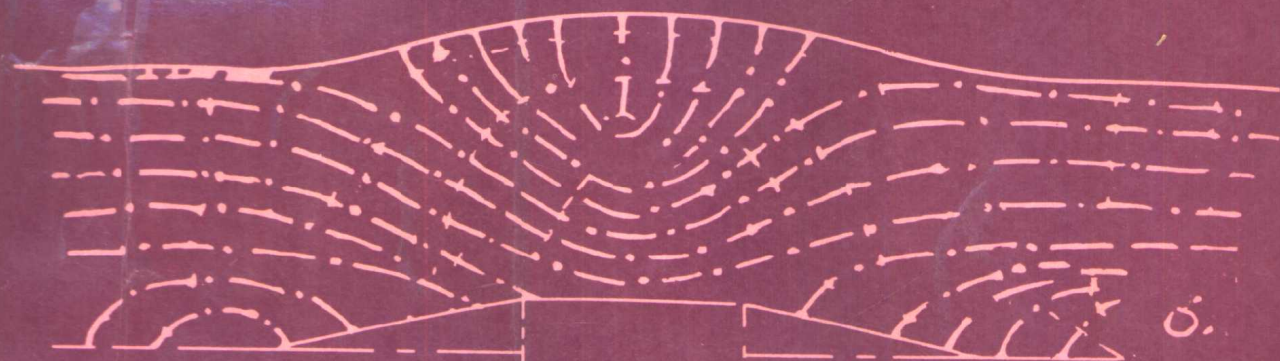


2

地壳构造与地壳应力文集

国家地震局地壳应力研究所 编



地震出版社



56.54
6034
2

地壳构造与地壳应力文集

(二)

国家地震局地壳应力研究所 编

地震出版社

内 容 提 要

本书是国家地震局地壳应力研究所编辑的地壳构造与地壳应力论文集的第二集。包括地应力与地应变测量、实验室研究和地壳构造运动三部分。第一部分介绍应变仪研究新成果和地应力测量系统；胜利油田、川西、黄河上游和滇西试验场等地的应力实测成果以及工程应用问题。第二部分介绍地震前兆机制、岩石摩擦性状、水压致裂原理以及光弹模拟等实验研究。第三部分为物探工作和野外地质工作成果。

本书可供构造地质、地震地质和地应力研究人员参考。

地壳构造与地壳应力文集（二）

国家地震局地壳应力研究所 编

责任编辑：李树菁

•
地震出版社 出版

北京复兴路63号

山东电子工业印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 15印张 384千字

1988年11月第一版 1988年11月第一次印刷

印数 0001—1200

ISBN 7-5028-0131-6/P·89

(530) 定价：6.75元

《地壳构造与地壳应力文集》编辑委员会

主 编：赵国光

副主编：刘光勋 苏恺之 陈宏德

编 委：(按姓氏笔划排列)

丁旭初	勾 波	王继存	付子忠
刘光勋	安 欧	李方全	李鼎容
苏恺之	张文涛	张伯崇	张崇寿
欧阳祖熙	陈学波	陈宏德	姜 光
杨承先	赵国光	聂宗笙	高莉青
黄福明	游丽兰	董立本	

编 辑：陈宏德

目 录

地应力与地应变测量

钻孔应变仪与井壁耦合方法的研究·····	欧阳祖熙	张宗润	(1)
一种钻井式地应力场测量系统·····	欧阳祖熙	李秉元 贾维九	张宗润 (11)
体积式应变仪探头的力学设计·····	裴玉珍	苏恺之	(21)
关于胜利油田水压致裂和孔壁崩落应力测量结果及其应用问题·····	丁健民	王世顺 刘泽凯 毛致新	
	梁国平	郭启良 高建理	(28)
四川西部水压致裂深部应力测量·····	李方全	张 钧 刘 鹏 翟青山	
	毛吉震	祁英男	(43)
安康水电站地应力测量研究·····	孙世宗	安其美 黄一和	(50)
黄河上游某水电站地应力测量及地下厂房设计中有关问题的研究·····	丁旭初	杨增学 刘宗坚 林景铭 王连杰 廖椿庭 丁原辰	(59)
滇西试验场永平钻孔水压致裂应力测量	祁英男	张 钧 毛吉震 刘 鹏 李方全	(69)
用房山测点的水压致裂测量结果分析地形起伏对应力测值的影响·····	刘建中	梁海庆 刘玉琢	(75)
永胜、下关、楚雄、漾濞跨断层垂直形变测量中热形变的消除·····	焦 青		(79)
一种消除地震观测数据趋势周期的方法·····	易志刚	葛丽明 吴凤玲 伊志华	(84)

实 验 室 研 究

应力对岩石中孔隙流体压力的影响——地下水位震前异常变化机理探讨·····	邬慧敏	张伯崇 刘长义 韩 风 马元春	(90)
岩石摩擦试验中的两种粘滑现象·····	张伯崇	马元春	(100)
岩石试件水压致裂抗张强度与试件钻孔半径关系的实验研究·····	刘长义		(105)
唐山地震断层破坏及其构造应力场的数值模拟·····	王继存	续春荣	(113)
圆凹地形对构造应力场影响的三维光弹性模拟实验研究·····	郭世凤		(119)
云南大理岩三轴压缩试验中的气体发射现象及 CO ₂ 等气体产生的机制·····	杨新华	王福江 刘长义 张伯崇	(127)
曲型断裂的光弹性实验研究·····	陈葛天	郭世凤 李淑恭 高德录	(133)

地壳构造运动

邢台地震震中区深浅构造关系研究·····	陈学波	吴玉荣 李金森 赵静娴	(143)
----------------------	-----	-------------	---------

青藏高原东缘低速上地幔.....	
.....陈学波 林中洋 吴宁远 吴跃强 李金森 赵静娴 吴玉荣 王春镛	(159)
华北地区主要断裂近期活动方式与地震危险性的探讨.....	
.....马延著 高忠宁 刘国民 赵国光	(167)
内蒙古大青山山前断裂带第四纪晚期活动特性	
.....聂宗笙 李 克 杨 发 吴景峰	(176)
山西多字型盆地的成因及其地震危险性探讨.....	李学新 (189)
滇西北大理冰期及冰后期地壳变形速率.....	李鼎容 侯治华 姚宝树 王宝杰 (199)
华北地区 L_g 波衰减的空间特性.....	王恩福 李瑞轩 (209)
京津地区现今断层活动与唐山 7.8 级地震.....	蒋成恩 黄佩玉 (214)
地层密度倒置下的重力变形.....	杨承先 (222)

* * * *

本书全部图件由孙立萍清绘

CONTENTS

CRUSTAL STRESS AND STRAIN MEASUREMENTS

- Studies of Method for Coupling Straingauge with Borehole Wall
..... Ouyang Zuxi, Zhang Zongrun (1)
- A Borehole Type Instrument for Monitoring of Changing Stress Field
in Earth's Crust.....
..... Ouyang Zuxi, Li Bingyuan, Jia Weijiu, Zhang Zongrun (11)
- A Mechanical Design of the Probe for Volumetric Straingauge.....
..... Pei Yuzhen, Su Kaizhi (21)
- Results of Stress Measurements Using Hydrofracturing and Well Break-
ing-out Techniques in Shengli Oil Field and Their Application
..... Ding Jianmin, Wang Shishun, Liu Zekai, Mao
Zhixin, Liang Guoping, Guo Qiliang, Gao Jianli (28)
- Hydraulic Fracturing Stress Measurements in Western Part of Sichuan
Province Li Fangquan,
Zhang Jun, Liu Peng, Zai Qingshan, Mao Jizhen, Qi Yingnan (43)
- A Study of Stress Measurements at Hydroelectric Station in Ankang
County..... Sun Shizhong, An Qimei, Huang Yihe (50)
- Some Problems Concerning Stress Measurements at a Hydroelectric
Station in Upper Reaches of the Huanghe River and Its Underground
Design..... Ding Xuchu, Yang Zengwue, Liu Zongjian,
Lin Jingming, Wang Lianjie, Liao Chunting, Ding Yuanchen (59)
- Hydraulic Fracturing Stress Measurements in Yongping, Western Part
of Yunnan Province
Qi Yingnan, Zhang Jun, Mao Jizhen, Liu Peng, Li Fangquan (69)
- An Analysis of the Effects of Topographic Relief on Measured Stress
Value by Use of Hydrofracturing Measurements from Fangshan
County..... Liu Jianzhong, Liang Haiping, Liu Yuzhou (75)
- Elimination of Thermal Deformation during Vertical Deformation Me-
asurements across Faults in Yongsheng, Xiaguan, Chuxiong, Yangbi
Counties..... Jiao Qing (79)
- A Method for Elimination of Trend Period in Seismic Observation
Data..... Yi Zhigang, Ge Liming, Wu Fengling, Yi Zhihua (84)

LABORATORY RESEARCH

The Effect of Stress on Pore Pressure in Rocks:

An Approach to the Mechanism of Abnormal Changes of Ground-water before Earthquake

Wu Huimin, Zhang Bochong, Liu Changyi, Han Fong, Ma Yuanchun (90)

Two Patterns of Stick-slip Observed by Friction Test in Rocks.....
..... Zhang Bochong, Ma Yuanchun (100)

Experimental Study of the Relationship between Hydrofracturing Tensile Strength and Borehole Radius of Rock Samples..... Liu Changyi (105)

A Numerical Simulation of Fault Failure and Tectonic Stress Field During Tangshan Earthquake..... Wang Jicun, Xu Chunrong (113)

Three-dimensional Photoelastic Model Test for Researching Effects of Round-concave Relief on Tectonic Stress Field Guo Shifeng (119)

Gas Emission of Yunnan Marble and Its Mechanism under Triaxial Compression Test.....
Yang Xinhua, Wang Fujiang, Liu Changyi, Zhang Bochong (127)

Photoelastic Test of Typical Fault.....
..... Chong Getian, Guo Shifeng, Li Shugong, Gao Delu (133)

CRUSTAL TECTONIC MOVEMENT

A Study of Relationship between Deep and Shallow Structures in Epicentral Area during Xingtai Earthquake.....
..... Chen Xuebo, Wu Yurong, Li Jinsen, Zhao Jingxian (143)

Tectonics of the Low Velocity Upper Mantle on Eastern Fringe of the Qinghai Xizang Plateau... Chen Xuebo, Lin Zhongyang, Wu Ningyuan, Wu Yueqiang, Li Jinsen, Zhao Jingxian, Wu Yurong, Wang Chunyong (159)

Types of Recent Motions of Main Faults and Seismic Risk in North China..... Ma Tingzhu, Gao Zhongning, Liu Guomin, Zhao Guoguang (167)

Features of Late-Quaternary Fault Motions in Piedmont Zone along Daqing Mountain, Inner Mongolia.....
Nie Zongsheng, Li Ke, Yang Fa Wu Jingfeng (176)

A Preliminary Study on Origin of Xi-type Basin in Shanxi Province and Seismic Risk within It..... Li Xuexin (189)

The Rate of Crustal Deformation in Northwestern Yunnan during Dali Glaciation and Post-glaciation.....

	Li Dingrong, Hou Zhihua, Yao Baoshu, Wang Baojie (199)
Spatial Characteristics of Attenuation of <i>Lg</i> -wave in North China	
.....	Wang Enfu, Li Ruixuan (209)
Present-day Fault Motions in Beijing-Tianjin District and Tangshan	
M=7.8Earthquake.....	Jiang Cheng'en, Huang Peiyu (214)
Gravity Deformation of Density Inversion Layer.....	Yang Chenxian (222)

钻孔应变仪与井壁耦合方法的研究

欧阳祖熙 张宗润

(国家地震局地壳应力研究所)

一、引言

实践及理论计算都表明,将钻孔应变仪测量探头与地壳岩体可靠地耦合起来,以便将所要测量的地壳应力场全部分量的变化不失真地传递到探头的敏感元件上,是一件非常重要然而也是十分困难的工作。其重要性在于不可靠的耦合会导致岩体中应力状态在传递过程中发生畸变,测量系统因而不能反映地壳应力场活动的真实图象。其困难则在于,所选择的耦合方式既要满足由探头、耦合介质和岩体组成的力学系统有确定的计算模型,同时还要能在井下可靠地实施,并使系统测量值的漂移和稳定时间控制在允许的范围内。

目前采用的耦合方式有如下三种:

1. 机械接触式 如压磁式电感法与振弦应力仪所采用的装置,是用具有楔形活动滑块的机械结构使传感元件与岩石孔壁紧密接触,以传递孔径的变化而进行测量的。

2. 沉砂法 系用石英砂将测量探头与岩石孔壁之间的缝隙全部填满夯实,来实现两者的耦合。如“YRY-2型压容式差应变仪”就是采用这种方式安装的。

3. 膨胀水泥固结法 使用有适当比例的膨胀水泥与石英砂混合剂将测量探头按所需方位固结于岩石钻孔中。体积式应变仪以及“RZB-1型电容式钻孔应变仪”均采用这种方法下井安装。

第一种方法中,由於与孔壁接触的活动滑块面积仅有几个平方厘米,为保证可靠地传递孔径的微小变化,要求滑块与孔壁的接触十分可靠且稳定。这势必对岩石的完整性与钻井施工提出较苛刻的、往往难于实现的要求。此外,这种安装方法的长期稳定性亦稍差。沉砂法中耦合材料是可以“流动”的石英砂,如何确定这种散粒体材料的力学参数在实验与理论上都存在很多问题,还找不到一个确定的力学模型来对其加以描述。故我们下面重点讨论用膨胀水泥将测量探头固结于钻孔内的方法。

二、模型与计算公式的推导

当测量探头用膨胀水泥固结于钻井中时,由於水泥凝固对传感元件施加一定预应力,故即使钻井周围岩石发生一定程度的拉张变形,该种耦合方法也能将岩体中应力场变动的全部分量传递给测量系统。水泥固化对探头施加的预应力可视观测站所处地区构造活动的方式及强度加以调节。因此,在一定程度的变形以内,测量探头用膨胀水泥与周围岩体耦合的状态可以用“焊接”的边界条件来描述。我们用“RZB-1型电容式钻孔应变仪”主要是观测研究地

壳水平应力场的活动规律，故本节只讨论求解平面应力场的问题。

如图 1 所示，在一无限大岩板中有一直径为 $2c$ 的圆孔。其内有浇注的水泥环和测量探头之弹性钢筒，图中分别标有各层的扬氏模量 E 和泊松比 ν 。岩板内作用有两向应力 P_1 和 P_2 。 θ 是主应力 P_1 的方位与第一个元件间的夹角。岩石与水泥以及钢筒与水泥的界面满足“焊接”的边界条件，即应力和位移分量在边界上连续，这就是三层焊接复环的计算模型。

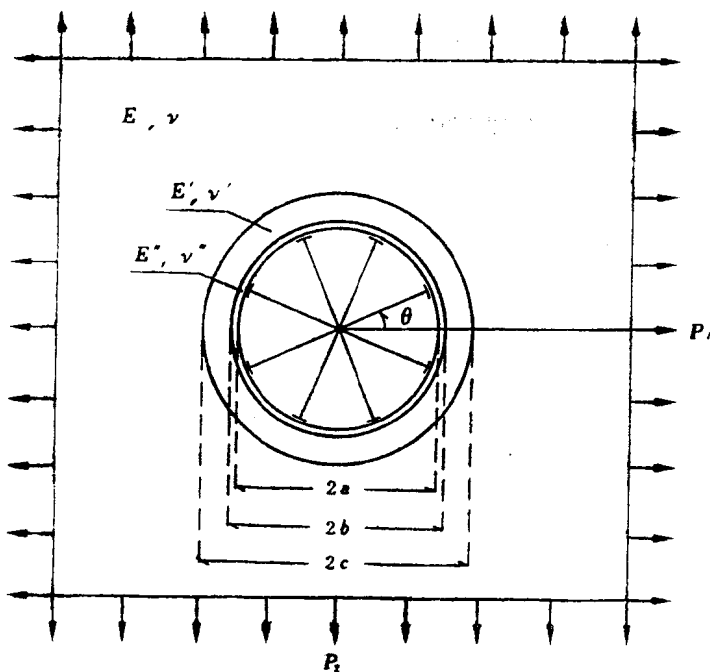


图1 三层焊接复环的计算模型

根据潘立宙推荐的一种在极坐标系中求解弹性力学平面问题的查表法及编制的一份特解表^[1]，可对图 1 所示的力学系统进行分析，并采用如下步骤进行解算：

1. 写出各层的边界条件与交界条件；
2. 挑选各层合适的应力函数和相应的应力、应变与位移的特解；
3. 将各项应力、应变与位移的特解分别乘以待定常数，

然后带入边界与交界条件，可直接写出求解待定常数的线性代数方程组；

4. 由线性方程组求解待定常数得到问题的全部解答。即已知岩体中两向应力，计算水泥环与弹性钢环内部、岩石与水泥以及水泥与钢环交界处、钢筒内壁各处的应力、应变和位移。主要的解算过程在附注中列出。

对于无限大岩板与水泥环交界处的应力、应变和位移，可用无限大岩板的特解公式来计算：

$$\sigma_r|_{r=c} = \frac{A}{c} + 2B - 2 \left(C + 3\frac{F}{c^4} + 2\frac{H}{c^2} \right) \cos 2\theta, \quad (1)$$

$$\sigma_\theta|_{r=c} = -\frac{A}{c} + 2B + 2 \left(C + 3\frac{F}{c^4} \right) \cos 2\theta, \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta}|_{r=c} = 2 \left(C - 3\frac{F}{c^4} - \frac{H}{c^2} \right) \sin 2\theta, \quad (3)$$

$$\varepsilon_r|_{r=c} = \alpha \frac{A}{c^2} + 2\beta B - 2 \left(\alpha C + 3\alpha \frac{F}{c^4} + \frac{2}{E} \frac{H}{c^2} \right) \cos 2\theta, \quad (4)$$

$$\varepsilon_\theta|_{r=c} = -\alpha \frac{A}{c^2} + 2\beta B + 2 \left(\alpha C + 3\alpha \frac{F}{c^4} + 2\nu \frac{H}{c^2} \right) \cos 2\theta, \quad (5)$$

$$\gamma_{r\theta}|_{r=c} = 4 \left(\alpha C - 3\alpha \frac{F}{c^4} - \alpha \frac{H}{c^2} \right) \sin 2\theta, \quad (6)$$

$$u|_{r=c} = -a \frac{A}{c} + 2\beta Bc - 2 \left(aCc - a \frac{F}{c^3} - \frac{2}{E} - \frac{H}{c} \right) \cos 2\theta, \quad (7)$$

$$v|_{r=c} = 2 \left(aCc + a \frac{F}{c^3} - \beta \frac{H}{c} \right) \sin 2\theta. \quad (8)$$

也可以从水泥环的特解得到以上解答，只是全部待定常数均需换为带撇的表示式。由於满足焊接的边界条件，两种方法算出的结果应能保证在交界处各应力分量和位移分量相等。

水泥环内的应力和位移同样可直接写出。下面列出主要的表达式：

$$\sigma'_1 = \frac{A'}{r^2} + 2B' - 2 \left(C' + 3 \frac{F'}{r^4} + 2 \frac{H'}{r^2} \right) \cos 2\theta, \quad (9)$$

$$\sigma'_2 = - \frac{A'}{r^2} + 2B' + 2 \left(C' + 6D'r^2 + 3 \frac{F'}{r^4} \right) \cos 2\theta, \quad (10)$$

$$\tau'_{1r} = 2 \left(C' + 3Dr^2 - 3 \frac{F'}{r^4} - \frac{H'}{r^2} \right) \sin 2\theta. \quad (11)$$

$$u' = -a' \frac{A'}{r} + 2\beta' B'r - 2 \left(a' C'r + 2v' D'r^3 - a' \frac{F'}{r^3} - \frac{2}{E'} \frac{H'}{r} \right) \cos 2\theta. \quad (12)$$

而电容式钻孔应变仪所测量的钢筒内壁之径向位移则为：

$$u''|_{r=a} = -a'' \frac{A''}{a} + 2\beta'' B''a - 2 \left(a'' C''a + 2v'' D''a^3 - a'' \frac{F''}{a^3} - \frac{2}{E''} \frac{H''}{a} \right) \cos 2\theta. \quad (13)$$

對於其它要计算的参数，均可按附注的解算结果写出相应的公式。在已知两向应力时，为计算该模型各部位的应力、应变和位移，已编制出程序 BODECA1。计算时只须输入各层的杨氏模量、泊松比、两向应力与模型的几何尺寸以及欲计算部位的坐标，便可获得计算结果。

“R ZB-1型电容式钻孔应变仪”测量钢筒内径的变化，由此来反演围岩中附加应力场是前述计算之逆问题。该探头四个受力元件互成 45 度夹角，两向应力作用下各元件的径向位移由 (13) 式整理得到：

$$\begin{aligned} u'_1 &= K_1 B + K_2 C \cos 2\theta, \\ u'_2 &= K_1 B + K_2 C \cos(2\theta + 90^\circ), \\ u'_3 &= K_1 B + K_2 C \cos(2\theta + 180^\circ), \\ u'_4 &= K_1 B + K_2 C \cos(2\theta + 270^\circ). \end{aligned} \quad (14)$$

化简后得到

$$\begin{aligned} u'_1 &= K_1 B + K_2 C \cos 2\theta, \\ u'_2 &= K_1 B - K_2 C \sin 2\theta, \\ u'_3 &= K_1 B - K_2 C \cos 2\theta, \\ u'_4 &= K_1 B + K_2 C \sin 2\theta. \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$B = \frac{1}{4}(P_1 + P_2),$$

$$C = \frac{1}{4}(P_2 - P_1).$$

任意取三个元件的测值, 即可解算出附加应力场的三个分量: P_1 、 P_2 与 θ :

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 &= \frac{2}{K_1}(u_1' + u_3'), \\ P_2 - P_1 &= \frac{2}{K_2}(u_1' - u_3') \cos 2\theta, \\ \operatorname{tg} 2\theta &= \frac{u_1' + u_3' - 2u_2'}{u_1' - u_3'}. \end{aligned} \quad (16)$$

式中 K_1 、 K_2 是与模型各部分几何尺寸及介质弹性常数有关的系数。已编写出程序 BODECA2, 使用此程序时仍要输入上述参数, 只是将两向应力换为三个方向钻孔径向位移的观测值, 便可求出钻孔周围均匀岩体内附加应力场的主应力及其作用方向。

以上的计算是按平面应力的情况来处理的, 故 E 、 ν 分别是材料的杨氏模量和泊松比。如果考虑平面变形的场合, E 、 ν 就是两个折合的弹性常数, 应分别以 $\frac{E}{1-\nu^2}$ 和 $\frac{\nu}{1-\nu}$ 替换之。测点附近岩石的弹性常数 E 和 ν 是通过钻井取出岩芯, 再进行实验测定的。

三、有关实际应用的讨论

使用程序 BODECA1 对图 1 的模型计算了岩体 E 、水泥层 E' 、水泥层厚与钢筒壁厚等参数的改变对各部位应力、应变和位移的影响。我们着重讨论了这些参数与弹性钢筒内壁径向位移 u'' 的关系, 所获得的结果不仅为地应力观测站选择台址和钻孔位置, 也为日后观测数据的分析与解释提供了理论依据。此外, 本节关于耦合参数的研究对合理选择测量系统的主要技术指标及结构参数也有实际指导意义。

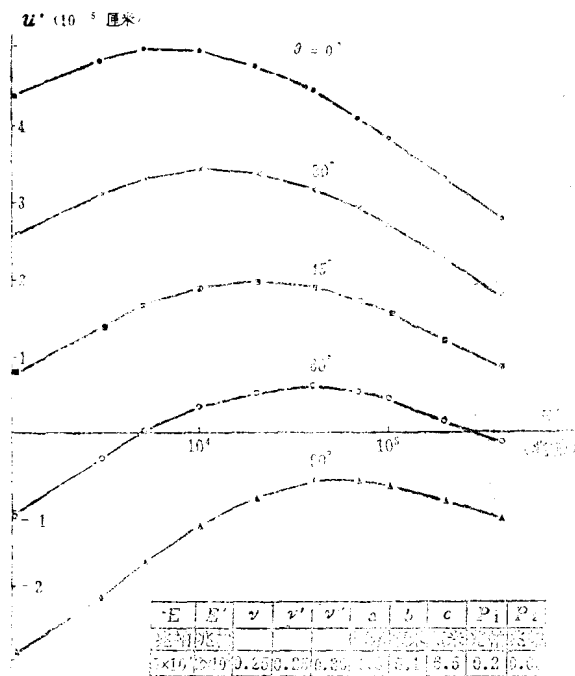


图2 钢筒内壁径向位移与耦合介质模量的关系

图 2 表示在进行平面应力测量时, u'' 与耦合介质杨氏模量的关系。从图中可看出, 即使 E' 在 $(5 \times 10^3 - 5 \times 10^4)$ 兆帕的较大范围内变动, 系统的测量灵敏度也未受到显著的影响。这一结果使我们在选择和配制耦合材料时, 可以优先考虑膨胀度、固结速度以及材料线度的长期稳定性等因素。

图 3 的计算结果表明, 弹性钢筒壁厚对测量系统灵敏度的影响不大。若已有的标准不锈钢管壁厚为 4 毫米, 制做探头时可不用减薄。这样既可简化加工程序, 还可避免加工带来的壁厚不均匀和残余应力等影响, 而此时系统灵敏度仅降低百分之几, 与下面要讨论的测区杨氏模量的影响比较起来是一个次要的因素。

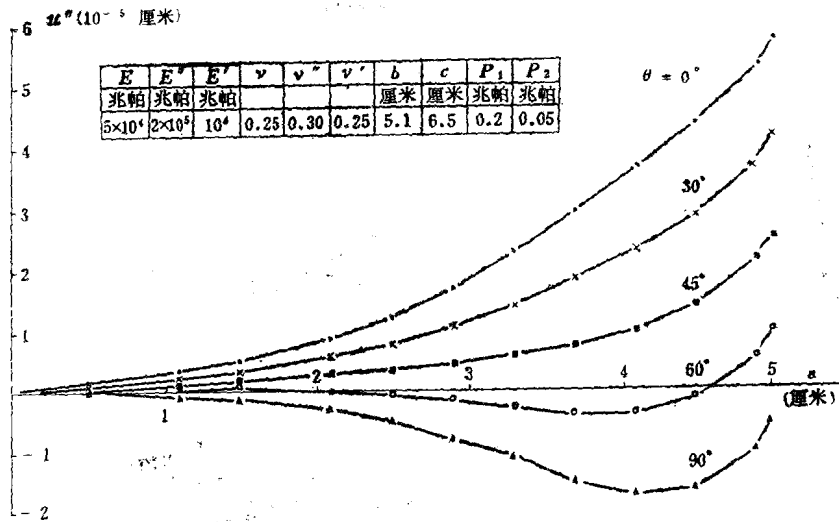


图3 钢筒内壁径向位移与钢筒壁厚的关系

观测台站地区地壳岩石杨氏模量的改变对耦合系统的应力-位移传递系数有着显著的影响。图4示出当在 10^3 兆帕至 10^5 兆帕之间改变时 u'' 的变化。在油田或煤矿等软岩层中进行地应力测量时，由于岩石的 E 值一般在 10^3 — 5×10^3 兆帕之间，从图中可看出钢筒变形较之在花岗岩中要大得多。所以，在设计测量装置时应采取措施，保证系统有足够的动态工作范围。

在一些特定应用场合下，可将不同方向的传感元件进行组合，以直接测量差应变或面应变。这时，深入了解探头与岩体的耦合问题是很重要的。仍采用前述耦合方式，当 E' 取较小值（如 10^3 兆帕）时，将 $\theta = 0^\circ$ 与 90° 的元件差接，几乎可使有效信号加倍（图5）。随着 E' 增大，此效应逐渐减弱。反之，若将两个互相垂直的元件迭加组合，或使用侧面应变的传感器，则信号会有衰减。尤其是 E' 值低时，组合引起的信号衰减甚至高达90%。

下面，我们来讨论沉砂耦合方法

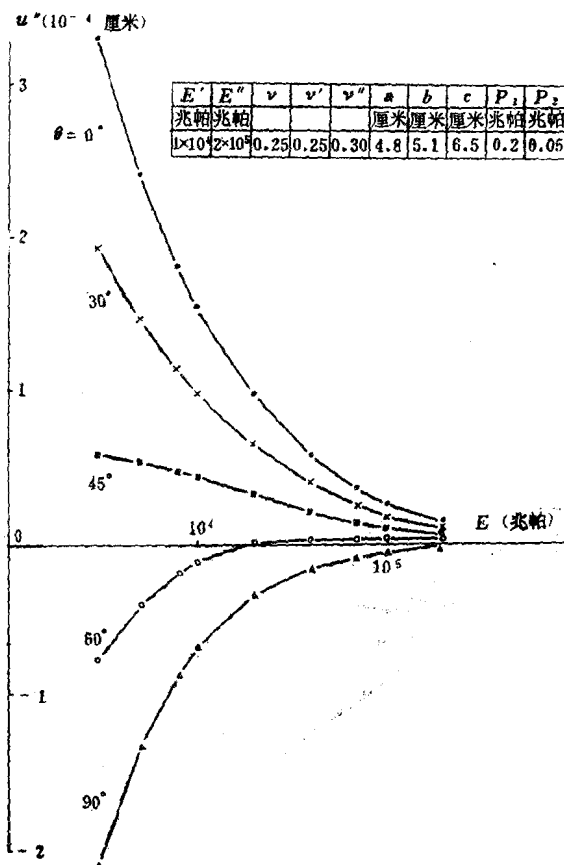


图4 钢筒内壁径向位移与围岩模量的关系

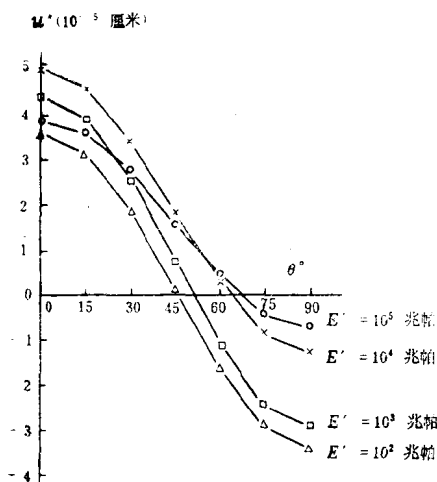


图5 钢筒内壁径向位移与方位角的关系

切力的能力取决于该处石英砂受到的压力。有关的侧压力系数和界面上的摩擦系数是参考岩石力学和工程地质手册提供的数据选取的^[2]。计及砂粒侧压力和对砂层夯实所施加的预压应力，代入前节公式进行计算。再判断是否出现张应力大于预压应力以及剪应力大于摩擦力的情况。我们重点研究了交界面上的不稳定性，图6示出了计算结果的一例。该结果表明，单向加载，均匀介质中的应变只有 $(1-3) \times 10^{-7}$ 时，交界处的某些部位（图6中加阴影段）已有失稳滑动现象产生。若再进一步提高载荷，均匀介质中的应变当会增大，不但交界处失稳滑动的范围会扩大，石英砂内部也将出现滑移面。石英砂的这种结构变形会衰减外部岩石的变形，最终导致在观测应力应变场积累过程时发生畸变。

四、耦合方法的初步实验结果

关于耦合方法的实验研究可分为两大类：即室内试验与现场试验。下面分别就试验内容和主要结论作一简要介绍。

室内试验主要是研究耦合粘接材料本身的特性。对于有机粘接剂中的一种糠叉丙酮改性环氧固化剂，我们作过不同配方的10个样品。经测定，它们的杨氏模量在 $(2-9) \times 10^3$ 兆帕的范围，抗拉强度不低于50兆帕。就力学性能而言，能满足作为膨胀固化剂的要求。但较长期的观测表明，这些样品线度的长期稳定性较之水泥要差一些。究其原因，或许是由于有机材料是大分子结构，易于老化失效所致。

关于膨胀水泥我们主要试验了硅酸盐水泥加微膨胀剂和高铝水泥加自应力水泥两种系列的配方，并采用了不同的水灰比、灰砂比以及不同的水泥组份比来配制水泥砂浆。经过材料力学试验，测得硅酸盐系样品的杨氏模量可达 2×10^4 兆帕，高铝系样品则为 $(4-9)10^3$ 兆帕。现阶段的实验说明高铝水泥加自应力水泥砂浆的膨胀量和预应力较易控制，漂移持续的

的问题。石英砂是一种散粒体材料，在外加作用力下变形十分复杂，可分作弹性变形与结构变形两大类。外加作用力很小时，其变形以弹性变形为主；当作用力稍大时，则出现不可恢复的结构变形，即砂粒与砂粒之间相对位置发生改变。因此很难找到合适的计算模型。这里，我们提出一个判断石英砂在什么条件下会发生结构变形的近似计算方法。首先，假定在沉砂耦合中石英砂本身是连续的，其与岩石、钢筒交界各处满足“焊接”的边界条件。前节所述之三层嵌套的复合环模式就可以借用到沉砂耦合方法的计算中来，从而可求得各个部位的应力张量。最后来判断上述假定是否成立，即在石英砂内部及其边界处是否已产生失稳滑动现象。

在限制砂层侧向流动的情况下，石英砂可以承受一定程度的压力，几乎不能承受张力；其承受剪

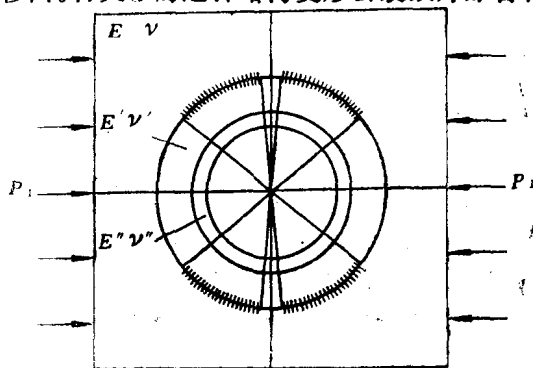


图6 沉砂耦合中交界面的失稳滑动

时间较短。试验还表明,当水灰比太大时,样品的杨氏模量明显降低,且结构松散易裂。

现场试验的一项工作是在同一钻孔中,先后采用沉砂法与膨胀水泥固结法对同一探头进行实地安装的对比观测。结果表明,采用沉砂法时各元件测值稳定快、漂移量小,但由于砂子透水性好,在同样的观测条件下,气压与水位等环境因素变化引入的干扰显著增大。

此外,我们还在四川姑咱地震台和北京香山地震台用优选的水泥配方固结了两个探头。从这两个站的实测资料和室内长期观测的结果可得出从膨胀水泥(高铝系列配方)浇注之日起到固化50天时元件测值的日漂移率(见表1)。可看出一般在水泥固结两个月后,元件

表1 元件测值日漂移率

固化时间(天)	1—10	11—20	21—30	31—50	>50
日 漂 移 率	$(1-3) \times 10^{-6}$	$(6-10) \times 10^{-7}$	$(1-5) \times 10^{-7}$	$(5-10) \times 10^{-8}$	$<5 \times 10^{-8}$

测值基本稳定。

最后,作为第一节所获得公式的应用实例,我们给出“RZB-1型电容式钻孔应变仪”在四川姑咱地震台的部分实测结果(图7)以及反演得到的相应水平应力场诸分量的变化情况(图8)。从姑咱近两年的观测资料看,鲜水河断裂、龙门山断裂、安宁河断裂交汇处及其邻区地壳应力场活动比较显著,已计划在该区布设较密集的钻孔应变仪台网来详

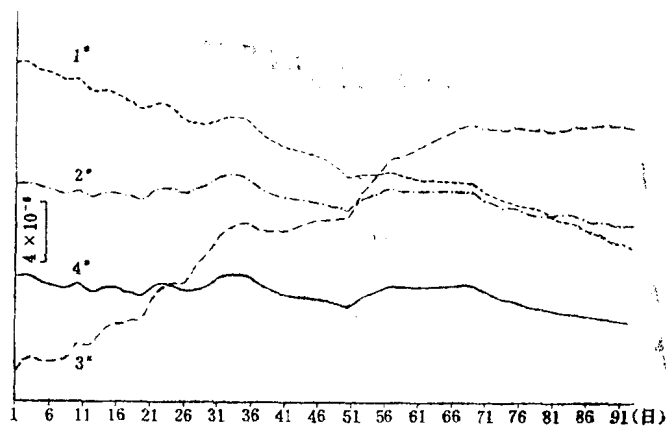


图7 姑咱台钻孔应变仪原始观测值
(1985. 8. 1.—1985.10. 31)

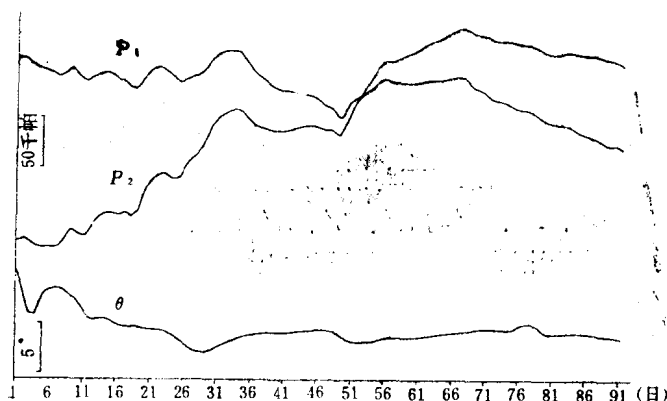


图8 由图7原始数据反演得到的水平应力场分量值
(1985. 8. 1~1985. 10. 31.)

细研究区域应力场活动的特点。

本项研究系由国家地震局地震科研监测预报招标合同 Z852302 资助的项目。作者感谢潘立宙、王绳祖同志对本项工作提出的有价值的参考意见。

参 考 文 献

- [1] 潘立宙, 与地应力测量有关的几个公式的推导和讨论, 地应力测量的原理与应用, 地质出版社, 1981。
[2] 《工程地质手册》编写组, 工程地质手册, 中国建筑工业出版社, 1977。

附录:

水泥固结条件下钻孔变形的计算

正文中已说明了此问题解算的步骤, 这里我们给出主要的计算过程。首先写出“焊接”条件下复环模型的边界和交界条件:

$$\sigma_r|_{r=a} = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) + \frac{1}{2}(P_1 - P_2) \cos 2\theta.$$

$$\tau_{r\theta}|_{r=a} = \frac{1}{2}(P_2 - P_1) \sin 2\theta.$$

$$\begin{aligned} \sigma_r|_{r=c} &= \sigma'_r|_{r=c}, & \tau_{r\theta}|_{r=c} &= \tau'_{r\theta}|_{r=c}, \\ u|_{r=c} &= u'|_{r=c}, & v|_{r=c} &= v'|_{r=c}, \\ \sigma'_r|_{r=b} &= \sigma''_r|_{r=b}, & \tau'_{r\theta}|_{r=b} &= \tau''_{r\theta}|_{r=b}, \\ u'|_{r=b} &= u''|_{r=b}, & v'|_{r=b} &= v''|_{r=b}, \\ \sigma''_r|_{r=a} &= 0, & \tau''_{r\theta}|_{r=a} &= 0, \\ u|_{\theta=0} &= u|_{\theta=\pi}, & v|_{\theta=0} &= 0. \end{aligned}$$

考虑到无穷远处 σ_r 与 $\tau_{r\theta}$ 的三角函数表达式及应力、应变值的有界性, 同时注意到环形板与无限大板之中心有可能是其应力和位移算式的奇点, 并计及位移的单值性, 可选出合适的应力函数和相应的应力、应变与位移的特解, 见表 2:

对无限大板, 选取表中第 2、3、15、17、21 及第一栏等特解, 待定常数分别为 A 、 B 、 C 、 E 、 F 和 K 、 L 、 N 。对水泥环与钢筒则需选取表中所有项为其特解, 并有相应的待定常数 A' 、 B' 、 C' 、 D' 、 F' 、 H' 与 K' 、 L' 、 N' 以及 A'' 、 B'' 、 C'' 、 D'' 、 F'' 、 H'' 与 K'' 、 L'' 、 N'' 。文中约定凡属无限大板的物理量用右上角不带撇的字母表示, 水泥环和钢环中的量则分别以带“'”与“''”的字母表示。

将应力、应变与位移的各项特解分别乘以待定常数后相加, 然后代入边界条件和交界条件可得到三组求解待定常数的代数方程式:

$$\left. \begin{aligned} K'' &= K' = K = 0, \\ L'' &= L' = L = 0, \\ N'' &= N' = N = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$