

一种土层原地应变(力)测量方法及其实验与现场应用

孙寿成 张绍治

(江苏省地震局, 南京)

提 要

本文介绍了一种土层原地应变(力)测量方法,论述了这种方法在土层中进行原地应变(力)测量的基本依据。实验室试验结果和野外现场测量等,旨在证明该方法在土层中测量原地主应变(力)方位是可行的,它可为地震地质、工程地质等提供土层原地应变(力)信息资料。

一、前 言

地震作为地下岩体破裂或断层滑动事件,它是与地壳某个部位由于应力作用的变化和由于特定的构造条件造成的应力集中密切相关,土体作为组成地壳的成份,必然在一定的空间范围内传递由震源体发出的应力波信息。实际上国内服务于地震测报工作的土层应力相对变化观测点在震前往往伴有测值突跳、脉冲和测值明显的上升或下降等现象。为了论证和检验这种事实,需要通过实验室和野外实地试验来解决土层中应变(力)测量的一系列理论和技术问题。其中直接测量土层中原地应变(力)的方向有其特殊的意义。

二、土层中原地应变(力)测量的目的原理及其可行性

土层原地应变(力)对于平原区来说,其目的是通过测量求出各个局部地段土层中原地应变(力)方向,它可以配合地震地质研究,勾画出本地区的现今构造应力(变)场的活动图象,研究平原区活动断裂的活动方式、调查地质灾害,从而服务于地震的预测预报和土体工程建设。

根据常规三轴压缩试验揭示,土层是一种复杂的弹-塑性固体^{①,11},但在低应力作用条件下,其应力应变曲线有一个短暂的线性阶段,即土体在低应力作用下有一个明确的弹性范围¹²。由于测量地应力的空间范围远远大于土层中形变位移尺寸,其伸缩应变较小,因此在数学运算中可略去高次项,使弹性理论中的微分方程为线性,从而将结构复杂的土体从总体上视为均匀统一体¹⁸,这样便可以把特定条件下的土力学问题简化到弹性范畴内进行研究。

就应力而言,土层同样应包括正应力和偏应力两部分,正应力造成的土体的体积应变可表达为

①黄文熙,土的弹塑性应力-应变模型理论(一) 岩石力学,1979年。

$$e_0 = \frac{\lambda_0}{1 + e_0} \ln \frac{p_0 + p}{p_0} \quad (1)$$

式中 λ_0 ——土体在一定应力作用下的压缩指数;

e_0 ——土体原始孔隙比;

p_0 ——土体原始应力状态;

p ——施加于土体的附加应力。

显然,土层体积正应变与外部附加应力(p)关系密切,而为了获得比较理想的弹性应变,就需要选择密实的未经人工扰动的原生状固结土,在增加的附加应力与原地应力之比较小的情况下,使得 λ_0 和 e_0 对土层应力应变线性度影响最小。

此外,在断裂带附近的土层,由于断裂活动的牵引,土层中可能产生明显的剪切应力,其值布兰斯拜(P.L.Bransby)认为可表达为②

$$\tau = \phi \cdot \eta |grad \cdot v| \cdot M \quad (2)$$

式中 ϕ ——经验比例系数,

η ——土层粘滞系数,

$|grad \cdot v|$ ——土体构造运动速度的梯度值

M ——构造运动不均一性的校正系数

上述表达式说明土层中的剪切应力与断裂的活动(错动)速率、断裂破碎带宽度、土层与断裂岩体的粘结状态等密切相关。因此,在现场选择具体测点时,必须同时考虑土体特性和构造条件可能带来的影响。

三、测定土层原应变(力)方向的方法

(一)方法

目前服务于各种目的的土层应力(变)测量途径和方法较多,如直接在土层中埋设压力盒、伸缩棒等探头,从物理意义上,诸方法通常只适用于观测土层中的应力(变)或地压力的相对变化,即测量其附加应力(变)。另一种则是直接测量原地应力(变)的赋存状态,又称绝对应力(变)测量。本方法属于后者,即测量土层中原地应变(力)状态,而造成这种状态的原因(如构造、土体的结构、局部地形)暂不考虑。所使用的方法称之为“填孔法”*,测量探头为电阻应变花,即在土层钻孔内定向安放比土层弹性模量小得多的橡胶塞($E_{\text{胶}}=80\text{kg/cm}^2$),并使之与土体吻合一体。橡胶塞内平面粘贴电阻应变阻栅花,构成传感探头,引出地面(传感探头见照1)。设被测的土层的弹性模量为 E_1 ,泊松比为 ν_1 ,而充填于土层钻孔内的橡胶塞弹性模量为 E_2 ,泊松比为 ν_2 ,则孔的径向位移式可表达为^[4](图1):

$$u_r = A_s(\sigma_1 + \sigma_2) r + B_s(\sigma_1 - \sigma_2) r \cdot \cos 2\varphi \quad (3)$$

②苏恺之,土层中的应力测量方法概述,国家地震局地震地质大队,1981年4月。

* 此方法的雏形最初由地质部地质力学所和兰州地震大队提供,笔者于1976年引入华东地区,并进行技术改进。



照片1 探头实物照

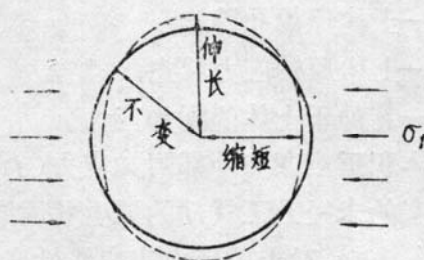


图1 钻孔在定向压下的径向应变示意图

其中, 两个复合弹性常数为

$$A_e = \frac{1 - \nu_2}{E_2(1 + \nu_1) + E_1(1 - \nu_2)} \quad (4)$$

$$B_e = \frac{2(1 + \nu_2)}{E_2(3 - \nu_1) + E_1(1 + \nu_2)}$$

式中 φ —— σ_1 至 r 之间的夹角;

r —— 需测方向上的点与钻孔(测孔)中心的距离。

则橡胶塞平面的理论上的径向应变为

$$\varepsilon_r = A_e(\sigma_1 + \sigma_2) + B_e(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\varphi \quad (5)$$

其径向应力值相应为

$$\sigma_r = A_o(\sigma_1 + \sigma_2) + B_o(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\varphi \quad (6)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} A_o &= \frac{A_e E_2}{1 - \nu_2} = \frac{E_2}{E_2(1 + \nu_1) + E_1(1 - \nu_2)} \\ B_o &= \frac{B_e E_2}{1 + \nu_2} = \frac{2E_2}{E_2(3 - \nu_1) + E_1(1 + \nu_2)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

若已知测孔平面内三个任意方向的传感元件(图2中的A、B、C)之间的夹角 θ_{12} 、 θ_{23} 分别表示逆时针计序的已知角, 且此三方向的应变片所测得的应变增量分别为 $\Delta\varepsilon_1$ 、 $\Delta\varepsilon_2$ 和 $\Delta\varepsilon_3$, 并将其分别代入式(5), 得

$$\Delta\varepsilon_1 = A_e(\sigma_1 + \sigma_2) + B_e(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\varphi \quad (8)$$

$$\Delta\varepsilon_2 = A_e(\sigma_1 + \sigma_2) + B_e(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2(\theta_{12} + \varphi) \quad (9)$$

$$\Delta\varepsilon_3 = A_e(\sigma_1 + \sigma_2) + B_e(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2(\theta_{12} + \theta_{23} + \varphi) \quad (10)$$

由式(8—10)分别求得 $\sigma_1 + \sigma_2$ 和 $\sigma_1 - \sigma_2$, 即

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{\Delta \varepsilon_3 [\cos 2\varphi - \cos 2(\varphi + \theta_{12})] + (\Delta \varepsilon_1 - \Delta \varepsilon_2) \cos(\varphi + \theta_{12} + \theta_{23})}{A_s [\cos 2\varphi - \cos 2(\varphi + \theta_{12})]} \quad (11)$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\Delta \varepsilon_1 - \Delta \varepsilon_2}{B_s [\cos 2\varphi - \cos 2(\varphi + \theta_{12})]} \quad (12)$$

由式(11)、(12)得

$$2\phi = \tan^{-1} \left[\frac{(\Delta \varepsilon_2 - \Delta \varepsilon_1) \cos(\theta_{12} + \theta_{23}) + (\Delta \varepsilon_3 - \Delta \varepsilon_2) - (\Delta \varepsilon_3 - \Delta \varepsilon_1) \cos 2\theta_{12}}{(\Delta \varepsilon_2 - \Delta \varepsilon_1) \sin 2(\theta_{12} + \theta_{23}) - (\Delta \varepsilon_3 - \Delta \varepsilon_1) \sin 2\theta_{12}} \right] \quad (13)$$

φ 角同时应满足判别式

$$\frac{\Delta \varepsilon_1 - \Delta \varepsilon_2}{B_s [\cos 2\varphi - \cos 2(\theta_{12} + \varphi)]} \geq 0 \quad (14)$$

否则最大主应变(力)至起算传感元件矢径方向所夹的角度 φ' 为 $\varphi' = \varphi + 90^\circ$

为了简化计算, 我们将三个传感元件之间的夹角按规则角度如 30° 、 45° 或 60° 等组合, 构成特殊角度的应变阻栅花。为了进行校核和避免随机误差, 常常用四个传感元件测量其径向应变, 用排列组合方法进行组合运算, 同时可以求得四组结果, 理论上它们应是一致的, 以此提高测量结果的可信度。

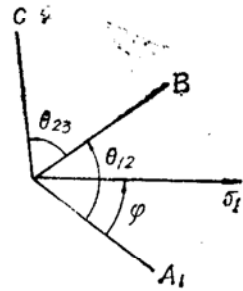


图2 主应力方向与测试元件在平面上的关系

(二)解除技术

解除技术采用在钻孔周围挖掘同心环形应力释放槽的办法(图3、照2), 以切断周围应

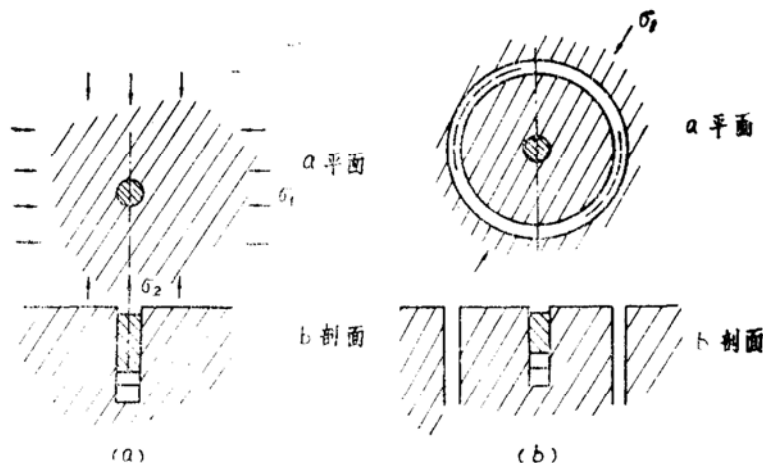


图3 土体应力(变)现场解除示意图

力的作用。应力释放槽开挖前后所引起的应变差值,可用来进行主应变(力)方向的计算(由于现场测定土层弹性模量等参数尚有一定困难,可暂不计算其主应变(力)的绝对值)。为保证解除过程中探头所受到的预应变(力)不影响测量结果,解除时应力释放槽至钻孔园心的半径至少10倍于钻孔半径。

四、室内模拟率定试验

为了试验土层中原地应力(变)主轴方位测量的可行性,在投入实地现场测量之前,进行了多次室内模拟率定试验。

(一)实验测试系统

将均匀的土壤(西北高原黄土)置于四周封闭,上下开启的容器中,探头置于土体中心部位(图4),在YY200A压力试验机下进行单轴加卸载试验,为减少边界效应影响,容器体积远远大于探头的尺寸。探头分别用半导体应变片、箔式应变片和金属丝电阻应变片作传感元件。记录仪用YJ-5型电阻应变仪和自制的测量电桥(图5)同时进行实验。设加卸载荷的方向为零度,通过实验计算求得的主压应力方向其实际误差如表1。

(二)实验数据分析

1.箔式应变片探头采用直角应变阻栅花测量,在不同加载($1-5\text{kg}/\text{cm}^2$)情况下的完全卸载,以模拟应力完全解除。这组实验共取得20组计算结果,其中主压应力实际误差为 $0^\circ-5^\circ$ 有11组, $5^\circ-10^\circ$ 有6组, $10^\circ-11^\circ$ 的为3组,当用自制电桥记录实验数据进行计算,误差较大,这显然与仪器的精度和灵敏度有关,但大部分误差仍在 10° 以内。

2.上述算例当用I、II两片作为起算片时,计算的主压应力实际误差较小,均在 6° 以内,当用III、IV片作起算片时,实际误差偏大,可能与这两组方向首先反映的微观剪切裂隙



照片2 土层地应力(变)解除现场

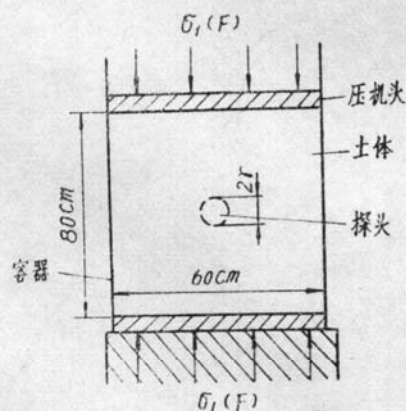


图4 探头在单轴的压力试验装置

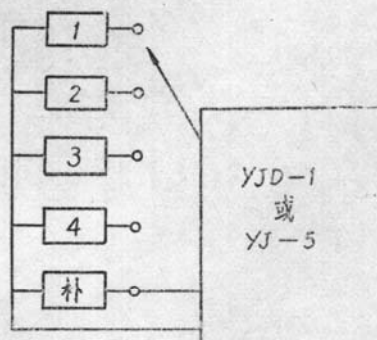
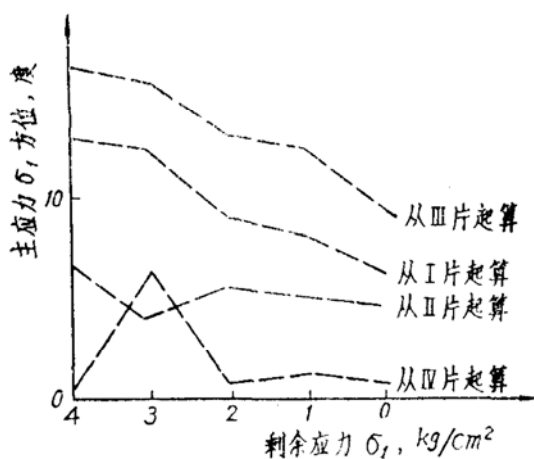


图5 记录仪与探头的联接

表1 土体中的主压应力方向实际计算结果与载荷方向的 σ_1 实际误差

卸 载	测 试 系 统	起 算 片 号																			
		Ⅰ					Ⅱ					Ⅲ					Ⅳ				
		加载至(kg/cm ²)																			
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	箔 式 片 YJ-5 应变仪	8°	3°	4°	5°	6°	0°	4°	3°	3°	4°	11°	10°	9°	9°	9°	10°	4°	2°	0°	0°
		59′	30′	47′	33′		26′	7′	4′	47′	24′	6′	39′	39′	39′	24′	3′	40′	40′	58′	35′
0	半 导 体 片 自 制 电 桥	5°	2°	5°	11°	11°	13°	2°	6°	23°	19°	5°	2°	2°	5°	5°	18°	1°	8°	23°	20°
		30′	15′	15′	45′		47′	18′	39′	3′	43′	20′	51′	45′	30′	39′	27′	54′	45′		40′
0	电 阻 丝 片 YJ-5 与应变仪	3°	5°	8°	7°	10°															
		51′	12′	6′	39′	10′															

图6 卸载过程中计算主应力 σ_1 方位的偏转

有关。

3.对土体试件进行四次压力锻炼,使土体结构由疏松变成致密,使之接近于原生赋存状态,在压实过程中,主压应力的计算方向亦逐渐接近实际加载方向($10^\circ 27' - 7^\circ 12'$)

4.对解除(卸载)过程中的数据进行计算,无论使用哪一组数据计算,其主压应力在解除过程中逐步接近实际卸荷方向。不完全解除仍旧保持一定的残余应力(图6),表明只有完全卸载测得的数据才完全反映土层中原地应变(力)的实际方向。

5.在不同量级加载并完全卸载后,其加载和卸载记录的应变差在理论上本应皆为零(对

弹性体),但黄土在加卸载试验时,其数值一般不为零(表2),此亦表明,土体中有残余应变(力)存在。

6.土层应变探头在单轴应力场作用下,各传感元件的测值变化为:与受力方向一致的元件呈现阻值下降和负的应变,垂直于受力方向的元件表现为阻值上升和正的应变。而在斜交主压应力方向上(如 45° ,图7中的Ⅲ、Ⅳ两组)的应变元件变化平缓,且一组略呈正的应变,另一组略呈负的应变。

从图7压力试验曲线上可以看出土体应变探头的线性和可逆性反映是良好的。图7中的Ⅰ'Ⅱ'Ⅲ'Ⅳ'为不同方向元件,第一次加卸载试验,其剩余应变较大,显然与土体结构松散有关,第二次加卸载曲线线性提高,剩余应变也显著减小。(图7中的Ⅰ''、Ⅱ''、Ⅲ''、Ⅳ''),同时随着加载和卸载的重复次数增高,探头的灵敏度也明显提高。

上述结果表明,土层中的应力作用方向是可以通过应变探头测定的,其测定的实际误差多在 $0^\circ - 10^\circ$ 以内。但这种测定是有条件的,即在低应力条件下,土体应保持相对压密状态(如原生土)。

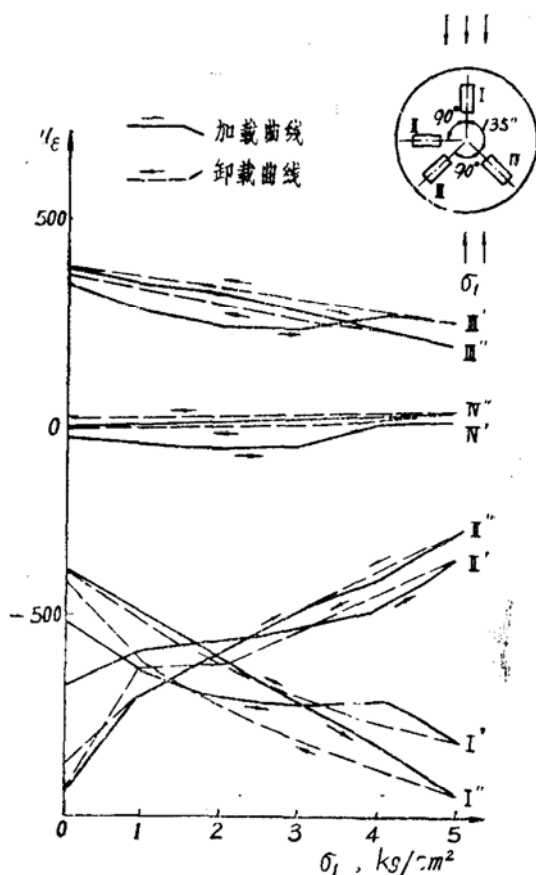


图7 箔式应变片探头重复加卸载曲线(YJ-5应变仪测试)

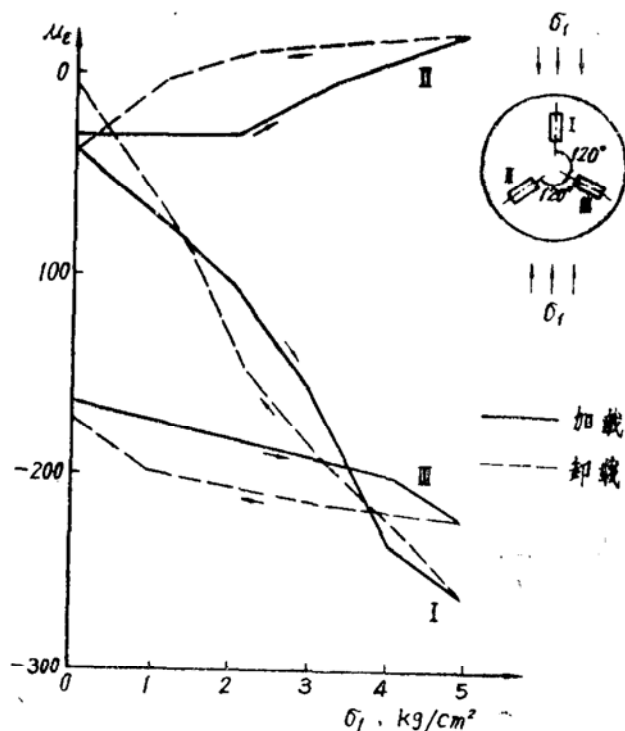


图8 阻丝式应变片探头加卸载应变试验曲线

五、现场原地应变主轴测量

采用上述方法笔者近年来对郯庐断裂带中南段的新沂、泗洪、泗县、邳县、嘉山、盱眙等地和茅山断裂带中段的溧阳、溧水等地进行土层原地应变主轴方位实地测量^[5], 结果表明, 对于每一测点, 只要土质条件选择得当(如亚粘土、粘土), 用同一探头中四个传感元件组合运算, 或同一测点用两个探头同时进行测量, 其结果一致性大多较好, 即就某个测点而言, 土层中的应力(水平)不是均匀的, 而是有一个显著的主方向性。就某一测区而言, 郯庐断裂带中南段与茅山断裂带中段两个不同区域, 其土层中的区域主应变轴向也明显不同(表3), 前者以北东向为主, 后者则为北西向, 这与地震地质、形变测量、震源机制和模拟实验所推演的这两地区现今应力场的主方向大体一致。这些事实说明土层中的应变(力)状态除

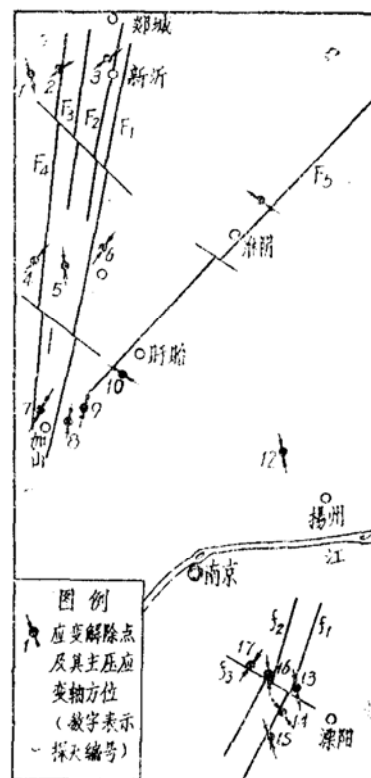


图9 土体应力(变)现场测量点分布图

注: F和f表示断裂构造

表2 土层应变探头室内模拟率定试验原始数据(卸加载: $\Delta\mu\epsilon(A)$ 和 $\Delta R(B)$)表

测 试 系 统	卸 载 (kg/cm^2)	卸 载 记 录 值	元 件 号																
			I					II					III						
			加载至(kg/cm^2)																
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
A 箔式应变片 探头中的应 变片互成 45° (YJ-5 电阻 应变仪记录)		-499	-603	-706	-807	-934		-693	-585	-487	-319	-288		338	314	272	229	190	
	4	-366	-262	-159	-58	69	-384	309	201	103	15	-104	230	-108	-84	-42	1	40	
	3	-293	189	-86	15	142	-481	212	104	6	82	-279	248	-90	-66	-24	19	58	
	2	-210	-106	-3	98	225	-583	110	2	-96	-184	-295	235	-53	-29	13	56	95	
	1	-604	-105	-1	102	203	-675	-2	-111	-208	-296	-407	322	-16	8	50	93	132	
	0	-397	102	206	309	417	537	-876	-185	-293	-391	-474	-590	355	17	41	82	126	165
B 半导体应变 片, 探头中 的应变片互 成 45° (自制 电桥记录)			619	630	639	647	653		430	413	409	403	394		502	505	508	514	514
	4	651	32	21	12	4	-2	396	-34	-17	-13	-7	2	515	13	10	7	1	1
	3	646	27	16	7	-1	-7	397	-33	-16	-12	-6	3	516	14	11	8	2	2
	2	642	23	12	3	-5	-11	403	-27	-10	-6	0	9	506	-4	1	-2	-8	-8
	1	634	15	4	-5	-13	-19	410	-26	-3	1	7	16	513	11	8	5	-1	-1
	0	605	-14	-25	-34	-42	-48	448	13	35	39	45	54	507	5	2	-1	-7	-7

注: 有 [] 的数值为完全卸荷后的残余应变值

表 3

土层应变主轴野外现场实测结果一览表

序 号	地 点	土 质	主应变方位(ϵ_1)
1	邳县运河公社三连	亚 粘 土	$N30^\circ W$
2	新沂纪集公社华沂	砂 土	$N45^\circ E$
3	新沂纪集公社墨河	亚 粘 土	$N60^\circ E$
4	泗洪东门公社马公	亚 粘 土	$N26^\circ E$
5	泗洪东门公社丁庄	亚 粘 土	$N30^\circ W$
6	泗洪城东83424部队	亚 粘 土	$N66^\circ E$
7	嘉山洪庙蔡岗	亚 粘 土	$N 8^\circ E$
8	嘉山鲁山公社所在地	亚 粘 土	$N30^\circ E$
9	盱眙龙山公社牛山	亚 粘 土	$N42^\circ E$
10	盱眙磨刀涧小学	亚 粘 土	$N42^\circ W$
11	淮阴张集朝阳	亚 砂 土	$N24^\circ W$
12	高邮天山公社	砂 土	$N25^\circ W$
13	溧阳南大分校果园	亚 粘 土	$N60^\circ W$
14	溧阳上沛中学	亚 粘 土	$N23^\circ W$
15	溧阳汤桥中学	亚 粘 土	$N27^\circ W$
16	溧水白马中学	亚 粘 土	$N39^\circ W$
17	溧水东芦砖瓦厂	亚 粘 土	$N50^\circ E$

反映了土体结构等自身特性外,更重要的反映了不同区域的地壳现今应力状态的差异,因此对土层原地主应力(变)的测量,将有可能为地震地质、地质灾害、土体工程等的调查研究提供有用的信息。

当然,土体毕竟不是理想的弹性体,各地的土质差异也较大;就方法而言,由于探头的加工、制作尚未标准化,测量采用不连续人工读数等等,不同测点的测量精度还不能做到完全统一,因此一些测点有时会有较大的测量误差,这种方法的测试系统尚需进一步探索和完善。

参加此课题部分工作的还有郗崇植、唐忠良、刘苏、郭玉莲。

参 考 文 献

- [1] Wohnlich, M. and Schade, D., Analysis and Interpretation of Rock Parameters from a Radial Jack Test, Rock Mechanics, Vol. 11, no. 4, 1979,
- [2] Black, C.A., Methods of Soil Analysis, American Society of Agronomy, Inc. Publisher, Madison, Wisconsin, USA, 1965,
- [3] 李四光,《地质力学》,地质出版社,1972年。
- [4] 潘立宙,关于地应力测量的几个公式的推导及讨论,全国地应力专业会议论文选编,1977年。

- [5] 孙寿成, 郟庐断裂带中南段和茅山断裂带中段土层原应变主轴方位测量, 西北地震学报, 4卷1期, 1982年。

A Method of Determination The Principle Strain Axis of Soil Layer in Situ and Its Experiments and Application

Sun Shou-cheng Zhang Shao-zhi

(Jiangsu Seismological Bureau, Nanjing)

Abstract

This paper offers some approach to determine the principle strain axis of soil layer in situ, describing the basic theory, method, experiment and field application.

As mentioned above, the following conclusions is written in this paper.

1. It is entirely possible to determine the principle strain of soil layer in situ with the method introduced in this paper.
2. The data of determination of the principle strain axis of soil layer in situ are useful for the seismogeology and engineering geology.