

国际地震论文专辑

84 — 5 总 (8)

地壳形变与地震

国家地震局情报资料室

一 九 八 四 年

编 者 的 话

国家地震局情报资料室根据地震科研的需要和广大科研人员及台站工作人员的要求, 由我室主办《国际地震论文专辑》, 拟出八个专辑:

1. 中、日、苏、美地震预报研究计划与现状
2. 地壳形变与地震
3. 第四纪活动断层与地震活动性研究
4. 地震观测技术
5. 地震小区划研究
6. 地应力与地震 (I, II)
7. 地震震级的研究

《国际地震论文专辑》主要反映本学科最新研究现状、进展、动向, 介绍其新理论、新方法和新技术。每个专辑所收集的论文是经过严格挑选, 基本达到内容新、有代表性的要求。在专辑中有综述文章, 扼要地介绍该学科研究概况, 有的专辑附有该学科近年来的主要论文目录, 为地震科研人员提供比较系统完整的参考资料。

本文集为《地壳形变与地震》。该专辑收集的论文, 基本上反映了美、苏、日等国近年来对地壳形变与地震的关系的研究现状, 展示了这一领域今后发展趋向。内容涉及形变观测网的种类和布设方法, 形变观测结果及其分析, 应用连续观测结果进行地震预报的尝试, 形变观测的新技术和新方法, 观测中各种干扰因素的处理等。这个专辑可供从事地震、地球物理、大地测量等方面的研究人员参考, 亦可供大专院校有关专业的师生阅读参考。

本专辑由国家地震局地震研究所情报资料室负责组稿工作。国家地震局情报资料室编辑、出版、发行。

责任编辑 卢振恒 傅木行 李桂莲 王晓平

目 录

日本近年来地壳形变连续观测综述 (编译)	(1)
国外地应变仪发展概况 (编译)	(13)
地震预报: 倾斜异常的判据 (C.P.Buckley等)	(19)
1973—1980年南加州应变积累 (W.H.普雷斯科特)	(28)
加州欧文河谷的形变 (J.C.萨维奇等)	(40)
基辅—阿尔季奥姆索尔剖面台站上倾斜潮汐测量中 地形效应 (V.G.巴兰科)	(46)
地壳上地幔局部不均匀性对地面倾斜固 体潮的影响 (S.M.莫洛琴斯基)	(52)
利用空中三角测量测定地震断层位移 (伊豆大岛地震断层实验) (佐藤裕等)	(56)
不需真空管道移动式激光地壳应 变仪 (大石忠尚等)	(62)
根据倾斜资料看形变效应 (M.K.Курбанов等)	(68)
日本六甲鹤甲断层运动观测室的地壳 运动观测 (大塚成昭等)	(71)
研究安科纳 (意) 地震区地壳形变的重力 网和大地测量网 (P. Baldi等)	(80)
激光测距中的温度订正问题 (木股文昭等)	(86)
论适用于水平摆伸缩仪的电容传感器 的应用 (M.范隆贝克)	(90)
适用于VM水平摆的高分辨可变电容传 感器的研制情况 (M.范隆贝克)	(99)
1944年东南海地震临震前的前兆性 地形变的时间变化 (茂木清夫)	(107)
1964年新潟地震前兆性地壳形变的可靠性 (藤田阳一郎)	(111)
附录: 近期有关地形变与地震方面的主要论文目录	

日本近年来地壳形变连续观测综述

日本地处东亚，位于西太平洋海岸地震带上，且属太平洋、菲律宾及欧亚三大板块的交汇地段，故历来地震活动频繁、地壳形变较剧烈。地形变连续观测，早于 80 年代就被用于地震预报探索的一种前兆手段。

观 测 目 的

- (1) 弥补传统大地测量在观测精度($10^{-5} \sim 10^{-6}$)和复测周期长(一年~几十年)等方面的缺陷，以获得高精度的倾斜、应变连续观测资料；
- (2) 探测几秒~几天周期的地震地形变前兆，为突破短临期地震预报提供判据。
- (3) 观测固体潮、地脉动、倾斜或应变阶跃等现象，为理论地球物理学服务。

观 测 体 系

(1) **横坑(水平坑道)台网**：国家标准形变台 20 多个，各台具三分量应变仪、两分量水管倾斜仪及 1~2 处小型倾斜仪(水平摆、气泡、铅垂摆等)观测室，观测坑道多呈等腰直角三角形，室顶复盖及水平进深均大于 30 米。此外还有 50 余处小型倾斜仪观测台。这些台站中约有一半是由战时防空壕、废旧矿井、铁路隧道及引水涵洞改建而成。

(2) **竖井观测台网**：鉴于横坑方式所存在的问题(平原地区无洞可挖，场地大多受限制；仪器置于水平基岩上，自由表面大，而难于反映大面积形变场的变化；占地面积大、造价高、工期长；易受降雨、坑道渗水等因素的干扰)，防灾中心自 1970 年起着手研制钻孔倾斜仪，大有以竖井取代横坑之势。目前该仪器已取得长足进步，并在关东、东海地区密集布井约 20 处，其中 3000 米级深井观测点有岩槻、下总、府中等三处。

(3) **体积应变仪观测网**：以往的应变观测均属线应变或面积应变观测，近几年日本引进并发展了体应变观测技术，制成了适用的体应变仪。并在关东、东海地区广泛布井，实施监测，目前已有十余口观测井，业已测悉震前的应变阶跃、长周期应变波动等前兆信息，结果令人振奋。

(4) **辅助观测系统**：随着连续观测仪器的不断完善，观测精度不断提高，从而对辅助观测的种类及精度也提出了更高的要求。例如分辨率为 0.001°C 的石英或双金属片自记温度计、 0.01 mb 分度的空盒气压计、压力传感水位自记仪、坑道渗水自记仪等普遍用于台站，在排除外界干扰，判定异常起着重要作用。有的辅助观测，例如深井地温、坑道渗水量观测也作为前兆观测手段而直接起到监测预报作用。仪器安装前还进行坑道弹性波速分布、岩性物理参数等探测研究。

(5) 观测方式多样化: 许多学者致力于新型仪器、新项目的探索性观测, 其观测方式力求多样化。例如开创铅垂分量及倾斜分量的应变观测、旋转应变观测、倒摆倾斜观测、海底倾斜仪的研制试测等。此外, 长条型仪器的跨距采用长短结合, 短至 3 米, 长达几公里 (水管仪), 以便进行对比。

观 测 精 度

随着电子探测技术的飞速发展 (差动变压器、磁性传感器、电容传感器、陶瓷传感器的问世与普及) 和精密自动标定、激光鉴定技术的应用, 目前地形变连续观测的精度已达 $10^{-12} \sim 10^{-11}$ /分、 $10^{-10} \sim 10^{-9}$ /日、 $10^{-8} \sim 10^{-7}$ /年; 仪器自身的电器噪声水平已低于 10^{-13} , 分辨能力也迅速提高。例如具世界水平的松代地震观测所拥有跨距达 100 米的石英管伸缩仪, 分辨率高达 2×10^{-11} ; 还有 105 米跨距的水管倾斜仪, TM-1B 型气泡倾斜仪, 分辨率均达 4.8×10^{-11} ; 钻孔应变仪分辨率为 10^{-10} 。这些高灵敏度仪器足可精确探测 1% 固体潮幅的微小倾斜与应变。

典型观测例及重大发现

(1) 近畿中部台网的连续观测

近畿中部地区连续观测台网包括大浦 (代号 O)、顿鹤峰 (D)、天濑 (A)、岩仓 (I) 等四个台, 依次由 SW 向 NE 方向展布, 相邻两台的台距约 20~60 公里, 由旧防空洞 (O、D 台), 导水涵洞 (A 台), 废石灰矿 (I 台) 改建而成, 于 1960 年起先后投入观测。仪器格值为 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ /毫米 (伸缩仪) 与 $0.01 \sim 0.05^{11}$ /毫米 (倾斜仪)。

各台投入观测的仪器为数不少, 例如 A、D 二台, 其伸缩仪数均多达 11 套, 倾斜仪分别为 5 套和 10 套。点位如图 1 所示。

各台倾斜、应变资料均用同一方法处理, 取每天 0h 值代表当天的观测值, 再求月均值并分别去掉降雨影响与年变部分 (13 个月滑动平均) 而得长期变化值。另外, 标出该地区每月所发生的地震的能量和, 取其累积值 $\Sigma 1/\bar{E}$, 与各台长期变化值进行对比分析得知, 观测点附近地震活动能量增大之前, 地壳运动似乎有所加剧。

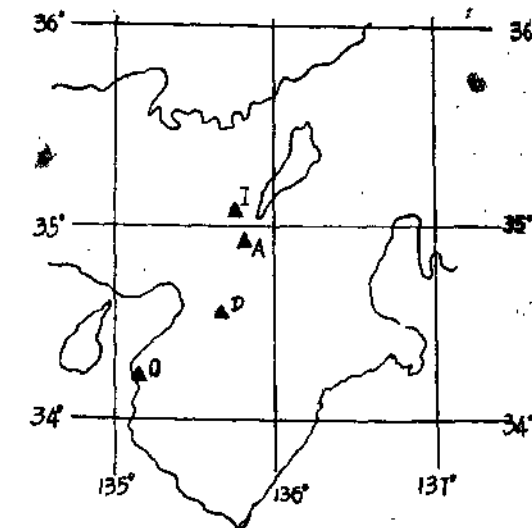


图 1 近畿中部地壳运动连续观测台网位置及各观测坑道平面图 O: 大浦; D: 顿鹤峰; A: 天濑; I: 岩仓

为查明区域应力场对整个台网的构造力的作用效应, 由各台正交两分量应变值求出面积应变 (胀缩), 并去掉各台固有的零漂值, 如图 2 所示。可发现各台曲线运动的形态发生了变化。大浦从 1973 年、

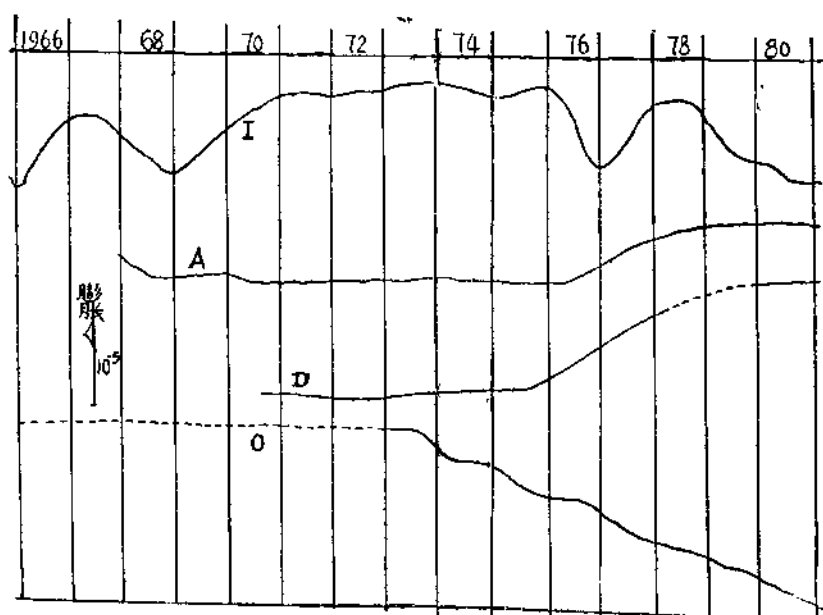


图2 四测点去掉零漂后的面积应变（膨胀、收缩）变化

屯鹤峰自1975、天濞自1976年、岩仑自1976~1977年起相继出现异常变化。认为这是地壳运动迁移性现象的又一例证，其迁移方向大体呈SW—NE，迁移视速度为30公里/年。这与1960年油壑、锯山水管仪观测所发现的形变迁移现象及尔后东北地区台网所记录到的形变峰，迁移方向大体相同，其速度（20~40公里/年）相当。尽管对形变峰的迁移现象目前还难于找到地学上的合理解释，但它毕竟是一重大发现，将推动地壳形变观测研究工作向纵深方向迅速发展。

（2）逢坂山潮汐应变观测中的地形效应

逢坂山地壳运动观测所位于东经 $135^{\circ}51.5'$ ，北纬 $34^{\circ}59.6'$ ，由原东海铁道逢坂山隧道改建而成，台址距海65公里远，海拔高160米，隧道全长近700米，观测室离洞口130米远，室顶复盖厚40~100米，室温年变、日变幅度分别小于 0.3°C 和 0.01°C ，观测条件较好，坑道及仪器布设情况如图3所示，其中伸缩仪各参数列于表I。

表I 逢坂山观测所应变观测参数

分 量	方 位	长 度	灵 敏 度	备 注	
E_1	$N52^{\circ}W$	21 m	$81.2 \times 10^{-8}/V$	超股钢棒 · 熔融石英管 超股钢棒 ·	水平摆放 大，影像传 感器电记录 差动变压器 传感，B、C 各放一个传 感器
E_2	$N7^{\circ}W$	28 m	$2.4 \times 10^{-8}/V$		
E_3	$N38^{\circ}E$	50 m	$1.1 \times 10^{-8}/V$		
$E_{4..}$	$N38^{\circ}E$	19 m	$5.3 \times 10^{-2}/mv$		
$E_{4..}$	$N38^{\circ}E$	10 m	$5.0 \times 10^{-2}/mv$		

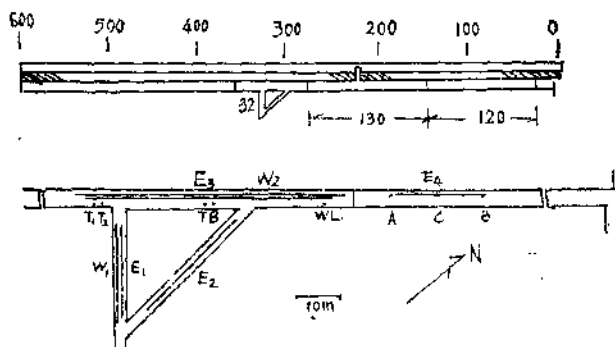


图3 坑道及观测室、仪器布设示意图
E: 伸缩仪; W: 水管仪; T₁、T₂: 水平摆倾斜仪; WL: 井孔; T: 湿度计; B: 气压计

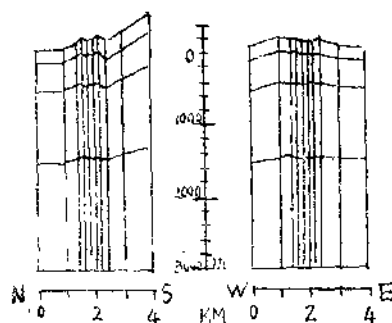


图4 三维有限单元法划分地块的竖直剖面图

A、观测数据处理

取1979年11月21日~1980年4月14日期间伸缩仪观测资料,用 Pertzev 滤波法去掉长期成分后,用最小二乘法解出 M_2 、 O_1 等10个主要分潮(计算时段长696h),并用 nortal 参数订正各分潮的振幅和相位,其结果称为实测振幅 H_0 和实测相位 φ_0 。

B、潮汐应变的理论计算

Homogeneous 潮汐应变包括固体潮汐和海潮负荷影响,计算固体潮汐时勒夫数取 $h = 4114$, 志田常数 $L = 0.0832$ 。海潮负荷影响的计算: 将台址附近的海域由近及远划分为 $3' \times 2'$ 至 $10' \times 10'$ 的大小不等的许多小块,设各小块内的潮汐振幅和相位处处一致,求其海潮负荷对观测点的影响,各小块海域影响之和便是海洋对该测点的总影响。

C、地形效应订正项

逢坂山观测所地表山峦起伏,地形较复杂,影响潮汐应变理论值,故应加上地形效应订正项。

地形效应的计算采用三维有限单元法, Harrison 地形订正模型 I 进行。即以观测点为中心,取 4 公里 $\times$ 4 公里的正方形区域(其边平行或垂直于经线)以下,海平面下边 8 公里深处以上的地块,并将该地块划分为 10 行 10 列 4 层共 400 个大小不等的小单元,越靠近观测点的单元越小,最小的单元为 $150 \times 150 \times 200$ 米³。

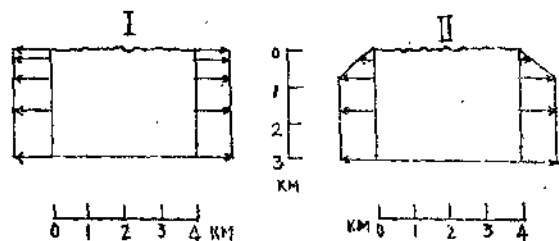


图5 (左): HARRISON 地形订正模型 I (未考虑地表的非均匀性) 右: 修正后的地形订正模型 II (下部力耦与 I 相同,上部渐减)

参数: $V_p = 5.5$ 公里/秒; $\sigma = 0.24$;
 $\rho =$ 克/厘米³;

因观测点离海洋较近,故其地壳内区域水平应变 E_{xx} 、 E_{yy} 、 E_{xy} 取决于海潮,可用潮汐应变代替之。设观测点的应变为 S_{xx} 、 S_{yy} 、 S_{xy} ,则联系二者的耦合应变矩阵为

$$[S] = [T][E]$$

由模型 I 中地块各侧面所受作用力,可算得 $[T]$ 的各元素,代入上式解出 S_{yy} 、 S_{xx} 、 S_{xy} ,进而可算出表 II 实测应变与理论值的对比各分量各分潮经地形订正后的理论潮汐应变的振幅 H_c 和相位 φ_c 。

表 II 实测应变与理论值的对比

分 量	分 潮	模 型 I		型 模 II	
		H_0/H_c	$\varphi_0 - \varphi_c$	H_0/H_c	$\varphi_0 - \varphi_c$
E_1	M_2	0.72	-9.3°	1.10	-9.1°
	O_1	0.57	-1.4	0.86	-2.5
E_2	M_2	0.67	-5.4	1.10	-5.3
	O_1	0.70	1.2	1.04	0.7
E_3	M_2	0.49	2.3	0.75	2.1
	O_1	0.54	3.2	0.83	5.7
$E_{4..B}$	M_2	0.54	3.1	0.83	2.9
	O_1	0.72	-1.0	1.11	1.5
$E_{4..c}$	M_2	0.55	2.2	0.84	2.3
	O_1	0.53	2.2	1.27	4.8

H_0 : 实测振幅, φ_0 实测相位滞后。

H_c : 理论振幅, φ_c 理论相位滞后。

D、实测潮汐应变与理论值之比较

表 II 列出实测潮汐应变与经地形效应订正后的理论潮汐应变的振幅比及相位差。对相模型 I 而言,实测值与理论值的相位较一致,仅 E_1 分量的 M_2 分潮差略大;但振幅比则差甚大,实测值仅为理论值的 0.5~0.7 (M_2 分潮)和 0.5~0.8 (O_1 分潮),尤其是 $N38^\circ E$ 方位的 E_2 、 $E_{4..B}$ 和 $E_{4..c}$ 的 M_2 分潮的振幅比较小。原因可能有四:仪器问题;潮汐模型的缺陷;观测坑道的空腔效应和基岩破碎、局部地质构造、地下水系的影响(简称“局部影响”)。今试析如下:该测点各分量伸缩仪中间支撑均采用悬线吊挂方式,比滚轴支撑方式先进,近于无摩擦的理想支撑,故此实测振幅不可能小至理论值的 0.8 以下;关于海潮模型,尽管远洋数据不甚准,但人们对左右逢坂山观测点的日本海岸沿线的海潮早已熟知,认为海潮负荷项不致有明显的出入;至于空腔效应,因该所

各分量伸缩仪分别与其坑道走向一致，且仪器两端离坑道端点之距远大于坑道直径，几乎不受坑道空腔效应的影响。看来，原因只能归结到“局部地质构造影响”这方面。

E、顾及“局部地质构造影响”的地形效应模型Ⅱ

据报导：逢坂山所在的琵琶湖地区的地壳表层的 $V_p < 5.5$ 公里/秒。对于上层地壳弹性常数减小的地区，若仍用模型Ⅰ（上层下层地块侧面受力均匀）则观测点的理论值将明显增加。因此，必须采用修正后的模型Ⅱ（如图5右所示）：地块下部侧面受力与模型Ⅰ相同，而距地表约600米以上的地块侧面受力递减，在地表受力为0。按模型Ⅱ重新计算，所得理论值与实测值的对比情况如表Ⅱ所列。可知两者振幅比大为改善，大体上近于1。图6表示 E_1 和 E_2 分量的实测潮汐应变值（虚线）、固体潮（B）、海潮影响（L）、地形效应（ T_1 或 T_2 ）。可见实测值与理论值（原点至 T_1 或 T_2 的终点的连线）之间的偏差。显然，用 T_2 之值更为妥当，即地形效应模型Ⅱ较适合逢坂山测点的情况。

（3）油壶观测所的海潮负荷倾斜及海湾振荡影响

油壶观测所位于本州东海岸的一个半岛上，东临油壶湾，南靠诸矶弯，西对相模湾，北接小网代湾，且离海仅20米远，堪称典型近海台站。正因其离海近在咫尺，该所早在20年代就已开始了海潮负荷倾斜观测。

a、观测概况

1979年9月在同一坑道内将观测点增多到四处（图7所示），用TEM电磁倾斜仪观测，其中③④两处仪器直接放于用薄层沙浆抹平的原生基岩坑上。用打点记录器记录，数字显示机读数（精确至0.1毫米），并用滤波器去掉零漂。为直接获得台站近处海潮资料，特制了两台压力传感验潮计（量程0~0.5公斤/厘米²，误差1%），置于台站正前方油壶湾内200米远处海底。

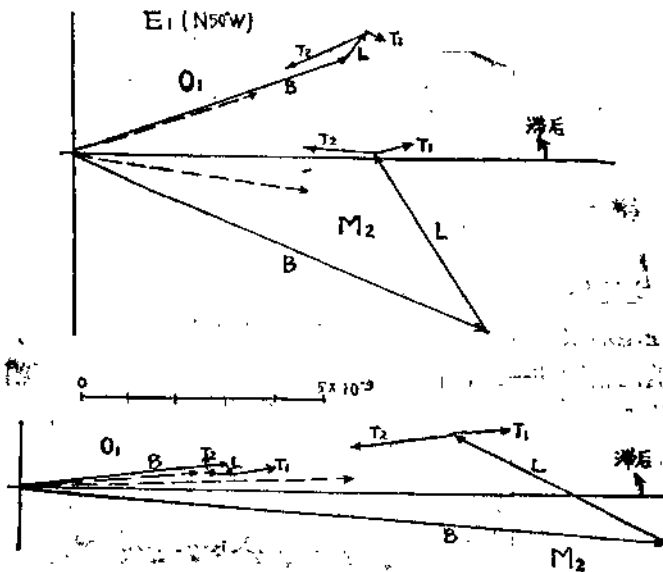


图6 实测潮汐应变与地形改正后的理论值的对比（虚线：实测值；B：固体潮；L：海潮影响； T_1 ：按模型Ⅰ计算的地形效应； T_2 ：按模型Ⅱ计算的地形效应）

b、海潮负荷倾斜

分别解算倾斜观测值与海潮值、固体潮理论值的 O_1 、 K_1 、 Q_1 、 M_1 、 J_1 、 M_2 、

S_2 、 N_2 、 L_2 、 $2N_2$ 共十个分潮，并将解算的起始时刻统一到1981年1月1日0h。整个误差对于 M_2 、 K_1 分潮而言，振幅误差为2~3%，相位差 1° 左右，对振幅较小的其它分潮而言，误差还大一些。

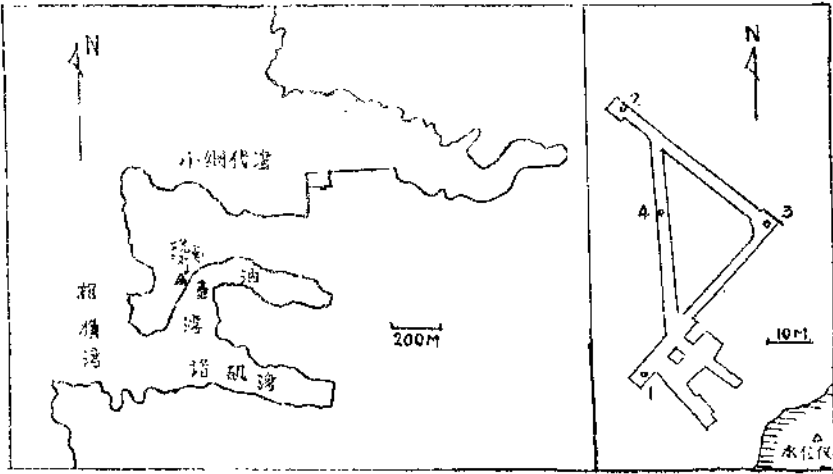


图7 油壶观测所地理位置

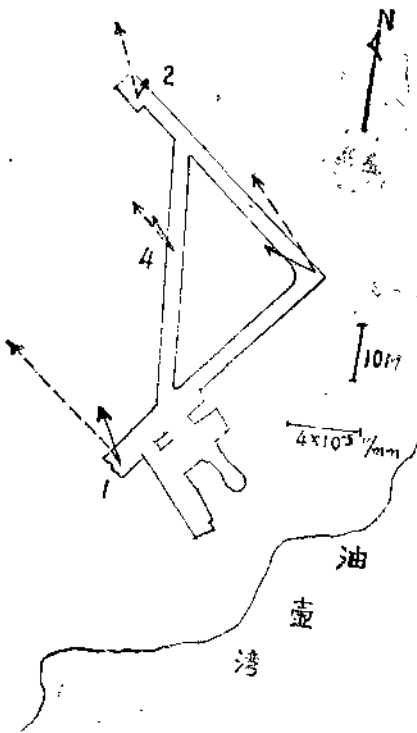


图8 海潮负荷倾斜 M_2 分潮（实线）与海湾振荡倾斜 M_2 分潮（虚线）之对比

水位升高，则地基向东南倾斜，这与台址紧邻的油壶湾水体作用重心正好在东南方，相符合；但与固体潮理论值的相位几乎差 180° 。各分潮的振幅均随测点离海之距离的增加，而减小，也即按①③④②的次序递减之，最近点①与最远点②的振幅比为3.5:1

一般来说,各分潮的相位在四个测点都较一致,其中仅④测点的半日潮EW分量、③测点的半日潮NS分量出现的偏差稍大,可能与其坑道洞穴效应有关。测点②的倾斜方向与其它三点相比,有些差异,认为这是该点离海最远,相对来说受外海的影响较大之故。图8表示各点海潮负荷倾斜的 M_2 分潮,可直观地对比各点的观测情况。

c、海湾振荡产生的影响

具备一定形态和大小的海湾在气象、外海海流、海啸等外力作用下,湾内水体可能产生一定周期和持续时间的自由振荡,通常把这种现象称作“海湾振荡”(Seiche)。例如,1896年6月15日三陆冲地震时,强大海啸激起油壺湾的振荡,其周期为14.8~15.2分,后来进一步测得7分和3.5分周期的振荡,振幅为10厘米。

近几年加强了油壺强测所的观测与研究,解算出油壺湾海水基本振荡周期为13.5分和15.5分,平均振幅为85毫米,水面升高则观测点地基向ES倾斜,倾斜量EW为 2.53×10^{-8} 秒,NS分量为 9.43×10^{-8} 秒。振荡现象不时发生,尤以冬春季节为最,倾斜量与离海距离之关系可表为

$$T = Ce^{kD} = 11.7E^{0.0035D}$$

式中T为倾斜量,单位 10^{-8} "/毫米;D为离海之距,单位为米。用验潮计所得海湾振荡数据推算倾斜量,其方位角一致,而推算值的振幅为实测值的0.7~0.8。海湾振荡引起的倾斜值的 M_2 分潮附绘于图8上(虚线),以供对比用。

(4) 天濑地壳运动观测室的应变观测

天濑观测室于1967年由原志津川水电厂的引水涵洞(1964年新建成天濑大坝之后无水而被废弃)改建而成。涵洞平直,长达1830米,高、宽各6米,为应变、倾斜及光速测距等仪器提供了良好的对比观测场所。坑道及仪器布设如图9所示。下面简介十多年来该室所获重要成果。

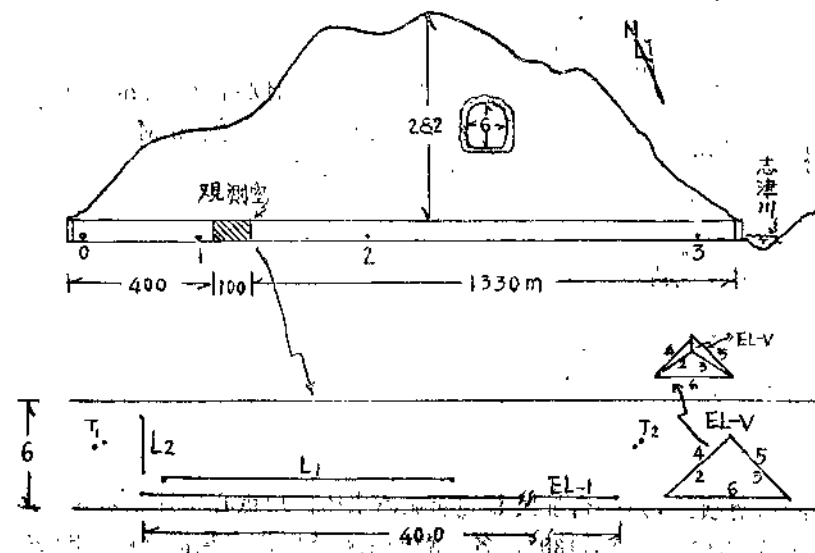


图9 天濑地壳运动观测室坑道及仪器布设示意图

0—1, 0—2, 0—3:

激光测距基线;

T_1 、 T_2 : 倾斜仪;

EL—V: 铅垂分量伸缩仪

a、洞穴效应对应变潮汐观测的影响

该室应变仪多达11分量，表Ⅲ列出其中有代表性的4分量的有关参数，图10表示观测情况。显然，垂直于坑道轴线的L-2（水平分量）、EL-V（铅垂分量）的应变潮汐振幅比平行于坑道轴线的L-1及EL-1分量大得多，前者为后者的3~4倍。

表Ⅲ：应变观测有关参数

分 量	方 位	跨距(米)	灵 敏 度	基 线 尺
L-1	N72.5° W	15.8	1.0×10^{-9}	激 光 束
L-2	N17.5° E	3.2	5.0×10^{-9}	“
EL-1	N72.5° W	40.0	0.25×10^{-9}	超 殷 钢 棒
EL-V	竖 直	5.6	1.5×10^{-9}	“

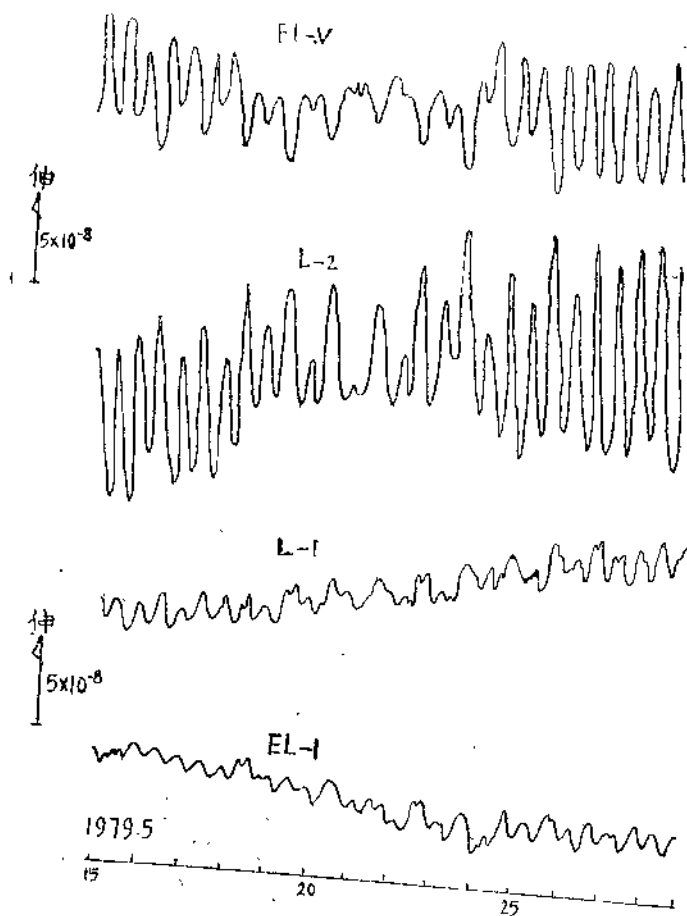


图10 平行与垂直于坑道轴线的应变潮幅对比图
L-1、EL-1 平行于轴线；L-2、EL-V 垂直于轴线

利用弹性体内空腔周围的应变理论，按三维直角坐标系（z轴铅直向上，x与y轴分别垂直和平行于空腔轴线）解得：

$$e'_x = A e_x + 2\nu e_y \quad e'_y = e_y \quad e'_z = B(e_x + \nu e_y) - \nu e_y$$

式中 e_x 、 e_y 为无空腔影响时的应变分量； e'_x 、 e'_y 、 e'_z 为有空腔影响时的应变分量；A和B为表征空腔效应的两个参数； $\nu = 0.25$ 为泊松比。对切面为圆形坑道来说， $A/B = -3.0$ 。而对于本台切面为马蹄形的坑道而言，只能借助于有限单元法解之，得 $A = 2.44$ ， $B = -0.92$ 其比值 $A/B = -2.65$ 。这与实测值非常吻合。解算中须注意，铅垂分量EL-V的“有效基线长”应从深入洞壁的基墩底部算起，而不从仪器墩顶面算起，即尺长以深入毛洞一成为宜，否则会出现一些偏差。

b、台风侵袭产生的应变变化

图11反映1979年9月30日与10月19日两次台风袭击时，坑内气压陡降、L-2巨伸、EL-V突缩的异常状况，而平行于坑道的L-1、EL-1分量却几乎无异变。将气压差对抗道的作用作为半无限弹性体表面的负荷变化，解得L-1的理论应变值为 1.9×10^{-8}

这与其实测值相近；但L-2，的实测值 3.6×10^{-7} 却比其理论值大一个数量级；铅垂分量EL-V的实测值 -1.8×10^{-7} 比理论值 3.8×10^{-8} 大得多，并且符号相反。经空腔效应订正后，垂直于坑道的L-2、EL-V的实测值比理论值大得更多。

究其原因台风临来时雨量约40毫米，并不比平常大，故降雨干扰不是主因；400米外的库水位变化与应变观测有关，但若仅考虑水体荷重产生的弹性形变，其量级不超过 10^{-8} ，故负荷变化亦非主因，而应另寻他因。

C、水库水位变化对应变观测的影响
影响天赖水库水位变化与应变观测密切相关（如图12所示）。水位上升到垂直于坑道的水平分量L-2大幅度缩短，而铅垂分量EL-V则伸长，两者绝对值之比为2:1，平行于坑道轴线的分量几乎无变化。观测坑道原为引水涵洞，四十年前开凿之时发现裂隙渗水较普遍，说明岩层裂隙较发育，现大坝库水位平均高出坑道10米，水位变化势必左右观测室周围的

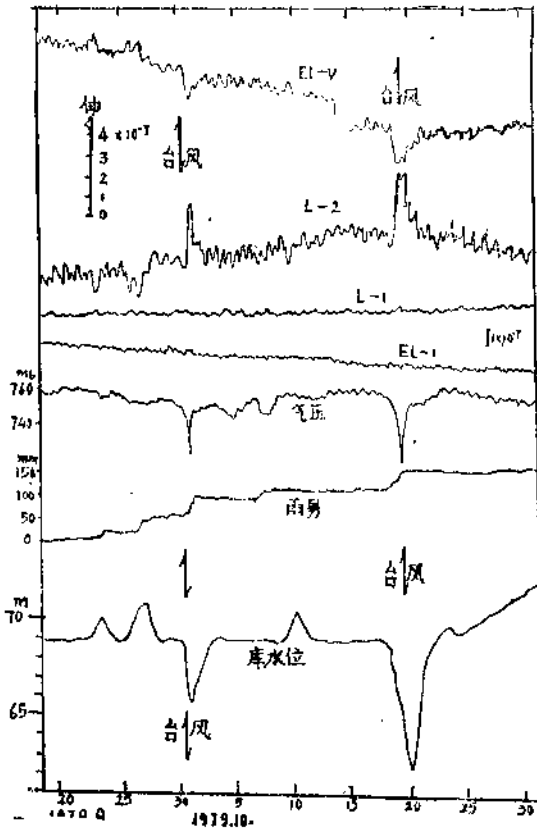


图11 两次台风侵袭对应变观测的影响

地下水位。用一简单的裂隙发育层内的“非固定渗流变化模型”能很完美地模拟和解释应变观测状况。实测 L-2（垂直于抗道轴线）分量的应变 $\epsilon_{xx} \approx 2 \times 10^{-7}$ ，顾及前述的空腔放大率 2.44 倍，算得应力 $\sigma_{xx} = E\epsilon_{xx}/2.44$ 倍 $3.7 \times 10^3 \text{ (N/m}^2\text{)}$ ，相应的地下水位变化为 37 厘米，该模型还很好地解释了 1979 年 4 月~7 月 L-2 分量缩短 2×10^{-6} 及 EL-V 分量伸长 1×10^{-6} 之巨的大幅度变化事件。

d、与洞内光速测距结果的对比

光速测距历来均在地表进行，属于大面积应变观测项目。由于定点短距连续应变观测与长距间断应变观测之间，在量级甚至正负号方面不一致的事例多有发生，这已成为地形变理论研究的重要课题。为同室（抗道）对比十米级与千米级的两类应变仪的观测结果，于 1970 年起设置 400~1700 米的长短共三个尺段光速测距基线（如图 9 所示）。开始阶段仪器置于三脚架上，1976 年以后将仪器固定于基墩上。反射镜固定在基点上，并使各镜站高低起落而达到光路畅通。洞温年变幅度小于 0.1°C ，其各点分布依次为

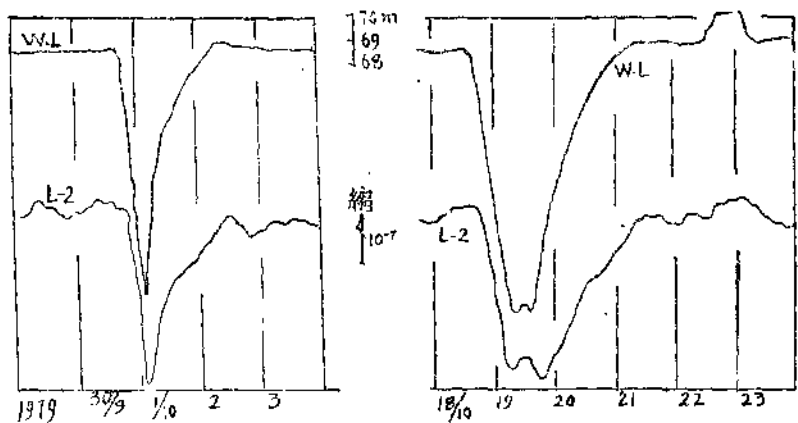


图12 水库水位（W、L）与应变记录的关系

15.5°C 、 17.2°C 、 16.3°C ，与室顶复盖厚度成比例，温度影响小于 1 毫米，可以借鉴定仪器。光速测距成果与 EL-1 分量成果比较，九年期间伸缩方向一致，应变量级相同，但连续观测仪器的精度高一个数量级，如表 IV 所列及图 13 所示。

表 IV ：光速测距仪与伸缩仪同洞对比观测结果

仪 器	尺段或分量	基线长 m	年 应 变 率 $\times 10^{-6}$	± 号	年观测精度 $\times 10^{-6}$
激 光 测 距 仪	3—0	1715	1.62	—	± 0.20
	2—0	827	1.49	—	± 0.45
	1—0	390	2.58	—	± 0.92
伸 缩 仪	EL—1	40	1.86	—	± 0.03

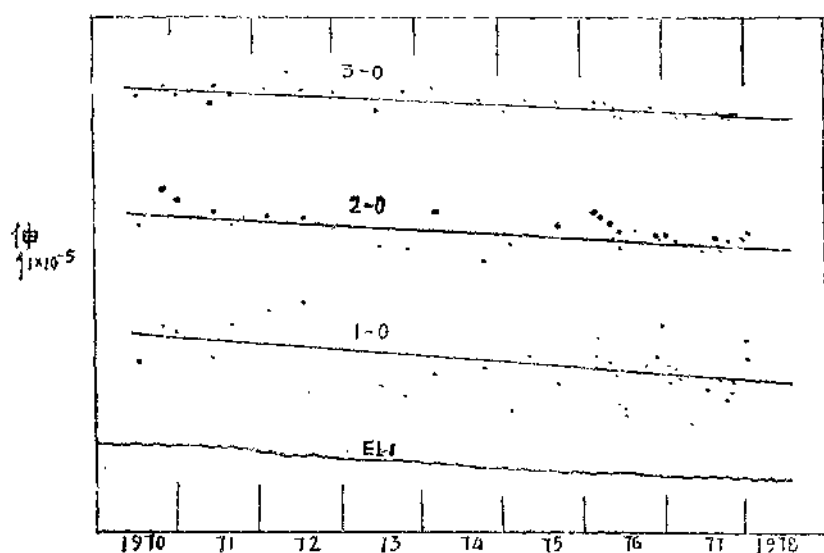


图13 同一洞室光速测距与连续观测成果的比较
(黑点为激光测距实测值，直线为其变化趋势)

通过上述四例，可大体了解日本地壳运动连续观测及研究工作的概况，与近几年达到的水平、涉及的领域。其中有不少值得我国从事这项工作的同行借鉴。

(罗荣祥 编译)

国外地应变仪发展概况

一、前言

地应变仪是连续测量地壳应变状态的仪器，它所得到的资料在地学的许多方面都有重要意义。地应变的连续测量为地球弹性研究提供了重要数据，潮汐应变资料是固体潮研究的一个重要部分，而地震应变观测则为地震预报提供了一个重要手段。

一台地应变仪通常由三部分组成：长度基准、换能器和记录器。每一部分都包括一些不同的型式。如按长度基准分类，有：（1）线应变仪（包括棒型、丝型、激光型等）；（2）其它应变仪（包括体应变仪、面应变仪、剪应变仪等）。线应变仪是将一基准长度与固定在地球表面上的两个参考点间的距离进行比较以检测地壳线应变的仪器。而其它应变仪测量的是其它量值，如体应变、面应变、剪应变等，其中后两类较少。如按换能器检测方法分类，大致包括：1 机械法（滚子、杠杆、滑轮、弓弦、水平摆、双丝等）；（2）光学法（利用光杠杆进行照相或读数，利用光干涉等）；（3）光电法（利用光敏元件和象传感器进行光电转换等）；（4）电测法（可变电容、超声波、差动变压器、磁传感器等）。如按记录方法分类，有目视和可见两种。由上述三项分类中各种因素的组合，有许多种可能的选择，加上材料和基线长度等的不同，所以在实际中使用的是五花八门的应变仪。

在定点地壳形变仪器中，国外对地应变仪的研制一直是比较重视的，各类地应变仪都得到了很大发展，仪器的灵敏度一般都在潮汐灵敏度（ 10^{-8} ）以上， 10^{-10} 以上的仪器也不时有报导。投入观测的仪器数量也较多。

下面按长度基准不同分别介绍线应变仪中的棒型、丝型、激光型仪器及体应变仪的研制发展概况。

二、棒型应变仪

棒型仪器是发展最早的一种应变仪。1898年米尔恩在日本人首次试验的仪器灵敏度仅为 6×10^{-3} 毫米；其后1900年意大利人把仪器灵敏度提高到 8×10^{-7} 毫米。但他们应用的仪器都十分粗糙，并都设在地表。正确表达地球物理技术设想的应变测量是1935年在加利福尼亚工作的美国地震学家H. Benioff开始的。他应用了一根25米长的钢制长度基准，并放置在热稳定的地下。

目前使用的棒型仪器，其长度基准一般为两种，一种是熔石英管，一种是殷钢或超殷钢棒。熔石英管的优点是线膨胀系数小（约为 0.5×10^{-6} ），这样，基准长度受温度影响就小一些。但石英管相互连接有一些困难，这往往是仪器产生误差大的一个来源。殷钢线膨胀系数高一些（约为 1.5×10^{-6} ），但易于加工和连接。棒型仪器的换能方式和记录方式不外乎前面所述的一些类型。长度基准棒的中间支承有液体、滚子、悬丝、倒摆、盘簧等。

棒型仪器是日本许多地形变台的常规观测仪器。美、苏等国也有一些观测站装置了

这类仪器。为监视断层水平运动，美国在圣安德烈斯断层安装了很多棒型蠕变仪。

下面介绍日本的一种采用激光干涉仪换能的超股钢应变仪（图1）：

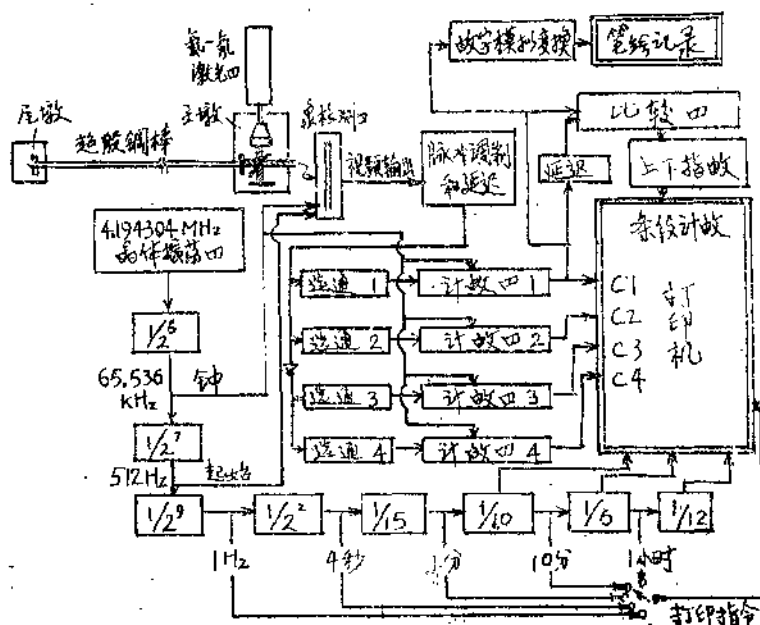


图1 超股钢棒型应变仪

该仪器长度基准材料为超股钢棒，总长40米的基线由每根长度为1.5~2米、直径为1厘米的超股钢棒从螺纹互相连接而成。有33个中间支承墩，在各中间墩面的玻璃板上安置一直径为2厘米的黄铜管作为长度基准棒的中间支承滚子。固定端固联在尾墩上，自由端能相对主墩位移。当基线方向上地壳产生伸缩时，主、尾墩间距产生变化，但超股钢棒长度不变。自由端相对主墩的位移采用激光干涉仪来检测：在棒的自由端贴一块全反射镜，在主墩适当位置放置一块与其相垂直的全反射镜及一块分光镜，采用 $\lambda = 0.6328$ 微米的氦-氖激光器作光源，这样就组成了一台迈克尔逊干涉仪。干涉条纹采用64个光电二极管组成的象探测器，进行光电转换，条纹被细分到1/30，即检测极限为0.01微米。仪器的分辨率为 2.5×10^{-10} 。

此干涉仪中干涉光的光程很短，所以不必象长光程干涉那样，为了消除温度改变所引起的折射率变化，而装置复杂昂贵的真空光路管道，激光也无须稳频。安装在日本天濑地壳变动观测台的这种仪器得到了较好的地潮记录。

三、丝型应变仪

长度基准为一根丝的丝型应变仪是由大地测量中进行基线测量的股钢基线尺演变而来的。最早的丝型仪器是日本人佐佐宪三、小泽泉夫等人于1950年研制的丝的两端固紧在两个墩子上，丝中点挂一重物，由丝的下垂度的变化来测量地应变。这种装置结构简