

# 上海地区构造应力场的光弹实验研究

颜玉定

何正檀

(广东省地省局)

(上海市地震局)

**提要** 由光弹模拟实验所得的上海地区的构造应力场反映出, 该区潜在着七个地震相对危险点, 两条易发展的断裂和两个地震相对危险区。另外, 本文从应力场和应变能的角度, 分析了存在于该区的四组不同走向的断裂的活动性。

**关键词:** 地震危险区, 应力场, 光弹性

上海地区位于长江三角洲, 松散层(N+Q)分布广而厚, 其下基岩断裂的展布方向, 延伸趋势主要通过重、磁资料解释获知。为了对上海地区的地震基本烈度进行复核, 查明交汇于市区附近的几条规模较大的基岩断裂的活动性及其应力分布状况, 先后采用了包括浅层人工地震法在内的多种探测手段, 同时还进行了光弹模拟实验。结果表明, 光弹实验的结论与地震地质以及地震活动性分析的结论十分接近。可见, 前者同样可作为圈定上海近场地震危险区的依据之一。

## 一、实验原理和方法

地壳岩体内总是作用着围压, 如按静水压力考虑, 则其大小为

$$\sigma_0 = \gamma r \quad (1)$$

式中 $\sigma_0$ —围压,  $\gamma$ —岩体深度,  $r$ —岩石容重。

此外, 岩体内还作用着其它一些外场力, 如构造应力。设主应力 $\sigma'_1$ ,  $\sigma'_2$ ,  $\sigma'_3$ 为只由外场力引起的岩体的应力状态, 并假定岩体为弹性体, 则表征岩体总应力状态的主应力 $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ 为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma'_1 + \sigma_0 \\ \sigma_2 &= \sigma'_2 + \sigma_0 \\ \sigma_3 &= \sigma'_3 + \sigma_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

如外场力引起的是平面应力问题, 则

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma'_1 + \sigma_0 \\ \sigma_2 &= \sigma'_2 + \sigma_0 \\ \sigma_3 &= \sigma_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

最大剪应力 $\tau_{\max}$ 为

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_2) \\ &= \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_2 + \sigma_3) \\ &= \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)\end{aligned}\quad (4)$$

上式表明 $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma'_1 - \sigma'_2$ ，说明对于 $\tau_{\max}$ 而言，有无围压的结果是一样的。

光弹实验是应用透明模型的应力——光性原理，直接获得等色线（ $\tau_{\max}$ 等值线）图和主应力方向图，再运用光弹性理论的有关公式，求得模型内任意点的所有应力，然后根据相似原理将这些应力换算成实物内的实际应力。

因围压的存在与否并不改变主应力方向，也不影响 $\tau_{\max}$ 的值，因此可对实验作出简化，即模型加载时不加围压，仅加外场力，而在最后的结果中叠加上围压。

本实验以上述原理对模型加载，即在远离研究区的边界上加一对 $N80^\circ E$  的 匀布压力（见图 1）

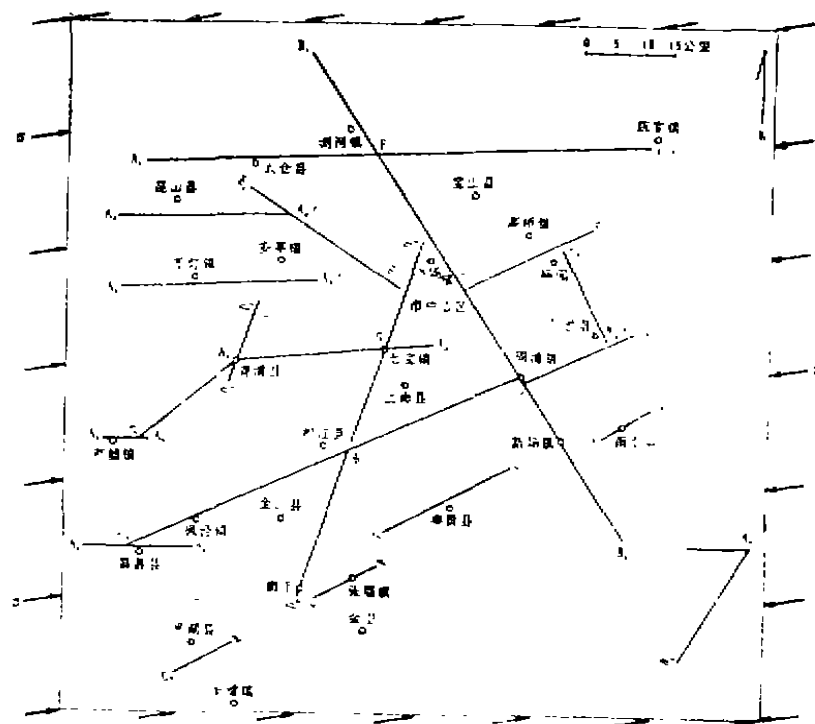


图 1 研究区范围、断裂带及外场力。

Fig. 1 Scope of the study region, the zone of faults and external field stress.

• 压力方向主要按震源机制解与资料求得。

## 三、实验概况

(1) 研究区范围: 以上海市区为中心, 东西、南北各长约117公里的正方形地块, 如图1所示。

(2) 断裂带: 主要有四组, 即①近EW走向的青浦——七宝断裂等, ②NW向的周浦——大场断裂等, ③NNE向的廊下——大场断裂等, ④NE向的松江断裂等(图1)。为方便叙述, 特将断裂端点, 交汇点等特征点标以字符, 下文中各断裂名称等也将以字符代替。

(3) 外场力: 作用于本研究区的外场力, 是一组方向为 $N80^{\circ}E$ 的均匀布压力, 已如上述。

(4) 模型: 除断裂宽度外, 研究区的其它几何尺寸均按统一比例缩小, 由环氧树脂制成平面模型。考虑到组成断裂的岩石与围岩的物理力学性质的差异, “断裂”材料由强度及弹性模量等均小于环氧树脂的另一种塑料制作。“围岩”与“断裂”之间胶结良好, 无微裂纹或其它孔隙。

## 三、应力场状态及应力分析

由于外场力大小无法确定, 本实验求得的所有应力值都是相对值。应力单位定为1级应力条纹(等色线条纹), 并规定压应力为正, 拉应力为负。为简便起见, 下文中所有应力值均略去单位, 只写数字。

根据实验的最终结果, 本研究区的应力场特征分述如下:

### 1. 最大剪应力 $\tau_{max}$

$\tau_{max}$ 的方向都是 $N55^{\circ}E \pm 3^{\circ}$ 和 $N35^{\circ}W \pm 3^{\circ}$ 。

图2为研究区的等色线图, 即 $\sigma_1 - \sigma_2$ 等值线图。因 $\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)$ , 故此图就是 $\tau_{max}$ 等值线图。由于区内众多断裂的影响, 图象显得斑杂紊乱, 但其应力分布却并不复杂, 主要特点为:

(1) 围岩(无断裂的地方)内的应力较低但较均匀, 一般在0.5—1.0之间。

(2) 沿断裂两侧的应力, 一般都比围岩内的高, 大多等于1.5, 但HG段东侧, HI段西侧±段、B<sub>2</sub>C'段和B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>段应力值较高, 为2.5—3.0。

(3) 高的和较高应力点全在各断裂端点和几处“汇而不交”的部位, 应力值在1.5—4.0之间。最高值为4.0, 有七处, 分别为点E<sub>1</sub>、A<sub>3</sub>'、A<sub>4</sub>'、A<sub>5</sub>'、C<sub>1</sub>'、L和P。断裂交汇点仅三处应力较高, 即①I点西北角, 其值3.0, ②G点东南角, 值3.0, ③A<sub>2</sub>'点西南角, 值2.5。

### 2. 最小主应力 $\sigma_2$

$\sigma_2$ 的方向都是 $N10^{\circ}W \pm 3^{\circ}$ 。

由外场力引起的全区所有点的 $\sigma_2$ 都等于零, 即 $\sigma_2 = 0$ , 由(2)式可得

$$\sigma_2 = \sigma_0$$

(5)

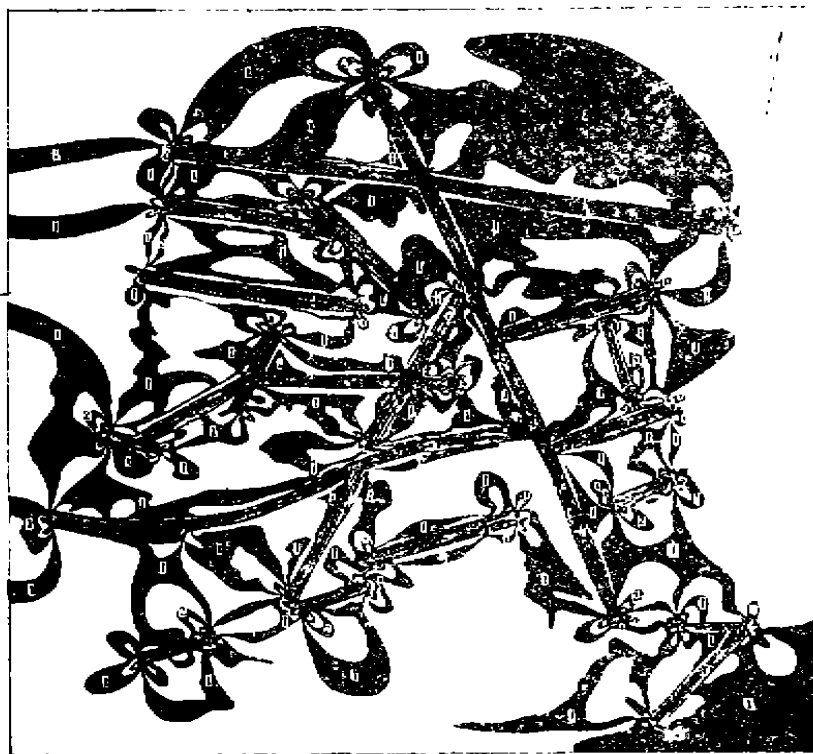


图2 主压应力及最大剪应力等值线  
Fig. 2 Isogram of major pressure stress and maximum shearing stress

① $\tau_{max}$ 的值为条纹级数的 $\frac{1}{2}$ ; ② $\sigma_2$ 的值为条纹级数加围压 $\sigma_0$ 。

即全区的所有最小主应力都等于围压。

### 3. 最大主应力 $\sigma_1$

$\sigma_1$ 的方向都是 $N80^\circ E \pm 3^\circ$ ，与外场力方向一样。

由(4)式可知

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma'_1 - \sigma'_2$$

当 $\sigma'_2 = 0$ 时，上式变为

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma'_1 \quad (6)$$

将(5)式代入(6)式，得

$$\sigma_1 = \sigma'_1 + \sigma_0 \quad (7)$$

因 $\sigma_1 - \sigma_2 > 0$ ，由(6)式可知 $\sigma'_1 > 0$ ，则(7)式中的 $\sigma_1 > 0$ ，可见 $\sigma_1$ 就是本研究区的主压应力。

因  $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_1 - \sigma_0$ , 所以

$$\sigma_1 = (\sigma_1 - \sigma_2) + \sigma_0 \quad (8)$$

由于  $\sigma_1 - \sigma_2$  是等色线条纹值, 而在同一深度的围压  $\sigma_0$  是常数, 所以 (8) 式的  $\sigma_1$  值等于色线条纹值加上一个常数。由此可见, 图 2 不仅是  $\tau_{\max}$  等值线, 亦是主压应力  $\sigma_1$  的等值线, 只是每级条纹所对应的  $\tau_{\max}$  与  $\sigma_1$  的值不同, 1 级条纹对应的  $\sigma_1 = 1 + \sigma_0$ ,  $\tau_{\max} = \frac{1}{2}$ 。

本区主压应力的分布特征、应力集中情况等显然与第 1 点描述的  $\tau_{\max}$  的状况完全一样。

#### 4. 应力集中系数

为使本研究区的主压应力和最大剪应力的应力集中情况更加清楚, 特求出断裂端点、交汇点等特征点的应力集中系数 (图 3)。应力集中系数  $\alpha$  定义为

$$\alpha = \frac{\sigma}{\bar{\sigma}} \quad (9)$$

式中  $\sigma$ —特征点应力值,  $\bar{\sigma}$ —平均应力值, 本实验取围岩内的应力值, 即  $\bar{\sigma} = 0.5$  (条纹级数), (9) 式变为

$$\alpha = 2\sigma \quad (10)$$

图 3 各特征点的数字即为该点的应力集中系数。图中可见, 断裂端点, 汇而不交点、交汇点都是应力集中点, 但各点的集中程度不同,  $\alpha$  在 3—8 之间, 其分布状况与第 1 点第 (3) 小点所述的相一致。

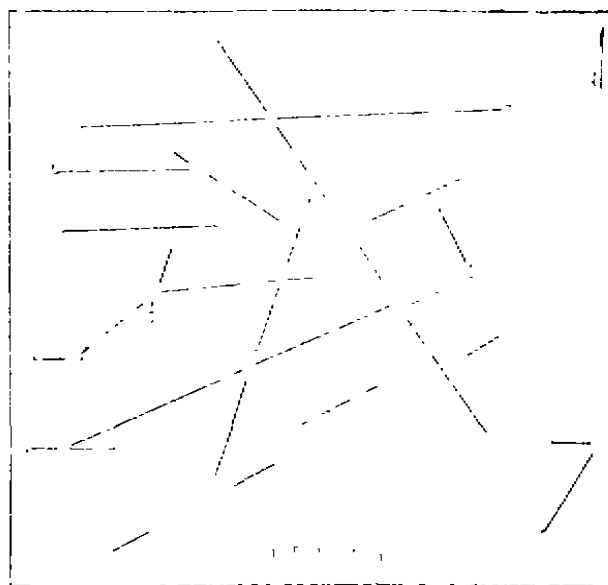


图 3 特征点的应力集中系数

Fig 3. Stress concentrating coefficient at the characteristic spots

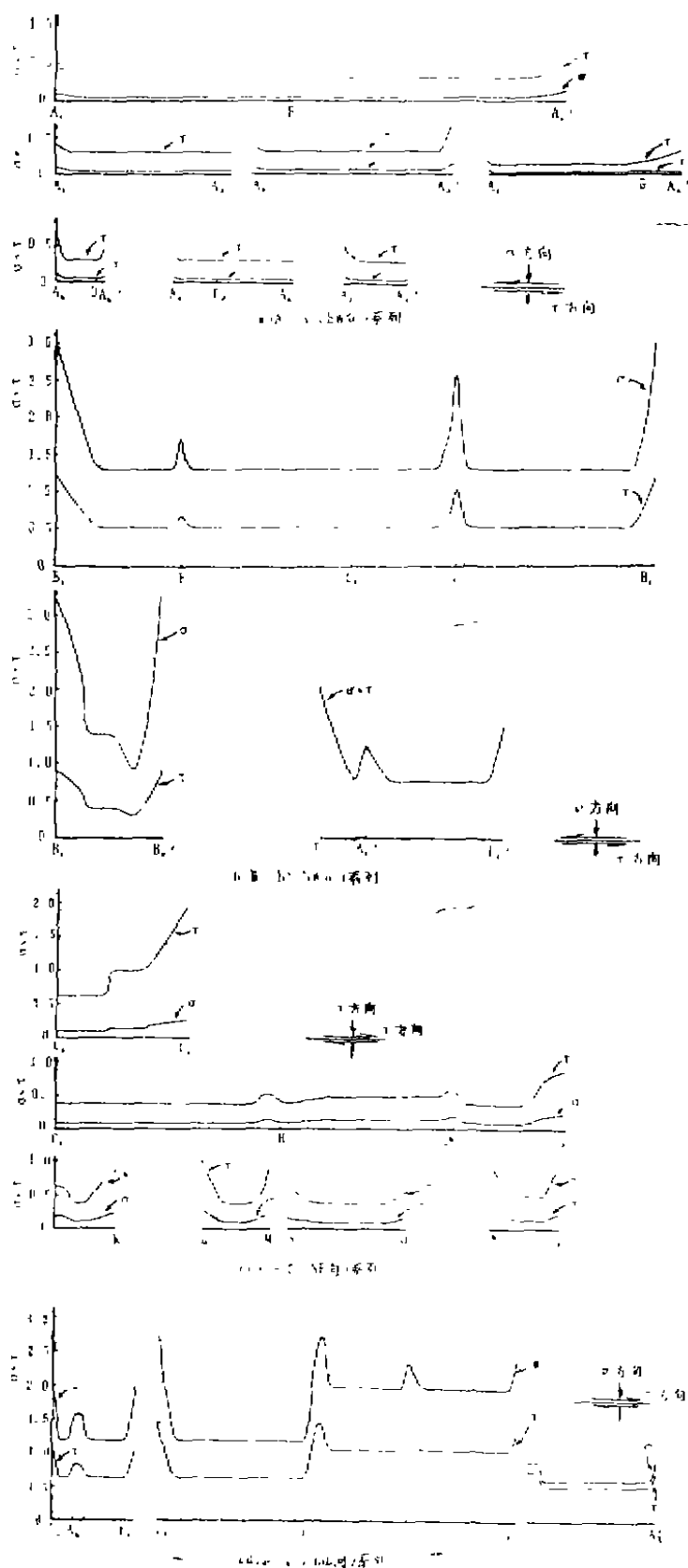
#### 5. 断裂面上的正、剪应力

图 4 为本区各断裂上的正应力  $\sigma$  和剪应力  $\tau$  的分布图。 $\sigma$  全是压应力, 垂直作用于断裂面上;  $\tau$  平行作用于断裂面, 其如方向图中所示,  $\tau$  在图中以绝对值表示。

图 4 中所有的  $\sigma$  均应加上  $\sigma_0$  (围压) 才是正应力的真实值, 为方便作图, 取正应力的相对值, 即将图中的  $\sigma$  作为正应力, 下文所述的正应力均指此应力。

按走向将断裂分为四个系列: ①图 4 (a) 为 EW 向 (A—A') 系列; ②图 4 (b) 为 NW 向 (B—B') 系列; ③图 4 (c) 为 NE 向 (C—C') 系列; ④图 4 (d) 为 NNE 向 (D—D') 系列。各系列断裂上的  $\sigma$ 、 $\tau$  分布状况为:

(1) EW 向 (A—A') 系列的  $\sigma$ 、 $\tau$  都比较小,  $\sigma$  尤其小。除  $A_2'$  (交汇点)



外, 其余各端点的 $\sigma$ 、 $\tau$ 都比非端点上为大, 交汇点F和G的 $\sigma$ 、 $\tau$ 也略大于平均值。本系列各断裂均为压扭性且呈反扭。

(2) NW向(B—B')系列(包括E—E'断裂)的 $\sigma$ 、 $\tau$ 的较大, $\sigma$ 比 $\tau$ 更大, 但E—E'断裂上的 $\sigma$ 、 $\tau$ 大小相等。各断裂端点的值最大, 交汇点次之。本系列各断裂均为压扭性且呈反扭。

(3) NE向(C—C')系列的 $\tau$ 较大而 $\sigma$ 较小。各断裂端点的值最大, 交汇点次之。C<sub>2</sub>点虽是交汇点, 但它的 $\sigma$ 、 $\tau$ 值都较小, 和普通点上的一样。本系列各断裂均为压扭性且呈顺扭。

(4) NNE向(D—D')系列的 $\sigma$ 、 $\tau$ 都较大, $\sigma$ 更大。各端点的值最大, 交汇点次之。本系列各断裂均为压扭性且呈顺扭。

## 四、地震危险区的划分

根据上述实验结果, 对上海地区地震的相对危险点、段、区作下述分析。

### 1. 危险点

(1) 最危险点共七处,

图4 断裂面上的正、剪应力  
Fig. 4 Positive and shear stresses on the fault faces

$\sigma$ 、 $\tau$ 的单位为1级应力条纹

为图 1 的  $E_1$ 、 $A'_3$ 、 $C'_1$ 、 $A'_2$ 、 $A_5$ 、L 和 P 点。这七点的应力集中系数最大，是围岩的 8 倍；主压应力和最大剪应力最集中，最易集聚高应变能。

(2) 次危险点 10 处，为图 1 中的  $B_1$ 、 $B'_1$ 、 $A'_1$ 、 $B_2$ 、 $B'_2$ 、 $C'_2$ 、H、K、 $D'_2$  和 M 点。它们的应力集中系数为 7。主压应力和最大剪应力都较高，也容易集聚高应变能。

## 2. 危险断裂

(1) 最危险的断裂为  $C_1$ — $C'_1$  和  $E_1$ — $E'_1$  两条。 $C_1$ — $C'_1$  上分布的剪应力是全区所有断裂上的剪应力中的最大者之一，而其上的正应力却较小，因此极易发生滑移或破裂； $E_1$ — $E'_1$  上的正、剪应力数值一样，都比较大，也容易发生滑移和破裂。二断裂相比， $C_1$ — $C'_1$  更容易发生破坏，而  $E_1$ — $E'_1$  却能聚集较大的应变能，如发生破坏而引起地震，其震级将是后者大于前者。

(2) 对于四个系列断裂的危险程度，如从容易发生破坏和容易集聚高应变能两种不同的角度考虑，将有不同的结果。

① 从容易发生滑移或破裂的角度出发，NE 向系列的断裂较危险。其上剪应力大，正应力小。它们易破裂，但不易集聚高应变能。

② 从应变能的角度出发，NW 向和 NNE 向两系列的断裂较危险。它们不仅分布着较大的剪应力，还有更大的正应力，可集聚高应变能，一旦滑移、破裂，便将发生较大的地震。从上海地区实际的地震情况来看，这两组断裂应是最危险的。

③ EW 向系列断裂上的正、剪应力都较小，不易发生破坏也不易集聚高应变能。尽管其上的  $\tau$  大于  $\sigma$ ，即使滑移发震，震级将不会太大。

## 3. 危险区

(1) “三角形”  $HID'_2$  内域。主要理由为①内部不仅含全区应力集中系数最高之一的  $A'_4$  点，而且三个角上的集中系数也很大（两个 6，一个 7）；②H 点是“汇而不交”点，由此点沿  $HD'_2$  和 HI 两段断裂内侧，是全区所有沿断裂呈条带状集中的应力中，四条高应力集中系数中的两条，此处  $\sigma = 5$ ，而多数断裂的  $\sigma = 1 \sim 3$ ；③HI 段上分布的剪应力较大，正应力小，容易发生滑移。 $HD'_2$  段正、剪应力都很大，易集聚高应变能。

(2) 由  $C'_1B_2$ 、 $B_2B'_2$ 、 $B'_2C'_2$  和  $C'_2C'_1$  所围的区域。其理由为①四个角的应力集中系数都很高（一个 8，三个 7），且应力集中的范围较大（见图 2）；②沿  $C'_2B_2$  两侧和  $B'_2C'_2$  内侧，其条带状分布的应力集中系数为 6，是同类应力分布的最高者；③  $C'_1B_2$ 、 $B'_2C'_2$  分别是本区最危险和较危险的断裂的一部分；④  $B_2$ — $B'_2$  是可集聚高应变能的断裂。

以上所述的地震危险点，危险断裂和危险区都是相对而言的，是根据实验所得的应力场的各种参数进行的划分和预测，可供圈定地震潜在震源区或地震危险区综合分析时参考。

# STUDY ON THE TECTONIC STRESS FIELD IN SHANGHAI AREA

Yan Yuding

He Zhengtan

(Guangdong Seismologic Bureau)

(Shanghai Seismologic Bureau)

[Abstract] A Photoelastic simulation experiment on the tectonic stress field shows that seven spots of seismic critical zone, two vulnerable seismic faults and two earthquake risk regions may exist in the area of shanghai.

The article also describes the activity of the four groups of faults at the angle of stress field and strain energy.

[Key Words] Earthquake risk region; Stress field; Photoelasticity

~~~~~

(上接第14页)

立自然保护区对发展当地的旅游事业,对发展晋江县的外向型经济,对发展当地的科学文化都具有重要意义。通过论证,专家们一致同意论证报告(由国家海洋局第三海洋研究所及晋江县科委编写)提出的,将深沪湾海底古森林—牡蛎礁遗迹立为国家级保护区比较适宜。

石圳海岸地貌地质景观保护区距深沪湾海底古森林——牡蛎礁保护区约8公里,主要由海蚀地貌、滨岸沙滩、和沿岸典型变质岩组成,属东南沿海著名的平潭—南澳变质岩带的重要组成部分。石圳海岸比较完整地保存并清楚展示其历经古生代,中生代,新生代等漫长的地质历史演变,内容繁杂丰富,有着重大科研价值。

论证会专家们一致同意论证报告提出的将石圳海岸地貌地质景观保护区立作地方级保护区。

福建晋江县深沪湾海底古森林—牡蛎礁遗迹是笔者和其他几位同志在执行国家地震局下达的“东南沿海地壳长趋势形变及其与地震关系——以民间广泛传说的沉东京为例”的基金课题研究过程中于1986年7月被首次发现的。海底古森林经鉴定为裸子植物的油杉属, $^{14}\text{C}$ 测定年龄为距今 $7620 \pm 130$ 年和 $7550 \pm 120$ 年之间。退潮时古森林最大出露范围达1公里之多,如原生直立树桩。最近国家海洋局第三海洋研究所用MCESIS—1500型高分辨率数字地震仪对其中5株古树桩进行测量,初步判断古树桩埋藏部分长度可达20—25米。深沪湾海底古森林遗迹较已规定为国际性遗迹的日本富士湾海底古森林〔树种为赤杨, $^{14}\text{C}$ 测年距今 $8470 \pm 70$ 年及 $9060 \pm 80$ 年,水深20—40米〕和渔津海底古森林〔树种为柳杉, $^{14}\text{C}$ 测年为距今 $1960 \pm 70$ 年,潮间带〕的分布面积要广些。

深沪湾古牡蛎礁(已胶结成海滩岩)出露长500米,宽约100米,厚约40厘米, $^{14}\text{C}$ 测年为距今 $1748 \pm 490$ 年及 $17330 \pm 470$ 年,主要为近江牡蛎及僧帽牡蛎。为国内外目前仅见的分布在潮间带的大片的晚更新世盛冰期时的海相生物遗迹。

(广东省地震局 徐起浩)