

1605年琼州大地震构造应力场的三维光弹实验

颜玉定 陈恩民 黄咏茵

(广东省地震局)

摘 要

本文对1605年琼州大地震的构造应力场进行了三维光弹模拟实验, 结果表明: (1) 在地下20公里左右, 北东东走向的光村—铺前深断裂拦截北北西走向的塔市—演丰断裂的“拦截区”, 是最大剪应力和主压应力的集中部位, 是琼州大震的震源所在; (2) 因铅垂向外力作用的结果, 应力矢量图中形象地显示出塔市—演丰断裂东侧(东寨港一带)一狭长地段呈“断块型倾侧式沉降”, 光村—铺前断裂北侧(铺前湾、琼州海峡南侧一带)呈“断块型沉降”。实验结果与实际考察研究及其它有关资料的计算、分析结果相一致。

一、引 言

1605年7月13日发生在海南岛北部的琼州大地震, 是华南历史上破坏性最大的一次地震。其震中烈度为Ⅱ度, 震级7 $\frac{1}{2}$ —8级, 震源深度22公里左右。为综合剖析这一典型震例, 探讨其构造应力场特征及与发震构造的关系, 我们以文献1)为基础, 设计了三维光弹实验。

二、实验模型、原理及方法

实验材料用环氧树脂高温固结成型。考虑到围岩和断裂构造带岩石介质特征的差异(如弹性模量、抗压强度), 将环氧树脂、固化剂、增塑剂按正常配比来模拟围岩; 而在配比中增大增塑剂的百分比, 使固化后的环氧树脂的弹性模量等均比正常配比的低, 用它来模拟构造岩。由于尚未做过有关震区的岩石力学试验, 所以模型中两类岩石岩性的差别仅仅是定性的。

模型为长轴近东西方向的长方体, 其长、宽、厚分别代表实际的186、112和60公里。图1中内框的范围为其投影于水平面的平面图。

本实验取两条发震断裂, 即走向N75°E的光村—铺前断裂(延伸约200公里, 切穿地壳, 倾向NNW, 倾角近于直立)和走向N20°W的塔市—演丰断裂(延伸约60公里, 略倾向

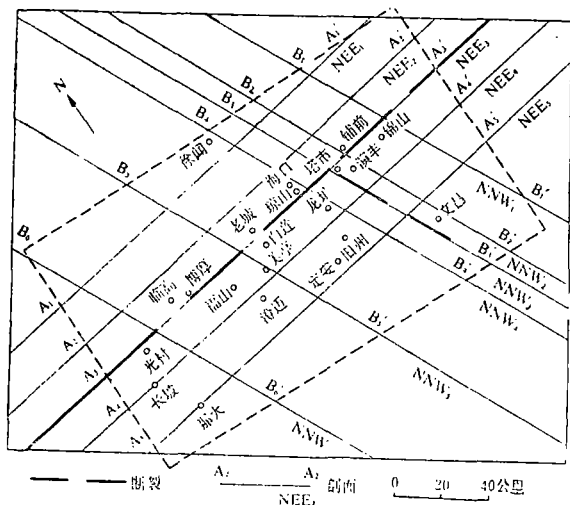


图1 模型的模拟范围、断裂及剖面位置平面图

Fig. 1 The simulating range, fractures and section planes in the experimental model

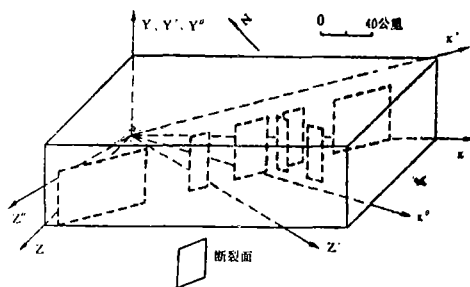


图2 模型立体图及坐标系

Fig. 2 Solid convergence of the experimental model and coordinates

NEE, 并被光村—铺前断裂拦截)。图2为坐标系及模型示意图。模型中模拟的两条断裂的走向与实际断裂的走向相同, 倾角为 90° , 深度为20—60公里。

根据实地考察结果^{1) [1]}, 确定实验的二组外力, 即 $N60^\circ W$ 方向的一组水平向压力(实验按匀布压力加载)及铅垂方向的一组剪切力。铅垂方向的力分布于断裂两盘, 在光村—铺前断裂北盘其方向向下, 南盘向上, 在塔市—演丰断裂东盘其方向向下, 西盘向上。

据文献^{1) [1]}, 地震时光村—铺前断裂水平错动量(右旋)约6—10米, 垂直错距平均约5米(最大超过10米)。假定这些错动全由作用于该面上相应的剪应力所引起, 且假定外力是匀布载荷, 则用弹性理论的有关公式可近似算得上述外力系中压力应是剪力的2.4倍。图3是外力系示意图。

本实验主要根据文献[2]所述的有关三维光弹性实验的原理和方法, 现简述如下:

将已退火, 即无预应力的模型加载并在恒温箱内进行应力冻结; 将冻结好的模型按模拟深度0—20公里、20—40公里、40—60公里切成三片, 将切片在光弹仪偏振光场中作一次正射和二次不同角度的斜射, 测取相应的等色线(次主应力差等值线)和等倾线(次主应力方向等值线)。根据文献[2]的有关公式, 可求得各点的应力分量 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 和 $(\sigma_x - \sigma_y)$ 、 $(\sigma_y - \sigma_z)$; 采用文献[2]中的“数解法”, 可得到各点的三个正应力之和 $\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$ 。与已求得的 $(\sigma_x - \sigma_y)$ 、 $(\sigma_y - \sigma_z)$ 联立, 便可分离出正应力 σ_x 、 σ_y 、 σ_z , 将获得的六个应力分量 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 代入文献[2]的有关公式, 可求出主应力 σ_1 、

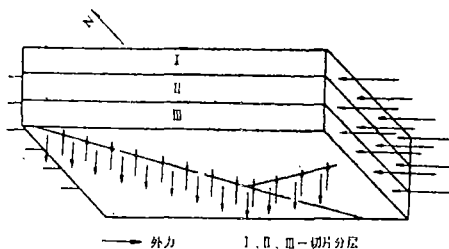


图3 外力系及模型分层示意图

Fig. 3 Indicating sketch of outside forces and divided layers in the model

1) 陈恩民、黄咏茵, 导致陆陷成海的一次板内大地震的构造条件—1606年琼州大地震的地质构造背景和发震构造, 1981.

σ_2 、 σ_3 的大小和方向; 将六个应力分量代入“坐标轴转动时应力分量的变换式”, 便可求出任意剖面(截面)上的正应力 σ_n 和剪应力 $\tau_{x'y'}$ 、 $\tau_{y'z'}$ 和 $\tau_{z'x'}$ 。

三、实验结果

因琼州大震的震源深度在22公里附近, 所以我们主要讨论第二层(20—40公里)的应力状态。

1. 最大剪应力(τ_{max})

实验中模型的切片是垂直中间主应力 σ_2 方向进行的, 所以切片的平面即为 σ_1 、 σ_3 所在的主平面, 光线正射时的等色线就是最大剪应力 τ_{max} 的等值线。

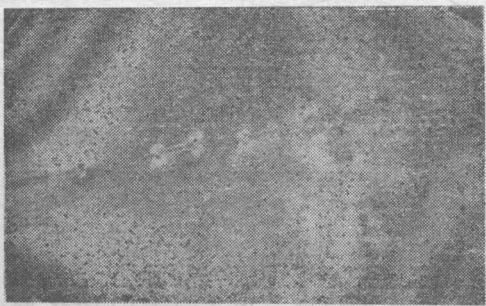
照片1为I层即地表至地下20公里深度的 τ_{max} 等值线图。从中可以看出, 在塔市、琼山、龙塘、旧州一带, τ_{max} 较大(具体位置参看图1)。等色线为6级应力条纹。图中没有应力集中点。此层没有模拟断裂, 但从应力图象来看, 深部的NEE向断裂在塔市西侧部分似对I层的应力分布有影响。

照片2为II层即20—40公里的 τ_{max} 等值线。区域应力的高值区(6级应力条纹)较I层略偏西北, 在徐闻、琼山、老城、白莲一带。断裂各分段的端点都是应力集中点(应力条纹在7级以上)。尤其在光村—铺前断裂拦截塔市—演丰断裂的部位(以下简称“拦截区”), 不但是应力最集中的少数几个部位之一, 而且其集中范围在诸部位中最大。

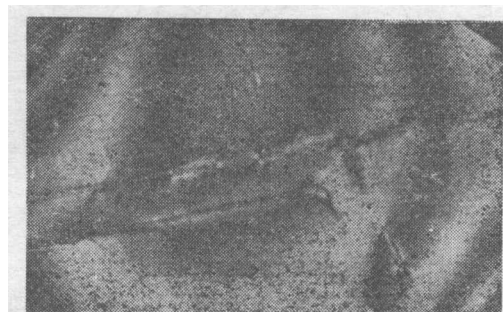
照片3为III层即40—60公里深处的 τ_{max} 等值线。区域应力高值区比I、II层更向北偏离, 中心已由I层的琼山附近偏离至本层的徐闻附近。断裂各分段的端点也是应力集中点, 但其集中的程度与范围均不及第II层。图中还有一条与光村—铺前断裂平行的应力图象, 可能是实验时受加力夹具的影响所致。



照片1 0—20公里深度内的 τ_{max} 等值线



照片2 20—40公里深度内的 τ_{max} 等值线



照片3 40—60公里深度内的 τ_{max} 等值线

2. 主应力

几乎所有点的三个主应力 σ_3 、 σ_2 、 σ_1 的方向都分别与坐标轴 x 、 y 、 z (图2)重合,最大偏差不超过 3° 。因此可认为 σ_3 方向为 $N60^\circ W$,平行于水平面; σ_2 方向垂直于水平面; σ_1 方向为 $N30^\circ E$,平行于水平面。

(1) 最大主应力(σ_1): 全是张应力,可称主张应力。其等值线见图4a。应力高值区呈狭长带状沿NNW走向的塔市—演丰断裂分布。最大值是4.5应力单位。在临高西侧,长坡东北侧,各有一小的局部应力集中区,其值为3.5—4应力单位,其余地区的 σ_1 值都比较低。

(2) 中间主应力(σ_2): 全是压应力(正应力中“负”的为压应力)。图4b为其等值线图。图中显示旧州东侧有一应力集中区,最大值为4应力单位。在塔市附近也有一局部的应力集中区。

(3) 最小主应力(σ_3): 全是压应力,可称主压应力。图4c为其等值线图。可明显看出,“拦截区”是主压应力最集中的地方,为5应力单位。以此为中心,4—4.5应力单位的区域沿两组断裂伸展,但主要沿NEE向断裂分布。

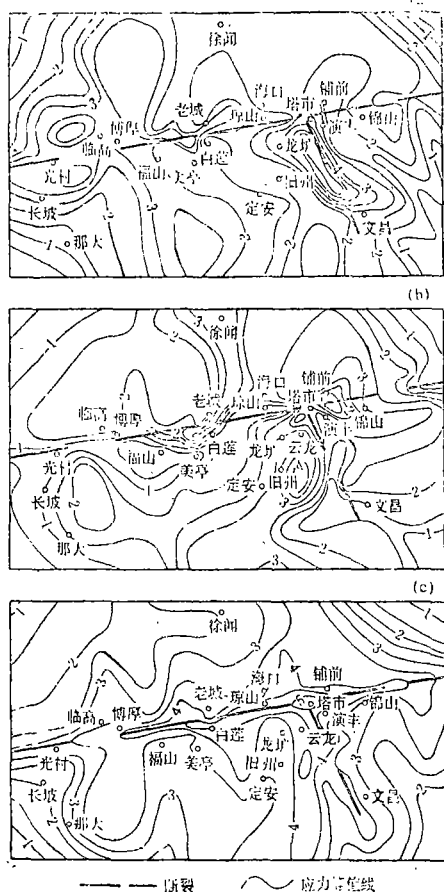


图4 主应力等值线

a. 主张应力 b. 中间主应力 c. 主压应力
Fig. 4 Isopleth of main stress

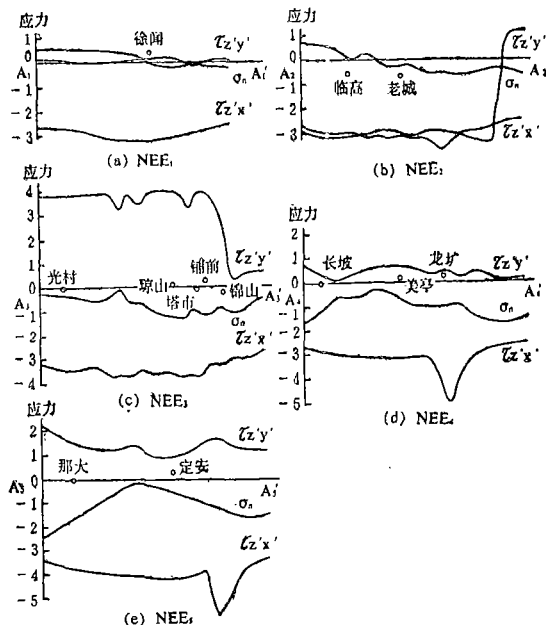


图5 NEE系列剖面上的正、剪应力
Fig. 5 Right stress and shear stress in the NEE section planes

3. 十一个剖面上的正、剪应力

为了解走向 $N75^\circ E$ 的光村—铺前断裂和走向 $N20^\circ W$ 的塔市—演丰断裂的断裂面上以及研究区内与两断裂走向平行的其它剖面上的应力分布情况,特作了两组11个剖面(包

括两条断裂)的正应力 σ_x 、水平向剪应力 $\tau_{x'y'}$ (NEE向剖面上)、 $\tau_{x'z'}$ (NNW向剖面上的)和垂直向剪应力 $\tau_{y'z'}$ (NEE向剖面上)、 $\tau_{x'y'}$ (NNW向剖面上)的计算。其中NEE系列共5个剖面,以NEE1—NEE5表示;NNW系列有6个剖面,以NNW1—NNW6表示。剖面的位置表示在图1中。

(1) NEE系列

NEE系列5个剖面上的应力分布图象见图5。其应力分布特点是:除个别地段外,正应力全为压应力。水平向剪应力 $\tau_{x'y'}$ 最大,在三种应力分量中占绝对优势。 σ_x 和垂直向剪应力 $\tau_{y'z'}$ 在正常情况下都比较小。然而,在直接受外力系中铅垂向剪力作用的NEE₂和NEE₃剖面上, $\tau_{y'z'}$ 与 $\tau_{x'y'}$ 一样大,是同系列其它剖面上的 $\tau_{y'z'}$ 值的几倍。NEE系列剖面上的 $\tau_{x'y'}$ 方向是北侧向东,南侧向西; $\tau_{y'z'}$ 的方向,除NEE₃剖面上的反向外,其余均为北侧向下,南侧向上(图5)。

(2) NNW系列

NNW系列剖面上的应力分布情况如图6所示。图6显示,除极个别点外,NNW系列剖面上的正应力 σ_x 均是张应力。水平向剪应力 $\tau_{x'y'}$ 在一般情况下比其它应力分量都大,但在直接受外力系中铅垂向剪力作用的NNW₂和NNW₃剖面上,NNW₂的垂直向剪应力 $\tau_{y'z'}$ 与水平向的剪应力 $\tau_{x'y'}$ 相近,而在NNW₃剖面上的垂直向剪应力 $\tau_{y'z'}$ 不仅远远大于水平向剪应力,而且还是11个剖面上所有应力分量中最大的。NNW系列剖面上 $\tau_{x'y'}$ 的方向是东侧向北,西侧向南; $\tau_{y'z'}$ 的方向除NNW₂剖面上的大部分地段方向相反外,其余都是东侧向下,西侧向上。

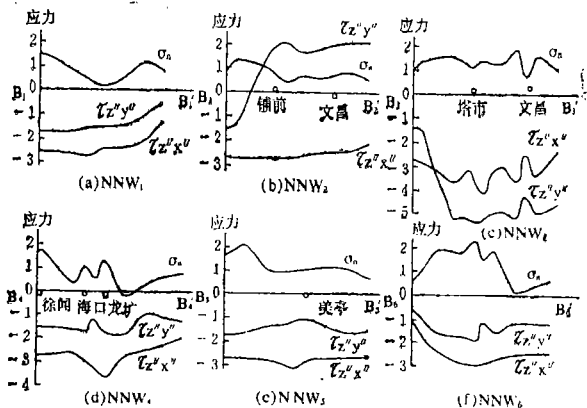


图6 NNW系列剖面上的正、剪应力
Fig. 6 Right stress and shear stress in NNW section planes

4. NEE和NNW两系列剖面各交点处的应力矢量图象

图7(1)a—e分别表示与NEE1—NEE5剖面相交的NNW1—NNW6剖面在交点处的正应力 σ_x 、水平向剪应力 $\tau_{x'y'}$ 和垂直向剪应力 $\tau_{y'z'}$ 的大小和方向。由图7(1)可见,各点的 σ_x 虽大小不一,但全是张应力。各点的 $\tau_{x'y'}$ 普遍较大,在剖面东侧其方向朝向NNW,西侧朝向SSE。 $\tau_{y'z'}$ 的方向,除NNW2剖面相反外,其余都是东侧向下,西侧向上。 $\tau_{y'z'}$ 一般都很小,可在NNW3剖面上的却很大,是所有应力分量中最大的。此现象是由外力系中垂向剪力和水平向压力所引起的两个同相 $\tau_{y'z'}$ 叠加而成。相反,在铅垂向剪力作用线的东侧,即NNW2剖面各相应点上,因两种外力引起的 $\tau_{y'z'}$ 反向,互相减弱。由于剪力引起的 $\tau_{y'z'}$ 比压力引起的大,致使NNW2剖面上的 $\tau_{y'z'}$ 叠加后方向与其它剖面上

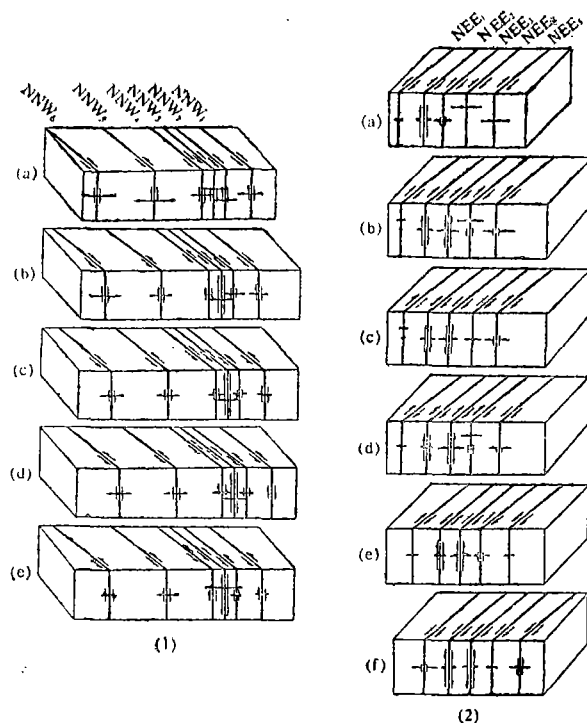


图 7

(1) 与NEE剖面相交处的NNW剖面上正、剪应力矢量图

(2) 与NNW剖面相交处的NEE剖面上的正、剪应力矢量图

的 τ_{xx} 方向相反。故图上形象地显示出：由NEE 2、NNW 2、NNW 3三个剖面分割出的南段这一狭长地块（即东寨港一带）呈“断块型倾侧式沉降”。

图7(2)a—f分别表示与NNW 1—NNW 6剖面相交的NEE 1—NEE 5剖面在交点处的 σ_x 、 τ_{xz} 、 τ_{zx} 的大小和方向。由图可见： σ_x 全是压应力，且应力值普遍较小。 τ_{xz} 普遍较大，尤其是NEE 5与NNW 2、NNW 3剖面相交的两点更大些，但 τ_{xz} 的最大值却在NEE 4与NNW 4两剖面相交处。各剖面的北侧 τ_{xz} 的方向为NEE，南侧为SWW。由外力系中水平向压力引起的 τ_{xz} 一般都很小，而铅垂向剪力对其作用线附近剖面上的 τ_{xz} 却影响颇大。图中的NEE 2与NEE 3两剖面间的狭长地带，显示“断块型沉降”的特征。

四、认识和讨论

实验结果显示：

主压应力主要沿NEE走向的光村—铺前断裂集中，最高值区是“拦截区”。主张应力沿NNW走向的塔市—演丰断裂集中，最高值区在“拦截区”南侧。中间主应力与断裂关系不明显。

NEE走向的断裂和剖面除个别地段外，均呈压剪性，而NNW走向的断裂和剖面，在不考虑围压的情况下，呈张剪性。

照片2、照片3反映出,在断裂尚未扩展及尚未互相贯通前,“拦截区”是整个研究区中最大剪应力最集中的几个部位之一。就应力集中的范围而言,它比其它部位都大,而Ⅰ层(20—40公里)比Ⅱ层(40—60公里)集中的范围更大。

“拦截区”内不仅最大剪应力最集中,主压应力也最集中(图4c),说明此处地震前积聚的应变能是全研究区中最大的,这是孕育强震的一个重要条件。在断裂其它各分段的端点,虽也是最大剪应力的集中点(照片3、图4),但其集中范围及主压应力都不及“拦截区”的大,这些部位即使发震,震级都超不过“拦截区”发生的地震。

上述说明,光村—铺前断裂拦截塔市—演丰断裂的构造部位,明显地应为1605年大震的震源所在。

实验结果还显示出,两条震源断裂的断裂面接近于最大剪切面。

最大剪应力的区域性高值区,随着深度的增加,逐渐向西北偏移。高值区中心,上中层在琼山、塔市附近,下层在徐闻附近。

从图5、图6均可看出,一般情况下各剖面上水平方向的剪应力远大于垂直方向的剪应力。然而,在光村—铺前断裂和塔市—演丰断裂的断裂面上,因受铅垂向剪力的直接影响,其垂直向剪应力的大小几乎与水平向剪应力相仿,有的甚至更大些,而与其它剖面上的垂直剪应力相比,则要大得多。正是这较大的垂直向剪应力的作用,使这两条断裂的两侧产生了较大的“断块型隆起”和“断块型沉陷”的构造变形。此现象在应力矢量图中更为直观。图7(1)显示了东寨港一带的“断块型倾侧式沉降”;图7(2)显示出光村—铺前断裂北面一宽约17公里的地带呈现“断块型沉降”的特征。

本实验承蒙陈国达教授检查、指导。实验的水平向加力夹具由李健康工程师帮助设计,谨此致谢。

(本文1986年9月18日收到)

参 考 文 献

- [1]陈恩民、黄咏茵, 1605年海南岛琼州大地震及其发展构造的初步探讨, 地震地质, Vol. 1, No. 4, 1979.
- [2]天津大学材料力学教研室光弹组, 光弹性原理及测试技术, 科学出版社, 1980.

THREE—DIMENSIONAL PHOTOELASTIC SIMULATING EXPERIMENTS
TO TECTONIC STRESS FIELD OF GREAT QIONGZHOU
EARTHQUAKE OF 1605 IN HAINAN, CHINA

Yan Yuding, Chen Enmin and Huang Yongyin
(*Seismological Bureau of Guangdong Province*)

Abstract

The three—dimensional photoelastic simulating experiments to tectonic stress field of great Qiongzhou earthquake of 1605 are made. The results indicate that the maximum shear stress and principal compressive stress are mainly concentrated in the depth of about 20km where the NNW trending Tashi—Yanfeng fault is intercepsted by the NEE trending Guangcun—Puqian deep fault. The Qiongzhou earthquake of 1605 is formed in the intercepted region. Because of the influence of the vertical force, the stress vector diagram shows obviously a feature of the fault—block type dip—slip subsidence in the east of Tashi—Yanfeng fault (a narrow belt near Dongzhai port), and a feature of the fault—block type subsidence in the north of Guangcun—Puqian fault (from Puqian bay to the south of Qiongzhou strait), respectively. The results of tests are consistent with field survey as well as the analysis and calculation based on the other data.