2

# 华北大陆地壳—上地幔波浪断裂型 构造的光弹模拟实验

孙武城 李松林 张晓普

(国家地震局地球物理勘探大队)

#### 摘 要

在华北大陆地壳深部探测成果的基础上,进行了二维光弹模拟实验。测定在华北地壳一上地 幔波浪断裂型构造背景下地壳的应力状态。实验发现,最大剪应力位于莫氏面伴有间断错动的 "拐点"附近。

综合华北地区的深部探测成果和上述试验结果,可对华北地区地震活动的某些现象予以解释。

## 一、问题的提出

地震资料表明,华北大陆的地震活动既不同于与其邻接的相对稳定的华南大陆及鄂尔多 斯地台,也不同于地震活动水平较高的南北地震带。在空间分布上,华北大陆的地震活动有 如下几个明显的特点:

1. 震源较浅;

2. 震中分散;

**3.** 六级以上地震相邻震中的距离为50—100公里左右,在空间展布上呈现出一定的等间 距性。



图 1 是华北大陆六级以上地震震中分布图 (考虑到地震资料的准确性和各地区的统一性引用了公元1500年以来的资料)。

造成上述地震空间分布的原因是什么呢?这的确是一个值得探索的问题。由我大队十五 年来的综合地球物理资料可知,华北大陆地壳一上地幔构造为波浪断裂型构造。即莫氏面呈 近乎正弦波形的起伏,并有莫氏面的间断错动等不连续的现象<sup>[1]</sup>。莫氏面的间断点大多位于 正弦波形的"拐点"附近。图 2 给出了这种波浪断裂型构造的二个垂直剖面。



图 3 京津唐地区地壳厚度及震中分布图

如果将华北地区的地震与深部探测成果结合起来考虑,就会发现,地震震中多位于地壳 厚度的变异带上(图3)。也就是说,地震容易发生在波浪断裂型构造中莫氏面"拐点"的 上方,而很少发生在正弦波形的波峰处和波谷处。基于这样的分布,造成了华北大陆地震震 中在一定程度上的等间距性。 那么,为什么地震震源多位于莫氏面"拐点"的上方呢?为了解答这个问题,我们作了 光弹模拟实验,测定在波浪断裂型构造的情况下,由于构造应力场引起的地壳内应力的分布 状态。

### 二、模型设计

模拟实验中,我们选用两种不同的光弹性材料构成地壳一上地幔波浪断裂型构造模型。 由关系式  $V = \sqrt{E/\rho}$ ,取两光弹材料的弹性模量 $E_1/E_2 = 1/2$ 。这次采用的是618\*环 氧 材料,其性能如表一所示。

ALC - R. P. L. POL HILL BET - An Indu E. L.

AL AL 14 64

表	618 坏氧材料受弹模板材力学、尤字性能									
试	材料配比	室 温 下								
样 号	H:S:B:C	E (kg/cm²)	v	f (kg/c	m)	f: (kg/cm <sup>2</sup> ) 16.27 16.34		k (1/cm) 1834 2707		
1*	100:25:5:0.1	27600	0.37	7 15.	05					
2*	100:36.8:5:0.1	38500	0.37	7 14.	22					
 试 样 号	材料配比	冻结温度下								
	H:S:B:C	E' (kg/cm²)	v'	f' (kg/cm)	f; (kg/cm <sup>2</sup> )		k' (1/cm)		冻结温度 (℃)	
1*	100:25:5:0.1	118	0.47	0.32	0.346		0.37		105	
2*	100:36.8:5:0.1	216	0.47	0.36	0.414		0.6		112	

表1中,各种符号意义如下;

H——618<sup>#</sup>环領树脂、S——顺丁稿二酸钙,B——磷笨二甲酸二丁脂,C——二甲基苯胺,f——材料条纹值,ft——模型条纹值,ft<sup>\*</sup>f/t(t为坂厚),k——材料的质量系数,k=E/f。

由表一可见,冻结温度下, E<sub>1</sub>/E<sub>2</sub>=118/216=0.546

室温下, E<sub>1</sub>/E<sub>2</sub> = 27600/38500 = 0.717



艾

1

图 4 为实验所采用的平面光弹模型,与波浪断裂型构造有关的几何参数均参考文献<sup>[1]</sup>中的结果。以 1 \*材料代表地壳,其板厚为  $t_1 = 9.25 \text{ mm}$ 。以 2 \* 材料代表 地幔,其板厚为  $t_2 = 8.70 \text{ mm}$ 。后面计算时,我们取平均值 t = 9 mm。这两部分分别用样板加工成形后,用 室温环氧胶粘接成一整体。

三、实验与结果

实验采用了水平的单向加载和双向加载两种方式。前者相当于华北地区晚第三纪以后北 东东向压应力为代表的现代构造应力场<sup>[2]</sup>,它是由于太平洋板块的挤压作用引起的。后 者则是同时考虑到了各种垂直向作用的影响<sup>[3]</sup>。

1. 单向加载试验

在试验中采用了冻结应力方法。载荷通过相对刚性很大的钢块作用到模型上,故基本上 是等位移加载。



图 5 单向载荷下的等色线条纹图(照片)



图6 单向载荷下的等色线图案

在冻结应力时,载荷 $Q_x = 3.83 \text{kg}$ 即  $P_{xx} \doteq \frac{3.83}{0.9 \times 6.4} = 0.665 \text{kg/cm}^2$ 

图 5 为单向载荷下模型的等色线条纹图(照片)。图 6 是由此得到的等色线图案。 根据平面光弹原理,模型任一点处的最大切应力 **T**max 与该点的条纹级数m成正比<sup>[4]</sup>。

= m • α • p<sub>x</sub>冻

上式中,  $\alpha_{\text{地壳}} = 0.346/P_{X}$  = 0.520

 $\alpha_{ii} = 0.414 / P_{Xi} = 0.623$ 

对于实际情况,若已知水平作用Pxx,则地壳中的实际应力可根据此条纹图来估算。

即  $\tau_{max} = m \cdot \alpha \cdot P_{X}$ 实

实验结果表明,在水平力的作用下,介质一(相当于地壳)中,其最大剪应力分布既不 是位于波浪形的波峰处,也不是位于波谷处,而是位于波浪断裂型构造中莫氏面间断处的上 方,另外,对于莫氏面连续的"拐点"处,其剪应力值也较高。



图7.单向加载时的等倾线图案

图 7 为单向载荷下模型的等倾线图,它表示出模型各点主应力的方向。

由图 6 和图 7 可知, 左、右两个拐点处的应力场有较大差别。左拐点附近剪应力集中程 度较右拐点高。从主压应力方向看,其它区域大都接近 0 °(水平方向), 左拐点附近为45°— 70°, 右拐点处只有15°—30°。左、右两拐点处应力场的差异与裂纹的存在 有关。因左拐点 处有裂纹存在,因此加强了该处的应力集中程度。图 7 还表明了波浪型构造对力的"转化" 作用。在拐点处,水平压力转向垂直方向。

2. 双向加载实验

1

为了便于改变垂直作用力 Pz,我们将前述已冻结的单向受压模型,在室温下加以垂直压力。然后,在光弹仪上照相,记录其条纹图。根据叠加原理,这样得到的条纹图即为双向加压的结果。



(a) 横向载荷p, 纵向载荷-13p



(b) 横向载荷 p, 纵向载荷  $-\frac{1}{2}$  p





由于材料在室温下材料条纹值与冻结时不同,故首先将冻结时压力P<sub>x</sub>折算到室 温,然后 用其计算垂直压力。

$$P_{X \cong a} = P_{X \Leftrightarrow i} \cdot \frac{f}{f'} = 0.665 \times \frac{15.05 + 14.22}{0.32 + 0.36} = 28.62$$

此处 $\frac{f}{f'}$ 近似取两种材料的平均值。

图 8 为试验得到的等色线条纹图。此时,模型各点最大剪应力仍然可按下式求出;

对于地壳,  $\tau_{max} = m \cdot \alpha_{ukk} \cdot P_x = 0.52 m P_x$ 

1 期

Ŀ

对于地幔,  $\tau_{max} = m \cdot \alpha_{uu} \cdot P_x = 0.62 m P_x$ 

实际地壳内的应力也可类似地进行估算。在室温下,两种材料的弹模比  $E_1/E_2 = 0.717$ ,与  $\frac{1}{2}$ -相差较多。条纹分布为不同弹模比的两种情况的综合效果。因而,同单向加压试验相比, 可能会有一定的误差,但是,作为定性分析是完全可以的。

双向加压实验结果表明,剪应力分布与水平单向加压时相似。地壳内的最大剪应力,仍 位于莫氏面间断错动的拐点的上方。

图 8 显示了垂直力作用对应力场的影响。随着垂直作用的逐渐增强(从 a 到 c), 地 壳内 的等剪应力线逐渐往垂直方向转。

#### 四、讨 论

根据用有限元法计算的结果,当深部基底有一隆起变形时,地球上部介质的应力场与上 述实验结果有些类似。其最大剪应力亦位于基底隆起的两翼\*。

地震的发生取决于地下物质剪切破坏的物理条件及该处的应力条件。一般同一深度的物 理条件可认为大致不变,因而可以说,最大剪应力的部分容易发生破坏。根据这一分析和光 弹实验结果,则地震容易发生在波浪形"拐点"的上方,尤其是当拐点附近有间断存在时。因 此,华北大陆伴有断裂的波浪型壳一幔构造,是控制华北大陆地震活动的基本因素之一。由 于它的存在,使华北地区的地震活动在强度和空间分布上具有其独特的特点。

显然,这些结果对华北地区地震危险区的圈定及其监视具有一定的意义。

当然,我们这次模拟实验还是很初步的,仍有不少问题需要进一步探讨。

首先是侧向的剪切外力的影响,由于平面问题的局限性,这一问题无法考虑,只有运用 三维的模型才能得到解决。

另一个是地壳结构沿垂直方向的非均匀性问题。事实上,地壳结构沿垂直方向有明显的 变化。因此,采用一平均的地壳模式只是对问题的近似描述。在这种近似下,应力场与地 壳、上地幔的物性差异有关。物性差异越大,则地壳、上地幔中的应力分布差异越显著。

考虑到以上因素,更加复杂的三维的实验研究将是非常必要的。

一机部机械研究所赖曾美等同志对我们的工作给予了大力支持和热情帮助。我队的王祖 寅、王开明同志绘制了本文的图件。在此,一并表示衷心感谢。

(1983年4月28日收到修改稿)

#### 参考文献

 Sun Wucheng et al, A Preliminary Study of the Relationship Between the Continental Earthquakes and Deep Crustal Structures in North China, Selected Papers From ISCSEP
汤理华、李钦祖,华北地区地壳应力场,地震出版社, 1980。

[3] 郭增建等,震源物理,22-34,地震出版社,1979。

- 〔4〕A·柯斯克等,光弹性应力分析,85一103,上海科学技术出版社,1979。
- \* 殷有泉,有限元法在地球物理学中的应用,1979。