

从应力解除资料反演中国东部 郯庐断裂带区域应力场方向*

许寿椿 朱 正

(国家地震局地震地质大队)

摘要

本文用二维非线性有限元法,取郯庐带一个水平剖面进行了模拟计算。根据该区原地应力测量资料反演了区域应力场方向。推断区域应力场主压应力方向为北东 80° — 90° 。

一、引言

郯庐断裂带是纵贯我国东部的一条规模宏伟、深切地壳的宽大断裂带,是控制中国东部强震活动的一个重要构造因素。五十年代以来,愈益受到广泛重视。对其应力状态的研究是基础性研究之一。利用震源机制、地震裂缝和地形变测量资料等,已经给出了关于郯庐断裂带现今区域应力场的若干结果^[1-4]。原地应力测量是一种直接研究地壳应力状态的手段。近十余年来,在华北及其它强震区已经陆续得到一批有价值的测量数据^[5]。本文尝试用有限元方法,依据个别点位的应力测值推断区域应力场方向。我们设想所取地块处于均匀外应力场作用之下,并视此均匀外应力场为区域应力场。地块内特定点的应力状态受区域应力场的控制,也受到局部介质不均一性和断裂的影响。设均匀外应力场的最大、最小主压应力分别为 σ_1 、 σ_2 , σ_1 的方向与南北向夹角为 α (顺时针为正)。程序依据输入的 σ_1 、 σ_2 、 α 等数值计算地块内各点的应力状态。把计算得到的各测点的应力方向和实测值比较,就得到两者的偏差。在进行多组计算以后,选取偏差最小的外应力场主轴为区域应力场方向。这就是本文所用的反演方法。

二、原地应力测量结果

1979年于该区用73-1型压磁应力计,用应力解除法进行了绝对应力测量。所得结果见表1。

作为定义在平面区域上的二元函数的二维场,只要是非均匀的,定义域内不同点的取值一般是不同的。因而我们的分析并不主要着眼于测值的简单一致性,而试图用测点间构造环境的差异解释方向测值的不同。对新沂测点,由于最大、最小主应力相当接近,由

* 1982年4月19日收到

表 1 郯庐断裂带应力测量结果

测点位置	测点岩性	最大主应力 (公斤/厘米 ²)	最小主应力 (同左)	最大主应力方向 (度)
济 南	中奥陶系灰岩	32	6	NW5°±6°
安 丘	同 上	31	20	NW84°±11°
青 岛	燕山期花岗岩	26	14	NE74°±7°
新 沂	上白垩系红砂岩	17	13	NW25°±10°
定 远	中寒武系灰岩	41	20	NE50°±8°
宿 县	上寒武系灰岩	47	27	NE86°±6°
无 为	中三迭系灰岩	11	0.02	NW63°±5°

注：资料引自文献[5]、资料国家地震局地震地质大队，四队郯庐带应力解除报告，1980。

此可能在计算主应力方向时产生较大误差。因为 $\sigma_1 = \sigma_2$ 时各方向都可视为主方向。新沂测点的这种情况是误差所致还是本身特点有待新的测量验证。在新沂又进行的水压致裂应力测量仍得到 $\sigma_1 \approx \sigma_2$ 的结果。这可能表明两主应力值相近正是该处应力状态本身特点。本文对取、舍新沂测点两种方案做了模拟计算。两种情况下所得区域应力场方向是一致的。但舍弃新沂资料时会使测值与计算值的偏差少 7° 左右。

三、有限元模拟计算

所模拟的地块范围、大约为北纬 30°—38°，东经 116°—122°。其中，主要断裂构造是郯庐断裂及山东山字型构造。图 1 是用于计算的有限元网格图。其中 f_1 是郯庐断裂带； f_2 是山东山字型西翼；其它区域，即 e 区，为弹性区。模拟中用层状材料描述断裂， e 区用各向同性弹性材料描述。力学参数选取参见文献 [6]。各区域的杨氏模量 E 和泊松比 ν 选取如下：

$$E_e = 830000 \text{ kg/cm}^2, E_{f_1} = 550000 \text{ kg/cm}^2,$$

$$E_{f_2} = 400000 \text{ kg/cm}^2, \nu_e = 0.25,$$

$$\nu_{f_2} = 0.23, \nu_{f_1} = 0.22.$$

郯庐带和山字型西翼上的摩擦系数分别为 0.5 和 0.6。

模拟计算中，我们取均匀外应力场的平均应力 $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$ 为 2800 公斤/厘米²。这个量值大约和十公里深处的静岩压力相当。参照实测资料取 $\sigma_2/\sigma_1 \approx 0.6$ ，具体取 $\sigma_1 = 3600$ 公斤/厘米², $\sigma_2 = 2000$ 公斤/厘米²。

四、主应力方向计算值与实测值的比较

模拟计算中，当均匀外应力场主压应力方向取不同值时，计算所得各测点的主应力方向和实测值的偏差见图 2。图中所述平均偏差 d 按下式算出

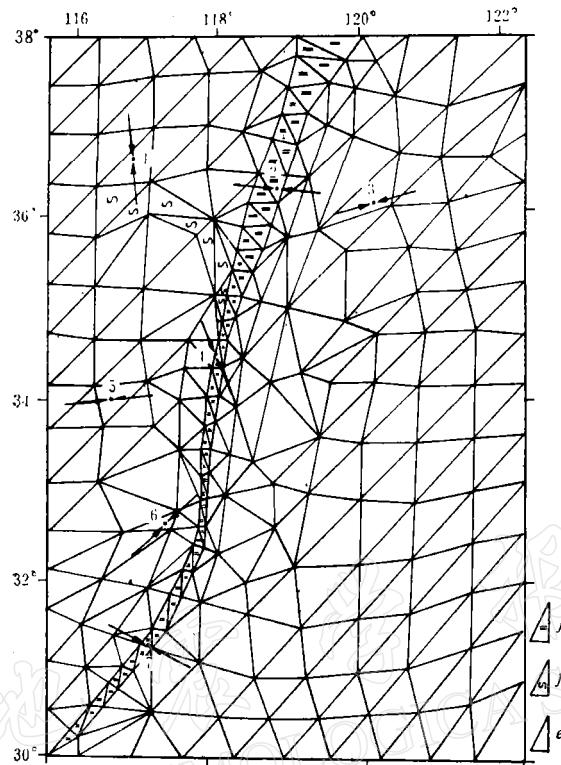


图 1 有限元网格、测量点位及实测主压应力方向

(f_1 —郯庐断裂带; f_2 —山东山字型西翼; e —弹性区;
1: 济南; 2: 安丘; 3: 青岛; 4: 新沂; 5: 宿县; 6: 定远; 7: 无为)

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\theta_i - \theta_i^*|.$$

式中, θ_i 和 θ_i^* 分别为第 i 个点位主应力方向的计算值和实测值. n 为参加统计的点数.

由图 2 可见, 两种情况下都是东西向时平均偏差最小. 如果取外应力场方向的变动幅度为 10° , 那么当它在 $NE80^\circ$ —东西向时平均偏差最小. 计算表明, 舍弃新沂测点时偏差显著小于计及新沂测点时的偏差.

由此我们推断, 郊庐断裂带区域应力场主压应力方向是近东西向的, 或说是 $NE80^\circ$ —东西向.

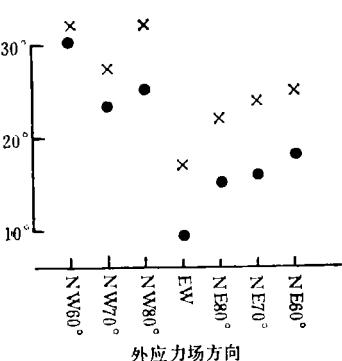


图 2 主应力方向实测值与计算值偏差图

●—舍弃新沂测点时
×—计及新沂测点时

五、与其它资料给出结果的比较

1. 现今构造应力场研究中, 经常使用震源机制资料. 由于震源机制的主轴是地震应力降的主轴, 也由于许多地震是沿地壳中已有的活动

断裂产生的，因而某些地震给出的 P 轴可能和区域应力场方向有较大偏差或系统偏差^[7-9]。许多作者认为，足够数量资料的统计处理可能消除系统偏差，从而提供较多的区域应力场信息。六省(市)震源机制小组处理、校正了苏、鲁、皖、豫地区 37 个地震的震源机制，由此进行统计分析得到 P 轴的优势方向 $P = 76^\circ \pm 28^\circ$ ，并认为这代表了该区构造应力场方向^[4]。而据方仲景在文献 [2] 中的 16 个地震统计， $P = 107^\circ \pm 33^\circ$ 。若取文献 [2、4] 中震级大于四级的地震统计，则有 $P = 98^\circ \pm 34^\circ$ 。这些结果表明，当资料选取和处理不同时，结论有相当大的差异，30 余度的标准差显示了 P 轴的较大波动。考虑到不少地震是沿已有活动断裂产生的， P 轴是地震应力降的主轴等情况，应该说震源机制资料和本文结论的差异并不意味着矛盾。统计给出的优势 P 轴方向与本文结果偏离不大。

2. 地震裂缝是构造应力活动的产物。由此可粗略推断构造应力场方向。文献 [2] 收集了三处地震裂缝资料。一处为朱书俊等首先报道。地点在 1668 山东莒县大震极震区，总体为北北东向展布。另两处为方仲景等报道，一处于新沂嶂山闸东；另一处在大别山北麓霍山县。三处裂缝均显示受北东东-南西西向水平挤压作用，致使北东向断裂产生右旋剪切错动。

3. 地形变资料。国家地震局测量队 1971 年、武汉地震大队 1976 年在山东郯城所做三角、微波、激光测距测量和 1954 年形变测量比较，发现近东西向的测线大幅度缩短，显示了东西向的挤压。这里需要特别指出的是，根据两期测量资料所得出的应力场概念，仅是这个时间段内的应力变化，不是绝对应力场本身。1976 年与 1971 年资料比较，就显示了东西向的引张变化。

4. 王仁等在文献[6]中，以华北地区五个强震的震中、释放能量、断层走向及错距等多项为模拟目标，由计算结果推断华北区域应力场方向为北东 $70^\circ \pm 10^\circ$ 。本文思路与文献 [6] 相同。只是本文以单纯的应力测量资料为拟合目标。两者的结果是一致的。

六、结语和讨论

1. 本文据原地绝对应力测量资料，用二维非线性有限元方法反演郯庐带区域应力场主压应力方向为近东西向，或为北东 80° -东西向，此时实测值与计算值的平均偏差为 10° - 15° 。若取区域应力场最佳角域为 20° ，则区域应力场方向为北东 70° -东西向，此时实测值与计算值平均偏差为 10° - 16° 。本文结果与震源机制、地震裂缝资料所得结论不矛盾，与文献[6]的结果相近。

2. 原地应力测量能直接给出测量点位的应力状态，这是它的主要特点和优点。近十余年来在工程地质、矿山、水工、隧道和其它地下工程的设计、施工及安全生产方面得到日益广泛的应用。利用应力解除法所做的原地应力测量，除矿井中所进行者外，大多是在地表浅层进行的。对于研究构造应力和震源力学来说，测量深度浅则是这种测量方法的显著缺欠。但这种深、浅关系问题在依据地表形变测量、地表破坏现象、地表构造形迹推断构造应力场时同样存在。应力测量技术在发展中，现有资料是发展中一个阶段的成果。至今，西欧、南非、北美、日本、澳大利亚等地的应力测量资料多数仍然是浅层测值。这种浅层测量有理论及实验室实验的依据。世界范围的测量实践表明，它有一定的科学价值，

由之得到了关于构造应力的若干规律性的认识，如：浅层水平应力状态远不如海姆据理论计算推断的

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_V,$$

而普遍存在大于垂直应力 σ_V 的水平应力 σ_H 、水平应力随深度线性变化的趋势、不同构造单元的主应力方向都显示了与断裂构造、板块运动的一定联系等等^[5,10-14]。活断裂及强震震中区附近的应力测量提出了若干值得重视的新资料^[14]。关于水平应力主方向，多处测量表明，只要测点选择注意避开地表地形的影响，同一测点不同层位的主方向就大体是一致的^[5,14]。近年来，适于测得较深层位应力状态的水压致裂方法受到特别重视。新资料在许多方面对浅层观测结论提出了新的补充。本文所用资料，所选择测点在地形平坦、节理裂隙不发育、风化较少的岩石中。而后又进行的一处水压致裂法应力测量，与本文所用应力解除法测得的主方向一致。以上可做为本文所用资料基本可靠性的一点说明。当然随着应力测量技术的进步，它有待于新资料的补充、肯定或修正。

参 考 文 献

- [1] 吴大铭等，论中国郯庐带的活动，*地震地质*，3，4，15—24，1981。
- [2] 方仲景等，苏鲁皖地区晚新生代构造应力场的初步探讨，*地震地质*，1，4，11—24，1979。
- [3] 方仲景等，郯庐断裂带地震活动的地质分析，*地震地质*，2，4，1980。
- [4] 六省(市)震源机制小组，由震源机制解推断苏鲁皖豫地区的现代构造应力场，*地震地质*，3，1，19—28，1981。
- [5] 李方全等，华北及郯庐断裂带应力测量，*岩石力学与工程学报*，1，1，73—86，1982。
- [6] 王仁等，华北地区地震迁移规律的数学模拟，*地震学报*，2，1，32—42，1980。
- [7] 黄宗贤等，构造应力场方向与震源机制解，*地震学报*，2，2，147—151，1980。
- [8] D. P. Mckenzie, The relation between fault plane solution for earthquakes and the direction of the principal stress, *B. S. S. A.*, 59, 591—601.
- [9] 郭增建等，震源物理，地震出版社，1979。
- [10] H. Baumann, Regional stress field and rifting in Western Europe, *Tectonophysics*, 73, 1—3, 105—111.
- [11] Y. Tanaka, et al., Generation mechanism of rock bursts and water-induced earthquakes under the tectonic stress field, *Rock Mechanics in Japan*, 3, 1979.
- [12] L. G. Alexander, et al., The near surface stress field near the site of the 1969 Meckering Earthquake, Western Australia, IASPEI and IAVCEI, Joint general assemblies, Durham, 1977.
- [13] 国家地震局地震地质大队情报室，岩石和地壳的应力测量，地质出版社，1980。
- [14] 海姆森等，地应力测量与研究，丁健民等译，地震出版社，1982。

ON THE DIRECTION OF THE REGIONAL STRESS FIELD IN THE TANLU FAULT REGION OF EAST CHINA BY INVERSION OF THE DATA OF INSITU STRESS MEASUREMENTS

XU SHOUCHUN ZHU ZHENG

(Seismotectonic Brigade, State Seismological Bureau)

ABSTRACT

This paper describes the results of simulated computation along a horizontal section of the Tanlu fault region by the two-dimensional non-linear finite element method. By inversion of the data of in-situ stress measurements the direction of regional stress has been obtained. It is inferred that the direction of the principal compressional stress of the regional stress field is NE 80° — 90° .