

## 广州地区活动断裂的数值模拟<sup>\*</sup>

李 红 陈连旺 李玉江

(中国地震局地壳应力研究所,北京 100085)

**摘 要** 根据广州地区地震地质、地球物理、震源机制解以及 GPS 观测等相关资料,用三维有限元模型,模拟计算了广州地区 4 条断裂的现今活动方式以及库仑破裂应力年累积速率。数值模拟结果显示:广州-从化断裂活动方式为压性逆冲;瘦狗岭断裂西段为右旋走滑,东段以右旋走滑为主兼逆冲;珠江口断裂西支和东支活动方式均以左旋走滑为主兼逆冲。广州-从化断裂和瘦狗岭断裂东段断裂面上的库仑破裂应力年累积速率明显高于瘦狗岭断裂西段和珠江口断裂西支、东支。数值模拟计算结果与该地区地震活动特征相一致。

**关键词** 广州地区;活动断裂;接触摩擦机制;库仑破裂应力年累积速率;地震活动

中图分类号:P315.2

文献标识码:A

## NUMERICAL SIMULATION OF ACTIVE FAULTS IN GUANGZHOU AREA

Li Hong, Chen Lianwang and Li Yujiang

(*Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing* 100085)

**Abstract** On the basis of the related data of seismogeology, geophysics, focal mechanism solutions and GPS a 3D finite element model of active faults in Guangzhou area was built up to simulate recent the motion mode and the Coulomb rupture stress rate p. a. of four active faults in Guangzhou area under the given boundary condition. The computed results are as follows; the motion modes of the south and the north segments of Guangzhou-Conghua fault are both compressive thrust; the motion mode of the west segment of Shougouling fault is right-lateral strike slip while its east segment is dominantly right-lateral strike slip and thrust also; the motion modes of the west and the east branches of Zhujiangkou fault are both left-lateral strike slip and thrust also. The average Coulomb rupture stress rates p. a. of Guangzhou-Conghua fault and the east segment of Shougouling fault are evidently higher than those of the west segment of Shougouling fault and the west and the east branches of Zhujiangkou fault. The simulation results comparatively accord with the seismic activity features in this area.

**Key words:** Guangzhou area; active fault; contact friction mechanism; the Coulomb rupture stress rate p. a. ; seismic activity

## 1 引言

广东地区处于我国东南沿海一带,在新生代构造分区中,地处华南构造区,西北侧受川青和川滇地块南东东和南东向推挤,东南侧有菲律宾海板块北

西向挤压,南边南海扩张终止,故构造应力场的压应力方位从北向南为近东西向渐转为南东东-北西西向<sup>[1]</sup>。从广州的历史地震记录来看,广州地区于 1372 年、1683 年、1824 年和 1915 年发生过 4.75~5 级的地震,多属中小型浅层有感地震,无灾害性和破

\* 收稿日期:2007-12-29

基金项目:地震行业科研专项(200708046)

作者简介:李红,女,1981 年生,硕士研究生,主要从事构造应力应变场的数值模拟工作. E-mail: lihonggood992@126.com

坏性强震(6 级以上)记载<sup>[2]</sup>。随着广州城市化进程逐步加快,因此有必要为城市建设和防震减灾提供一定的参考信息。

为此,本文选择广州-从化断裂、瘦狗岭断裂、珠江口断裂西支和东支等 4 条断裂作为广州地区目标断裂,通过建立包含活动断裂面且考虑断裂面接触摩擦关系的三维有限元模型,模拟了广州地区 4 条活动断裂现今活动方式以及库仑破裂应力年累积速率。

2 广州地区三维有限元模型的建立

2.1 活动断裂的处理

在以往的数值模拟计算中<sup>[3-6]</sup>,一般把活动断裂处理为一软弱带,通过物性参数的选取,降低其强度,使其更加容易变形。如此处理的问题在于:无法模拟地壳介质中存在的不连续间断面,也无法模拟断层面上存在的摩擦机制。而采用接触摩擦分析理论处理活动断裂的非线性有限元模型既能模拟间断面,也能模拟断裂面上存在的摩擦机制。接触摩擦分析单元把断层模拟为一间断面,在一个物理断面上,相对于断层的上下盘建立一接触面,接触面之间遵从库仑滑动定律。一旦断层面上剪应力超过极限摩擦应力,则断层两盘发生相对位错。相对于弱化带单元,接触摩擦单元对于活动断裂的模拟,更加接近于真实的活动断裂,模拟断层活动的结果较好。

本文所建立的三维有限元模型采用接触摩擦分析单元处理活动断裂。三维数值模拟计算利用中国地震局地壳应力研究所地壳动力学数值模拟实验室提供的软硬件系统完成,软件系统为支持并行计算的 PFEPG 有限元程序自动生成系统,硬件系统为 4 节点 PC Cluster。

2.2 有限元模型的几何参数

根据广州区域构造地质学背景,特别是区域构造应力场的作用方向,确定的广州地区活动断裂几何模型如图 1。为避免有限元模型的边界效应对模拟结果的干扰,所选取的几何模型区域远大于目标工作区。西北边界的中心位于 112.74°E,23.35°N,走向为 N24°E;东南边界的中心位于 113.91°E,22.87°N,走向为 N24°E;西南边界的中心位于 113.05°E,22.55°N,走向为 N114°E;东北边界的中心位于 113.60°E,23.67°N,走向为 N114°E;西北边界和东南边界分别长约 136.5 km,东北边界和西南边界分别长约 131 km。模型垂直区域为从地表至莫霍面 34 km 深处。模型区内活动断裂的主要参数见表 1。

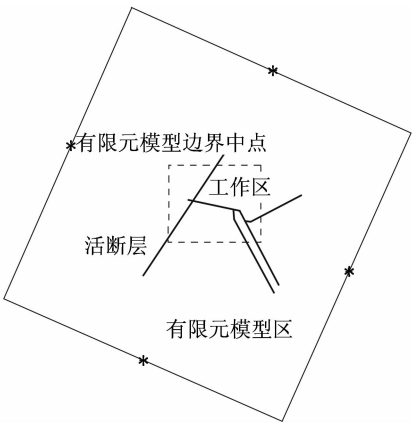


图 1 广州地区活动断裂的几何模型

Fig. 1 Geometric model of active faults in Guangzhou area

表 1 广州地区三维有限元模型活动断裂的几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of active faults in 3D finite element model of Guangzhou area

断层	走向	倾向	倾角(°)	深度(km)
广州-从化断裂	N56.5°E	NWW	60	12
瘦狗岭断裂西段	N78°W	SSW	60	12
瘦狗岭断裂东段	N60°E	SSE	55	12
珠江口断裂西支	N28°W	NEE	65	4
珠江口断裂东支	N27.5°W	NEE	65	4

2.3 模型结构、介质参数及边界约束条件

依据广州地区波速结构<sup>①</sup>,考虑数值模拟计算的需要,有限元模型在纵向上分为 4 层,分别对应上地壳上层、上地壳下层、中地壳和下地壳(表 2),具体介质物性分区及其参数见表 3。

表 2 广州地区地壳分层结构模型

Tab. 2 Crustal layered structure model of Guangzhou area

层数	层厚(km)	速度(km/s)
1	6	5.855
2	6	6.06
3	12	6.27
4	10	6.87

广州地区三维有限元模型如图 2,模型节点数为 10 862,单元数为 57 632。

综合区域构造应力场和 GPS 观测成果<sup>[1-7]</sup>,确定的广州地区活动断裂有限元模型的边界条件如表 4 所示。

3 断裂活动方式的模拟结果

3.1 广州-从化断裂

根据数值模拟结果(图 3),广州-从化断裂南段

① 中国地震局地质研究所,中国地震局工程力学研究所,广东省地震局,广东台山核电项目可行性研究阶段地震安全性评价报告。

表 3 广州地区三维有限元模型介质分区及参数

介质分区	深度 (km)	弹性模量 ( $10^4$ MPa)	泊松比	密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	摩擦系数
上地壳上层断裂带	0 – 6	7.71	0.25	2 700	0.85
上地壳上层其他区域	0 – 6	7.71	0.25	2 700	–
上地壳下层断裂带	6 – 12	8.49	0.255	2 800	0.85
上地壳下层其他区域	6 – 12	8.49	0.255	2 800	–
中地壳全部区域	12 – 24	9.32	0.26	2 900	–
下地壳全部区域	24 – 34	1.15	0.265	3 000	–

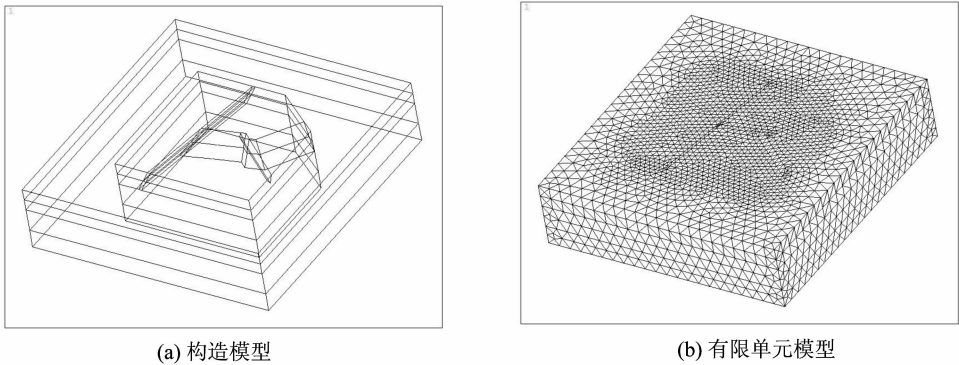


图 2 广州地区三维有限元模型  
Fig. 2 3D finite element model of Guangzhou area

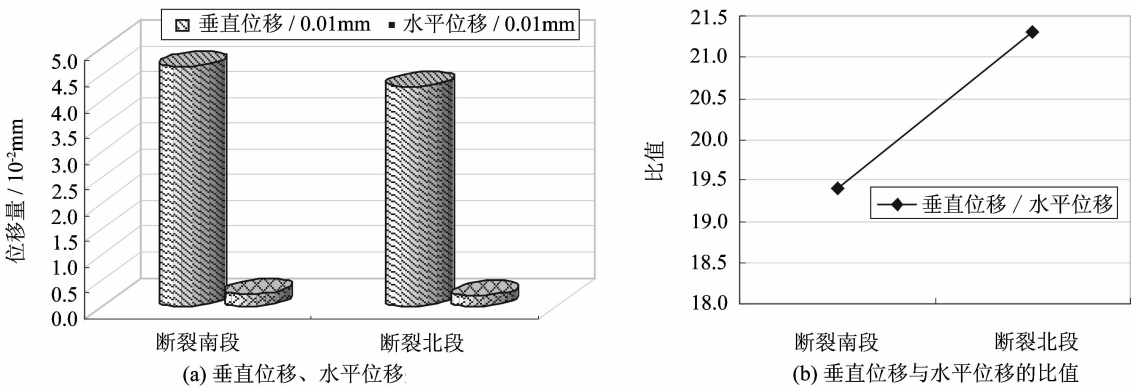


图 3 广州-从化断裂活动方式  
Fig. 3 Motion modes of Guangzhou-Conghua fault

表 4 广州地区三维有限元模型边界条件

Tab. 4 Boundary conditions of 3D finite element model of Guangzhou area

边界	西北边界	东南边界	东北边界	西南边界
东西向位移 ( $10^{-3}\text{m/a}$ )	7.67	6.76	–	–
南北向位移 ( $10^{-3}\text{m/a}$ )	–3.42	–3.01	–	–

的垂直方向的相对位移为 0.046 5 mm,水平方向的相对位移为 0.002 4 mm,垂直位移与水平位移之比约为 19.4。广州-从化断裂北段的垂直方向的相对位移为 0.042 6 mm,水平方向的相对位移为 0.002

mm,垂直位移与水平位移之比约为 21.3。结果表明,广州-从化断裂活动方式表现为压性逆断运动。

3.2 瘦狗岭断裂

图 4 显示瘦狗岭断裂西段垂直方向的相对位移为 0.001 8 mm,水平方向的相对位移为 0.017 8 mm,垂直位移与水平位移之比约为 0.1;瘦狗岭断裂东段垂直方向的相对位移为 0.026 5 mm,水平方向的相对位移为 0.046 2 mm,垂直位移与水平位移之比约为 0.6。结果表明,瘦狗岭断裂西段活动方式表现为右旋走滑断层运动,东段以右旋走滑为主兼具逆断运动。

### 3.3 珠江口断裂西支和东支活动方式的模拟结果

图 5 表明,珠江口断裂西支(化龙断裂)垂直方向的相对位移为 0.005 5 mm,水平方向的相对位移为 0.026 2 mm,垂直位移与水平位移之比约为 0.2;

珠江口断裂东支(文冲断裂)垂直方向的相对位移为 0.007 mm,水平方向的相对位移为 0.025 5 mm,垂直位移与水平位移之比约为 0.3。结果表明,珠江口断裂西支(化龙断裂)和东支(文冲断裂)活动方式均表现为以左旋走滑为主兼逆断运动。

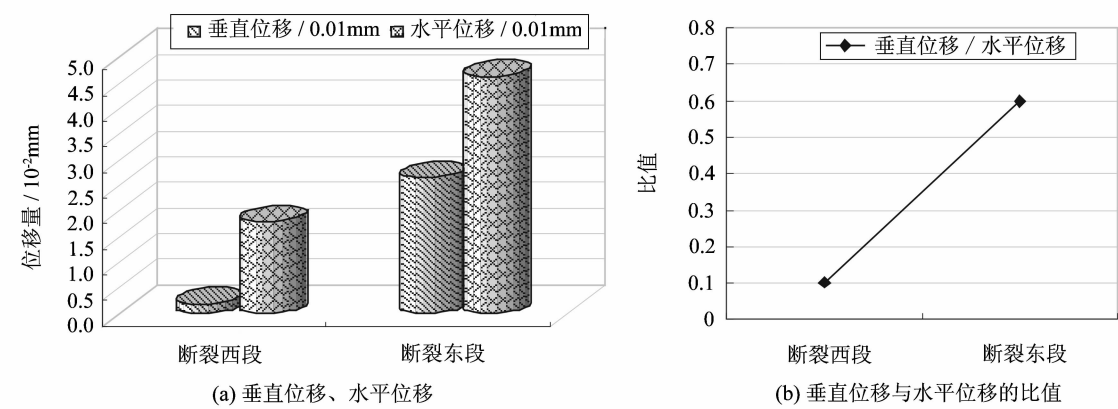


图 4 瘦狗岭断裂西段、东段活动方式  
Fig.4 Motion modes of the west and the east segments of Sougouling fault

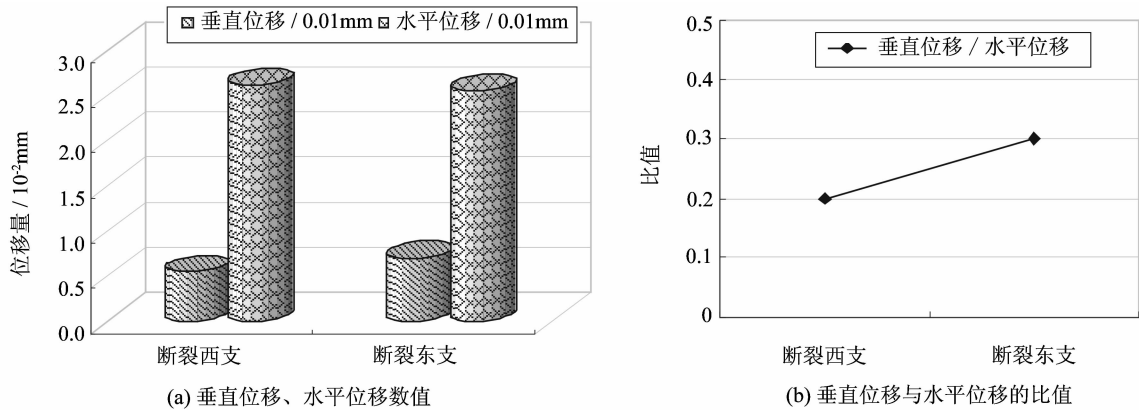


图 5 珠江口断裂西支和东支活动方式  
Fig.5 Motion modes of the west and the east branches of Zhujiangkou fault

### 4 活动断裂面上库仑破裂应力年累积速率

模型中断裂采用接触摩擦机制处理,接触面遵从库仑破裂准则,区域内某一断层面上库仑破裂应力  $\sigma_c$  的定义:

$$\sigma_c = \tau - \mu(\sigma_n - P) - C \tag{1}$$

式中  $\tau$  为断层面上剪应力,  $\sigma_n$  为断层面上正应力(压应力为正),  $\mu$  为内摩擦系数,  $C$  为内聚强度,  $P$  为孔隙压力。假定内摩擦系数与内聚强度保持不变,并引入参数,则库仑破裂应力增量可表示为:

$$\Delta\sigma_c = \Delta\tau - \mu'\Delta\sigma_n \tag{2}$$

式中  $\Delta\tau$  为断层面上剪应力增量,  $\Delta\sigma_n$  为断层面上正

应力增量,  $\mu'$  为视摩擦系数。

利用模拟计算出的应力分量,便可计算出广州地区各活动断裂面上的库仑破裂应力年累积速率<sup>[3]</sup>。根据本文所模拟的活动断裂在地壳中的展布深度约为 10 km 左右,且广州地区地震的震源深度绝大多数小于 10 km,图 6 给出了活动断裂地表以下的中间部位的模拟结果(图例中每段断裂的库仑破裂应力年累积速率值为每段的平均值)。

图 6 的结果显示:广州-从化断裂从南向北分为 4 段,4 段平均库仑破裂应力年累积速率从南向北分别为 0.043 2 bar/a、0.044 7 bar/a、0.043 2 bar/a、0.042 7 bar/a;瘦狗岭断裂西段从西向东两段分别为 0.006 23 bar/a、0.006 18 bar/a;瘦狗岭断裂东段从西向东两段分别为 0.015 7 bar/a、0.010 9 bar/a;

珠江口断裂西支从南向北 3 段分别为 0.005 81 bar/a、0.006 20 bar/a、0.005 52 bar/a;珠江口断裂东支从南向北 3 段分别为 0.00450 bar/a、0.007 48 bar/a、0.006 41 bar/a。

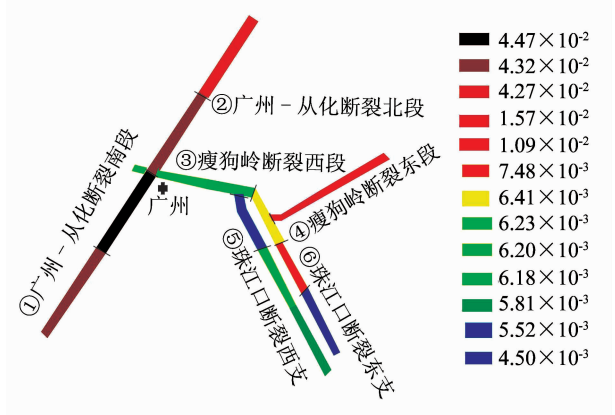


图 6 广州地区活动断裂面上的平均库仑破裂应力年累积速率(单位:bar/a)

Fig. 6 Simulated results of the average Coulomb rupture stress rate p. a. of active faults in Guangzhou area (unit:bar/a)

5 结果分析

垂直位移与水平位移比值的大小决定活动断裂的运动方式,垂直位移与水平位移的比值大于 1 时活动断裂的运动方式以倾滑为主,比值越大,倾滑作用越显著;垂直位移与水平位移的比值小于 1 时活动断裂的运动方式以走滑为主,比值越小,走滑作用越显著。从广州地区活动断裂的垂直位移与水平位移比值的模拟结果(图 7)可以看出:北东向的广州-从化断裂南段和北段活动方式均为压性的逆断层;近东西向的瘦狗岭断裂西段活动方式为右旋走滑,北东东向的瘦狗岭断裂东段活动方式以右旋走滑为主;北西向的珠江口断裂西支和东支活动方式均为以左旋走滑为主。这也反映了本区是受北西西-南东方向的区域挤压应力场的作用,区域应力场主要来源于菲律宾海板块北西方向的俯冲和印度板块在华南地区南东方向推挤的共同作用<sup>[8]</sup>。

活动断裂面上的平均库仑破裂应力年累积速率的模拟结果表明,广州-从化断裂南段比北段值大,最大值位于广从断裂与瘦狗岭断裂交叉切割部位的南侧,这与华南沿海地区水平挤压应力有从南向北逐渐减弱的特点一致<sup>[8]</sup>;瘦狗岭断裂东段也表现出与广州-从化断裂同一量级(为  $10^{-2}$  bar)的库仑破裂应力年累积速率,除受该区构造应力场控制外,与其北东东走向也有一定的关系;瘦狗岭西段与珠江口断裂西支、东支的平均库仑破裂应力年累积速率比广从断裂小一个量级(为  $10^{-3}$  bar),而且珠江口

断裂西支和东支均表现为中段库仑破裂应力年累积速率高于两端的特点。

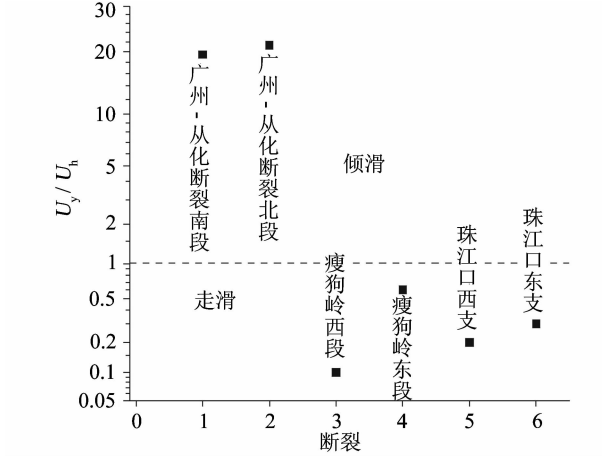


图 7 广州地区活动断裂垂直位移与水平位移的比值

Fig. 7 Ratio of vertical and horizontal displacements of active faults in Guangzhou area

从广州地区 1970 年以来 2 级以上的地震震中分布(图 8)来看,在所模拟的 4 条断裂中,广州-从化断裂和瘦狗岭断裂东段及其附近区域的地震比较多,而瘦狗岭西段与珠江口断裂西支、东支及其附近区域几乎无地震发生;从大于 5 级的历史地震来看,研究区域内分别于 1683 年和 1824 年发生过 5 级地震,震中均位于广从断裂南段东侧及其附近。这与模拟得出的广州-从化断裂和瘦狗岭断裂东段库仑破裂应力年累积速率较高的结果相符。

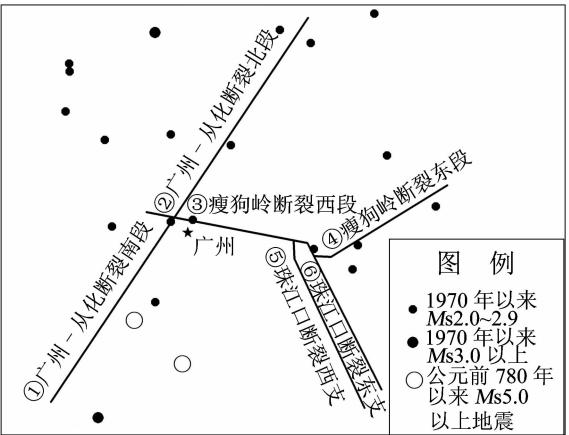


图 8 广州地区地震震中分布图

Fig. 8 Distribution of epicentre of earthquakes distribution in Guangzhou area

依据断裂构造活动性分析,近东西向的瘦狗岭断裂切割最深,发育历史最长,主要形成于加里东期,北西向的珠江口断裂西支和东支主要形成于燕山期,新生性和近期活动性最显著,但其切割最浅<sup>[9]</sup>,北东向的广从断裂形成于印支运动,燕山运动与喜马拉雅运动均有明显的表现,新老程度居

中<sup>[10,11]</sup>。从已发生的地震震级来看,广州地区大震数量很少,多为小震。珠江三角洲地震危险性分析的研究成果认为<sup>[12,13]</sup>,广州地区目前处于地震平静期,未来地震以小震为主,发生较大地震的概率比较小,但不能排除个别事件的发生。

## 6 结论

三维数值模拟结果显示,广州-从化断裂活动方式为压性的逆断层作用;瘦狗岭断裂西段活动方式为右旋走滑作用,东段活动方式以右旋走滑为主且兼逆断作用;珠江口断裂西支和东支活动方式均以左旋走滑为主兼逆断作用。广州-从化断裂和瘦狗岭断裂东段断裂面上的库仑破裂应力年累积速率明显高于瘦狗岭断裂西段和珠江口断裂西支、东支。模拟结果也解释了广州地区地震活动的空间分布特征。

本文的三维有限元模型为比较理想的弹性模型,虽然在深度范围内得出的结果相对可信,但是地壳深部物质的流变特性还有待今后进一步研究。

**致谢** 衷心感谢周庆副研究员、冉洪流副研究员、汪一鹏研究员和杨主恩研究员的指导与帮助!

## 参 考 文 献

- 1 邹和平. 广东沿海新构造运动的大陆动力学背景[J]. 华南地震, 2002, 22(3): 11-19.
- 1 Zhou Heping. The continental dynamic background of the neotectonic movements along the coastal areas of Guangdong province, China[J]. South China Journal of Seismology, 2002, 22(3): 11-19. (in Chinese)
- 2 彭卫平, 刘伟. 广东奥林匹克体育中心场地稳定性评价[J]. 城市勘测. 2005, 2: 44-51.
- 2 Peng Weiping and Liu Wei. Field stability evaluation of Olympic GYM center of Guangdong [J]. Urban Reconnaissance, 2005, 2: 44-51. (in Chinese)
- 3 陈连旺, 等. 1966 年邢台地震引起的华北地区应力场动态演化过程的三维粘弹性模拟[J]. 地震学报, 2001, 23(5): 480-491.
- 3 Chen Lianwang, et al. Three dimensional viscoelastic simulation on dynamic evolution of stress field in North China induced by 1966 Xingtai earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(5): 480-491. (in Chinese)
- 4 陈连旺, 等. 华北地区三维构造应力场[J]. 地震学报, 1999, 21(2): 140-149.
- 4 Chen Lianwang, et al. 3D tectonic stress field of North China [J]. Acta Seismologica Sinica, 1999, 21(2): 140-149. (in Chinese)
- 5 陈化然, 等. 川滇地区应力场演化与强震间相互作用的三维有限元模拟[J]. 地震学报, 2004, 26(6): 567-575.
- 5 Chen Huaran, et al. 3D finite element modeling for evolution of stress field and interaction among strong earthquakes in Sichuan-Yunnan region [J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(6): 567-575. (in Chinese)
- 6 陈连旺, 等. 华北地区断层运动与三维构造应力场的演化[J]. 地震学报, 2001, 23(4): 349-361.
- 6 Chen Lianwang, et al. Evolution of 3D tectonic stress field and fault movement in North China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(4): 349-361. (in Chinese)
- 7 张静华, 等. 华南块体的现今构造运动与内部形变[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(3): 57-62.
- 7 Zhang Jinghua, et al. Contemporary tectonic movement and internal deformation of South China block [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(3): 57-62. (in Chinese)
- 8 蒋维强, 林纪曾, 赵毅. 华南地区的小震震源机制与构造应力场[J]. 中国地震, 1992, 8(1): 36-42.
- 8 Jiang Weiqiang, Lin Jiceng and Zhao Yi. Focal mechanism of small earthquakes and characteristics of tectonic stress field in South China [J]. Earthquake Research in China, 1992, 8(1): 36-42. (in Chinese)
- 9 张虎男, 吴玺虹. 华南沿海主要活动断裂带的比较构造研究[J]. 地震地质, 1994, 16(1): 43-52.
- 9 Zhang Hunan and Wu Qianhong. A Comparative study of main active fault zones along the coast of South China [J]. Seismology and Geology, 1994, 16(1): 43-52. (in Chinese)
- 10 黄日恒. 珠江三角洲地区地震危险性刍议[J]. 华南地震, 1998, 15(1): 64-69.
- 10 Huang Riheng. The earthquake risk of Pearl River Delta region [J]. South China Journal of Seismology, 1998, 15(1): 64-69. (in Chinese)
- 11 严国柱. 广州-从化断裂构造带的基本特征及其形成演化的研究[J]. 华南地震, 1986, 6(4): 8-21.
- 11 Yan Guozhu. Study on basic feature and evolvement of Guangzhou-Conghua fault tectonic zone [J]. South China Journal of Seismology, 1986, 6(4): 8-21. (in Chinese)
- 12 陈国能, 等. 珠江三角洲断裂构造最新活动性研究[J], 华南地震, 1995, 15(3): 16-21.
- 12 Chen Guoneng, et al. Study on the Neotectonics of the faults in the Pearl River Delta area [J]. South China Journal of Seismology, 1995, 15(3): 16-21. (in Chinese)
- 13 杨马陵. 珠江三角洲未来几年地震危险性分析[J]. 华南地震, 2001, 21(4): 14-21.
- 13 Yang Maling. Seismic risk analysis of Pearl River Delta area in some years to come [J]. South China Journal of Seismology, 2001, 21(4): 14-21. (in Chinese)