

罗湖断裂带地应力场三维有限元模拟分析

马淑芝^{1, 2}, 贾洪彪², 易顺民³, 龚淑云³

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 深圳市地质局, 广东 深圳 518028)

摘要: 罗湖断裂带位于深圳—五华断裂带的南西段, 由 13 条 NE 向断层和 6 条 NW 向断层组成, 断裂分布密集。该断裂带位于深圳市区, 周围高楼林立, 其中的 F₈ 断裂被证实为活断层并于 1994 年曾有过异常活动, 因而对于该断裂带的构造活动性进行研究意义重大。在对罗湖断裂带地质特征研究的基础上, 建立起三维地质模型, 采用弹塑性有限元法对断裂带地应力场进行数值模拟。根据模拟结果, 分析罗湖断裂带地应力的分布特征、断层存在对地应力场的影响, 并在此基础上对断裂带的构造稳定性进行分析。研究表明, 断裂带的存在对地应力大小、方向、连续性、应力集中程度有明显影响; 局部位置存在塑性破坏区, 构造稳定性稍差, 存在进一步活动的趋势, 尤以 F₈, F₉ 断裂北西段为甚。由于塑性破坏的发生会导致应力某种程度的释放, 从而使应力集中程度较低, 断层的活动将以蠕滑方式为主, 不足以形成中强地震。

关键词: 数值分析; 罗湖断裂带; 三维地质模型; 有限元; 地应力场

中图分类号: O 319

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3898 - 06

ANALYSIS OF GEOSTRESS FIELD SIMULATION IN LUOHU FAULT ZONE WITH 3D FINITE ELEMENT METHOD

MA Shuzhi^{1, 2}, JIA Hongbiao², YI Shunmin³, GONG Shuyun³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

3. Shenzhen Geology Bureau, Shenzhen, Guangdong 518028, China)

Abstract: Luohu Fault Zone is a part of Shenzhen—Wuhua Fault Zone and composed of 13 faults trending in NE direction and 6 faults trending in NW direction in the area of 38 km², where faults are very dense. This fault zone is inside of Shenzhen City where many tall buildings locate, and F₈, a fault of Luohu Fault Zone, is an active fault which acted in 1994. So it is very important to study the crustal stability of this fault zone. The geologic conditions of this zone are introduced firstly, then the 3D geological model is built and the numerical modeling of geostress field is finished with the elastoplastic finite element method. According to the modeling results, the characters of the geostress and the influence of the faults on the geostress field are expounded and the tectonic stability of the area is analyzed. The study shows that these faults have remarkable effect on the magnitude, direction, continuity and concentration degree of the geostress, and the tectonic stability in a few sites is bad because of the existence of plastic failure zone. It is very serious in the area which is enclosed by F₈, F₁₃, F₂₀₅ and F₂₀₆, because the plastic failure can induce the stress relief and the decrease of the stress concentration degree, the main action manner of the faults is creeping slide and middle or strong earthquake will not happen.

Key words: numerical analysis; Luohu Fault Zone; 3D geological model; finite element; geostress field

收稿日期: 2006 - 04 - 06; **修回日期:** 2006 - 07 - 24

作者简介: 马淑芝(1974 -), 女, 博士, 1995 年毕业于中国地质大学水文地质及工程地质专业, 现任副教授, 主要从事岩土工程和地质工程专业的教学与研究工作。E-mail: maszyy@163.com

1 引言

罗湖断裂带位于深圳市罗湖区和上步区, 在约 38 km² 的范围内共分布有 19 条主要的断裂, 它们穿越高楼林立的市区和东水西调生命线工程, 历史上曾有多次微震、弱震发生。位于罗湖断裂带中心的 F₈ 断层被证实为活断层。因此, 罗湖断裂带的构造活动性对深圳市的土地资源开发、城市工程建设安全和社会经济发展将产生极大的影响, 而断裂带地应力场对于分析断裂构造稳定性意义十分重大。本文采用三维有限元数值模拟, 对罗湖断裂带的地应力场进行模拟, 为区域构造稳定性和断裂构造活动性的评价提供依据。

2 罗湖断裂带概况

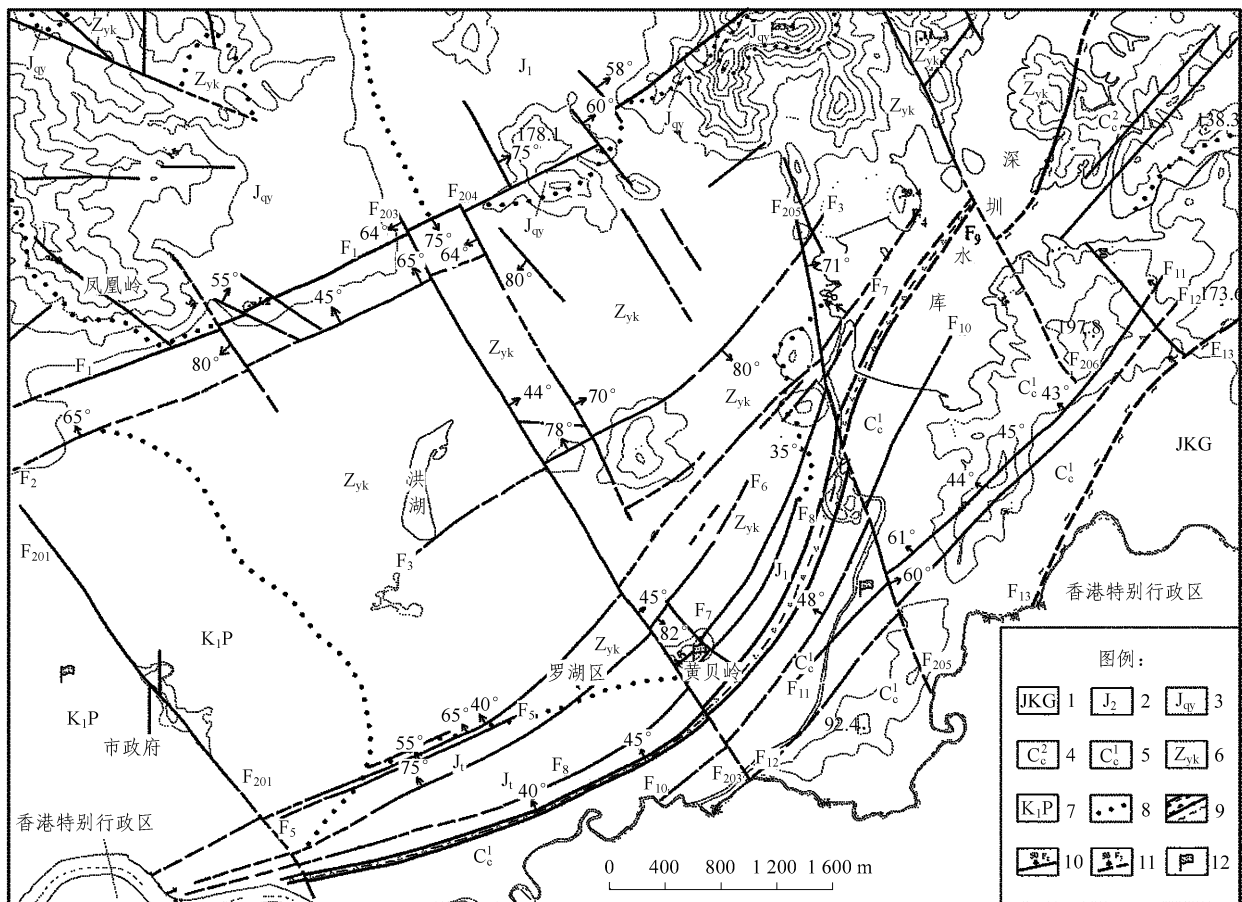
罗湖断裂带位于中国东南沿海大陆边缘的粤东

莲花山断裂带的北西支——深圳—五华断裂带的南西段。深圳—五华断裂带总体呈 NE 向, 进入深圳地区后分成企岭吓—九尾岭、横岗—罗湖、石井岭—田螺坑 3 条大致平行的 NE 向断裂组^[1, 2]。

罗湖断裂带所处位置为低山丘陵及台地平原区, 大部分被第四系及建筑物覆盖。经地质调查、物探及钻探查证, 断裂带由 19 条主要断层组成, 其中 NE 向断层 13 条(编号为 F₁~F₁₃), NW 向断层 6 条(编号为 F₂₀₁~F₂₀₆), 见图 1。NE 向的 13 条断层分属于上述 3 个断裂组。

在这 19 条断层中, NE 向的 F₁~F₁₃ 断层被 NW 向的 F₂₀₁~F₂₀₆ 断层穿切错断, 水平断距一般为 30~10 m。而 F₂₀₁~F₂₀₆ 断层规模相对较小, 由于切割了 F₁~F₁₃ 断层, 因此形成晚于 F₁~F₁₃ 断层。表 1 列出了各断层特征。

位于断裂带轴心部位的 F₈ 断层属现今中速活动断裂^[3], 年趋势活动速率为 0.35~0.45 mm/a, 1994 年 F₈ 断层附近居民点曾出现地热异常, 跨断层的向



1—上侏罗统高基坪群; 2—中侏罗统塘厦组; 3—中侏罗统桥涌组; 4—下石炭统测水组上段; 5—下石炭统测水组下段; 6—震旦系云开群; 7—燕四期花岗岩; 8—地层界线; 9—压碎岩及构造角砾岩片理化带; 10—实测断层产状及编号; 11—推测断层产状及编号; 12—地应力监测站

图1 罗湖区地质略图

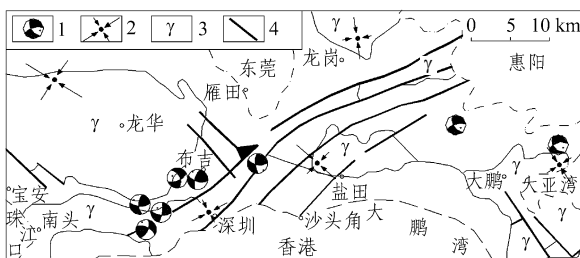
Fig.1 Geologic map of Luohu Area

表 1 断层特征表
Table 1 Features of faults

编号	规模		断层面产状		
	长/km	宽/m	走向/(°)	倾向	倾角/(°)
F ₁	3.9	10~42	60~65	SE	80~55
F ₂	4.0	57	60~70	NW	52~65
F ₃	3.7	2.4~20	40~50	NW	48~65
F ₄	7.6	2~12	45~70	NW	45~48
F ₅	1.8	5~8	65	NW	55~65
F ₆	5.2	3.5~20	35~60	NW	70~75
F ₇	2.8	1~12	20~40	NW	30~40
F ₈	5.6	6~30	25~70	NW	38~42
F ₉	7.5	40~200	40~70	NW	25~70
F ₁₀	3.8	2~10	30~48	NW	40~48
F ₁₁	5.0	2~20	35	NW	41~50
F ₁₂	4.5	3~5	30~35	NW	60~80
F ₁₃	2.0	2 000 (影响带)	60	NW	40
F ₂₀₁	>5.0	4~20	320~330	SW	62~73
F ₂₀₂	1.5	-	317	NE	80
F ₂₀₃	5.0	0.7~2.1	310~320	NE	44~65
F ₂₀₄	7.6	2~12	45~70	NW	45~48
F ₂₀₅	1.8	5~8	65	NW	55~65
F ₂₀₆	5.2	3.5~20	35~60	NW	70~75

西村一栋 6 层楼房开裂。

根据深圳地区及周边区域地应力测量和地震震源机制解资料，区内总体最大水平应力方向为 N50° W，平均 3.5 MPa，最小水平应力方向 NE40°，平均 3.0 MPa(见图 2)^[2, 4, 5]。



1—震源机制解(黑色为引张区，白色为压缩区，点为 P 轴)；2—地应力测量点，箭头长短表示该方向主压应力的相对大小；3—花岗岩类；4—断裂

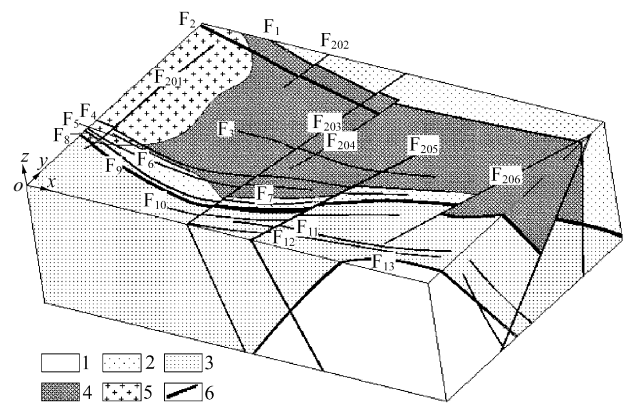
图 2 深圳地区压磁电感法地应力测量结果^[2]

Fig.2 Results of geostress measured with piezo-magnetic inductance method in Shenzhen Area^[2]

3 三维有限元模拟

3.1 地质模型

考虑深圳地区构造应力场特征，根据有限元数值模拟的需要，建立地质模型和计算模型^[6]。所建模型范围为：沿最小水平应力方向(N40°E)取 8 200 m，以该方向作为 x 轴正方向；沿最大水平应力方向(N50°W)取 5 500 m，以该方向作为 y 轴正方向；由地表向下取 2 500 m，以竖直向上为 z 轴正方向。整个模型平面面积为 45.1 km²，体积为 113 km³，如图 3 所示。如此建模和选取坐标系的目的是为了便于在模型边界施加地应力——因为 x 和 y 轴分别平行于最小水平地应力和最大水平地应力方向，所以最小水平地应力应平行于 x 轴施加到 yoz 平面上，最大水平地应力应平行于 y 轴施加到 xoz 平面上。



1—上侏罗统火山碎屑岩及熔岩；2—中侏罗统砂岩、凝灰岩；
3—下石炭统砂岩、页岩；4—震旦系变粒岩、片岩及砂岩；
5—燕山四期花岗岩；6—断层

图 3 三维地质模型

Fig.3 Three-dimensional geological model

3.2 边界条件

由上述地质模型向计算模型转化时，边界条件定义为：底边界 z 方向约束，北西边界 y 方向约束，东北边界 x 方向约束，南东和西南边界为已知应力边界，地面为自由边界。

已知应力边界实际上要确定边界上的地应力。虽然深圳地区及周边有地应力实测数据，但这些测点多位于地表浅部(多数深度在 200 m 内)，且分布零散，难以直接形成整个模型的应力边界条件，需要进行处理。

一般情况下，地应力主要由自重应力和构造应

力两部分构成^[7], 即地应力 σ 可表示为

$$\sigma = \sigma_0 + \sum_{i=1}^n c_i \sigma^i \quad (1)$$

式中: σ_0 为自重应力; $\sum_{i=1}^n c_i \sigma^i$ 为构造应力, c_i 和 σ^i 分别为每类单位构造运动引起的应力及其相应的有效构造运动的大小, n 为基本构造运动模式的种类。

用有限元法计算自重应力是比较准确的^[7], 可以先不考虑构造应力, 将边界全设置为约束边界, 对整个模型施加自重应力, 求解出此边界节点约束力, 作为自重应力在应力边界上各节点的荷载分量。

对于构造应力, 可以认为在有限的区域范围和有限的深度范围内, 除地表附近构造应力因释放较小外, 其他位置构造应力变化不大。因此可以根据各测点的地应力实测结果剔除自重应力后作为模拟区的构造应力, 通过等效荷载移植确定出构造应力在应力边界上各节点的荷载分量, 再按式(1)进行应力叠加, 得到应力边界上的最终等效节点荷载。

3.3 计算参数

模拟区岩土介质类型可分为 6 种, 其物理力学见表 2。

表 2 介质种类划分及其物理力学参数

Table 2 Classification of media and their physico-mechanical parameters

介质类型	重度 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦 角($^\circ$)	抗拉强 度/MPa
上侏罗统火山碎屑岩及熔岩	23.5	4.0	0.25	0.42	48.0	0.5
中侏罗统砂岩、凝灰岩	23.9	1.9	0.28	1.02	56.5	0.5
下石炭统砂岩、页岩	24.1	1.2	0.28	0.35	41.0	0.4
震旦系变粒岩、片岩、砂岩	24.2	4.7	0.27	1.13	45.0	0.5
燕山四期花岗岩	25.0	4.0	0.27	2.08	45.0	0.5
断裂带	24.2	1.2	0.30	0.11	36.0	0.4

3.4 网格剖分和有限元计算

对上述模型进行有限元计算网格剖分, 共剖分 29 642 个节点, 163 171 个单元。岩体和断裂均采用实体单元, 断裂带按实际的平均宽度建模, 个别宽度小于 5 m 的按 5 m 处理。由于缺少深部的断裂产状, 深部的断裂展布按浅部的产状和总的地质特征

进行推测延伸。

有限元网格剖分和计算均采用国际上通用的 ANSYS 软件, 按照弹塑性力学介质模型进行计算, 塑性破坏判断依据 Drucker-Prager 判据。

3.5 模拟结果

图 4~8 为部分模拟结果。依据模拟结果可知, 模拟区内最大主应力方向在浅部多为近水平向, 深部多为竖直向。总体上水平最大应力和最小应力方向与区域一致, 但在部分位置, 特别是中西部发生不同程度的偏转, 且不同部位偏转情况也不一致。

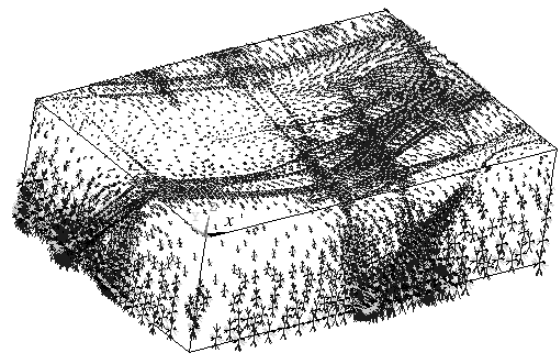


图 4 主应力矢量图

Fig.4 Vectogram of principal stresses

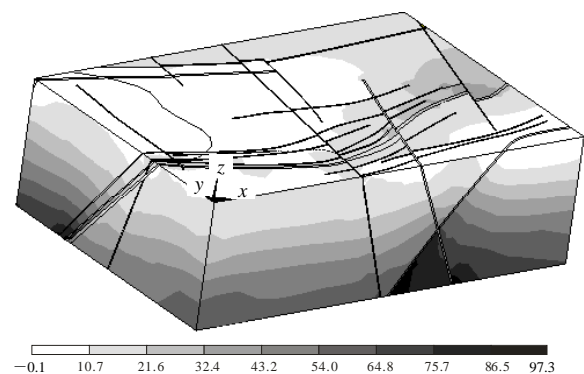


图 5 最大主应力等值线图(单位: MPa)

Fig.5 Contour of the maximum principal stress(unit: MPa)

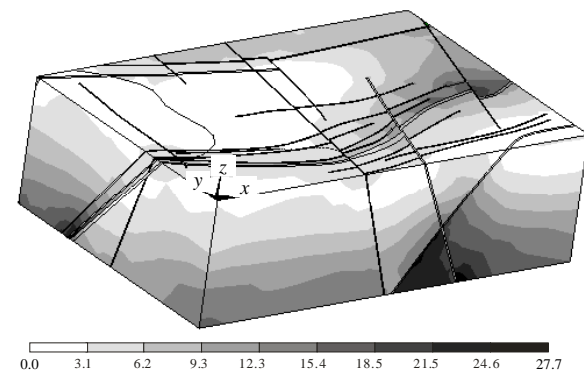


图 6 最大剪应力等值线图(单位: MPa)

Fig.6 Contour of the maximum shear stress(unit: MPa)

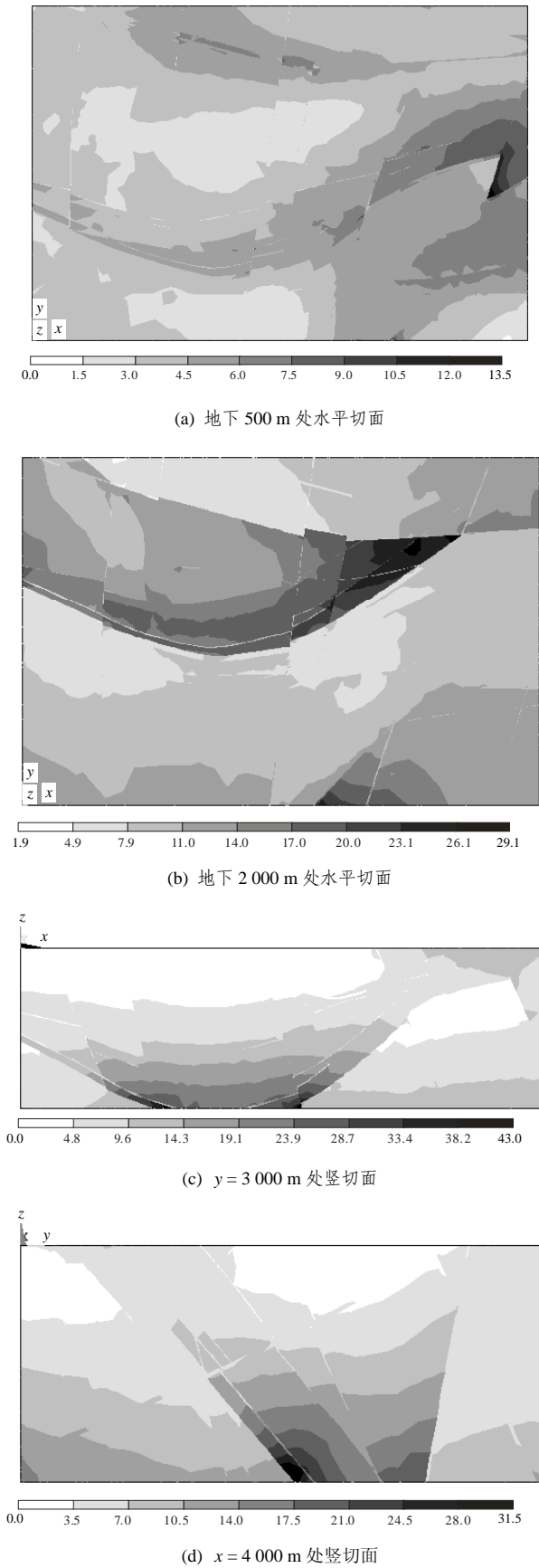


图7 切面最大剪应力等值线图(单位: MPa)

Fig.7 Contours of the maximum shear stress of different sections(unit: MPa)

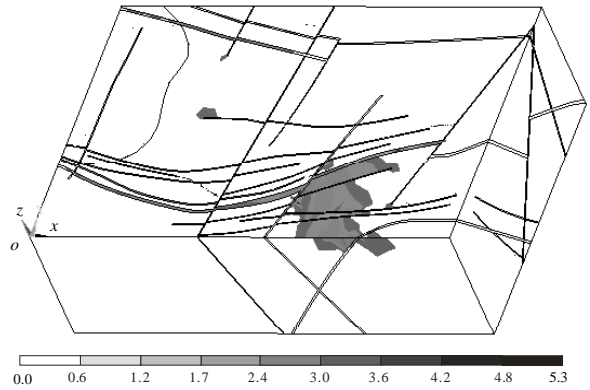


图8 塑性应变密度(单位: 10^{-3})

Fig.8 Contour of plastic stain intensity(unit: 10^{-3})

断层带两侧应力大小往往不连续, 说明断层对应力传递有明显的阻隔作用^[8, 9]。在断层带的某些部位, 应力集中特别明显, 特别是 F_8 , F_9 断层与 F_{206} 断层相交汇的位置附近, 应力集中特别强烈。

最大剪应力受到断层的明显影响^[10], 断层带两侧最大剪应力大小往往不连续。除个别位置外, 断层上盘最大剪应力明显大于下盘, 且多在断层交汇处形成剪应力集中。从平面上对比, 沿 F_8 断层两侧比其他位置要大, 且在其北西端达到最大。从剖面上对比, 深部的最大剪应力较大。根据模拟结果, 发生塑性破坏的区域极为有限, 主要分布于 F_8 , F_9 和 F_{205} , F_{206} 的交汇处(见图 8), 1985 年发震($M_L=1.2$)的黄贝岭^[2]即位于塑性区北侧的边缘。

比较各断层的影响, F_8 , F_9 断层的影响最为巨大, 不仅沿断层两侧应力跳跃极大, 而且其北东端应力集中强烈, 模拟得到的绝大部分塑性区都分布于该断层带上, 说明该断层带在地应力作用下, 局部已经处于塑性破坏状态, 因此蠕滑破坏在所难免。另一方面, 由于蠕滑破坏导致应力某种程度的释放从而使应力集中程度较低, 断层的活动不足以形成中~强地震。

4 结 论

罗湖断裂带断层分布密集、构成复杂, 对其构造活动性和区域稳定性影响大, 分析研究困难, 本文采用三维有限元数值模拟, 对罗湖断裂带的地应力场进行模拟, 得到一些有益的认识, 为区域构造稳定性的评价提供依据, 是一条行之有效的途径。

参考文献(References):

[1] 广东省地质矿产局. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社,

- 1988.(Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangdong Province. Geological Annals of Guangdong Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.(in Chinese))
- [2] 地质矿产部《深圳市区域稳定性评价》编写组. 深圳市区域稳定性评价[M]. 北京: 地质出版社, 1991.(Compilation Group of Assessment of the Crustal Stability of Shenzhen City, Ministry of Geology and Mineral Resources. Assessment of the Crustal Stability of Shenzhen City[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.(in Chinese))
- [3] 王建军, 张鸿旭, 李荣强, 等. 深圳市罗湖断裂带活动性及建筑物安全监测系统设计[J]. 灾害学, 2002, 17(3): 14 - 20.(Wang Jianjun, Zhang Hongxu, Li Rongqiang, et al. Activity of Luohu Fault Zone and design of building safety monitoring system in Shenzhen City[J]. Journal of Catastrophology, 2002, 17(3): 14 - 20.(in Chinese))
- [4] 康镇江, 李作明. 深圳(罗湖)—香港(元朗)断裂带的特征及其稳定性研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(增): 168 - 174.(Kang Zhenjiang, Li Zuoming. The characteristic and stability studies on Shenzhen(Luohu)—Hong Kong(Yuen Long) fault belt[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(Supp.): 168 - 174.(in Chinese))
- [5] 陈伟光, 赵红梅, 李富光, 等. 深圳市断裂构造的活动性及其对地质环境的影响[J]. 热带地理, 2001, 21(1): 45 - 50.(Chen Weiguang, Zhao Hongmei, Li Fuguang, et al. Fault activities and their influence upon geologic environment in Shenzhen City[J]. Tropical Geography, 2001, 21(1): 45 - 50.(in Chinese))
- [6] 唐诗佳, 彭恩生, 孙振家, 等. 断裂构造三维模型研究评述[J]. 地质科技情报, 1999, 18(2): 23 - 26.(Tang Shijia, Peng Ensheng, Sun Zhenjia, et al. Overview about three-dimensional model studying in fault[J]. Geological Science and Technology Information, 1999, 18(2): 23 - 26.(in Chinese))
- [7] 朱伯芳. 岩体初始地应力反分析[J]. 水利学报, 1994, (10): 30 - 35.(Zhu Bofang. Back analysis of initial stresses in rock masses[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, (10): 30 - 35.(in Chinese))
- [8] 苏生瑞. 断裂构造对地应力场的影响及其工程意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 296.(Su Shengrui. Effect of fractures on rock stresses and its significance in geological engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 296.(in Chinese))
- [9] Su S, Stephansson O. Effect of a fault on in-situ stresses studied by the distinct element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(8): 1 051 - 1 056.
- [10] 李天斌, 徐进, 任光明. 西安地区断裂构造活动性的地质力学模拟研究[J]. 工程地质学报, 1994, 2(3): 34 - 42.(Li Tianbin, Xu Jin, Ren Guangming. Study on geomechanical modeling of the fault activities in Xi'an Area[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(3): 34 - 42.(in Chinese))