

郯庐断裂带山东段深孔地应力测量 及其现今活动性分析

张 鹏^{1,2}, 秦向辉^{1,2}, 丰成君^{1,2}, 孙炜锋^{1,2}, 谭成轩^{1,2}

(1. 中国地质科学院 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 已有的地表调查和 GPS 位移测量、深部震源机制等研究结果表明, 郯庐断裂带山东段现今活动性表现为顺时针压扭性活动特征。为揭示郯庐(郯城-庐江)断裂带山东段地表和深部之间地壳浅表层日本大地震发生后的现今地应力状态和活动特征, 在鲁东北部花岗岩地区开展了 600 m 的钻探工程与地应力测量工作。钻探岩芯编录初步揭示地壳浅表层岩体结构特征, 随深度系统的地应力测量结果表明, 现今水平主应力起主导作用, 易于断层走滑作用发生, 且现今最大水平主应力方向为近东西向, 反映出郯庐断裂带山东段现今活动特征为压性兼右旋走滑, 与地表和深部已有研究成果相吻合。研究成果为郯庐断裂带山东段现今活动性研究补充了新的资料。

关 键 词: 郯庐断裂带; 水压致裂; 地应力测量; 库仑准则; 走滑断层

中图分类号: TV 554

文献标识码: A

In-situ stress measurement of deep borehole in Shandong segment of Tan-Lu fracture belt and analysis of its activity

ZHANG Peng^{1,2}, QIN Xiang-hui^{1,2}, FENG Cheng-jun^{1,2}, SUN Wei-feng^{1,2}, TAN Cheng-xuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Analysis of earth surface displacement using GPS and deep focal mechanism show that present activity in the Shandong segment of Tan-Lu (Tancheng-Lujiang) fracture zone exhibit a clockwise compression-torsion characteristics in between the shallow earth crust and deep zone of the region after the 2008 Japan earthquake. Data was gathered from 25 in-situ stress sensors installed at varying intervals along the total depth of single 600 m borehole located inside a granite rich region at the northeast part of Shandong. Combined with in-situ stress data, core sampling of the structural features of shallow earth crust rock formations reveals that current horizontal principal stresses play a leading role in strike-slip fault activity. Moreover, measured maximum principle in-situ stress mechanics trend towards the east-west direction and reflects present compressive properties, with dextral slip activity, of the Shandong segment. Including pre-existing data of surface and subterranean experiments, this new data will allow us to open new research avenues for understanding the present active features of the Shandong segment of the Tan-Lu fracture belt.

Key words: Tan-Lu fracture belt; hydraulic fracturing; in-situ stress measurement; Coulomb criterion; strike-slip fault

1 引 言

地壳应力状态是地球动力学研究的基本问题之一, 了解地应力状态有助于研究断裂的现今活动特征, 同时对工程建设、地震预测、预报等也具有十分重要的意义^[1-4]。

2011 年 3 月 11 日日本本州东海岸附近海域(北纬 38.1°, 东经 142.6°)发生 9.0 级大地震对中国

东部大陆产生了较大的影响, 据地表 GPS 同震位移测量表明, 郯庐断裂带东、西两侧位移均显著增大, 并且其位移差异显著, 东侧位移明显大于西侧(见图 1^[5]), 反映出该重大地质事件发生过程中太平洋板块构造活动对郯庐断裂带活动起主导作用, 在郯庐断裂带地表产生同震张性应力环境。已有研究成果表明, 在 2011 年 3 月 11 日大地震发生之前, 由于受印度板块区域构造作用, 郯庐断裂带表现为压

收稿日期: 2012-05-24

基金项目: 中国地质调查局项目“北京地区主要活动断裂工程地质稳定性评价与地应力测量”资助(No. 1212011120070); 国土资源部公益行业专项项目“我国东部沿海核电站区域地壳稳定性与地质灾害研究”资助(No. 201211096)。

第一作者简介: 张鹏, 男, 1986 年生, 硕士, 研究实习员, 主要从事为地应力测量与监测、岩石力学、构造应力场等方面的研究。

E-mail: zhangpeng0713@sina.com

性顺扭应力环境,地震发生之后实测地应力表明,郯庐断裂带仍处于压性顺扭应力环境。

郯庐断裂带是我国东部现今仍在活动的一条巨大构造变形带,总长度约 3 500 km,由南向北依次经过安徽庐江、江苏宿迁、山东郯城、渤海、沈阳,之后分为东西两支,西支为依兰—伊通断裂带,东支为密山—抚顺断裂带(敦化—密山断裂带)^[6-7]。郯庐断裂所穿越地区人口密集、经济发达,并且富含大量的矿产资源。已有研究成果表明,郯庐断裂带现今仍处于活动状态,地震活动也从未间断,如 1668 年 7 月 28 日在山东郯城发生的 8.5 级大地震,波及全中国,是我国东部有记录以来发生的最大地震;1888 年渤海湾 7.5 级地震;1974 年海城 7.4 级地震;1975 年海城 7.3 级地震等等^[8]。一直以来,郯庐断裂带的现今活动对中国大陆东部城市建设和经济发展有重要的影响,在日本大地震导致区域构造应力环境发生变化的背景下对郯庐断裂带的现今活动特征进行新的研究,对于中国东部大陆的城市安全和经济发展具有重要的意义。

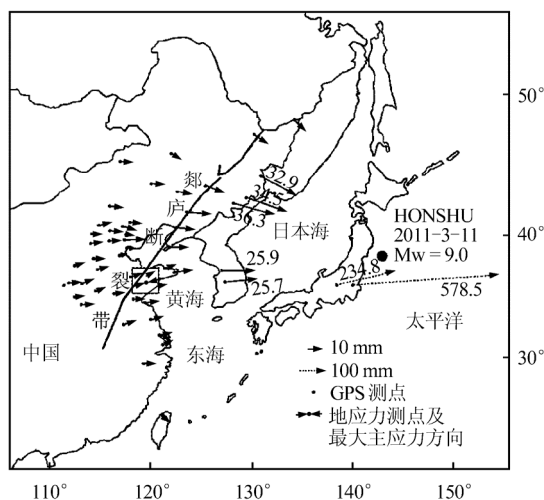


图 1 日本震后中国东部大陆 GPS 位移测量结果^[5]
Fig.1 Measurement results of GPS displacement in Eastern China after Japan's earthquake^[5]

2 郯庐断裂现今活动性研究现状

针对郯庐断裂带的活动特性,许多学者先后利用不同的技术手段,开展了比较深入的工作,取得了很多研究成果^[9],主要有地壳浅表层原地应力测量、地震切片、地表 GPS 位移测量、遥感图像解译、深部震源机制解研究等等。1979 年,我国地震地质大队在郯庐断裂带进行了原地应力测量,结果表明,最大水平主应力为近东西向的压应力,由于采用的测量方法受当时技术条件的限制与约束,测量深度

均在 30 m 以内的浅层^[10]。在郯庐断裂西侧渤海海域莱州湾地区,利用三维地震水平切片的直接证据,揭示新近纪以来郯庐断裂存在明显的右旋走滑的拖拽现象^[11]。从遥感图像解译可以看出,郯庐断裂带山东段具有水系错断、地震陡坎、冲沟、线性构造等一系列构造地貌现象,分析认为,郯庐断裂带山东段具有右旋走滑运动的特征^[12]。地表 GPS 测量结果反映出华北亚板块整体的运动方向具有自西向东、由北向南顺时针偏转趋势,并且郯庐断裂带南段东侧相对于西侧向 SE 方向移动,表现为右旋运动趋势^[13]。依据 1973—1979 年鲁、豫、皖、苏 4 省中小地震震源机制结果的统计分析,得到该区的地震应力场分布为 P 轴近东西向, T 轴近南北向,且 P 、 T 轴的仰角均较小,表明郯庐断裂中段为走滑断层,且具有右旋运动趋势^[14]。

以上各种方法的研究结果均表明,郯庐断裂山东段的现今活动特征为右旋走滑趋势,但仅限于地表(或近地表)和深部地球物理与震源机制的研究还显不足,两者之间缺少地壳浅表层的直接实测结果。本文通过山东省平度市深孔(600 m)地应力测量钻探工程和随深度系统地应力状态实测,揭示了郯庐断裂带山东段地壳浅表层的现今地应力状态,为郯庐断裂带现今(尤其是 2011 年 3 月 11 日日本大地震发生之后)活动性分析提供了新的资料,完善了郯庐断裂带山东段由地表到地壳浅表层到地壳深部的研究工作,对于分析郯庐断裂带现今活动现状及其发展趋势、评价中国东部大陆区域地壳稳定性均具有重要的意义。

3 深孔地应力测量及结果分析

3.1 深孔地应力测量

为分析郯庐断裂山东段 2011 年 3 月 11 日日本大地震发生后的现今活动特征及潜在发展趋势,在鲁东北部平度市崔召镇路子口村(GPS: 120° 00'47"E, 36° 51'48", 海拔深度 $H = 150$ m)花岗岩体上确定了一个深孔地应力测量点,该钻孔位于郯庐断裂东侧约 20 km 附近,属于郯庐断裂带中部山东段,历史上 1668 年 7 月 25 日在其西南山东郯城发生了 M_s 8.5 级大地震,属于郯庐断裂关键构造部位之一,该钻孔已完成 600 m 的钻探工程与随深度系统的地应力测量工作。

本次测量采用国际岩石力学学会推荐的地应力测量方法——水压致裂法^[15-17]。该方法假设围岩为均质、各向同性、线弹性体、岩体完整;岩体中的一个主应力方向为垂直的等条件,根据钻探岩心的

岩石质量指标以及岩石的力学性质选取地应力测试段进行水压致裂地应力测量, 为了提高各压力参数的取值精度以及相关数据的可比性, 采用国际岩石力学学会推荐的 5 种方法之一的 dt/dp 法 (水压、致裂测量数据的一种处理方法, dp 为瞬时关闭压力) 进行测量数据的处理^[18-20]。该钻孔周围地势平坦, 在孔深 65~542 m 范围内, 岩性均为花岗岩, 共成功进行了 25 段水压致裂地应力测量。另外, 根据压裂测试曲线的初步分析, 考虑测试结果随深度分布的合理性和科学性, 选取了 5 个压裂深度段进行印模定向。首先, 将定向印模器系统置于测量深度上, 地面水泵加压将印模器膨胀, 使裂缝重新张开, 半硫化橡胶挤入裂缝, 印模器表面就保留了裂缝的痕迹, 定向仪自动记录定向器极限的方位。再通过印痕, 基线和磁北针之间的关系, 计算出裂缝方位, 即最大水平主应力的方位。通过测定水压裂缝的方位, 确定钻孔附近地壳浅表层现今最大主压应力方向, 水压致裂与印模测试结果如图 2、3 和表 1 所示。表中, P_b 为岩石原地破裂压力; P_r 为破裂面重张压力; P_s 为破裂面瞬时关闭压力; P_H 为静水柱压力; P_0 为孔隙压力; T 为岩石抗拉强度; S_h 为水平最小主应力; S_H 为水平最大主应力; S_v 为根

据上覆岩石埋深计算的垂向主应力 (岩石重度取 26.5 kN/m^3)。

3.2 地应力测量结果分析

通过对该钻孔岩芯系统编录和钻孔附近地表花岗岩体露头观察, 由于受郯庐断裂现今活动性影响, 地表岩体和钻孔岩芯高角度 (一般大于 45°) 节理裂隙发育。地应力测量结果分析可知, 由于主要受岩体结构的影响, 地应力值大小在同等深度、类似岩性等条件下与其他地区相比较属于正常水平, 另外, 钻孔周围地势开阔平坦, 该钻孔也没有出现应力集中现象 (见图 2 和表 1)。3 个主应力关系为 $S_H > S_v > S_h$, 说明该地区地壳浅表层现今构造活动以水平运动为主; 平度市现今最大水平主应力方向印模定向结果表明, 水压致裂形成的裂缝印模清晰, 纵向延伸较长且为对称的竖直裂缝, 基本贯穿整个压裂段, 5 个深度段的印模定向试验较一致地反映该钻孔附近地壳浅表层现今最大主压应力方向为近东西向, 与震源机制解所反映的该区域现今构造应力场方向和其他研究成果基本一致, 见图 3 和表 1。图 3 中, PL 为破裂线; JX 为基线, 它们在印模试验里面, 一个是基线 (定方向用的), 另外一个为印模痕迹 (水压致裂破裂的痕迹)。

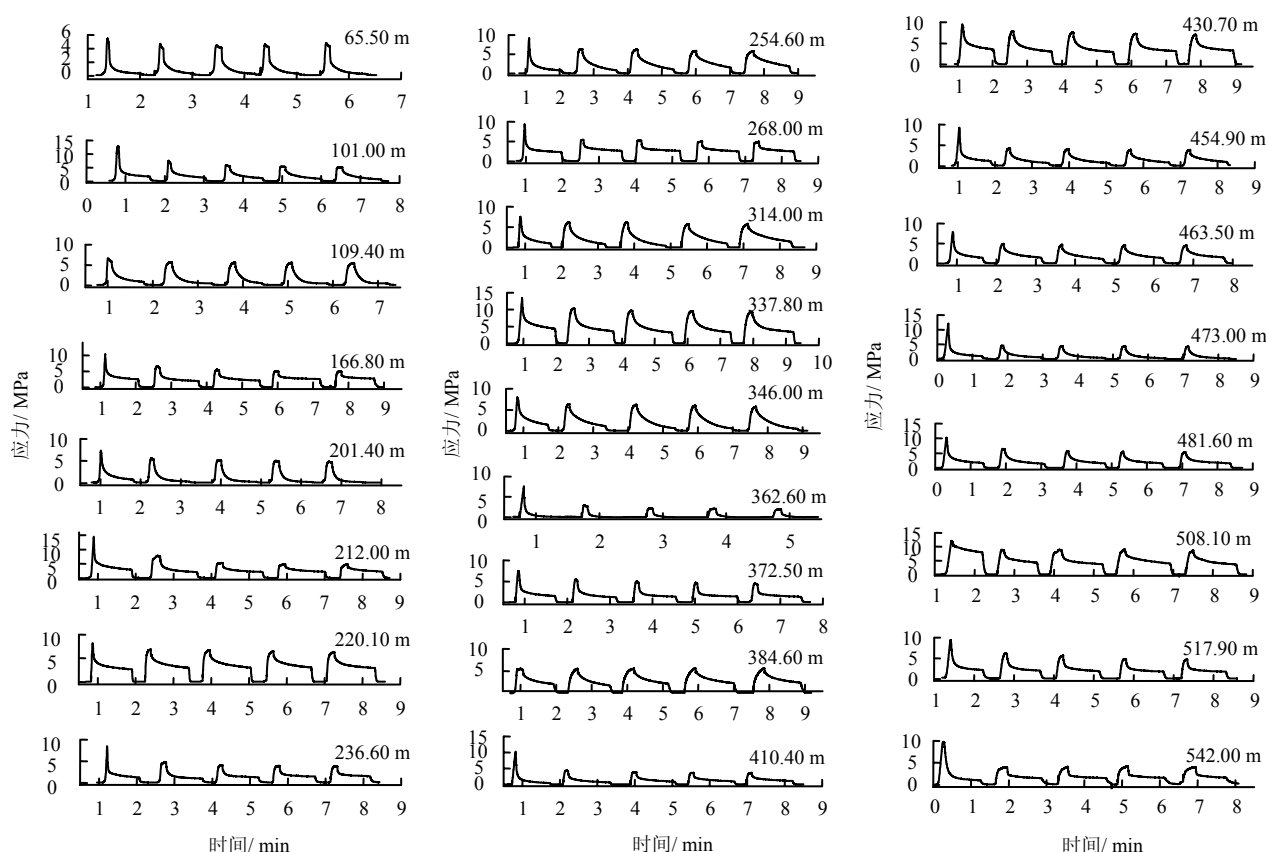


图 2 平度市深孔水压致裂应力测量曲线

Fig.2 Curves of hydraulic fracturing in-situ stress measurement in Pingdu deep borehole

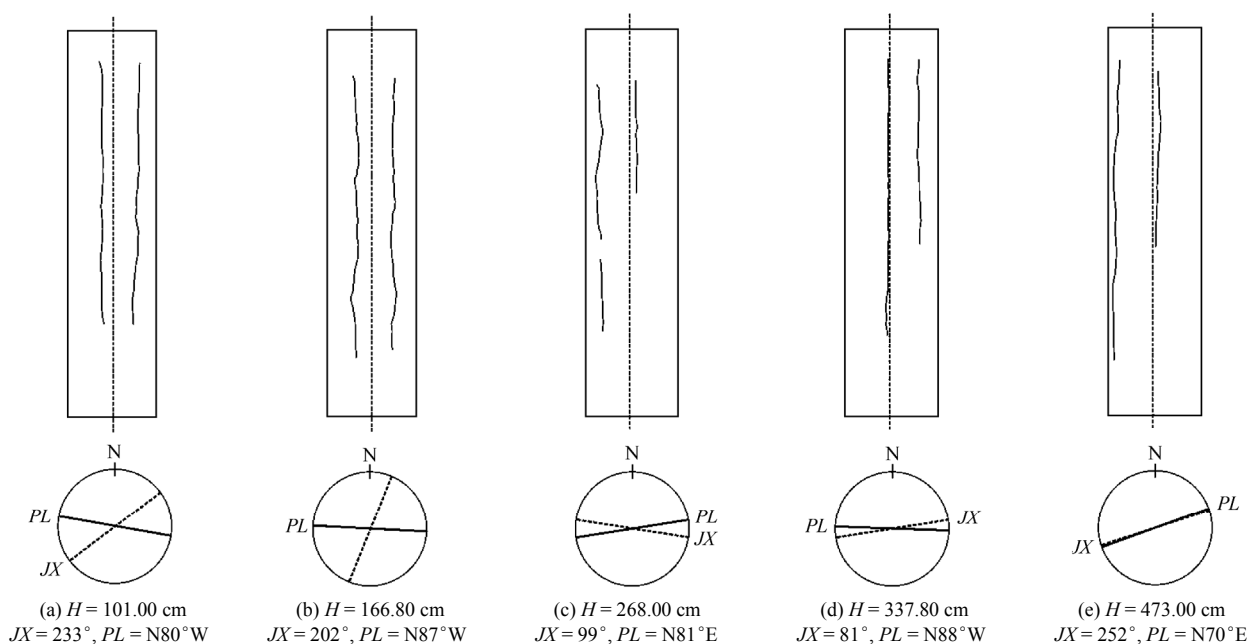


图3 平度市深孔水压破裂印模形状及其方向

Fig.3 The shape and its direction of hydraulic fracture impression in Pingdu deep borehole

表1 钻孔水压致裂地应力测量结果

Table 1 Results of in-situ stress measurement in 600 m borehole

序号	测段中心深度 /m	压力参数/MPa					主应力/MPa				S_H 方向
		P_b	P_s	P_r	P_H	P_0	S_H	S_b	S_v	T	
1	65.50	6.09	2.18	3.11	0.66	0.56	2.87	2.18	1.74	2.98	
2	101.00	13.70	4.2	5.57	1.01	0.91	6.05	4.20	2.68	8.13	N80° W
3	109.40	7.62	4.11	5.64	1.09	0.99	5.81	4.11	2.90	1.98	
4	166.80	11.79	5.00	6.02	1.67	1.57	7.41	5.03	4.42	5.77	N87° W
5	201.40	9.11	4.73	6.51	2.01	1.91	5.77	4.73	5.34	2.6	
6	212.00	14.43	5.39	6.20	2.12	2.02	7.95	5.39	5.62	8.23	
7	220.10	10.42	6.30	7.81	2.20	2.10	8.99	6.30	5.83	2.61	
8	236.60	10.85	4.51	5.72	2.37	2.27	5.54	4.51	6.27	5.13	
9	254.60	11.81	6.32	7.71	2.55	2.45	8.80	6.32	6.75	4.1	
10	268.00	11.95	6.19	7.18	2.68	2.58	8.81	6.19	7.10	4.77	N81° E
11	314.00	10.68	6.48	8.10	3.14	3.04	8.50	6.48	8.32	2.58	
12	337.80	16.85	8.83	11.98	3.38	3.28	11.23	8.83	8.95	4.87	N88° W
13	346.00	11.37	7.29	8.50	3.46	3.36	10.01	7.29	9.17	2.87	
14	362.60	11.23	4.80	5.21	3.63	3.53	5.66	4.80	9.61	6.02	
15	372.50	11.17	6.53	7.48	3.73	3.63	8.48	6.53	9.87	3.69	
16	384.60	9.40	7.74	8.28	3.85	3.75	11.19	7.74	10.19	1.12	
17	410.40	14.36	6.43	7.15	4.10	4.00	8.14	6.43	10.88	7.21	
18	430.70	13.84	9.33	10.73	4.31	4.21	13.05	9.33	11.41	3.11	
19	454.90	13.77	6.95	7.89	4.55	4.45	8.51	6.95	12.05	5.88	
20	463.50	12.56	7.78	8.47	4.64	4.54	10.33	7.78	12.28	4.09	
21	473.00	16.82	7.39	8.53	4.73	4.63	9.01	7.39	12.53	8.29	N70° E
22	481.60	15.05	8.64	9.71	4.82	4.72	11.49	8.64	12.76	5.34	
23	508.10	17.14	10.90	12.86	5.08	4.98	14.86	10.90	13.46	4.28	
24	517.90	14.56	8.59	9.34	5.18	5.08	11.35	8.59	13.72	5.22	
25	542.00	15.17	7.78	8.19	5.42	5.32	9.83	7.54	14.36	6.98	

S_H 和 S_h 随深度的分布规律 (见图 4) 表明, 水平主应力值总体上随深度的增加而增大。 S_H 和 S_h 随深度表现出一定的线性回归, 其线性回归结果为

$$\left. \begin{aligned} S_H &= 0.018 \ 4H + 3.406 \ 7 \\ S_h &= 0.014 \ 1H + 2.327 \ 6 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

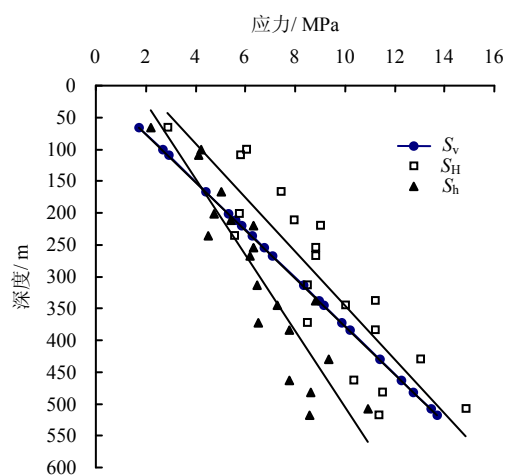


图4 深孔应力大小随深度分布图

Fig.4 Curves of stress with depths in deep borehole

由于主要受岩体结构的影响,地表岩体和钻孔岩芯高角度节理裂隙发育, S_H 和 S_h 随深度线性回归相关性系数不高,均在 0.7 左右。 S_H 和 S_h 随深度线性回归结果中,均含有一定值的常数项,说明存在有较大的水平应力,且主要来自于构造应力。另外,应力变化梯度均小于岩石重度,表明达到一定深度范围后, S_H 、 S_h 和 S_v 三者的大小关系将发生变化,最后 S_v 可能会转变为最大应力。

4 郯庐断裂现今活动性特征分析

郯庐断裂带位于西太平洋块体与东亚大陆交汇的边缘上,晚白垩期末以来,西太平洋块体沿近东西向向西俯冲挤压东亚大陆,并具有明显加剧的趋势,在地壳浅表层表现为新近沉积地层逆冲到老地层之上,形成规模巨大的陡立挤压褶皱带和逆冲推覆构造等,同时印度大陆向欧亚大陆俯冲,两大区域动力机制的共同作用铸就了郯庐断裂带现今具有顺时针压扭活动特征^[9]。

郯庐断裂带穿越中国东部地区,平面几何形态上呈北东-北北东向展布,其中山东段南北贯穿山东省东部地区,走向上呈北北东向,主断面倾角较大(大于 45°)。本文地应力测量结果表明,钻孔附近地壳浅表层现今最大主压应力方向为近东西向,考虑郯庐断裂山东段空间展布与现今最大主压应力方向之间的几何关系、钻孔地应力测量所反映的动力作用机制等,揭示郯庐断裂带山东段地壳浅表层现今构造活动具有压性兼右旋走滑特征,这与地表调查、地表 GPS 测量、深部震源机制等研究所反映的郯庐断裂山东段现今活动特征相一致,也为西太平洋块体、欧亚大陆和印度大陆三者之间现今区域动力作用机制研究提供了新的资料和证据。

5 断层活动稳定性分析

断层的活动性与其所受的应力状态密切相关,根据库仑准则,若 $\tau \geq \mu \sigma_n$,则断层滑动,其中 τ 为断层面上的剪应力; μ 为摩擦系数,由试验确定; σ_n 为断层面上的正应力; $\mu \sigma_n$ 为断层面上的滑动摩擦阻力。同样根据库仑准则,最大有效主应力与最小有效主应力之比与摩擦系数 μ 的关系为

$$(\sigma_1 - p)/(\sigma_3 - p) = [(1 + \mu^2)^{1/2} + \mu]^2 \quad (2)$$

式中: σ_1 、 σ_3 为断层面周围最大与最小主应力; p 为孔隙压力。如果等式 (2) 左边小于右边,说明断层面稳定。反之,断层面可能沿断层面法线方向与最大主应力夹角为 φ 的面产生错动,且 φ 与 μ 满足关系:

$$\varphi = 0.5(\pi/2 + \tan^{-1} \mu) \quad (3)$$

Byerlee 认为,在应力值小于 100 MPa 时,断层面的剪应力与正应力比值 μ 为 0.85^[21]。张伯崇^[22]认为,在应力值为 150~250 MPa 时,岩石摩擦系数 μ 的上限为 1.10,下限为 0.65,平均为 0.85,即 μ 取 0.6~1.0 是合理的。

对于走滑断层,取 $\sigma_1 = S_H$ 、 $\sigma_3 = S_h$,分别将 μ 取值 0.6 和 1.0 代入式 (2),计算得到走滑断层活动时最大水平主应力临界值的下限和上限,将其与实测地应力值随深度变化如图 5 所示。

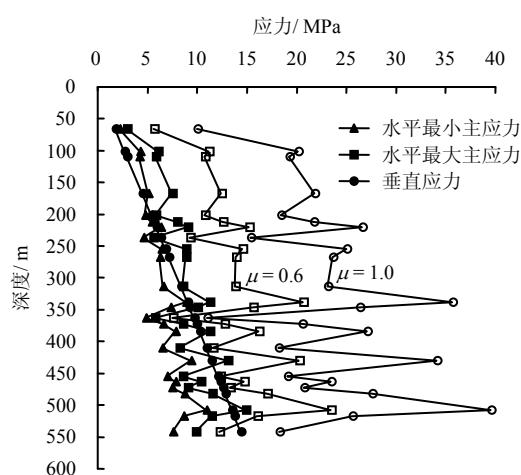


图5 平度市深孔实测主应力大小随深度变化趋势

Fig.5 Variation of in-situ stress magnitude vs. depth in Pindu deep borehole

从图 5 可以看出,平度市深孔地应力值尚未达到断层活动的应力值临界区,表明该钻孔附近断裂带处于相对稳定状态。由于受郯庐断裂带长期活动的影响,地表岩体和钻孔岩芯高角度(一般大于

45°) 节理裂隙发育, 导致平度深孔地应力测值处于正常水平, 但并不能排除沿郯庐断裂带在一些岩体结构完整的部位地应力值较大, 超过断层活动的应力值临界区。关于郯庐断裂带的稳定安全程度分析仍需要进一步开展断裂带应力场研究, 分段进行活动性和稳定性评价。

6 结 论

(1) 由于受郯庐断裂带现今活动性的影响, 钻孔岩芯高角度节理裂隙比较发育。

(2) 受岩石质量指标的影响, 平度市深孔地应力测量结果在同等深度、类似岩性等条件下地应力大小与其他地区相比较属于正常水平, 无应力集中现象, 3 个主应力关系为: $S_H > S_v > S_h$, 该地应力状态有利于走滑断层活动。

(3) 水平主应力值总体上随深度的增加而增大, 并且存在有较大的水平应力, 且主要来自于构造应力。

(4) 本次钻孔附近地壳浅表层现今最大主压应力方向为近东西向, 揭示郯庐断裂带山东段现今活动具有压性兼右旋走滑特征。库仑准则计算结果表明, 郯庐断裂带山东段北部现今地应力状态尚未达到促使断层失稳的临界状态。

本文在地表 GPS 测量、深部震源机制解等研究成果分析的基础上, 根据地应力实测结果, 对郯庐断裂带山东段现今地应力状态以及活动特性进行了分析和探讨。由于构造应力环境变化复杂, 受构造活动影响较大, 需在郯庐断裂带山东段其他关键部位进一步开展地应力测量工作, 以检验分析已有研究成果。

参 考 文 献

- [1] 孙叶, 谭成轩, 李开善, 等. 区域地壳稳定性量化评价[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [2] 吴满路, 张岳桥, 廖椿庭, 等. 汶川地震后沿龙门山断裂带原地应力测量初步结果[J]. 地质学报, 2010, 84(9): 1292—1299.
WU Ma-lu, ZHANG Yue-qiao, LIAO Chun-ting, et al. Preliminary results of in-situ stress along the Longmenshan fault zone after the Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. *ACTA Geologica Sinica*, 2010, 84(9): 1292—1299.
- [3] 陈群策, 安其美, 孙东生, 等. 山西盆地现今地应力状态与地震危险性分析[J]. 地球学报, 2010, 31(4): 541—548.
CHEN Qun-ce, AN Qi-mei, SUN Dong-sheng, et al. Current in-situ stress state of Shanxi basin and analysis of earthquake risk[J]. *ACTA Geoscientica Sinica*, 2010, 31(4): 541—548.
- [4] 谭成轩, 孙叶, 王连捷, 等. 地应力测量值得注意的若干问题[J]. 地质力学学报, 2003, 9(3): 275—280.
TAN Cheng-xuan, SUN Ye, WANG Lian-jie, et al. Some problems of in-situ crustal stress measurements[J]. *Journal of Geomechanics*, 2003, 9(3): 275—280.
- [5] 万天丰, 朱鸿, 赵磊, 等. 郯庐断裂带的形成与演化: 综述[J]. 现代地质, 1996, 6: 159—166.
WAN Tian-feng, ZHU Hong, ZHAO Lei, et al. Formation and evolution of Tancheng-Lujiang fault zone: a review[J]. *Geoscience*, 1996, 6: 159—166.
- [6] 朱光, 刘国生, 牛漫兰, 等. 郯庐断裂带的平移运动与成因[J]. 地质通报, 2003, 22(3): 200—207.
ZHU Guang, LIU Guo-sheng, NIU Man-lan, et al. Transcurrent movement and genesis of the Tan-Lu fault zone[J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(3): 200—207.
- [7] 百度百科, 郯庐断裂带[DB/OL]. <http://baike.baidu.com/view/1711157.htm>, 2012-07-31/2012-05-10.
- [8] 中国地震局. 日本东海 Mw9.0 级地震在中国大陆东部区域的 GPS 同震位移[DB/OL]. http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c_116674a018300cf_content/11_03/22/1300780240530.html, 2011-03-22/2012-05-10.
- [9] 王小凤, 李中坚, 陈柏林, 等. 郯庐断裂带[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1—14.
- [10] 李方全, 孙世宗, 李立球, 等. 华北及郯庐断裂带地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, (1): 73—86.
LI Fang-quan, SUN Shi-zong, LI Li-qiu, et al. In-situ stress measurements in north China and Tancheng-Lujiang fault zone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1982, (1): 73—86.
- [11] 彭文绪, 史浩, 孙和风, 等. 郯庐走滑断层右旋走滑的地震切片证据[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(6): 755—759.
PENG Wen-xu, SHI Hao, SUN He-feng, et al. Dextral strike-slip evidence on seismic slice for Tanlu strike-slip fault[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2009, 44(6): 755—759.
- [12] 姜文亮, 张景发, 陈丁, 等. 利用遥感、重力多源信息研究郯-庐断裂带苏-鲁段构造特征[J]. 地球学报, 2011, 32(2): 143—153.

- JANG Wen-liang, ZHANG Jing-fa, CHEN Ding, et al. Tectonic characteristics of Su-Lu segment of the Tan-Lu fault zone derived from RS and gravity multi-source information[J]. *Acta Geoscintica Sinica*, 2011, 32(2): 143—153.
- [13] 郭良迁, 薄万举, 杨国华, 等. 华北 1999—2009 年水平形变应变场特征[J]. *大地测量与地球动力学*, 2011, 31(3): 15—19.
- GUO Liang-qian, BO Wan-ju, YANG Guo-hua, et al. Characteristics of horizontal deformation-strain field in north China from 1999 to 2009[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2011, 31(3): 15—19.
- [14] 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今构造应力场[J]. *地震地质*, 1981, 3(1): 19—28.
- United Group of Focal Mechanism. Study of recent tectonic stress field in Jiangsu-Shandong-Anhui-Henan regions from the focal mechanism solutions[J]. *Seismology and Geology*, 1981, 3(1): 19—28.
- [15] HAIMSON B C, CORNET F H. ISRM suggested methods for rock stress estimation. Part 3: Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2003, (40): 1011—1020.
- [16] ZOBACK M D, HEALY J H. In-situ stress measurements to 3.5 km depth in the Cajon. Pass Scientific Research Borehole: Implications for the mechanics of crustal faulting[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B4): 5039—5057.
- [17] HAYASHI K, HAIMSON B C. Characteristics of shut-in curves in hydraulic fracturing stress measurements and determination of in situ minimum compressive stress[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(B11): 18311—18321.
- [18] ZOBACK M D, HAIMSON B C. Status of the hydraulic fracturing method for in situ stress measurements[C]//The 23rd US Symposium on Rock Mechanics. Berkeley, California: American Rock Mechanics Association, 1982: 143—156.
- [19] 陈群策, 毛吉震, 张钧. 水压致裂应力测量数据分析——对关闭压力 P_s 值判读方法的讨论[M]//水压致裂裂缝的形成和扩展研究, 北京: 地震出版社, 1999.
- [20] 丰成君, 陈群策, 吴满路, 等. 水压致裂应力测量数据分析——对瞬时关闭压力 p_s 的常用判读方法讨论[J]. *岩土力学*, 2012, 7(11): 2149—2159.
- FENG Cheng-jun, CHEN Qun-ce, WU Man-lu, et al. Analysis of hydraulic fracturing stress measurement data—Discussion of methods frequently used to determine instantaneous shut-in pressure[J]. *Rock and Soil Mechanic*, 2012, 7(11): 2149—2159.
- [21] BRERLEE J D. Friction of rocks[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1978, 116(4—5).
- [22] 张伯崇. 孔隙压力、断层滑动准则和水库蓄水的影响[C]//长江三峡坝区地壳应力与孔隙水压力综合研究. 北京: 地震出版社, 1996.

国内外重大地下工程事故与修复技术

著译者: 白云等 出版时间: 2012-1 开本: 16 开本 版次 第一版 页数: 184 装帧: 平装

出版单位: 中国建筑工业出版社 标准书号: ISBN 978-7-112-13746-6

本书共分 7 章, 全面、系统、详细地介绍了国内外 6 个重大工程事故过程、原因和修复工作。这些重大工程案例涉及软土深基坑工程、软土隧道联络通道工程、盾构隧道工程, 不仅有建设期发生灾难的情况, 也有运营初期发生事故的实例。编著者相信, 通过对这些重大地下工程事故的深刻剖析, 从技术和风险管理角度上讲, 将有助于国内同行提高对地下工程建设认识。第 1 章 新加坡地铁隧道工程事故案例; 第 2 章 原苏联圣彼得堡地铁隧道案例; 第 3 章 巴西圣保罗地铁隧道工程事故案例; 第 4 章 中国台湾高雄地铁工程事故案例; 第 5 章 上海地铁 4 号线工程事故案例; 第 6 章 荷兰电车隧道工程事故案例; 第 7 章 总结。

本书可供城市地铁隧道、越江越海隧道、取排水隧道和公共事业等隧道设计与施工的工程技术人员、施工人员、科研人员及大专院校有关专业师生作技术参考。

(信息来源: 中国建筑书店网站)

《岩土力学》2013 年第 5 期被 EI 收录论文 (43 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
1	边坡动力可靠性分析方法的模式、问题与发展趋势	刘 晓, 唐辉明, 熊承仁	1217—1234
2	预制节理岩体试件强度及破坏模式的试验研究	刘红岩, 黄好诗, 李楷兵, 等	1235—1241
3	红黏土承载比的土团尺寸效应研究	谈云志, 郑 爱, 吴 翩, 等	1242—1246
4	有效应力对煤吸附特性影响的试验研究	李小春, 付 旭, 方志明, 等	1247—1252
5	侧限压缩条件下土体结构性参数的单变量模型	陈 茜, 骆亚生, 程大伟, 等	1253—1258
6	瀑布沟水电站砾石土心墙初次蓄水期原位钻孔渗流试验研究	胡万雨, 陈向浩, 林 江, 等	1259—1263
7	不同胶结厚度下粒间胶结力学特性的试验研究	蒋明镜, 周雅萍, 陈 贺	1264—1273
8	刚性桩复合地基桩体抗震性能分析	盛桂琳, 鲍 鹏, 苏彩丽, 等	1274—1278
9	双组份岩石压缩系数推导与试验验证	蒋雨江, 李 闽, 薛潇妮, 等	1279—1286
10	白鹤滩层间错动带微结构特性及其化学改性初探	史存鹏, 冯夏庭, 江 权, 等	1287—1292
11	温度改性水玻璃固化黄土机制研究	吕擎峰, 吴朱敏, 王生新, 等	1293—1298
12	典型基坑开挖卸荷路径下软土三轴流变特性研究	周秋娟, 陈晓平	1299—1305
13	典型岩石破裂产生次声波试验研究	朱 星, 许 强, 汤明高, 等	1306—1312
14	修正应变能密度因子准则及岩石裂纹扩展研究	施明明, 张友良, 谭 飞	1313—1318
15	Q ₂ 黄土浸水前后微观结构变化研究	方祥位, 申春妮, 汪 龙, 等	1319—1324
16	加载历程对配径碎煤渗透特性影响的试验研究	王路珍, 陈占清, 孔海陵, 等	1325—1330
17	黄土中水分迁移规律现场试验研究	李 萍, 李同录, 王阿丹, 等	1331—1339
18	含水率影响下尾矿砂内摩擦角随标贯击数变化研究	李志平, 彭振斌, 肖尊群, 等	1340—1344
19	悬臂式抗滑桩加固黏土边坡地震永久位移算法	肖世国, 祝光岑	1345—1350
20	基于 Barton-Bandis 准则的锚固边坡稳定性分析	罗 强, 赵炼恒, 李 亮, 等	1351—1359
21	强降雨条件下气压对滑坡延时效应研究	韩同春, 马世国, 徐日庆	1360—1366
22	桩承式路堤土拱效应发挥过程研究	费 康, 陈 毅, 王军军	1367—1374
23	浅埋隧道塌方地质灾害成因及风险控制	周宗青, 李术才, 李利平, 等	1375—1382
24	隧洞围岩损失位移估计的智能优化反分析	张 研, 苏国韶, 燕柳斌	1383—1390
25	桩基内力长期监测中的蠕变影响分析	刘争宏, 郑建国	1391—1396
26	应力监测在公路岩质边坡中的应用研究	郭永建, 王少飞, 李文杰	1397—1402
27	走滑断层地震地表断裂位错估计方法研究	赵 颖, 郭恩栋, 王 琼, 等	1403—1408
28	基于等级相关的泥石流危险因子筛选与危险度评价	陈鹏宇, 乔景顺, 彭祖武, 等	1409—1415
29	混合法在深基坑排桩锚杆支护计算中的应用研究	朱彦鹏, 李元勋	1416—1420
30	基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析	魏 纲	1421—1428
31	基于 Drucker-Prager 准则的扩孔器单齿正交切削岩土三维力学模型	贾彦杰, 蒋 平, 童 华	1429—1436
32	基于 Eshelby 张量和 Mori-Tanaka 等效方法的砂卵石土等效弹性模量研究	胡 敏, 徐国元, 胡盛斌	1437—1442
33	施工期间人工挖孔桩桩间土稳定性分析	曹贤发, 张家生, 刘之葵, 等	1443—1448
34	土压平衡盾构反扭矩的分析和计算	郭玉海, 王梦恕, 张照煌, 等	1449—1452
35	高土石坝裂缝分析的变形倾度有限元法及其应用	彭 翀, 张宗亮, 张丙印, 等	1453—1458
36	基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响的数值分析与变形控制研究	郑 刚, 刘庆晨, 邓 旭	1459—1468
37	中主应力对硬岩破裂机制的影响	张社荣, 严 磊, 孙 博, 等	1469—1477
38	吹填土强夯加排水地基处理的数值分析与应用	刘 洋, 张 铎, 闫鸿翔	1478—1486
39	堆石料单轴流变试验的颗粒流模拟	邵 磊, 迟世春	1487—1494
40	深埋地下结构静动力耦合响应分析的边界条件设置方法	赵跃堂, 罗中兴, 李振慧, 等	1495—1500
41	砂砾岩水力压裂裂缝扩展规律的数值模拟分析	李连崇, 李 根, 孟庆民, 等	1501—1507
42	颗粒材料剪胀性的微观力学分析	秦建敏, 迟璐璐	1508—1514
43	煤体在高压水射流作用下的损伤机制	穆朝民, 王海露	1515—1520