

青海格尔木-五道梁地区现今地应力测量结果 及其构造分析

张春山 吴满路 廖椿庭 马寅生 区明益

中国地质科学院地质力学研究所,北京,100081

摘 要 本文给出了格尔木-五道梁地区近年地应力测量的结果,并据此进行了构造分析。实测结果表明,最大主应力的方向总体上与区域构造应力场的方向基本一致,呈NE向,局部地区主应力的方向受局部断裂的影响而不同于区域应力场的方向。在地震前后,主应力的大小和方向均发生变化。在震后,昆仑山断裂带附近地应力数值降低约三分之二。

关键词 现场应力测量 最大主应力 地震活动 区域构造应力场 构造分析

Current Stress Measurement and Structure Analysis of Golmud-Wudaoliang Region in Qinghai Province

ZHANG Chunshan WU Manlu LIAO Chunting MA Yinsheng OU Mingyi

Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing, 100081

Abstract This paper deals with the results of stress measurements performed in recent years at different sites in Geermu-Wudaoliang region of Qinghai Province. On such a basis, structure analysis was carried out. The direction of the principal stress is generally northeastward, consistent with that of the regional stress field. Nevertheless, the direction of principal stress affected by local faulting is always different from the direction of regional structural stress field near the fault. Both the value and the direction of stresses tend to change before and after the earthquake. At the sites near the Kunlun fault zone, the stress value is higher before earthquake than after earthquake. The value of stress after earthquake is one-third the value before earthquake. Earthquake is the performance of stress release, and the information of earthquake might be gathered through measuring the stress variation.

Key words in-situ stress measurement maximum principal stress action of earthquake regional structural stress field structure analysis

青海格尔木-五道梁地区是在建青藏铁路格尔木—拉萨的起始段,位于青藏高原的北部,地质条件复杂,活动断裂发育,地层主要以古生界以来的地层为主,局部发育有侵入岩和火山岩,岩石风化强烈,地形地貌变化较大,高程由格尔木的2 800 m迅速升高至昆仑山的约5 000 m左右(海拔4 300 m以上为冻土的北分界线)。该路段穿过现今活动性极强的昆仑山断裂带和可可西里断裂带,分布有数座大小不等的隧道,并有进入西藏的咽喉隧道——昆仑山隧道,2001年11月14日昆仑山断裂带发生Ms8.1大地震,将109国道错断(徐锡伟,2002; Aimin Li 2001)。结合青藏铁路建设项目的实施以及在国土资源部科技司项目的支持下,笔者在格尔

木-五道梁地区不同的构造单元开展了地表地应力现场测量,为铁路的施工设计、安全运营以及大陆动力学和构造地质学的研究提供了地表应力数据。

1 地应力测量采用的方法及条件

1.1 地应力测量采用的方法

目前国内外广泛采用的地应力测量方法主要有压磁应力解除法、空心包体式三轴应力计解除法、水压致裂法、钻孔崩落法和超声波法等。通过大量的室内和野外试验表明,压磁应力解除法具有可靠性好、灵敏度高等特点,测量值误差在10%以内(王连捷等,1991),目前已被国内外广泛应用。中国的许多重大工程和区域研究中也广泛采用了压磁应力解

除法,如广东大亚湾核电站(胡海涛,1988)、青海拉西瓦水电站(施兆先,1991)、二滩水电站(孙世宗,1984)、华北及郯庐断裂带(李方全,1982)、金川铜镍矿(廖椿庭,1985)、青藏铁路(廖椿庭,2002)等。

笔者在格尔木-五道梁地区的地表地应力测量工作中采用压磁地应力解除法进行现场测量。取得了平面地应力数据。

1.2 地应力测点的位置及工程地质条件

2001~2003年,笔者先后在昆仑山、雪水河、南山口和五道梁进行了地应力测量。其中昆仑山地区有2个地应力测点(Ms8.1地震前)和2个复测点(Ms8.1地震后),其他地区各有一个地应力测点(图1)。

1.2.1 南山口地应力测点 Nsk测点位于青海格尔木市南山口宁鑫加油站对面。地理坐标为北纬 $36^{\circ}08'20.6''$ 、东经 $94^{\circ}46'51.0''$,海拔高程约3124 m。距发震断裂的垂直距离约为50 km。测点地貌为山间河谷盆地的边缘地区,距山体边缘约150 m,地形坡度小于 10° 。测点岩性为黑云母钾长花岗岩。地表岩石风化强烈,岩石破碎,15 m深度以下岩石较完整。岩体中夹有多条黑色基性岩脉,基性岩脉的产状为 $40^{\circ}/67^{\circ}$ 。

1.2.2 雪水河地应力测点 Xsh测点位于雪水河大桥上游2 km水泥厂采石场,坐标为北纬 $35^{\circ}55'47.6''$ 、东经 $94^{\circ}49'56.2''$,高程为3358 m。距发震断裂的垂直距离约为35 km。测点地貌为山间河谷的岸边地区,距山体边缘约30 m,山坡坡度 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。岩性为浅变质青灰色灰岩,岩石结构致密,强

度较高。岩石中发育多组微裂隙,裂隙被方解石脉充填。岩层产状为 $225^{\circ}/35^{\circ}$ 。

1.2.3 昆仑山地应力测点 Kls1测点位于西大滩隐伏断裂北侧的侵入岩体上,坐标为北纬 $35^{\circ}43'52.4''$ 、东经 $94^{\circ}03'28.3''$,高程为4590 m。距发震断裂的垂直距离约为7 km。测点地貌为山间沟谷的边缘地区,沟谷纵坡约 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 左右,山坡坡度 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。岩性为黑云母花岗岩,地表岩石风化破碎较严重,节理裂隙发育,10 m以下岩石较完整,钻孔中可取得完整岩心。

Kls1-1测点为Kls1测点的震后复测点。位于Kls1测点西侧2 m处,地形、地貌和岩性条件与Kls1测点相同。

Kls2测点位于西大滩隐伏断裂的北侧岩体上,坐标为北纬 $35^{\circ}45'30.3''$ 、东经 $94^{\circ}20'10.3''$,高程为4090 m。距发震断裂的垂直距离约为15 km。测点地貌为山间河谷盆地边缘地区的山体边缘,山坡坡度 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。岩性为辉长岩,两侧发育板岩夹页岩,地表岩石风化破碎,节理裂隙发育,7 m以下岩石较完整,钻孔中可取得完整岩心。

Kls2-1测点为Kls2测点的震后复测点。位于Kls2测点西南侧2 m处,地形、地貌和岩性条件与Kls2测点相同。

1.2.4 五道梁地应力测点 Wdl测点位于青海格尔木市五道梁铁20局采石场西部山坡上。地理坐标为北纬 $35^{\circ}05'16.7''$ 、东经 $93^{\circ}02'39.7''$,海拔高程约4718 m。距发震断裂的垂直距离约为60 km。测点地貌为闪长岩形成的山坡,坡度较缓,约 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。测点岩性为闪长岩,地表覆盖为第四系砂土。从采石场揭露情况看,地表岩石破碎,下部相对完整,垂直节理发育,采石场堆积有许多大块石。

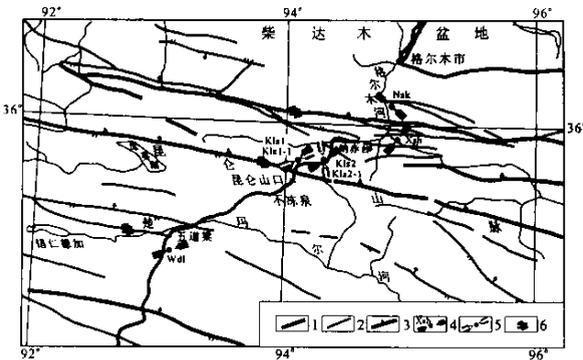


图1 格尔木-五道梁地区地应力测点及断裂分布图

Fig.1 Distribution of stress measurement site and faults in the region of Geermu-Wudaoliang

1-深大断裂 2-一般断裂 3-板块缝合线 4-地应力测点代码及方向;
5-复测点地应力方向 6-断层走滑方向

1-deeper and bigger fault; 2-normal fault; 3-plate junction;
4-measurement site, code and direction of stress; 5- stress
direction at measurement site; 6-slip direction of fault

2 地应力测量结果及构造分析

2.1 地应力测量结果

采用压磁应力解除法,对各测点进行现场地应力实测,得到各测点的平面地应力状态(表1)和平面应力椭圆(图2)。

地应力现场测量结果表明,该区现今地应力的方向和大小均变化较大,同一地点震前震后的地应力大小和方向也发生变化。

2001年11月14日昆仑山Ms8.1级地震后,该区最大水平主应力范围为2.2~6.8 MPa,最高值约为最低值的3倍。地应力方向总体为NE向(NNE—NEE向均有),而在格尔木南山口测点则为NW向,昆仑山2号复测点为近SN向。其中五道

表 1 格子木-五梁地区地应力测量结果一览表

Table 1 Results of stress measurement in the region of Germu-Wudaoliang

测点及编号	测量深度 /m	最大水平主应力 /MPa	最小水平主应力 /MPa	最大主应力方向	测量时间 /年.月	备注	
南山口 Nsk	20	5.6	4.7	N50°W	2003.07	-	
雪水河 Xsh	13	3.1	1.1	N32°E	2002.07	-	
昆仑山	Kls1	18	12.9	12.1	N45°E	2001.08	震前测量
	Kls1-1	18	3.5	3.2	N66°E	2002.07	震后测量
	Kls2	14	6.8	4.4	N58°E	2001.08	震前测量
	Kls2-1	14	2.2	1.2	N5°W	2002.07	震后测量
五道梁 Wdl	20	6.8	4.5	N26°E	2003.08	-	

注 测点 Kls1-1 和 Kls2-1 分别为 2001 年 11 月 14 日昆仑山 Ms8.1 级地震后在 Kls1 和 Kls2 点进行的复测。

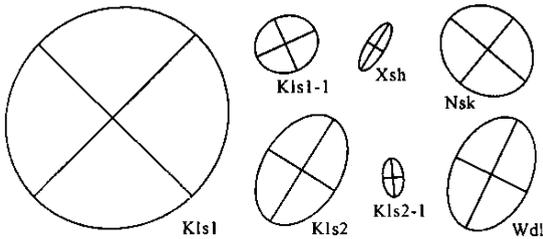


图 2 格尔木-五道梁地区地应力测点应力椭圆示意图

Fig. 2 Sketch map of stress ellipse about each stress measurement site in the region of Geermu-Wudaoliang

梁 WDL 测点最大水平主应力值最高, 应力值为 6.8 MPa, 方向为 NE 向。昆仑山 Kls2-1 测点最大水平主应力值最低, 应力值为 2.2 MPa, 方向为 NNW。该区最小水平主应力范围为 1.1~4.7 MPa, 最高值约为最低值的 4 倍。其中南山口 Nsk 测点最小水平主应力值最高, 应力值为 4.7 MPa, 雪水河 Xsh 测点最小水平主应力值最低, 应力值为 1.1 MPa。

从昆仑山两个地应力测点震前和震后复测的结果可以看出, 震后的最大主应力值均较震前约减小了三分之二, 即由震前的 12.9 MPa 和 6.8 MPa 分别变为震后的 3.5 MPa 和 2.2 MPa。且主应力的方向也发生了变化, 分别由震前的 N45°E 和 N58°E 变为震后的 N66°E 和 N5°W (Liao 等 2003)。

从应力椭圆图可以看出: 昆仑山 Kls1 测点的地应力方向性不明显, 接近于应力圆, 其他测点的方向性相对较明显。

2.2 地应力测量结果的构造分析

许多学者对格尔木-五道梁地区的构造进行过研究, 按板块理论的划分, 五道梁地应力测点位于可可西里地块内, 其他地应力测点均位于昆仑地块内, 其中昆仑山的两个地应力测点位于两板块的缝合带附近 (图 1)。该区的活动构造主要以近 EW 向和 NW 向的断裂为主, 且断裂大都为压性逆断层, 具

有左旋走滑的性质, 局部地区发育 NNE 向的断裂。根据震源机制解进行的构造应力场分析 (李松林等, 1986) 可知, 区域构造主压应力方向为近 NE 向。

实测的最大主应力方向有 3 个测点 (五道梁、昆仑 1 号测点及复测点、雪水河) 为 NE 向, 与区域构造应力场基本一致。但有一个测点 (南山口) 为 NW 向, 而另一个测点 (昆仑 2 号复测点) 为近 SN 向, 与区域构造应力场不一致。不同测点出现大小和方向的变化, 主要与所处的地质构造有关, 基本上反映了不同构造部位的现今应力状态。

五道梁地应力测点位于可可西里地块的中部。在测点北部发育有一条 NW 向的压性断裂, 并表现出左旋滑动的性质。由于受该活动构造的影响, 最大主应力应为 NE 向, 而现场所测的最大主应力方向正好与此相吻合, 且地应力值相对较高, 表明该断裂现今活动性较强。

昆仑山的两个地应力测点位于昆仑板块与可可西里板块的缝合带附近, 2001 年 11 月 14 日昆仑山断裂发生 Ms8.1 地震, 致使走向 110° 的昆仑山断裂发生长约 400 km 的地表破裂带, 造成 109 国道错断, 明显表现为左旋走滑 (徐锡伟, 2002; Aimin Li, 2001), 因而该测点的最大主应力方向为 NE 向。震前实测的两个测点的最大主应力方向均为 NE 向, 与区域构造的最大主应力方向基本吻合, 且该点的应力值在地震前较高, 地震后应力值降低了约三分之二。表明在地震前有一个应力积累过程, 而震后随着地表破裂的产生、应变能释放, 应力重新调整, 有一个应力释放的过程, 主应力方向也发生改变。

雪水河地应力测点位于昆仑地块内, 在测点南北均发育有近 EW 向的断裂, 具有左旋滑动的性质, 因而该点的最大主应力方向应为 NE 向。所测得的最大主应力方向亦与此吻合, 且应力值较小。在昆仑山 Ms8.1 地震后, 其周边地区发生多次余

震,可能释放部分应力,使其震后应力值变小。

南山口地应力测点位于昆仑地块内,其北侧发育近 EW 向的弧形断裂,现场实测的最大主应力方向为 NW 向,与区域构造应力场的方向不一致。说明该测点的地应力方向受局部弧形构造的控制。该测点的应力值相对较高,仅次于五道梁测点,居中等量值。

根据昆仑山 Ms8.1 地震后的应力值测量结果可以看出(Wdl、Kls1-1、Kls2-1、Xsh 和 Nsk 等 5 个测点)离地震破裂带(活动断裂)越远,地应力值越大,而在昆仑山 Ms8.1 地震前的应力值测量结果(Kls1 和 Kls2 两个测点)可以看出,离地震破裂带越远,地应力值越小。

3 结语

地应力测量的结果表明:多数测点最大主应力的方向均与区域构造应力场的方向基本一致,个别测点最大主应力的方向往往受局部断裂的影响有所偏转。表明一个区域构造应力场在总体方向一致的情况下,在不同的构造部位其主应力方向也会有所改变,与其周边的构造关系密切。在地震前后,主应力的大小和方向均发生变化。在震前,距活动断裂带越近,地应力数值越高,而在震后,距活动断裂带越近,地应力数值越低。地震活动是地应力释放的表现形式,通过监测地应力的变化情况,有可能捕捉到地震的前兆信息。

参考文献

- 胡海涛,易明初,向祖廷等. 1988. 广东核电站规划选址区域稳定性分析与评价. 北京:档案出版社.
- 李方全,孙世宗,李立球. 1982. 华北及邻庐断裂带地应力测量. 岩石力学与工程学报, 1(1):73~86.
- 李松林,岳华峰,宁占龙. 1986. 由多个地震的震源机制推断喜马拉雅弧形山系的构造应力场. 地球物理学报, 29(4):419~423.
- 廖椿庭,崔鸣铎,任希飞等. 1985. 金川矿区地应力测量与构造应力场. 北京:地质出版社.
- 廖椿庭,吴满路,张春山等. 2002. 青藏高原昆仑山和羊八井现今地应力测量及其工程意义. 地球学报, 23(4):353~357.
- 施兆先,丁旭初,安其美等. 1991. 拉西瓦水电站地应力测量及其有关问题的讨论. 地壳构造与地壳应力论文集(5):167~180.
- 孙世宗,李立球,李方全. 1984. 二滩电站的地应力测量. 水文地质与工程地质(2):7~10.
- 王连捷,潘立宙,廖椿庭等. 1991. 地应力测量及其在工程中的应

用. 北京:地质出版社.

- 徐锡伟,陈文彬,于贵华等. 2002. 2001 年 11 月 14 日昆仑山库塞湖地震(Ms8.1)地表破裂带的基本特征. 地震地质, 24(1):1~13.

References

- Aiming Lin, Bihong Fu, Jianming Guo et al. 2002. Co-seismic strike-slip and rupture length reduced by the 2001 Ms 8.1 Central Kunlun Earthquake. Science, 296:2015~2017.
- Liao Chunting, Zhang Chunshan, Wu Manlu et al. 2003. Stress change near the Kunlun fault before and after the Ms 8.1 Kunlun earthquake. Geophysical Research Letters, 30(20):2027.
- Hu Haitao, Yi Mingchu, Xiang Zuting. 1988. Regional stability analysis and evaluation of nuclear power station for planning and selecting field in Guangdong province. Beijing:Record Publishing House(in Chinese).
- Li Fangquan, Sun Shizong, Li Liqiu. 1982. In-situ stress measurements in North China and Tancheng-Lujiang fault zone. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1(1):73~86(in Chinese).
- Li Songlin, Yue Huafeng, Song Zhanlong. 1986. Inferring the tectonic stress field of Himalaya arcuate structure from the multiple focal mechanisms. Acta Geophysical Sinica, 29(4):419~423(in Chinese).
- Liao Chunting, Cui Mingduo, Ren Xifei et al. 1985. In-situ stress measurements and tectonic stress field in the Jinchuan mine area. Beijing:Geological Publishing House(in Chinese).
- Liao Chunting, Wu Manlu, Zhang Chunshan et al. 2002. Recent ground stress measurements of the Kunlun mountains and Yangba-jing area in Qinghai-Tibet plateau and its engineering significance. Acta Geoscientia Sinica, 23(4):353~357(in Chinese with English abstract).
- Shi Zhaoxian, Ding Xuxu, An Qimei et al. 1991. Crustal stress measurement of Laxiwa hydropower station and the discussion of the related problem. Proceedings of Crustal Tectonic and Crustal Stress, (5):167~180(in Chinese).
- Sun Shizong, Li Liqiu, Li Fangquan. 1984. Crustal stress measurement of ertan hydropower station. Hydrogeology and Engineering Geology, (2):7~10(in Chinese).
- Wang Lianjie, Pan Lizhou, Liao Chunting et al. 1991. Crustal stress measurements and their application in engineering. Beijing:Geological Publishing House(in Chinese).
- Xu Xiwei, Chen Wenbin, Yu Guihua et al. 2002. Characteristic features of the surface ruptures of the Hoh Sai Hu(Kunlunshan) Earthquake(Ms 8.1), Northern Tibetan Plateau, China. Seismology and Geology, 24(1):1~13(in Chinese with English abstract).