文章编号:1006-6616(2009)02-0114-17

# 龙门山北端青川断层附近应力测量 与断层稳定性

### 彭 华<sup>1,2</sup>,马秀敏<sup>1,2</sup>,姜景捷<sup>1,2</sup>

(1. 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: 汶川 8.0 级地震后, 余震是否沿青川断裂向汉中方向发展, 是否还会发生 强烈余震成为社会关注的问题。为了查明汶川80级地震后青川断层库仑应力的变 化,判明余震的发展趋势,2008年6月2日~28日我们在青川断裂中段阳平关一 带开展了断层附近原地应力测量研究,在3个钻孔中分别用水压致裂法和解除法得 到了断层上下盘构造应力的大小、方向和分布特征。根据实测的地应力资料,断层 附近最大水平主压应力方向为 NE-NEE 向,与区域构造应力 SN-NNE 向主压应力方 向有一些差异,说明受断层活动影响,断层附近的应力状态与区域应力场已经发生 了改变。青川断层是一条逆冲兼右行走滑的活动断裂,在汶川大地震中虽未见其活 动,但其阻隔了余震向北发展,表明该断层是一条重要的边界断层,既是区域构造 分区的界线,也是区域应力场的分区标志线。利用地应力实测资料研究了断层的活 动性,在测量深度域内水平和铅直应力的关系为 $\sigma_{u} > \sigma_{v}$ ,该应力状态有利于 逆断层活动,与地质资料反映的以逆断层活动及近期在断层附近发生的地质异常现 象一致。利用库仑摩擦滑动准则,摩擦强度取06~10进行分析,断层附近的现 今地应力状态接近产生逆断层摩擦滑动的临界值,其中断裂东段发生逆断层活动的 可能性较小,相比而言,青川断裂带西段危险性更大。

关键词:龙门山地震;青川断层;水压致裂地应力测量;垂直应力解除;库仑摩擦 滑动准则

中图分类号: P315.72<sup>+</sup>7 文献标识码: A

### 0 引言

2008 年 5 月 12 日四川省汶川发生了 8.0 级特大地震,导致大量建筑物倒塌和破坏,约 7 万余人死亡、17823 失踪,直接经济损失 8451 亿元。

根据国家地震台网观测报告,本次地震的余震序列非常发育,截止到 2008 年 10 月 6

收稿日期: 2009-05-31

基金项目:科技部"汶川地震断裂带科学钻探"项目和地调项目(编号:1212010916064)联合资助。

作者简介:彭华(1964-),男,研究员,主要从事地应力测量及相关测量仪器研制、地壳稳定性调查与评价、地质灾 害、岩稳定性和岩石力学与工程施工等方面的研究工作,E-mail:penghuabgs2005@yahoo.com.cn。 日,已经记录到的余震总数超过 300000次,其中 5~5.9级地震 32次,6~6.9级地震 8次, 最大余震为 2008年5月 25日青川 6.4级地震。这些余震基本沿龙门山断裂带集中分布,形 成 300km 长的余震分布带,并具有从中段向北段迁移的趋势,余震分布突破了以往所认识的 断裂活动边界,直达青川以北陇南的文县和陕南的宁强青木川一带。

汶川地震后在青川断裂阳平关和大安镇一带形成了大范围的地质异常,水井水位普遍上 升,泉水异常增大,干涸的小溪又出现了水流,温泉变冷泉,断层附近树木离奇枯萎等等, 一度引起了陕西汉中地区、甘肃陇南地区的社会恐慌(据中国地震信息网,2008-07-03)。该 地区是否还会发生强烈余震成为社会关注的问题。

地震是断裂变形产生的应变能积累而突然爆发性释放的过程,实质是地层受力破裂而滑 动的过程,震前必然有应力的积累和临震微破裂。因此,通过震前地应力积聚程度及其所产 生的相关地球物理异常监测,分析岩石受力状态,研究地壳岩石受力和破坏的规律,是实现 地震预报的关键。地壳应力水平的测量和应力波动变化的监测,有助于我们对断裂活动力学 状态和发震力学机制的分析、发震危险性及地壳稳定性的判断。

为了迅速查明青川断层在汶川 8.0 级地震后地质构造环境的变化,判明余震的发展趋势 及余震是否沿青川断裂向汉中方向发展,国土资源部统一部署,由中国地质调查局组成地震 应急工作组开展相关的地震地质调查,我们在青川断裂东中段阳平关一带开展了断层附近原 地应力研究,分别在阳平关、大安镇和代家坝建立了地应力监测站<sup>[1]</sup>。根据青藏铁路监测站 的技术要求<sup>[2]</sup>,在站内安装了体应变仪和短周期地震仪,开展余震和地壳应力场动态观测。 6月2日~28日在监测站的钻孔中进行了铅直孔空芯包体解除法地应力测量,得到了断层两 侧构造应力的大小、方向,对断层库仑应力状态进行了计算和分析。希望通过对地应力大小 及其变化趋势的观测、库仑应力状态的计算,判断青川断层活动的危险性,为余震发展趋势 的分析提供依据。

### 1 区域地质背景

龙门山是青藏高原东部边缘陡度最大的山脉,其新生代的推覆构造活动一直倍受关注, 许多学者对龙门山以及四川盆地进行过研究<sup>[3-8]</sup>,认为龙门山是发生在中生代的推覆构造 带,它将许多由元古宙和古生代岩层组成的断片向南东推覆在四川盆地的中生代地层之上, 构成典型的薄皮构造<sup>[3]</sup>。Tapponnier et al.认为龙门山为挤压边界,以逆冲推覆为主<sup>[9]</sup>。近年 来的一些研究表明:龙门山在晚新生代存在明显的右行走滑作用<sup>[10-11]</sup>,并控制了山前盆地 的发育,说明走滑作用在龙门山构造带演化中占有重要地位。

龙门山是青藏高原内部巴颜喀拉地块和中国东部华南地块的边界构造带,经历了长期的 地质演化历史,具有十分复杂的结构和构造。龙门山断裂带呈北东-南西走向,长约 500km, 向南西延伸到锦屏山逆冲推覆带,中部被鲜水河断裂斜截(图1);北东端与秦岭造山带交 汇。龙门山断裂带由4条近平行的断裂组成:南东侧的灌县-安县断裂,中央的映秀-北川断 裂,北西侧的汶川-茂县断裂和青川断裂,其中灌县-安县断裂是龙门山断裂带东南的边界断 裂;映秀-北川断裂是主断裂,也称中央断裂;汶川-茂县断裂和青川断裂是北西侧的边界断 裂(图2)。其东、西两侧分别为四川盆地和松潘-甘孜造山带,穿过龙门山北段的河流主要 是嘉陵江及其支流白龙江(图3)。

这川地震发生在龙门山逆冲推覆构造带上,印度板块与欧亚大陆碰撞及其向北的推挤,





Fig.1 Geotectonic and stress field in Longmenshan area

这一板块间的相对运动导致了亚洲大陆内部大规模的构造变形,造成了青藏高原的地壳缩 短、地貌隆升和向东挤出。由于青藏高原向东北方向运动的过程中在四川盆地一带遭到华南 活动地块的强烈阻挡,使得应力在龙门山推覆构造带上高度积累,以至于沿映秀-北川断裂 突然发生错动,产生 8.0 级强烈地震<sup>[12-17]</sup>(图 1)。

虽然 GPS 观测与地震记录显示龙门山断裂带现今活动性不强<sup>118〕</sup>,但 GPS 观测表明龙门 山构造带的现今构造变形也是以逆冲和右旋剪切为特征,只是变形速度不大。

地质研究表明映秀-北川断裂全新世(1 万年)以来具有明显的活动性,其长期地质滑 动速率小于每年1mm。因而,龙门山构造带及其内部断裂属于地震活动频度低但具有发生超 强地震地质条件的特殊断裂。

### 2 青川活动断裂带

青川断裂由 2 个分支断裂组成,即平武-青川-勉县断裂和八海-玉泉坝断裂。前者是后山 断裂的主干;后者位于主干断裂之北,规模较小,在阳平关附近交汇到主干断裂上。

(1) 主干断裂基本特征

青川断裂是龙门山断裂带北西侧的一个分支, 与映秀-北川断裂成左阶排列, 断裂西起





Fig.2 Distribution of Longmenshan fault and Wenchuan earthquake aftershocks
1. 彭县-灌县断裂带; 2. 映秀-北川断裂带; 3. 茂县-汶川断裂带; 4. 青川断裂带;
5. 青木川断裂带; 6. 安县-广元断裂带; 7. 北川-南坝-林庵寺断裂

平武,向东经青川至勉县,呈 NEE 向展布(图 3)长约 250km,断裂带宽度一般在 500~700m,在地貌上表现为强烈的线性特征,自勉县的武侯祠向西到青羊驿、大安镇、代家坝、阳平关、广坪、金山寺,形成长达 110km 的峡谷,断裂南西段在地貌上线性特征逐渐降低,并分成 2~3 条次级分支断层,在平武古城西一带与虎牙断层相交并消失。断层两侧地层差异明显,北西侧为深变质的前寒武系碧口群、震旦系木座组、水晶组和浅变质的志留系茂县群,南东侧主要为志留系黄坪组,局部有前寒武纪地层出露,两侧地层和构造线的延伸方向基本一致。沿断裂仅局部断续分布有透镜状红色陆相粗碎屑沉积,地貌特征明显,线状沟谷发育,青川断裂具有多期活动的特点<sup>[19]</sup>。

青川断层错断地貌十分发育,包括山体错断、水系错断。沿断裂广泛发育水系的右行位 错,按水系规模不同,相应的位错量也可分为3个级别:嘉陵江作为区内的一级水系,沿断 裂发生的位错最大,在阳平关-燕子砭一带为17km;其次一级的支流水系位错量相应减小,



### 图 3 青川断裂及其邻区的地质构造略图

Fig.3 Simplified geological map of the Qingchuan fault and adjacent areas 1. 现代堆积; 2. 震旦系; 3. 元古宙; 4. 元古宙花岗岩; 5. 断层; 6. 河流



### 图 4 金山寺附近地貌及水系位错图 Fig.4 Geomorphological map and systematic stream offsets across the Qingchuan fault near Jinshansi Contour line interval being 20m

2009

如南沙河、安乐河和白龙江,位错量很接近,为2~7km;更次一级的水系位错量一般小于 1km。这种水系位错与水系规模成正相关的特征说明确实是受断裂活动控制。

阳平关以东的代家坝一带有一系列小规模的冲沟和水系位错,冲沟之间分别被一系列元 古宙构成的小断块所分隔,断块呈羽斜状排列,其组合形态指示断裂为右行剪切,位移量大 致在 200~250m。由于地表覆盖严重,未找到全新世活动的证据。

阳平关以西断层活动较明显,金山寺附近沿断裂发育有宽度约 200~500m 的小盆地和断 塞塘,长约 0.6~5km,沿断裂向南西盆地的宽度和长度都逐渐增大,说明断裂在此处具有 一定的张性分量,并且向南西张性分量逐渐增加。白龙江支流在塔寺坝自北向南穿过断裂, 形成约 200m 的右旋位错。田坝附近有多条溪流同步转折,右旋位错在 80~110m,其两侧的 山梁被错断形成坡中槽,长数十至数百米(图 4)。

广坪-燕子砭一带,断裂宽约 50~300m,带内有片岩及侏罗系紫红色砾岩透镜体。砾岩中的砾石成份主要为黄绿色砂岩、紫红色砂岩、少量片麻岩、灰岩和石英。砾石分选差,砾 径大者可达 30~40cm,小的约 0.15cm。砾石磨圆较差,次棱角状;砾石表面多有紫红色铁 膜,为紫红色铁质、泥质胶结,岩石层理不清楚(图 5a)。断层带内的砾岩发生强烈劈理 化,指示断裂发生右行剪切(图 5b)。

(2) 青木川分支断层

该断层位于青川断裂西北 8~12km,并与之大致平行。西南起碧口,向东北姚渡、经青 木川、玉泉坝、八海,与主干断层交汇在阳平关一带,长约 80km,倾向 NW 或 SE,倾角较 陡。该断裂是古生代碧口群地层内部的一条断裂,在碧口镇花岗岩中断裂延伸短,破碎带 窄,宽仅几米,向东地貌上有槽地或地形转折等显示,形成长达数十公里的断层谷地,控制 了碧口-姚渡一带白龙江的走向,在青木川、玉泉坝、八海河乡一线不仅控制了断层谷地水 系发育,而且造成穿越谷地的金溪、广坪河、安乐河水系同步转折,说明该断层有一定的活 动性。据樊春等研究结果,断层至少在晚第四纪期间停止了活动。在玉泉坝东北,晚更新世 含砾黄土覆盖在断层之上,在黄土中取 TL 样品,测定年龄为距今(8.486±0.721)×10<sup>4</sup>a, 反映 8 万年以来断层就停止了活动;在八海西紫红色断层泥的 TL 样品测定,其最晚活动时 代为距今(15.674±1.322)×10<sup>4</sup>a,表明断裂活动时代在晚更新世前后<sup>1201</sup>。

(3) 青川断层附近余震分布特征

青川断层是一条逆冲兼右行走滑活动断裂,在这次汶川大地震中虽未见其活动,但其阻 隔了余震向北发展,表明该断层是一条重要的边界断层,既是区域构造分区的界线,也是区 域应力场的分区标志线。

汶川 8.0 级地震和宁强 5.7 级地震后,青川-勉县断裂带东段的阳平关-大安一线出现大 面积的地质环境异常,水井水位普遍上升、泉水异常增大、干涸的溪流重新出水、勉县温泉 变冷泉、树木离奇枯萎,种种迹象表明该区地震后地形变化较大。

由于陕西宁强的青木川距离四川的青川县仅数十公里,自5.12 汶川大地震后,受连续 余震波及严重,特别是5月27日,宁强发生的5.7 级余震震中就位于青木川镇,当天在4 小时内曾连续发生9次余震,其中3级以上余震3次,分别为16时03分四川青川(北纬 32.7°,东经105.6°)发生5.4级地震;当日16时12分陕西宁强(北纬32.8°,东经105.6°) 发生3.7级地震;当日16时37分陕西宁强(震中位置位于北纬32.8°,东经105.6°)发生5.7 级地震(据地震台网测定),造成青木川镇大量历史建筑和新建建筑严重损毁(图6~图8)。



a. 广坪青川断裂内侏罗系紫红色砾岩透镜体(镜头NE)

b. 金山寺青川断层带为蓝色断层泥及构造透镜体(镜头SW)

图 5 青川断裂 Fig.5 The Qingchuan fault



图 6 宁强 5.7 级地震震中青木川镇破坏

Fig.6 Damage of Qingmuchuan town in the Ningqiang  $M_{\rm S}5.7$  earthquake

### 3 地应力测量结果

水压致裂法是竖直孔常用的一种地应力测量方法,水压致裂技术起源于石油和天然气开 采的油井压裂增产措施,已在铁路隧道、矿山、水电等领域广泛性应用<sup>[21-23]</sup>。Hubbert 等<sup>[24]</sup>



### 图 7 宁强 5.7 级地震距震中 77km 阳平关镇小学破坏

Fig.7 Damage of Yangpingguan primary school in the Ningqiang  $M_{s}5.7$  earthquake



图 8 阳平关嘉陵江河滩长达数公里的地裂缝带和喷砂冒水现象(5.12 地震造成) Fig. 8 Blasting water and crack at Yangpingguan along Jialingjiang River

发表了水压致裂产生的张破裂与周围应力关系的理论研究成果,经过几十年理论和实验研究,水压致裂地应力测量成了目前测量地壳深部应力有效而实用的方法。水压致裂基于铅直应力等于静岩压力( $\sigma_n = \rho g h$ )的假设,实质上是一种2维平面地应力测量,在逆断层应力状态时可能出现较大的误差(最小主应力不一定是铅直的),为了测得青川断层上下盘真实的地应力状态,我们利用大安镇、阳平关和代家坝3个地应力监测站钻孔进行了水压致裂地 应力测量,同时还在同一钻孔中采用空芯包体解除法进行地应力比较测量,得到了地表浅部 构造应力的大小、方向和分布特征。根据实测的地应力资料,用库仑摩擦滑动准则分析了断 裂带的活动性。

3 个钻孔呈三角形分布,大安镇与阳平关监测孔均在断层下盘,相距 21.96km,代家坝 钻孔位于断层上盘,距大安镇钻孔 17.48km,距阳平关钻孔 7.45km。测试孔段直径为 Φ130mm,孔深度分别为 49.10m、50.10m和 52.50m,大安镇为花岗岩,阳平关为奥陶系灰 岩,代家坝为元古宙绿片岩。为保证钻孔完整和不渗水,开孔全部选在弱风化-微风化基岩 中,井斜保持在1~2°范围内(表1)。

表1 地应力测量钻孔概况

Tab.1 Borehole profile of in situ stress measurement

监测站		地理坐标		71.577	构进位罢	上本	
名称			<b>ゴレ/木</b> /m	何但世里有			
大安镇	33.05	106.31	653.46	52.50	断裂的 SE 盘(下盘)	花岗岩	
阳平关	32.98	106.10	638.40	50.10	断裂的 SE 盘(下盘)	奥陶系灰岩	
代家坝	33.05	106.13	595.97	49.10	断裂的 NW 盘(上盘)	元古宙绿片岩	

3.1 解除法地应力测量方法和仪器

水平孔空芯包体解除法地应力测量是一种成熟的技术,广泛应用于矿山和隧道中。测量 时先将探头安装在预先钻好的小孔中,用胶将探头与岩石胶结在一起,一般用环氧树脂(一 种忌水胶),为了保证探头与岩石的粘合质量,要求钻孔是干燥的,因此一般采用上倾的钻 孔,探头通过电缆与孔口的应变仪连接,导线不易太长,因而该方法测量的深度受到限制, 一般不超过 20m。

(1) 垂直解除法

垂直孔空芯包体解除法的技术关键是如何保证在垂直孔内有水条件下岩石和探头的粘结。经过多年的努力,我们开发了适用于空芯包体的水下固化胶和新型探头。水下胶在稀泥浆的条件下,可将岩石表面的水分、油膜及少量泥浆吸收,以保证岩石和探头在水下胶结牢靠。井下空芯包体探头是一体化的地应力测试仪器,将 16 路应变仪、电子罗盘和微型自动记录装置固化在一块 80 × 25mm 的电路板上,装在探头的内部,仪器采用钟控方式在预定时间启动后,电子罗盘记下探头安装方位角和倾角,然后按每隔 10 秒 16 通道循环读数,将测量的方位角和应变数值保存在 flash 内,自带的锂电池可保证仪器连续工作 10 小时以上。测试结束后,探头随岩芯被取出来,并用 pc 机读出 flash 内的测量数据。

(2) 垂直解除过程

垂直孔空芯包体环氧树脂三轴应变法的应力解除过程见图 9。

由图 9 可以看出,垂直孔空芯包体解除过程大致如下:

①打大孔:用钻机向基岩钻进应力解除孔,钻孔深度以终孔点不受环境及围岩应力场的 影响为标准,钻头直径为 \$130mm。

②磨平钻孔的孔底,消除残余岩芯和岩块、岩粉,岩芯管后带取粉筒。

③换锥形钻头做锥形孔底,以保证后面的小孔与大孔同轴心。

④打小孔:采用特制的液压钻具,换上 \$36mm 钻头,进尺 50cm。钻具在不同深度上开 有泻水孔,通过水压的变化,判断小孔的深度。

⑤空芯包体安装:用砂纸将空芯包体外侧圆柱面打毛;按比例配制好粘结剂(A,B两种液态材料),在空芯包体的空腔内倒入适量的粘结剂,固定好销钉,将包体安装在定向器上。用钻杆慢慢地将其送入大孔中,并记下长度,在剩余长度为5m左右时要特别注意,以保证包体能够完好地进到小孔中。前端进入小孔20cm左右,应注意包体筒体部分缓慢推入,探头和安装器脱钩,包体成功地安装于小孔中。

⑥应变初始数据:在安装包体 20 小时左右,环氧树脂固化。将安装器小心地从钻孔中 提出,安装器中电子罗盘记下探头安装角,所显示数字为应力计的安装角。 ⑦套芯地应力解除与应变测试:在井 下应变仪到达预定时间时,应变仪将自动 启动,开始测量,此时应按预定深度开始 缓慢钻进,进行套芯解除,达到一定深度 后,应变计读数趋于稳定。

⑧ 套 芯 解 除 完 成 , 取 出 岩 芯 和 应 变 仪 , 测试结束。

3.2 测量结果

(1)大安镇孔位于漫洞子村口,青川 断裂带的南侧下盘。钻孔为泥浆钻进,孔 径 Φ130mm,孔深 52.50m,静水位 0.80m。 钻孔岩性:0~10.50m为浅灰色风化花岗 岩;10.50~52.50m为弱风化-微风化灰白 色花岗岩,岩芯完整为柱状。由于施工进 度限制,在该孔 15.50m处进行了1段水压 致裂应力测量,测得的水平最大主应力 7.91MPa,最大主压应力方向为 NE65°(表 2)。

(2)阳平关钻孔位于滴水寺村,青川 断裂带的南侧下盘。钻孔为泥浆钻进,直
径为 Φ130mm,孔深 50.10m,静水位
0.20m。钻孔岩性:0~50.10m为奥陶系灰
色灰岩,岩芯完整。在该孔在 15.50m、



图 9 井下应力解除过程示意图

6.20m。 田北石住: 0~30.10m / 英國宗次
Fig.9 Stress relieving process under ground
色灰岩,岩芯完整。在该孔在 15.50m、1.施工钻孔; 2. 磨平孔底; 3. 孔底磨锥槽; 4. 施工小孔; 5. 安
22.50m、28.50m、35.50m、40.50m 进行了 装地应力探头; 6. 套芯解除; 7. 套芯结束; 8. 取岩芯和应变仪
5 段水压致裂应力测量,水平最大主压应力方向平均为 NW50.7°(表 2)。

表 2	<b>毡</b> 孔水/	玉欫裂地应刀测量结果	

钻孔	测段深度	压裂参数/MPa				ŧ	主应力值/MPa			$\sigma_H$	
位置	/m	$P_b$	$P_r$	$P_s$	$P_0$	Т	$S_H$	$S_h$	$S_v$	/°	$\sigma_v$
大安镇	15.50	3.86	1.80	1.05	0.16	2.06	1.20	1.05	0.47	NE65	3.4
	15.50	4.27	2.22	1.21	0.16	2.05	1.26	1.21	0.47	NW55	3.6
	22.50	4.61	2.81	1.65	0.23	1.80	1.91	1.65	0.68		3.7
阳平关	28.50	3.98	3.56	1.96	0.29	0.42	2.02	1.96	0.86		3.0
	35.50	4.93	3.58	2.10	0.36	1.35	2.36	2.10	1.07	NW46.4	2.8
	40.50	5.62	4.27	2.45	0.41	1.35	2.68	2.45	1.22		2.8
	20.50	4.81	3.11	1.67	0.21	1.70	1.70	1.67	0.62	NE35	3.6
	25.50	5.82	3.88	2.09	0.26	1.94	2.13	2.09	0.77		3.7
代家坝	31.50	5.82	4.42	2.45	0.32	1.40	2.62	2.45	0.95		3.7
	36.50	6.02	4.49	2.52	0.37	1.53	2.69	2.52	1.10	NE53.6	3.2
	43.50	6.80	5.08	2.95	0.44	1.73	3.35	2.95	1.31		3.3

Tab.2 Hydraulic fracturing stress measurement results

(3)代家坝钻孔位于白猿沟村,青川断裂带的北侧上盘。钻孔为泥浆钻进,直径 Φ130mm,孔深 49.10m,静水位 0.50m。钻孔岩性:0~49.10m为元古宙绿片岩,岩芯较完整,呈长柱状。在该孔的 20.50m、25.5m、31.5m、36.5m和 43.5m 处进行了 5 段水压致裂应 力测量,水平最大主压应力方向平均为 NE44.3°(表 2)。

(4)2008年6月6日,在阳平关监测孔深 33m 处,进行了垂直孔解除法地应力测量,测 得震后最大主应力方向为119°,最大主应力大小为8.98MPa;6月8日,在宁强县代家坝白 猿沟孔深31m 处,采用空芯包体解除法进行了地应力测量。测得震后最大主应力方向为 62°,最大主应力大小为10.74MPa(表3)。

				U				
钻孔 位置	深度	测试会物	d	<sup>7</sup> 1	$\sigma_2$		$\sigma_3$	
	/m	则以参数	测量结果	相对误差	测量结果	相对误差	测量结果	相对误差
代家坝		应力(MPa)	2.69	3.18%	2.25	3.97%	1.65	5.18%
	31.0	方位(°)	242.05	—	1.74	—	98.64	—
		倾角(∘)	- 23.83	—	- 15.23	—	- 61.19	_
阳平关		应力 ( MPa )	2.25	2.42%	1.67	3.09%	1.59	3.43%
	33.0	方位(°)	119.06	—	- 76.43	—	193.91	—
		倾角(°)	2.31	_	- 8.47	_	81.22	_

表 3 钻孔空芯包体解除法地应力测量结果 Tab.3 Stress relieving measurement results

### 4 青川断层附近原地应力状态与断层活动性分析

利用原地应力测量结果解释断裂活动及地震研究,主要取决于近地表的应力资料与深部 应力场之间的对应程度,对此,国内外进行了大量的测量研究。总体认为,原地应力测量结 果与测点附近活断层类型推断的结果相一致。

4.1 滑动准则的确定

根据破裂理论,在 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ (且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )应力作用下,地层和岩石破裂时, $\sigma_2$ 轴与破裂面平行,主应力轴与断层之间的关系如图 10 所示。应用断层摩尔-库仑摩擦滑动准则,也可以研究断层的活动性。断层 3 个主应力值之间的关系为 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$ ,当水平最大、最小和垂直应力的关系为 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$ , $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$ 和 $\sigma_V > \sigma_H > \sigma_h$ 时,则分别有利于逆断层、走滑断层和正断层活动。

地震是由预先存在的断层面在应力作用下滑动而引起的,可用摩尔-库仑准则表示:

$$\sigma_f = \tau + \mu \sigma_n \tag{1}$$

式中: $\sigma_f$ 为滑动力, $\tau$ 为断面黏结强度, $\sigma_n$ 为断面正应力, $\mu$ 为断面摩擦因数,用剪裂角表示为:

$$b = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \mu \right)$$
 (2)

通常 τ 的量级约为几十分之一兆帕,可以忽略。μ 值在一定正应力界限内比较稳定, 即不随岩石类型和正应力水平的变化而出现较大波动。如果沿断层面的滑动力 σ<sub>r</sub> 大于阻碍



图 10 主应力轴与断层关系

Fig.10 Relationship between principal stress axis and fault





Fig.11 Effective stress-Moore Circle with the shear stress and critical areas diagram of

Qingchuan fault stress measurement 红线-代家坝实测地应力状态;蓝线-阳平关实测地应力状态; 黄线-大安镇实测地应力状态;绿线-解除法实测的地应力状态

断层滑动的摩擦阻力μσ,时,在断层面上就会发生摩擦滑动。

用主应力改写库仑准则,并引入有效应力的概念。这样,滑动阻力便是正应力  $\sigma_n$  与孔 隙压力  $P_0$  之间的函数。对于方位合适的断裂面,最大有效应力  $S_1 - P_0$  与最小有效主应力  $S_3 - P_0$  之比值可简单地表示为摩擦系数的函数,用 k 表示:

$$k = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_1 - P_0}{S_3 - P_0} \ge \left[ \left( \mu^2 + 1 \right)^{0.5} + \mu \right]^2$$
(3)

式中:P。为孔隙水压力。

采用水平主应力和铅直应力表示正断层、走滑断层和逆断层滑动准则如下:

(1) 正断层:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_V - P_0}{S_{h\min} - P_0} = \left[ \left( \mu^2 + 1 \right)^{1/2} + \mu \right]^2$$
(4)

(2) 走滑断层:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_{H_{\text{max}}} - P_0}{S_{h_{\text{min}}} - P_0} = \left[ \left( \mu^2 + 1 \right)^{1/2} + \mu \right]^2$$
(5)

(3) 逆断层:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{S_{Hmax} - P_0}{S_V - P_0} = \left[ \left( \mu^2 + 1 \right)^{1/2} + \mu \right]^2$$
(6)

若最大、最小有效主应力之比小于此值,则断层稳定,不发生滑动。如果比值等于此 值,就会在方位合适的断层上发生滑动。

断层稳定性研究的首要问题是滑动准则(摩擦强度)的选取。拜尔利<sup>[25]</sup>综合各种不同 类型岩石的实验室摩擦实验资料表明:大部分岩石的 μ 值均在 0.6~1.0 之间。

在兰吉利油田研究注水诱发地震的试验中,采用 Byerlee 确定的砂岩滑动准则(公式7), 验证了在实验室得到的断层滑动准则可以用于天然断层。

$$\tau = 0.6 \sim 1.0 (S_n - P_0)$$
 (7)

M. D. Zoback 等<sup>[26~27]</sup>在分析美国卡罗来纳州 Monticello 水库蓄水后是否诱发地震时,采用的摩擦因数为 0.6~0.8;在分析内华达试验场地几条断层稳定性时,采用的摩擦因数为 0.6~1.0。张伯崇等<sup>[28]</sup>、李方全等<sup>[29]</sup>在黄河上游拉瓦西水电站、三峡工程断层稳定性分析 以及台吉煤矿稳定性研究时,进行了花岗岩和灰岩的三轴摩擦试验,得出了滑动准则公式 (8)和公式 (9):

$$\tau = 0.65(\sigma_n - P_0) \tag{8}$$

和

$$\tau = 0.62 \sim 0.81 (\sigma_n - P_0)$$
 (9)

### 4.2 断层附近应力状态与断层活动性

在青川断裂附近 3 个钻孔分别采用空芯包体解除和水压致裂两种方法进行地应力测量, 得到断裂上下盘的地应力大小和方向。表 1 给出了不同测区水平最大主应力( $\sigma_{\mu}$ ) 水平最 小主应力( $\sigma_{h}$ )和由静岩压力估计的铅直应力( $\sigma_{V}$ ),以及走滑断层和逆断层活动相应的平 均剪切强度,显示出青川断层地壳浅部构造应力场以水平构造应力为主,主应力值随深度增 加而增大,测得浅部最大主应力和中间主应力为水平方向,属于逆断层应力状态,应力状态 的总趋势有利于逆断层滑动,水平最大与最小应力之比小于  $K = 1.0 \sim 1.13$ ,实测应力值达 不到临界值( $K_{0.6} = 3.1$ ,  $K_{0.8} = 4.3$ ),所以不具备发生走滑断层活动的可能性。最大水平主 应力与铅直应力比值为:大安钻孔  $K = \sigma_1/\sigma_3 = 3.4$ ,阳平关钻孔  $K = \sigma_1/\sigma_3 = 2.8 \sim 3.6$ ,代家 坝钻孔  $K = \sigma_1/\sigma_3 = 3.2 \sim 3.6$ ,如果按大多数断层岩石的  $\mu$  值在 0.6 ~ 1.0 之间判断,实测应 力值已达到或接近临界值( $K_{0.8} = 4.3$ ),实测应力值接近发生逆冲滑动的临界值,表明断层 处于不稳定的临界状态,因此,在方位合适的断裂或节理面上发生逆断层型的活动是很可能

2009

的(图11)。

就地应力方向而言,青川断层上盘代家坝白袁沟测点测得的水平最大主压应力方向为 NE44.3°,与断层有一定夹角,有利于断层左滑运动。断层下盘阳平关测点水平最大主压应 力方向为 NW50.7°,大安镇测点最大水平主应力方向为 NE65°,与断层面有一定的角度,有 利于逆断层运动。对比余震震源机制解结果基本一致。断层上盘和下盘的最大主应力方向差 异较大,说明该区地应力场受到地震活动的扰动。上述只是根据较浅钻孔的资料进行了初步 讨论,是否可以将这些资料外推到深部以及青川断层的摩擦系数 µ 值究竟应取多大,都是值 得进一步研究的问题。

### 5 结论

(1)青川断层 3 个测点的应力测量结果表明:在地壳浅部构造应力场以水平构造应力为 主,主应力值随深度增加而增大,测区内最大水平主压应力方向为 NE-NEE。

(2)青川断层 3 个测点的 3 个主应力值之间的关系为 σ<sub>H</sub> > σ<sub>k</sub> > σ<sub>v</sub>, 应力状态的总趋势 有利于逆断层滑动。

(3)用库仑摩擦滑动准则和实测的地应力资料对青川断层的活动性分析表明,研究区的 实测地应力水平最大与最小应力之比小于 K = 1.0~1.13,实测应力值达不到滑动临界值, 所以不具备发生走滑断层活动的可能性,表明断层在走滑方向是稳定的。

(4) 实测最大水平主应力与铅直应力比值为:大安钻孔  $K = \sigma_1/\sigma_3 = 3.4$ ,阳平关钻孔  $K = \sigma_1/\sigma_3 = 2.8 \sim 3.6$ ,代家坝钻孔  $K = \sigma_1/\sigma_3 = 3.2 \sim 3.6$ ,实测应力值已达到或接近逆冲滑动临界值,在方位合适的断裂或节理面上发生逆断层型活动的可能性较大。

(5)青川断裂与龙门山断裂带的其它几条断裂相比,在晚新生代右行走滑的地貌上线性 特征更为明显,沿断裂分布的断层谷地及线性地貌显示了新生代晚期以来以走滑运动为主的 特征。相比而言,断层西段活动性强于东段,距此次地震震中更近,因此,断裂带中-西段 断层活动的危险性更大。

#### 参考文献

- [1] 彭华,马秀敏,姜景捷.山丹地应力监测站体应变仪的地震效应[J].地质力学学报,2008,14(2):97~108.
   PENG Hua, MA Xiu-min, JIANG Jing-jie. Analysis of the volume strain data from the Shandan in-situ stress Monitoring Station
   [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (2):97~108.
- [2] 彭华,吴珍汉,马秀敏. 青藏铁路无人值守地应力综合监测站 [J]. 地质力学学报,2006,12(1):96~104. PENG Hua, WU Zhen-han, MA Xiu-min. Unmanned in-situ stress monitoring stations along the Qinghai-Tibet railway [J]. Journal of Geomechanics,2006,12(1):96~104.
- [3] 罗志立,龙学明. 龙门山造山带崛起和川西前陆盆地沉降[J]. 四川地质学报,1992,12(1):1~17. LUO Zhi-li, LONG Xue-ming. The uplifting of the Longmenshan orogenic zone and the subsidence of the western Sichuan foreland basin [J]. Acta Geologica Sichuan, 1992,12(1):1~17.
- [4] 刘树根. 龙门山冲断带与川西前陆盆地形成演化[M]. 成都:成都科技大学出版社, 1993.17~117.
   LIU Shu-gen. The formation and evolution of Longmenshan thrust zone and western Sichuan, China [M]. Chengdu: Press of Chengdu University of Science and Technology, 1993.17~117.
- [5] 陈社发,邓起东,赵小麟,等.龙门山中段推覆构造带及相关构造的演化历史和变形机制(一)[J].地震地质, 1994,16(4):404~412,421.

CHEN She-fa , DENG Qi-dong , ZHAO Xiao-lin , et al. Deformational characteristics , evolutionary history , and deformation mechanism of the middle Longmenshan thrust-nappes and related tectonics (I) [J]. Seismology and Geology , 1994 , 16 (4):  $404 \sim 412$  , 421.

[6] 陈社发,邓起东,赵小麟,等.龙门山中段推覆构造带及相关构造的演化历史和变形机制(二)[J].地震地质, 1994,16(4):413~421.

CHEN She-fa , DENG Qi-dong , ZHAO Xiao-lin , et al. Deformational characteristics , evolutionary history , and deformation mechanism of the middle Longmenshan thrust-nappes and related tectonics ( II ) [ J ]. Seismology and Geology , 1994 , 16 ( 4 ): 413 ~ 421.

- [7] 彭华,马秀敏,白嘉启,等.甘孜玉树断裂带第四纪活动特征[J].地质力学学报,2006,12(3):295~304. PENG Hua, MA Xiu-min, BAI Jia-qi, et al. Characteristics of Quaternary activities of the Garzê-Yushu fault zone [J]. Journal of Geomechanics, 2006,12(3):295~304.
- [8] 彭华,马秀敏.南水北调西线工程区地震危险性分析及预测[J]. 地质力学学报,2007,13(1):15~24. PENG Hua, MA Xiu-min. Risk analysis and prediction of earthquakes in the construction area of the west line of the south to north water diversion project [J]. Journal of Geomechanics, 2007,13(1):15~24.
- [9] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1986, 19: 113 ~ 157.
- [10] 李勇,周荣军, Densmore AL,等.青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志[J]. 第四纪研究, 2006,26(1):40~51.
   LI Yong, ZHOU Rong-jun, Densmore AL, et al. Geomorphic evidence for the Late Cenozoic strike-slipping and thrusting in
- Longmen Mountain at the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1):40~51. [11] 李勇,周荣军, Densmore AL,等.青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑挤压作用的沉积响应[J]. 沉积学报, 2006,24(2):153~164.

LI Yong, ZHOU Rong-jun, Densmore A L, et al. Sedimentary responses to Late Cenozoic thrusting and strike-slipping of Longmenshan along eastern margin of Tibetan Plateau [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24 (2): 153 ~ 164.

[12] 姚鑫,张永双.基于差分干涉雷达的汶川地震同震形变特点[J].地质力学学报,2009,15(2):151~161. YAO Xin, ZHANG Yong-shuang. Co-seismic deformation of 5.12 Wenchuan earthquake based on D-InSAR [J]. Journal of Geomechanics, 2009,15(2):151~161.

### [13] 张永双,雷伟志,石菊松,等.四川5.12地震次生地质灾害的基本特征初析[J].地质力学学报,2008,14(2): 109~116.

ZHANG Yong-shuang , LEI Wei-zhi , SHI Ju-song , et al. General characteristics of 5.12 earthquake-induced geo-hazards in Sichuan [J]. Journal of Geomechanics , 2008 , 14 (2): 109 ~ 116.

- [14] 张永双,石菊松,孙萍,等. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例[J]. 地质力学学报,2009,15(2):131~141. ZHANG Yong-shuang, SHI Ju-song, SUN Ping, et al. General manifestation of coupling processes between endogenic and exogenic geological processes in 5.12 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(2):131~141.
- [15] 谭成轩,孙叶,吴树仁,等. 5.12 汶川 M<sub>S</sub>8.0 大地震后关于我国区域地壳稳定性评价的思考 [J]. 地质力学学报,2009,15(2):142~150.
   TAN Cheng-xuan, SUN Ye, WU Shu-ren, et al. A consideration on regional crustal stability assessment after 5.12 Wenchuan

M<sub>s</sub>8.0 strong earthquake in China [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(2): 142~150.
[16] 王连捷,崔军文,周春景,等. 汶川 5.12 地震发震机理的数值模拟[J]. 地质力学学报, 2009, 15(2): 105~

WANG Lian-jie, CUI Jun-wen, ZHOU Chun-jing, et al. Numerical modeling of Wenchuan 5.12 earthquake mechanism [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 105 ~ 113.

[17] 王连捷,周春景,孙东生,等. 汶川 5.12 地震引起的库仑应力变化及其对周边地震活动的影响 [J]. 地质力学学报,2008,14(3):193~200.

WANG Lian-jie , ZHOU Chun-jing , SUN Dong-sheng , et al. Coulomb stress changes caused by Wenchuan earthquake and its influence on seismic activity in the adjacent area [J]. Journal of Geomechanics , 2008 , 14 (3):  $193 \sim 200$ .

[18] 邓起东,陈社发,赵小麟.龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学 [J].地震地质,1994,16(4):389~

113.

403.

DENG Qi-dong , CHEN She-fa , ZHAO Xiao-lin. Tectonics , seismicity and dynamics of Longmenshan Mountains and its adjacent regions [J]. Seismology and Geology , 1994 , 16 (4): 389 ~ 403.

[19] 王全伟,梁斌,谢启兴,等.青川地区青川断裂带的显微构造及其变形条件研究[J].矿物岩石,2000,20(1): 87~90.

WANG Quan-wei, LIANG Bin, XIE Qi-xing, et al. Research on micro-structures and deformation conditions of the Qingchuan fault zone [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2000, 20 (1): 87 ~ 90.

[20] 樊春,王二七,王刚,等.龙门山断裂带北段晚新近纪以来的右行走滑运动及其构造变换研究——以青川断裂为例[J].地质科学,2008,43(3):417~433.

FAN Chun , WANG Er-qi , WANG Gang , et al. Dextral strike-slip and tectonic transformation of the northern Longmenshan fault belt from Late Neocene : A case study from the Qingchuan fault [J]. Chinese Journal of Geology , 2008 , 43 (3): 417 ~ 433.

[21] 马秀敏,彭华,李金锁.新疆西部地应力测量在隧道工程中的应用 [J].地质力学学报,2005,11 (4):386~ 393.

MA Xiu-min , PENG Hua , LI Jin-suo. Application of hydraulic fracturing in-situ stress measurements in tunneling in western Xinjiang [J]. Journal of Geomechanics , 2005 , 11 (4): 386 ~ 393.

[22] 李金锁,彭华,崔巍,等.云南西北部铁路隧道地应力测试及工程应用[J].地质力学学报,2005,11(2):135 ~144.

LI Jin-suo, PENG Hua, CUI Wei, et al. Reaults of rock stress measurements and engineering application of a railway tunnel in northwestern Yunnan [J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11 (2): 135 ~ 144.

[23] 马秀敏,彭华,李金锁,等. 襄渝铁路增建二线——新白岩寨隧道地应力测量及其在岩爆分析中的应用[J]. 地 球学报,2006,27(2):181~186.

MA Xiu-min, PENG Hua, LI Jin-suo, et al. In-situ stress measurement and its application to rock burst analysis in Xinbaiyanzhai tunnel of the Xiangyu Railway [J]., Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27 (2): 181 ~ 186.

- [24] Hubbert M K, Willis D G. Mechanics of hydraulic fracturing [J]. The American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 1957, 210: 153~166.
- [25] Yerlee J D. Friction of rocks [J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116(4/5): 615~626.
- [26] Zoback M D, Hickman S. In site study of the physical mechanics controlling induced seismicity at Monticello reservoir south Carolina [J]. Journal of Geophysical Research, 1982, 87:6959~6974.
- [27] Zoback M D, Healy J H. Friction, faulting and in-situ stress [J]. Annals Geophysics, 1984, 2 (6): 689 ~ 698.
- [28] 张伯崇,马元春.岩石摩擦性状的试验和断层滑动准则的讨论 [A].国家地震局地壳应力研究所.地壳构造与应 力论文集 [C].北京:地震出版社,1987.136~145.

ZHANG Bo-chong, MA Yuan-chun. The experiments on frictional behaviors rocks and a discussion on criterion of fault slide [A]. In: Institute of Crustal Dynamics of State Seismological Bureau. Symposium of the Crustal Tectonics and Stress [C]. Beijing: Seismological Press, 1987.136 ~ 145.

[29] 李方全,张伯崇,苏恺之.三峡坝区水库诱发地震研究——茅坪钻孔的现场测试与分析[M].北京:地震出版 社,1993.191.

LI Fang-quan, ZHANG Bo-chong, SU Kai-zhi. Study on reservoir induced eartyquake in Three Gorges dam: On-site measurement and analysis in Maoping borehole [M]. Beijing: Seismological Press, 1993.191.

## STABILITY AND STRESS MEASUREMENT NEAR THE QINGCHUAN FAULT IN THE NORTHERN LONGMEN MOUNTAINS

PENG Hua<sup>1 2</sup> , MA Xiu-min<sup>1 2</sup> , JIANG Jing-jie<sup>1 2</sup>

(1. Key Lab of Neotectonic Movement and Geohazards, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: After the M8.0 Wenchuan earthquake, it becomes an important concern that whether aftershocks direct to Hanzhong along the Oingchuan fault and a strong aftershock also occur. The study on *in situ* stress measurements was carried out at Ninggiang region in the northeastern section of the fault in order to master the changes of the coulomb stress in the Qingchuan fault after the earthquake and to identify the development trend of aftershocks, using the hydraulic fracturing in situ stress measurement techniques on June 2 to 28, 2008. The size, orientation and distribution of the tectonic stress in the fault were obtained respectively by the hydraulic fracturing and stress relieving in three boreholes. According to the measured stress data, the direction of the maximum level principal stress is NE-NEE near the fault, and does not accord with the SN-NNE direction of the regional tectonic stress. It is shown that the stress state near the fault changes obviously compared to the regional stress field, affected by the impact of fault activity. The relationship between horizontal and vertical stress is  $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$  at the measurement depth. The study reveals that the stress state is conducive to the activities of reverse fault and is basically the same as the geological data. By using sliding friction Coulomb Guidelines and friction strength from 0.6 to 1.0, it can be seen that present stress state near the fault has reached or exceeded the sliding friction threshold of the thrust fault, indicating that present tectonic activity is mainly thrust movement and it is impossible for the strike-slip movement to occur in the measured area. The thrust fault activity is less likely in the eastern section of the fault but much more likely in western part of the Qingchuan fault.

**Key words**: Longmenshan earthquake; Qingchuan fault; *in situ* stress; hydraulic fracturing stress measurement; Coulomb sliding friction criteria