

三峡库首区高桥断裂带断层泥分形特征研究

高红亮¹ 姚运生^{1,2} 王秋良^{1,2} 张丽芬^{1,2} 陈星星¹

1 中国地震局地震研究所(地震与大地测量重点实验室),武汉市洪山侧路40号,430071

2 中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地,武汉市洪山侧路40号,430071

摘要:三峡水库蓄水前后,沿高桥断裂带发生了一系列地震活动。为了解断层泥特征与断裂活动的关系,在野外地质调查基础上,对高桥断裂带内的断层泥进行X光衍射和粒度分布测试。结果显示,高桥断裂带断层泥的粘土矿物含量一般低于35%,并且主要矿物为不具膨胀性的绿泥石和伊利石;断层泥分维值在2.20~2.67之间变化,表明高桥断裂带的运动方式以粘滑为主。断层力学性质和断层泥分维计算均表明其具有分段性,结合断裂附近的地震活动认为,北东段较南西段稳定,但不排除高桥断裂带未来有发生中强地震的可能性。

关键词:断层泥;分维值;粘滑;高桥断裂

中图分类号:P315

文献标识码:A

在长江三峡工程前期论证、施工及后期蓄水过程中,近库坝区断裂活动性一直是研究的重点课题之一。对于三峡这样一个少震区,进行断裂活动性和活动方式等的分析,对库区未来地震活动趋势的判断有着重要意义。高桥断裂作为库首区巴东库段的一条重要断裂,其活动性备受关注。研究断裂活动性的方法很多,利用断层泥进行断裂活动的研究是近年来的发展方向^[1]。断层泥指发育在断层带中的未固结或弱固结泥状岩石,是断层反复运动时两侧岩石破碎形成的。断层泥是断裂活动的重要信息载体,它蕴含着断裂活动时代、方式和物理环境等大量信息^[2]。Sammis等^[3]对断层泥的研究表明,断层泥具有自相似特征,并首先将分维理论应用于断层泥研究领域。而后,我国学者将分形理论应用于断层泥分维值与断裂活动关系的研究中,为断裂活动的定量研究开辟了新途径。

前人对高桥断裂的形成机制、构造活动期次、动力学特征及地震活动性等方面进行了大量研究^[4-5]。本文在此基础上,以高桥断裂带上的断层泥为研究对象,结合野外地质调查,探讨断层泥分形特征与断裂活动性之间的关系。

1 高桥断裂带基本特征

高桥断裂带位于秭归盆地西北缘,北起兴山古

夫,向西南经南阳河、伍家垭、龚家桥、巴东白湾、曾家岭和炮台山西坡,止于西穰口神农溪,全长近40 km。断裂总体走向为北东50°,倾向或南东或北西,倾角50°~65°,切割上古生界-三叠系地层。该断裂经历了多期构造变动,燕山早期以正断为主,晚期强烈挤压,发育碳化构造片岩及碳化糜棱岩;喜山期伴随着三峡地区整体抬升而发生张性正断活动;由方解石的双晶纹、自由位错密度推导,该断裂带喜山期、新构造运动早期和晚期差异应力分别为145、76~100和30~43 mPa,说明喜山期以来断裂的活动性逐渐减弱,但喜山期活动强度要高于三峡地区的平均值(100 mPa)^[6]。

断裂破碎带一般宽30~100 m,局部可达650 m,由主断面和多条分支断面组成,破碎带内部主要为次级褶皱、碎裂岩带、断层角砾岩带及断层泥,断裂在纵向和横向上均具有明显的分带分段现象,可大致分为北东段和南西段。

1) 茶园坡一带剖面

剖面位于高桥乡茶园坡附近,断层发育在三叠系巴东组(T_{2b})灰岩与泥盆系写经寺组(D_{3x})黄褐色砂岩、砂质泥岩之间,断层产状为130°∠65°。断层上盘为灰岩;下盘为砂、泥岩互层。挤压构造带宽约30 m,带内发育不同方向的节理面。构造岩带坚硬致密,断面上发育擦痕和张性裂隙,根据擦痕和地层接触关系判断,断裂活动性质以正断

收稿日期:2014-12-17

项目来源:中国长江三峡集团公司科研专项(SXSN/2377, SXSN/3354)。

第一作者简介:高红亮,硕士生,研究方向为防灾减灾工程及防护工程, E-mail:gaohongliang_eq@126.com。

通讯作者:姚运生,研究员,博士生导师,主要从事防灾减灾工程及防护工程研究, E-mail:yunsheng@eqhb.gov.cn。

为主。野外观察判断,该处断层至少在第四纪中晚期没有明显活动迹象。

2) 溪丘湾乡加油站剖面

在溪丘湾乡加油站可见一发育在三叠系巴东组(T_{2b})泥岩和泥质砂岩中的断层,主要切割巴东组紫红色砂岩、泥岩,断层产状为 $160^\circ \angle 30^\circ$ 。断层上盘为紫红色砂岩,夹有泥岩;下盘的中下部以紫红色泥岩为主,顶部为紫红色砂岩。断层构造带上宽下窄,宽度约 2 m。根据断层上、下盘地层对比,断层的最新活动为逆断性质,垂直断距约为 3 m。

3) 凉风垭一带剖面

在凉风垭一带可见一断层,发育在三叠系巴东组(T_{2b})灰岩和灰黄色泥质砂岩中。断层上盘为有轻微变形的灰岩,下盘的中下部以紫红色泥岩为主,顶部为紫红色砂岩,断层产状为 $350^\circ \angle 50^\circ$ 。断裂活动表现为宽约 20 m、变形强烈的破碎带,内部发育断层构造岩。断层在地貌上形成高约 50 m、走向 60° 的断层陡崖。断面上发育断层擦痕,侧伏角近 90° ,根据擦痕和断层上下盘地层的接触关系,判断该断层为逆断性质。构造带内物质胶结良好,坚硬致密。从剖面附近的宏观地貌和断层两侧的岩性分析,该处断层陡崖的形成可能是由于两侧的岩性不同而有差异风化侵蚀所造成的。

高桥断裂带在遥感图像上线性影像清晰,沿沟谷、垭口、凹槽状地形及陡崖展布;地貌上西北侧高且坡陡,峰高一般 1 700~2 300 m,东南侧相对低缓,峰高 1 500~1 800 m。

区域重力及航磁资料表明,高桥断裂带位于重力均衡正、负异常以及正、负磁异常交接地带,尤其在古夫至龚家桥一线这种异常表现更为明显。人工地震测探揭示,古夫一带存在西升东降、断距达 1.5 km 的断裂,说明高桥断裂带不仅走向延伸规模大,而且向地下也有一定的延伸深度。

2 样品断层泥的采集与实验

结构与成分是表征断层泥特征的两个重要方面。结构特征不仅反映了断层活动的类型和强度,而且也反映了断层泥的形成和演化环境;断层泥的物质成分是断层形成与演化的结果与记录,反映着断层的物质组成和来源以及所经历的地质变化和化学变化。为了解样品断层泥的结构特征和物相,在中国地质大学(武汉)材料与化学分析测试中心和地质过程与矿产资源国家重点实验室分别进行了样品断层泥的粒度分布测试和 X 射

线衍射分析。

2.1 样品断层泥的采集

严格按照地质学采样要求,进行现场样品采集。首先分清断层带结构,查明断层带、上盘和下盘,应用手持 GPS 测定取样点的位置。选好取样剖面,放上皮尺或卷尺,准确记录所取样品的地点。取样时要清除外层风化的岩土体,自下而上取新鲜岩土体大约 1 kg,装在准备好的样品袋中避光保存,同时做好野外样品采集记录。基于此采样原则和流程,在目标断裂上共取得断层泥样品 5 个(表 1)。

表 1 样品断层泥描述

Tab. 1 The description of fault gouges			
样品编号	取样地点	GPS 坐标	取样位置
GQ-1	营盘村	$31^\circ 18' 27.5''N, 110^\circ 40' 47.23''E$	断层带内
GQ-3	伍家坪村	$31^\circ 15' 23.59''N, 110^\circ 35' 31.87''E$	断层面向上 0~5 cm
GQ-6	严家井	$31^\circ 13' 37.51''N, 110^\circ 33' 59.98''E$	断层面向上 30~35 cm
GQ-8	红堰塘	$31^\circ 09' 32.48''N, 110^\circ 25' 59.07''E$	断层面向上 0~5 cm
GQ-10	麦丰湾	$31^\circ 07' 32.42''N, 110^\circ 21' 45.81''E$	断层带内

2.2 样品制备

1) 断层泥的粒度分布测试是将断层泥样品溶于蒸馏水,加入适量分散剂(六偏磷酸钠),在超声波振荡仪中振动 20 min 后进行测试。

2) X 射线衍射分析则采用非定向全岩试样,直接将样品置于玛瑙研钵中研磨成微米粒级细小颗粒,置于样品架凹槽中,采用背压法制备试样。

2.3 测试方法

1) 粒度分布测试。样品的粒度分布测试采用美国 LS230 激光粒度分析仪,数据准确度误差 $< 1\%$,精确度误差 $< 1\%$ 。

2) X 射线衍射分析。样品的 X 射线衍射分析采用荷兰 X'Pert PRO Dy2198 型粉晶衍射仪完成。入射光源为 Cu 靶 $K\alpha$ 线, Ni 片滤波, X 光管工作管压为 40 kV,管流为 30 mA;使用连续扫描方式,扫描速度 $10^\circ/\text{min}$ 。

3 断层泥矿物组分分析

X 射线衍射分析结果表明,高桥断裂大部分断层泥样品的母岩矿物组分主要为石英、方解石、长石等,粘土矿物以层状硅酸盐,如绿泥石和伊利石等为主。部分样品中含有较高含量的白云石及微量铁矿物(主要是赤铁矿,见表 2)。

在 X 射线衍射图谱中,石英、方解石和白云石等多个标志性反射峰清晰可辨;粘土矿物以伊利石和绿泥石为主,相对来说其反射峰强度都不

表 2 断层泥矿物组分
Tab. 2 The mineral composition of fault gouges

样号	样品断层泥的矿物组分/%						
	绿泥石	伊利石	石英	长石	方解石	白云石	赤铁矿
GQ-1	20	15	51	12	0	0	2
GQ-3	5	5	8	5	41	36	0
GQ-6	20	15	31	4	30	0	0
GQ-8	10	20	63	4	0	0	3
GQ-10	15	15	60	5	0	2	3

是很大(图 1)。研究断层泥中粘土矿物成分有助于确定断层的滑动方式,前人实验表明,当断层泥粘土含量减少时,滑动方式则由稳滑变为粘滑。一般来说,粘土矿物在断层泥中的绝对含量,伊利石大于 50%,蒙脱石大于 15%,即可抑制断层粘滑作用的发生^[7]。而高桥断裂样品断层泥矿物组分测定结果显示,伊利石的绝对含量介于 5%~20%之间,所以,对断层的粘滑是有利的。

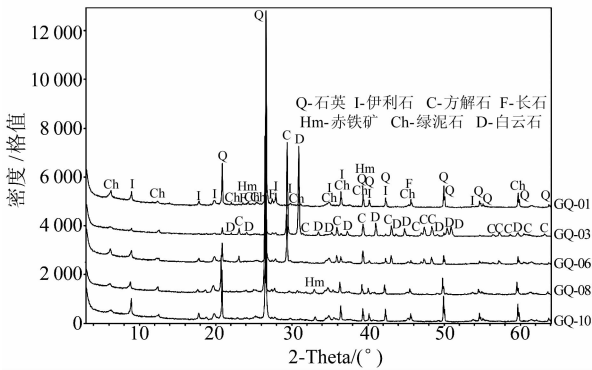


图 1 断层泥 X 射线衍射图
Fig. 1 The X-Ray Diffraction phase of fault gouges

4 断层泥粒度分维特征

4.1 样品断层泥的粒度分布

按照前述实验方法对高桥断裂所采集样品进行粒度分析测试,根据易顺民等^[8]提出的断层泥粒度分布取值区间,结合本文样品断层泥的粒度分布特征,得到结果如表 3 所示。粒度测试结果

表 3 断层泥粒度分布/%
Tab. 3 The grain size distribution of fault gouges/%

样号	样品断层泥的不同粒径/ μm							平均粒径/ μm
	<1	<2	<3.9	<7.8	<15.6	<31.3	<62.5	
GQ-1	1.11	14.09	39.31	66.42	86.9	99.25	100.00	7.2
GQ-3	0	0.74	9.95	38.13	71.87	97.03	99.98	11.527
GQ-6	0.08	5.45	25.18	54.68	80.94	97.93	99.35	11.591
GQ-8	1.16	10.99	30.72	52.56	72.47	93.85	99.08	13.977
GQ-10	0	1.58	13.44	40.63	70.66	96.12	99.77	12.543

4.3 断层泥粒度分析结果与分维值

从断层泥粒径含量 $M(r)/M$ 和相应粒径 r 的双对数坐标图(图 2)可以看出,当粒径 $<3.9 \mu\text{m}$ 时,断层泥累计百分含量较为离散,整体线性

表明,样品断层泥颗粒大小主要集中在 $1\sim3.9$ 、 $3.9\sim15.6$ 和 $15.6\sim31.3 \mu\text{m}$ 3 个等级,平均粒径(Dav)在 $7.2\sim13.977 \mu\text{m}$ 之间,样品中大于 $62.5 \mu\text{m}$ 的颗粒较少。高桥断裂带北东段(GQ-1,GQ-3,GQ-6)的样品断层泥粒径比南西段(GQ-8,GQ-10)偏小,也说明了该断裂的分段性。

4.2 断层泥粒度成分的分维计算方法

对断层泥的分形研究表明,断裂破裂过程具有统计自相似性,断层泥粒度分布具有分形结构特征^[9]。自 Sammis 等^[3]创立“粒径法”确定碎裂岩的分维值 D 后,国内学者对断层岩分维法进行了进一步研究,形成了图像分析法和筛选法等多种方法^[10],筛选法以简单易行、精度高、不受样品胶结程度限制等被广泛用于断层泥分形研究中。

按照分形的定义,在分形集中,若某一集合关于标度 ϵ 具有自相似性,且在标度 ϵ 度量下的个数为 N ,则有:

$$N = (\frac{1}{\epsilon})^D = \epsilon^{-D} \tag{1}$$

式中, D 即为分维值。设断层泥颗粒的粒径为 r , $M(r)$ 为粒径小于 r 的颗粒累计质量, M 为样品总质量, $M(r)/M$ 就是粒径小于 r 的颗粒的累积百分含量。如果

$$M(r)/M \propto r^{-D} \tag{2}$$

即有:

$$\text{d}M \propto r^{b-1} \text{d}r \tag{3}$$

经过推导可得^[8]:

$$D = 3 - b \tag{4}$$

如果 $M(r)/M$ 和 r 在双对数坐标图上具有很好的线性关系,则表明其粒度分布具有分形结构。这样,只要在 $M(r)/M$ 与 r 的双对数坐标图上用最小二乘法拟合直线的斜率 b 值,即可由上式求出断层泥粒度成分的分维值 D 。

关系不好,即在此粒径范围内,分形不明显。当粒径介于 $3.9\sim62.5 \mu\text{m}$ 时,线性关系显著,说明高桥断裂在此断层泥粒径范围内具有较好的分形结构特征。

根据图 2 中断层泥分形特征和断层泥存在分

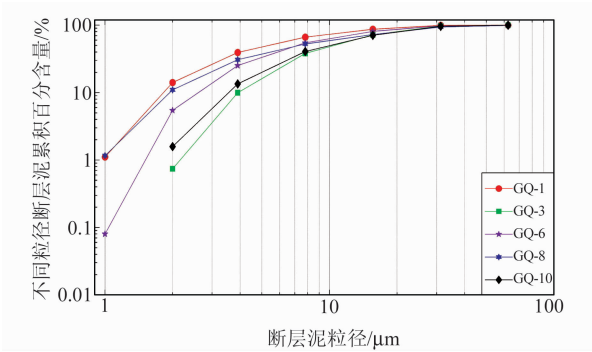


图 2 断层泥粒度在双对数图上的分布

Fig. 2 Diagrams showing the $M(r)/M$ of fault gouges
形结构的标度区间,按照前述断层泥分维数 D 值的计算方法,对高桥断裂带的 5 个样品断层泥粒度分别进行分维数 D 值的计算,其结果如表 4。

表 4 断层泥分维值

Tab. 4 The fractal dimensions of fault gouges

样号	粒径范围 / μm	分形区间 / μm	斜率 b	分维值 D	相关系数 R
GQ-1	0.514~61.104	3.9~62.5	0.33	2.67	0.92
GQ-3	1.266~73.179	3.9~62.5	0.80	2.20	0.91
GQ-6	0.737~834.94	3.9~62.5	0.48	2.52	0.92
GQ-8	0.514~834.94	3.9~62.5	0.61	2.39	0.93
GQ-10	1.156~834.94	3.9~62.5	0.70	2.30	0.92

从表 4 的结果分析,高桥断裂带的断层泥粒度的分维值在 2.20~2.67;相关系数(R)在 0.91~0.93,平均相关系数达 0.92。良好的线性关系表明,断层泥粒度的分形结构是客观存在的。

5 断层泥分维的地震地质意义

综合考虑高桥断裂特征、地震活动性以及断层泥的组分和粒度分维值,以期进一步探讨、研究断层泥分维的地震地质意义。

1)由高桥断裂断层泥粒度分维值分析结果,对比前人对活动断层带内断层泥分维值与断层活动关系的研究成果,对高桥断裂的活动性进行分析。国内许多学者发现,断层泥在一定的标度内不仅具有分形结构特征,而且其粒度分维值的大小反映了断裂活动方式。以粘滑为主的断裂,断层泥由断层快速运动形成,其粒度分维值小于 2.7;以蠕滑为主的断裂,断层泥由断层长时间缓慢反复研磨形成,其粒度分维值大于 2.8;若分维值在 2.7~2.8,则认为断层的粘滑与蠕滑相当^[11]。因此我们可以认为,高桥断裂的运动方式是以粘滑为主。高桥断裂带北东段(GQ-1,GQ-3,GQ-6)样品断层泥的平均分维值为 2.46,略大于南西段(GQ-8,GQ-10)的平均分维值 2.35,说明北东段活动性较南西段弱,更为稳定。

2)研究表明,粘土矿物的含量和组合反映了

断层活动的物理化学环境和活动方式,同时断层泥中粘土矿物的存在对断层带的强度和滑动特征有重要影响^[12]。沿高桥断裂带由北向南 5 个断层泥样品的粘土含量与断层泥粒度成分分维值曲线(图 3)表明,断层泥粒度成分分维值与粘土含量总体上具有一致的变化趋势。高桥断裂带断层泥的粘土矿物含量一般低于 35%,并且主要矿物为不具膨胀性的绿泥石和伊利石,这样的物质组成有利于断裂的粘滑运动。

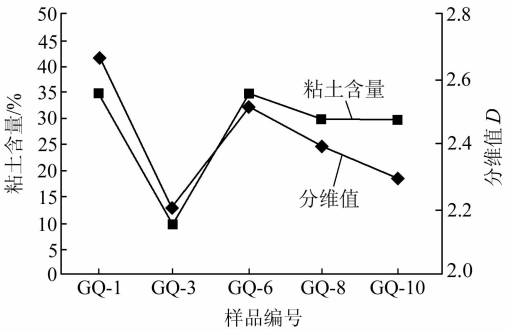


图 3 高桥断裂带断层泥中粘土含量与分维值变化曲线
Fig. 3 The change curves of the clay contents and fractal dimensions of fault gouges

3)在三峡水库蓄水前的 40 多年中,高桥断裂带及邻近地区共记录到 $M_L \geq 1.0$ 地震 26 次,其中 $M_L 2.0$ 以下地震占 77%,表现出地震频次低、强度弱的特点,说明该地区属于弱震活动带。自三峡水库蓄水以来,由于库水荷载和渗透等作用,沿高桥断裂带地震活动有明显增加,蓄水后地震活动在空间分布上主要集中在高桥断裂的南西段。

水库地震按成因大致可分为构造型和非构造型 2 大类^[13]。对于构造型地震,先存的断裂构造是发震的主要原因。非构造型地震又可分为岩溶塌陷型地震、岩溶气爆型地震、矿塌型地震和层间滑动型地震^[14],库水在其中占据主导作用,这些地震的发生与断裂构造关系不大,是蓄水“诱发”了地震。三峡库区巴东段的地层岩性主要为三叠系中厚层灰岩和白云质灰岩,岩溶十分发育,容易形成库水向深部渗透的通道,为岩溶型水库地震的发生提供了有利条件。在官渡口、东穰口等地区,除岩溶型地震外,地震还与裂隙带的滑动密切相关。而在巴东库段的上三叠系和下侏罗系地层中有香溪煤系,前期采矿留有深埋的采空区,蓄水后在重力影响下岩体失稳而诱发地震。综合分析,三峡水库蓄水后高桥断裂下盘的地震活动主要属于岩溶型、层间滑动型和矿塌型水库地震,即非构造型水库地震。考虑到高桥断裂带的活动性,其上盘的地震活动应不排除构造型水库地震的可能。

6 结 语

高桥断裂是三峡工程库首区一条规模较大的断裂,新构造运动以来该断裂活动强度较弱。在一定的标度区间内对该断裂带不同地段的断层泥样品进行分形研究得出,断层泥分维值在 2.20~2.67 之间变化。根据前人研究成果,断层泥分维值的大小可以反映出断裂的活动方式,据此我们认为,高桥断裂运动方式是以粘滑为主。断层力学性质和断层泥分维计算均表明,该断裂具有分段性,结合断裂附近的地震活动,北东段较南西段稳定。根据样品断层泥的矿物组分分析结果,高桥断裂带断层泥的粘土矿物含量一般低于 35%,并且主要矿物为不具膨胀性的绿泥石和伊利石,这样的物质组成有利于断裂的粘滑运动。

虽然历史上秭归盆地西部地震活动性较弱,但 1979 年龙会观 5.1 级地震以及 2000 年高桥 3.6 级地震等都与高桥断裂带有关,这说明高桥断裂具有一定的孕震能力。以粘滑为主的活动方式利于应力应变能量的积累,而且三峡工程前期论证将该区域列为潜在的地震危险区,给定的震级上限为 5.0~5.5 级。蓄水后该区域地震活动明显增强,2013-12-16 巴东 5.1 级地震也发生在断裂附近。综合上述,在蓄水位周期涨落影响下,该区域不排除未来有发生中强地震的可能。

致谢:本文在野外地质调查和成文过程中得到中国地质大学周舟和曾广乾、中国地震局地震研究所张鑫和邢立辉的帮助,在此一并致谢!

参考文献

- [1] 付碧宏,王萍,孔屏,等.四川汶川 5.12 大地震同震滑动断层泥的发现及构造意义[J].岩石学报,2008,24(10):2 237-2 243(Fu Bihong, Wang Ping, Kong Ping, et al. Preliminary Study of Coseismic Fault Gouge Occurred in the Slip Zone of the Wenchuan Ms 8.0 Earthquake and Its Tectonic Implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(10): 2 237-2 243)
- [2] 马瑾, Moore D E, Summers R, et al. 温度压力孔隙压力对断层泥强度及滑动性质的影响[J].地震地质,1985,7(1):15-24(Ma Jin, Moore D E, Summers R, et al. The Effect of Temperature, Pressure and Pore Pressure of Strength and Sliding Behavior of the Gouges[J]. Seismology and Geology, 1985, 7(1): 15-24)
- [3] Sammis C G, King G, Biegel R. The Kinematics of Gouge Deformation[J]. Pure Appl Geophys, 1987, 125: 777-812
- [4] 夏金梧,李长安,曾新平.三峡工程库首区高桥断裂特征与地震活动性研究[J].大地测量与地球动力学,2008,28(2):8-15(Xia Jinwu, Li Changan, Zeng Xinping. Study on Characteristics and Seismic Activity of Gaoqiao Fault in the

- Head Area of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2008, (2): 8-16)
- [5] 夏金梧,周乐群,刘世凯.鄂西秭归盆地及外缘主要断裂特征及活动性研究[J].水文地质工程地质,1996(1):10-14(Xia Jinwu, Zhou Lequn, Liu Shikai. The Main Characteristics of Fault and Its Activity in Zigui Basin, Western Hubei Province[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1996 (1): 10-14)
- [6] 邓嘉农,周乐群.鄂西秭归盆地西北缘高桥断裂带特征及其活动性[J].华南地质与矿产,2003(3):18-23(Deng Jianong, Zhou Lequn. Features and Activity of Gaoqiao Fault Zone along the North-Western Margin of Zigui Basin in Hubei Province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2003(3): 18-23)
- [7] 邵顺妹.断层泥研究的现状和进展[J].高原地震,1994,6(3):51-55(Shao Shunmei. Present Condition and Progress of Fault Gouge Research[J]. Earthquake Research in Plateau, 1994, 6(3): 51-55)
- [8] 易顺民,唐辉明.断层泥粒度成分的分形研究[J].地震地质,1995,17(2):185-191(Yi Shunmin, Tang Huiing. Fractal Research of Granulometric Composition in Fault Gouge[J]. Seismology and Geology, 1995, 17(2): 185-191)
- [9] Babaie H A, Hadizadeh J, Babaei A. Self-Similar Cataclasis in the Saltville Thrust Zone, Knoxville, Tennessee[J]. J Geophys Res, 1995, 100: 18 075-18 084
- [10] 赵中岩,王毅.碎裂岩的分数维分析:理论、方法及地质意义[J].地质科学,1992(3):282-290(Zhao Zhongyan, Wang Yi. Fractal Analysis of Cataclastic Rocks: Theory, Techniques and Applications[J]. Scientia Geologica Sinica, 1992 (3): 282-290)
- [11] 邵顺妹,邹谨敞,滕瑞增.西秦岭北缘断裂带东段断层泥的粒度分布和显微构造特征[J].西北地震学报,1996,18(2):74-79(Shao Shunmei, Zou Jinchang, Teng Ruizeng. Grain Size Distribution and Microstructure Characters of the Fault Gouge in the East Section of Northern Edge of Western Qinling Mountain[J]. Northwestern Seismological Journal, 1996, 18(2): 74-79)
- [12] 张秉良,冯锦江,牛要芳,等.红河断裂带断层泥粘土矿物特征及其地震地质意义[J].地震地质,1989,11(3):96-97(Zhang Bingliang, Feng Jinjiang, Niu Yaofang, et al. Characteristics of Clay Minerals in Fault Gouges from Honghe Fault Zone and Their Seismogeologic Implication[J]. Seismology and Geology, 1989, 11(3): 96-97)
- [13] 张丽芬,姚运生,申学林,等.三峡水库地震类型:构造触发和非构造诱发地震及震害机理研究[J].大地测量与地球动力学,2014,34(4):77-82(Zhang Lifan, Yao Yunsheng, Shen Xuelin, et al. Study on Type and Focal Mechanism of the Earthquakes in Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(4): 77-82)
- [14] Yao Y K, Wang Q L, Li J G, et al. Seismic Hazard Assessment of the Three Gorges Project[J]. Geodesy and Geodynamics, 2013, 4(2): 53-60

The Fractal Dimension of Fault Gouges in the Gaoqiao Fault Zone in the Three Gorges Dam Area

GAO Hongliang¹ YAO Yunsheng^{1,2} WANG Qiuliang^{1,2} ZHANG Lifan^{1,2} CHEN Xingxing¹

1 Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, 40 Hongshance Road, Wuhan 430071, China

2 Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA, 40 Hongshance Road, Wuhan 430071, China

Abstract: The Gaoqiao fault zone, which extends along the strike direction for more than 40 km, is a large-scale fault in the Three Gorges dam area. There were a series of seismic activities along the Gaoqiao fault zone before and after impoundment of the Three Gorges Reservoir. In this paper, the authors investigate the fractal dimension and mineralogy of the clay-rich fault gouge samples collected from the Gaoqiao fault zone based on grain size distribution and X-ray diffraction analysis. In this study, the main clay minerals of fault gouges are illite and chlorite, and the content of clay minerals is generally less than 35%, which is conducive to the stick-slip. The results demonstrate that the fractal dimension of fault gouges in the Gaoqiao fault zone range from 2.20 to 2.67, which indicates that the fault is essentially characterized by stick-slip. The mechanical properties of the fault and the fractal dimension of fault gouges show that it is divided into two segments. On the basis of the above, coupled with the analysis of seismicity, it is clear that we should pay attention to the moderate-sized earthquakes occurring on it in the future.

Key words: gouge; fractal dimension; stick-slip; Gaoqiao fault

(上接第 956 页)

- [5] 孙中苗, 夏哲仁. FIR 低通差分器的设计及其在航空重力测量中的应用[J]. 地球物理学报, 2000, 43(6): 850-855 (Sun Zhongmiao, Xia Zheren. Design of FIR Lowpass Differentiator and Its Applications in Airborne Gravimetry[J]. Chinese J Geophys, 2000, 43(6): 850-855)
- [6] Steven W S. Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists[M]. Boston: Newnes, 2003

- [7] 柴华, 王勇, 王虎彪, 等. GNSS/SINS 组合进行惯性重力测量的误差分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(6): 73-78 (Chai Hua, Wang Yong, Wang Hubiao, et al. Error Analysis for Inertial Gravimetry by Use of GNSS / SINS Combination[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(6): 73-78)

Land Based Inertial Gravimetry Research by Static Experiment

CHAI Hua¹ WANG Hubiao¹ WU Lin¹ WANG Yong¹

1 State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics,

CAS, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China

Abstract: With data obtained from a high precision strapdown inertial measure unit, in this research, static experiments are carried out for the land based inertial gravimetry, initially examining the influence factors for static inertial gravimetry. Results from our static experiments show that with a moving average filter, most high frequency noise from the quartz flexible accelerometers is mitigated, and the corresponding standard deviation of gravity observation that derived from the test IMU is achieved at about 1.5 mGal with 30 s averaging. However, due to instrument instability and observation environment, an upward temporal trend in the observed gravity value can still be noticed. By modeling the temporal trend with regression analysis and detecting the initial unknown IMU observation bias from the beginning known gravity point, the error of observed gravity value can be calculated and compensated. Using this method, in our vehicle-based experiment the observation precision at most ZUPT points is successfully improved from 12-20 mGal to 2 mGal.

Key words: inertial measure unit; gravimetry; static experiment; error compensation