

福建仙游 5.0 地震前后小地震视应力变化研究

蔡杏辉¹

1 福建省地震局,福州市华鸿路 7 号,350003

摘要: 分析 2011-01~2013-11 福建数字台网记录到的 73 个福建仙游地震,给出仙游 2013-09-04 $M_L 5.0$ 地震前后小地震视应力变化情况,得到该区的视应力水平,并讨论主震前后的视应力演化特征以及视应力与震级和深度的关系。

关键词: 仙游地震;视应力;地震矩;地震波辐射能

中图分类号: P315

文献标识码: A

2013-09-04 福建省仙游县发生 $M_L 5.0$ 地震,是福建数字台网建成以来该地区最大的地震。地震发生在北西向沙县-南日岛断裂带上,震区小地震活动频繁。该震群自 2010-08-04 开始地震活动,至今共发生 $M_L 3$ 以上地震 11 次(其中 $M_L 4$ 以上地震 4 次),地震活动空间与北西向沙县-南日岛断裂带走向基本一致。仙游地区位于东亚新华系第二隆起带的东部沉降带和南岭纬向构造体系的交汇处,此外还有北西向构造。这 3 组构造互相折冲交汇、叠加,深刻地影响境内地形地势,构造主要表现为不同走向的断裂,褶皱在境内不占重要地位。本文利用福建台网记录此次地震序列的波形资料,研究仙游地区的视应力演化特征,对深入了解震源破裂过程的细节有重要意义。

1 资料选取

震区 2011 年以来记录 0 级以上地震 1 000 余次,形成较为完整的地震序列。本文选取福建台网记录的福建仙游 $M_L 2.0$ 以上地震进行研究,其中前震 59 个,余震 13 个。为消除地震波辐射过程中的方向性效应,通常选取两个台站的资料进行视应力计算,然后取其均值,要求两个台的震中方位角的交角为 45° ,且所选台的震中距最好控制在 100 km 以内。本文选取莆田荔城台、福清东张台,震中距分别为 35、55 km,交角为 48° ,2 个台均采用 CMG-3ESPC-60 型地震计。

2 地震视应力计算方法

2.1 视应力

地震视应力计算公式为:

$$\sigma_a = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (1)$$

其中, E_s 代表地震波辐射能, M_0 是地震矩, μ 是震源区介质的剪切模量,通常取 $\mu = 3.0 \times 10^4$ mPa。

2.2 地震矩

对地震记录的 S 波取 10 s 窗长,用快速傅立叶变换(FFT)得出 S 波窗数据位移谱,作仪器响应校正,对地震波形进行零点校正、倾斜校正和高通滤波处理,由地震位移谱的低频部分确定波谱零频值 Ω_0 。

根据 Brune 的计算结果,标量地震矩为:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v_s^3 \Omega_0}{2 R_{\theta\phi}} \quad (2)$$

式中, ρ 是密度,取 2.7 g/cm^3 ; v_s 是 S 波速度,取 3.5 km/s ; $R_{\theta\phi}$ 是 S 波的辐射花样系数,对于 SH 波取震源辐射能量的平均值为 $\sqrt{2/5}$ 。

2.3 地震波辐射能

可以通过古登堡和里克特的经验公式计算地震的能量 E_s :

$$\lg E_s = 11.8 + 1.5 M_s \quad (3)$$

M_s 可由震级换算公式求得:

$$M_s = 1.13 M_L - 1.08 \quad (4)$$

3 计算结果与分析

根据 72 个小震 ($2.0 \leq M_L \leq 4.5$, 不包括主震)的视应力值计算视应力均值,得到仙游地区的平均视应力为 0.16 mPa,此次地震序列视应力在 0.01~2.13 mPa 之间。吴忠良等^[1]采用 1987~

1998 的 NEIC 宽频带地震辐射能量目录和哈佛 CMT 目录研究得出中国大陆地震视应力分布在 0.1~2.6 mPa 间。张彬等^[2]采用 1900~2005 的中强震资料研究得出中国大陆平均视应力为 0.67 mPa,东部平均视应力为 0.32 mPa,西部为 0.97 mPa。黄显良等^[3]计算出华东地区视应力场平均值为 0.08 mPa。汤兰荣等^[4]对江西瑞昌地震序列的视应力变化进行研究,得出该地区平均视应力为 0.04 mPa。本文结果符合吴忠良等^[1]所得中国大陆地震视应力分布区间,并且与张彬等东部平均视应力值结果较为接近。

图 1 给出仙游 $M_L5.0$ 地震前后小地震的视应力时间分布。结果表明,从 2013-02 起视应力呈现渐升的趋势,2013-08-09~23 出现明显波动(视应力平均值为 0.80 mPa,是整个地震序列视应力平均值的 5 倍),随后在 2013-09-04 发生了仙游 $M_L5.0$ 地震,其视应力为 9.86 mPa,远高于其前后地震的视应力水平,主震后视应力急速下降,逐步恢复到震前水平。研究表明^[5],中强地震发震视应力的变化历程为前期积累-震前突跳-主震异常高值-震后恢复。主震前期是应力不断积累的阶段,当应力积累到一定程度,发生破裂,释放部分能量,应力降低,回到一个稳定状态,历程与滑动弱化模式所描述的过程相符。此次仙游 $M_L5.0$ 地震前后小地震的视应力随时间变化与前人研究结果较为一致。

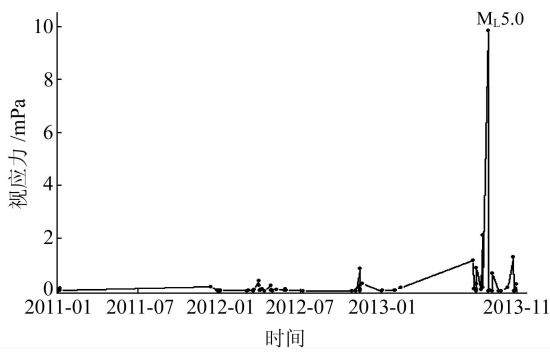


图 1 仙游 $M_L5.0$ 地震前后小地震视应力随时间变化曲线
Fig. 1 Variation of the apparent stress before and after the Xianyou $M_L5.0$ earthquake

图 2 是仙游 $M_L5.0$ 地震前后视应力与小震震级关系图(不含仙游 $M_L5.0$ 地震)。从图中可以看出,地震视应力有随震级增大而变大的趋势,曲线表现为指数形态,拟合关系式为 $\ln \sigma_a = 1.970 1 \ln M_L - 8.111 7$,相关系数 $R=0.935$ 。关于视应力与震级关系的研究结果,研究者有着不同看法,部分人认为视应力值与震级没有显著的相关关系^[6];部分人认为两者线性关系明显^[7];还

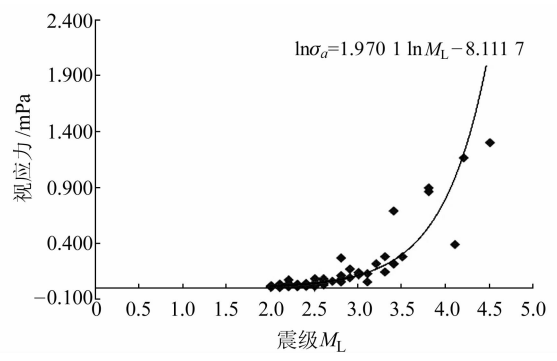


图 2 仙游 $M_L5.0$ 地震前后视应力与小震震级关系
Fig. 2 Relationship between the apparent stress and small earthquake magnitudes before and after the Xianyou $M_L5.0$ earthquake

有一部分人认为视应力与震级关系存在显著分段性,在某一震级区间有较好的线性关系,而在另一震级区间不存在线性关系^[8]。认为视应力与震级有一定相关性的人居多数。

本文研究结果表明,视应力的变化与震级密切相关,仙游地震序列 $M_L5.0$ 主震视应力为 9.86 mPa,主震前发生 $M_L \geq 3.5$ 的地震共有 6 次,平均视应力为 0.954,而整个地震序列平均视应力为 0.16 mPa,前者是后者的 6 倍,说明主震前的震级增大使得震源区的视应力相应增大。华卫等^[9]对三峡水库地区震源参数特征研究认为,地震视应力随震级增大而增大意味着地震越大,单位地震矩所释放的地震能量越多,反映出大地震是比小地震具有更高效率的地震能量辐射体,大地震和小地震可能在破裂速度等方面有较大差异。

图 3 是仙游 $M_L5.0$ 地震前后视应力与震源深度关系图(不含仙游 $M_L5.0$ 地震)。从图中可以看出,视应力和深度没有明显的关系,视应力高值主要分布在 10~14 km 的范围,与主震震源接近。这与大多研究者的看法较为一致^[4]。

利用仙游 $M_L5.0$ 地震前后中小地震资料,分析地震波辐射能与地震矩的关系(图 4)。从图 4

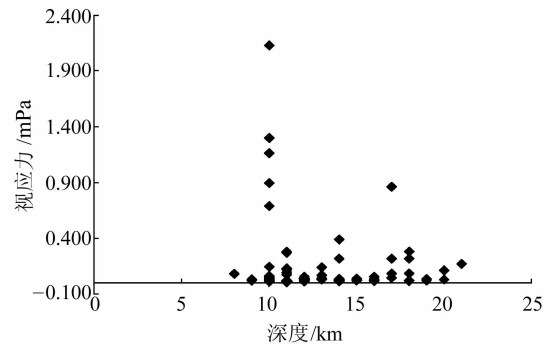


图 3 仙游 $M_L5.0$ 地震前后视应力与震源深度关系
Fig. 3 The relationship between the apparent stress and the hypocenter depth before and after the Xianyou $M_L5.0$ earthquake

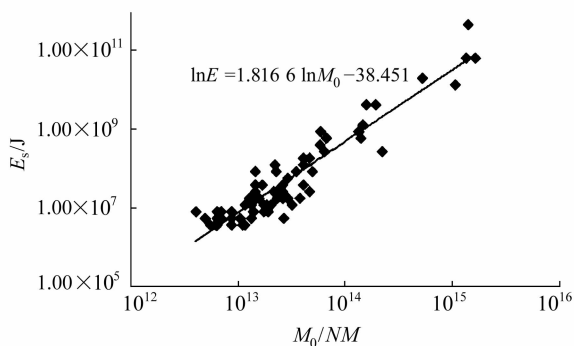


图4 地震波辐射能与地震矩关系

Fig. 4 Relationship between the earthquake radiation energy and seismic moment

可见,地震波辐射能与地震矩有较好的正相关性,两者拟合关系式为 $\ln E_s = 1.8166 \ln M_0 - 38.451$, 相关系数 $R = 0.943$ 。与程万正等^[7]对四川地区地震辐射能量和视应力的研究结果较为相似,其认为地震波辐射能总体上与地震矩呈正比。

关于视应力与地震矩的关系,研究者有不同的看法,本文对此未作分析讨论。部分人认为,地震视应力随着地震矩增加而增加^[10];也有人认为,视应力在相当大范围内不随地震矩变化而变化^[11];还有人认为,视应力随地震矩的变化与震源机制有关^[12]。

4 结 语

本文在计算地震波幅射能时,采用震级换算的方法。由于地震震级与地震矩相关,另外能量与震级并不存在理想的和全球通用的“换算关系”^[1],由此得到的地震波幅射能可能出现偏差。但对于同一震源区发生的地震序列,地震波射线经过的地壳介质和接收仪器都相同。由震级换算的地震波幅射能存在的是系统偏差,对序列的各次地震是可比的。本文目的不是测定序列地震的绝对地震波幅射能,而是侧重其相对变化,知道其相对变化就可说明问题,不使研究结果发生本质变化^[13]。今后研究工作中可采用数字地震波形反演方法和地面运动峰值速度法计算测定地震波幅射能,并与传统方法进行比较,对比分析不同方法得到的地震波幅射能的准确度,以提高视应力的计算可靠程度。

对福建仙游 $M_L 5.0$ 地震前后小地震视应力变化进行研究,得出以下两点认识:

1)通过对仙游 $M_L 5.0$ 地震前后小地震视应力的计算,得到仙游地区的视应力平均值为 0.16 mPa ,认为其视应力历程变化经历了前期视应力积累-震前突跳-主震异常高值-震后恢复的过程,与前人的研究结果较为相符。

2)地震视应力有随着震级增大而变大的趋势,视应力与震级呈现一定的相关性;视应力和深度没有明显的关系;地震波辐射能与地震矩有着较好的正相关性。

参考文献

- [1] 吴忠良,黄静,林碧苍.中国西部地震视应力的空间分布[J].地震学报,2002,24(3):293-301(Wu Zhongliang, Huang Jing, Lin Bicang. Distribution of Apparent Stress in Western China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(3): 293-301)
- [2] 张彬,杨选辉.中国大陆地震视应力空间分布研究[J].大地测量与地球动力学,2007,27(5):26-29(Zhang Bin, Yang Xuanhui. On Distribution of Apparent Seismic Stress in Chinese Mainland[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(5):26-29)
- [3] 黄显良,刘东旺,沈小七,等.华东地区视应力场的研究[J].地震地磁观测与研究,2005,26(6):29-32(Huang Xianliang, Liu Dongwang, Shen Xiaoqi, et al. The Study on the Apparent Stress Field in East China[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2005, 26(6):29-32)
- [4] 汤兰荣,杨锐,杨雅琼,等.九江-瑞昌地震序列的视应力变化研究[J].华南地震,2007,27(4):19-26(Tang Lanrong, Yang Rui, Yang Yaqiong, et al. A Study on the Variations in Apparent Stress of Jiujiang-Ruichang Seismic Sequence[J]. South China Journal of Seismology, 2007, 27(4):19-26)
- [5] 吴晶,顾瑾萍.甘肃景泰 $M_S 5.9$ 地震前后小地震视应力计算讨论[J].地震,2004,24(1):170-174(Wu Jing, Gu Jinping. Discussion on Apparent Stress of Small Earthquakes before and after Jingtai Earthquake with $M_S 5.9$ in Gansu Province[J]. Earthquake, 2004, 24(1):170-174)
- [6] 刘红桂,刘杰,丁页岭,等.地震视应力在云南地震序列中的前兆特征[J].地震学报,2006,28(5):462-471(Liu Honggui, Liu Jie, Ding Yeling, et al. Precursory Specialities of Apparent Stresses in Yunnan Earthquake Series[J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 28(5):462-471)
- [7] 程万正,陈学忠,乔慧珍.四川地震辐射能量和视应力的研究[J].地球物理学进展,2006,21(3):692-699(Cheng Wanzheng, Chen Xuezhong, Qiao Huizhen. Research on the Radiated Energy and Apparent Strain of the Earthquakes in Sichuan Province[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3):692-699)
- [8] 王琼,陈学忠,王林瑛.岫岩地震序列视应力变化及其预测意义[J].地球物理学进展,2006,21(3):692-699(Wang Qiong, Chen Xuezhong, Wang linying. Change of Apparent Stress of Xiuyan Earthquake Sequence and Its Prediction Significance[J]. Earthquake, 2006, 21(3):692-699)
- [9] 华卫,陈章立,郑斯华,等.三峡水库地区震源参数特征研究[J].地震地质,2010,32(4):533-541(Hua Wei, Chen Zhangli, Zheng Sihua, et al. A Study on Characteristics of Source Parameters in Three Gorges Reservoir Area[J]. Seismology and Geology, 2010, 32(4):533-541)

(下转第1006页)