

# 应用和达法测定福建古田水口水库 $M_L 4.8$ 级地震序列波速比

杨 贵, 李祖宁, 徐嘉隽

(福建省地震局, 福州 350003)

**摘要:**应用和达法测定福建古田水口水库  $M_L 4.8$  级地震序列的波速比, 其计算的相关系数较高, 测得的波速比值具有较高的可信度。通过分析  $M_L 4.8$  级主震前后的波速比发现, 在前震期经历了相对稳定—低异常值—回升—加速上升—高异常值—主震发生的过程; 余震期波速比高、低异常值增多, 且差异有逐渐加大趋势。

**关键词:**福建古田水口水库;  $M_L 4.8$  级地震序列; 和达法; 波速比

**中图分类号:** P315.61

**文献标志码:** A

## 0 引言

波速作为地震波的运动学特征, 它与传播介质的性质有着密切的关系。冯德益<sup>[1]</sup>认为在地壳演化过程中, 介质的物理性状将产生一系列变化, 如出现微破裂、扩容、塑性硬化及相变等, 地震波通过地壳介质时, 波速也会相应发生变化, 这是利用波速比研究介质物性的重要依据。早在上世纪 50 年代初, 就有人开展波速比的研究工作, 近几年我国许多地震工作者开展了应用数字地震资料测定地震波速比的工作, 如王林瑛等<sup>[2-3]</sup>、刘锦和陈贵美<sup>[4]</sup>、黎明晓和刘杰<sup>[5]</sup>、张小涛等<sup>[6]</sup>、邹振轩等<sup>[7]</sup>, 他们分别对不同区域发生的中强地震前后的波速比变化特征进行研究, 取得了一定成果。

福建古田水口水库是华东地区最大的水库, 1993 年 3 月 31 日下闸蓄水以来, 地震活动较为频繁。2008 年 3 月 6 日, 水口水库发生了  $M_L 4.8$  级地震, 此次地震是水库蓄水以来记录到的最大地震。在发生主震的前半年, 水库发生了许多中小地震, 主震后中小地震活动也很活跃, 为研究该序列地震的波速比变化提供了丰富的原始地震记录数据。本文应用多台和达法测定该序列地震的波速比值, 并对序列的波速比特征进行了初步分析。

## 1 方法及原理

测定波速比的方法主要有多台和达法、双台直达波法、单台四震相法、虚拟台站法、联合求波速比法等。本文采用多台和达法, 该方法是日本地震学

家和达清夫 1928 年提出的(王林瑛等<sup>[2]</sup>), 其原理为: 对一个地震以一组台站记录的纵波到时和纵横波到时差的资料作图, 拟合直线求得斜率, 再加 1 即为波速比。

对某个地震, 假设震中周围有  $n$  个台记录到, 对得到的  $P$  波和  $S$  波到时分别记为  $t_{pi}$  和  $t_{si}$ , 纵横波到时差记为  $\Delta t_i = t_{si} - t_{pi}$ , 纵横波的波速分别记为  $\nu_p$  和  $\nu_s$ , 波速比  $k = \frac{\nu_p}{\nu_s}$ , 应用多台和达法, 通过最小二乘法计算的平均波速比可表示为:

$$k = \frac{\nu_p}{\nu_s} = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - (\sum_{i=1}^n \Delta t_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (\Delta t_i t_{pi}) - \sum_{i=1}^n t_{pi} \sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad (1)$$

相关系数  $R$  表示为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{pi} - \bar{t}_p)(\Delta t_i - \bar{\Delta t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_{pi} - \bar{t}_p)^2 \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \bar{\Delta t})^2}} \quad (2)$$

$$\text{其中: } \bar{t}_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_{pi}}{n}, \bar{\Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n}.$$

## 2 资料选取与预处理

计算地震波速比的关键要点是震相判读的精度和可靠性判定(王林瑛等<sup>[2]</sup>)。震相数据我们只使用直达波  $P_g$ 、 $S_g$  到时数据, 在判读震相数据时, 震中距 120 km 附近可能出现了  $P_n$  波, 这可能影响到对

直达波震相的判读精度,因此我们仅选用震中距小于 120 km 的台站记录,且要求台站记录都要有直达波 Pg、Sg 的震相数据,这样对绝大多数地震来说,震相简单且易于辨别,能减少判读震相数据的误差。福建台网台站记录仪器的采样率有 50 Hz 和 100 Hz 两种,这样震相数据的读数精度可达 0.02 s 和 0.01 s。考虑到和达法的多台拟合问题,这里要求同一地震事件至少要有 4 个台同时有 Pg、Sg 震相数据的地震,且要求选用的地震震级  $M_L \geq 1.0$ ,并在使用和达法对曲线进行拟合过程中,对个别显著偏离回归直线的台站记录值进行舍去处理。

2005 年的 10 月 4 日至 2007 年 9 月 10 日近 2 年时间里,古田地区未记录到 0 级以上地震,2007 年的 9 月 11 日才开始记录到 0 级以上地震活动,此后小震活动频繁,直至 2008 年 3 月 6 日发生了  $M_L$  4.8 级地震;4.8 级主震之后,余震活动时间延续很长,考虑到  $M_L$  1.0 级以上地震的发生情况及余震衰减情况,我们对  $M_L$  4.8 级古田地震序列的研究时段取为 2007 年的 9 月 11 日至 2009 年 12 月 31 日。按照上述要求,筛选了 285 个地震事件,其中主震前 58 个地震,主震后 226 个地震,总计有 Pg、Sg 震相对 2 280 个,这些地震的震级分布为  $M_L$  1.0~4.8,震源深度分布为 1~10 km,参与计算的台站数为 4~14 个。计算的 285 个地震事件的震中位置与参与计算的台站位置如图 1 所示。

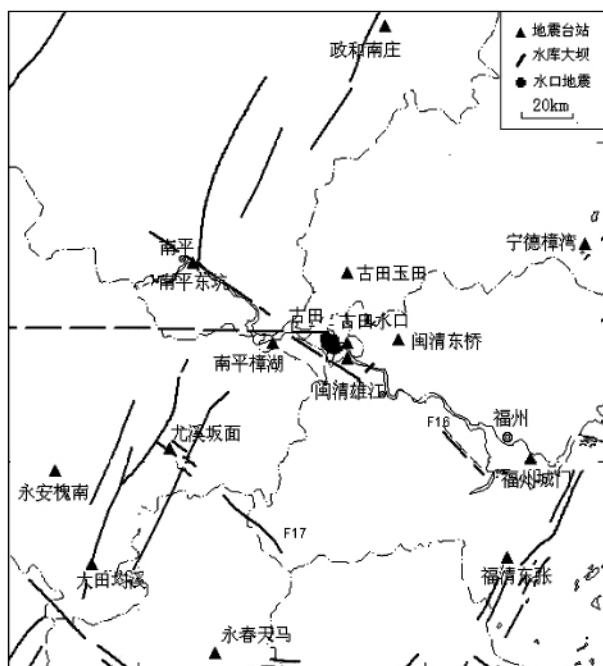


图 1 285 个地震事件震中位置及参与计算的 14 个周边地震台站分布图

### 3 结果分析

#### 3.1 相关系数的分析

应用和达法的最小二乘法拟合福建古田  $M_L$  4.8 级地震序列的波速比值,计算得到的相关系数值随地震序号的变化如图 2 所示。图 2 中,285 个事件的相关系数为 0.9958~1,平均相关系数为 0.9994,其中介于 0.9990~1.0 的事件为 239 个,占总事件的 83.9%,可见所计算事件的相关性很好。从图中可以看出随着地震序列的发展,相关系数有一定的发散,但偏差较小。

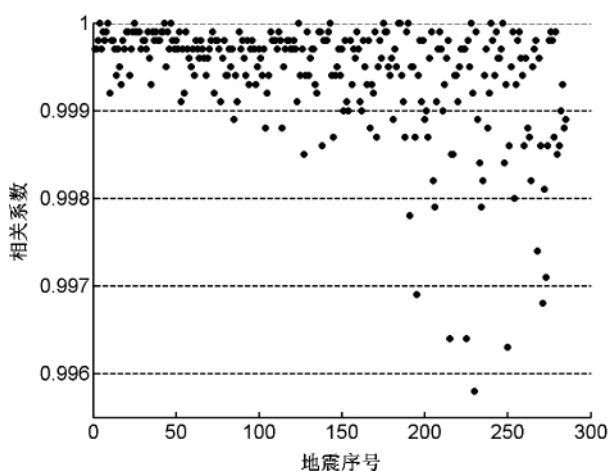


图 2 相关系数随地震序号变化图

#### 3.2 波速比的时间变化特征

古田  $M_L$  4.8 级地震序列的波速比最低值为 1.646,最高值为 1.741,全部波速比的平均值为 1.692,低于线弹性体的波速比值 1.730。由图 3 波速比所对应的地震次数图可以看出波速比值较集中在均值附近。

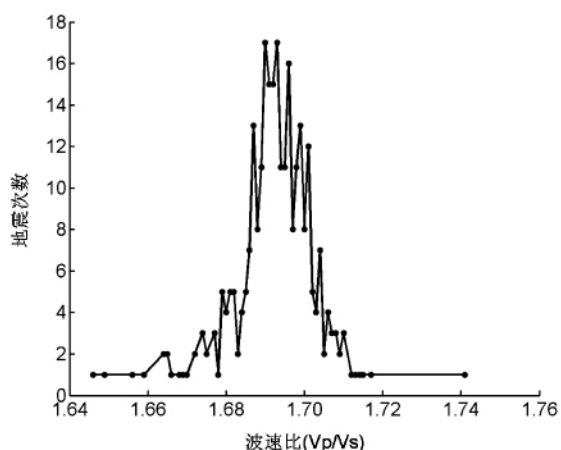


图 3 不同的波速比对应的地震次数

图 4 波速比随地震序列时间的分布图中,黑实线为波速比的平均值线,两条虚线为 1 倍的标准偏差线,时间轴为每 3 个月一个刻度。 $M_L 4.8$  级主震发生时间为 2008 年 3 月 6 日,从图中,可以看出,主震前半年的 58 个地震的波速比基本介于 1.68~1.70 之间,超过标准偏差的极少,主震后余震较集中的 2 个时段,即 2008 年 3—7 月和 2009 年 7—8 月的波速比值都有较多超过标准偏差的,而且超过标准偏差值越来越多、越来越大。这可能由于前震期孕震区内地壳处于应力加速积累的状态,但相对稳定,波速比表现为较一致;主震后,震源区随着裂隙的发育,特别是水库水的逐渐渗入,使得微裂隙产生膨胀,此时 P 波和 S 波的视速度变化的差异性增大而使波速比值变化较大。

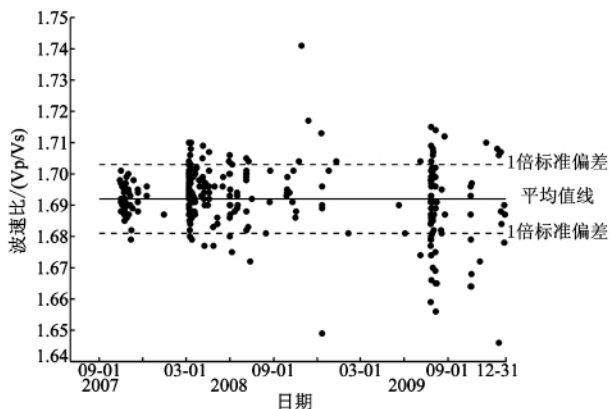


图 4 波速比随地震序列时间的分布图

主震前后的波速比变化情况,特别是对临近主震前的波速比变化分析,有益于地震监测预报工作。考虑到整个序列时间跨度及前、余震密集时段的分布情况,取主震前近 5 个月(2007 年 10 月 14 日—2008 年 3 月 6 日)和主震后近 5 个月(2008 年 3 月 6 日—7 月 31 日)的 176 个事件,它们的波速比值分布为 1.672~1.710,平均值为 1.693,取大于 1 倍标准偏差为异常值,按序列发展做图,并标注这段时间内的主震和较大地震(图 5)。由图可见,主震前波速比相对稳定,在接近主震时,波速比曾出现连续 2 个较低异常值,为 2007 年 11 月 6 日、7 日发生的地震,此时离主震正好相差 4 个月的时间,其后回升,到临近主震时,特别是  $M_L 4.1$  级最大前震至主震时段,这些地震发生于同一个小时内,波速比出现加速升高,直到  $M_L 3.8$  级地震较高异常值,随后发生主震,可见波速比经历了相对稳定—低异常值—回升—加速上升—高异常值—主震发生的过程;主震

后,波速比的异常值明显增多,且异常量有越来越大的趋势,波速比值较为分散。

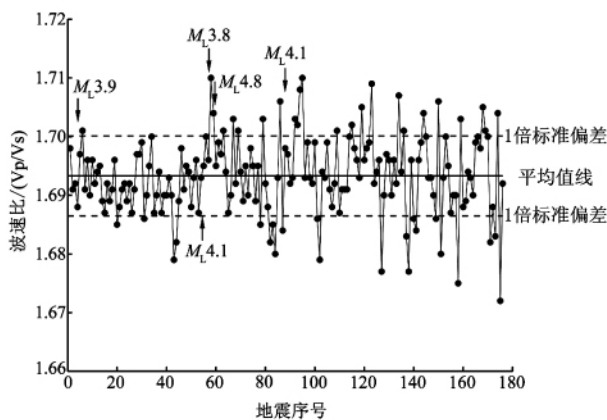


图 5 176 个地震波速比随地震序号变化图

### 3.3 波速比和震级的关系

图 6 为波速比值随震级的变化,震级范围为  $M_L 1.0 \sim 2.0$ ,波速比值的分布范围较大为 1.646~1.741,平均为 1.691;在震级  $M_L 2.1 \sim 3.0$  间,波速比分布范围为 1.675~1.709,平均为 1.693;在震级  $M_L 3.1 \sim 4.0$  间,波速比分布范围为 1.687~1.710,平均为 1.696; $M_L 4.8$  主震为 1.704,最大的  $M_L 4.1$  前震为 1.693,最大的  $M_L 4.1$  余震为 1.697。由于较大震级的地震样本较少,整个序列震级与波速比的变化未显示明显的关系。

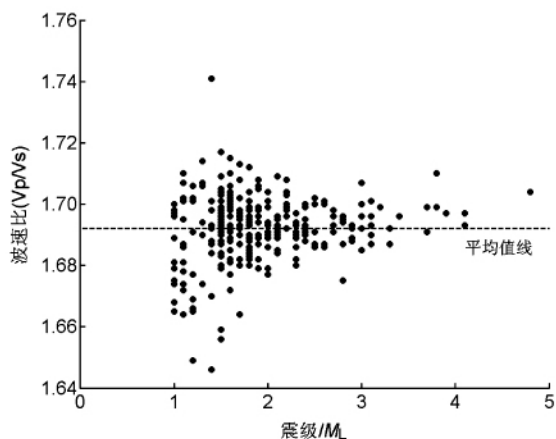


图 6 波速比值随震级的变化图

### 3.4 波速比和震源深度的关系

285 个地震事件的震源深度分布为 1~10 km,平均深度为 4.5 km,主要集中分布在 3~7 km 范围内,其中  $M_L 4.8$  主震深度为 4.3 km。从图 7 中可见,在震源深度 3 km、4 km、6 km 附近,波速比的变化范围较大,这可能反映了震源区应力蓄积、变化的

主要深度。

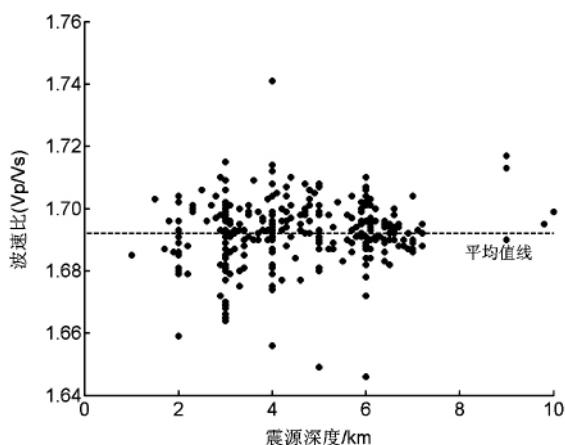


图 7 波速比值随深度的变化图

#### 4 结论与讨论

应用多台和达法的最小二乘法对福建古田水口

水库  $M_L 4.8$  级地震序列的波速比进行测定,并对波速比的变化特征进行初步的讨论,形成如下一些结论:

(1)使用震源区附近一定范围内的台站数据,经过对震相到时数据严格的筛选,使得相关系数较高,计算的平均波速比值,具有较高的可信度。

(2)通过对波速比随时间变化特征的分析,认为古田水口水库地震波速比在前震期经历了相对稳定—低异常值—回升—加速上升—高异常值—主震发生的过程;余震期波速比高、低异常值增多,且差异有逐渐加大趋势。这可能反映了震源区前震期相对稳定,余震期受破裂与库水的渗入,波速比差异加大。

(3)通过对波速比随震源深度的变化特征分析认为,波速比值的变化能反应应力积累与变化的区域深度,可能反映了震源位置附近的介质物理性质和化学性质存在变异。

#### 参考文献:

- [1] 冯德益. 地震波速异常[M]. 北京:地震出版社,1981:1-14.
- [2] 王林瑛,李艳娥,李芳,等. 汶川地震前后地震波速比和视速度变化特征的研究[J]. 地震学报,2011,33(1):1-14.
- [3] 王林瑛,郭永霞,刘芳,等. 汶川地震前后地震首都圈分区波速比研究[J]. 地震学报,2008,30(3):240-253.
- [4] 刘锦,陈贵美. 应用和达法测定阳江地区的波速比[J]. 华南地震,2008,28(4):120-126.
- [5] 黎明晓,刘杰. 云南地区地震序列的波速比( $V_p/V_s$ )异常的研究[J]. 地震,2006,26(1):26-34.
- [6] 张小涛,吕坚,马广庆,等. 九江—瑞昌地震序列的波速比特征研究[J]. 华北地震科学,2006,24(4):36-40.
- [7] 邹振轩,李金龙,俞铁宏. 应用多台和达法测定温州珊溪水库地区地震的平均波速比[J]. 地震,2006,26(4):133-137.

## Determine Average Seismic Wave Velocity Ratios of Fujian Shuikou Reservoir $M_L 4.8$ Earthquake Sequence Using Multi-Station Methods

YANG Gui, LI Zu-ning, XU Jia-jun

(Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** In this paper, average seismic wave velocity ratios of Fujian Shuikou reservoir  $M_L 4.8$  earthquake sequence is determined using Multi-Station Methods. The correlation coefficient is high and the wave velocity ratio value is reliable. The wave velocity ratios before and after the main shock are analyzed. The result shows that in foreshock period the wave velocity ratios experienced a process of relative stable—low abnormal values—rebound—accelerated rise—high abnormal value—main shock occurrence; during the aftershock period, the wave velocity ratio is higher than before, low abnormal values increase, and the differences have increasing trend.

**Key words:** Fujian Gutian Shuikou reservoir;  $M_L 4.8$  earthquake sequence; multi-station methods; average seismic wave velocity ratios