

基于断层摩擦组合定律的汶川地震应力降估算

李振^{1,2)}, 彭华^{1,2)}, 马秀敏^{1,2)}, 姜景捷^{1,2)}

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

地震是在构造应力作用下震源区应力积累到破裂极限时断层发生快速破裂或错动, 应力急剧降低激发震动弹性波, 向四周传播引起地面振动的自然现象。应力降的变化速率与地震波辐射能有着一定的联系, 应力降变化急剧, 释放的地震辐射能比率较大, 如果应力缓慢降低, 地震辐射能也降低, 甚至为零, 表现为慢地震 (Xyoli Perez-Campos^①)。因此, 可以说地震应力降直接关系着地震的破坏力, 深入研究应力降对于地震防灾减灾有着不可估量的作用。然而, 由于地震一般发生在地壳 15~30km 的深度范围内, 现有测量技术无法直接测量震源区的应力状态。基于震源应力场处于较高水平时应力降大的假设, 在震害学中, 主要是通过震源机制、应力降、视应力等来研究地震应力场的作用方式和相对强弱等。陈学忠等人结合地震效率、视应力和应力降, 对震源区震前和震后的应力进行了估计 (陈学忠, 2005)。

地震过程中的断层活动表现为一种复杂摩擦行为, 构造应力积累到岩体极限强度, 断层面突然错动, 断层由静摩擦状态转变为动摩擦状态, 构造应力通过滑动摩擦的方式快速释放, 表现为地震应力降 (李振^②)。断层摩擦应力变化一定程度上反映出地震动态应力变化趋势。为此, 本文从地震过程地应力变化的断层摩擦物理机制入手, 利用断层摩擦组合定律估算汶川地震动态应力降。

1 断层摩擦定律

Dieterich 等人综合所有观测资料进行归纳、拟合为组合定律, 而后在此组合定律基础上, Ruina (1983) 引入与速率 (rate) 及状态 (state) 相依的参数, 得到摩擦方程式。称作 Dieterich-Ruina 定律

或慢度 (slowness) 定律, 展示当物体由慢速转为快速滑动的一瞬间, 摩擦系数会瞬间有一个较小增量, 之后摩擦系数会随滑移速率增大逐渐减小, 最后回到慢速滑动的稳定状态 (Dieterich, 1979; Ruina, 1983)。

$$\tau = \sigma [\mu + a \ln (V/V^*) + b \ln (V^* \theta / d_c)] \quad (1)$$

其中, τ 为剪应力, V 为滑移速度, V^* 为参考速度, σ 为有效正应力, μ 为 $V = V^*$ 、 $\theta = \theta^* = d_c/V^*$ 的标准状态下的表观摩擦系数, 一般取值在 0.6~0.7; θ 为与滑移路径、应力路径有关的随滑动面凸起接触时间变化的状态变量, 其大小用时间表征; d_c 为临界滑移距离, a 、 b 为室温条件下, 实验常数, 取值范围 0.005~0.015。

2 汶川地震应力变化

地震动态应力降为剪切破裂强度 (最大静摩擦应力) τ_p 与动摩擦应力 τ_d 之差

$$\Delta\tau_d = \tau_p - \tau_d \quad (2)$$

结合简化的断层摩擦组合定律

$$\mu_{ss} = \mu_0 + (a-b) \ln (V/V^*) \quad (3)$$

取 V 为汶川地震断层滑移平均速度 1.5m/s, V^* 按照汶川地震后滑移速度取值, 假设此值恢复到震前 3mm/a 水平, a 、 b 取值范围 0.005~0.015 之间, 估算地震过程中, 断层摩擦系数瞬间由 0.6 可降至 0.25, 甚至降至 0.06 (李振^②, Hiroki Sone, 2013)。另外, 考虑除了速度弱化外, 还有空隙热流作用、断层熔融等作用存在, 动摩擦系数也就在 0.25 左右。考虑逆断层, 估算横向压应力为垂直应力的 2~4 倍, 取水平压应力为垂直应力的 2 倍, 取静水压力为水平压应力与垂直应力和的一半, 即

注: 本文为国家科技支撑项目“汶川地震带科学钻探项目-井中科学探测课题”成果。

收稿日期: 2015-02-02; 改回日期: 2015-02-28; 责任编辑: 费红彩。

作者简介: 李振, 男, 1984 年生, 男, 硕士生, 地质工程专业, E-mail: lizhen05400209@163.com。

$$p = (\sigma_v - \sigma_h) / 2 \quad (4)$$

垂直平均应力 σ_v 可由下式近似计算:

$$\sigma_v = \frac{1}{H} \int_0^H \rho_c g H d_H = \frac{1}{2} \rho_c g H \quad (5)$$

由此, 取断层面倾角 65° , 结合公式 2 计算, 所得动态应力降水平达到 $5.62 \sim 8.73 \text{MPa}$, 该值较陈学忠等人计算的动态应力降要大些, 表明地震过程中, 除了速度弱化原理降低断层摩擦应力外, 可能还有其他弱化机制在起作用, 如流体润滑、空隙流体气化、流体热压等, 降低空隙流体压力而有效正应力降低, 减小了断层摩擦应力。

注 释 / Notes

- ① Xyoli Perez-Campos, 2002. A Comprehensive Study of the Radiated Seismic Energy.
- ② 李振. 2011. 汶川 8.0 级地震断层摩擦特征研究. 导师: 彭华. 中国地质科学院地质工程专业硕士学位论文, 1~88.

3 结论与建议

(1) 本文从地震过程地应力变化的断层摩擦物理机制入手, 利用断层摩擦组合定律估算汶川地震动态应力降水平达到 $5.62 \sim 8.73 \text{MPa}$ 。从学术研究角度, 难免在一些问题上存在分歧和不同的见解, 供其在从事相关研究专家、学者之参考, 不当之处敬请指正。

(2) 所估算的应力降数值较陈学忠等人计算的动态应力降要大些, 可能是由于考虑了在地震过程中, 除了速度弱化原理降低断层摩擦应力外, 可能还有其他弱化机制在起作用, 所取动摩擦系数较小缘故, 需进一步开展研究工作。

参 考 文 献 / References

- 陈学忠. 2005. 2001 年昆仑山口西 8.1 级大地震前后震源区应力水平估计. 地震学报, 27(6): 605~609.
- Dieterich J H. 1979. Modelling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations. J. Geophys. Res., 84: 2161~2168.
- Hiroki Sone, Toshihiko Shimamoto. 2013. 地震滑动加速和减速过程中的摩擦作用. 国际地震动态, 8(416): 12~18.
- Ruina A. 1983. Slip instability and state variable friction laws. J. Geophys. Res., 88: 10359~10370.