

三峡水库蓄水后坝址附近诱发地震可能性探讨

李方全

(国家地震局地壳应力研究所)

1. 前言

通常认为水库可能诱发地震的物理机制有两种: 在原有的地应力背景上附加了储水重量的载荷, 因而诱发地震; 以及由于孔隙压力作用使地下岩层的孔隙压力增高, 使断层面上的有效正应力降低, 从而诱发地震。

应力场的数值计算表明, 由于水库蓄水引起的荷载的增加, 库区地表下的应力增量主要集中在近地表范围内, 即使考虑其最大应力增量也仅为 1.3 MPa。因此, 作者在考虑蓄水诱发地震可能性时, 假定主要是由于深部孔隙压力的增加而引起的。

2. 断层滑动准则

按照通常的假定, 认为地震是由预先存在的断层面滑动而引起的。如果沿断层面的剪应力 τ 等于阻碍断层滑动的摩擦阻力 S_f 时, 在断层面上就会发生摩擦滑动。 μ 是根据实验确定的材料的“摩擦系数”, S_n 是断层面上的正应力。这个关系称为库仑准则。也可以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 S_1 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 $(S_3 - P_0)$ 之比可简单地表示为摩擦系数的函数:

$$(S_1 - P_0) / (S_3 - P_0) = [\mu^2 + 1]^{1/2} + \mu^2$$

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。

拜尔利 (Byerlee, J. D., 1987) 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。

3. 原地应力状态与断层稳定性评价

在距三峡水库坝址区约 2.5 km 的茅坪镇钻了一口 800 m 深的钻孔, 钻孔位于闪云斜长花岗岩体中 (图 1)。在该钻孔中, 从 155 m 到 790 m 我们共进行了 16 个深度的水压致裂法应力原地测量。水压致裂应力测量结果发现, 最大水平主应力方向在 390 m 以上变化较大, 390 m 以下则较为稳定。在深部, 最大水平主应力的平均方向为 N69°W。

根据水压致裂应力测量结果进行线性回归, 得:

$$S_H = 9.28 + 0.0137H \text{ (MPa)}$$

相关系数: 0.966

$$S_h = 4.65 + 0.0110H \text{ (MPa)}$$

相关系数: 0.988

$$S_v = 0.0268(\text{MPa})$$

其中 S_H 为最大水平主应力; S_h 为最小水平主应力; S_v 为按上覆岩层重力计算的垂直主应力 (岩石密度为: $2.73\text{g}/\text{cm}^3$).

图 2 是茅坪钻孔水压致裂应力测量得到的最大水平主应力 S_H , 最小水平主应力 S_h 和按静岩压力计算的垂直主应力 S_v 随深度的变化图. 由图可见, 在 294m 以上的浅部, 最大主应力为 S_H , 最小主应力为 S_v , 即 $S_H > S_h > S_v$, 如果产生断层活动, 将有利于逆断层运动; 294-708m 为 $S_H > S_v > S_h$, 将有利于走滑断层运动; 在 708m 以下为 $S_v > S_H > S_h$, 则将有利于正断层运动. 下面根据实测应力状态及其随

图 1 测点位置及坝址区附近主要断层分布图

Fig. 1 Distribution of the measurement sites and major faults near the dam area

深度的变化规律, 分别讨论水库蓄水后各种类型断层活动的可能性.

(1) 逆断层活动

在 294m 以上, 最小主应力 S_v 是按上覆岩压力计算的, 是一个比较稳定的数值. 如果产

图 2 茅坪 800m 钻孔应力随深度的变化及正断层和逆断层活动相应的水平主应力的临界区

Fig. 2 Variation of the stress in Maoping 800m - borehole with the depth and critical domain of horizontal principal stress corresponding to normal and reverse faulting

图 3 深度 294-708m 蓄水后最大和最小水平主应力有效值的摩尔圆及产生走向滑动的临界区

Fig. 3 Mohr's circle showing maximum and minimum horizontal principal effective stresses between 294-708m depth after stored water and critical domain where strikeslip may take place

生逆断层活动,则要求水平最大主应力 S_H 达到由断层面摩擦系数 μ 和孔隙压力值 d 所确定的某一临界值。如图 2 右上角部分布满小点的区域是蓄水后最大水平主应力 S_H 的临界区。由图可见,在 294m 以上有的测点测得的最大水平主应力 S_H 已进入临界区。因此,可以认为在坝址区附近,蓄水后在小于 294m 的深度有可能产生逆断层型的活动。

(2) 正断层活动

在 708m 以下,最大主应力为垂直主应力 S_V ,它是一个比较稳定的数值。如果发生正断层运动,则要求水平最小主应力 S_h 小于某一临界值。图 2 中左下的小点区代表水库蓄水后最小水平主应力 S_h 的临界区。由图可见,在 800m 左右,水平最小主应力已进入或接近蓄水后的临界区。因此,在 708m 以下在方位合适的断层或节理面上发生正断层型的活动是可能的,应予以重视。

(3) 走向断层活动

深度在 249-708m 之间,最大主应力为水平最大主应力 S_H ,最小主应力为水平最小主应力 S_h 。因此,如果产生断层活动将是走向滑动。我们以 $f=0.60(S_H-P_0)$ 和 $f=1.00(S_H-P_0)$ 作为断层滑动准则,以 S_H-P_0 和 S_H-P_0 作摩尔圆代表每一测点的应力状态。图 3 中只画出了最危险的三个测点在水库蓄水后的应力状态。由图可见,水库蓄水后将不大可能产生走向断层滑动。

4 讨论

根据以上原地应力状态和断层滑动准则相结合的讨论,在坝址附近浅于 294m 的深度内,水库蓄水后有可能在某些产状有利的断裂或节理面上引起逆断层型滑动,从而诱发微小地震活动。在大约 294-708m 的深度段内,应力状态的总趋势有利于走向断层滑动,但是实测应力值在水库蓄水后均达不到临界值,故不会出现走滑型断层活动。在 450-550m 深度段内,由于有一破碎带,应力变化较大,个别点的应力状态已进入蓄水后正断层滑动的临界区。在 708m 以下应力状态有利于正断层活动。从实测结果看,实际上从 670m 以上的 4 个测点的应力值已进入或接近水库蓄水后临界应力区,因此在方位合适的断裂或节理面上发生正断层型的活动是很可能的。如果应力随深度变化的规律可按 800m 以上的资料往深部外推,则在 800m 以下,只要存在方位合适的破裂面,出现正断层型运动是很可能的,应予以重视。上述只是根据一个 800m 钻孔的资料进行的初步讨论。是否可以将这些资料外推到深部以及摩擦系数 μ 值究竟应取多大,都是值得进一步研究的问题。