

水库诱发地震机理分析

牛恩宽 王孔伟 艾志雄

摘要:水库诱发地震经常威胁着水库大坝的安全,酿成远比地震的直接破坏更加严重的次生灾难,因此对地震水库诱发地震应予充分重视。从水库地震能量积聚和诱发因素两个方面对水库地震的形成机理进行分析。根据摩尔-库仑破裂准则,利用库区应力摩尔圆的移动和半径的变化以及岩石破裂线的变动,分析了水库在不同断裂类型区域的诱震机制。

关键词:诱发地震; 渗透; 孔隙水压; 断裂构造

The Analysis for the Mechanism of Reservoir Induced Earthquake

Niu Enkuan Wang Kongwei Ai Zhixiong

Abstract Reservoir induced earthquake threatens the safety of the dam frequently, which produces secondary disaster far more serious than the damage directly produced by ordinary earthquake. Therefore, full attention should be paid to the reservoir induced earthquake. This paper tries to analyze the mechanism of reservoir earthquake from cumulative energy and inducing factors. Based on Mohr-Coulumb rupture principle, the mechanisms of induced earthquake in different parts of reservoir zone with different kinds of fault structures are analyzed, in which both the changing of the Mohr circle and the changing of the rupture line are considered.

Key words induced earthquake; permeate; pore water pressure; fault structure

水库诱发地震,一般指在库区特定的地质条件下,水库蓄水后伴随产生某种诱发作用,导致岩体内累积的应变能释放而产生地震的现象。水库诱发地震曾经在世界上多次导致破坏性后果,最早于 1931 年发生在希腊的马拉松水库。20 世纪 60 年代以来,又有几个大水库相继发生 6 级以上强烈地震。造成大坝及附近建筑物的破坏和人员伤亡。由于水库诱发地震具有很大的破坏性,不仅将给工程建筑物和设备等财产造成破坏,还可能诱发滑坡、引起涌浪,使水库地区人民的生命财产造成灾难性的损失。因此。水库诱发地震不仅是水利水

作者简介:牛恩宽(1980 -),男,三峡大学土木水电学院硕士研究生;邮编:443002。

电工程研究的重要内容,也是区域构造稳定性和环境工程地质研究重要内容之一。

吴景浓根据新丰江水库地震的特点,曾提出了“积累-释放-再积累-再释放”的观点^[1]。这很好的解释了地震的周期循环性,这种性质是受水库地震的能量储存量与地质约束能力的强弱对比控制的。所以,水库即使具备某些有利地质构造条件,由于当地应变能量积累程度尚未濒临库基岩体破裂的程度,以致库水诱发作用不足以打破这种平衡,因而不能改变当地地震正常的蕴育和发展过程。

于品清认为水库地震的本质应用“储能地质体+水的作用”这一公式来表示^[2],这既能包括所有水库地震类型,也较好地解释了不同水库地震的成因及其由此派生出来的特点。储能地质体可以是断块、岩块,也可以是特殊性质的地层,从水库地震的活动特点,特别是发震时间与库水位的相关性看,储能的程度极不一致。但对于水库诱发地震,库区储能地质体积累应变能的多少无疑是决定性因素。在一般情况下,滞后时间短表明震源区的应力、应变已接近岩石破裂的极限,只要稍加外力即可破裂,产生地震;滞后时间长表明震源区的应力、应变还没有达到岩石破裂的极限值,只有通过库水和地下水的作用使原应力场调整,并在某一特定部位集中,或大大降低岩石的结构强度,然后方能发生地震。水库区储能地质体的应力、应变积累的程度是千差万别的,一些已达到岩石破裂的极限,另一些距这个值可能尚远。但是,只要应力、应变接近岩石破裂的极限,就会引发地震。

1 水库地震的能量来源

1.1 构造应变能

水库地震实例统计表明,其发生不取决于当地地震活动性强弱,可是确与当地构造应变能的积累有密切关系^[3]。构造应变能的形成,受构造应变能的积累所制约,地震活动水平高的地区,地震频繁发生,构造应变能积累的速率较高,地震重复间隔较短。在这种地区修建水库,发生诱发地震并提前释放已积累的构造应变能的机遇相对较少。相反,在少震区和弱震区,构造应变能积累的速率较慢,地震重复间隔较长,更有可能在较广泛的地区内积累相当大的构造应变能,因此,少震区和弱震区更易于发生水库诱发地震。

1.2 水库荷载应变能

水库的巨大水体对库基岩体而言是一种强迫荷载,它可以造成库基弹性应力明显增加,水库荷载可以改变库基岩体的应力状态,使库基岩体发生弹性位移,岩体的变形立即继之而来,从而使岩体储备相应的弹性能增加。

1.3 岩块的位能

岩块在构造运动的过程中,如果处在某一高度,我们即可认为其具有一定的位能,一旦在外在诱发因素所作用下发生错动,就会储存或释放能量。

2 水库地震的诱因

2.1 水荷载的作用

水库荷载可以产生以下几种效应和作用^[3-6]:(1)弹性效应——水库荷载使库基岩体发

生弹性位移,从而使岩体承受的弹性应力增加,这种变化是快速响应的。(2)压实效应——在饱和的岩石中,由于弹性应力的增加而使岩体中的空隙被压缩,孔隙体积减少,孔隙水压从而升高。这种响应亦较迅速。(3)扩散效应——由于水库蓄水造成一定的水头压力,迫使库水沿裂隙向孔隙压较小的部位运移。这种扩散作用必然还与压实作用造成的孔隙压变化有联系。(4)抬高地下水位作用——在水库蓄水以前,地下水位埋深很深,以致使地表浅层的库基岩石处于不饱和状态。当水库蓄水以后,库水向不饱和的岩体渗透,最终使地下水位被抬高。弹性效应是水库荷载对库基的直接效应,而其它3种效应是在水库荷载的条件下,库水对岩石介质的物理特征和对水文地质条件的影响。水库荷载的意义在于触发已积蓄的构造应变能,水库蓄水使水库边缘形成附加水平引张应变环分布。因此,如果当地初始最小应力 σ_3 与附加张应力接近平行,特别是初始构造应力已接近岩石破裂的临界值时,附加张应变就可能产生诱发地震的作用。附加引张应变可以部分地抵消断裂面上的正应力,从而使构造应力更易于造成断裂错动和地震。

2.2 孔隙水压的作用

2.2.1 孔隙水压的效应

按照孔隙水压概念,有液体渗透到孔隙介质后,有效应力为总应力减去孔隙水压力,即

$$\sigma' = \mu(\sigma - P) + c \quad (1)$$

式中, μ 为岩石(或其界面)的抗剪强度; σ 为总应力或界面的正应力; P 为孔隙水压力; c 为岩石凝聚力。实验表明断层的剪切强度(μ)与正应力密切相关。从理论上讲,如果孔隙水压增加,使断裂面上有效应力降低,以至断裂面的剪切强度低于当地的构造应力时,就导致地震。

2.2.2 孔隙水压与断裂构造的关系

地震失稳现象主要与沿断裂面的摩擦滑动有关。尤其是震源不超过20 km的浅层地震多被认为是断层闭锁区发生瞬间位错的结果。世界水库震例,绝大多数是与库区,特别是靠近水库边缘的浅层构造断裂密切相关的。库基岩体的断裂网络愈发育,库水愈得以渗透,库水的孔隙压效应和库水荷载的物理作用才能充分发挥影响。还有学者指出指出,由高渗透性岩层构成的褶皱构造在库区的展布特征对水库地震有着较为直接并且重要的影响^[7]。这主要是从褶皱构造中的裂隙和断层在被库水淹没后成为库水向地下渗透的通道,有利于库水的渗透扩散,使得库水的孔隙压效应和库水荷载的物理作用充分发挥影响的角度考虑的。

完整的岩石的初始剪切强度比已经存在破裂面的强度大得多,所以,错动面不一定与最大和最小主应力轴成45°交角,凡是已存在裂隙的岩石受到应力作用,通常都是沿着已经存在的破裂面发生错动。因此,一旦水库区已存在接近现今构造应力场最大剪切破裂面的平移断层和接近垂直最小主应力轴(最大引张应力轴)的倾滑正断层时,便最易发生错动。一般说来,水库荷载的引张效应在水库边缘的浅层最显著。

水库地震通常发生于构造引张区,而不利发生于构造挤压区。莫尔-库仑破裂准则为水库区岩石破裂过程和诱发因素的影响提供了简单的解释(图1)。对正断层、平移断层和逆断层等断裂形式在孔隙水压力作用下诱发地震的解释如下:

(1)在引张构造环境下,如正断层,最大主应力轴近于直立(图1a),单是增加水库荷载 P 使莫尔圆的半径加大,增加逼近外包络线的机会(图1a的曲线2),使破裂的概率加大。如果增加荷载,并且孔隙水压上升时(曲线3),莫尔圆整体向左(接近包线的方向)滑动,则岩石破裂的概率更高。

(2) 在剪切的构造环境下,如平移断层附近,最大和最小主应力轴都近水平,中间应力轴直立。这种情况下,水库荷载不能增加破裂的可能(图 1b 的曲线 2),可是孔隙压增加,同样使莫尔圆整体向左(接近包线的方向)滑动(曲线 3),破裂更易发生。

(3) 在挤压构造环境下,逆断层或逆掩断层附近,水库荷载和孔隙压升高都无助于破裂的发生(图 1c),甚至对库基稳定起到一定的促进作用。上述分析得到大量实际资料的证实。

水库区,特别是水库边缘的与现代区域最大剪应力方向近于平行的活动性平推断层与正断层,是易于发生较强水库地震的构造。无论就库水的渗透,或岩块的重力滑移而言,直立或近于直立的断裂有利于水库地震的发生,岩石断块将因受构造应力或岩块重力的作用而发生的滑动,形成诱发地震。前者释放构造应力能,形成可大可小的诱发地震,后者主要释放岩体断块的位能,只能诱发微小地震。而那些逆断层,特别是低角度的逆掩断层,一般不大会触发水库地震。不过当有压扭等作用叠加时,逆断层同样可以触发水库地震。

总之,由于孔隙水压显著增大,降低了断层面上的有效应力,导致库基稳定性减小,才产生诱发地震。水库地震的形成应是水库蓄水和地质构造两种因素复合影响的结果。

2.3 水对库基岩体的物理化学作用

干燥的和含水的岩石具有不同的强度和变形特征。对某些种类的岩石而言,这种差别尤为突出。这种岩石特性变化是水对岩石的物理、化学作用的结果。水库蓄水以后,受重力和水压的作用,库水沿着岩石的孔隙、岩体的裂隙和其他软弱结构面向深部和水库四周边缘渗透,孔隙水压随之变化。水的渗透作用不仅改变了岩石的强度,改造了岩石孔隙和岩体裂隙的形状,同时也改变了岩体内部的应力状态,总的结果是使岩石软化。根据吴景浓等对新丰江水库的岩石进行试验研究^[1],各种岩石在不同的饱水状态下破裂强度试验结果如图 2 所示。显然,经过压力饱水以后,岩石的强度显著降低了。同时,试验数据的分散性也说明岩样结构是不均匀的。根据莫尔包络线的形状和破裂模式分析,对于结构均匀、致密的岩样,在高围压下,符合格里菲斯破裂理论,即

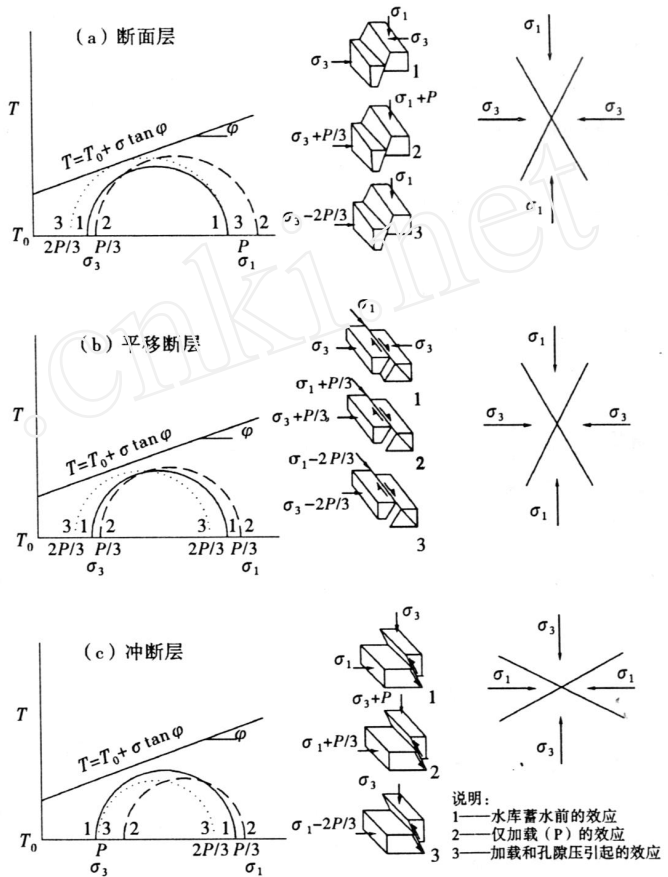


图 1 不同断层环境的水库蓄水效应在有效应力的莫尔圆

说明:
1—水库蓄水前的效应
2—仅加载(P)的效应
3—加载和孔隙压引起的效应

$$\sigma_1^2 = 4 \sigma_1 (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2)$$

式中, σ_1 为岩石的抗拉强度; σ_3 为正拉力。对于结构松碎或存在明显层面的岩样, 当围压不太高时, 则比较符合莫尔-库仑准则, 即

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_3 \cdot \tan \alpha \quad (3)$$

式中, σ_3 为岩石材料内部的抗剪力, 包括凸凹不平的嵌合力和内聚力; α 为内摩擦角。在封闭饱水条件下, 由孔隙压 P 的作用, (2)、(3) 式变为

$$\sigma_1^2 = 4 \sigma_1 [\sigma_1 - (\sigma_3 - P)] \quad (4)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (\sigma_3 - P) \cdot \tan \alpha \quad (5)$$

$\sigma_3 - P$ 通常称为有效应力。由图 3 可以看出, 两条包络线并不是平行的, 表明岩石饱水后抗剪强度的降低不是一个常量。这是由于原先注入岩样中的水分被围压 (超过 P 值后) 所封闭, 随着围压的升高, 试样体积被压缩, 在密封的情况下, 水的可压缩性极小, 造成孔隙压力 P 随着围压 σ_3 而增高, 对抗剪的强度影响也就越大, 直至围压相当高时这种影响才趋于稳定。如图 4 所示, 当正压力超过 30000 kg/cm² 以后, 风干与饱水岩样抗剪强度的差值几乎是不变的, 最大差值比达 22 %。不难设想, 在水库蓄水或深井注水时, 如果那里的结构具有存在 P 的条件, 那么随着区域构造应力场和水压应力场的变化, 都会影响 P 值的变化, 甚至使静态的 P 变为动态的 P , 成为触发 (或诱发) 地震的重要因素。

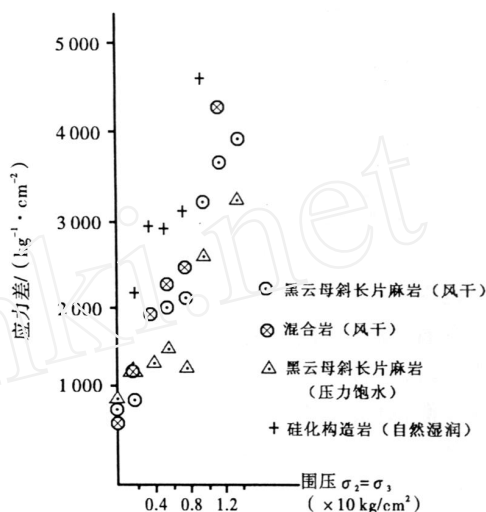


图 2 不同围压下的破裂强度

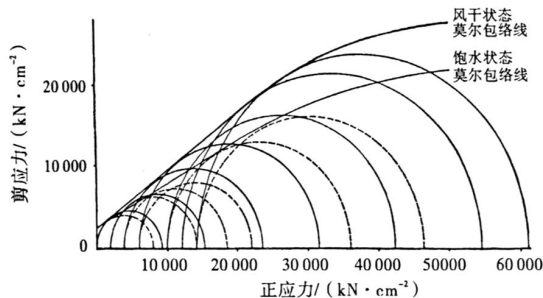


图 3 风干、饱水状态下的莫尔破裂包线图

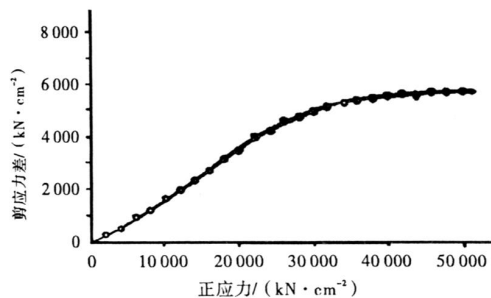


图 4 风干、饱水岩样抗剪强度差值随正应力的变化

库水渗透到库基内, 还使库基岩石的部分矿物产生溶解, 水化和吸附效应等物理 - 化学过程。水化作用降低了使岩石颗粒边界扩散和压熔变形所需的最低温 (1975) 等称这种物理过程为应力腐蚀。

在应力腐蚀作用情况下含石英岩石的强度将显著降低, 明显地缩短导致破裂的时间, 或是加速破裂成长的速度。充填粘土质成分的裂隙, 在受到库水的渗透之后, 岩石的内摩擦系数可减小 15 %, 断裂强度降低 50 %。吸附效应是指岩石受水渗透后, 在矿物之间的分子层表面形成水膜, 因而降低矿物之间的联结强度, 而使原有的裂隙易于分开。吸附效应的强弱取决于地下水的成分。当含有与构造矿物相同的离子的低浓度盐水溶液时, 对岩石的吸附效应最强烈。

总之,水对库基岩体的应力腐蚀和吸附效应可导致岩石介质软化,或使断层的破裂强度降低,或使断层的剪应力增大,如果已积累接近临界强度的构造力,就可诱发地震。有些水库蓄水不久,水头不高就诱发了微震,应力腐蚀是主要因素,例如新丰江水库就是一个典型的例子。

2.4 微震的诱发作用

诱发地震序列初期的微震既是对水库蓄水的响应,又是一种反馈因素。它们为更大规模释放构造应变能和岩体断块的位能创造条件。已知震例中,较强的水库诱发地震(3级以上地震)发生以前,都有大量微震。一方面,大量小地震的发生使微小裂隙不断发展,甚至互相贯通,促使形成较大的破裂,从而有助于库水向深部渗透扩散,在更大的深度产生孔隙压效应,这一过程有利于孔隙水压效应发挥作用;另一方面,许多小地震活动,使应力分布更加不平衡,更大尺度的岩体内出现应力集中和应力不均衡,导致在大破裂上发生大规模错动,为释放更大规模已积累的应变能创造条件,直到导致发生主震和能量大释放。故此,大量微小地震成为爆发大地震的诱发因素,这种现象也可称之为应力腐蚀。

3 结 论

水库地质体积聚了足够的能量后,当应变积累接近于岩体破裂的临界值时,在有利于诱发水库地震的地质构造条件的地段,导致岩体内累积的应变能释放而产生地震。

水库地震失稳现象主要与沿断裂面的摩擦滑动有关,在水库边缘的与现代区域最大剪应力方向近于平行的活动性平移断层与正断层,是易于发生较强水库地震的构造。

孔隙水压是诱发水库地震最主要最直接的影响因素,荷载和孔隙水压效应的叠加,更促进了水库地震的发展和形成。水库地震的形成应是水库蓄水和地质构造两种因素复合影响的结果。

水库地震的诱发机制是多因子的复杂过程,各种诱发作用既有时间先后差别,又有相互促进,互相联系。库区地质构造和水文地质条件,为库水的渗透和水库荷载的物理效能等因素发挥作用提供客观条件,水的渗透作用使岩石软化。

参 考 文 献:

- [1] 吴景浓. 岩石软化与水库地震[J]. 华南地震, 1981(1): 84-95.
- [2] 国家地震局地震研究所. 中国诱发地震[M]. 北京: 地震出版社, 1984.
- [3] 丁原章. 水库诱发地震[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- [4] 司富安. 水库地震研究现状及问题探讨[J]. 水利水电技术, 1994(6): 25-30.
- [5] 欧作畿. 水库诱发地震的研究[J]. 云南水力发电, 2005(3): 18-29.
- [6] 秦四清. 水库诱震机制新理论的探索—断层带弱化与岩体软化效应诱震理论[J]. 工程地质学报, 1995(3): 35-44.
- [7] 龚宇. 论褶皱构造在水库诱发地震中的作用[J]. 四川地震, 2000(3): 39-42.

[责任编辑 周丽丽]