

# 试论狭谷型水库诱发地震的 一种原因和机理

李 自 强

(国家地震局地球物理研究所)

刘玉琢 刘建中

(国家地震局地壳应力研究所)

**摘要** 本文讨论了狭谷型水库倾滑型和逆掩型地震交替发生的原因和机理,认为虽然前者震级很小,不易形成破坏,但有可能成为后者的诱发原因,后者的地震规模受断层尺度、走向、倾向、层面间的固结强度限制,有时可以诱发三级以上的地震。本文从孔隙压和应力的耦合作用、倾滑性地震的卸载作用出发,用摩尔圆理论讨论了后者发生的原因和机理,认为在水库地震研究中,这种倾滑型、逆掩型地震交替发生的现象应该受到重视。

## 一、前 言

水库诱发地震是近几十年内随着大量兴建高坝大库容水库而发生的地震现象。迄今经科学家们研究后确认的水库诱发地震的震例在世界上已达百个左右。提出了水压应力场,孔隙压的增加,岩石软化等多种导致诱发地震的原因和机制。本文在前人研究的基础上提出了一种新的诱发机制。

为了充分利用地形、地物、减少人力、物力投资,人们常常把水库建设在狭谷区。因此,狭谷区水库的诱发地震研究在水库地震研究中占有重要位置。狭谷区水库库区及上游河道两侧常常有陡峭的断崖,高耸的山体,使谷底成为高水平应力区,在水浸作用下,山体、断崖发生倾滑,库岸卸载,垂向主应力减少,其累积效应可能成为更大的逆掩型地震的诱发因素。

本文讨论了这种狭谷型水库,倾滑、逆掩型地震交替发生的原因和机理。

## 二、倾滑型地震发生的原因和机理

由于水库蓄水,使水库及上游地区水位升高,使原来没有浸水的地层发生水浸,浸水裂隙受到水的软化作用,层面间的摩擦系数可能降低,根据室内实验结果,摩擦系数可以从

0.85降低至0.6<sup>(1)</sup>。

对于南北走向的河流，河岸受到科里奥利力的作用，使河岸受到冲刷，其作用力可以表示为<sup>(2)</sup>：

$$\begin{aligned}\Delta f &= 2 m \cdot \Omega \cdot W \cdot \sin \varphi \\ m &= \rho \cdot dV \\ &= \rho \cdot w \cdot ds \\ dV &= W \cdot ds\end{aligned}$$

因此

$$\Delta f = \int_S \rho \cdot \Omega \cdot W^2 \cdot \sin \varphi \cdot ds \quad (1)$$

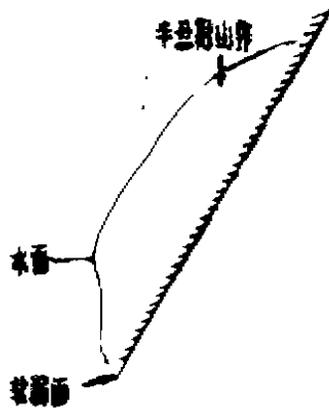


图1 冲刷后的半悬浮岩体

Fig. 1 Rock formation of half suspension after scouring

这里， $m$ 是单位时间流过的流体质量， $\rho$ 是河水的密度， $\Omega$ 是地球自转角速度， $W$ 是河水流速， $\varphi$ 是地心纬度， $V$ 是体积， $S$ 是水流截面。 $\Delta f$ 是科里奥利力，在北半球，它总作用在河流的右岸。

从(1)式可以看出，科里奥利力与流速的平方成正比，水的流速大、科氏力也大，水位急剧上升，往往与上游河水流速增大相联系，使右岸受到更快的冲刷，有时使右岸变成半悬附状态(图1)，悬浮的岩体主要靠层面间的摩擦力固结，其滑动且形成微震的条件可以写为<sup>(3)</sup>：

$$\tau = M \sigma_n \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned}\tau &= \frac{\sigma_z - \sigma_h}{2} \sin \alpha \\ \sigma_n &= \frac{\sigma_z + \sigma_h}{2} + \frac{\sigma_z - \sigma_h}{2} \cos 2\alpha\end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这里， $\tau$ 是作用在软弱面上的剪切应力， $\sigma_n$ 是软弱面上的有效法向应力， $\sigma_z$ 、 $\sigma_h$ 、分别是垂向、水平向的有效主应力， $M$ 是层面间的摩擦系数， $\alpha$ 是软弱面的倾角。对于图1所示的岩体， $\sigma_n$ 应该与河水的侧应力相当，如果河水已渗入软弱面，河水的侧应力则被孔隙压抵消，那么(2)、(3)式可改写为：

$$\frac{\sigma_z}{2} \sin 2\alpha = M \frac{\sigma_z}{2} (1 + \cos 2\alpha) \quad (4)$$

$$\frac{\sin 2\alpha}{1 + \cos 2\alpha} = M$$

进而可以得出： $\alpha = 30^\circ$

该结果表明，只要倾向于河床，倾角大于 $30^\circ$ ，摩擦角小于 $60^\circ$ 的边坡都可以发生滑动，形成倾滑型地震。该类倾滑型地震只发生在河床以上高度，属于极浅源地震，而且震级很小。乌江渡水库的诱发地震震源深度极浅，分布于水库右岸，地质调查表明该区也存在走向，倾向合适的断层。其多数地震可能就属于上述倾滑型地震<sup>(4)</sup>(图2)。

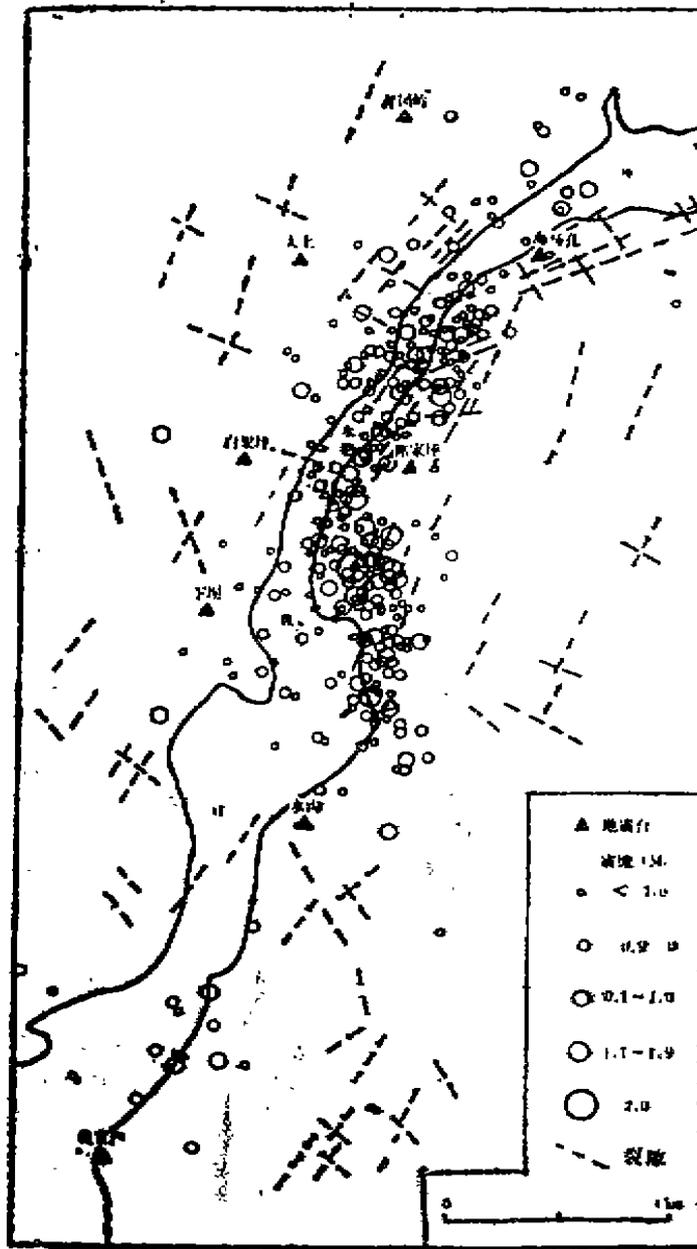


图2 乌江渡水库诱发地震的震中分布

Fig. 2 Epicentre distribution of the reservoir induced earthquake in Wujiangdu

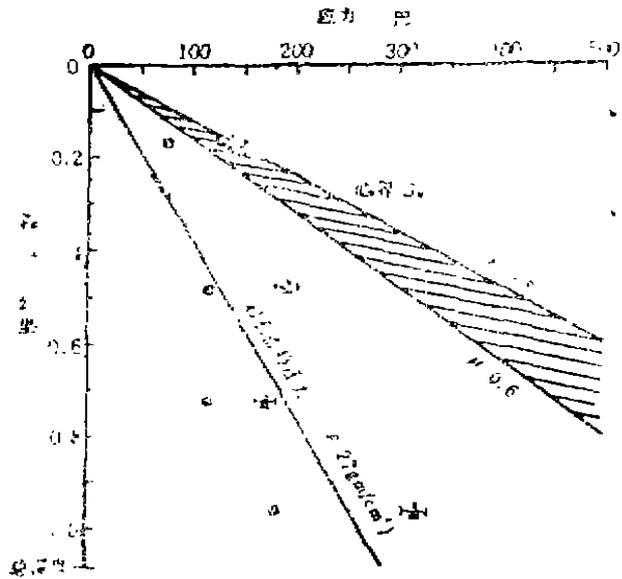
(据国家地震局地震研究所)

### 三、逆掩型水库诱发地震发生的原因和机理

狭谷型水库的谷底受两岸山体的作用应该是高水平应力区<sup>(6)</sup>。

由于水库蓄水，河床以下的岩层中的孔隙压增加，应力增量 $\Delta S_0$ 与孔隙压的关系可以写为<sup>[10]</sup>：

$$\Delta S_0 = \frac{1 - 2\nu + \frac{E}{CD}}{1 - \nu + \frac{E}{CD} + \frac{2(1 - \nu^2)}{R}} r_0 \Delta P_0 \quad (5)$$



作为蒙蒂赛洛：井深变函数的水压致裂应力测量结果。圆点表示最小水平主应力 $S_h$ 的大小。三角表示最大水平主应力 $S_H$ 的大小。表明 $S_H$ 临界值的带表示 $S_H$ 的大小。在这个带里与摩擦系数为0.6和0.8之间的逆断层作用，预期会有好的适宜的方向面上发

图3 谷底震源区的应力测量结果

Fig. 3 Result of stress measurement at the source region of the valley bottom

$R$ 为河谷宽度， $E$ 为杨氏模量， $\nu$ 为泊松比， $C$ 为裂隙刚度， $D$ 为相邻两个裂隙的平均距离， $r_0$ 为库岸在垂直于作用面的水平点力作用下发生径向位移区的半径。 $\Delta P_0 = Pgh$ 是水库蓄水引起的孔隙压的增量，水平应力增量的最大值可达 $2Pgh$ ，这里， $h$ 是水库蓄水水位。美国蒙蒂赛洛水库在震源区的水压致裂应力测量表明，在河床深度以下，渗水地层深度范围内，底确存在一个高水平应力层<sup>[11]</sup>（图3）。上述两个因素可能就是高水平应力层形成的原因。

边坡围岩的倾向性滑动又使岩体发生卸载导致垂向主应力减少，减小值 $\Delta S_0$ 可以写为：

$$\Delta S_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_0 D_i A_i H_i \cos \alpha_i}{A \cos \alpha} \quad (6)$$

这里， $\rho_0$ 是岩石密度， $D_i$ 是第 $i$ 次倾滑地震的位错量， $A_i$ 是第 $i$ 次地震的震源断层面积， $H_i$ 是倾滑断层的厚度， $\alpha_i$ 是倾角。A是逆掩型地震的断层面积， $\alpha$ 是逆掩型断层的倾角。

水位提高，又导致孔隙压的提高，其量级可以写为 $\rho gh$ ，这里， $\rho$ 是水的密度， $g$ 是重力加速度， $h$ 是水位高度。

上述因素共同作用的结果可能导致逆掩型地震的发生，这时：

$$\tau_1 \geq M \sigma_{n1} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \tau_1 = \frac{S_h + \Delta S_h - S_v + \Delta S_v}{2} \sin 2\alpha \\ \sigma_{n1} = \frac{S_h \times \Delta S_h + S_v - \Delta S_v}{2} + \frac{S_h + \Delta S_h - S_v + \Delta S_v}{2} \cos 2\alpha - P_0 - Pgh \end{cases} \quad (8)$$

这里， $\tau_1$ ， $\sigma_{n1}$ 分别是该条件下的剪应力和法向有效应力， $S_v$ ， $S_h$ 分别是垂向与水平向的主应力， $P_0$ 是孔隙压， $\alpha$ 是断层倾角。

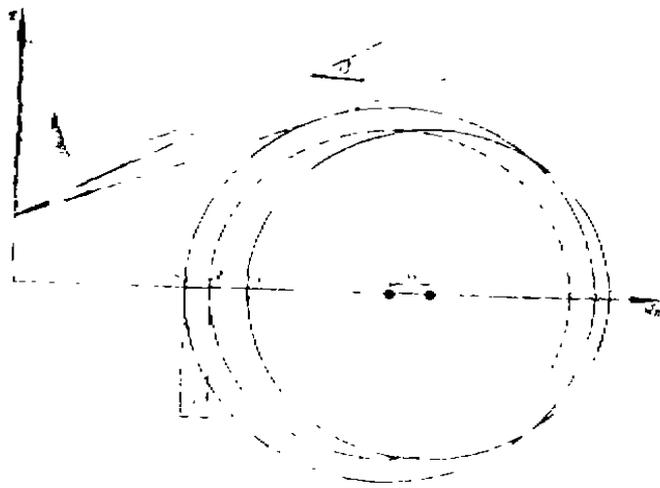


图4 由(8)式绘的应力摩尔圆

Fig. 4 The stress drew by the formula of (8)

1. 蓄水前的应力摩尔圆; 2. 正应力减小后的应力摩尔圆; 3. 剪应力增大后的摩尔圆。

把(8)式的结果绘成应力摩尔圆<sup>[6]</sup>(图4),

图中,  $f_1 = \Delta S_a - \Delta S_b + Pgh$ ,

$$f_2 = \frac{\Delta S_b + \Delta S_c}{2}, \beta \text{ 是岩石软化前}$$

的摩擦角。由图4可以看出, 剪应力有一个很小的增加, 法向有效应力有一个很大的减小, 岩石软化也使摩擦角减小, 其共同作用可能致使逆掩型地震发生。如乌江渡水库<sup>[4]</sup>, 蒙蒂赛洛水库<sup>[7]</sup>。这类地震的规模与断层长度, 走向, 倾向, 层面间的固结强度有关, 有时可以诱发3—4级地震, 其震源深度常在河床深度以下。

#### 四、结 语

从上述讨论可以看出, 对于狭谷型水库, 倾滑型地震和逆掩型地震可以在水线一侧交替发生。前者震源深度较浅, 震级较小, 但可以成为后者的诱发原因。后者的震源深度略大, 可以诱发3—4级地震。条件是存在倾向于水线的断层。如果河道为南北走向, 科氏力的累积作用也不容忽视。

#### 参 考 文 献

- [1] 吴景浓, 岩石软化与水库地震, 中国诱发地震, 地震出版社, 1984。
- [2] 周衍柏, 理论力学, 江苏人民出版社, 1961。
- [3] 刘建中, 地震孕育发生的应力条件, 地震学报, 第9卷增刊, 1987。
- [4] 国家地震局地质研究所诱发地震组, 乌江渡水库诱发地震的研究, 1987。
- [5] 刘建中, 用云南下关测点的水压致裂结果分析地形起伏对应力测值的影响, 地震研究, 第10卷, 第6期, 1988。
- [6] 李自强等, 讨论大庆油田高压注水所引起的作用, 华北地震科学, 油井动态与地震文集, 1985。
- [7] Mar, D. Zoback, Steplen Hickman), 控制南卡罗来纳蒙蒂赛洛水库诱发地震的物理机制的现场研究, 水库诱发地震文集4, 广东科技出版社, 《华南地震》编辑委员会, 1987。
- [8] D. W. Simpson, 诱发地震, 水库诱发地震文集4, 广东科技出版社, 《华南地震》编辑委员会, 1987。

# TRIAL DISCUSSION ABOUT A CAUSALITY AND MECHANISM OF A TYPE OF CANYON RESERVOIR INDUCED EARTHQUAKE

Liu Ziqiang

Liu Yuzhuo, Liu Jianzhong

(Geophysical Institute, SSB)

(Crustal Stress Institute, SSB)

[Abstract] The causality and mechanism of dip slipping and reverse hiding earthquake which occurred alternately in a type of canyon reservoir are discussed in this paper. It thinks that although the magnitude of the former is small and it is not easy to cause any destruction, yet it is possible to become the induced factor of the latter. The earthquake scale of the latter are limited by yardstick, trend, dip, solid strength of fault plane and sometimes the induced earthquake of  $M_s=3$  may occurred. This paper proceeds from the coincidence of hole pressure and stress, discharge of dip slipping earthquake and uses the theory of Moryuan to discuss the causality and mechanism of the latter. It thinks that this phenomenon of dip slidding and reverse hiding earthquake which occurred alternately should be paid great attention in the study of reservoir earthquake.