

渗流与新丰江水库地震

沈立英

(广东省地震局)

摘 要

新丰江水库地震是世界上四个震级大于6级的水库诱发地震之一。实际资料表明,地震活动与水库蓄水有明显的相关性。为探讨库水在地震形成机制中的作用,本文试图通过新丰江水库渗流场的有限元计算,对新丰江水库蓄水初期库水渗流与地震的关系进行初步研究。本次对三个不同方向的剖面进行稳定流及非稳定流计算。计算结果表明渗流在地震诱发过程中起很重要作用,并解释了新丰江地震中出现的某些问题。

前 言

新丰江水库于1959年10月下闸蓄水,蓄水后一个月,库区就出现有感地震,随着库水位的上升、库容的增加,地震活动也与日剧增,并于1962年3月19日在大坝西北1.1公里处发生了6.1级地震。大震后地震活动逐渐衰减,但小震仍连绵不断,1987年9月15日还发生了4.7级地震。这是世界上公认的水库诱发地震震例之一。

对于水库诱发地震的形成机制,国内外大多专家认为处于临界状态下的初始构造应力场在库水的触发下诱发了地震。作者对新丰江地震序列的反演表明本区在北西西—南东东方向的东南沿海区域构造应力场作用之下,北北西、北东东这两组构造是区内多组构造中比较不稳定的构造带,因此无论是小震的震中分布、主震震源机制解的两组节面均与这两组构造相对应,这就明显地说明新丰江水库地区的地震与区域构造应力场的作用是密切相关的。同时实际资料也表明1976年之前,库区地震频度及强度均与水位呈正相关^[1]。那么库水在地震形成及发生过程中起了那些作用,又是如何起作用的呢?曾昭平、吴各彬等同志已研究了库水引起的附加应力场与新丰江地震的关系。本文试图通过新丰江水库渗流场的模拟计算,对新丰江水库蓄水初期的库水渗流与地震的关系进行初步研究探讨。

一、渗流场的计算理论^[2]

渗流可分稳定流和非稳定流。对于平面问题,它需满足连续方程

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0$$

同时,在求解区域D内还必须满足下列偏微分方程

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial H}{\partial y} \right) + A = C \frac{\partial H}{\partial t}$$

定解条件为

$$H|_{t=0} = H_0(x, y)$$

$$H|_{S_1} = H_1(x, y, t)$$

$$K \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n, x) + K \frac{\partial H}{\partial y} \cos(n, y) = q \quad \text{在边界 } S_2 \text{ 上}$$

当水头H与时间t无关时, 上述方程变成椭圆方程, 反映稳定流问题。

上述抛物线方程的定解问题与泛函。

$$E(H) = \iint_D \left\{ \frac{K}{2} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(C \frac{\partial H}{\partial t} - A \right) H \right\} dx dy - \int_{S_2} q H ds$$

等价。

由此可把求渗流偏微分方程的定解问题转化为求某一泛函极值的变分问题。

然后通过有限元法计算出任意点水头的近似值H, 流速V等参数。又由 $P = Hr$ 求出各点的渗透压(强)。

二、计算简介

利用北京大学蔡永恩老师主编的《FIELD程序》对新丰江水库区渗流场进行了初步计算。计算时不考虑初始地下水的分布情况。实际水深最高达90米左右。渗透系数K的选取既参考了其他地区的资料, 又粗略考虑了新丰江水库的实际情况。由于各组断裂的力学性质有差异, 所以选取的渗透系数也有区别。断裂中渗透系数K最高取5米/天, 基岩中K取 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 米/天。

计算时选取了三个不同方向的剖面(图1):

剖面I—I': 沿北42°西方向斜切过北东东向塔坑—葫芦坳挤压带和北北西走向的双坝断裂(略去河源断裂和人字石断裂)。双坝断裂在地表距

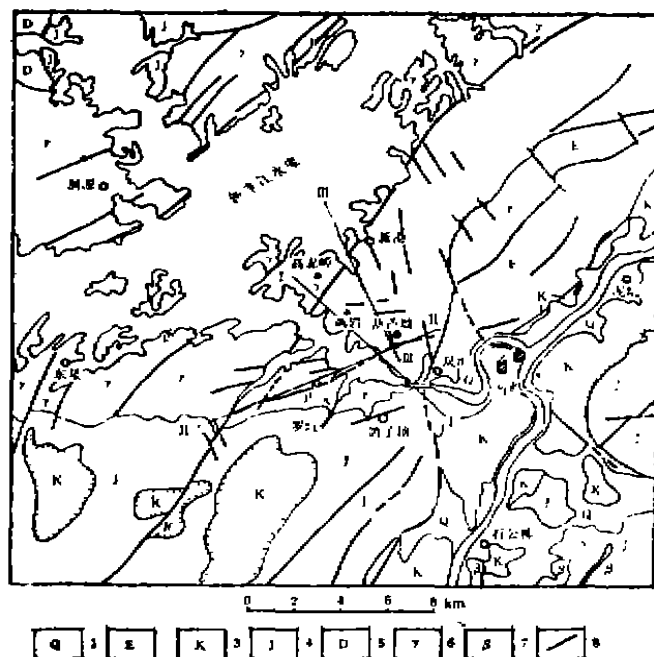


图1 新丰江水库区概况及计算剖面(据丁原章等资料改编)

Fig. 1 The survey of Xinfengjiang reservoir and the calculating section

1. 第四纪沉积; 2. 第三系; 3. 白垩纪砂砾建造; 4. 侏罗纪碎屑岩及砂页岩建造; 5. 泥盆纪砂页岩及碳酸盐建造; 6. 燕山期花岗岩; 7. 新生代玄武岩; 8. 断层。

水域约1.5公里左右，塔坑—葫芦坳挤压带位于水域下面。

剖面 I—I'：走向北东东，中段、南西段沿着塔坑—葫芦坳挤压带，并与双坑等北北西向断裂以及北东向的人字石断裂斜交。由于塔坑—葫芦坳挤压带切过双塘断裂后延伸不久即尖灭，故剖面北东段为基岩部分。该剖面不但计算了稳定流情况，还计算了非稳定流情况。非稳定流考虑了孔隙压随时间变化的情况。本次计算分三个时段、五小步进行。第一时段从1959年10月到地震活动逐渐加强的1960年5月、水位为80多米；第二时段从1960年6月到1962年1月，水位取112米左右，这时段分二小步；第三时段从1962年1月到1962年3月19日，水位取110米左右，该时段分二小步，共分五小步计算。

剖面 II~II'：沿北北西向断裂展布，并将北东东塔坑—葫芦坳挤压带与北北西向断裂交汇处的水头，作为已知边界条件给出。同时在剖面的北西段（人字石断裂西边）再加水头，表示库水从两个方向朝剖面内渗流。

由于本次计算采用了二维且简化后的模型，所以计算结果只能是半定量的。

三、计算结果

图2、图3均反映断裂直接处在水库底下、与库水相通的情况。但图2¹⁾（剖面 I~I'）

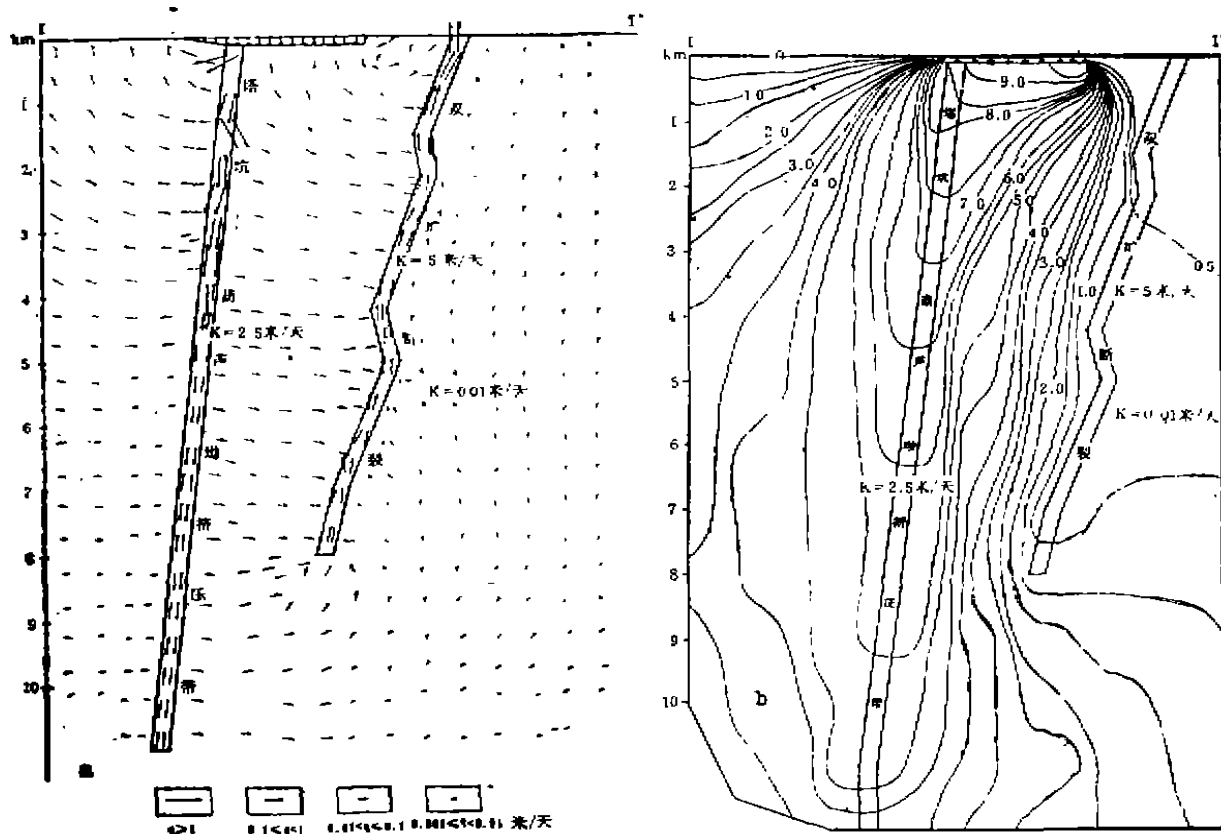


图2 I~I'剖面渗流状况
Fig. 2 The Condition of seepage in I—I' section
a. 渗流矢量图 b. 渗透压分布图

1) 下面图中渗透压单位均为 10^5 帕，

I') 是斜切断层面的, 断裂与水域的接触面较小, 断层在剖面上呈管状, 该剖面也反映与水库无任何连通的断层的渗流情况。图 3 (剖面 II ~ II') 基本上是沿断层面切的, 断层与水域的接触面较大, 本剖面也反映与库水间接连通的断层情况, 剖面 III ~ III' 的计算结果与剖面 II ~ II' 的结果大同小异。

从图 2、图 3 可以看到:

(1) 库水的渗流情况: 当断层与水域直接接触时, 水主要沿断层往深部及走向方向渗流, 也有少部分往断层两侧的基岩内渗透。当断层不与水库相连通时, 它可汇集与水域相连通的断层内的水以及周围基岩里的水到其断层内流动, 这时渗流矢量方向是向上的。无论断层是否与库水连通, 库水在断层内的渗流速度往往要比基岩里高出 1 ~ 2 个数量级, 且断层上部的流速要比断层下部的流速要快。

(2) 渗透压的分布情况: 渗透压的最大值与库水的单位面积上的水头压力大致相等, 并作用在库下极浅部位。在 I ~ I' 剖面内, 与库水连通的断层内的渗透压衰减较慢, 在断层底部还达 45 万帕左右。与水域连通的断层内的渗透压还与非连通断层内的渗透系数有关, 当非连通断层内的渗透系数 (0.5 米/天) 小于连通断层内的渗透系数 (2.5 米/天) 时, 连通断层内的最大渗透压一直可到达断层的根部。渗透压在与水域连通的断层与非连通断层之间衰减很快, 在非连通断层内及其远离水岸的一侧的基岩内, 渗透压很小, 还不到 10 万帕。在剖面 II ~ II' 内, 渗透压随着与水域距离的增加而减少。在垂直方向, 渗透压在库下 1 公里内衰减最快; 在大约 1 ~ 6 公里之间, 渗透压衰减较慢; 在 6 公里以下衰减更慢, 渗透压值可达 10 万帕以上。等压线呈不规则的半圆形。值得注意的是, 图 3 中的等压线明显地往剖面北东方向凸出, 原以为是北西向断裂存在的缘故, 将二条断层去掉后又算了一次, 结果等压线的形态还是不变, 可见这一现象与这侧存在渗透系数小的基岩有关。当新丰江水库满库

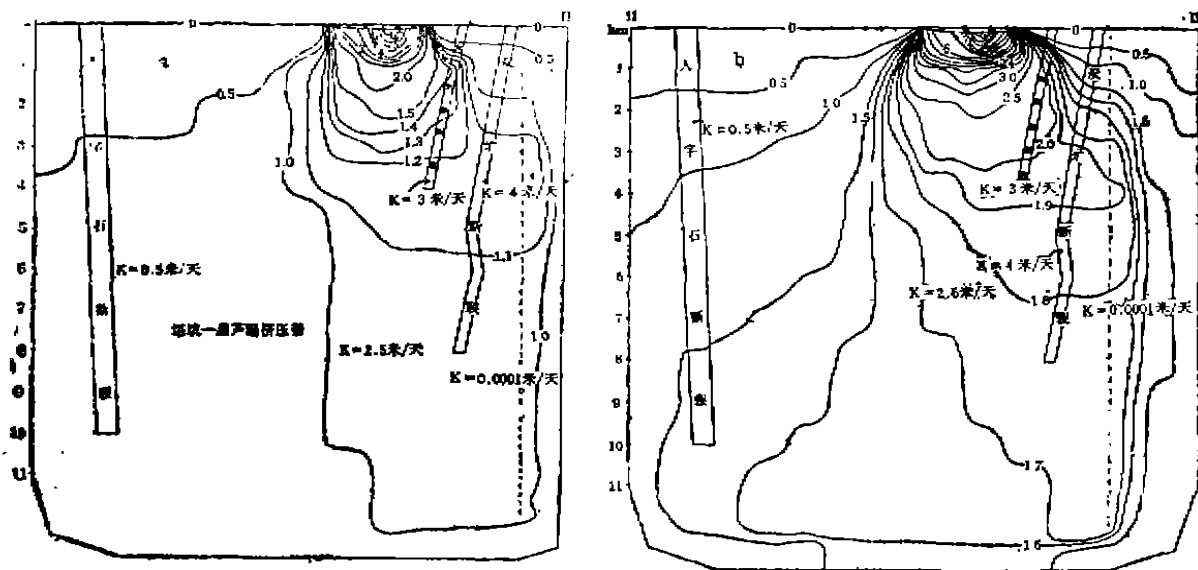


图 3 剖面 II ~ II' 的渗透压分布图

Fig. 3 The distribution map of permeable pressure in the II-II' section
a. 第一小步 b. 第三小步

时，双塘断裂内约5公里深处的渗透压可达20多万帕，大大高于水荷载产生的附加应力（ <5 万帕）。

（3）图3也反映了渗透压的动态变化过程，由于图幅有限，本文仅显示了第一小步及第三小步的情况，图3a是第一小步，表示蓄水后约300天、水深达60米左右的情况，这时库下最大渗透压达60多万帕，水库边缘的北北西向小断裂内可达13万帕左右，双塘断裂5公里深处可达11多万帕。图3b是第三小步，表示蓄水后约830天、水深约90米的情况，这时库下最大透压达90万帕左右，库缘的北北西向小断裂内渗透压为20多万帕，双塘断裂内5公里深渗透压约19万帕。第四、第五步水位略有下降，渗透压也随之减少。

四、讨 论

新丰江水库于1959年10月20日开始蓄水，大约一个月以后，当水位上升18米左右时，库区就出现有感地震，随着水位的上升，库区的地震活动就愈来愈剧烈。蓄水初期的地震主要发生在峡谷北岸的大坝—高龙璋一带，即A₁震区（图4）〔3〕。十几米水头作用在这一带产



图4 新丰江水库地震活动分区（1961.7—1964.1）（据肖安予等）
Fig. 4 The division region of seismicity in Xinfengjiang reservoir
1. 地震台； 2. 2.0—2.9级地震； 3. 3.0—3.9级地震； 4. 4.0—4.9级地震；
5. 5.0—5.9级地震； 6. 6.1级主震

生的荷载附加应力和孔隙压是微弱的,它们直接诱发地震的可能性不大,但库水渗流产生“雷宾德尔效应”则可引起这些微震的发生。苏联科学院院士П. А. 雷宾德尔在研究金属和岩石时发现^[4],当气体或液体与金属、岩石等脆性固体接触时,能够吸附在固体的表面并降低固体的强度。苏联物理化学家还指出:当活动液体浸湿了固体的整个表面并在裂隙内部迅速漫流时,固体的强度明显下降。又指出裂纹的发展速度取决于液体向其端部入渗的快慢。上述计算表明,蓄水后库水主要沿断层、裂隙、节理等往下渗流,同时也向库外基岩里入渗。峡谷北岸大坝、葫芦坳、燕岩、高龙嶂等地,由于处于峡谷和水库主体所围的半岛内,其中北北西,北东东这两组构造薄弱带又较发育(图1),因此库水可以从几个方向往里面渗流。库水首先渗入离水域较近、较浅的裂隙、节理中,将这些破裂面浸湿,吸附作用使岩石强度降低。水位的迅速上升,使渗流速度加快,渗流水头不断冲击裂隙、节理的端部及根部,使本来就处于不稳定状态的这些小构造产生滑移,从而导致一些破裂、即微震。水和介质的某些物理化学作用也促使了上述过程的发生。

库水的继续渗入,使一些大裂隙、小断层面全面浸湿,并在里面漫流。除初始构造应力作用外,断层端部受到的还有水的物理化学作用、水流冲击作用以及微小破裂产生的弹性波的影响,从而产生较大破裂、诱发较大的地震。渗流水头向新的区域推进,吸附作用也随之进行。

在已产生吸附作用的裂隙、断层面内,由于库水的不断渗入,使介质处于饱和状态,这时吸附作用停止。但另一方面,随着水位上升,库水在这些破裂的端部及根部滞留下来,使孔隙压(在我们考虑的流速范围内,孔隙压值与渗透压值相等)增加,这些孔隙压降低了断层面的正应力作用,即降低了断层的抗剪强度,使本来就处于不稳定状态的破裂而产生滑动,从而发生地震。

随着水位的上升,水体荷载产生的附加应力也在起作用。水体荷载在A₁震区产生的剪应力有利于北北西向断裂活动^[5,6],虽然其应力值较小,但作用方向与区域构造应力作用所产生的应力方向基本一致。同时,水体荷载可在库缘浅部产生一个大致指向库水较深部位的拉应力,根据柘林、龙滩^[7]等水库的情况,一个水库往往会出现若干个较深部位。由于A₁震区处在半岛内,这个拉应力可能对北北西向断层起一定作用,虽然拉应力的量级较小,但它对渗流的推进,特别在吸附作用产生破裂的过程中所起的作用是不可低估的,因吸附作用的特点是某种介质和一定机械力共同作用下的结果。

因此,可以认为吸附作用、孔隙压效应及水荷载产生的应力的综合作用使A₁震区成为新丰江库区发震最早且持续时间最长的地块(表1)

新丰江6.1级主震主要是构造应力作用的结果^[8],但库水还是起了很重要的作用。正如前面所述,库水首先触发了微震、小震。库水与小震的联合作用又触发了中强地震。中强地震的发生使局部应力场进行调整,从而使6.1级主震所在的北北西断层处于失稳的临界状态。另一方面,从蓄水一开始,库水主要沿北北东向的塔坑—葫芦坳挤压带朝北东端涌来,并在北北西断层与北东东断层交汇处贮存下来,在5公里左右的深处形成了孔隙压的异常区,这里是两条断层的端部也可能还是北北西向断层的根部。前面已经提到,该处的孔隙起码可达20万帕左右,但实际上由于断层相互切割交汇,使介质处于非常不均匀状态,孔隙压可能会高于这个值。与吸附作用及附加应力作用相比,孔隙压在诱发主震的过程中应该是起主导作用的。

表 1

新丰江水库区地震分区活动情况

Table 1 The active condition of seismic division region in Xinfengjiang reservoir region

震 区	地震活动时间	地震活动高潮期	震中密集区面积 (平方公里)	震中密集区 长轴方向	震中密集区 密集程度	震源密集带 深度(公里)
A ₁	1959. 11—现在	1961. 11—1962. 5	21	北北西	57.2	4—8
A ₂	1962. 3—现在	1962. 3—4	22	北东东	28.3	4—8
B	1961. 10—1962. 6	1961. 11—1962. 1	37	北北西	4.0	8—11
C	1961. 11—1964. 1	1962. 5—6	12	北北西	15.7	9—11
D	1962. 4—1963. 1	1962. 7—8	5	北东东	7.9	4—7

• 指每平方公里面积内2.0级以上地震的次数。据肖安子等

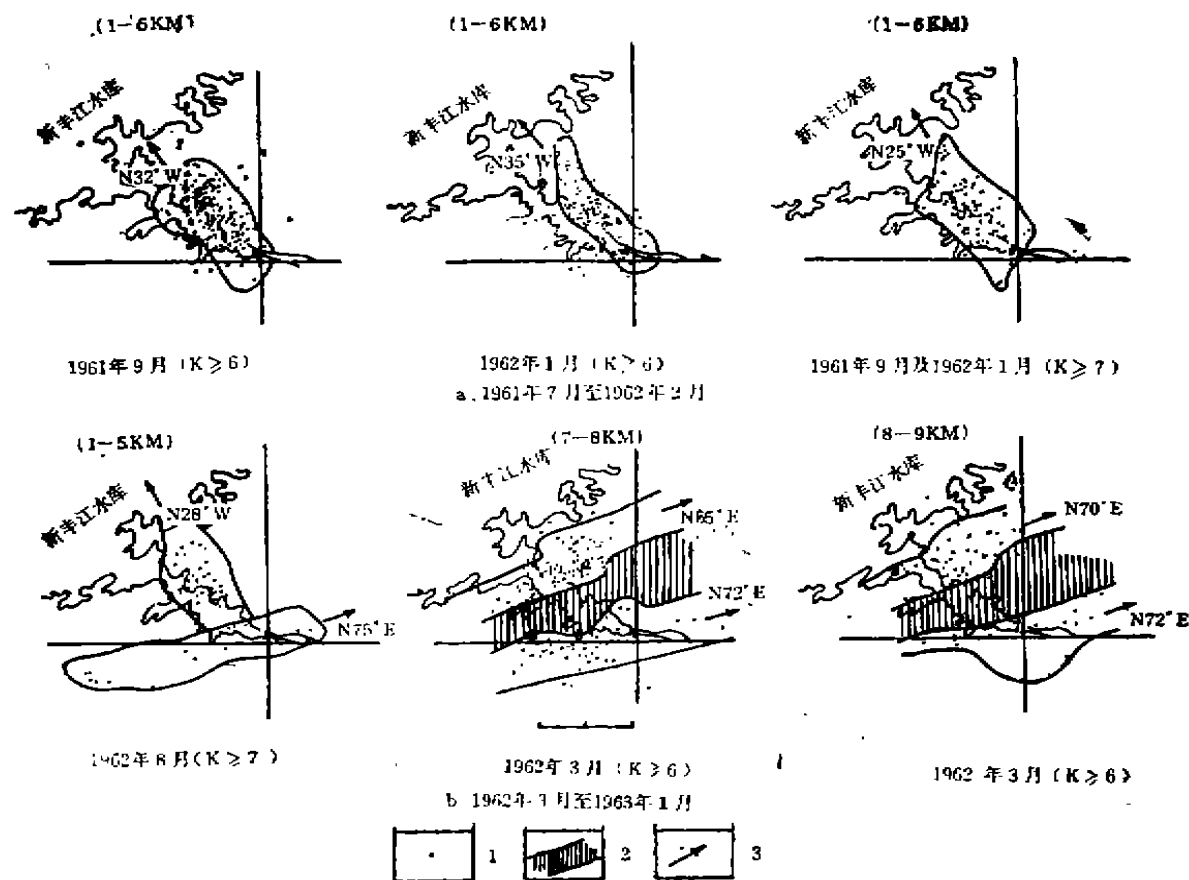


图 5 A震区震源垂直分带图(据原中南地震地质队)

Fig. 5 The zoning map of the source in the vertical section of A region

1, 震中; 2, 地震平静区; 3, 地震带主要展布方向,

新丰江水库地震的震中分布同地表断层的展布相一致, 可分北北西带和北东东带。这两条地震带不仅震源深度有明显的不同、发震时间也有先后之别(图5)。北北西地震带震源深度较浅, 主要分布在1~6公里, 6公里以下很少出现, 而北东东地震带的震源深度在6公里以下显示得更加明显。在发震时间上, 北北西地震带形成时间较早, 蓄水初期的地震主要发生在这个带内, 而北东东地震带是在1962年3月19日6.1级主震以后出现的。为什么这两条地震带在时空上有如此明显的区别呢? 除了初始构造应力场的影响外, 库水的渗流也起了很大的作用。库水除了向断层的两端扩展外, 还向断层的根部入渗, 由于北北西向断层切割地块较浅, 库水首先在这些断层上产生吸附作用, 并在这些断层的特殊部位乃至根部形成孔隙压异常区, 诱发地震首先在这些断层上发生, 因此震源深度较浅。6.1级主震的发生, 使整个库区的应力场进行了调整, 促使了北东东向构造的活动, 同时也促使了某些断裂与水库沟通, 如鸽子顶断层可能通过北北西向的石英脉、断裂等与水库发生水力联系。在下渗过程中, 还是吸附作用一马当先, 首先诱发微震, 而孔隙压的产生要等库水浸透了整个断层, 然后才能在端部、根部等特殊部位滞留下来。孔隙压的聚集需要时间, 高水位可能使库水首先到达某个深度, 并有了部分孔隙压的积累, 但这个值可能还不足以造成断层的滑动, 只有不断积累渗流下来的库水, 使孔隙压超过某一个临界值时, 才能造成裂而滑动, 产生地震。吸附作用与孔隙压效应的时间差可能是造成大部分深源地震与水位不相关、往往滞后于高水位, 只有小部分地震与高水位相对应(图6)的原因。孔隙压的逐渐积累

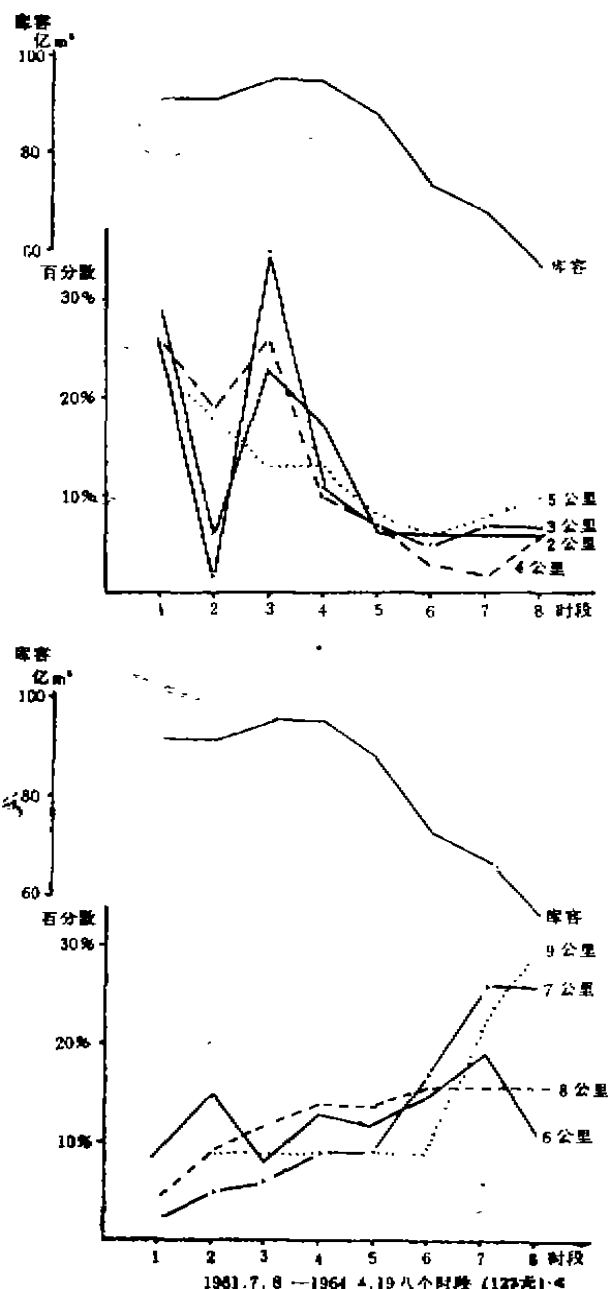


图6 不同震源深度的地震数与库容的变化曲线
(据丁原章等)

Fig. 6 The varied curve of the seismic events at different source depths and the reservoir capacity

也可能是6.1级主震滞后于高水位的主要原因。

结 论

(1) 新丰江水库区基岩介质较破碎、花岗岩体内岩脉、节理、断层等不连续面是库水渗流的主要通道。由于水库的蓄水,库下基岩内形成了强有力的水力联系网。A₁震区所在大坝、葫芦坳、燕岩、高龙嶂等地是渗流最早形成、最发达的地区。

(2) 渗流产生的吸附作用、孔隙压效应,水体的附加应力是触发A₁震区的三大主要因素。它们分别在发展初期的不同时段起了触发作用。库水的吸附作用首先触发库缘微小地震,并随渗流水头逐步向深部、向库外发展。然后是孔隙压效应起主要诱发作用,且持续时间较长。水体附加应力在整个诱发过程中均起促进作用。

(3) 孔隙压效应在新丰江6.1级主震发生过程中起了直接的诱发作用。

(4) 渗流引起的吸附作用和孔隙压效应不但对北北西地震带起诱发作用,同时对北东东地震带也起诱发作用。这两个效应作用时间的先后造成小部分深源地震与水位相关,而大部分深源地震滞后于高水位。

北京大学王仁教授与蔡永恩老师在模型的确定及计算过程中给予了指导和帮助,马汉雄同志参加了本文的计算,黄一川同志协助整理了部分数据,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- (1) 丁原章,新丰江水库地震的形成条件,地震战线,第4期,1978.
- (2) 薛禹群,地下水动力学,地质出版社.
- (3) 肖安予等,新丰江水库地震,中国诱发地震,地震出版社,1984.
- (4) И·Г·基辛著,单修政译,地震和地下水,地震出版社,1986.
- (5) 曾宪泽等,新丰江水库蓄水时库区附加位移及应力计算结果,华南地震,第4卷,第3期,1984.
- (6) 吴各彬等,新丰江三维水压应力场的计算,华南地震,第7卷,第3期,1987.
- (7) 沈立英等,龙滩水库初始构造应力场与库水附加应力场的计算与分析,华南地震,第8卷,第1期,1988.
- (8) 沈立英等,新丰江水库区构造应力场与地震关系的数学模拟,中国诱发地震,地震出版社,1984.

THE INFLUENT AND EARTHQUAKES IN XINFENGJIANG RESERVOIR

Shen Liying

(Seismological Bureau of Guangdong Province)

Abstract

The earthquake of Ms 6.1 in the Xinfengjiang Reservoir is one of

four reservoir induced earthquakes which maximum magnitude is over 6 in the world. The actual information indicates that there is obvious relativity between the seismicity and reservoir filling. In order to study the triggering mechanisms, we try to calculate the seepage field by finite element method and explore the relationship between the seepage with initial impoundment and the seismicity in the reservoir region. We also calculate stable-seepage and unstable-seepage of three sections at different directions in Xinfengjiang region. The result indicates that the seepage seems to play important role in the process of reservoir induced seismicity and we also explain some problems about induced seismicity in Xinfengjiang reservoir.

• ~~~~~ •

(上接第53页)

③经中国专利局授予专利权的发明专利,实施后取得经济效益,并由实施单位出具证明的。

对于发表公布的论文著作,凡在国内外学术刊物上发表的论文,出版一年以上的专著,或在国内外学术会议上宣读的论文(全文)、研究报告等,也可免审进入成果系列。

这里说的国内学术刊物,原则上是指业经各级主管部门、出版管理机关批准并办理了注册登记手续获准公开出版发行的学术期刊。

这里说的国内学术会议系指全国性学术会议,即地震学会、地球物理学会等学会年会,及其专业委员会召开的全国性学术会议,国家地震局召开的全国性专业会议如全国地震趋势会商会、全国性学术讨论会等。

除此而外,在上述范围之外公布的文章、报告等,需另外履行鉴定(或评议)等手续,经有关部门认定后方可进入成果系列。没有进入成果系列的诸方面材料,只能做为资料进入科技档案系列中。

因此,笼统地称一篇文章、报告或讲稿是成果是不妥当的,成果管理部门也无法为你进行登记。

MY OPINON ABOUT SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESULTS

Wang Zhenshan

(Seismological Bureau of Hebei Province)