

# 水库诱发地震最大震级的预测\*

常宝琦 梁纪彬

(广东省地震局)

**提要:** 水库蓄水诱发地震虽然是水利工程建设伴生的少见现象,但有时会诱发6级以上地震,加之震中距小,震源浅,成为水利工程抗震设防的重要因素。已有震例还证明,水库规模越大,诱震的可能性越大,诱震的最大震级 $M_{\max}$ (以下简称 $M$ )也越高。我们曾提出用水库的“综合影响参数 $E$ ”来表征水库的“规模”,并给出了 $M \sim E$ 回归关系式。本文在补充了部分震例资料,并把 $M$ 和 $E$ 以及最大库深 $H_{\max}$ (以下简称 $H$ )都视为随机量,经模式识别的分类判别后把所用震例分为两组(第一组为 $M \geq 4.5$ 的21个震例;第二组为全部37个震例),把变量 $E$ 取为确定量或取为随机量和把变量 $E$ 、 $\ln H$ 取为两个随机量与 $M$ 进行了回归。回归结果:第一组的双随机量( $M$ 、 $E$ )模型的回归标准差为 $\sigma_M = 0.610$ ,变异系数 $V = 0.118$ ,三随机量( $M$ 、 $E$ 、 $H$ ) $\sigma_M = 0.576$ , $V = 0.111$ ;第二组的双随机量的 $\sigma_M = 1.028$ , $V = 0.234$ ,三随机量时 $\sigma_M = 1.032$ , $V = 0.235$ 。说明第一组三随机量模型对可能发生 $M \geq 4.5$ 级的新建水库的最大诱震震级的预测是可用的。

**关键词** 水库诱发地震,综合影响参数 $E$ ,震例模式识别分类回归分析,最大震级预测

## 前 言

水库诱发地震目前在世界范围已有百余例,我国新丰江水库和印度柯依那水库曾诱发出大于6级并使大坝蒙受严重震害的实例。因此,在大坝设计前必须对蓄水后诱震危险性作出判断,如有诱震危险,接着必须估计可能产生的最大震级和可能的发震地点,并用地震危险性概率分析方法计算坝址的地震动参数,以便对大坝及附属工程进行合理的抗震设计。当然,由于水库地震震例少,研究程度尚浅,对于上述任何一个问题作出有把握的判断都是困难的,笔者曾对这些问题阐述过一些初步看法<sup>[1]</sup>。就最大诱震震级的估计,国内外学者曾提出过一些方法,本文拟在作者以前工作<sup>[2,3]</sup>的基础上,补充部分震例资料重新统计了 $M$ 与 $E$ 或 $M$ 与 $E$ 、 $H$ 的关系,给出可供实用的结果。

## 一、水库“规模”与最大诱震震级

水库蓄水后可能诱发的最大震级的估计有两种意见,一种认为诱震最大震级不会超过建库前当地发生过的最大天然地震震级(多数水库地震震例也确如此),根据是水库蓄水对地壳没有或极少附加应变能,蓄水只不过起到提前释放库区周围地壳已积累的应变能;另一种观点则认为水体对库下局部岩体附加较大应变能,如新丰江水库蓄水后库心花岗岩体下沉达10—11cm,附加了相当大应变能,而且库水可能渗透到较大岩体范围,使其强度降低,与天然构造应力场相比,扩大了孕震体,从而诱发出高于建库前最高震级的地震,这种观点经

\*本文为地震科学联合基金资助项目成果之一

常被举出的例子是我国新丰江、印度的柯依那以及赞比亚/津巴布韦的卡里巴水库。虽然上述说法各持其理,目前还难以判断哪种看法正确,但有一点是得到共识的,即水库规模越大,诱震危险性越大,诱震震级也越高,这是作者提出用水库“规模”预测最大诱震震级的主要依据。

我们在最初讨论水库规模与M的关系<sup>[2]</sup>时,根据30个诱震震例分析了最大库深(H)、库容(V)、水库面积(S)各自与M的相关性,证明它们与M的相关系数都达不到95%的可信度,因此认为它们各自与M的相关性是较低的,而从它们导出的无因次量—综合影响参数E

$$E = \frac{H \cdot S}{V}$$

与M的相关系数却高于99%可信度相应的临界相关系数,并讨论了E值的物理意义,给出了两者的统计关系式。后来又讨论了E值的随机性,并把M和E都视为随机量进行了统计分析<sup>[3],1)</sup>。有些论文<sup>[4,5,6],2)</sup>引用我们给出的M~E关系式用于对新建水库最大诱震震级的预测或对于已建并发震水库进行后验。

应当强调指出,M~E关系式不能用于判断诱震危险性,只能在用其它方法判断有诱震危险性的基础上,用它来估算最大诱震震级。同时原来得到的回归标准差较大( $\sigma_M > 1$ )。为此补充了部分震例(表1),经模式识别的分类判别后把高震级( $M \geq 4.5$ )单独进行统计,同时除E值外又增加了lnH作为随机量用三随机量进行统计分析。

## 二、水库地震震例的分类判别

众所周知,水库诱发地震成因机制有多种,但大体上可分为两种。库水荷载与渗透孔隙压耦联效应往往诱发出较高震级的,一般称之为构造型水库地震,这类地震震级较高,对工程可能产生震害;其它成因机制的如浅部岩溶崩塌(如中国南水水库等)、裂隙水冻胀(如奥地利施莱盖斯水库等)、岸边岩体重力滑移(如中国乌溪江水库等)等,统称为非构造型水库地震,这类地震震级往往较小,对工程基本无震害。

显然,我们所关心的是第一类水库地震。但逐个分清每个震例的机制是比较困难的。为此我们采用模式识别的改进的连续亨明法<sup>[7]</sup>进行分类识别,试把水库地震震例分为两类。首先以M为4.0、4.5和5.0作为界限值,震级M大于界限值的作为D<sub>0</sub>类,小于界限值的作为N<sub>0</sub>类;然后计算两类样本的各特征(这里为M, E, lnH)的方差和;接着计算亨明核;再计算各样本到亨明核的欧氏距离;最后根据选定的欧氏距离的阈值进行分类判别。分类判别的结果列于表2,从表2可知把M=4.5作为界限值是比较合理的。

## 三、回归分析结果

在我们的回归分析中,按分类判别的结果把震例分为两组:一组是 $M \geq 4.5$ (21个震例)、第二组是全部37个震例;在变量上取E和E、lnH两种;在回归方法上,分M~E(确定量)、M~E(随机量)和M~E(随机量)、lnH(随机量)。这样,回归结果有6种组合。

1) 常宝琦, 水库地震最大震级的预测, 第二届全国诱发地震讨论会论文, 1990

2) 王国英, 东江水库诱发地震研究, 1990

表1 诱震水库有关参数、实发和后验最大震级

Tab.1 Related parameters and maximum magnitude in practice and posterior of the reservoir induced earthquakes

水库 编号	库名(国名)	最大库 深H(m)	库容 V 米 <sup>3</sup> ×10 <sup>8</sup>	水库面积 S(公里 <sup>2</sup> )	综合影 响参数 E	诱发最 大震级 M实	最大诱震震级后验值 M后					
							式(1)	式(2)	式(3)	式(4)	式(5)	式(6)
1	南水(中国)	81.3	11218	39.4	2.63	2.4				3.91	3.50	3.27
2	南冲(中国)	45	15	1	2.90	2.8				4.16	3.97	2.70
3	乌溪江(中国)	129	2060	41.9	2.62	2.8				3.90	3.48	4.02
4	Shasta(美国)	153	5610	119	3.24	3.0				4.49	4.57	5.23
5	Ukai(印度)	63.6	8611	320	2.39	3.0				3.68	3.07	2.51
6	前进(中国)	50	17	0.8	2.62	3.0				3.90	3.40	2.45
7	Jocassee(美国)	107	1431	30	2.24	3.2				4.56	2.81	3.14
8	柘林(中国)	62	7171	307	3.35	3.2				4.59	4.77	3.90
9	矢作(日本)	90	80	2.7	3.04	3.4				4.30	4.22	4.05
10	Browering(澳大利亚)	95	1628	44.5	2.60	3.5				3.88	3.29	3.40
11	Keban(美国)	182	31000	600	3.99	3.5				5.20	5.90	6.61
12	Tatbingo(澳大利亚)	142	935	19.4	2.95	3.5				4.21	4.06	4.67
13	Kerr(美国)	54	1505	60	2.15	3.0				2.37	2.65	1.88
14	池源(日本)	105	338.4	8.43	2.62	3.9				3.90	3.40	3.60
15	Monicouagan 3(加拿大)	96	10423	207	1.91	4.1				3.22	2.20	2.47
16	九龙头(日本)	122	353	8.9	3.08	4.3				4.34	4.29	4.62
17	Nurek(苏联)	205	11000	74	1.92	4.5	4.39	3.49	4.59	3.23	2.24	4.28
18	佛子岭(中国)	74.4	488	23	3.51	4.5	5.24	5.30	4.83	4.75	5.05	4.44
19	Ganalles(西班牙)	132	678	16.3	3.17	4.7	5.06	4.91	5.13	4.42	4.45	4.88
20	Marathon(希腊)	60.3	41	2.4	3.53	4.7	5.25	5.32	4.59	4.77	5.08	4.13
21	Sefia Rud(伊朗)	80	1800	56	2.49	4.7	4.10	4.14	3.70	3.77	3.25	3.04
22	丹江口(中国)	92	20896	862	3.79	4.7	5.39	5.61	5.42	5.01	5.54	5.21
23	参窝(中国)	50.3	790	52.6	3.35	4.8	5.16	5.12	4.15	4.59	4.77	3.59
24	黑布(日本)	186	199	3.5	3.26	4.9	5.11	5.02	5.67	4.51	4.61	5.58
25	汤田(日本)	69.5	114.16	6.3	3.84	4.9	5.42	5.67	5.14	5.06	5.63	4.83
26	Eucumbene(澳大利亚)	106	4761	145	3.23	5.0	5.09	4.98	4.93	4.48	4.56	4.61
27	Hoover(美国)	191	36703	593	3.09	5.0	5.02	4.82	5.49	4.35	4.31	5.37
28	Benmore(新西兰)	96	2040	72.6	3.42	5.0	4.89	5.20	5.03	4.66	4.97	4.73
29	奈川渡(日本)	125	94	2.74	3.64	5.0	5.31	5.45	5.63	4.87	5.28	5.50
30	Srinagarind(泰国)	133	17.745	400	3.60	5.2	4.97	4.73	4.94	4.26	4.15	4.64
31	Warragamba(澳大利亚)	104	2053	75	3.80	5.4	5.40	5.62	5.59	5.02	5.56	5.43
32	Aswan(埃及)	84	164000	6200	3.18	5.5	5.07	4.93	4.58	4.43	4.48	4.15
33	Claret(美国)	204	4400	63	2.92	5.7	4.93	4.64	5.37	4.18	4.01	5.22
34	Kariba(赞比亚/津巴布韦)	122	175000	6572	4.58	6.1	5.82	6.51	6.72	5.77	6.94	6.86
35	新丰江(中国)	97	11500	390	3.29	6.1	5.13	5.05	4.89	4.54	4.66	4.55
36	Kremasta(希腊)	120	4750	180	4.55	6.2	5.80	6.48	6.66	5.74	6.88	6.79
37	Koyna(印度)	100	278	115	4.14	6.4	5.58	6.01	5.95	5.35	6.16	5.88



之所以把E和lnH作为随机量来处理其理由是,在计算各水库震例的E值时,各震例水库的H,V,S等资料中难免都存在偏差,而且发震时的水位也不一定都在H(和其相应的V,S)时发生的,对同一个震例水库而言,不同水位时的E值也存在一定偏差。因此在我们的统计分析中,M和E、lnH也都作为随机量,利用〔8〕的一致加权最小二乘统计回归方法进行回归。回归关系式列于表3。

表3 回归关系式  
Tab. 3 Regression relationships

组 别	回 归 式	回归标准差 $\sigma_M$	变异系数 $V_M$
第一组 ( $M \geq 4.5$ 的21个震例)	1. E为确定量: $M = 3.3650 + 0.5349E$ (1)	0.504	0.097
	2. E为随机量: $M = 1.3163 + 1.1347E$ (2)	0.610	0.118
	3. E、lnH都为随机量: $M = -4.7251 + 1.1962E + 1.2420 \ln H$ (3)	0.511	0.111
第二组 (全部37个震例)	1. E为确定量: $M = 1.4010 + 0.9529E$ (4)	0.947	0.214
	2. E为随机量: $M = -1.1419 + 1.7638E$ (5)	1.028	0.234
	3. E、lnH都为随机量: $M = -7.9295 + 1.4991E + 1.6504 \ln H$ (6)	1.032	0.235

用上述6式的各震例后验结果列于表1最后6栏,计算出的回归标准差 $\sigma_M$ 和变异系数 $V_M$ 列于表3最后两栏。

从表3可得出如下几点结论:

(1) 第一组( $M \geq 4.5$ )震例的回归标准差在半级左右,第二组(全部震例)为1级左右。后者的变异系数比前者也大一倍。因此为预测高震级的水库地震以第一组结果为好。

(2) 把E作为确定量的回归标准差稍小于把E视为随机量的回归偏差,但如前文所述,E视为随机量是合理的。

(3) 把E和lnH都视为随机量(式3、6)比只考虑E为随机量的回归标准差还稍小,这证明在回归分析中增加库深这一因素是合理的。

(4) 因此,对于大型新建水库预测构造型水库地震时,我们建议采用(3)式,其精度也是可以满足工程要求的;在正态分布假设下,有84%的把握使预测震级的精度在半级左右。

### 参 考 文 献

- 〔1〕 Chang Baoqi (常宝琦), Preliminary study on the prediction of reservoir earthquakes, Gerlands Beitr. Geophysik, 99 (1990)
- 〔2〕 常宝琦,梁纪彬,1987,水库“规模”与水库地震震级的关系,华南地震,7(1)

- 〔3〕常宝琦, 1989, 对“论水库要素与水库地震的关系”的讨论, 华南地震 9 ( 3 )
- 〔4〕光跃华, 1988, 论水库要素与水库地震的关系, 华南地震 8 ( 3 )
- 〔5〕钟以章、王国新, 1990, 用灰色系统理论预测辽宁锦凌水库的诱发地震, 华南地震, 10 ( 4 )
- 〔9〕黄乃安、张绍波, 1991, 丹江口水库诱发地震趋势的研究, 华南地震, 11 ( 4 )
- 〔7〕王碧泉、陈祖荫, 1989, 模式识别 ( 理论、方法和应用 ), 地震出版社
- 〔8〕胡聿贤, 1988, 地震工程学, 地震出版社

## PREDICTION ABOUT THE MAXIMUM MAGNITUDE OF RESERVOIR INDUCED EARTHQUAKE

Chang Baoqi    Liang Jibin

( Seismological Bureau of Guangdong Province )

〔Abstract〕 Although the reservoir induced earthquake is a scarce phenomenon associated with the water conservancy construction, it would induce earthquake of greater than 6, so that it becomes an important factor of seismic protection of water conservancy engineering. The present events proves that the larger the reservoir scale, the greater the inducing earthquake may be and the higher the maximum magnitude will become. We had proposed using " comprehensive effecting parameter E " for " scale " of reservoir and given the regression relationship between M and E. In this paper, we supply partial information of events, take M, E and reservoir maximum depth H as random variables and divide all the events into two groups ( the first group as  $M \geq 4.5$  has 21 events, the second one as totalled 37 events ) after classification of pattern recognition. The results of regression show that in the first group as tri-random ( M, E and H ) model, regression standard deviation is  $\sigma_M = 0.577$ , variation coefficient is  $V_M = 0.111$ . It shows that tri-random model is very useful to predict the maximum magnitude of newbuild reservoir which will be induced earthquake of  $M \geq 4.5$ .

〔Key words〕 Reservoir induced earthquake; Comprehensive effecting parameter E; Pattern recognition classification of the events; Regression analysis; Prediction of the maximum magnitude