

# 朱溪水库诱发地震可能性分析

马志江 赵冬 韩用兵 毛昌伟 姚立珣

(浙江省工程地震研究所, 杭州 310013)

**摘要** 台州市朱溪水库于2011年开始筹备建设, 坝高73.5m, 总库容1.257亿 $m^3$ , 属于大型水库。水库建成蓄水后是否会诱发地震, 一旦诱发地震, 可达的最大震级有多大, 这一焦点问题备受各方关注。本文通过对库区区域构造背景、主要断层活动、破坏性地震的影响及地震地质条件, 结合水库库区的具体情况, 采用构造类比分析法和概率预测法, 对朱溪水库诱发地震的可能性进行了分析, 最终给出了相对科学的预测结论, 为将来应对可能出现的水库诱发地震问题提供了科学依据。

**关键词:** 朱溪水库 区域构造背景 主要断层活动 诱发地震

## 引言

拟建中的朱溪水库地处浙江省台州市仙居县朱溪镇境内, 坝址位于朱溪镇上游4.5km、河口村下游约600m处, 水库拦河坝坝高73.5m, 正常蓄水位以下总库容约1.257亿 $m^3$ , 朱溪水库工程是以供水为主, 结合防洪、灌溉, 兼顾发电等综合利用的水利工程。水库诱发地震对水库工程设施因震级不同而产生不同程度的破坏, 可引起严重的次生灾害。据有关资料统计, 至今国内外已记录到有百余座水库诱发地震的震例(杨清源等, 1996)。我国自建国以来也已发生过43例水库诱发地震的事件, 其中浙江就占有5例。因此, 开展朱溪水库诱发地震可能性的分析工作十分必要。朱溪水库诱发地震可能性的分析, 不仅可为当前工程设计提供科学依据, 而且也可为将来水库建成后, 应对可能出现的水库诱发地震问题提供科学依据。本文在对朱溪水库的区域构造背景、近场区断层活动特点和破坏性地震的影响等资料的分析基础上, 对库区诱发地震的可能性进行了讨论和分析。

## 1 地震构造背景

### 1.1 区域构造背景

朱溪水库位于浙南中山隆起区与浙江沿海低山隆起区分界线附近, 新构造以来, 浙南中山隆起区表现为缓慢的间歇性隆升特点, 地貌上形成较多的“V”形谷地, 山谷陡峭。朱溪水库两岸同样也是山势陡峭, 以陡壁为主, 岩面大都裸露。区内断层主要有北东向的奉化-丽水断层、镇海-温州断层、泰顺-温州断层以及北西向的淳安-永嘉断层等。其中, 镇海-温

州断层在其北段的宁波附近, 为晚更新世早期有过活动的断层(周本刚等, 2008), 其它断层或断层段为晚更新世以来不活动断层。历史上, 在奉化-丽水断层的南段曾发生过 1574 年庆元  $5^{1/2}$  级地震; 在镇海-温州断层北段附近, 曾发生过 1523 年镇海  $5^{1/2}$  级地震; 在泰顺-温州断层与淳安-永嘉断层的交汇部附近曾发生过 1813 温州  $4^{3/4}$  级地震。库区地震基本烈度在《中国地震动参数区划图 (GB 18306-2011)》(中华人民共和国国家标准, 2011) 上为小于 VI 度。

## 1.2 近场区主要断层活动特征

朱溪水库近场区内(水库及坝址周围 25km 范围)新构造运动特征基本与区域特点一致, 以间歇升降运动为主。白垩纪以来在仙居附近沉积形成白垩纪盆地, 第四纪以来该区继续接受沉积, 其它地区基本以隆起、剥蚀为主, 形成表层风化坡积物。近场区出露的岩浆岩为燕山期火成岩。近场区主要断层有 4 条, 其中仅张家渡-上张断层( $f_1$ )在水库西部附近通过, 近场区断层情况如表 1 所示。在近场区, 历史上记录到的有感地震震级最大为 4.0 级, 距离水库坝址 24.2km, 现今无地震记录。

表 1 朱溪水库近场区范围内主要断层概况

Table 1 Main faults in the adjacent area of Zhuxi reservoir

断层名称	产 状	长度 (km)	性质	最新活动时代 (推测)
奉化-丽水断层 $F_1$	$40^\circ/\text{NW} \angle 70^\circ$	10	逆断	$Q_{1-2}$
镇海-温州断层 $F_2$	$20^\circ-30^\circ/\text{SE} \angle 70^\circ-80^\circ$	60	正断	$Q_{1-2}$
张家渡-上张断层 $f_1$	$20^\circ-40^\circ/\text{NW} \angle 40^\circ-50^\circ$	70	逆断	$Q_{1-2}$
仙居盆地边界断层 $f_2$	$30^\circ-60^\circ/\text{SE} \angle 50^\circ-60^\circ$	50	正断	$Q_{1-2}$

通过对近场区内这些断层开展的野外调查并结合年代学研究成果, 这些断层均属于第四纪早期( $Q_{1-2}$ )断层, 晚更新世以来没有活动迹象。

## 2 破坏性地震的影响

根据对区域地震活动性分析的成果, 区域范围内(库区周围 150km 范围内)历史上曾发生过  $M \geq 4^{3/4}$  级地震 9 次, 最大地震为 1523 年镇海海滨  $5^{1/2}$  级地震和 1574 年庆元  $5^{1/2}$  级地震。根据收集到的历史地震资料, 对水库区影响烈度进行综合分析认为, 历史上远场郟城、南黄海、泉州、台湾等地发生的大地震对水库区的影响烈度最大为 V 度左右, 不到 VI 度; 1523 年镇海  $5^{1/2}$  级地震、1574 年庆元  $5^{1/2}$  级地震以及 1813 年温州  $4^{3/4}$  级地震, 对水库的影响烈度均小于 V 度。

## 3 水库区地质构造条件

水库区周围两岸地层由侏罗系上统西山头组( $J_{3x}$ )的流纹质或英安质玻屑熔结凝灰岩和角砾熔结凝灰岩组成, 岩体较完整。水库区附近发育北东、北西及近东西向多条断层(表 2, 图 1), 这些断层不是区域性断层。但个别断层与坝址及库区关系较为密切。

表 2 朱溪水库库区主要断层概况

Table 2 Main faults in Zhuxi reservoir

断层名称	断层产状	最新活动时代 (推测)	与水库区位置关系
张家渡-上张断层 $f_1$	$20^\circ-40^\circ/\text{NW}/40^\circ-50^\circ$	$Q_{1-2}$	在水库西库尾附近通过
$f_{(1)}$ 断层	$20^\circ-45^\circ/\text{SE}/55^\circ-85^\circ$	AnQ	在库区内西侧穿过
$f_{(2)}$ 断层 (*)	$35^\circ/\text{NW}/85^\circ$	AnQ	未通过库区
$f_{(3)}$ 断层	$310^\circ-335^\circ/\text{NE}/50^\circ-80^\circ$	AnQ	在坝址东侧通过
$f_{(4)}$ 断层 (*)	NW	AnQ	在库区外西部出露
$f_{(5)}$ 断层	$325^\circ/\text{NE}/80^\circ$	AnQ	在库区南梅岙附近通过
$f_{(6)}$ 断层	$300^\circ/\text{NE}/75^\circ$	AnQ	未通过库区
$f_{(7)}$ 断层	EW, 近直立	$Q_{1-2}$	在库区中间通过

注: (\*) 号断层为野外调查未发现出露的断层, 其相应参数是根据收集到的相关地质资料综合给出的。

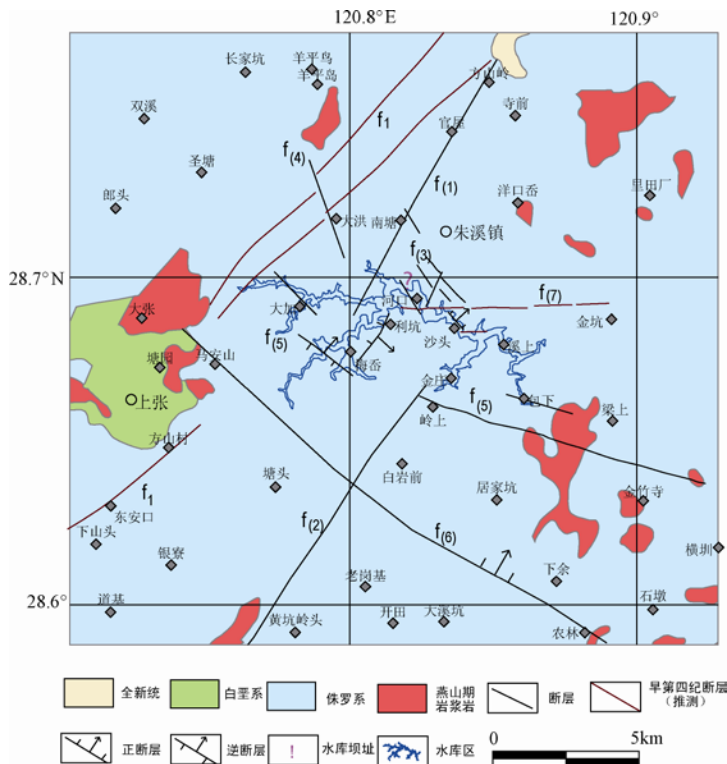


图 1 朱溪水库库区地质构造图

Fig. 1 Geological map of Zhuxi reservoir and its adjacent area

### 3.1 $f_{(1)}$ 断层及其活动特征

该断层在水库区西侧 (梅岙至利坑口一线附近) 通过, 北东走向。野外地质调查中, 在利坑口村西南 500m 公路边见断层出露剖面 (图 2), 断层发育于灰褐、灰黑色的凝灰岩中, 断层走向北东  $20^\circ$ , 倾向南东, 倾角  $85^\circ$ , 断面波状起伏, 上部缓倾, 剖面下部断面则近陡立, 断层下盘为沉凝灰岩, 由于挤压造成岩性破碎, 但仍可见层理。断层破碎带宽数 cm 至 1.5m

不等。破碎带内可见明显的挤压劈理，破碎带内以角砾岩为主，由于雨水侵蚀及植物根劈，破碎带内局部风化强烈。该断层没有明显的地貌表现，综合分析认为该断层为压型断层，推测最新活动时代在前第四纪。

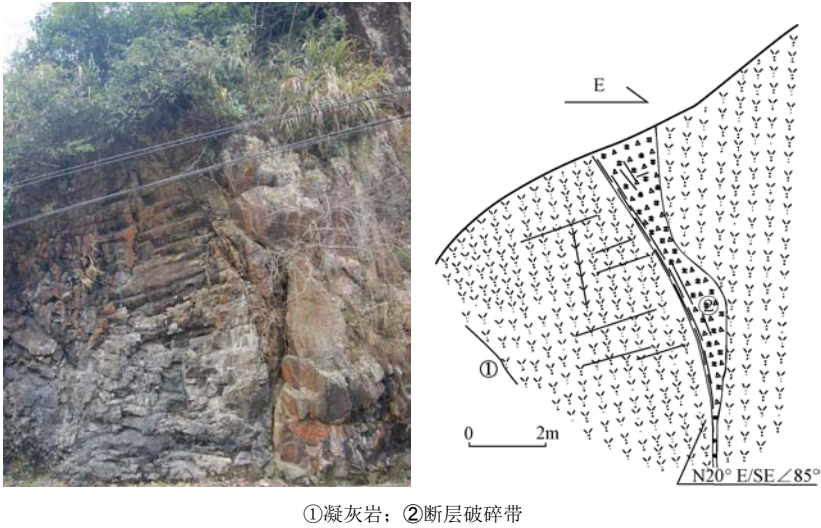
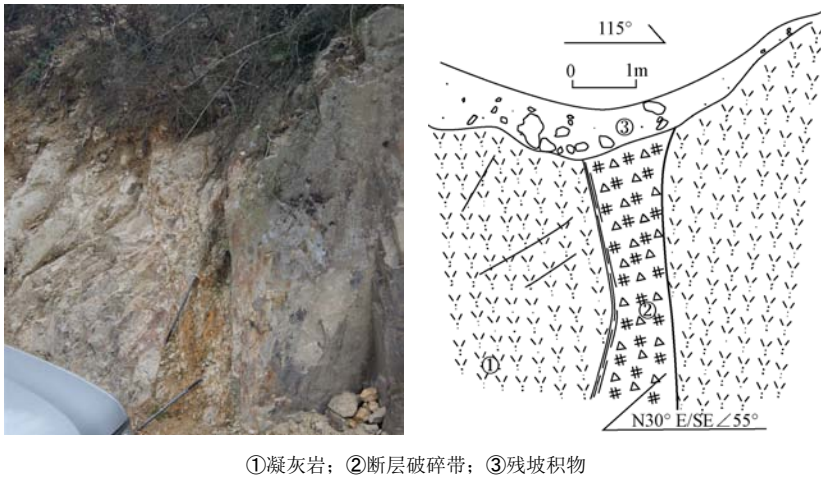


图 2 利坑口村路边断层出露剖面

Fig. 2 Fault exposure at the roadside of Likengkou village

此外，在位于河口村朱溪水库坝址东南山边，由于新开挖公路见断层剖面（图 3）。断层发育于青灰色、黄褐色的凝灰岩中，断层走向北东 40°，倾向南东，倾角 55°，断面波状起伏，断层下盘节理发育，并且岩性破碎，断层破碎带宽约 1m，呈灰褐色，挤压破碎，可见明显的劈理。破碎带内以角砾岩和碎裂岩为主，胶结成岩。断层上覆厚数 10cm 至 1cm 不等的第四纪崩坡积物。断层沿线没有明显的地貌表现，综合判定该断层为一压性断层，推测最新活动时代在前第四纪。



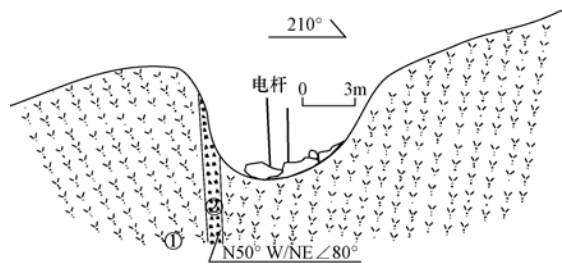
①凝灰岩；②断层破碎带；③残坡积物

图 3 河口村路边断层出露剖面

Fig. 3 Fault exposure at the roadside of Hekou village

### 3.2 $f_{(3)}$ 断层及其活动特征

该断层主要发育于坝址东侧，由数条长度 1km 的小断层组成，在朱溪水库可研报告<sup>1</sup>中亦提及该断层，总体走向北西  $320^{\circ}$ — $340^{\circ}$ ，倾向北东，倾角  $40^{\circ}$  左右。在野外地质调查中，在沙头村东南 300m 左右的朱溪右岸见断层出露剖面（图 4），断层发育于灰褐色块状凝灰岩中。断层产状为  $NW50^{\circ}$  走向，倾向北东，倾角  $80^{\circ}$ 。断面光滑平整，呈闭合状。破碎带整体宽约 1m，以角砾岩为主，胶结成岩。在断层盘面可见明显的水平向擦痕及阶步，根据擦痕深浅方向及阶步坎的面向，判定该断层为右旋走滑断层。综合野外地质调查，判定该断层最新活动时代在前第四纪。



①凝灰岩；②断层破碎带

图 4 沙头村路边断层出露剖面

Fig. 4 Fault exposure at the roadside of Shatou village

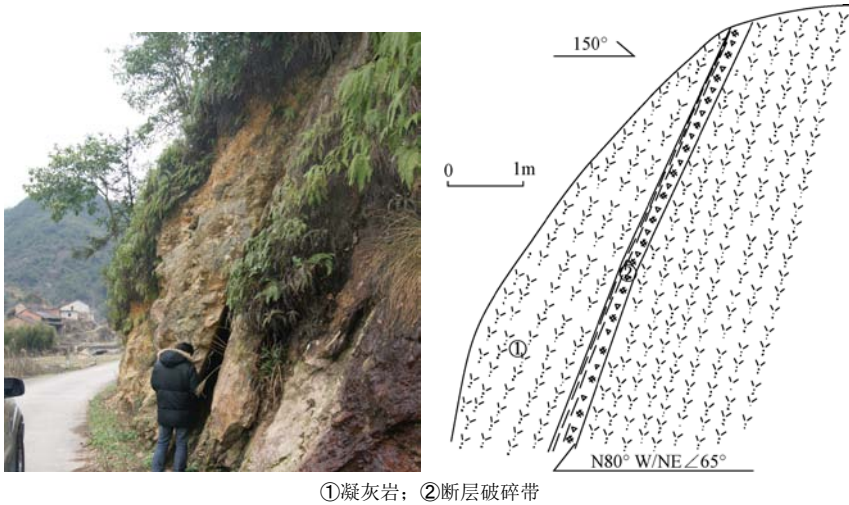
在上王周村村口亦见断层出露剖面，断层发育于灰褐色的侏罗纪块状凝灰岩中，断层北西  $25^{\circ}$  走向，倾向北东，倾角  $47^{\circ}$ ，断面波状起伏。破碎带宽约 50—80cm，以角砾岩和碎裂岩为主，呈青灰色。紧靠上盘面可见清晰片理及宽约 5—10cm 左右的青灰色断层泥。断层出露边坡覆盖有少量崩坡积物。断层岩性没有明显的地貌表现，综合判定该断层最新活动时代在前第四纪。

### 3.3 $f_{(5)}$ 断层及其活动特征

该断层走向北西  $330^{\circ}$ ，长 14km 左右。断面见于岭根村附近，断层发育于黄褐色至灰色的凝灰岩中。断层破碎带宽约 1.5m 左右，断层破碎带以棱角状构造角砾岩为主，紧靠下盘面处可见明显的挤压片理及青灰色断层泥。受风化侵蚀强烈，该断层破碎带内物质较为松散，且为强风化状态。该断层在地貌上并无明显地貌表现，综合判定该断层最新活动时代在晚更新世之前，推测为前第四纪。

在张郎村公路边（图 5），断层发育于黄褐色块状凝灰岩中，产状为： $N80^{\circ}W/NE \angle 65^{\circ}$ 。断层破碎带宽约 40—50cm，挤压片理发育。破碎带内以角砾岩、碎裂岩为主，呈黄褐色，紧靠下盘面可见少量的青灰色断层泥，胶结成岩。破碎带表层风化侵蚀强烈，呈砂土状。综合判定该断层最新活动时代为前第四纪。

1 浙江省水利水电勘测设计院，2009. 浙江省台州市朱溪水库可行性研究报告.



①凝灰岩；②断层破碎带

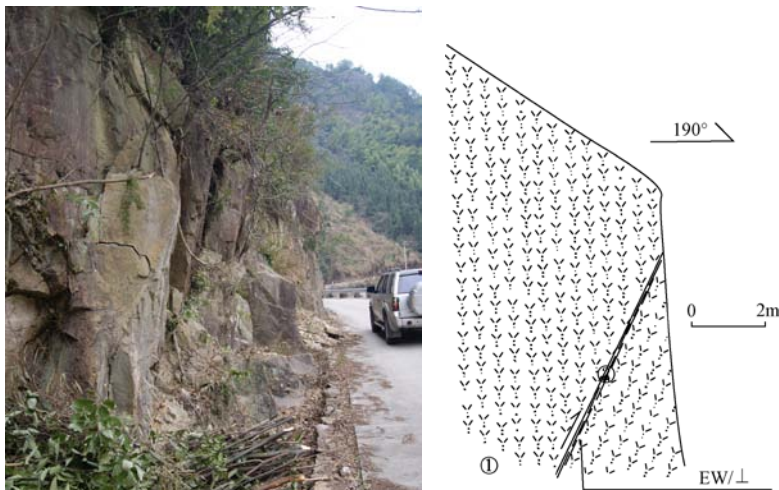
图 5 张郎村附近断层出露剖面

Fig. 5 Fault exposure at the roadside of Zhanglang village

### 3.4 f<sub>(7)</sub> 断层及其活动特征

该断层走向近东西向，断层在库区附近内延伸长为 7km 左右，自利坑口向东延伸经郑加山至后横岭。位于沙头村附近该断层地貌上形成垭口地貌，朱溪的两条小支流在沙头村及利坑口村段受断层影响，呈东西走向。受断层影响沙头村公路边岩体节理较为发育，影响带在 5—8m 左右，且节理微张，局部充填有胶结碎屑物。综合判定该断层最新活动时代在早第四纪。

在沙头村西南 500m 左右的公路边（图 6），断层发育于块状灰黄色、灰褐色的晶屑凝灰岩中。断层近东西走向，倾角近直立。破碎带紧仅 10cm 左右，挤压片理发育，夹有 3cm 左右的青灰色断层泥。破碎带内以碎粉岩为主，含较多植物根系，风化严重。综合判定最新活动时代在早第四纪。



①凝灰岩；②断层破碎带

图 6 沙头村附近断层出露剖面

Fig. 6 Fault exposure at the roadside of Shatou village

## 4 水库诱发地震预测与评价

水库诱发地震是指由于水库蓄水或水位变化而引发的地震。水库诱发地震危险性评价是水利水电工程安全性评价的重要组成部分,重点是在水库修建之前根据水库影响区的地震、地质条件,对水库诱发地震的可能性、可能发震库段和最大震级以及诱发地震的危害性进行评价。本文根据《水库诱发地震危险性评价(GB 21075-2007)》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2008),对朱溪水库诱发地震进行了预测评价。采用的方法分别是规范中提供的构造类比法(确定性评价方法)和概率评价法。

### 4.1 构造类比法评价朱溪水库诱发地震的可能性

浙江省及周围地区水利资源丰富,水库较多,也是水库诱发地震较多的地区。与其它省相比浙江省属少震区,历史地震强度和频度都较低,但水库诱发地震事件却相对比较多,在浙江省 100 多座大、中型水库中已发生水库诱发地震 5 例。表 3 列出了浙江省及邻省一些水库诱发地震的基本情况(林松建等,2007;丁原章,1989),同时也给出了邻省几座水库发生诱发地震的基本情况。

表 3 浙江省及邻省水库发生诱发地震的概况

Table 3 Summary of the reservoirs and induced earthquakes in Zhejiang province and its neighboring

水库名称	库容 (亿 m <sup>3</sup> )	坝高 (m)	库区主要岩性及 状态	水库地震区 主要构造	库水渗透 条件	蓄水时间/ (首震时间)	主震时间 及震级
乌溪江 水库	20.6	129	流纹斑岩,柱状 节理、裂隙发育	湖山盆地边缘,北东 向、北北西向断层	岩体渗透 条件较好	1979.1 (1979.6)	1979.10.7 M <sub>L</sub> 3.4
文成珊溪 水库	12.9	131.8	流纹斑岩,断 层交汇处岩体较 破碎	盆地边缘,北东、北 西断层交汇区	岩体渗透 条件较差	2000.5 (2002.7)	2002.9.5 M <sub>L</sub> 3.9 2006.2.9 M <sub>L</sub> 4.6
宁波皎口 水库	1.1	66	流纹斑岩,节 理、裂隙发育	盆地边缘断层,北东、 北西断层交汇处	岩体渗透 条件较好	1973.5 (1993.2)	1994.9.7 M <sub>L</sub> 4.7
嵊州丰潭 水库	0.1449	67	流纹斑岩,节理 发育,岩体破碎	盆地边缘断层	岩体渗透 条件较好	1992 投入使 用(1992.7)	1992.7.3 M <sub>L</sub> 3.4
宁波横溪 水库	0.33	30.7	熔结凝灰岩	盆地边缘断层		1978.7 建成 (1993.9)	1993.9.4、 2000.3.30 M <sub>L</sub> 2.4
福建水口 水库	26.0	101	火成岩,酸性 花岗岩,中性闪 长岩,库区有多 处温泉	北东、南北、东西向 断层交汇,断层较为活 动	断层交汇 区,岩体破 碎,渗透条 件较好	1993.3 (1993.5)	1996.4.21 M <sub>L</sub> 4.1 2008.3.6 M <sub>L</sub> 4.8
安徽佛子 岭水库 <sup>[5]</sup>	4.7	97	中浅变质岩, 库尾大理岩。	盆地边缘,北西西大断 层、北东-北东东破碎带	渗透条 件较 好	1954.6 (1954.12)	1973.3.11 M <sub>s</sub> 4.5
江西柘林 水库	20.6	130	灰岩,砂页岩	中、新生代盆地边缘, 东西向、北东向断层, 新构造运动明显	渗透条 件较 好,有温 泉分 布	1972.1 (1972.10)	1972.10. 24 M <sub>L</sub> 3.8

注:嵊州丰潭水库、宁波横溪水库资料来源:浙江省地震局,《浙江省地震目录》(内部),1999年。

由表 3 可见,这些发生诱发地震水库的共同之处是:水库位于断陷盆地边缘,库区断层

和破碎带发育, 地震多发生在盆地边缘的断层带上; 地震发生区域多为火成岩、流纹斑岩、花岗岩和灰岩分布, 岩体节理, 尤其是垂直节理发育, 或是几条断层交汇, 岩体破碎, 有较好的渗透条件。除横溪水库外, 其它水库坝高都在 60m 以上, 6 座大型水库库容都在 1 亿  $\text{m}^3$  以上。以上这些都是水库诱发地震的主要有利条件。

根据朱溪水库规模、构造、岩性、渗透性、地震活动等资料, 作者分析认为:

(1) 朱溪水库处于 V 型峡谷中, 坝高 73.5m, 总库容 1.257 亿  $\text{m}^3$ , 坝前水深 62m, 水库淹没面积 5.5 $\text{km}^2$ , 属于大型水库。

(2) 水库区和坝址区的构造主要是规模不大的断层, 均为早第四纪至前第四纪断层, 无晚第四纪活动断层分布, 构造比较稳定, 不具备发生中、强地震的构造背景。

通过水库区和坝址区的断层主要为北东向、北西向和东西向三组断层, 断层规模不大, 破碎带不宽, 且多为压性和压扭性, 少数为张性, 不易形成渗水通道。

(3) 水库区及周边前第四纪地层为中生界侏罗系上统火山岩、白垩系下统河湖相沉积岩和陆相火山碎屑岩。第四纪地层主要为上更新统坡洪积层、坡积层和全新统冲积层、洪积层以及残坡积层。岩浆岩为上侏罗世、下白垩世的潜火山岩和侵入岩, 主要分布有流纹斑岩、霏细斑岩和钾长花岗岩。水库区主要发育北西向、近东西向和北东向三组节理, 在分布上没有成带或密集发育的现象, 节理密度很小。除少数垂直于挤压构造的张节理外, 绝大部分均为压性和压扭性, 长度绝大多数在 10m 以下, 裂隙面呈闭合和微闭合状, 基本无填充, 闭合良好不易形成渗水通道。张节理仅发育在构造的表层, 延伸较短, 深部基岩为不透水层, 岩体渗透条件差。

(4) 库区构造应力场以近东西向的水平压应力, 近北南向的水平张应力为主。在这样的应力场作用下, 库区分布较多的北东向和北西向断层容易发生走滑错动, 东西向断层容易发生张性错动。

(5) 水库区及周围 50km 范围内, 最大地震为 1853 年临海 4 $^{1/2}$  地震, 距坝址 35km。1970 年以来, 区域地震台网仅记录到 3 次小地震, 最大为  $M_L$  2.4 级, 距坝址超过 40km。在水库影响区范围内没有历史地震记载, 也没有监测到现今地震。

(6) 水库区及周边未发现温泉活动。

将上述 6 点与表 3 列出的水库诱发地震的条件类比后认为, 除朱溪水库库容较大外, 朱溪水库诱发地震的其它条件不够充分, 水库建成蓄水后诱发地震的可能性较小。此外, 因为库段不具备发生  $M_{4.5}$  级以上的地震构造背景, 即使建成蓄水后发生水库诱发地震, 其震级也不会超过 4.5 级。

#### 4.2 概率法评价朱溪水库诱发地震的可能性

水库诱发地震可能性概率评价是一种水库诱发地震预测的定量方法, 它考虑了构造环境、应力场、库区岩性、水库参数等多种诱发地震的因素。

如果实验 E 的样本空间为  $\Omega$ , 互不相容事件  $M_1, M_2, \dots, M_n$  为  $\Omega$  的一个划分, 且满足  $P(M_i) > 0$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),  $P\left(\bigcup_{i=1}^n M_i\right) = 1$ , 则对于任一事件 A ( $P(A) > 0$ ), 贝叶斯公式为:

$$P(M_i/A_j) = \frac{P(M_i)P(A_j/M_i)}{\sum_{i=1}^n P(M_i)P(A_j/M_i)}, \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$



式中,  $P(M_i/A_j)$  为要预测的某震级水库诱发地震的概率;  $M_i$  为水库诱发地震事件的震级分档类别;  $A_j$  为水库发震库段各诱震因素及其相应状态, 即诱震因素组合条件;  $P(M_i)$  为不同震级类别的验前概率;  $P(A_j/M_i)$  为不同震级条件下不同诱震因素组合条件的验前概率。

Beacher 等 (1982) 根据世界上 234 座水库 (29 座发震水库和 205 座未发震水库) 的资料分析, 给出了影响水库地震发生的 5 个主要诱震因素: 库深  $H$ ; 库容  $V$ ; 应力场状态  $S$ ; 断层活动性  $F$ ; 库区岩性条件  $G$ 。将这 5 个因素各分成 3 种状态, 列于表 4。

表 4 水库诱发地震的因素与状态

Table 4 Factors and states of reservoir induced earthquakes

诱震因素	状态 1	状态 2	状态 3
库深 $H/m$	$H_1 > 150$	$H_2 > 92-150$	$H_3 < 92$
库容 $V/m$	$V_1 > 100 \times 10^8$	$V_2 > (12-100) \times 10^8$	$V_2 < 12 \times 10^8$
应力场状态 $S$	$S_1$ 逆断层环境	$S_2$ 正断层环境	$S_3$ 走滑断层环境
断层活动性 $F$	$F_1$ 活动	$F_2$ 不活动	
库区岩性条件 $G$	$G_1$ 沉积岩	$G_2$ 变质岩	$G_3$ 火成岩

根据计算中可用的水库资料多少并考虑样本数量和震级档划分, 将水库诱发地震震级划分为中震、小震和不发震三档, 即:  $6.9 > M_1 \geq 5$ 、 $M_2 < 5$  和  $M_3$  无震三档。它们的验前概率分别为:

$$P(M_1) = 0.04, \quad P(M_2) = 0.10, \quad P(M_3) = 0.86$$

假设上述各诱震因素  $A_j$  相互独立, 则有:

$$P(A_j/M_i) = P(H, V, S, F, G/M_i) \\ = P(H/M_i)P(V/M_i)P(S/M_i)P(F/M_i)P(G/M_i) \quad (i=1, 2, 3) \quad (2)$$

根据 238 座 (33 座发震和 205 未发震) 水库资料样本统计 (常宝琦, 1995), 得到对于不同状态下水库发生中震、小震和不发震三种事件的每种诱震因素的验前概率, 列于表 5。

表 5 对于三种状态不同震级条件下不同诱震因素的验前概率

Table 5 Pre-test probability under different three states with different induced factors and earthquake magnitudes

诱震因素	状态 1			状态 2			状态 3		
	$M_1 \geq 5$	$M_2 < 5$	$M_3$	$M_1 \geq 5$	$M_2 < 5$	$M_3$	$M_1 \geq 5$	$M_2 < 5$	$M_3$
库深 $H$	0.21	0.27	0.13	0.50	0.17	0.71	0.29	0.54	0.16
库容 $V$	0.29	0.12	0.25	0.57	0.35	0.18	0.14	0.53	0.57
应力场状态 $S$	0.10	0.11	0.17	0.40	0.59	0.68	0.50	0.30	0.15
断层活动性 $F$	1.00	1.00	0.67	0.00	0.00	0.33			
岩性条件 $G$	0.40	0.53	0.35	0.10	0.22	0.39	0.50	0.25	0.26

根据朱溪水库的情况, 库深 62m 归为状态 3, 库容 1.257 亿  $m^3$  归为状态 3, 应力场状态取逆断层环境归为状态 1, 断层活动状态取第四纪以来活动断层归为状态 1, 岩性取火成岩归为状态 3, 使用式 (2) 计算得到:

$$p(M_1/A_j) = 0.0250, \quad p(M_2/A_j) = 0.247, \quad p(M_3/A_j) = 0.728$$

即诱发中等地震的概率为 0.025, 诱发小震的概率为 0.247, 不诱发地震的概率为 0.728。

由上述计算结果分析, 几乎不存在诱发中等地震的可能性, 诱发小地震的可能性也较小。但是从安全考虑, 上述结果发震概率  $p(M_2/A)$  为 0.25, 略大于水库诱发地震的临界概率 (常宝琦, 1988) 的数值 0.2, 存在诱发小地震的可能性。

### 4.3 水库诱发地震的最大震级估计

如果水库建成蓄水后发生水库诱发地震, 其最大震级可用以下方法估计:

#### (1) 根据水库影响区范围内历史地震的最大震级估计

据已有的发震水库统计结果表明, 水库诱发地震的震级一般都不会超过当地最大构造地震的震级。朱溪水库区及水库影响区范围没有发现历史地震记载, 1970 年以来区域地震台网也没有记录到地震活动, 在坝址 50km 范围内最大地震为 1853 年 5 月 29 日临海  $4\frac{1}{2}$  级地震, 它距坝址 35km, 若将此视为当地最大构造地震, 则推测朱溪水库即使发生水库诱发地震, 最大震级不超过 4.5 级。

#### (2) 根据可能诱发地震的断层长度估计诱发地震的最大震级

根据统计研究, 库区发震断层的长度与诱发地震震级之间具有表 6 所示的关系 (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008)。

表 6 断层长度和水库诱发地震震级的统计关系

Table 6 Statistical relationship between fault length and magnitude of reservoir induced earthquake

序号	断层长度 (km)	可能诱发地震的震级范围 (M)
1	0—5	$M < 4.0$
2	5—10	$4.0 \leq M < 6.0$
3	10—20	$6.0 \leq M < 6.5$

通过朱溪水库区的断层规模较小, 特别是通过淹没区的规模在 5km 以下, 根据表 6 推测朱溪水库即使发生水库诱发地震, 最大震级为 4 级左右。

#### (3) 根据地震断层破裂长度估计诱发地震的最大震级

根据国内外 21 例水库诱发地震震级 (绝大部分为  $M3$  级以上) 与发震断层破裂长度的关系 (曾心传等, 1989), 统计得到断层长度与最大诱震震级之间的关系为:

$$M = 3.45 \log L + 1.76 \quad (3)$$

式中,  $L$  为断层破裂长度, 单位为 km。

在库区的东西向  $f_7$  断层, 自利坑口向东经郑加山至后横岭, 在库区延伸长为 7km 左右, 断层岩体节理较为发育, 影响带在 5—8m, 且节理微张, 局部充填有胶结碎屑物, 具备一定的渗水条件, 相对有利于诱发地震的发生。按地震破裂长度占断层长度的 17—38% 计算 (张文甫, 1999), 如果该断层发生地震则破裂长度最长为 2.7km, 根据上式计算得到水库诱发地震最大为 3.2 级。

## 5 结语

根据水库诱发地震条件类比, 朱溪水库区发生诱发地震的可能性较小, 根据水库诱发地

震概率评价, 朱溪水库存在较小的诱发小地震的可能性。综合考虑水库诱发地震确定性分析和概率评价结果, 从偏保守角度考虑认为, 朱溪水库蓄水后存在诱发小地震的可能性, 其震级最大为 4.5 级左右。在最大震级情况下, 最大可产生震中烈度为 VI 度的地震影响。

## 参考文献

- 常宝琦, 1995. 岩土力学·地震工程·水库地震(论文集). 广州: 华南理工大学出版社, 183—184, 271—274.
- 常宝琦, 1988. 关于水库诱发地震概率预测的临界概率  $P_c$ . 华南地震, **8** (4): 86—90.
- 丁原章, 1989. 水库诱发地震. 北京: 地震出版社.
- 国家质量技术监督局, 2001. 中国地震动参数区划图(GB 18306-2001). 北京: 中国标准出版社.
- 林松建, 黄昭, 连玉平等, 2007. 水口水库诱发地震特征与发震断层的探讨. 大地测量与地球动力学, **27** (1): 40—44.
- 杨清源, 胡毓良, 1996. 国内外水库诱发地震目录. 地震地质, **18** (4): 453—461.
- 张文甫, 1999. 水库地震诱震区预测与强度评估. 地震地磁观测与研究, **20** (2): 47—51.
- 曾心传, 高世钧, 1989. 水诱发地震应力场初步探讨. 华南地震, **9** (1): 73—85.
- 周本刚, 宋新初, 杨晓平等, 2008. 宁波育王山山前断层探测结果的工程应用问题. 地震地质, **30** (1): 209—217.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008. 水库诱发地震危险性评价(GB 21075-2007). 北京: 中国标准出版社.
- Baecher B.G., Keeney R.L., 1982. Statistical examination of reservoir induced seismicity. BSSA, **72** (2): 553—569.

# The Probability Analysis of Induced Earthquakes in Zhuxi Reservoir

Ma Zhijiang, Zhao Dong, Han Yongbin, Mao Changwei and Yao Lixun

(The Engineering Seismology Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China)

**Abstract** Zhuxi reservoir in Taizhou city was put into preparation for the construction in 2011. As a large-scale reservoir, the storage capacity of Zhuxi is 1.257 billion cubic meters with a dam height of 73.5 meters. Much attention has been paid to some potential problems thereafter, such as the probability of induced earthquakes and the possible maximal magnitude. Based on the regional tectonic background, main faults activity, the potential earthquake hazard and the seismo-geological conditions, we discuss the probability of the induced earthquake in Zhuxi Reservoir by using analogy analysis method of structures and the probabilistic prediction method. Our results will provide a scientific base for reservoir induced earthquake study in future after the reservoir is built up.

**Key words:** Zhuxi reservoir; Regional geologic structure background; Activity of main faults; Induced earthquake