

陈涛, 余刚群, 杨福平, 等. 横渡水库诱发地震危险性分析[J]. 华南地震, 2021, 41(2): 92–98. [CHEN Tao, YU Gangqun, YANG Fuping, et al. The Risk Analysis of Earthquakes Induced By Hengdu Reservoir in Zhejiang[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(2): 92–98]

横渡水库诱发地震危险性分析

陈 涛, 余刚群, 杨福平, 刘喜亮, 李 敏

(浙江省地震局, 杭州 310013)

摘要: 通过横渡水库所在区域地震构造背景、水库影响区及库区断裂活动性等方面的研究, 采用构造类比法对横渡水库诱发地震的可能性进行讨论和分析, 最终给出横渡水库诱发地震的可能性以及一旦诱发地震的最大震级, 为水库建成后, 可能出现的水库诱发地震问题提供科学依据。

关键词: 横渡水库; 断层活动性; 构造类比法; 概率法; 最大震级

中图分类号: P315.728 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2021)02-0092-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.02.13

The Risk Analysis of Earthquakes Induced By Hengdu Reservoir in Zhejiang

CHEN Tao, YU Gangqun, YANG Fuping, LIU Xiliang, LI Min

(Zhejiang Earthquake Agency, Hangzhou 310031, China)

Abstract: Based on the research on the seismic tectonic background, reservoir affected area and fault activity in the Hengdu Reservoir area, the possibility of earthquake induced by Hengdu Reservoir is discussed and analyzed by the structural analogy method and the probabilistic prediction method. Finally, the possibility of the earthquake induced by Hengdu Reservoir and the maximum magnitude of the earthquake once it is induced are given, which provides a scientific basis for the possible occurrence of the earthquake induced by the reservoir after the completion of the reservoir.

Keywords: Hengdu Reservoir; Faults activity; The structural analogy method; The probabilistic prediction method; Maximum magnitude

0 引言

浙江横渡水库位于白溪流域, 地属台州市三门县, 由上水库和下水库组成。上水库最大坝高43 m, 水库正常蓄水位88 m, 总库容2733万m³,

为中型水库。下水库最大坝高为11 m, 正常蓄水位108 m, 总库容155万m³, 为小型水库。水库诱发地震对水库工程设施因震级不同而产生破坏也不相同, 可引起严重的次生灾害。据统计, 至今国内外已记录到有百余座水库诱发地震的震例^[1]。

收稿日期: 2020-05-13

基金项目: 地震科技星火计划(XH19016); 地震科技星火计划青年项目(XH20023Y)联合资助

作者简介: 陈涛(1984-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事活动构造、工程地震、水库诱发地震等方面的研究。

E-mail: chentao0528@126.com

我国自建国以来已发生过 43 例水库诱发地震的事件,其中浙江 5 例。因此,开展水库诱发地震危险性分析工作十分必要^[2]。横渡水库诱发地震危险性分析,不仅可为当前工程设计提供科学依据,而且也可将来水库建成后,应对可能出现的水库诱发地震问题提供科学依据^[3]。

本文在对横渡水库所在区域地震构造背景、水库影响区及库区断裂活动性等方面的研究,通过构造类比法对横渡水库诱发地震的可能性进行了讨论和分析,认为横渡水库诱发地震的可能性较小,一旦诱发最大地震不超过 4 级。

1 地震构造背景

1.1 地质构造背景

横渡水库所在研究区位于浙东低山丘陵区,地势自西北、西南向东部倾斜。新构造运动以差异升降运动为主。研究区内出露地层单位简单,

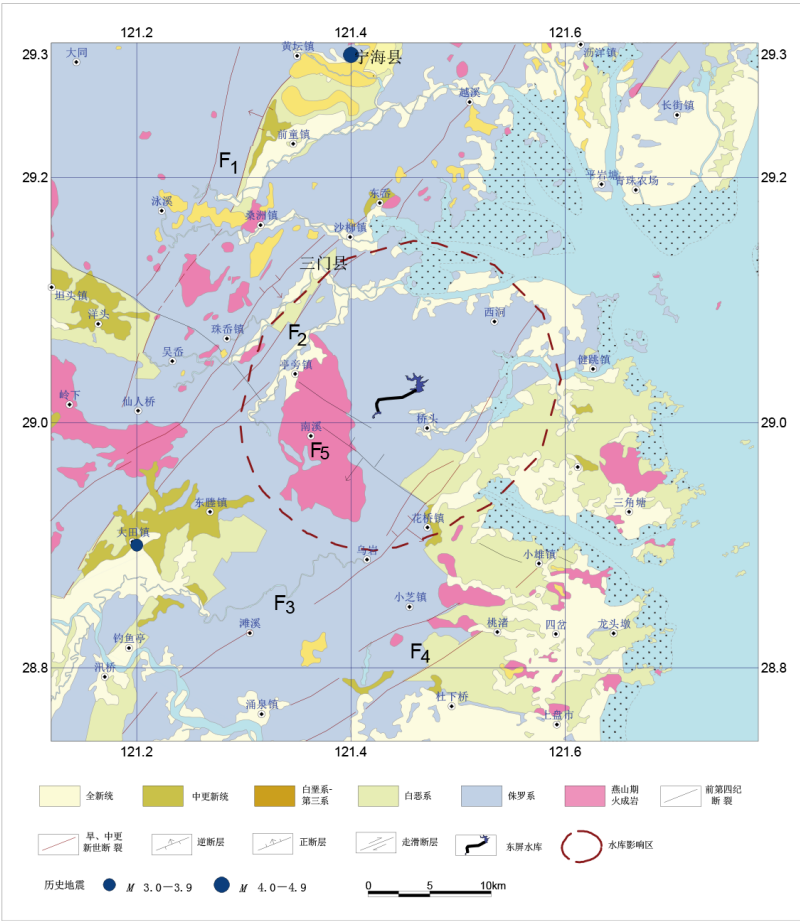
侏罗系地层分布最为广泛,白垩系地层在柠溪、昆阳等地出露。第四纪地层主要分布于平原及山边河流出口附近。此外燕山期火成岩广泛分布。

研究区内断裂构造发育,主要存在北东、北西向两组断裂。规模较大的断裂有北东走向的越溪—大田断裂(F_1)、岔路—珠岙断裂(F_2)、岱山—黄岩断裂(F_3)以及小雄—涌泉断裂(F_4),北西向的坦头—小雄断裂(F_5)(图 1)。这些断裂的活动特征见表 1。

1.2 地震活动背景

根据地震史料记载,研究区发生过 $3\frac{1}{2}$ 级和 4 级有感地震各 1 次。1970 年以来,华东区域地震台网未记录到研究区地震,也没有记录到水库影响区和水库区地震。可见,水库及周围区域地震活动较弱^[4]。

表 2 给出研究区历史地震目录,研究区地震震中分布见图 1。



F_1 越溪—大田断裂; F_2 岔路—珠岙断裂; F_3 岱山—黄岩断裂; F_4 小雄—涌泉断裂; F_5 坦头—小雄断裂

图 1 研究区地震构造图

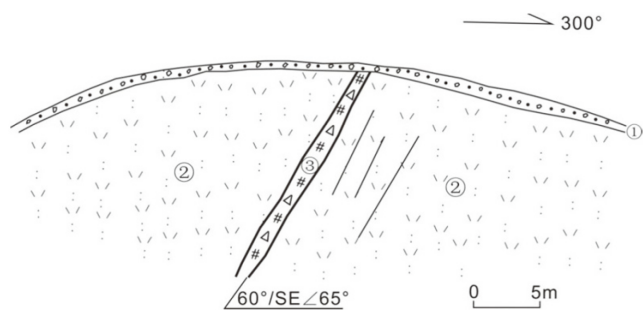
Fig.1 The seismotectonic map of the study area

2.1 越溪一大田断裂(F_2)

越溪一大田断裂在水库影响区内总体走向北东,分为两支,分别沿三门县南侧和北侧展布,北支主要展布在侏罗系内,长约7 km,南支在三门县附近构成侏罗系和白垩系的边界,全长约13 km。断裂距离上水库最近距离约13 km。

在三门县亭旁镇石头岙村西隧道口见断裂剖面(图3),断裂发育在青灰色侏罗系凝灰岩中,产状为 $60^\circ/\text{SE}\angle 65^\circ$,断层两侧岩体较为完整,右侧岩体靠近断层部位发育一组与断裂产状大体一致的节理密集带,断层破碎带宽约50 cm,主要以断层角砾岩为主,未见断层泥发育,断层上覆第四系残坡积物也为受到断层活动的影响。在地貌上也未见与断层活动相关的微地貌表现。

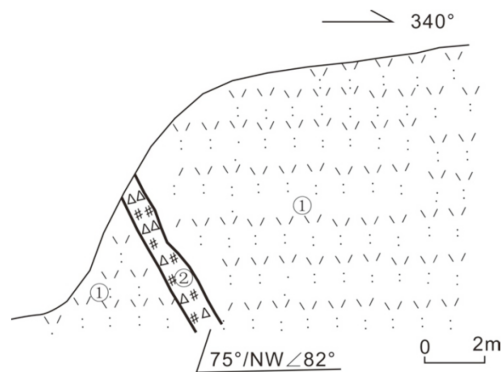
在三门县城南省道S74公路旁见该断裂剖面(图4),断裂发育在侏罗系凝灰岩中,产状为 $75^\circ/\text{NW}\angle 82^\circ$,断层破碎带宽约1 m,主要以灰绿色断



①表层残坡积物;②侏罗系凝灰岩;③断层破碎带

图3 三门县石头岙村西隧道口断裂剖面

Fig.3 Fracture section at the entrance of the west tunnel in Shitou'ao Village, Sanmen County



①侏罗系凝灰岩②断层破碎带

图4 三门县城南省道s74公路边采石场

Fig.4 The quarry beside the provincial highway s74 in the south of Sanmen County

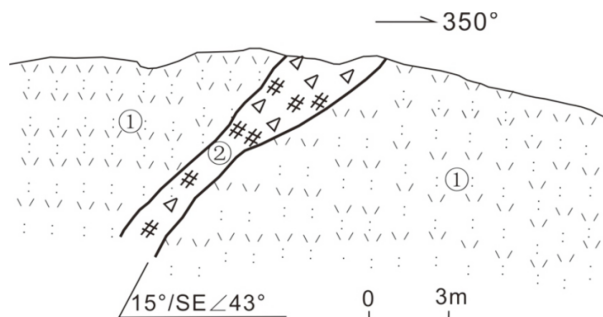
层角砾岩、碎裂岩为主,未见断层泥发育,地貌上也未见与断层活动相关的地貌现象,综合地质地貌等因素,认为该断层的最新活动时代为早第四纪。

水库影响区内的越溪一大田断裂具有一定规模,断层破碎带宽50~100 cm不等,主要以断层角砾岩、碎裂岩为主,未见断层泥发育,地貌上也没有明显的线性地貌,综合地质地貌、断层物质及近场研究成果,认为该断裂的最新活动时代为早第四纪。

2.2 岱山—黄岩断裂(F_3)

岱山—黄岩断裂在水库影响区内总体走向北东,北起六敖镇西,经尖坑山、罗城坑、托岙、桥头,到达花桥镇西南,全长约25 km。该断裂距离水库的最近距离约为4 km。

在三门县健跳镇罗城坑村西北水库旁将断裂剖面(图5),断裂发育在青灰色侏罗系凝灰岩中,产状为 $15^\circ/\text{SE}\angle 43^\circ$,断层两侧基岩表面风化强烈。断层破碎带上宽下窄,上部宽约4 m,下部宽约3 m,主要以灰绿色、青灰色碎裂岩为主,未见断层泥发育。地貌上也未见与断层相关的地貌显示。

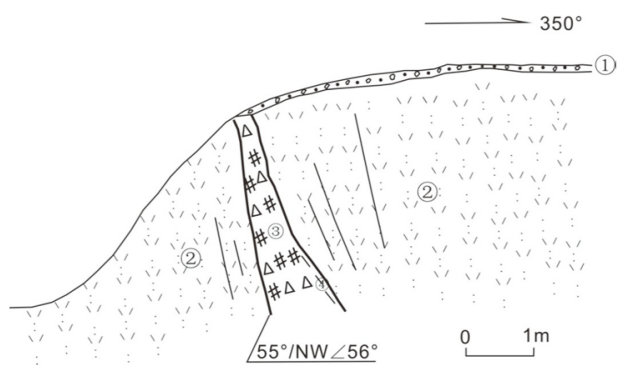


① 侏罗系凝灰岩;②断层破碎带

图5 三门县健跳镇罗城西北水库旁断裂剖面

Fig.5 Fracture section near Luo Cheng Northwest Reservoir in Jiantiao Town, Sanmen County

在三门县花桥镇长山头村北公路旁见断裂剖面(图6),断裂发育在青灰色侏罗系凝灰岩中,产状为 $55^\circ/\text{NW}\angle 56^\circ$,断层两侧基岩较为破碎,发育与断层产状大体一致的一组节理密集带。断层破碎带上窄下宽,下部最宽处约1 m,断层带内以碎裂岩为主,在底部右侧断面上有少量灰绿色断层泥发育,已胶结。地貌上未见与断层活动相关的地貌现象。综合地质地貌等,认为该断层的最新活动时代为早第四纪。



① 表层残坡积物;②侏罗系凝灰岩;③断层破碎带;

图 6 三门县花桥镇长山头村北公路旁断裂剖面

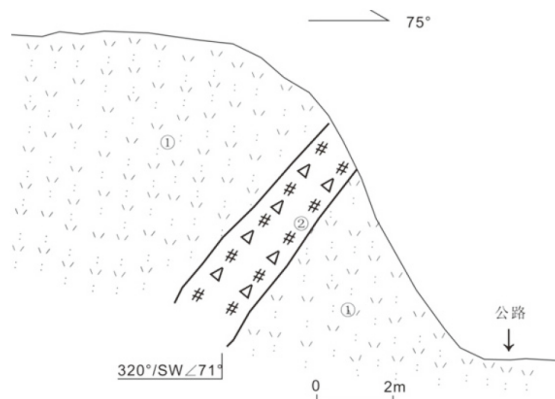
Fig.6 Fracture section beside the north road of Changshantou Village, Huaqiao Town, Sanmen County

水库影响区内的岱山—黄岩断裂规模较大,断层破碎带宽 1~4 m 不等,断层破碎带内主要以角砾岩、碎裂岩为主,局部见少量断层泥发育,已胶结,地貌上未见与断层活动的微地貌表现。综合地质地貌、断层物质等,认为该断裂的最新活动时代为早第四纪。

2.3 坦头—小雄断裂(F5)

坦头—小雄断裂在水库影响区内,西北起自亭旁镇西北,经亭旁、南溪,到达花桥镇北,全长约 19 km。该断层距离水库最近约 1 km。

在三门县亭旁镇葫芦田村北公路边见断裂剖面(图 7),断裂发育在灰褐色侏罗系凝灰岩中,产状为 $320^{\circ}/\text{SW} \angle 71^{\circ}$,断裂两侧基岩均较为完整,断层破碎带宽约 2 m,以灰白色断层角砾岩为主,未见断层泥发育,地貌上也未见与断层相关的微地貌显示。

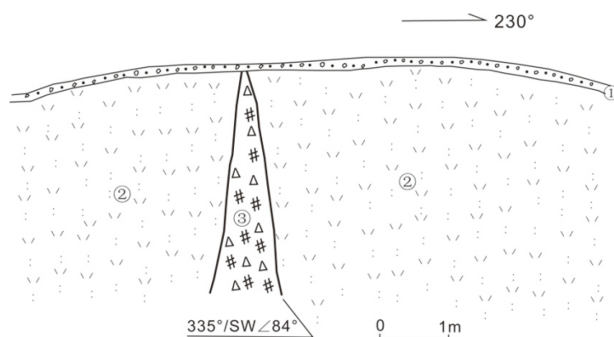


① 侏罗系凝灰岩;②断层破碎带

图 7 三门县亭旁镇葫芦田村北公路边见断裂剖面

Fig.7 Fracture section along the road in the north of Hulutian Village, Tingbang Town, Sanmen County

在临海县花桥镇银山村北公路旁见断裂剖面(图 8),断裂发育在侏罗系凝灰岩中,产状为 $335^{\circ}/\text{SW} \angle 84^{\circ}$,断裂两侧基岩较为完整,断层破碎带上宽下窄,底部最宽约 1.5 m,顶部逐渐尖灭,主要以断层角砾岩为主,未见断层泥发育,上覆第四系残坡积物也为受到断层活动的影响。综合地质地貌、断层物质等认为,断层的最新活动时代为前第四纪。



① 第四系残坡积物;②侏罗系凝灰岩;③断层破碎带

图 8 临海县花桥镇银山村北公路旁断裂剖面

Fig.8 The fracture section beside the north road of Yinshan Village, Huaqiao Town, Linhai County

水库影响区内的坦头—小雄断裂具有一定的规模,断层破碎带宽 1.5~2 m 不等,主要以断层角砾岩为主,未见断层泥发育,上覆第四系残坡积物也未受到断层活动的影像,地貌上也未见与断层相关的微地貌表现。综合地质地貌、断层物质等因素,认为该断层的最新活动时代为前第四纪。

2.4 f_1 — f_3 断裂

库区共存在 3 条小规模断裂,分别命名为 f_1 ~ f_3 (图 2),野外地质调查的结果显示断裂主要以北东向高倾角压扭性断层为主,近东西向张性断层次之,断层规模均较小,延伸不长,库区主要断层详见表 3

3 水库诱发地震评价

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,在全省 100 多座大、中型水库中已发生水库诱发地震 5 例(其中皎口水库和横溪水库地震属构造型水库地震)。表 3 列出浙江省几座水库诱发地震的基本情况,同时

也给出了邻省几座水库发生诱发地震的基本情况。

由表 4 可见, 这些诱发地震的水库在构造上存在共同之处:

(1)水库位于断陷盆地边缘, 地震多发生在盆地边缘断层带上或是几条断层交汇处, 这些地方断层带和破碎带发育, 岩体破碎, 有较好的渗透条件;

(2)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, 渗透性强;

(3)除横溪水库外, 其它水库坝高都在 66 m 以上, 六座大型水库的库容都在 1 亿 m³ 以上, 即水库诱发地震大多发生在高坝大库容的水库。以

上这些都是浙江省及邻近地区水库有利于发生诱发地震的主要条件, 即具备这些条件的水库发生诱发地震的可能性大些。

根据上水库和下水库的规模、构造、岩性、渗透性、应力场和地震活动性等资料分析认为:

(1)上水库大坝处于 U 型峡谷中, 坝高 43 m, 总库容 2733 万 m³, 水库规模不大, 属于中型、中坝水库。下水库处于 V 型峡谷中, 坝高 31 m, 总库容 171 万 m³, 水库规模小, 属于小型、中坝水库。据统计, 在国内外发生水库诱发地震的 132 例水库中, 中、小型水库只占 20%, 诱发水库地震的比例不高。

表 3 库区主要断层活动特征

Table 3 Activity characteristics of main faults in the reservoir area

名称	产状	长度/km	性质	最新活动时代	距离库区最近距离/km
f1	60°~70°/NW ∠ 60°	3.3	逆断	AnQ	上水库西北侧通过
f2	80°/NE ∠ 70°	4.5	正断	AnQ	上水库南侧穿越
f3	300°/N ∠ 50°~60°	60	正断	AnQ	沿下水库西北侧延伸穿越

表 4 浙江省及邻省发生水库诱发地震的基本情况

Table 4 Summary of reservoir-induced earthquakes in Zhejiang and its neighboring provinces

水库名称	库容/ (亿 m ³)	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、震级、震 源深度
浙江省乌溪 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	1979-01 1979-06	1979-10-07 M _L 3.4 3.5 km
浙江省文成 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	2000-05 2002-07	2002-09-05 M _L 3.9 7 km 2006-02-09 M _L 4.6 6 km
浙江省宁波 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	1973-05 1993-02	1994-09-07 M _L 4.7 15 km
浙江省嵊州 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	1992-05 1992-07	1992-07-03 M _L 3.4 深度很浅
浙江省宁波 横溪水库	0.39	30.7	熔结凝灰岩	盆地边缘断层		1978-07 1993-09	1993-09-04 M _L 2.4 2000-03-30 M _L 2.4
福建省水口 水库	26.0	101	火成岩,酸性花岗 岩,中性闪长岩	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	1993-03 1993-05	1996-04-21 M _L 4.17 km 2008-03-06 M _L 4.8 4 km
安徽省佛子 岭水库	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	1954-06 1954-12	1973-03-11 M _s 4.9 深度很浅
江西省柘林 水库	20.6	130	灰岩,砂页岩	中、新生代盆地边缘,东西 向、北东向、北北西向断层 交错,新构造运动明显	岩体破碎,岩溶 发育渗透条件较 好,有温泉分布	1972-01 1972-10	1972-10-14 M _L 3.8 3~6 km

(2)水库影响区有岱山—黄岩断裂和镇海—宁海断裂以及规模较小坦头—小雄断裂通过。下水库区有 1 条断层通过,上水库有 1 条断层通过库尾,1 条断层接近坝址区,断层长度最长为 4.5 km。这些断裂均呈逆断层性质,断层两侧岩体大多比较完整,岩体较坚硬,断层物质胶结较好,库水不易沿断层向外渗漏。水库影响区断裂最新活动年代为早第四纪至前第四纪。

(3)水库区地层和岩性。地层有侏罗系上统(J_3)、白垩系下统(K_1)、第四系上更新统(Q_3)及全新统(Q_4)。岩石主要为晶屑玻屑熔结凝灰岩,岩石完整性较好,岩体节理裂隙不发育~较发育,岩石坚硬,抗风化能力强,隔水性能良好,库水不易渗透。

(4)水库区及周边未发现溶洞,没有发现温泉活动,也没有发现地热异常区。

(5)水库区和影响区均未记载到地震活动,地震活动很弱。

将上述 5 条与表 4 诱发地震水库的条件类比后认为,上水库具备诱发地震的条件不够充分,水库建成蓄水后诱发地震的可能性较小。

3.3 水库诱发地震最大震级估计

由水库诱发地震确定性评价结果,上水库诱发地震的可能性较小。水库存在 3 条小断层,多为逆断层,不利于库水渗透,且库区未发生过地震,发生诱发地震的可能性较小。但从地震安全性考虑,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几种方法估计:

(1)根据水库影响区范围内历史地震的最大震级估计。据世界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。横渡水库区及水库影响区范围内没有地震记载。因此诱发水库的地震可能性较小。

(2)根据断层破裂长度与震级的统计关系估计诱发地震的最大震级。曾心传和高士钧根据国内外 21 例水库地震震级(绝大部分为 3 级以上)与发

震断层破裂长度的关系统计得到断层长度与最大诱发地震震级之间的关系为^[5-6]

$$M=3.45\lg L+1.76 \quad (1)$$

式(1)中 L 为断层破裂长度,单位为 km。

从水库区地质构造图(图 2)可见,水库区最长的断层是位于上水库库首的北西西向断层 f_2 ,其长度约 4.5 km,其它断层较短或未穿过水库区,这里可以选择断层 f_2 的长度估计诱发地震的最大震级。按一次地震的破裂长度占断层长度的 17~38%计,则预期的地震破裂长度最长为 1.6 km,代入上式,可发生 2.6 级地震。

综合上述方法,如果横渡水库蓄水后发生水库诱发地震,其最大震级为 4 级左右。

4 结论

(1)水库影响区及库区存在的主要断裂有越溪—大田断裂、岱山—黄岩断裂、坦头—小雄断裂以及一些规模较小的断裂,这些断裂均为晚更新世以来不活动断裂。

(2)根据水库诱发地震评价的结果,认为横渡水库蓄水后诱发地震的可能性较小,一旦诱发地震,其最大震级不超过 4 级。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

- [1] 杨清源,胡毓良. 国内外水库诱发地震目录[J]. 地震地质,1996,18(4):453-461
- [2] 常宝琦. 关于水库诱发地震概率预测的临界概率[J]. 华南地震,1988,8(4):86-90.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 21075-2007 水库诱发地震危险性评价[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [4] 顾功叙. 中国地震目录 [M]. 北京:科学出版社,1983.
- [5] 曾心传,高世钧. 水诱发地震应力场初步探讨[J]. 华南地震,1989,9(1):73-85,
- [6] 林松建,黄昭,连玉平,等. 水口水库诱发地震特征与发震断层的探讨[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(1):40-44.