

· 水库地震专栏 ·

广东省汤溪水库大坝抗震稳定性分析

常宝琦 杨廉法

(广东省地震局, 广州 510070)

提 要 汤溪水库始建于 1959 年, 当时未对地震设防。为响应“国际减灾十年”号召, 有关部门要求对该水库大坝的抗震能力进行复核。

在研究区的地震地质、地震活动性以及深部地球物理场等资料的基础上, 划分出四个潜在震源区, 并用概率地震危险性分析方法, 给出复核大坝抗震能力的两个等级的地震动: 取地震复发周期 475 年 (相当于地震基本烈度) 的峰加速度 142.2cm/s^2 , 复发周期 2474 年 (相当于“罕遇烈度”) 的峰加速度 229.6cm/s^2 。

在上述地震动下, 利用三种方法对大坝抗震能力进行复核: 1. 水工建筑物抗震设计规范 SDJ10-78 的拟静力法; 2. 有限元整体永久变形分析法; 3. 有限滑动永久变形分析法。根据上述三种方法的复核结果, 主坝可以抗御地震基本烈度的作用, 在罕遇烈度下, 几种方法的结果稍有不同, 拟静力法的最小安全系数 $K=1.08$, 稍小规范规定的 1.1; 整体永久变形算出的最大水平永久变形 10.8cm, 估计坝顶和坝坡会出现规模不大条数不多的纵、横向裂缝, 因此是可以接受的; 有限滑动分析的几种类似的方法给出的结果差别较大, 尤其是 Romo 法, 得出水平和垂直最大永久变形分别为 66cm 和 21cm。综合来看, 在罕遇烈度下, 主坝的抗震能力处于临界状态。副坝抗震能力高, 在罕遇烈度下也是令人放心的。

关键词 水库地震 汤溪水库 大坝抗震 稳定性分析 拟静力分析 整体永久变形分析 滑动体变形分析

1 地震动强度评定

汤溪水库建于黄岗河上, 大坝由主、副坝组成, 坝料为含砾石粘土, 坝型为均质坝, 主、副坝高分别为 43 m 和 35 m (图 1), 设计库容 $2.86 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

复核大坝抗震能力首先需要评定大坝可能遭遇的地震动强度。目前, 评定场址的地震动强度多采用概率地震危险性分析方法。

1.1 确定研究区的潜在震源及其地震活动性参数

1.1.1 确定研究区的潜在震源。研究区一般是指以场址为中心 200—250 km 为半径的区域, 潜在震源是指研究区内可能发生超过背景震级 (一般为 4 级) 的震源区。确定潜在震源区一般需根据地震地质、地震活动性等资料来划定。在本研究区最后划分出 4 个潜在震源区 (表 1)。

① 本文收稿日期: 1992-06-07

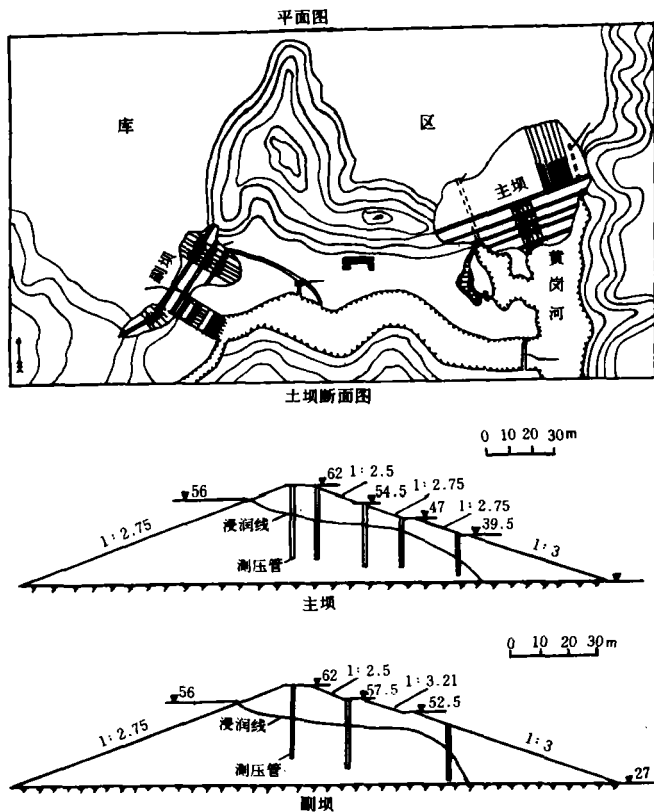


图 1 汤溪水库区平面图和土坝断面图

Fig. 1 Plan of Tangxi Reservoir area and the sections of the dams

表 1 潜在震源区及其地震活动性参数

Tab. 1 Potential seismic source region and its seismic activity Parameters

潜在震源	地震活动性参数		
	b	ν	M_u
饶平	1.1999	0.0329	7.0
南澎	1.0233	0.0507	7.5
潮汕	1.1999	0.0329	7.0
漳厦	1.1999	0.0453	7.0

1.1.2 潜在震源的地震活动性参数。参与概率地震危险性分析计算的地震活动性参数包括：表示大小地震比例的 b 值、背景震级 M_0 以上震级的年发生率 ν 和震级上限 M_u 。根据资料统计，上述 4 个潜在震源区的地震活动性参数见表 1。

1.2 地震动参数衰减规律

除划分潜在震源区及确定其地震活动性参数外，地震动强度衰减规律是概率地震危险性分析计算的另一重要参数。由于我们用峰值加

速度表示地震动强度，故需要峰值加速度随距离的衰减规律。由于本研究区缺乏加速度衰减资料，只能利用既有烈度分布资料又有加速度衰减资料的参考地区（利用美国西部地区）的资料，经本地区的烈度衰减资料对比修正，获得适用于本地区的峰加速度衰减规律。最后得本地区峰加速度衰减规律为

$$\ln a = 6.587 + 0.495M - 1.149 \ln(R + 25) \quad (1)$$

$$\sigma_{\ln a} = 0.323$$

式中, a 、 M 和 R 分别为峰加速度、震级和衰减距离; $\sigma_{\ln a}$ 为 $\ln a$ 的统计标准差。

1.3 汤溪水库坝址地震危险性分析结果

根据地震危险性分析结果, 汤溪水库坝址的峰加速度超越概率分布见表 2。

表 2 汤溪水库坝基峰加速度超越概率分布

.. Tab. 2 Distribution of peak acceleration exceeding probability at the dam site of Tangxi Reservoir

超越概率 P	0.9	0.632	0.5	0.3	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01
a (cm/s ²)	36.9	38.1	69.4	92.4	110.7	142.2	177.2	229.6	274.6
复发周期 (年)	21	50	72	97	224	474	974	2474	4974

一般以 474 年和 2474 年复发周期确定地震基本烈度和罕遇烈度, 故汤溪水库复核大坝抗震能力的两级峰加速度取为 142.2 和 229.6 cm/s²。

2 汤溪水库土坝抗震能力复核

目前国际上通用拟静力分析和永久变形分析两类方法复核土坝抗震能力。

2.1 拟静力法

拟静力法^[1]是把地震对大坝作用用一个当量静力表示。抗震稳定系数表为:

$$K = \frac{\sum \{c \cdot b \cdot \sec \psi + [(W_1 + W_2 \pm Q')] \cos \psi - Q \sin \psi - (u_w - r_0 Z) b \sec \psi\} \tan \phi}{\sum [(W_1 + W_2 \pm Q') \sin \psi + (Mc/r)]} \quad (2)$$

式中, r 为圆弧半径; b 为滑动体条块宽度, ψ 为条块底面中点切线与水平线夹角; Z 为坝坡外水位高出条块底面中点的距离; r_0 为水的容重; u_w 为稳定渗流在条块底面中点产生的孔隙压力 (汤溪水库有多年测压管资料, 由其确定); W_1 、 W_2 分别为条块在浸润线以上部分的实重和浸润线以下部分的浮重; Q 为作用于条块重心处的水平地震惯性力, 即条块实重乘其重心处的 $K_M C_z a_i$ (在这里, K_M 取 0.145 和 0.234, a_i 按规范, C_z 取 $\frac{1}{4}$); $Q' = Q/3$; Mc 为 Q 对园心的力矩; C 、 ϕ 为土的强度参数。根据规范规定, 在考虑地震作用时要验算正常高水位和“死水位”, 最小安全系数为 1.1 (1、2 级档水建筑物)。汤溪水库土坝的验算条件和结果见表 3 和表 4。

表 3 汤溪水库土坝抗震验算条件

Tab. 3 Conditions for seismic resistance of the dam of Tangxi Reservoir

坝 Ⅱ 别	坝 高 (m)	坝 顶 宽 (m)	坝 底 宽 (m)	坡 率	强 度 参 数			单 位 体 重 (tf/m ³)		坝 外 水 深 (m)		浸 润 线 表 达 式 ¹⁾	
					ψ	C (tf/m ²)	r 湿	r 饱	r 浮	正 常 高 水 位	死 水 位	正 常 高 水 位	死 水 位
主 坝	43	10	246.5	2.75	24.5	12.2	1.89	1.93	0.93	36.96	15.56	$\sqrt{2048.4-9.96x}$	$\sqrt{1140.43-5.58x}$
				3.0						3	3		
副 坝	35	10	217.6	2.75	24.5	12.2	1.89	1.93	0.93	28.96	7.56	$\sqrt{1608.96-10.2x}$	$\sqrt{450.79-3.18x}$
				3.18						3	3		

1)表中 x 为从上游坝脚下向下游的距离, $h(x)$ 为从坝基向上的高度(根据该水库多年观测结果统计)

关于最小安全系数的失效概率分析。据表 4, 汤溪水库主、副坝的最小安全系数都受下游坡控制。在基本烈度 ($a=1.42.2 \text{ cm/s}^2$) 和罕遇烈度 ($a=229.6 \text{ cm/s}^2$) 作用下主坝的最小安全系数分别为 1.140 和 1.084; 副坝为 1.286 和 1.224, 都大于或接近于 1.1, 因此根据拟静力法, 汤溪水库主坝的抗震能力超过 7 度接近 8 度, 副坝可达 8 度。但是, 由于计算参数都存在随机偏差, 特别是峰加速度的统计偏差较大 (见式 1), 因此需要考虑安全系数的失效概率。

在对数正态分布假设下, 失概率可表为:

$$P=1-\psi\left\{\ln \left[\bar{K} \frac{\sqrt{1+V_d^2}}{\sqrt{1+V_s^2}}\right] / \sqrt{\ln \left[(1+V_d^2)(1+V_s^2)\right]}\right\} \quad (3)$$

式中, \bar{K} 为用各参数标准计算出的实际安全系数 (表 4 中括号内数值), V_d 和 V_s 为式 (2) 中分母项和分子项的变异系数, 分别确定为 $V_d^2=0.111$ 和 $V_s^2=0.131$, $\psi\{\}$ 为正态累积函数。最后算得主、副坝安全系数最小的下游坡的失效概率列于表 4 最后一列。不难看出主坝和副坝的安全系数的失效概率分别约为 23—25% 和 18—20%, 显然是比较高的, 因此对汤溪水库大坝, 尤其是主坝下游坡的安全性不能掉以轻心。

表 4 汤溪水各抗震验算结果 (最小安全系数)

Tab. 4 Results of seismic resistance of the dam of Tangxi Reservoir (minimum safety factor)

坝别	峰值加速度 (cm/s^2)	上 游 坡		下 游 坡	失效 概率
		正常高水位	死水位	正常高水位	
主坝	142.2	1.285 (1.565)	1.225 (1.511)	1.140 (1.432)	0.23
	229.6	1.219 (1.505)	1.162 (1.453)	1.084 (1.380)	0.25
副坝	142.2	1.437 (1.700)	1.312 (1.643)	1.286 (1.575)	0.18
	229.6	1.365 (1.637)	1.304 (1.582)	1.224 (1.510)	0.20

(内数字为实际安全系数^[4] (由于规范忽略条块间作用力导致安全系数偏低))

2.2 永久变形分析

拟静力法是建立在刚塑体的圆弧滑动和地震作用视为当量静力的假设。尽管用式 (2) 设计的土坝没有出现大的失误, 但其假设与土坝实际震害不尽相符, 因此有人认为它“不能完全判断土坝遭受地震的稳定性, 是一种经验估计”^[5], “只是从工程经验与常识上对安全度的一种解释, 不完全反映结构真实的安全度”^[6]。土坝 (尤其是均质土坝) 的实际震害往往是以变形为主, 即在地震时大坝发生沉陷和坝坡侧胀, 出现纵横向裂缝, 因此才提出用地震诱生的永久变形来评价土坝的抗震能力。

近 20 年来, 土坝地震永久变形分析已提出两类方法, 第一类为 Newmark 及后继者发展的滑动体有限位移分析; 第二类是把坝体视为连续介质的整体永久变形分析。下面结合汤溪水库把这两类方法加以简介。首先介绍整体永久变形分析方法。

2.2.1 汤溪水库主坝整体地震永久变形分析

把坝体视为弹塑性连续介质的整体永久变形分析的基本思路从土的静、动力作用下的

本构关系出发的,即从实验出发,在附加动力(地震)作用下,土的模量降低了,因此地震永久变形是静力和动力变形之差,本法的框图见图2。

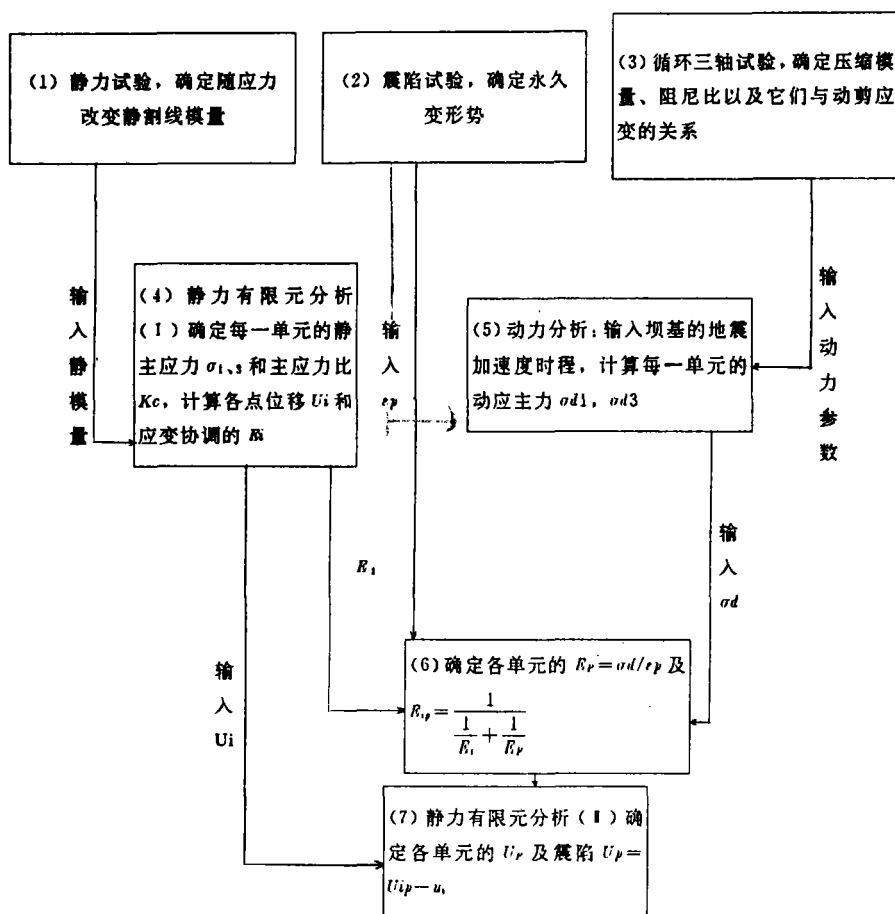


图2 整体地震永久变形计算框图

Fig. 2 Block diagram of calculation of overall seismic permanent deformation

在计算汤溪水库主坝整体永久变形时共划分 285 个等参数四边形单元,共 320 个节点。图中有关参数不加详述;坝基地震加速度时程,根据三角级数形成人工合成地震波,作为求解动力方程的地震输入。

主坝的整体永久变形结果见图3(表5只给出坝顶和上下游坝坡各节点的永久变形。)从表5可知,在 $a=142.2$ 和 229.6 cm/s^2 作用下坝顶震陷最大值为 2.7 和 3.3 cm;上游坝坡最大水平永久变形分别为 2.7 和 3.3 cm;下游坡最大水平永久变形分别为 3.2 和 10.8 cm。坝体允许的最大震陷与水平永久变形目前虽无定说,一般认为震陷容许值应小于坝的预留超高,最大水平永久变形控制在 40—60 cm,一般不会产生严重震害。因此从汤溪水库主坝的永久变形计算结果,该坝抗御 7、8 度地震的能力是足够的。

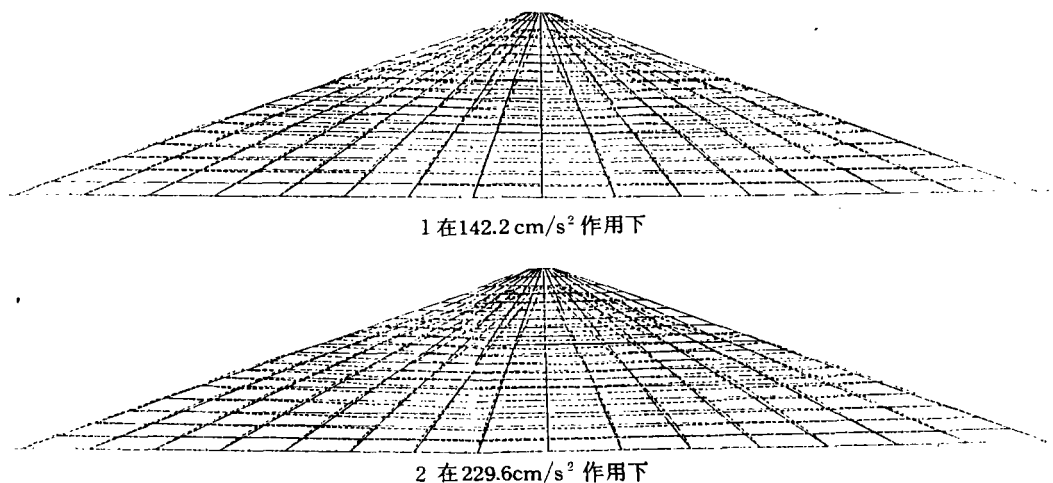


图3 汤溪水库主坝整体地震永久变形有限元分析结果

Fig. 3 Result of finite element analysis of bulk seismic permanent deformation

2.2.2 滑动体有限位移分析^[8]

前已述及, 计算坝体地震永久变形的另一类方法是滑动体有限位移方法。此法从 1965 年 Newmark 提出以后, 经改进已有多种简化方法问世。不过, 与实际震害相比, 都有不小的差异, 多数都是计算值小于实际值, 这里不详细介绍, 只介绍和应用于汤溪水库的 Romo 和 Resendiz 方法简称 RR 方法。

从坝顶向下算起的高度为 y 处的永久形 u 为

$$u/u_{\max} = \frac{1 - \cos [2\pi (y/H)^{1.45}]}{5.5 (y/H)^{2.2}} \quad (4)$$

式中, H 为坝高, u_{\max} 为某高度处出现的最大水平永久变形

$$u_{\max}/H = \frac{1}{93 (F-1)} - \frac{1}{535 (F-1)^2} \quad (5)$$

式中, F 为实际最小安全系数值 (对于汤溪水库见表 4 括号内的数字)。

坝顶震陷 (超高损失) L 为

$$\frac{L}{H^2} = \frac{L}{B+b} \left[\left(\frac{u_{\max}}{H} \right)_{\text{上游}} + \left(\frac{u_{\max}}{H} \right)_{\text{下游}} \right] \quad (6)$$

式中, B 、 b 分别为坝底和坝顶宽。把表 4 中的 F 值代入, 计算结果见表 6

表 6 汤溪水库永久变形 RR 法计算结果

Tab. 6 Results of calculation of permanent deformation for Tangxi Reservoir by RR method

坝 别	坡别	u_{max} (cm)		L (cm)	
		$a=142.2$	$a=229.6$	$a=142.2$	$a=229.6$
主 坝	上游坡	56.7	60.0	20.2	21.7
	下游坡	64.0	66.0		
副 坝	上游坡	40.4	43.0	11.7	12.5
	下游坡	45.7	48.6		

3 结 语

汤溪水库属于大型水利工程, 根据“国际减灾十年”的要求, 一切减灾措施都应落实在灾害发生之前; 我国政府也规定: “检查要害工程、生命线工程和人口密集地区的民用建筑等设施的抗震能力, 对不符合要求的工程设施尽快进行抗震加固, 或采取其他可以保障安全的措施”。根据上述原则, 我们对汤溪水库大坝的抗震能力进行了复核。考虑到土坝抗震能力复核方法还在发展中, 因此采用了 3 种方法, 复核结果归纳成表 7。

表 7 汤溪水库大坝抗震稳定性分析综合结果

Tab. 7 Composite result of seismic stability analysis of the earth dam of Tangxi Reservoir

坝 别	坡 别	最大水平 加速度 (cm/s^2)	最小安 全系数 K	最大水平永久变形 (cm)		最大震陷 (cm)		失效 概率
				整体变形分析	有限滑动分析	整体变形分析	有限滑动分析	
主 坝	上游坡	142.2	1.275	1.4	56.7	2.3	/	0.20
		229.6	1.140	2.3	60.0	2.3	/	0.22
	下游坝	142.2	1.162	3.2	64.0	2.5	/	0.23
		229.6	1.084	10.8	66.0	4.5	/	0.25
	坝顶	142.2	/	0.9	0	2.9	20.2	/
		229.6	/	2.3	0	3.4	21.1	/
副 坝	上游坡	142.2	1.312	未	40.4	未	/	0.15
		229.6	1.286		43.0		/	0.17
	下游坡	142.2	1.304		45.7		/	0.18
		229.6	1.224		48.6		/	0.20
	坝顶	142.2	/		0		11.7	/
		229.6	/	算	0	算	12.5	/

根据复核的综合结果可得如下结论:

1. 在相当于地震基本烈度 ($a=142.2\text{cm/s}^2$) 下, 主、副坝的抗震能力是足够的;
2. 在相当罕遇地震 ($a=229.6\text{cm/s}^2$) 下, 副坝的抗震能力也是足够的; 主坝的抗震能力处于临界状态;

3. 由于参数的离散性,特别是水平峰加速度的变异性较大,主坝的失效概率在 23%—25%,副坝 18—20%,还是比较高的,因此对于他们的抗震能力不能过分乐观。

国家地震局工程力学研究所石兆吉副研究员、郁寿松高级工程师协助完成整体地震永久变形有限元计算,谨表感谢!

参 考 文 献

- 1 中华人民共和国水利电力部. 水工建筑物抗震设计规范 SDJ10—78. 水力电力出版社, 1979.
- 2 谢君斐, 石兆吉, 郁寿松, 丰万玲. 液化危险性分析. 地震工程与工程振动, 1988, 8 (1).
- 3 Romo, M. p, Resenix, D, Computed and observed deformation of two embankment dams under seismic loading, Proc. of conference held at the Institution of Civil Engineers, 1980.
- 4 《土工原理与计算》编辑组. 土工原理与计算 (上册). 华东水力学院水利出版社, 1980.
- 5 水利电力部第五工程局等. 土坝设计 (上册). 水利电力出版社, 1978.
- 6 何广纳, 等. 海堤地震整体稳定性的模糊概率分析. 铅印, 1991.

SEISMIC STABILITY ANALYSIS OF THE EARTH DAM OF TANGXI RESERVOIR

Chang Baoqi and Yang Lianfa

(Seismological Bureau of Guangdong Province, Guangzhou, 510070)

Abstract

Tangxi reservoir was constructed on Huanggang River, and the dam is composed of the main dam 43m in height and the auxiliary dam 35 in height. The design capacity of the reservoir is $2.86 \cdot 10^8 \text{ m}^3$. The dam was built in 1959, and no measures were taken against earthquake. In order to respond to the call of "International Decade for Natural Disaster Reduction", it is required by the related authority to check the earthquake resistance capability of the dam.

Firstly, the criteria for checking earthquake resistance capability of the dam are given by means of probabilistic hazard analysis, i. e. peak acceleration of 142.2 cm/s^2 and 229.6 cm/s^2 are taken to be corresponding to the basic seismic intensity and "extreme intensity", respectively.

Three methods are used for re-estimating earthquake resistance capability of the dam: 1) The quasi-static method; 2) Finite element analysis of overall permanent deformation; 3) Finite sliding deformation analysis. The result of re-estimating by the above-mentioned methods indicate that the main dam has ability to resist the action with the basic intensity. For the peak acceleration of 229.6 m/s^2 , the three methods give slightly different results. The minimum safety factor $k=1.08$, obtained by the quasi-static method is slightly lower than that specified in the Code (1.1); the maximum horizontal permanent deformation calculated from the overall deformation is 10.8 cm, which is acceptable; the horizontal and vertical permanent deformations calculated by Newmark's, Makdis' and Sarma's methods in the finite sliding analysis are very small and calculated by Romo's method are 66.0 cm and 21.1 cm, respectively, indicating that the earthquake resistance capability of the main dam reaches a critical state in the case of extreme intensity. The earthquake resistance capability of the auxiliary dam is high.

Key words: Reservoir earthquake; Tangxi Reservoir; Seismic stability analysis; Quasi-static analysis; Permanent deformation