

关于坝体震害预测的研究

马尔曼

张全虎

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000) (甘肃省建筑勘察设计院)

摘要 本文在“嘉峪关市地震危险性分析”工作的基础上,以大草滩水库土石坝为例,研究了坝体震害预测的方法。用动力非线性有限元法计算并分析了坝体的非线性动力特性,给出了50年超越概率为10%和2%两种风险水平下,坝体表面可能出现的拉裂区域和坝体内可能出现的塑性破坏区域,并给出了有代表性的一些地点的加速度时程和动剪应力时程。本文还用拟静力法对坝体的整体稳定性进行了分析计算,给出上述两种风险水平下,在可能遇到的各种情况下,坝体的整体安全可靠性能。

关键词: 土石坝;震害预测;动力非线性有限元方法

1 概况

大草滩水库位于嘉峪关市西北12km处,水库总容量为 $64 \times 10^6 \text{m}^3$,常年供水量为 $2.1 \text{m}^3/\text{秒}$,最大给水量为 $3 \text{m}^3/\text{秒}$ 。北大河的水通过位于其沟口下游19km处的直径为3.2m,长7.8km的暗渠和长2.7km的明渠流入大草滩水库。近年由于泥沙淤塞,实际给水量约为 $1.65 \text{m}^3/\text{秒}$ 左右。该水库是保证酒钢公司工业用水和部分农业用水的重要水源之一。该水库大坝的主坝断面如图1所示,坝高41.3m,其下部为15.5m厚的砂砾石层,中间夹有一薄的黑色细砂层,该层下部为黄土夹砂石层和夹有大石块的砂砾石层,厚约4m,底部即为基岩。断面中心为粉质壤土防渗心墙,开挖了一个截水槽到砂砾石层底部,水槽下部为混凝土截水墙穿至基岩。这是一座典型的土石截水坝。

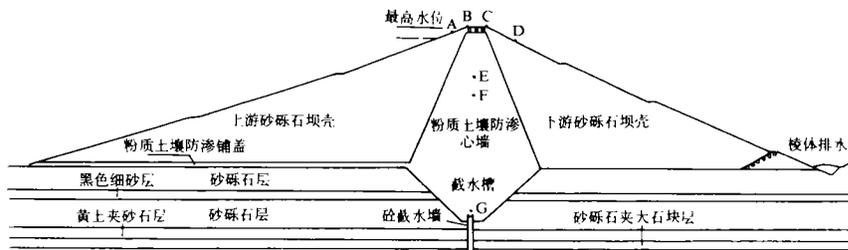


图1 主坝横截面示意图

Fig. 1 Cross section of main dam of Dacatan reservoir

2 大草滩水库主坝的动力特性的计算

从1966年开始,有限单元法被应用于土石坝应力与应变的非线性分析,该方法的应用使对这

一问题的研究可以推广到非均质的坝体剖面,同时可以考虑水平方向和竖直方向的地震振动。Seed 在 1969 年和 1975 年用有限单元法分别研究了谢菲尔德坝及下圣菲尔南多坝的砂土液化^[1]结果是很成功的。因此,在分析大草滩水库主坝动力特性时,基本上采用了 Seed 的分析方法。Seed 用有限单元法进行土石坝动力分析的步骤参见文献 [1]。

2. 1 应用有限单元法推算坝体在地震前的初始静应力及基岩地振动加速度时程的合成

利用静力有限单元法,可求得坝体内任一点的应力状态,得出了在静力作用下坝体的主应力场及最大剪应力矢量场。

根据地震危险性分析计算,可以预测未来 50 年超越概率 10%和 2%的场地基岩地振动加速度时程的反应谱和持时,然后,以此反应谱为目标谱,合成基岩地振动加速度时程。只考虑水平方向的振动,两个概率水平下的时程曲线参见文献*。

2. 2 坝体的动力特性

用有限单元法计算坝体的动力特性,需要考虑土料的非线性指标。土料的非线性特性的表示方式有多种,本文以土料的最大剪应变与剪模比曲线来表示,图 2 给出了砂砾石和粘土的剪模比曲线。

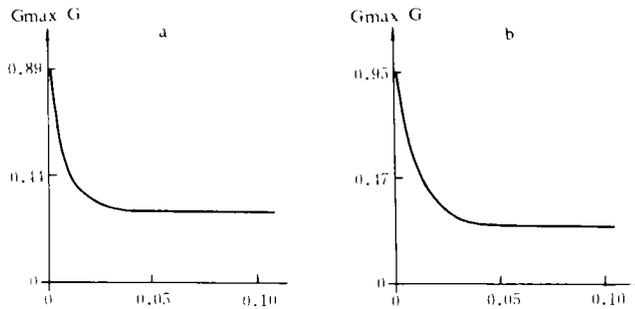


图 2 砂砾石和粘土的剪模比和剪应变的关系

a. 砂砾石; b. 粘土

Fig. 2 Relation curves of shear modulus ratio and shear strain of grit and clay

非线性动力计算是用逐步求解法来完成的,土料的非线性性质是用迭代法来考虑的,通过逐步计算和反复迭代,求得坝体内任一点的加速度、速度、位移时程和任一点的动应力时程。图 3 给出了 50 年超越概率 10%和 2%时,A、B、C、D4 点的加速度时程,图 4 给出了越概率 10%和 2%时,E、F、G3 点的动剪应力时程。

2. 3 动静力的组合

在求得了坝体内任一点的初始静应力和动应力时程以后,进行动静应力组合,具体公式为:

$$\sigma_i = \sigma_{i,s} + 0.65\sigma_{i,d} \tag{1}$$

式中 σ_i 为第 i 个点动静应力组合, $\sigma_{i,s}$ 为该点的初始静应力, $\sigma_{i,d}$ 为该点的动力最大幅值。由 (1) 式分别计算得出了坝体 50 年超越概率 10%和 2%的组合主应力场和最大剪应力矢量场。

* 兰州地震研究所,酒泉钢铁公司抗震防灾规划基础研究——地震危险性分析,1990.

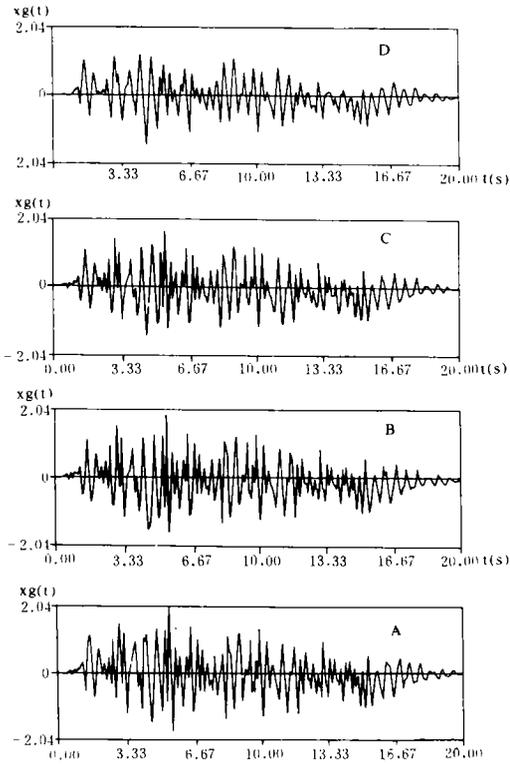


图 3 超越概率分别为 10% 时, 大坝上 A、B、C、D 4 点的加速度时程

Fig. 3 Acceleration time history of A, B, C, D points on dam's surface for 10% of exceedance probability

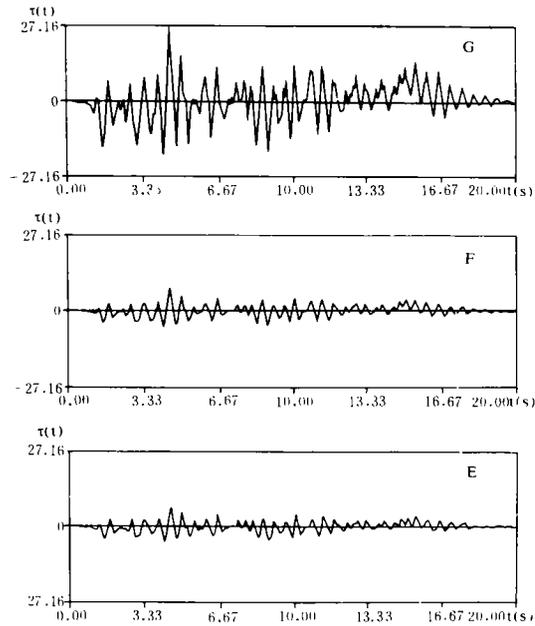


图 4 超越概率为 10% 时大坝内 E、F、G 3 点的动剪应力时程

Fig. 4 Shear stress time history of E, F, G points in dam for 10% of exceedance probability

2.4 坝体可能破坏的危险区的确定

在野外测试工作中,取得了各种土质的横波波速 V_s 的具体数据,以此为基础可求得各类土质的剪切模量和弹性模量。表 1 给出了各种土质的 V_s 数据及其他有关实验数据。

表 1 各类土料测试参数

土料	横波波速	饱和容重	湿容重	粘聚力	内摩擦角
砂砾土	450.0	2.1	1.9	0.0	40.0
粘土心墙	500.0	2.0	1.75	2.5	27.0
细砂	450.0	2.0	1.88	0.0	32.0
黄土夹砂	500.0	1.98	1.73	2.0	24.0

对于土质判别标准的确定,没有统一的规律和模式可循,本文以最大剪应力强度为判别标准,

即当: $\tau_{max} \geq \tau_f$ 时, 发生剪切破坏; 当 $\tau_{max} < \tau_f$ 时则不会发生剪切破坏。 τ_{max} 为静动应力组合后所求得的土质所受的最大剪应力, τ_f 为土质的抗剪应力强度, 可由摩尔-库伦准则求得, 即

$$\tau_f = [C \cdot \cos\Phi + \sigma_3 \cdot \sin\Phi] / (1 - \sin\Phi) \quad (2)$$

式中 C 为土质粘聚力, Φ 为土质的内摩擦角, σ_3 为最小主应力。将主应力 σ_3 与粘聚力 C 比较, 来判断土质是否被拉裂。只有当 σ_3 为拉应力时, 这种比较才有效, 即当 $\sigma_3 \geq C$ 时, 则出现拉裂, 反之安全。

图5分别给出了50年超越概率为10%和2%时坝体可能出现的拉裂区和剪切破坏区。

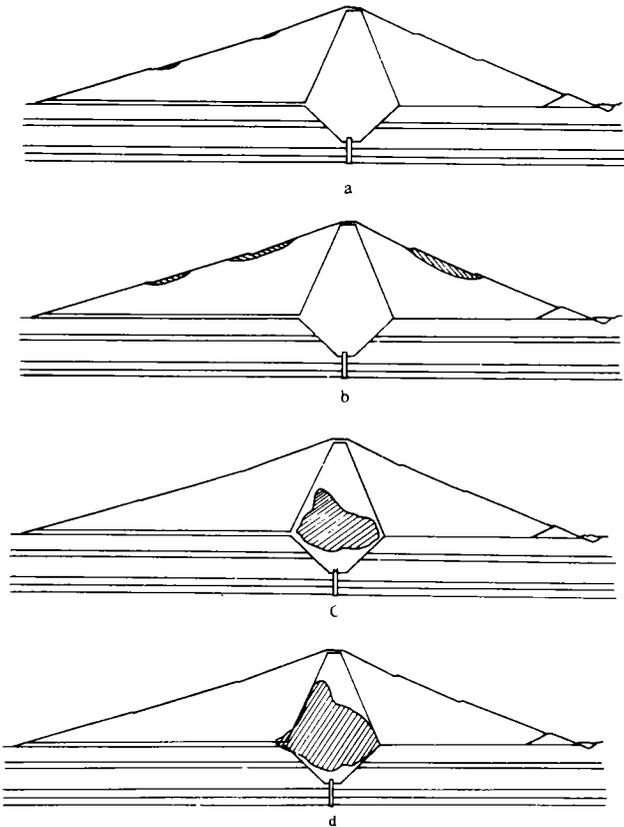


图5 超越概率为10%和2%时坝体拉裂区和剪切破坏区分布

- a. 超越概率为10%时的拉裂区;
- b. 超越概率为2%时的拉裂区;
- c. 超越概率为10%时的剪切破坏区;
- d. 超越概率为2%时的剪切破坏区

Fig. 5 Distribution of pull-open regions and shear failure regions for 10% and 2% of exceedance probability

用时, 其整体是稳定的, 安全系数全部大于1.05, 完全满足规范要求。另外有两种特殊情况需要考虑, 一种是地震作用的同时伴随着水位骤降, 另一种是地震作用前有水位骤降但孔隙水压力还没有完全消散。在前一种情况下, 迎水面坝壳内土质处于饱和状态, 孔隙水压力较大, 在50年超越概率

3 坝体的整体稳定性评价及震害预测

由于动力有限元法是近年发展起来的, 人们对这种方法还缺乏使用经验, 将其应用于坝体的整体稳定性评价还存在着一些问题, 因此, 评价坝体的整体稳定性, 仍然采用《水工建筑物抗震设计规范——SDJ10—78》中所规定的方法。

参考有限单元法的计算结果, 考虑到水位突降因素的影响, 通过计算和搜索, 选择了5条滑动圆弧面作为最危险的滑裂面, 如图6所示。图6b和图6c分别为 $b-b'$, $e-e'$ 两条圆弧面的条分计算简图, 限于篇幅, 其余三条滑弧面的计算图没有给出, 计算结果见表2—表4, 其余滑裂面的计算结果, 限于篇幅没有列出。

由有限单元法计算结果可知, 在50年超越概率10%和2%地震作用下, 防渗心墙下部可能受到剪切破坏, 坝坡表面有些区域可能被拉裂(见图5), 但没有影响坝体的整体稳定的破坏趋势, 因此, 可以认为坝体可以经受住地震作用。如果遭受地震作用时, 应仔细观察, 发现裂缝要及时补救, 以防灾情扩大。

由拟静力方法计算的结果可知, 在一般情况下, 坝体遭受到两个概率水平的地震作

表2 滑裂面稳定性分析计算表

土条 编号	土条 宽度	水位上土条 实重	水位下土条 浮重	夹 角	粘聚力	内摩擦角	孔隙水压力
No	B(I) (米)	W1(I) (吨)	W2(I) (吨)	FUA(I) (度)	C(I) (吨/米)	FA(I) (度)	UW(I) (吨/米)
1	3.50	39.40	0.00	59.00	0.00	40.00	4.00
2	3.50	91.20	0.00	54.00	2.50	27.00	9.00
3	6.00	219.60	0.00	50.00	2.50	27.00	12.00
4	7.00	352.10	0.00	45.00	2.50	27.00	13.00
5	5.00	262.60	0.00	38.00	2.50	27.00	14.50
6	5.00	275.80	0.00	33.00	1.50	31.00	14.50
7	5.00	281.00	0.00	30.00	0.00	40.00	15.00
8	2.00	116.20	0.00	28.50	0.00	40.00	15.00
9	8.00	464.80	0.00	25.00	0.00	40.00	15.00
10	5.00	254.80	18.00	21.00	0.00	40.00	12.50
11	5.00	233.80	24.8	16.00	0.00	40.00	10.50
12	7.00	291.90	31.50	12.00	0.00	32.00	9.00
13	2.00	73.10	13.50	10.00	0.00	32.00	7.00
14	6.00	211.80	43.20	8.00	0.00	32.00	7.00
15	5.00	155.60	38.30	6.50	0.00	32.00	3.50
16	5.00	131.80	39.60	3.50	0.00	32.00	3.50
17	5.00	111.30	38.30	-1.00	0.00	32.00	2.00
18	5.00	91.30	36.00	-5.00	0.00	32.00	1.00
19	5.00	71.30	33.80	-10.00	0.00	32.00	0.00
20	5.00	52.30	27.00	-14.00	0.00	40.00	0.00
21	5.00	19.00	22.50	-17.00	0.00	40.00	0.00
22	5.00	23.80	13.50	-21.00	0.00	40.00	0.00
23	5.00	9.50	6.80	-25.00	0.00	40.00	0.00
地震水平		50年超越概率10%		50年超越概率2%		滑弧半径(米)	
竖向地震力		向 下	向 上	向 下	向 上		
安全系数		1.20	1.19	1.09	1.06	87.50	

表 3 滑裂面稳定性分析计算表(水位聚降后)

土条 编号	土条 宽度	水位上土条 实重	水位下土条 浮重	夹 角	粘聚力	内摩擦角	孔隙水压力
No	B(I) (米)	W1(I) (吨)	W2(I) (吨)	FUA(I) (度)	C(I) (吨/米)	FA(I) (度)	UW(I) (吨/米)
1	6.00	48.60	0.00	47.00	2.50	27.00	0.00
2	2.00	28.50	0.00	43.00	2.50	27.00	0.00
3	5.00	100.00	0.00	40.00	2.50	27.00	1.70
4	5.00	126.00	0.00	35.00	0.00	110.00	2.40
5	5.00	136.50	0.00	31.00	0.00	40.00	3.90
6	5.00	147.00	0.00	27.50	0.00	40.00	4.20
7	5.00	147.00	0.00	23.50	0.00	40.00	5.60
8	5.00	152.30	0.00	19.00	0.00	40.00	5.80
9	4.00	117.60	0.00	15.50	0.00	40.00	7.00
10	2.00	58.80	0.00	14.00	0.00	40.00	7.00
11	4.00	117.60	0.00	12.00	0.00	40.00	3.40
12	5.00	141.80	0.00	8.90	0.00	40.00	9.50
13	5.00	131.30	0.00	5.50	0.00	40.00	8.80
14	5.00	120.80	0.00	3.00	0.00	40.00	3.10
15	5.00	105.00	0.00	2.00	0.00	40.00	8.00
16	5.00	84.00	0.00	1.00	0.00	40.00	7.20
17	5.00	27.8.	0.00	0.50	0.00	40.00	5.00
18	5.00	21.00	0.00	1.00	0.00	40.00	2.00
地震水平		50年超越概率10%		50年超越概率2%		滑弧半径(米)	
竖向地震力		向 下	向 上	向 下	向 上		
安全系数		1.65	1.63	1.48	1.43	79.80	

表4 地震和水位聚降同时作用下 $e-e'$ 滑裂面稳定性分析计算表

土条 编号	土条 宽度	水位上土条 实重	水位下土条 浮重	夹 角	粘聚力	内摩擦角	孔隙水压力
No	$B(I)$ (米)	$W1(I)$ (吨)	$W2(I)$ (吨)	$FUA(I)$ (度)	$C(I)$ (吨/米)	$FA(I)$ (度)	$UW(I)$ (吨/米)
1	6.00	48.60	0.00	47.00	2.50	27.00	0.00
2	2.00	28.50	0.00	43.00	2.50	27.00	0.00
3	5.00	100.00	0.00	40.00	2.50	27.00	8.50
4	5.00	126.00	0.00	35.00	0.00	40.00	12.00
5	5.00	136.50	0.00	31.00	0.00	40.00	13.00
6	5.00	147.00	0.00	27.50	0.00	40.00	14.00
7	5.00	147.00	0.00	23.50	0.00	40.00	14.00
8	5.00	152.30	0.00	19.00	0.00	40.00	14.50
9	4.00	117.60	0.00	15.50	0.00	40.00	14.00
10	2.00	58.80	0.00	14.00	0.00	40.00	14.00
11	4.00	117.60	0.00	12.00	0.00	40.00	14.00
12	5.00	141.80	0.00	8.60	0.00	40.00	13.50
13	5.00	131.30	0.00	5.50	0.00	40.00	12.50
14	5.00	120.80	0.00	3.00	0.00	40.00	11.50
15	5.00	105.00	0.00	2.00	0.00	40.00	10.00
16	5.00	84.00	0.00	2.00	0.00	40.00	8.00
17	5.00	27.80	0.00	-0.50	0.00	40.00	5.50
18	5.00	21.00	0.00	-1.00	0.00	40.00	2.00
地震水平		50年超越概率10%		50年超越概率2%		滑弧半径(米)	
竖向地震力		向 下	向 上	向 下	向 上		
安全系数		1.08	1.04	0.97	0.89	79.80	

2%地震作用下可能发生较大的滑坡,而超越概率 10%地震作用下则是稳定的,参见表 4,不过这情况发生的概率是非常小的;在后一种情况下,如果有足够的时间让孔隙水压力消散,则坝体是稳定的,安全系数均大于 1.3。鉴于上述两种特殊情况,如有危险情况,尽可能提前使水位降下来,以便有足够的时间使孔隙水压力消散,从而保证坝体的整体稳定性。

本文计算中所采用的参数,波速是现场原位测试,其中剪模比曲线采用的是另外场地的试验资料,因而计算结果仅供参考。如果要使计算结果可靠,评价正确可信,需要进行专门的抗震研究和稳定评价。

(本文 1992 年 10 月 13 日收到)

参考文献

- 1 Seed, H. B. et al. *Dynamic analysis of the slide in the lower San Fernando Dam during the earthquake on Feb. 9, 1971.* PASCE, 1975, G. T. 9.
- 2 中华人民共和国水利电力部. 水工建筑抗震设计规范 SDJ10-78. 北京:水利电力出版社, 1978.

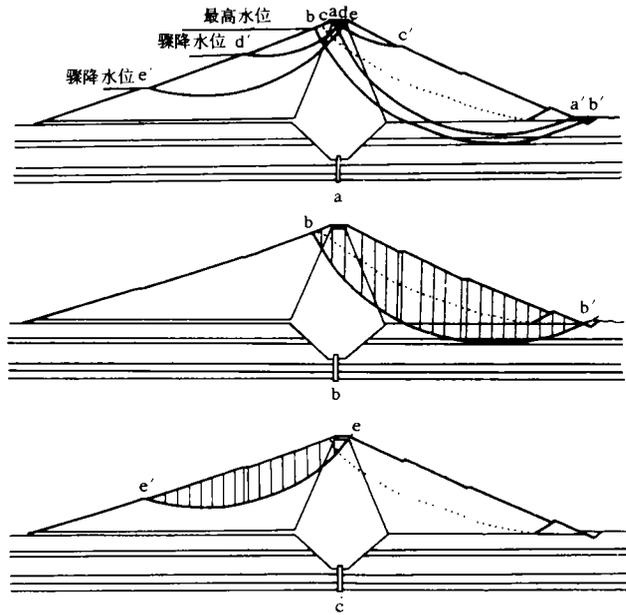


图 6 两条滑裂面的计算简图
 a. 滑裂面示意图; b. b—b' 滑裂面; c. e—e' 滑裂面
 Fig. 6 Diagram of calculation for divided strip of two sliding face

THE RESEARCH OF SEISMIC DISASTER PREDICTION OF EARTH DAM

Ma Erman

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, China)

Zhang Quanhu

(Institute of Architectural Reconnaissance and Design of Gansu Province, Lanzhou)

Abstract

Based on "The Seismic Risk Analysis of Jiayuguan City", this paper anticipates the seismic disaster of Dacotan earth dam. We calculate and analyse the dam's nonlinear dynamic characteristics using dynamic nonlinear finite element method, and give the possible pull-open regions on the dam's surface and the possible plastic failure regions in the dam under 10% and 2% of exceedance probability during a period of 50 years, and give the acceleration time history and shear stress time history of several representative points. We also calculate and analyse the whole stability of the dam. Under the two exceedance probabilities, this paper gives the whole safe reliability during a period of 50 years.

Key Words: Earth dam; Seismic disaster prediction; Dynamic nonlinear finite element method