

文章编号: 1000-7598-(2008) 增刊-155-06

堆石坝地震响应和地基液化分析

肖 伟, 李泰来, 黄臣虎

(武汉大学 设计研究总院, 武汉 430072)

摘 要: 利用冶勒大坝已经获得的强震监测资料进行大坝坝体及覆盖层动力参数反演, 采用三维非线性有限元动力分析方法, 分析冶勒大坝在其已经遭遇的最大地震, 即 4 级地震作用下的坝体动力加速度状况, 并根据计算结果判别坝基覆盖层的液化情况, 进而对冶勒大坝在所遭受的 4 级地震下的抗震安全性作出评价。其中坝体堆石料及覆盖层砂粒料静力计算时采用邓肯 E-B 模型, 动力计算是采用 Hardin 模型, 地震响应分析采用等价线性法。

关 键 词: 大坝; 反演; 有限元; 液化

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Seismic response and foundation liquefaction analysis of rockfill dam

XIAO Wei, LI Tai-lai, HUANG Chen-hu

(General Design & Research Institute, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Dam material and overburden dynamic parameters are inversed on the basis of strong earthquake monitoring data of Yele Dam. Then three-dimensional nonlinear finite element analysis is carried out to analyze the dynamic acceleration responses of the dam subjected to its largest earthquake so far(4 earthquake). Liquefaction of the foundation overburden is evaluated in accordance with the results by finite element analysis. Seismic safety of the dam suffered by earthquake is evaluated finally. Rockfill and overburden material models used in static calculation are Duncan E-B model, and Hardin model in dynamic calculation. 3D nonlinear finite element earthquake response analysis applies equivalent linearization method.

Key words: dam; inversion; finite elements; liquefaction

1 前 言

在堆石坝的地震响应计算中, 材料参数的取值对整个计算结果起到决定作用。由于种种原因, 堆石料及地基覆盖层砂粒料参数很难与设计值相符。如果用设计计算时的材料参数进行堆石坝抗震性能研究及地基覆盖层液化判别, 势必会造成不可估计的误差。所以在堆石坝地震响应和地基覆盖层液化分析中, 材料参数的反演具有重要的意义。

堆石坝地震响应分析方法随着堆石体非线性应力-应变关系的认识水平而变化, 由最初的线弹性分析发展到等价线性、“真”非线性和弹塑性等非线性分析。“真”非线性分析比较真实地选用各个时段的土体切线剪切模量, 是一种比较精确的计算方法, 但因计算量大, 且在考虑土体的阻尼特性时引入较多的假定, 目前尚处于研究阶段。而等价线性法可

考虑地震过程中土体的剪切模量与阻尼比的总体平均变化趋势, 虽然存在着一定的局限性, 但计算较简单且结果能够满足工程运用, 在堆石坝地震动力响应非线性分析中得到较广的应用^[1-3]。

地震液化评估方法很多, 其中简易经验法为目前常用方法之一。用土体抗液化的动剪应力比与地震作用下土体单元承受的动剪应力比相比较, 然后评判液化的可能性。这就要求对土体材料进行动强度试验以及做出动力反应计算分析。

本文结合冶勒大坝的地震监测资料, 对冶勒大坝坝体材料及地基覆盖层参数进行反演, 利用反演所得的动力参数对大坝进行了三维非线性有限元动力分析, 并对地基覆盖层做出了液化判别, 以此作为最终评价冶勒大坝抗震安全性的依据。其中, 静力计算时坝体堆石料和地基覆盖层砂粒料采用邓肯 E-B 模型, 动力计算时采用 Hardin 模型, 动力计算

收稿日期: 2008-07-25

作者简介: 肖伟, 男, 1985 年生, 工学硕士, 初级工程师, 主要从事水工结构设计方面的研究。E-mail: xiaowei218@163.com

方法采用等价线性法。在整个计算过程中,左岸基岩均采用线弹性模型,动力计算时仅考虑其刚度。

2 动力本构模型^[4]

Hardin-Drnevich 双曲线本构模型概念明确,应用方便,在有限元动力计算中得到了广泛的运用。把堆石体视为粘弹性体,采用等效弹性模量 E (或 G) 和等效阻尼比 λ 这两个参数来反映堆石体动应力—动应变关系的两个基本特征:非线性与滞后性,并且将模量与阻尼比均表示为动应变幅的函数,即 $E_d = E_d(\varepsilon_d)$ 和 $\lambda = \lambda(\varepsilon_d)$, 或 $G_d = G_d(\gamma_d)$ 和 $\lambda = \lambda(\gamma_d)$, 同时,在确定上述关系中考虑了静力固结平均主应力的影响。起始剪切模量:

$$G_d = 220(K_2)_{\max}(\sigma'_0)^{0.5} \text{ (kPa)} \quad (1)$$

式中: σ'_0 为平均有效应力, $(K_2)_{\max}$ 为计算参数。

等效阻尼比是从应力应变滞回圈的几何特征出发提出的计算公式:

$$\lambda = \lambda_{\max} \frac{\gamma_d / \gamma_f}{1 + \gamma_d / \gamma_f} \quad (2)$$

式中: $\lambda_{\max}$ 可根据试验或经验确定; γ_f 为参考剪应变。Hardin 等人又得出如下经验公式:

$$\lambda_{\max} = 33 - 1.5(\lg N) \quad (3)$$

式中: N 为循环加载次数。

3 等价线性法

首先根据静力计算所得各单元的剪应变,由 Hardin 模型计算出初始剪切模量及阻尼比,运用线性有限元法求解堆石体的动力响应,依此确定各单元的等价剪应变。然后采用此等价剪应变进行第二次迭代,如此不断迭代直至各单元的等价剪应变值与假定剪应变值相差不超过某一百分数(例如 5%),或达到预先规定的迭代次数为止。按照计算精度的需要和实际情况,可以将一次地震分为若干个时段,也可以就作为一个时段计算。其中等价剪应变

$$\gamma_{eq} = 0.65\gamma_{\max} \quad (4)$$

0.65 为转换系数,带有一定的经验性,一般都在 0.55~0.75 之间; $\gamma_{\max}$ 为单元剪应变时程中的最大值。

4 反演分析

反演分析,即以现场量测到的反映系统力学行为的某些物理信息量为基础,通过反演模型,反演推算得到该系统的各项或一些初始参数。其最终目的是建立一个更接近现场实测结果的理论预测模

型,以便能较正确地反映或预测结构的某些力学行为^[5,6]。

本文针对强震仪所测得的某次地震情况下的加速度进行材料参数反演分析,选用直接法,利用有限元软件完成正算过程,以最小二乘法作为控制迭代精度的工具。针对每个变量进行反演所用的流程图如下:

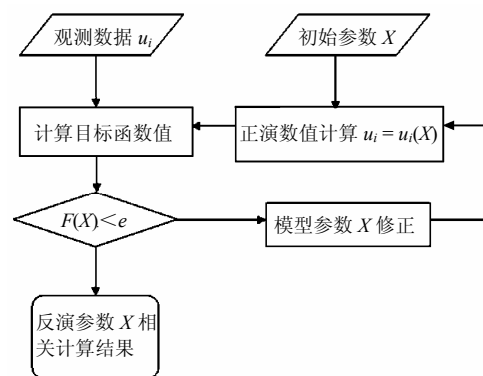


图1 反演分析流程图

Fig.1 Process of inversion analysis

5 液化判别^[1]

目前国内外应用最广泛的评定土石坝坝体及其坝基的地震液化可能性的方法就是抗液化剪应力法。这个方法是由美国 Seed 等人首先提出的,将不规则变化的地震剪应力随时间变化概化为一种等效的一定循环次数的均匀剪应力,则可以用同样的应力循环数对砂基土样进行振动三轴试验,测定出引起液化所需的动剪应力,或称抗液化剪应力。如果这个抗液化剪应力大于实际的地震剪应力,则在该处无液化的可能性,否则,将会引起液化现象。它的关键问题在于正确确定出地震剪应力和抗液化剪应力。

整理计算坝基动剪应力比 $(\tau_{\max} / \sigma'_0)$ 值,根据 $\tau_e = 0.65\tau_{\max}$, 即可得 (τ_e / σ'_0) 。参照实验室土样液化试验 (τ_d / σ'_0) , 其中 τ_d 为在实验当中产生液化要求施加于破坏面上的往返剪应力幅值,如果这个抗液化剪应力 (τ_d / σ'_0) 大于实际的地震剪应力 (τ_e / σ'_0) , 则在该处无液化的可能性,否则,将会引起液化现象。

6 冶勒大坝地震响应和地基液化分析

6.1 工程概况

冶勒水电站位于四川省凉山州冕宁县和雅安市石棉县境内的南桡河上,大坝位于冕宁县冶勒乡,厂房位于石棉县栗子坪乡南桡村,坝、厂间距离约 11 km。冶勒坝址右岸及河床下部覆盖层厚度大于

440 m。左岸基岩埋藏较浅，河床及右岸覆盖层深厚，左、右岸基础条件严重不对称。坝址区的地震烈度高，坝上共设置强震仪 10 台，可随时记录坝体结构在地震时的加速度反应。大坝平面布置及剖面位置如图 2^[7]。

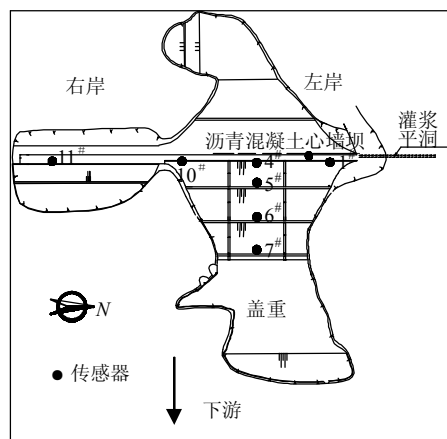


图 2 大坝平面布置及剖面位置图
Fig.2 Layout plan of the dam

6.2 有限元计算

6.2.1 地震波确定

根据冶勒大坝地形地质条件，以 Taft 地震波为基础构造冶勒大坝基岩地震输入波进行动力时程计算。所构造的冶勒大坝基岩地震输入波三向加速度时程如图 3 所示，其中加速度幅值按冶勒大坝至

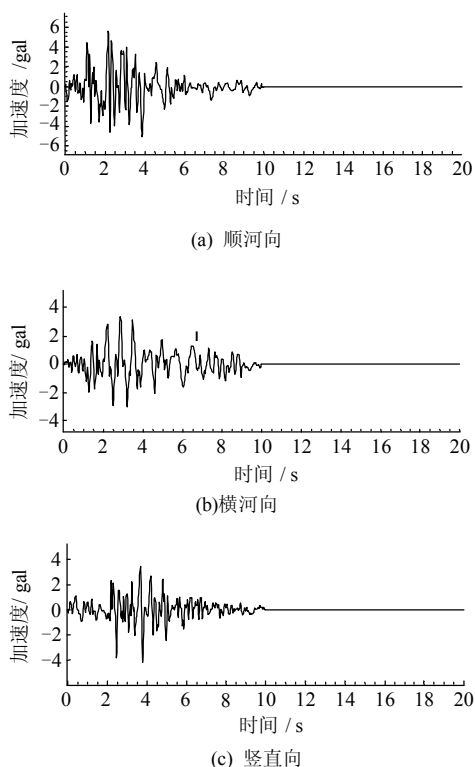


图 3 基岩地震输入波三向加速度时程图
Fig.3 Input earthquake waves in three directions

2007 年底发生的最大地震(2007 年 1 月 7 日 4 级地震)进行调整，顺河向峰值加速度调整为 5.60 gal，横河向峰值加速度调整为 3.36 gal，竖直向峰值加速度调整为 4.20 gal。持续时间从震相开始到震相结束取为 10 s。

6.2.2 有限元模型

由于冶勒大坝坝址地形地质条件十分复杂，为了比较合理地考虑深厚覆盖层的影响，本次计算模型选取相当大范围的覆盖层地基。有限元模型向上下游方向取至距坝脚 2 倍坝高，右岸向右延伸 3 倍坝高，底部取至大坝建基面以下 2 倍坝高。

静力与动力计算的有限元网格相同，网格剖分时主要采用 8 节点 6 面体单元，单元总数共 13 624 个，节点总数 16 113 个，大坝坝体及覆盖层实体及网格模型如图 4 所示。

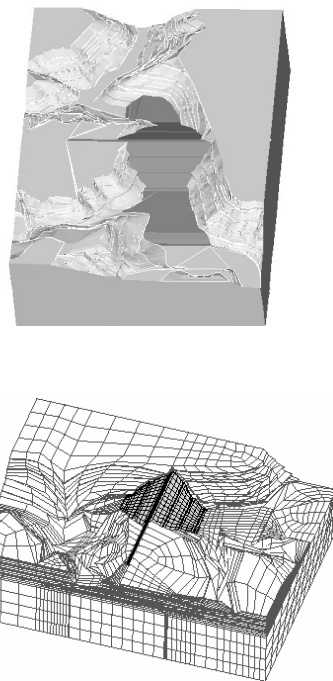


图 4 计算实体模型及网格图
Fig.4 Entity and mesh model

6.2.3 材料参数

静力计算采用 Duncan E-B 模型，计算参数如表 1 所示，表中： ρ 为材料密度， c 为凝聚力， ϕ 为内摩擦角， k 为加载时弹模基数， n 为加载时弹模指数， R_f 为破坏比， K_b 为体积模量基数， m 为体积模量指数， K_{ur} 为卸载时弹模基数， n_{ur} 为卸载时弹模指数。

由于冶勒大坝强震监测资料有限，本次计算共反演 4 个参数，分别为坝体和覆盖层的 $(K_2)_{\max}$ 和 $\lambda_{\max}$ 。冶勒大坝 2007 年 10 月 23 日的地震共有 6 台强震仪获得有效数据记录，因此在反演计算中，以其为样本值进行反演分析，动力计算的材料参数如

表 2 所示。

表 1 静力计算 Duncan E-B 模型计算参数
Table 1 Static parameters of Duncan E-B model

材料	ρ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	c / MPa	φ / ($^{\circ}$)	K	n	R_f	K_b	m	K_{ur}	n_{ur}
覆盖层	2 350	0	70	1 400	0.75	0.65	700	0.55	3 000	0.75
坝体	2 200	0	50	900	0.45	0.7	500	0.3	1 800	0.45
下游盖重	2 300	0	36	600	0.45	0.65	350	0.3	1 800	0.45
上游平台	2 300	0	36	600	0.45	0.65	350	0.3	1 800	0.45

表 2 动力计算 Hardin 模型计算参数
Table 2 Dynamic parameters of Hardin model

材料	$\lambda_{\max}$	$(K_2)_{\max}$
坝体	0.32	180
覆盖层	0.28	120

计算中左岸基岩采用线弹性模型,密度取 2 300 kg/m^3 , 弹模取 15 GPa, 泊松比 0.2, 动弹模在静弹

模的基础上提高 30%, 即静弹模乘以 1.3 的系数。同时, 在动力计算中只考虑基岩的弹性作用。

6.3 计算成果分析

6.3.1 最大加速度分析

图 5 为大坝表面最大加速度反应。由图可知, 三个方向的最大加速度反应基本上都是靠右岸比靠左岸大, 坝顶比坝脚大。其中, 大坝表面顺河向最大加速度反应同时在坝顶的 0+220 断面和 0+440 断面位置有极值区域, 最大值发生在副坝坝顶的 0+440 断面附近, 为 24.22 gal, 放大倍数为 4.33; 横河向加速度反应的最大值发生在主坝坝顶的 0+220 断面附近, 为 21.57 gal, 放大倍数为 6.42; 竖直向加速度反应的最大值发生在副坝坝顶的 0+440 断面附近, 为 15.55 gal, 放大倍数为 3.70。从加速度的数值上看, 坝面的顺河向加速度最大, 横河向加速度次之, 竖直向加速度最小。

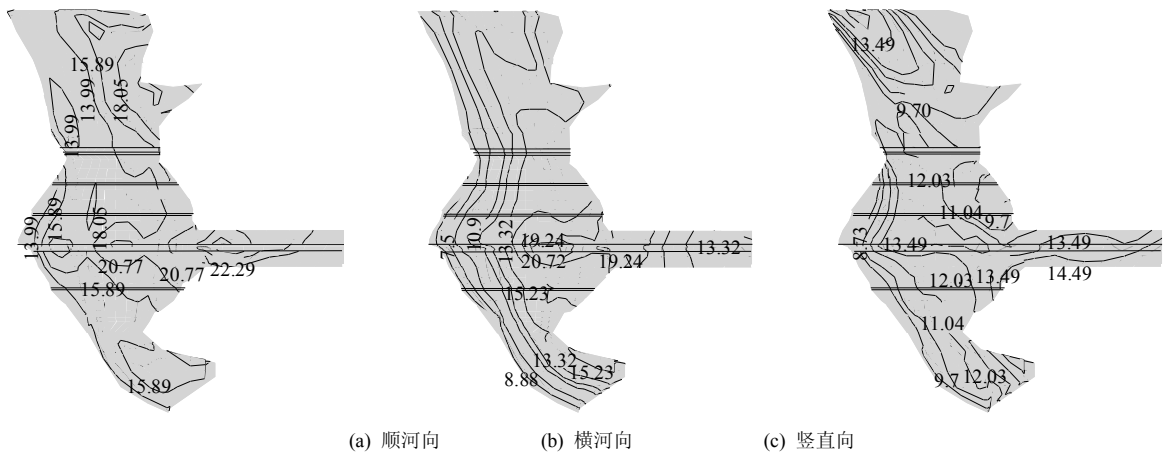


图 5 大坝表面最大加速度反应 (单位: gal)

Fig.5 Maximum acceleration contours on dam surface (unit: gal)

图 6 为坝 0+220.00 剖面最大加速度反应。由图可知, 在坝 0+220 m 断面上, 可以明显看到三向最大加速度均随着坝高的增加而增大, 并且大坝表面的加速度比大坝内部大。其中, 顺河向最大加速度反应同时在坝顶和下游坝脚有极值区域, 最大值发生在坝顶, 为 21.36 gal, 放大倍数为 3.81; 横河向加速度反应的最大值发生在靠主坝坝顶的下游面, 为 18.35 gal, 放大倍数为 5.46; 竖直向加速度反应的最大值也发生在主坝坝顶, 为 13.87 gal, 放大倍数为 3.30。从加速度的数值上看, 顺河向加速度最大, 横河向加速度次之, 竖直向加速度最小; 从放大倍数上看, 横河向最大, 竖直向最小。

6.3.2 最大地震位移分析

图 7 为大坝表面最大位移反应。由图可知, 三个方向的最大动位移反应基本上都是从左岸到右岸逐渐增大, 坝顶比坝脚大。其中, 大坝表面顺河向

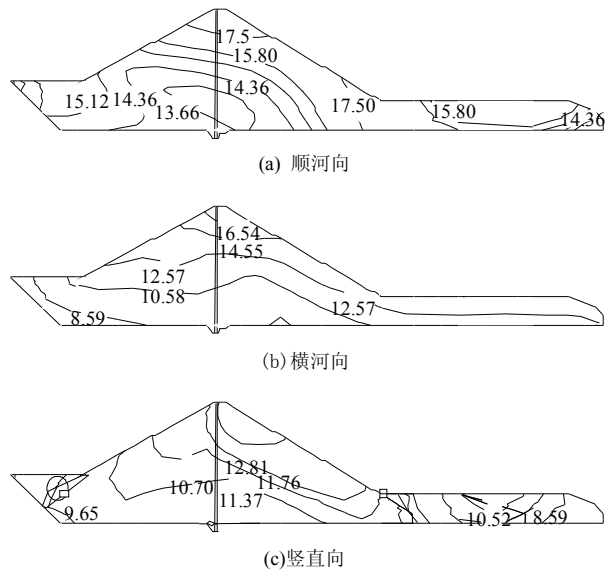
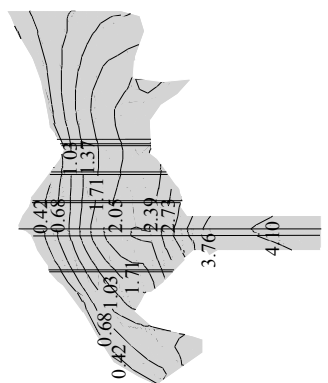
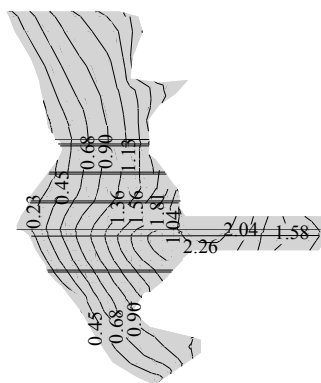


图 6 坝 0 + 220.00 剖面最大加速度反应(单位: gal)

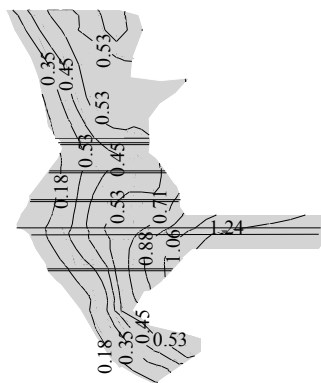
Fig.6 Maximum acceleration contours of 0 + 220.00 cross-section (unit: gal)



(a) 顺河向



(b) 横河向



(c) 竖直向

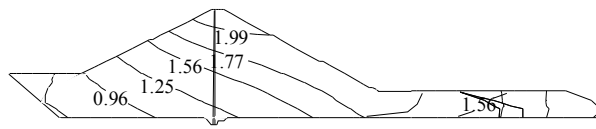
图 7 大坝表面最大位移反应(单位: mm)

Fig.7 Maximum displacement contours of dam surface (unit: mm)

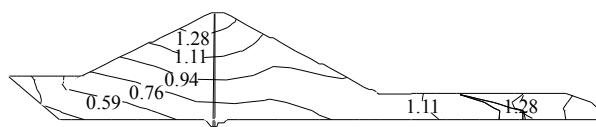
动位移的最大值发生在副坝靠右岸坝顶, 为 4.53 mm; 横河向动位移反应的最大值发生在副坝坝顶的 0+440 断面附近, 为 2.46 mm; 竖直向动位移的最大值反应发生在副坝靠右岸坝顶, 为 1.33 mm。从动位移的数值上看, 坝面的顺河向动位移最大, 横河向动位移次之, 竖直向动位移最小。

图 8 为坝 0+220 m 剖面最大位移反应。由图可知, 在坝 0+220 m 断面上, 三个方向的动位移最大值均发生在坝顶。其中, 顺河向最大动位移反应的等值线倾向下游, 最大值为 2.17 mm; 横河向动

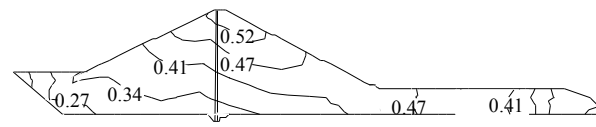
位移反应的最大值发生在靠主坝坝顶的下游面, 为 1.39 mm; 竖直向动位移反应的等值线略倾向下游, 最大值为 0.55 mm。从动位移的数值上看, 坝面的顺河向动位移最大, 横河向动位移次之, 竖直向动位移最小。



(a) 顺河向



(b) 横河向



(c) 竖直向

图 8 坝 0+220 剖面最大位移反应 (单位: mm)

Fig.8 Maximum displacement contours of 0+220 cross-section (unit: mm)

6.3.3 坝基覆盖层液化分析

图 9 为最大横剖面覆盖层动剪应力比。由图可知, 在 4 级地震作用下, 剖面中坝基覆盖层动剪应力比 (τ_e/σ'_0) 等值线基本呈水平分布, 并在坝脚附近数值相对较大。但是总体上数量级很小, 基本小于 0.1。参照冶勒水电站蓄水安全鉴定报告, 冶勒大坝坝基粉质壤土层抗液化剪应力比 (τ_d/σ'_0) 为 0.850 ($K_c = 1$, $N_f = 8$), 远大于计算所得动剪应力比, 因此不会发生液化。

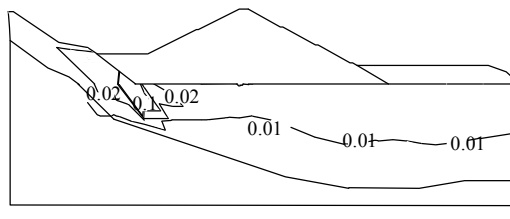


图 9 最大横剖面覆盖层动剪应力比

Fig.9 Dynamic shear stress ratio in overburden of the maximum section

7 结 论

(1) 在所遭受的 4 级地震作用下, 库水位为 2 638.46 m 时, 冶勒大坝地震动力反应总体上较小,

基本规律为坝顶反应大于坝脚,符合堆石坝一般地震反应规律。但由于坝基材料的不对称性,冶勒大坝也呈现了与一般规律不同的反应规律,即右岸反应大于左岸,且横河向反应与顺河向相当。

(2) 由计算所得坝基覆盖层动剪应力比数量级很小(小于 0.1),远小于抗液化剪应力比(约 0.85),不会发生液化。

综上可知,在 4 级地震作用下,库水位为 2638.46 m 时,冶勒大坝地震动力反应较小,地震过程中动剪应变数量级也很小,远未到破坏状态,同时基本不会有液化情况发生,因此具有较高的抗震安全性。

参 考 文 献

- [1] 倪汉根,金崇磐. 大坝抗震特性与抗震计算[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994.
- [2] 冀春楼,夏颂佑,邓德生. 深覆盖层上沥青混凝土心墙堆石坝动力分析[J]. 河南大学学报, 1995, 23(5): 74—80.
- [3] 顾淦臣. 土石坝地震工程[M]. 南京:河海大学出版社, 1989.
- [4] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- [5] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社. 1999.
- [6] 李守巨,刘迎曦,王登刚,等. 混凝土重力坝材料参数识别的正则化最小二乘法[J]. 计算物理, 2000, 17(6): 702—706.
- [7] 夏万洪. 冶勒水电站枢纽工程蓄水安全鉴定报告(第二部分)[R]. 成都: 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 2004.