

库底非饱和淤砂层对高拱坝地震反应的影响

王进廷¹ 唐 庆² 杜修力²

(1.清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(筹)北京 100084;
2.北京工业大学工程抗震与结构诊治实验室 北京 100022)

摘要 采用时域显式有限元方法,将库底非饱和淤砂层近似模拟为不同于库水的流体介质。以小湾拱坝为例,分析可压缩库水条件下库底非饱和淤砂层对高拱坝地震反应的影响。计算结果表明非饱和淤砂层的存在有可能使得坝体地震响应增加。
关键词 拱坝-可压缩库水-地基系统,非饱和淤砂层,时域显式有限元,地震反应
中图分类号 :TV312 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2007)02-0022-04

Effect of unsaturated sediment layer on seismic responses of high arch dams//WANG Jin-ting¹, TANG Qing², DU Xiu-li²
(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)
Abstract : With the Xiaowan Arch Dam taken as an example, the unsaturated sediment layer at the bottom of the reservoir was simulated as the fluid medium, which was different from the reservoir water, and the time-domain explicit finite element method was used for analysis of the effect of the unsaturated sediment layer on seismic responses of the dam under the condition of compressible reservoir water. The result shows that the unsaturated sediment layer may lead to the increase of dynamic seismic responses of the dam.
Key words : arch dam-compressible reservoir water-foundation system; unsaturated sediment; time-domain explicit finite element; seismic response

水库运行一段时间以后,库底会有大量的淤砂沉积。由于淤砂层的特性不同于库水,将使得坝体-库水-地基系统的自振特性发生变化,影响坝体的地震反应,进而影响到大坝的抗震安全性。这一问题对我国多泥沙河流尤显重要。例如,小湾拱坝(高 292 m)和溪洛渡拱坝(高 278 m),预计在运行 30 年后坝前淤砂厚度将分别达到 70 m 和 90 m,运行 50 年后坝前淤砂厚度都将超过 100 m。因此,研究库底淤砂层对高拱坝地震反应的影响,具有重要的工程参考价值。

目前有关淤砂层对坝体动力反应影响的研究成果主要是针对重力坝^[1],而对于拱坝的研究较少。Zhang Chu-han 等^[2]分析了淤砂层对响洪甸拱坝-库水动力反应的影响。在文献[3]中作者将库底饱和淤砂层模拟为重流体层(密度和体积模量均大于库水密度和体积模量),以小湾拱坝为例,分析研究了饱和淤砂层对高拱坝地震反应的影响。与饱和淤砂层相比,非饱和淤砂层中由于少量气体的存在,其孔

隙流体体积模量要小得多,因此本文将进一步考虑库底非饱和淤砂层的情况,以全面了解淤砂层对高拱坝地震反应的影响。仍以小湾拱坝为例,非饱和淤砂层近似用密度和体积模量均小于库水的流体介质模拟,系统地分析不同非饱和淤砂层厚度时坝体地震反应的变化情况。

1 淤砂层模型

非饱和淤砂层由固体骨架、孔隙水和少量气体组成,本文中近似用流体介质对其进行模拟,与文献[3]的计算模型相同。坝体和地基模拟为固体介质,库水和淤砂层模拟为流体介质,采用时域显式有限元方法进行计算分析^[4]。模拟为流体时,非饱和淤砂层的密度 ρ' 和体积模量 K' 根据下式确定:

$$\rho' = (1 - n)\rho_s + n\rho_l \tag{1}$$

$$\frac{1}{K'} = n \frac{1}{K_l} + (1 - n) \frac{1}{E_s} \tag{2}$$

式中 ρ_s 和 ρ_l 为非饱和淤砂层固体骨架和孔隙水密

度 n 为孔隙率 ; K_1 和 E_s 分别为非饱和淤砂层孔隙水体积模量和固体骨架颗粒体积模量 ,若假定固体骨架颗粒不可压缩 ,则 E_s 为无穷大。

2 计算实例

在文献 [3] 的基础上 ,仍以小湾拱坝为例 ,进一步分析非饱和淤砂层对高拱坝地震反应的影响。

2.1 基本计算资料

2.1.1 材料参数

小湾水电站位于云南省澜沧江与其左岸支流黑惠江交汇后下游 1.5 km 的河段上 ,拦河大坝为抛物线变厚度双曲拱坝。坝底高程 953 m ,坝顶高程 1 245 m ,最大坝高 292 m ,坝顶弧长 935 m ,坝顶厚 12 m ,坝底厚 73 m ,大坝上游正常蓄水位 1 240 m ,常遇低水位 1 181 m。混凝土动态弹性模量 27.3 GPa ,密度 2 400 kg/m³ ,泊松比 0.189。地基根据实际情况细分为 21 种材料^[4] ,阻尼取瑞利阻尼 ,确定瑞利阻尼系数的两阶阻尼比均取为 0.05(分别对应于 1.0 Hz 和 15.0 Hz)。库水密度为 1 000 kg/m³ ,体积模量为 2.0 GPa。非饱和淤砂层固体骨架和孔隙水密度分别为 2 640 kg/m³ 和 1 000 kg/m³ ,假定固体骨架颗粒不可压缩 ,孔隙水体积模量为 0.257 GPa。模拟为流体时非饱和淤砂层的密度和体积模量分别为 1 656 kg/m³ 和 0.428 GPa。

2.1.2 地震时程

小湾拱坝设计地震烈度为 9 度 ,水平向设计地震动峰值加速度为 0.308 g ,竖向设计地震动峰值加速度取水平向的 2/3 ,即 0.205 g 。本文采用以设计反应谱为目标谱生成的人工地震波作为输入地震波 ,考虑到半无限空间表面的地震放大效应 ,将其时程记录乘以 0.5 后作为基底输入的加速度时程记录 ,如图 1 所示。

2.1.3 有限元模型

坝体和地基部分为三维 8 结点单元以及 6 结点退化单元 ,共有 20 107 个单元、22 878 个结点。库水部分高水位时共有 971 个单元、1 201 个结点 ,其中包括库水与坝体-地基系统交界面结点 334 个 ;低水位时共有 583 个单元、756 个结点 ,其中包括库水与坝体-地基系统交界面结点 249 个。坐标轴方向定义为 : x 方向沿横河向 ,指向右岸为正 ; y 方向沿顺河向 ,指向下游为正 ; z 方向为沿高程方向 ,竖直向上为正。

2.1.4 计算工况

计算中考虑了高水位和低水位两种情况。由于有限元网格的原因 ,高水位取为 1 245 m(库水深度 $H = 292$ m) ,低水位取为 1 170 m(库水深度 $h = 217$ m)。

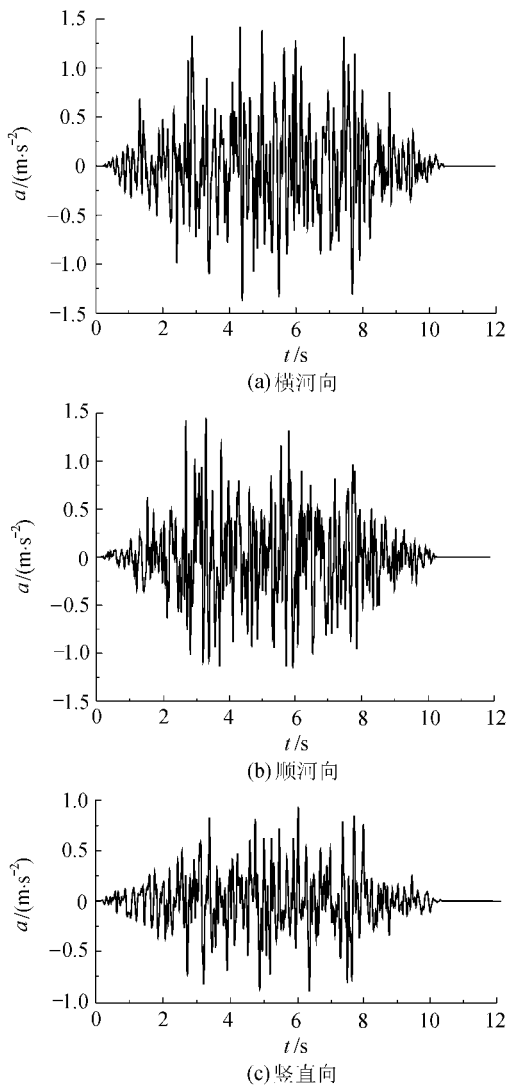


图 1 小湾人工地震波

高水位时 ,选取的计算工况淤砂层厚度分别为 0 , 0.10 H , 0.20 H , 0.33 H 和 0.50 H ,低水位时选取的计算工况淤砂层厚度分别为 0 , 0.10 h , 0.25 h 和 0.50 h 。

2.2 计算结果

选取坝体上游面的 5 个位置点进行动力反应观察 ,分别为 :拱冠梁顶点 ,坝顶拱圈右 1/4 点 ,坝顶拱圈左 1/4 点 ,拱冠梁中点和拱冠梁底点 ,即图 2 中 A , B , C , D , E 点。

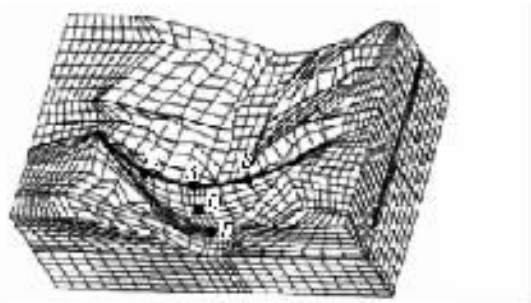


图 2 小湾拱坝坝体-地基有限元网格示意图
(不包括人工边界网格)

2.2.1 位移分析

拱坝在地震荷载作用下,最大位移一般出现在拱冠梁顶点,因此选择拱冠梁顶点(A 点)的位移作为比较分析对象。高水位和低水位情况下,非饱和淤砂层厚度不同时,拱冠梁顶点的位移时程如图 3 所示。从图 3 中可以明显看出库底非饱和淤砂层对于坝顶位移反应的影响比较明显,不仅幅值发生了变化,而且频率也发生了变化。

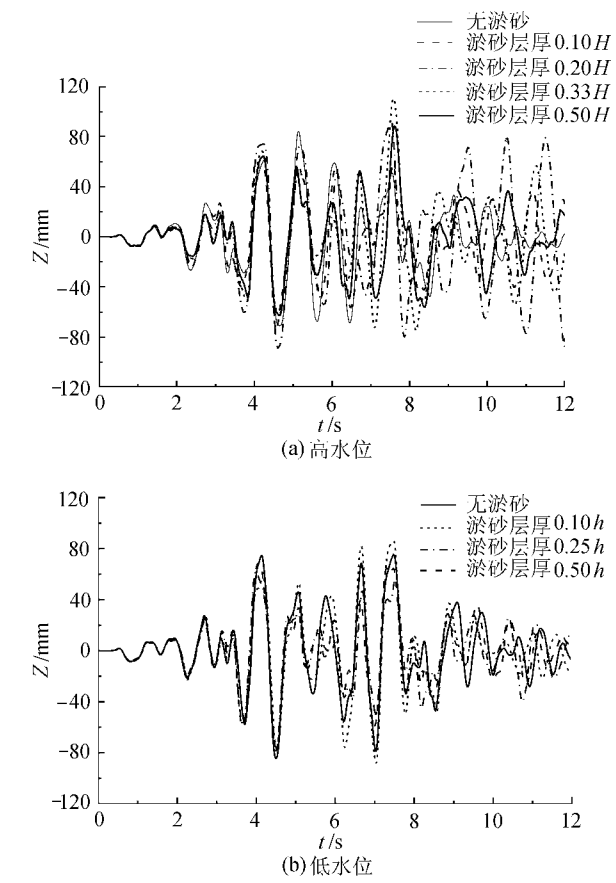


图 3 非饱和淤砂层对上游面拱冠梁顶点顺河向位移的影响

对于高水位情况(如图 3(a)所示),当淤砂层厚度较小时,坝顶位移有增加的趋势,但是当水深达到一定深度以后,随着淤砂层厚度的继续增加,位移变化又有减小的趋势。如拱冠梁顶点顺河向向上游方

向最大位移在无淤砂层时为 71.1 mm,而当淤砂层厚度为 0.10H、0.20H、0.33H 和 0.50H 时相应的位移分别为 75.2 mm、90.0 mm、75.1 mm 和 62.9 mm。其他一些位置点也显示出了类似的趋势(由于篇幅限制,图中没有示出)。

对于低水位情况(如图 3(b)所示),当淤砂层厚度较小时(0.10h),坝顶位移也有所增加,而当淤砂层较厚时,坝顶位移却比无淤砂时有所减小。但是与高水位时相比,低水位时淤砂层引起的坝顶位移变化幅度相对较小。

上述变化主要是由于库底淤砂层的存在,一方面改变了坝体-库水-地基系统原有的自振特性,另一方面改变了坝面动水压力作用,因此使得在相同地震荷载作用下坝体的动力反应发生变化。

2.2.2 应力分析

在拱坝的应力分析中,主要关心的是拱向和梁向应力,因此在表 1 和表 2 中列出了上游面 5 个位置点横河向和竖直向的最大拉应力和最大压应力(分别近似于拱向和梁向应力)。图 4 为拱冠梁顶点(A 点)横河向应力时程和拱冠梁中点(D 点)的竖直向应力时程。

下面分高水位和低水位两种情况进行讨论。

a. 高水位。从表 1 可以看出,非饱和淤砂层对坝面应力最大值的影响比较明显。与不考虑淤砂层的情况相比较,淤砂层的存在有可能使坝面拉应力增加。当淤砂层厚度为 0.20H 时:拱冠梁顶点(A 点)横河向最大拉应力从无淤砂时的 3.36 MPa 增大到 3.70 MPa,增幅为 10.12%;拱冠梁中点(D 点)横河向最大拉应力从 1.92 MPa 增大到 2.36 MPa,增幅为 22.92%,竖直向最大拉应力从 1.40 MPa 增大到 1.64 MPa,增幅为 17.14%。当淤砂层厚度为 0.33H 时,上游面拱冠梁顶点横河向最大拉应力则从无淤砂时的 3.36 MPa 增大到 4.03 MPa。表 1 还表明非饱和淤砂层厚度变化时坝面最大压应力也可能增加,但总体而言压应力绝对值均比较小。进一步从图 4(a)

表 1 不同非饱和淤砂层厚度时坝体上游面主要位置点应力最大值(高水位)

上游面主要位置		最大拉应力 /MPa					最大压应力 /MPa				
		无淤砂层	淤砂厚 0.10H	淤砂厚 0.20H	淤砂厚 0.33H	淤砂厚 0.50H	无淤砂层	淤砂厚 0.10H	淤砂厚 0.20H	淤砂厚 0.33H	淤砂厚 0.50H
拱冠梁顶点	横河向	3.36	3.47	3.70	4.03	3.24	-4.15	-3.06	-3.62	-4.29	-4.19
拱冠梁顶点	竖直向	0.78	1.02	1.10	1.06	0.80	-1.04	-1.05	-1.20	-1.32	-1.44
顶拱右 1/4 点	横河向	1.41	1.39	1.56	1.34	1.41	-1.02	-0.97	-1.30	-1.21	-1.18
顶拱右 1/4 点	竖直向	0.87	0.78	0.81	0.70	0.79	-1.18	-1.11	-0.92	-0.82	-0.84
顶拱左 1/4 点	横河向	1.53	1.26	1.58	1.54	1.48	-1.78	-1.56	-1.71	-1.62	-1.44
顶拱左 1/4 点	竖直向	0.94	1.06	0.87	0.78	1.08	-0.74	-0.93	-0.89	-0.82	-0.65
拱冠梁中点	横河向	1.92	1.59	2.36	1.89	1.87	-1.97	-1.97	-2.71	-2.00	-2.02
拱冠梁中点	竖直向	1.40	1.45	1.64	1.50	1.46	-1.36	-1.56	-1.62	-1.47	-1.46
拱冠梁底点	横河向	1.23	1.42	1.44	1.43	1.27	-1.10	-1.02	-1.36	-1.30	-1.05
拱冠梁底点	竖直向	4.57	4.40	5.27	4.52	3.96	-4.07	-4.11	-5.16	-4.30	-4.09

表 2 不同非饱和淤砂层厚度时坝体上游面主要位置点应力最大值(低水位)

上游面主要位置		最大拉应力/MPa				最大压应力/MPa			
		无淤砂层	淤砂厚 0.10h	淤砂厚 0.25h	淤砂厚 0.50h	无淤砂层	淤砂厚 0.10h	淤砂厚 0.25h	淤砂厚 0.50h
拱冠梁顶点	横河向	3.72	3.52	3.49	3.32	-3.82	-4.45	-3.26	-3.02
拱冠梁顶点	竖直向	1.14	0.97	1.00	1.00	-1.27	-1.20	-1.15	-1.02
顶拱右 1/4 点	横河向	0.98	1.08	1.10	1.11	-1.44	-1.63	-1.20	-1.10
顶拱右 1/4 点	竖直向	1.02	1.18	1.03	1.18	-0.92	-0.82	-0.76	-0.81
顶拱左 1/4 点	横河向	1.67	1.96	1.41	1.52	-1.49	-1.46	-1.42	-1.43
顶拱左 1/4 点	竖直向	0.83	0.88	0.86	0.76	-0.97	-0.83	-0.88	-0.90
拱冠梁中点	横河向	2.22	2.49	1.60	1.79	-2.06	-2.26	-1.52	-2.20
拱冠梁中点	竖直向	1.43	1.75	1.36	1.35	-1.63	-1.49	-1.71	-1.51
拱冠梁底点	横河向	1.29	1.33	1.35	1.35	-1.28	-1.36	-1.12	-1.01
拱冠梁底点	竖直向	4.95	5.33	5.11	5.10	-4.13	-4.23	-4.14	-4.19

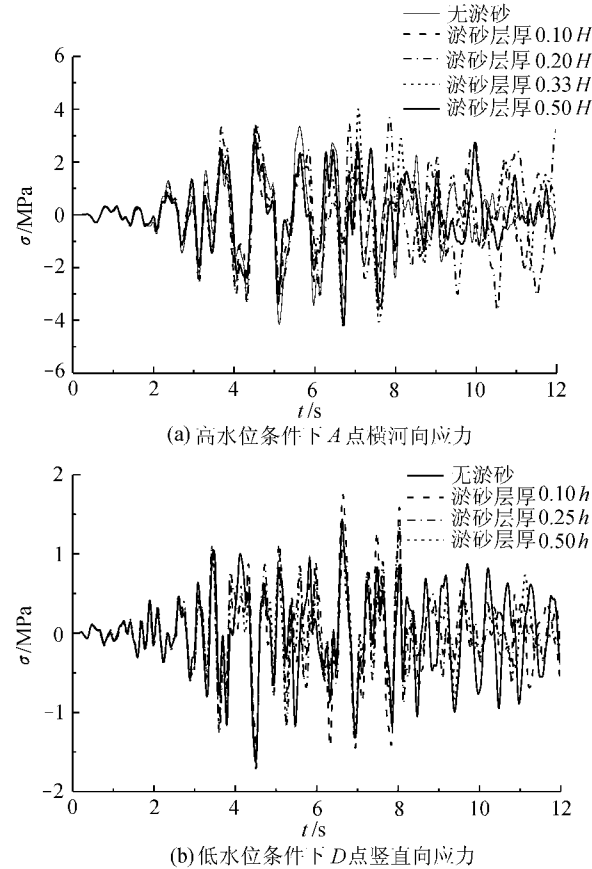


图 4 非饱和淤砂层对上游坝面应力的影响

中可以看出 随着淤砂层厚度的变化 ,在最大拉应力和最大压应力幅值变化的同时应力最大值出现的时刻也在不断变化 ,说明淤砂层的存在不仅改变了坝面动水压力的作用 ,而且使得坝体系统反应的振动频率也发生了变化。

b. 低水位。从表 2 和图 4 (b)可以看出 ,与高水位时相似 ,在低水位情况下非饱和淤砂层的存在不仅使坝面应力最大值发生了变化 ,而且时程也发生了变化。坝面最大拉应力和最大压应力均有可能增加 ,如在淤砂层厚度为 0.10h 时 拱冠梁中点竖直向最大拉应力从无淤砂层时的 1.43 MPa 增大到 1.75 MPa ,横河向最大拉应力从 2.22 MPa 增大到

2.49 MPa ,拱冠梁顶点横河向最大压应力绝对值则从 3.82 MPa 增大到了 4.45 MPa。

3 结 语

本文将库底非饱和淤砂层近似模拟为不同于库水的流体介质 ,采用拱坝-可压缩库水-地基系统地震反应的时域显式有限元分析模型 ,以小湾拱坝为例分析库底非饱和淤砂层厚度的变化对高拱坝地震反应的影响。研究表明 ,由于库底淤砂层的存在使得坝体-库水-地基系统的自振特性改变 ,而且坝面动水压力也与无淤砂层时不相同 ,因此在相同的地震荷载作用下 ,随着库底淤砂层厚度的变化 ,坝体位移和应力不仅幅值不断变化 ,而且应力最大值出现的时刻也不断变化。与无淤砂层的情况相比 ,库底非饱和淤砂层的存在有可能使坝体地震响应增加 ,从而降低高拱坝的抗震安全性。此外 ,与文献 [3] 中的饱和淤砂层情况相比 ,非饱和淤砂层中由于有气体存在 ,其孔隙流体体积模量要小得多 ,因此对小湾拱坝地震反应的影响也较明显。但是这里仍然要指出 ,由于本文仅针对小湾拱坝进行了计算 ,而且只考虑了 1 条地震记录和 1 种淤砂层参数 ,因此还难以得出一般性结论 ,仍需要对这一问题进行系统深入的研究。

参考文献 :

[1] 杜修力 ,王进廷 . 动水压力及其对坝体地震反应影响的研究进展 [J]. 水利学报 ,2001(7):13-21.

[2] ZHANG Chu-han , YAN Cheng-da , WANG Guang-lun . Numerical simulation of reservoir sediment and effects on hydrodynamic response of arch dam[J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics 2001 ,30 :1817-1837.

[3] 王进廷 ,唐庆 ,杜修力 . 库底饱和淤积砂层对高拱坝地震反应的影响研究 [J]. 水力发电学报 ,2006 ,25(2):11-15.

[4] 杜修力 ,王进廷 . 拱坝-可压缩库水-地基地震波动反应分析 [J]. 水利学报 ,2002(6):83-90.

(收稿日期 2006-03-29 编辑 高建群)