

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.01.015

# 某消力池泄洪引发近场振动的三维有限元动力分析

殷荣岗<sup>1,2</sup>, 张建海<sup>1,2</sup>, 刘喜康<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学 水力学及山区河流开发与保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 四川大学 水利水电学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 某水电工程下闸蓄水以后, 消力池泄洪消能引发了近场振动, 致使附近建筑有轻微晃动。为了能够准确分析近场振动机理, 采用三维有限元动力计算方法反演计算参数并进行动力响应分析。计算结果表明, 近场振动最大值出现在覆盖层最厚的育才路, 最大加速度为 0.30 gal; 距离消力池较近的云天化幼儿园振动反而较弱, 最大加速度为 0.10 gal。近场振动沿着育才路形成一条传播路径, 符合实际规律。可见育才路地基覆盖层没有良好吸波减震效应, 而云天化幼儿园地基中发育的裂隙、断层是导致云天化幼儿园晃动减弱的主要原因。

**关键词:** 消力池; 泄洪消能; 近场振动; 反演分析

中图分类号: TV653

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)01-0072-05

## 3D Dynamic FEM Analysis of Near-field Vibration Caused by Flood Discharge and Energy Dissipation of a Stilling Pool

YIN Rong-gang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jian-hai<sup>1,2</sup>, LIU Xi-kang<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Development and Protection, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. College of Water Resources & Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

**Abstract:** After the impoundment of a hydropower project, the near-field vibration was caused by the flood discharge and energy dissipation of a stilling pool, which had slight effect on nearby buildings. In order to accurately analyze the mechanism of the near-field vibration, the 3D dynamic FEM is used to backly analyze the choosing parameters such as damping ratio and deformation modulus and make the study on the seismic response of nearby buildings. The results show that the calculated maximum vibration value occurs in Yucai Road which has the most thick overburden layer, and the maximum acceleration reaches 0.30gal. However, the vibration of Yuntianhua Kindergarten near the stilling pool is not obvious, and the maximum acceleration value is 0.10gal. The near-field vibration propagates along Yucai Road, which accords with the practical law. It is clearly seen that the overburden layer under Yucai Road plays less role in reducing the vibration, and there are the fracture and fault in the foundation of Yutianhua Kindergarten, which are the main reason of vibration reducing.

**Keywords:** stilling pool; flood discharge and energy dissipation; near-filed vibration; back analysis

某水电站挡水建筑物为混凝土重力坝, 最大坝高 162.00 m。泄洪坝段位于河床中部略靠右岸, 12 个表孔 10 个中孔间隔布置, 由中隔墙分隔成两个对称的消能区。电站采用高低坎消力池消能, 由中导墙分割为左右对称的双池, 消力池末端设尾坎, 尾坎后接海曼。电站遇小洪水时表、中孔单独开启泄洪, 遇大洪水时表、中孔联合泄洪。

2012 年 10 月 10 日该水电工程下闸蓄水, 随后附近县城居民陆续反映: 云天化幼儿园门窗有连续晃动, 育才路两侧门面卷帘门连续晃动, 部分居民家中出现家具颤动, 吊灯摆动情况。为此, 本文对包括某混凝土重力坝、坝身孔口、消力池等主要结构, 以及晃动现象发生的主要区域进行详细建模, 对不同反演工况进行有限元动力计算<sup>[1]</sup>, 对比实测值确

定最优反演工况,结合该工况的计算结果,对出现晃动区域的位移、速度和加速度进行了详细分析。

## 1 研究条件

### 1.1 计算软件简介

本文有限元分析采用四川大学开发的水工岩土问题二维和三维静动力非线性有限元分析程序NASGEWIN。该分析系统先后成功地应用于国家“七·五”、“八·五”、“九·五”攻关课题及二滩、锦屏一级、紫坪铺、官地、瀑布沟等二十多个重大工程项目研究,取得了良好的效果,并在工程实践中不断丰富完善,现已具备很强的分析功能。

### 1.2 计算范围及结构离散

该消力池振动分析的三维有限元模型范围: $X$ 方向为顺河向,由上游指向下游,截取总长为3 600 m; $Y$ 方向为铅直向,从50 m高程延伸至800 m高程; $Z$ 方向为横河向,沿该方向整个区域划为69个桩号,其中消力池范围内有49个桩号,由左岸桩号0 m取至右岸桩号0+3246 m。三维计算模型共计离散为78 759个节点和72 908个单元。有限元计算<sup>[2-3]</sup>三维模型如图1所示。

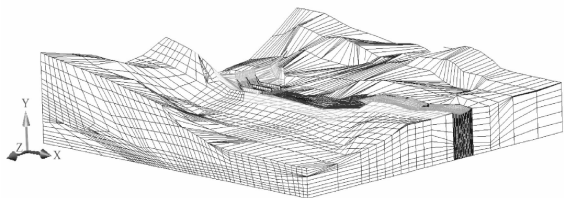


图1 有限元计算的三维模型

### 1.3 物理力学参数

混凝土密度:2.4 t/m<sup>3</sup>,弹性模量:25.5 GPa,泊松比:0.167,内摩擦系数:1.5,凝聚力:2 MPa,阻尼比:0.04。各类材料动变形模量取静变形模量的1.3倍,岩体物理力学参数见表1。

表1 各类岩体的物理力学参数

岩类	弹模 $E$ /GPa	泊松比 $\nu$	容重 $\rho$ /(t·m <sup>-3</sup> )	抗剪断强度		阻尼比
				$f$	$C$ /MPa	
$Q_4^i$	0.33	0.42	2.02	0.45	0.10	0.060
$Q_4^{al}$	0.36	0.38	2.10	0.45	0.10	0.060
$Q_4^{coll}$	0.30	0.48	2.00	0.45	0.10	0.060
$J_{1-2Z}$	3.00	0.33	2.58	0.55	0.30	0.035
$T_3^d$	7.30	0.28	2.60	0.99	1.00	0.055
$T_3^s$	4.50	0.31	2.60	0.85	0.75	0.045
$T_3^{-5}$	7.30	0.28	2.60	0.90	0.85	0.055

表中:Q-覆盖层,J-软弱夹层,T-基岩

### 1.4 约束与作用荷载

消力池泄洪消能引发近场振动分析模型选择区域较大,覆盖11.69 km<sup>2</sup>的范围。近场振动传到模型边界时完全可以忽略,因此计算中前后左右下边界施加 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三向约束。

近场振动主要由下泄水流与表中孔流道、表中孔隔墙、消力池底板、消力池导墙等相互碰撞产生。有限元动力计算分析时,通过模型试验得出出水荷载,施加于消力池及表中孔上,以此来模拟某消力池泄洪消能引发的振动。

## 2 反演分析

### 2.1 反演方法研究思路

该消力池泄洪消能引发振动分析模型的计算范围较大。计算范围内揭露有断层,岩体节理裂隙发育,工程地质条件相当复杂,岩体的阻尼系数与变形模量难以准确确定。

鉴于以上原因,本文采用反演分析方法<sup>[4-7]</sup>,按照以下反演思路进行分析:

(1) 充分模拟场区工程地质条件,特别是对振动起阻止缓冲作用的断层和破碎带,进而计入泄洪动力荷载作用,进行动力响应分析。

(2) 通过变化地基阻尼和变模,使计算模型振动与实测达到接近的反演要求。

### 2.2 反演分析过程

#### 2.2.1 实测值选取

近场振动主要体现如下特点:振动较为明显的区域主要包括育才路两侧和云天化幼儿园附近的建筑物,尽管云天化幼儿园附近的建筑物距离消力池更近,但是育才路两侧建筑物振动明显较大。育才路两侧建筑物、云天化幼儿园附近建筑物和消力池位置相对关系如图2所示。



图2 育才路、云天化幼儿园与消力池的位置

为此选择育才路两侧建筑物和云天化幼儿园附近建筑物的实测值作为反演的参考值(如表2所示)。

表 2 位移、速度、加速度的实测峰值

位置	位移/ $\mu\text{m}$	速度/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	加速度/ $\text{gal}$
育才路	79.76	0.26	0.17
云天化幼儿园	11.01	0.05	0.07

### 2.2.2 反演工况

综合分析育才路两侧建筑物和云天化幼儿园附近建筑物的实测值,按照反演分析方法的研究思路,在合理控制范围内,不断搜索拟合后,拟定四种反演分析工况,四种反演工况的详细情况如表 3 所示。

表 3 反演分析工况

反演工况	研究条件
1	所有材料参数按表 1 选取
2	云天化幼儿园附近位置 20 m 深度范围内材料阻尼比取 0.4,其他材料按表 1 选取
3	云天化幼儿园附近位置 20 m 深度范围内材料阻尼比取 0.4,变形模量取 20 GPa,其他材料按表 1 选取
4	云天化幼儿园附近位置材料阻尼比取 0.6,其他材料按表 1 选取

### 2.2.3 计算结果反演分析

(1) 如图 3 所示,工况 1 和工况 2 条件下,育才路两侧和云天化幼儿园附近建筑物的计算位移和实测位移差距较大。工况 3 和工况 4 条件下,育才路两侧建筑物最大计算位移大于云天化幼儿园附近建筑物最大计算位移,与实测规律相符。工况 3 和工况 4 条件下,云天化幼儿园附近建筑物最大计算位移分别为  $7.500 \mu\text{m}$  和  $10.100 \mu\text{m}$ ,接近实测位移峰值  $11.010 \mu\text{m}$ ;工况 3 和工况 4 条件下,育才路两侧建筑物最大计算位移分别为  $17.500 \mu\text{m}$  和  $17.600 \mu\text{m}$ ,小于实测位移峰值  $79.760 \mu\text{m}$ 。

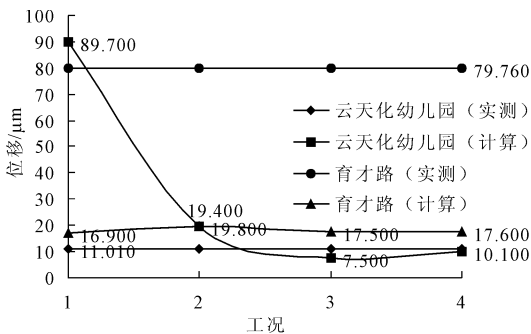


图 3 最大计算位移与实测位移峰值

(2) 在不同反演工况下,育才路两侧和云天化幼儿园附近建筑物的计算速度和实测速度如图 4 所示。计算速度和实测速度在工况 1 和工况 2 条件下

有较大差距。在工况 3 和工况 4 条件下,育才路两侧建筑物计算速度最大值大于云天化幼儿园附近建筑物计算速度最大值。云天化幼儿园附近建筑物的计算速度最大值分别为  $0.072 \text{ mm/s}$  和  $0.085 \text{ mm/s}$ ,接近实测峰值  $0.050 \text{ mm/s}$ ;育才路两侧建筑物的计算速度最大值分别为  $0.205 \text{ mm/s}$  和  $0.251 \text{ mm/s}$ ,接近实测峰值  $0.260 \text{ mm/s}$ 。

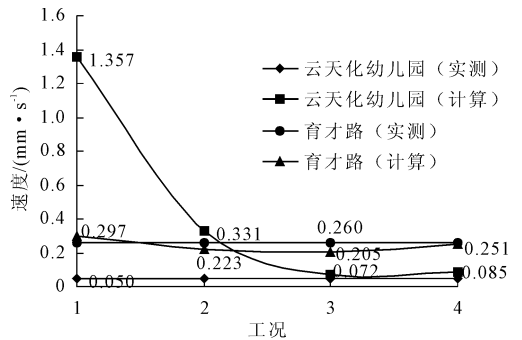


图 4 最大计算速度与实测速度峰值

(3) 如图 5 所示,工况 1 和工况 2 条件下,计算加速度和实测加速度不同。在工况 3 和工况 4 条件下,对于计算加速度最大值,育才路两侧建筑物大于云天化幼儿园附近建筑物,符合实测规律。云天化幼儿园计算加速度最大值分别为  $0.112 \text{ gal}$  和  $0.192 \text{ gal}$ ,接近实测值  $0.074 \text{ gal}$ ;育才路两侧建筑物计算加速度最大值分别为  $0.30 \text{ gal}$  和  $0.382 \text{ gal}$ ,和实测峰值  $0.175 \text{ gal}$  接近。

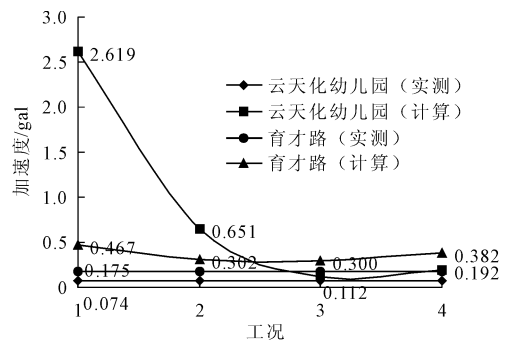


图 5 最大计算加速度与实测加速度峰值

综上所述,工况 3 和工况 4 条件下,位移、速度、加速度计算最大值与实测峰值都比较接近,且都符合育才路两侧建筑物大于云天化幼儿园附近建筑物的规律。相比工况 4 的参数,工况 3 提高云天化幼儿园位置覆盖层的变形模量达  $20 \text{ GPa}$ ,缺乏勘测数据支持。因此选取工况 4 的计算结果进行有限元动力详细分析<sup>[8-11]</sup>。

### 3 有限元动力分析

#### 3.1 动位移分析

(1) 桩号 0 + 1661.15 m 经过云天化幼儿园附近,顺河向位移等值线图如图 6 所示。云天化幼儿园顺河向位移最大值约为 10.00  $\mu\text{m}$ ,没有出现位移等值线集中现象。由图 7 可见,桩号 0 + 2261.15 m 经

过育才路,育才路顺河向最大位移为 18.00  $\mu\text{m}$ ,育才路出现位移等值线集中现象。育才路地基有厚约 80 m 的覆盖层,云天化幼儿园地基覆盖层厚约 25 m,云天化幼儿园地基发育断层、裂隙。可见覆盖层对消力池的阻尼效应并不显著,云天化幼儿园以下发育的断层、裂隙对振动产生主要阻尼效应。

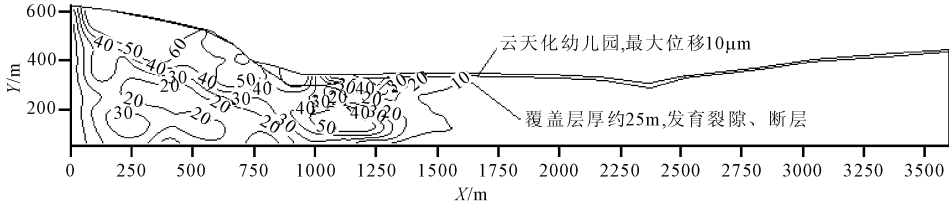


图 6 0 + 1661.15m 顺河向位移等值线图 ( $\mu\text{m}$ )

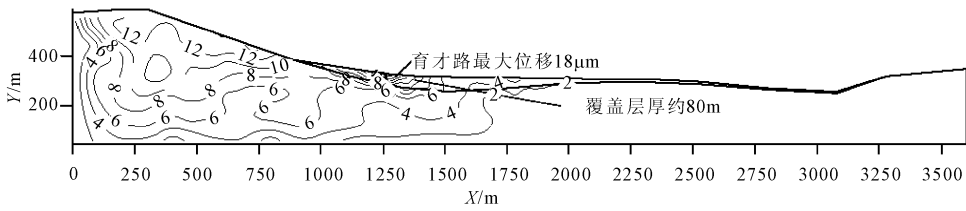
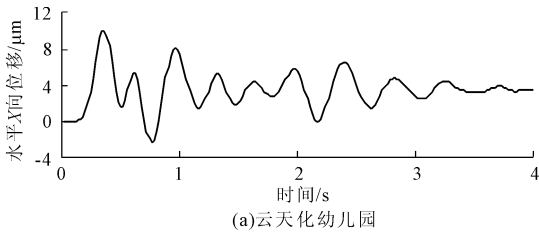


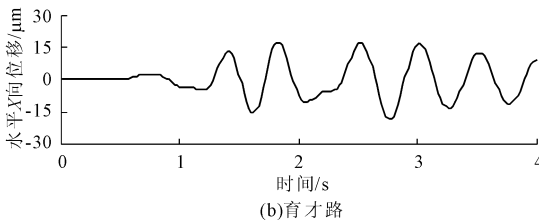
图 7 0 + 2261.15m 顺河向位移等值线图 ( $\mu\text{m}$ )

(2) 育才路和云天化幼儿园位置水平向位移随时间变化规律如图 8 所示。由图 8(a)可见,消力池振动后 0.2 s,云天化幼儿园起振,振动频率约为 1.5 Hz ~ 3 Hz,且随着消力池泄洪消能持续振动。由图 8 (b)可见,消力池泄洪消能开始后约 0.4 s,育才路起振,振动频率约为 1.5 Hz ~ 2.5 Hz,并随着消力池泄洪消能持续振动。相比云天化幼儿园,育才路距离消力池更远,起振时刻更晚。

线如图 9 所示。由图 9 可见,育才路水平向速度计算最大值约为 0.20 mm/s,且水平向出现速度等值线集中的现象,沿育才路形成振动传播路径。云天化幼儿园水平向速度计算最大值约为 0.10 mm/s,没有出现速度等值线集中的现象。



(a)云天化幼儿园



(b)育才路

图 8 水平向位移时程图

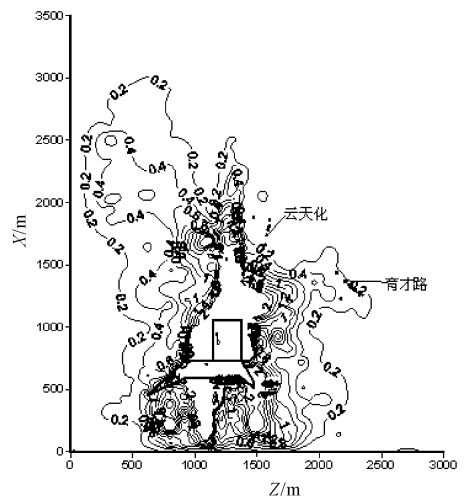


图 9 水平向速度等值线 ( $\text{mm/s}$ )

(2) 消力池泄洪消能引发近场振动计算加速度等值线图如图 10 所示。育才路水平向最大计算加速度约为 0.30 gal,加速度等值线在育才路位置附近集中。云天化幼儿园水平向最大计算加速度约为 0.15 gal,且等值线分布稀疏。

#### 3.2 速度与加速度分析

(1) 消力池泄洪消能引发近场振动的速度等值

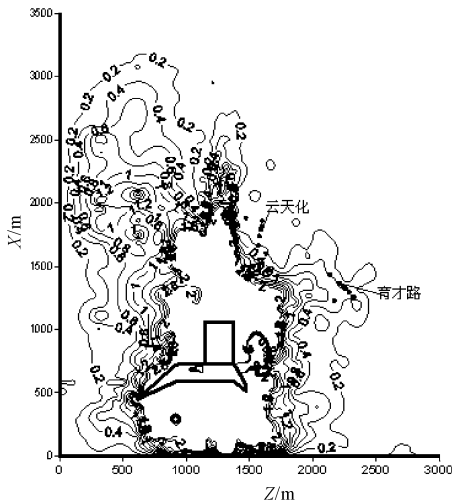


图 10 水平向加速度等值线图 (gal)

## 4 结 论

采用反演分析方法,对比实测结果,对某消力池泄洪消能引发近场振动进行有限元分析。得到以下几点结论:

(1) 反演工况 4 条件下,育才路与云天化幼儿园位移、速度、加速度的计算最大值都接近实测峰值,符合实测值规律,因此采用工况 4 进行有限元动力分析是合理的。

(2) 对近场振动进行有限元动力分析后,发现距离消力池较远且覆盖层最厚的育才路计算值最大,覆盖层较薄、基础发育断层和裂隙的云天化幼儿园计算值较小。由此可见,覆盖层没有很好的吸收消力池引发的振动,而断层和裂隙则产生较大的阻尼效应,减小了云天化幼儿园位置的振动。

(3) 育才路和云天化幼儿园位置计算位移、速度和加速度的变化规律,揭示出育才路和云天化幼儿园位置的振动规律:振动沿着育才路形成一条传播路径,而由于断层和裂隙的阻尼效应,云天化幼儿园附近振动较为微弱。

## 参考文献:

- [1] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [2] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [3] 刘武军,陈尧隆,司政,等.沥青混凝土心墙坝三维有限元动力分析[J].水资源与水工程学报,2009,20(6):152-156.
- [4] 徐波,夏辉.某混凝土重力坝温度线膨胀系数反演分析[J].水力发电,2010,36(10):34-37.
- [5] 何吉,徐青,陈胜宏.裂隙岩体渗透特性反演分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(A01):2730-2734.
- [6] 刘贝贝,张岚,金秋.基于位移场混合模型的棉花滩大坝弹性模量反演分析[J].水力发电,2010,36(3):55-58.
- [7] 朱晟,张美英,戴会超.土石坝沥青混凝土心墙力学参数反演分析[J].岩石力学,2009,30(3):635-639,644.
- [8] 焦爱萍,刘宪亮,许新勇.宝泉浆砌石重力坝三维有限元动力分析[J].水利水运工程学报,2007,3(1):36-39.
- [9] 王金龙.重力坝抗震性能有限元分析[J].潍坊学院学报,2010,10(6):113-115.
- [10] 李泽,姚激.基于振型分解反应谱法重力坝三维有限元动力分析[J].中国农村水利水电,2010,6(3):124-126,129.
- [11] 殷荣岗,张建海,刘喜康.大岗山高拱坝坝肩刚体弹簧元抗滑稳定分析[J].水利与建筑工程学报,2012,10(3):121-125.

(上接第 20 页)

- [3] 李宏伟.降雨入渗条件下土质边坡非饱和和渗流二维数值分析[J].水资源与水工程学报,2010,21(6):133-136.
- [4] 周家文,徐卫亚,邓俊峰,等.降雨入渗条件下边坡的稳定性分析[J].水利学报,2008,39(9):1066-1073.
- [5] 李亮,刘宝琛.降雨入渗条件下边坡极限承载力的分析[J].铁道学报,2002,24(4):109-113.
- [6] 王协群,张有祥,皱维列,等.降雨入渗条件下非饱和路堤变形与边坡的稳定数值模拟[J].岩土力学,2010,31(11):3640-3644,3655.
- [7] 詹良通,吴宏伟,包承纲,等.降雨入渗条件下非饱和和膨胀土边坡原位监测[J].岩土力学,2003,24(2):151-158.
- [8] 徐晗,朱以文,蔡元奇,等.降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J].岩土力学,2005,26(12):1957-1962.
- [9] 周利杰,方云.降雨作用下反倾岩质边坡尖点突变模型研究[J].水利与建筑工程学报,2008,6(4):130-140.
- [10] 朱伟,陈学东,钟小春.降雨入渗规律的实测与分析[J].岩土力学,2006,27(11):1873-1879.
- [11] 荣冠,张伟,周创兵.降雨入渗条件下边坡岩体饱和和非饱和和渗流计算[J].岩土力学,2005,26(10):1545-1550.
- [12] 乔娟,张立仁,阮祥明.三峡库区滑坡土体降雨产流及入渗试验研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(5):183-188,193.
- [13] 戚国庆,黄润秋,速宝玉,等.岩质边坡降雨入渗过程的数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2003,22(4):625-629.
- [14] 朱元骏,邵明安.含砾石土壤降雨入渗过程模拟[J].水科学进展,2010,21(6):779-787.
- [15] 中国水利水电第七工程局.复杂地质高陡边坡施工技术与安全控制稳定性报告[R].成都:中国水利水电第七工程局,2010.