

# 基于地震风险分级响应的库水-淤砂层-坝体-坝基体系地震响应分析

代凌松 蔺如伟 李奎 陶源涛 李福雄

云南华电金沙江中游水电开发有限公司阿海发电分公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i6.2374

**[摘要]** 在地震灾害频发的今天,地震对水库大坝的运行稳定性造成严重威胁。为此,本文以阿海电站大坝为研究对象,提出了科学合理的地震风险分级响应策略,并系统研究了库水、淤砂层、坝体及坝基在地震中的相互作用与影响机制,以为大坝震后维护提供参考。

**[关键词]** 地震风险分级响应; 库水-淤砂层-坝体-坝基体系; 阿海电站大坝; 强震监测系统  
**中图分类号:** P315 **文献标识码:** A

## Seismic response analysis of reservoir-silt layer-dam-body-dam foundation system based on earthquake risk classification response

Lingsong Dai Ruwei Lin Kui Li Yuantao Tao Fuxiong Li

Ahai Power Generation Branch Company, Yunnan Hua Dian Jinsha River Midstream Hydropower Development Co., Ltd.

**[Abstract]** In the era of frequent seismic disasters, the operational stability of reservoir dams faces severe threats. This study focuses on the Aha Hydropower Station Dam, proposing a scientifically sound seismic risk classification and response strategy. It systematically investigates the interaction and influence mechanisms among reservoir water, silt layers, dam body, and foundation during earthquakes, aiming to provide references for post-earthquake dam maintenance.

**[Key words]** earthquake risk classification and response; reservoir water-silt layer-dam body-dam foundation system; Ahaishan Power Station dam; strong earthquake monitoring system

### 引言

在水电站运行安全管理中,大坝安全突发事件应急处理属于核心部分。常见的应急事件主要包括地震、暴雨以及洪水等,这类事件均具有突发性、异常性<sup>[1]</sup>。一旦发生,会使得库区水位上涨、坝体出现裂缝等事故,严重影响坝体的安全性。

在大坝安全应急管理中,预防与准备是重点,通过对应急事件进行快速响应,及时评估大坝安全性。

鉴于此,本文以阿海电站大坝为研究对象,针对大坝运行情况,提出了合理的地震风险分级响应策略,进而确保大坝安全稳定的运行。

### 1 阿海电站大坝强震监测系统改造概述

阿海水电站坝址位于云南省丽江市玉龙县(右岸)与宁蒗县(左岸)交界的金沙江中游河段,属大(1)型一等工程,主要建筑物为一级建筑物,以发电为主,兼顾防洪、灌溉等综合利用。为有效提升大坝运行的安全性,对大坝强震监测系统进行了改造。

在进行改造后,在强震观测系统中引入一体化强震动加速度仪,具有量程高、动态范围大、记录频带宽、智能化程度高的特点。应用的一体化强震动加速度仪其测量范围为 $\pm 4g$ ,动态范围 $\geq 135db$ ,频率响应程度为 $0\sim 280Hz$ ,数据采集器为28位的宽动态范围采集器,满量程范围为 $\pm 10V$ ,观测系统的监测能力可监测到 $0\sim 280Hz$ 的强震动反应,大大提高了系统的监测能力。地震发生后,强震系统接收水库台网地震速报信息,自动计算本次地震的大坝峰值加速度和烈度,然后主动发送到大坝自动化观测系统,自动化观测系统根据接收到的强震信息,自动启动观测,及时进行采集测量的任务。

### 2 地震风险分级响应策略

在发生地震后,地震对水电站的影响与地震震级、震源深度,以及水电站坝址区与震中的直线距离等因素有着直接联系<sup>[2]</sup>。对于等级越高的地震,其释放的能量相对较大,所造成的灾害也越严重。对于震源深度,其主要分为浅源地震、中源地震以及深源

地震。当震源深度处于0-60km之间时,则为浅源地震,处于60-300km之间时,则为中源地震,大于300km时,为深源地震。在地震等级相同的情况下,震源深度越浅,地震对地面的影响越大,所造成的破坏就越严重<sup>[3]</sup>。

在水电站大坝运行过程中,可通过“烈度”对地震的影响程度进行衡量的指标。通过“烈度”,不仅可以反映地震强度,还能反映场地因素的作用和建筑物的抗震能力。不同级别地震“烈度”所造成的灾害详见表1。

表1 地震“烈度”与造成的灾害

烈度	造成的灾害	仪器测定的地震烈度 $I$
I	—	$1.0 \leq I < 1.5$
II	—	$1.5 \leq I < 2.5$
III	—	$2.5 \leq I < 3.5$
IV	—	$3.5 \leq I < 4.5$
V	—	$4.5 \leq I < 5.5$
VI	河岸、松软土地出现少量裂缝	$5.5 \leq I < 6.5$
VII	河岸塌方、松软土地出现大量裂缝	$6.5 \leq I < 7.5$
VIII	干硬土地出现少量裂缝、基岩错动、塌方	$7.5 \leq I < 8.5$
IX	干硬土地出现大量裂缝、基岩错动、塌方	$8.5 \leq I < 9.5$
X	山崩和地震断裂出现	$9.5 \leq I < 10.5$
XI	地震断裂延续大、大量山崩滑坡	$10.5 \leq I < 11.5$
XII	地面剧烈变化,山河改观	$11.5 \leq I \leq 12.0$

根据汶川地震溃坝险情土石坝统计显示,土石坝处于V度区时,并未发生险情;处于VI度区时,坝体出现裂缝,且伴有沉陷、渗透等情况。随着“烈度”不断增加,裂缝、沉陷、渗透等震害逐渐严重<sup>[4]</sup>。

基于上述分析,结合大坝安全运行状态监测的重要性,在地震“烈度”小于等于V度时,大坝不会出现险情,但需密切关注大坝水位变化情况、坝体渗流等;在地震“烈度”处于V度至VI度之间时,大坝虽然并未表现出显著的震害,但需加强坝体结构的监测;在地震“烈度”大于VI度及以上时,坝体可能会出现裂缝、渗透等震害,此时需对坝体进行全面检测,为险情的控制提供依据。同时,还需加强坝体重点部位的巡视。基于“烈度”等级,选择对应的监测项目,开展震前震后的数据对比,分析地震对坝体的影响程度,并精准识别影响最大的位置。

对于阿海水电站坝,其布设了13个测点,并对强震监测系统进行了改造,可自动监测地震对大坝的影响程度,并以此为基础,构建地震震级、震中距与待响应的监测项目关系,具体详见表2。

在获取相应的地震信息后,便可根据上表中的地震震级及水电站大坝所在位置与震中的距离,启动应急响应监测项

目,以此来分析大坝是否受到地震的影响,并识别地震影响较大的区域。

表2 安全监测项目地震响应对照

震级 $M$	震中距	响应级别	安全监测响应项目
$M < 3$	—	IV级	巡视重点部位
$3 \leq M < 4.5$ (有地震)	$< 30$	II级	监测坝体水位、震动以及变形
	$[30, 50)$	III级	监测坝体水位、震动以及变形
$4.5 \leq M \leq 6$ (中强震)	$< 30$	I级	全面安全监测、全面巡视检查
	$[30, 50)$	II级	监测坝体水位、震动以及变形
	$[50, 100)$	III级	监测坝体水位、震动以及变形
$6 \leq M < 7$ (强震)	$< 70$	I级	全面安全监测、全面巡视检查
	$[70, 150)$	II级	监测坝体水位、震动以及变形
	$[150, 300)$	III级	监测坝体水位、震动以及变形
$7 \leq M < 8$ (大地震)	$< 600$	I级	全面安全监测、全面巡视检查
$M \geq 8$ (巨大地震)	$< 800$	I级	全面安全监测、全面巡视检查

### 3 库水-淤砂层-坝体-坝基体系地震响应分析

#### 3.1 库水响应分析

在发生地震后,大坝库水会产生相应的波动。在其波动过程中,会对大坝产生动水压力。通过强震监测系统对其进行监测,可分析不同地震风险等级下库水的波动程度以及对坝体的动水压力<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 淤砂层响应分析

在大坝库底,通常含有淤砂层,当地震波在淤砂层中传播时,通常会出现衰减的情况。通过强震监测系统对其进行检测,可深入分析地震波在淤砂层中的衰减特性,为评估坝体的稳定性提供依据。

#### 3.3 坝体响应分析

在地震发生后,坝体会产生相应的振动,通过分析坝体材料性能、结构形式及地震动参数等因素,可对坝体的抗震性能进行评估。同时,通过监测不同地震等级下坝体的响应数据,可分析坝体在震后是否存在破坏,以便于实际进行加固<sup>[6]</sup>。

#### 3.4 坝基响应分析

在地震发生后,坝基可能会出现不同程度的形变与沉降。通过分析强震监测数据,可进一步了解坝基在不同地震风险等级下的变形与沉降规律,并分析其在地震影响下的承载力。

### 4 响应体系应用

2025年10月9日,距离阿海电站大坝300km处的四川甘孜州新龙县5.4级地震,震中距45km。根据地震分级响应标准,启动地震事件安全监测项目II级响应,并在震后现场采集库水位、坝体渗流、坝体变形、防渗体应力应变等监测数据,对坝体的运行稳定性进行分析,并对坝体重点部位进行巡视<sup>[7]</sup>。

#### 4.1 效应量震后变化情况

在大坝运行过程中,库水位属于主要效应量,需重点关注其数据波动特征及地震工况下的响应表现。震前水位高程为1420.60m,震后为1420.64m,水位变化量为0.04m,变化率为0.0045%,二者均处于较低水平。同时,为进一步分析水位波动幅度,研究计算了水位波动比,即:

$$q_i = \frac{|d_i - \bar{d}|}{\sigma} \quad (1)$$

式(1)中, $d_i$ 表示第*i*次观测的跳动特征值; $\bar{d}$ 表示跳动特征的算术平均值; $\sigma$ 表示跳动特征的均方差。若 $q_i > 3$ ,则表示异常波动。经计算得知, $q_i = 0.78 < 3$ ,说明地震导致的水位波动幅度较小,不会造成相应的险情。

结合坝址区历史地震资料,统计显示地震工况下库水位变化区间为-0.32~1.25m。相较于本次地震后的实际水位变化,库水的水位变化受地震影响较小,不会影响大坝运行的安全性。

#### 4.2 影响量震后变化情况

通过分析后得知,在坝体内部产生的不同程度的沉降,且其余监测项目出现异常波动。其中,坝体应力数据异常波动较大,坝后渗流量、绕坝渗流监测项目在水库水位变化幅度不大的情况下,地震前后出现了数据波动异常。

从整体上来讲,基于地震风险分级响应的地震响应体系可精准识别坝体异常点的安全等级,可对坝体安全运行稳定性进行有效评估,并可进行及时的风险预警<sup>[8]</sup>。

#### 5 结语

为有效提升地震作用下大坝的运行稳定性与安全性,本文

以阿海电站大坝为研究对象,针对实际需求,提出了地震风险分级响应策略,并对库水-淤砂层-坝体-坝基体系地震响应特性进行分析。研究表明,通过构建地震风险分级响应策略,可实现坝体安全运行稳定性的评估,为坝体的维护提供依据。

#### [参考文献]

- [1]尹光耀,张怀,石耀霖.梯级水坝的地震触发级联效应:以溪洛渡和向家坝水库为例[J].地球物理学报,2023,66(6):2470-2488.
- [2]张洪刚.地震作用对水库混凝土大坝的损伤分析[J].水利科技与经济,2025,31(5):47-51.
- [3]蒋复量,吴浩楠,刘永,等.基于灰色关联度和变权理论的地震条件下轴尾矿库群坝安全评价研究[J].南华大学学报:自然科学版,2020,34(1):7.
- [4]危成昊.复杂地质条件下某水库渗漏原因及工程措施研究[J].工程机械与维修,2025(5):38-40.
- [5]黄帅,程思博,钱海涛,等.地震作用下深水坝坡动水压力分布特性及影响因素分析[J].应用基础与工程科学学报,2024(3):11.
- [6]郑伟.不同类型地震波作用下龙河口水库大坝动力响应特征研究[J].水利技术监督,2025(7):17.
- [7]刘艳国,王海城,张瑞卿.承德“6·17”地震对双峰寺水库大坝安全影响的分析[J].水科学与工程技术,2023(6):72-74.
- [8]罗力谦,张移,朱嘉健,等.乐昌峡大坝地震响应分析[J].华南地震,2021,41(3):55-62.

#### 作者简介:

代凌松(2002--),男,汉族,云南曲靖人,本科,学士,研究方向:大坝安全监测。