

文章编号:2097-096X(2022)04-0362-07

强震作用下水电站沉沙池右边墙非线性动力时程分析

王伟¹, 梁辉², 冯径军¹, 范建朋¹, 郭胜山²

(1. 中国电建集团 西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 本文基于现有“L型”沉沙池右边墙无质量地基模型的线弹性动力分析研究结果, 进一步通过考虑沉沙池右边墙-地基接触非线性以及地基辐射阻尼效应, 开展了最大设计地震(MDE, max design earthquake)下的非线性动力分析, 综合评估了右边墙墙根抗剪、抗弯性能以及墙体与地基接触面滑动和张开情况, 结果表明: MDE作用下, 右边墙墙根弯矩时程均低于需求能力比(DCR, demand to capacity ratio)允许值, 剪力时程存在一定持时范围超过DCR允许值, 有发生剪切破坏的可能性, 可以通过在墙体根部配置剪力筋, 增强其抗剪性能。此外, 地震结束后, 沉沙池右边墙-地基接触面最终处于闭合状态, 表明其具有较好抗倾覆能力。本文针对沉沙池右边墙开展的非线性动力分析可为抗震设计提供科学依据, 亦可为强震区沉沙池结构的抗震分析提供参考。

关键词: 沉沙池右边墙; 接触非线性; 地基辐射阻尼效应; 非线性动力分析; 需求能力比

中图分类号: TV73

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20210078

1 研究背景

沉沙池作为重要进水建筑物, 它通过加大过水断面、减小流速和挟沙力使得有害泥沙沉淀在沉沙池池腔内, 兼具排泥沙、引清水入引水道功能。

目前大多数研究成果主要是针对沉沙池的结构布置、设计和流场等方面。陈锐等^[1]针对实际工程地形地址条件, 对某小型水电站沉沙池布置、结构设计等开展了详细的研究论证, 优化了沉沙池的功能。李志乾等^[2]针对CCS水电站大型连续式沉沙池布置、冲沙系统设计、水力设计等方面开展了研究, 首次采用了SEDICON冲沙系统, 能够为沉沙池设计提供借鉴作用。孔伟^[3]对西藏觉巴水电站沉沙池包括沉沙池布置、水力计算、沉沙池模型试验以及结构设计等方面进行了系统的介绍, 通过实际运行反馈得到该水电站沉沙池结构布置和设计的合理性, 冲沙效果良好, 工作性能较好。李顺涛等^[4]基于泥沙沉积与冲刷数学模型, 模拟和研究了沉沙池流态和冲沙过程, 分析了冲沙底板开启方式的不同对冲沙效果的影响。华根福等^[5]基于沉沙池内水流运动的控制方程, 采用Fluent软件和Simple迭代算法对沉沙池内水流运动开展了数值模拟研究, 结果得到沉沙池内流场存在两个水流“死水区”, 而沉沙池内部区域的流态较为稳定, 对泥沙沉降有利。杨红等^[6]基于 $\kappa-\epsilon$ 紊流模型, 开展了沉沙池立面流场的数值模拟研究, 为后续沉沙池内泥沙运动规律的研究提供基础。张庄^[7]在流动和悬浮物输移控制方程的基础上, 提出了一种可以对沉沙池内部悬浮物运动规律进行模拟的数学模型, 并依据所构建的模型开展了某典型圆形沉沙池内的流场、悬浮物浓度分布和沉沙效率研究。

美国陆军工程师兵团(USACE)工程手册EM1110-2-6053^[8]系统地介绍了基于DCR方法的混凝土水工建筑物抗震性能评价步骤, 众多研究者基于DCR方法开展了混凝土坝抗震性能研究。Heshmati等^[9]在DCR方法框架下, 构建了大坝-地基-库水耦合系统, 采用有限元分析方法开展了基于应力准则和基于应变准则的拱坝抗震性能评估差异性研究。Alembagheri^[10]基于DCR评价体系, 考虑混凝土拉伸开裂作为主要潜在破坏, 以3个现有的重力坝为例, 开展了基于线性分析和经验破坏准则的混凝

收稿日期: 2021-03-17; 网络首发时间: 2022-02-09

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5020.TV.20220209.0935.001.html>

作者简介: 王伟(1974-), 正高级工程师, 主要从事水工设计。E-mail: 943810253@qq.com

通讯作者: 梁辉(1991-), 博士, 工程师, 主要从事水工结构抗震计算。E-mail: 1054305889@qq.com

土重力坝震害评估。Wang等^[11]基于需求能力比DCR、累积超应力持时和超应力空间范围指标开展了近断层地震动作用下大坝-地基-库水体系的抗震性能评估。梁辉等^[12]基于美国陆军工程师兵团EM 1110-2-6053中提出的水工建筑物抗震性能需求能力比(DCR, demand capacity ratio)评价方法,从抗剪性能、抗弯性能、抗滑稳定和抗倾覆稳定性能四个方面综合评价了某水电站沉沙池的抗震性能。

综上所述,已有成果主要是针对沉沙池自身结构设计和使用寿命开展研究,对地震作用下沉沙池结构抗震安全研究很少。针对沉沙池结构因自然灾害事件出现严重损害后的修复案例基本没有研究。因此,有必要对沉沙池结构修复方案设计进行详细地分析论证,并对处于高地震烈度区的沉沙池结构进行抗震性能评估。本文将在现有“L型”沉沙池右边墙无质量地基模型的线弹性动力分析结果基础上,进一步通过考虑沉沙池右边墙与地基接触非线性以及地基辐射阻尼效应,开展右边墙非线性动力分析,为水电站沉沙池结构设计和抗震安全评价提供科学依据。

2 工程概况

本工程为低坝长引水式电站,位于尼泊尔加德满都东北方向的Tatopani和Phulpingkatti村。本工程经历了2016年7月5日洪水引发泥石流自然灾害事件。洪水过后,发现沉沙池右边墙的一段65 m长的墙体发生整体破坏,墙体穿过河道向对岸(右)推进约125 m(图1和图2)。在河道下游约600 m处发现了右边墙的第二段较小部分墙体。洪水泥石流撕裂了右边墙完整的混凝土,撕裂面一般刚好在墙体混凝土内垂直钢筋的穿透深度以下,墙体的破坏表面形成一个不规则的平面。邻近溢洪道闸墩的沉沙池残余墙体部分出现一系列拉裂缝隙,需要拆除。沿右边墙墙体底部和左侧的破坏面粗糙,不规则,有裸露的钢筋。因混凝土破裂成鹅卵石和小卵石块,沿破坏面显露大面积裂缝和受剪切骨料。右边墙上游部分、上游竖向收缩缝、左边侧墙和沉沙池尾部端墙完好无损,结构构件未出现开裂、偏移或位移。

总体上,沉沙池的右边墙已经破坏,需要将残余的墙体混凝土和相邻的底板混凝土局部拆除,然后在原轮廓的基础上进行修复。鉴于此,需要对修复后的沉沙池右边墙的抗震安全进行评估,为其抗震设计提供依据。



图1 沉沙池右边墙破坏示意图



图2 右边墙冲到对岸的残留体

3 计算理论

3.1 黏弹性边界和地震动输入

3.1.1 黏弹性边界 Lysmer和kuhlemeyer^[13]引入了一个简单的黏性边界模型考虑了无限地基辐射阻尼效应。针对黏性边界可能带来较大误差和低频不稳定的问题,文献[14-15]提出了黏弹性人工边界。本研究采用黏弹性人工边界来考虑能量耗散作用,包括在底部和两侧边界节点增加弹簧和阻尼器,见图3。计算中,可在与边界相关的单元矩阵对角项增加阻尼和弹簧刚度项。

边界法向弹簧刚度和阻尼系数为:

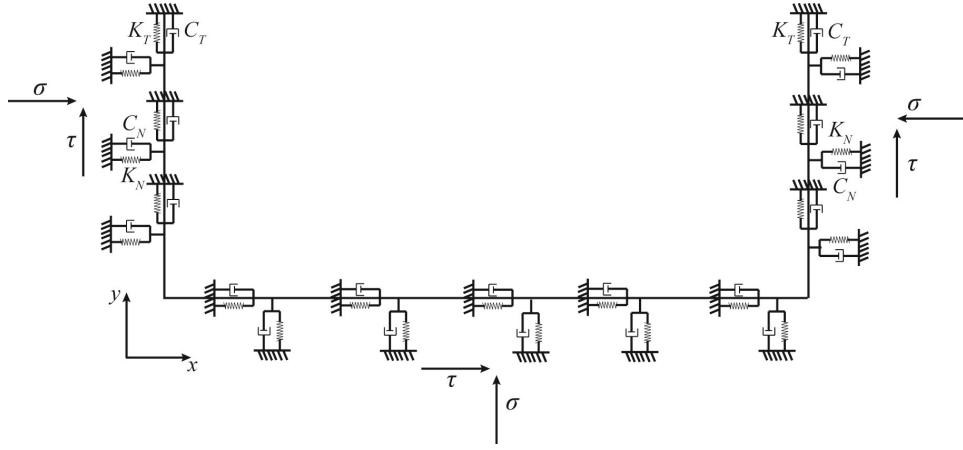


图3 黏弹性边界模型

$$K_T = \frac{E}{2r_b} A, \quad C_T = \rho c_p A \quad (1)$$

边界切向弹簧刚度和阻尼系数为：

$$K_N = \frac{G}{2r_b} A, \quad C_N = \rho c_s A \quad (2)$$

式中： K_T 、 K_N 为边界法向和切向弹簧刚度； C_T 、 C_N 为边界法向和切向阻尼系数； E 为弹性模量； G 为剪切模量； ρ 为密度； A 为黏弹性边界节点的影响面积； r_b 为边界的高度； c_p 和 c_s 分别为压缩波和剪切波波速。

3.1.2 地震动输入 人工边界上的地震动输入为底部边界入射波和地表反射波相叠加组成的自由场输入，可以采用在人工边界上施加等效节点荷载来实现，对于无阻尼地基体系，地震动在底部边界以折半的形式输入。基于一维波动理论的假设，自由场位移和速度可表示为：

$$\begin{cases} u = u_0 \left(t - \frac{z}{c_s} \right) + u_0 \left(t - \frac{2r_b - z}{c_s} \right) \\ \dot{u} = \dot{u}_0 \left(t - \frac{z}{c_s} \right) + \dot{u}_0 \left(t - \frac{2r_b - z}{c_s} \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} v = v_0 \left(t - \frac{z}{c_s} \right) + v_0 \left(t - \frac{2r_b - z}{c_s} \right) \\ \dot{v} = \dot{v}_0 \left(t - \frac{z}{c_s} \right) + \dot{v}_0 \left(t - \frac{2r_b - z}{c_s} \right) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} w = w_0 \left(t - \frac{z}{c_p} \right) + w_0 \left(t - \frac{2r_b - z}{c_p} \right) \\ \dot{w} = \dot{w}_0 \left(t - \frac{z}{c_p} \right) + \dot{w}_0 \left(t - \frac{2r_b - z}{c_p} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中： u 、 v 、 w 和 $\dot{u}$ 、 $\dot{v}$ 、 $\dot{w}$ 分别为 x 、 y 、 z 三方向自由场位移和速度时程； $u_0 \left(t - \frac{z}{c_s} \right)$ （ u 表示 u 、 v 、 w ，下同）、

$\dot{u}_0 \left(t - \frac{z}{c_s} \right)$ 为入射波三方向位移和速度时程； $u_0 \left(t - \frac{2r_b - z}{c_s} \right)$ 为表面反射波三方向位移时程；

$\dot{u}_0 \left(t - \frac{2r_b - z}{c_s} \right)$ 为表面反射波三方向速度时程。

因此，等效边界节点荷载时程可表示为：

$$\mathbf{F} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} \cdot A + \mathbf{C}_B \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_B \mathbf{u} \quad (6)$$

式中： $\mathbf{F}$ 为荷载向量； $\boldsymbol{\sigma}$ 为自由场应力张量； $\mathbf{n}$ 为边界外法线向量； $\mathbf{C}_B$ 为边界节点阻尼系数矩阵； A 为边界节点影响面积； $\mathbf{K}_B$ 为边界节点弹簧刚度矩阵； $\mathbf{u}$ 为自由场位移向量， $\mathbf{u} = \{u \ v \ w\}^T$ ； $\dot{\mathbf{u}}$ 为自由场速度向量， $\dot{\mathbf{u}} = \{\dot{u} \ \dot{v} \ \dot{w}\}^T$ 。

3.2 接触非线性模型 接触非线性问题采用 Abaqus 有限元分析软件中基于拉格朗日乘子法的接触模型进行求解，二维接触模型示意图见图4，详细理论推导见文献[16]。本文将对其进行简单介绍，软件中采用硬接触模型考虑了接触压力 p 的定义如下：(1)当 $h < 0$ ， $p = 0$ 表示张开；(2)当 $p > 0$ ， $h = 0$ 表示闭合。

采用拉格朗日乘子以混合方法表示接触压力来满足接触约束，其虚功方程为：

$$\delta \Pi = \delta p h + p \delta h \quad (7)$$

线性化形式如下：

$$d\delta \Pi = \delta p dh + dp \delta h \quad (8)$$

标准的库伦摩擦模型假设当等效摩擦应力 τ_{eq} 小于临界应力 τ_{crit} 时，接触面没有相对运动。临界应力 τ_{crit} 和接触压力 p 成一定比例，表示为：

$$\tau_{crit} = \mu p \quad (9)$$

当 $\tau_{eq} = \tau_{crit}$ 时，接触面可能发生滑动。如果摩擦是各向同性的，则滑动方向和摩擦应力重合，表示为：

$$\frac{\tau_i}{\tau_{eq}} = \frac{\dot{\gamma}_i}{\dot{\gamma}_{eq}} \quad (10)$$

式中： h 为张开度，负号表示张开； μ 为摩擦系数； $\dot{\gamma}_i$ 为 i 方向上的滑移率； $\dot{\gamma}_{eq}$ 为滑移速度幅值， $\dot{\gamma}_{eq} = \sqrt{\dot{\gamma}_1^2 + \dot{\gamma}_2^2}$ ，下标1和2表示滑动面上相互正交的两个方向。

4 非线性动力时程分析

4.1 有限元模型 本文作者在之前的研究中基于国外标准^[8,17-19]中DCR性能评价指标，开展了沉沙池右边墙无质量地基模型线弹性动力分析^[12]，得到右边墙墙根部剪力、弯矩、混凝土/毛石混凝土接触面抗滑安全系数以及抗倾弯矩和合力作用点时程曲线。结果表明，运行基准地震(OBE, operational basis earthquake)下沉沙池右边墙抗剪、抗弯和抗倾覆稳定性能满足标准要求，具有良好的抗震性能，但是墙根抗剪性能冗余度较小。MDE作用下，沉沙池右边墙抗剪性能难以满足设计要求，同时可能发生滑动失稳和倾覆失稳破坏。

由此，为了更加全面地对沉沙池右边墙的抗震性能进行评估，本研究进一步考虑沉沙池底部混凝土/毛石混凝土交界面接触非线性和地基辐射阻尼效应，开展了MDE作用下沉沙池右边墙非线性动力分析。非线性有限元动力分析模型，见图5，其中沉沙池底部高程为1417 m，顶部高程为1435 m，右边墙的宽度为2.5 m。

4.2 静动力荷载和材料参数 静态荷载主要有沉沙池自重和静水压力，正常运行下，沉沙池侧壁水位为1434 m。动力荷载为最大设计地震MDE，基岩水平向地震峰值加速度为0.87g，相应的竖向地震峰值加速度为0.74 g。归一化的水平向和竖向地震动加速度时程，见图6。材料及接触面计算参数，见表1和表2。计算时，覆盖层阻尼比按7%考虑，混凝土阻尼比按5%考虑。

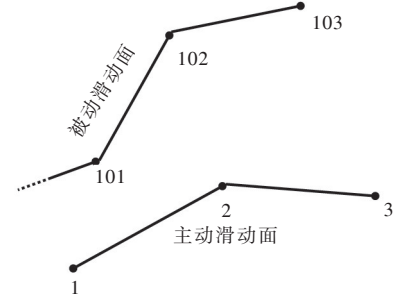


图4 二维接触示意图

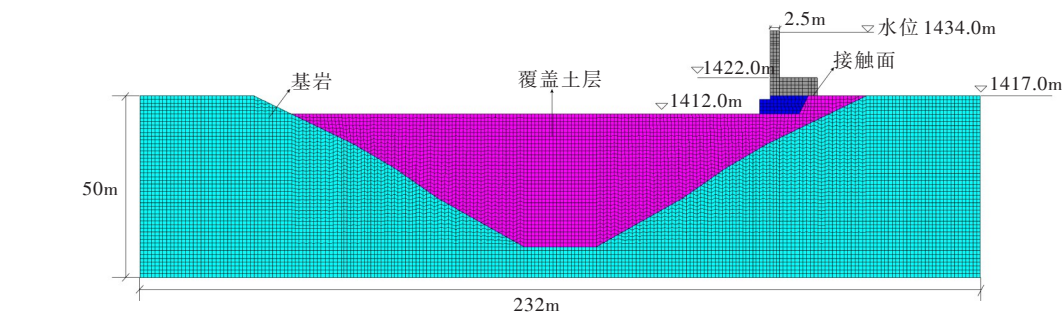


图5 计算模型

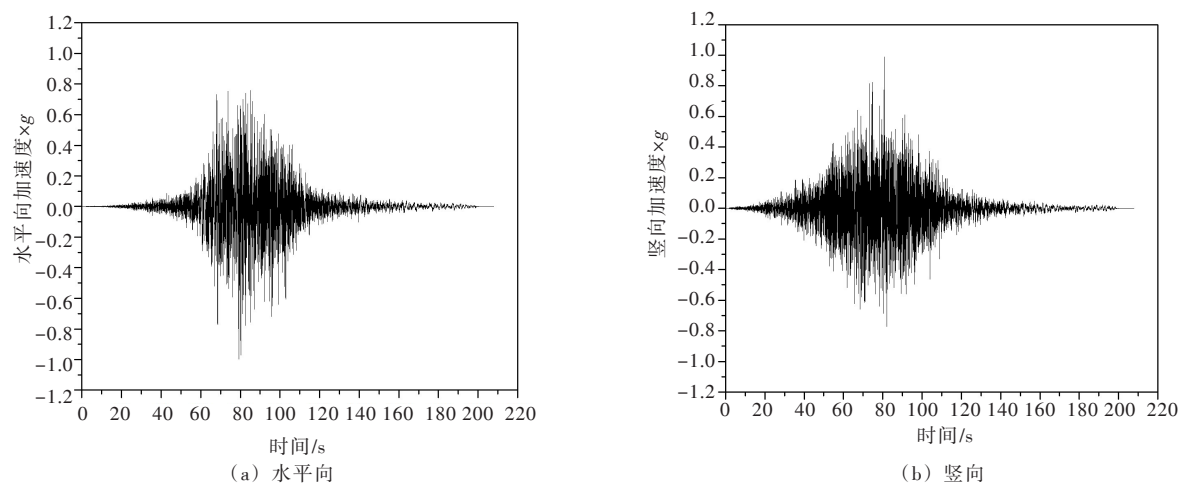


图6 地震加速度时程

表1 材料参数

材料	容重 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	剪切模量 G/MPa	泊松比 ν	弹性模量 $E=2G(1+\nu)/\text{MPa}$	凝聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	容许承载力 $/\text{kPa}$
边墙混凝土 C20	24	12000	0.167	28000	/	/	12500
基础毛石混凝土 C12	24	9500	0.167	22000	/	/	7500
覆盖层	19	/	0.20	25	/	32.5	400
岩石	26.5	1800	0.275	4500	/	/	/

4.3 分析结果

4.3.1 抗弯和抗剪性能 通过非线性动力时程分析得到右边墙根部剪力和弯矩时程，见图7和图8。由图7和图8可知，右边墙墙根弯矩最大值为 $9.94 \text{ MN} \cdot \text{m}$ ，低于 DCR 允许值且具有较高的冗余度，表明沉沙池右边墙的抗弯性能良好；然而其剪力时程最大值为 1.92 MN ，且存在一定持时范围高于 DCR 允许值（极限抗剪强度

$V_u = 1.519 \text{ MN}$ ， $DCR = 1$ ，名义抗弯承载力 $M_N = 8.782 \text{ MN} \cdot \text{m}$ ， $DCR = 2$ ，详见文献[12]），表明在MDE作用下其有发生剪切破坏的可能性，可以通过在墙体根部加强配置剪力筋，增强其抗剪性能。

4.3.2 接触面张开和滑移 沉沙池顶部和底部相对水平位移、接触面滑动和张开位移时程曲线，见图9—图12。由图9—图12可知，在MDE作用下，沉沙池右边墙顶部和底部相对水平位移最大值为 0.305 m ；地震结束后，接触面残余滑动位移约为 0.15 m ；接触面张开位移最大值为 0.083 m ，且在地震结束后接触面最终处于闭合状态，表明沉沙池右边墙不会出现倾覆失稳破坏，抗倾覆性能良好。

表2 接触面参数

接触面	凝聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
混凝土/混凝土	0	45
混凝土/毛石混凝土	0	40
混凝土/覆盖层	0	28.8
毛石混凝土/覆盖层	0	28.8

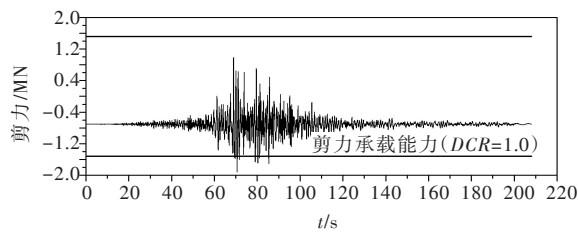


图7 墙根剪力时程

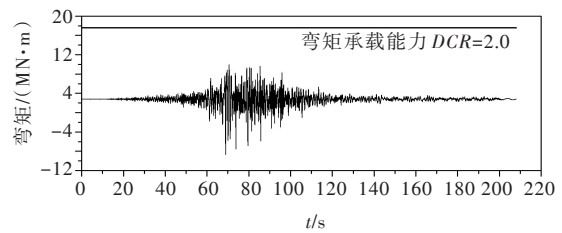


图8 墙根弯矩时程

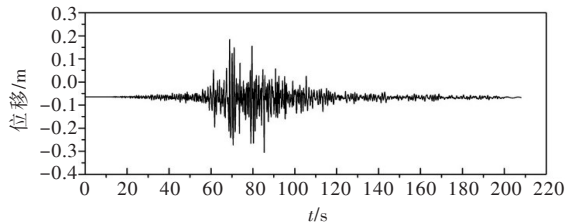


图9 沉沙池顶部和底部相对水平位移时程

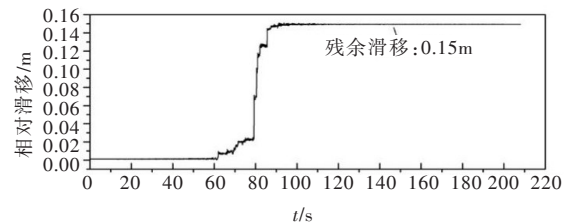


图10 沉沙池底部接触面滑动位移时程

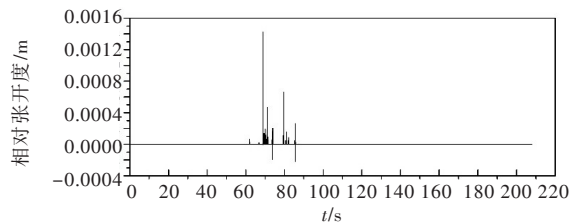


图11 沉沙池底部接触面左侧张开位移时程

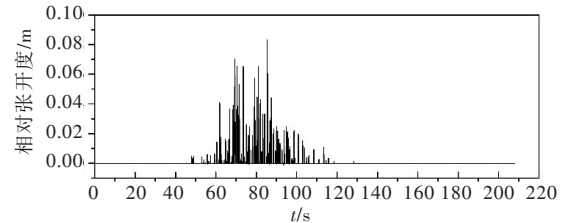


图12 沉沙池底部接触面右侧张开位移时程

5 结论

本文在现有“L型”沉沙池右边墙无质量地基模型线弹性动力分析研究结果基础上,进一步考虑沉沙池右边墙与地基接触非线性和地基辐射阻尼效应,开展了非线性动力分析研究,对沉沙池右边墙抗弯、抗剪性能以及接触面的滑动和张开情况进行了分析和评价,研究成果已用于指导国外某水电站沉沙池抗震设计,同时可为强震区沉沙池结构抗震分析提供参考依据^[20]。主要结论如下:(1)MDE工况下,右边墙墙根弯矩时程最大值为 $9.94 \text{ MN}\cdot\text{m}$,低于 DCR 允许值且具有较高的冗余度,其抗弯性能良好,满足标准;(2)MDE工况下,右边墙剪力时程最大值为 1.92 MN 且存在一定持时范围高于 DCR 允许值,有可能发生剪切破坏,可以通过在墙体根部配置剪力筋,增强其抗剪性能;(3)地震振动结束后,接触面残余滑动位移约为 0.15 m ,张开位移时程最大值为 0.083 m ,且在地震结束后接触面最终处于闭合状态,不会出现倾覆失稳破坏;(4)对比线弹性动力分析结果,基于非线性分析方法,本文定量地评价了沉沙池右边墙抗倾覆稳定性能,即不会出现抗倾覆失稳破坏;同时提出了一种增强沉沙池右边墙抗剪性能的方法。

参 考 文 献:

- [1] 陈锐,李建华,代开锋,等.小型水电站沉沙池布置与结构设计的研究[J].中国农村水利水电,2012(7): 179-181.
- [2] 李志乾,耿波,台航迪.CCS水电站大型沉砂池设计[J].珠江水运,2014(22): 60-61.
- [3] 孔伟.西藏觉巴水电站沉沙池设计[J].云南水力发电,2018(4): 50-54.
- [4] 李顺涛,耿波,向媛,等.沉沙池冲沙过程CFD模拟分析[J].水电能源科学,2016(11): 104-108.
- [5] 华根福,刘焕芳,汤骅,等.沉沙池中水流流态的数值模拟[J].石河子大学学报:自然科学版,2009(4): 92-96.
- [6] 杨红,潘光在.沉沙池立面流场数值模拟研究[J].泥沙研究,2000(2): 55-59.

- [7] 张庄. 沉沙池沉淀效果的数值分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998(1): 96-99.
- [8] US Army Corps of Engineers . Earthquake design and evaluation of concrete hydraulic structures; EM 1110-2-6053 [S] . Washington DC, 2007 .
- [9] HESHMATI M, MIRZABOZORG H, ARDEBILI M, et al . Are there any differences in seismic performance evaluation criteria for concrete arch dams? [J] . Civil Engineering Infrastructures Journal, 2013, 46(2): 233-240 .
- [10] ALEMBAGHERI M . Earthquake damage estimation of concrete gravity dams using linear analysis and empirical failure criteria[J] . Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2016, 90: 327-339 .
- [11] WANG G, ZHANG S, CHAO W, et al . Seismic performance evaluation of dam-reservoir-foundation systems to near-fault ground motions[J] . Natural Hazards, 2014, 72(2): 651-674 .
- [12] 梁辉, 郭胜山, 涂劲, 等 . 基于 DCR 方法的沉砂池右边墙抗震安全评价[J] . 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(2): 100-109 .
- [13] LYSMER J, KUHLEMEYER R L . Finite dynamic model for infinite media[J] . J . Eng . Mech . Div . ASCE, 1969, 95(4): 759-877 .
- [14] DEEKS A J, RANDOLPH M F . Axisymmetric time domain transmitting boundaries[J] . J . Eng . Mech . ASCE, 1994, 120(1): 25-42 .
- [15] LIU J B, LV Y D . A direct method for analysis of structural foundation dynamic interaction[J] . J . Civil Eng . , 1998, 31(3): 55-64 .
- [16] ABAQUS Inc . Abaqus Analysis User's Manual[M] . USA, 2010 .
- [17] US Army Corps of Engineers . Strength design for reinforced concrete hydraulic structures; EM1110-2-2104[S] . Washington DC, 1992 .
- [18] US Army Corps of Engineers . Retaining and flood walls; EM 1110-2-2502 [S] . Washington DC, 1989 .
- [19] US Army Corps of Engineers . Time-history dynamic analysis of concrete hydraulic structures; EM1110-2-6051 [S] . Washington DC, 2003 .
- [20] 徐建荣, 柳海涛, 彭育, 等 . 基于泄洪雾化影响的白鹤滩水电站坝身泄洪调度方式研究[J] . 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(5): 449-456, 468 .

Nonlinear dynamic time history analysis of a desilting basin right wall of a hydropower station under strong earthquakes

WANG Wei¹, LIANG Hui², Feng Jingjun¹, FAN Jianpeng¹, GUO Shengshan²

(1. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: In this paper, a nonlinear dynamic analysis considering the contact nonlinearity of the desilting basin and foundation as well as radiation damping effect under Max Design Earthquake (MDE) condition is carried out based on the linear elastic seismic safety results of the right wall of L-shaped desilting basin. The shear and bending performance as well as the sliding and opening of the wall and the foundation interface are evaluated under MDE. The results show that under the MDE condition, the bending moment time history of the right wall is within the allowable value, while the shear force time history has a certain duration range exceeding the allowable value, which has the possibility of shear failure. It is noted that the shear performance of the right wall can be enhanced by strengthening the shear reinforcement. In addition, the contact surface of the right wall is finally closed after earthquake indicating a good overturning resistance performance. The nonlinear dynamic analysis of the right wall of the desilting basin provides a scientific basis for its seismic design and can also provide a reference for seismic analysis of desilting basin structures in strong earthquake areas.

Keywords: right wall of a desilting basin; contact nonlinearity; radiation damping effect; nonlinear dynamic analysis; demand-capacity ratio

(责任编辑: 王学凤)