

抽水蓄能电站管道水力振动在围岩中的传播规律研究

王海军^{1,2}, 陈波^{1,2}, 杨秀维^{1,2}, 练继建^{1,2}

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350)

摘 要: 针对抽水蓄能电站运行引发的场地振动问题,以某抽水蓄能电站为例,建立“水力荷载-管道-围岩”有限元-无限元耦合模型,研究抽水蓄能电站管道水力振动在围岩中的传播规律,为减振提供技术支撑。首先基于水力振动理论、传递矩阵法和水力阻抗法建立抽水蓄能电站管道水力脉动荷载计算方法;然后采用耦合模型系统分析了弹性模量、阻尼、机组运行状态等变化对管道水力振动在围岩中传播的影响,并给出减振措施。计算结果表明:随着岩石弹性模量的增大,管道水力振动在围岩中衰减速率变慢,由管道水力振动引起的场地振动增大。当围岩阻尼比从0.02增大到0.30时,管道水力振动引起地表的振动强度不断减小。阻尼比从0.02增加到0.10时,地表振动强度衰减了85%~97%;阻尼比从0.20增大到0.30时,地表振动强度衰减了0.1%~1.0%,变化比较平缓。对于该抽水蓄能电站,当运行更多机组时,引发的地表振动更大,且该电站在抽水运行时较发电运行时引发的场地振动强度更大。

关键词: 管道水力振动; 围岩传播; 场地振动; 有限元分析; 抽水蓄能电站

中图分类号:TV312

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2023)03-0116-07

Propagation law of hydraulic vibration of pipelines in surrounding rock of pumped storage power station

WANG Haijun^{1,2}, CHEN Bo^{1,2}, YANG Xiuwei^{1,2}, LIAN Jijian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to investigate the ground vibration caused by the operation of pumped storage power stations, taking a pumped storage power station as an example, we established a finite element – infinite element coupling model of “hydraulic load – pipe – surrounding rock” to study the propagation law of hydraulic vibration of the pipeline in the surrounding rock, so as to provide some technical support for the vibration reduction. Firstly, based on hydraulic vibration theory, transfer matrix method and hydraulic impedance method, the method for calculating the hydraulic fluctuating load of the pumped storage power station pipeline is established. Then, the coupling model is used to systematically analyze the influence of the changes of elastic modulus, damping and unit operating state on the propagation of hydraulic vibration of pipeline in the surrounding rock, and the damping measures are proposed. The calculation results show that with the increase of the elastic modulus of rock, the attenuation rate of hydraulic vibration of pipeline in the surrounding rock decreased and the ground vibration caused by hydraulic vibration of pipeline increased. When the damping ratio of the surrounding rock increased in the range of 0.02 to 0.30, the intensity of the surface vibration caused by the hydraulic vibration of pipeline kept decreasing. When the damping ratio increased from 0.02 to 0.10, the surface vibration intensity decreased by 85% – 97%; when the damping ratio increased from 0.20 to 0.30, the surface vibration intensity decreased only by 0.1% to 1.0%, which changed relatively little. For this pumped storage power station, when more units are in operation, the resulting ground vibration is greater and the ground vibration intensity during pum-

收稿日期:2023-01-11; 修回日期:2023-03-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401902);天津市自然科学基金项目(18JCYBJC22300)

作者简介:王海军(1978—),男,江西萍乡人,博士,教授,研究方向为水利水电工程。

通讯作者:陈波(2000—),男,四川宜宾人,硕士研究生,研究方向为水利水电工程。

ping operation is greater than that during power generation operation.

Key words: pipeline hydraulic vibration; propagation in surrounding rock; ground vibration; finite element analysis; pumped storage power station

1 研究背景

抽水蓄能作为一种绿色低碳清洁能源,具有调峰、填谷、调频、调相、储能等功能,可以和火电、光电配合使用,近年来得到了高速发展。根据国家能源局2022年第四季度新闻发布会介绍,我国目前抽水蓄能电站累计装机规模达到 $4\,360 \times 10^4$ kW,居世界第一。

在抽水蓄能电站运行的过程中,可能会出现场地振动过大、噪声过大等问题^[1]。目前关于抽水蓄能电站的研究中,厂房结构及水轮机组相关的振动问题^[2-3]是主要的研究内容之一。如:童恩飞等^[4]通过数值分析的方法对琼中抽水蓄能电站地下厂房进行了振动分析;崔琦等^[5]通过有限元计算和现场测试,分析了地下厂房围岩与上、下游边墙的约束条件变化时对厂房振动的影响;Menéndez等^[6]建立了不同围岩岩性的抽水蓄能电站模型,研究电站运行时厂房洞室的稳定性;Terrier等^[7]采用物理模型试验和原型观测对比的方法,研究了两座相近抽水蓄能电站联合运行时出现的浪涌问题等。而针对抽水蓄能电站管道振动在围岩中的传播及其引起的场地振动问题,现有的研究较少。但在应力波的传播和地铁诱发环境振动等领域,学者们进行了大量相关的研究。如:陶明等^[8]推导了平面P波(primary wave)作用下深埋引水隧洞的稳态响应和瞬态响应解析解;李建春等^[9]总结了当前研究应力波在围岩中传播的3种方法,并对比了其各自的侧重点和应用范围;王田友等^[10]建立了地铁列车二系弹簧模型,得出地铁运行引发环境振动的适用隧道荷载,并将其施加于二维模型中进行计算且与实测数据进行了对比;陈国兴等^[11]基于ABAQUS有限元软件建立地铁列车运行的有限元模型,分析了地铁运行引起的环境、地表振动。

国内外学者的研究表明,抽水蓄能电站机组的振动及其诱发的管道水力脉动是厂房结构振动的主要振源^[12]。针对抽水蓄能电站运行诱发场地振动问题,本文结合某抽水蓄能电站工程,采用有限元计算软件,构建“水力荷载-管道-围岩”有限元-无限元耦合模型,计算不同围岩弹性模量、阻尼比、机组运行工况时,抽水蓄能电站所在场地不同深度、地表不同位置处的振动响应,研究抽水电站管道水力振动

在围岩中的传播规律。

2 管道水力脉动荷载

引起抽水蓄能电站厂区振动的因素主要有机械振动、电磁振动和水力振动3大类^[13]。文中将抽水蓄能电站引水管道区域的水力脉动作为输入荷载,基于水力振动理论、传递矩阵法和水力阻抗法^[14-16],建立了管道水力脉动荷载计算方法。

首先,将电力系统中的惯性、电容和电阻的概念引入水流连续方程和动量方程,可得^[15, 17-18]:

$$\frac{\partial q'}{\partial x} + C \frac{\partial h'}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h'}{\partial x} + L \frac{\partial q'}{\partial t} + Fq' = 0 \quad (2)$$

式中: q' 为振荡流量, m^3/s ; h' 为振荡压力, m ; C 为流容, m ; L 为流感, s^2/m^3 ; F 为流阻, s/m^3 。

结合传递矩阵法,对公式(1)、(2)进行拉普拉斯变换,可以得到:

$$\begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_c \sinh(\gamma x) \\ -\frac{1}{Z_c} & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_u \\ Q_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_d \\ Q_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Z_c = \frac{\gamma}{C \cdot s} \quad (4)$$

$$\gamma = \sqrt{C \cdot s(R + s \cdot L)} \quad (5)$$

式中: H 和 Q 分别为 h' 和 q' 经拉普拉斯变换之后的值,下标 u 和 d 分别表示管道的上边界和下边界; Z_c 为特性阻抗; s 为拉普拉斯算子; γ 为传播常数。

公式(3)为单根管道的传递矩阵,若是分析整个抽水蓄能电站系统的强迫振动,还应考虑其他水利设施,如水泵水轮机、调压室、支管等^[15, 17-18]。

在强迫振动分析模型中,预先设置强迫振源处的振荡压力或流量,并通过振源处的水力阻抗计算得到另一个:

$$Z_x = \frac{H_x}{Q_x} \quad (6)$$

式中: Z_x 为水力阻抗,当振源处的压力和流量已知时,即可通过相应的传递矩阵依次导出相邻节点处的振荡压力以及流量。

现有部分抽水蓄能电站现场测试数据表明,地面振动主频与厂房结构振动主频和蜗壳进口处脉压主频吻合,皆为机组转轮叶片通流频率的1~2

倍^[1]。根据电站机组的模型实验,选取蜗壳进口幅值较大的 3 组不同机组负荷工况(发电工况 67.10、99.79 MW,抽水工况 315.8 MW)。以 1 倍叶频(78.6 Hz)和 2 倍叶频(157.2 Hz)为激励源,在蜗壳进口处施加上述 3 种机组负荷下的压力脉动,求出不同运行工况下的引水管道系统强迫振型。再对强迫振型进行简化处理,对每一段管道的压力振幅求平均,比较各段的压力振幅平均值,得到引水管道沿程的脉压变化系数,再乘以蜗壳进口处的压力脉动幅值,得到引水管道沿程水力脉动荷载。考虑到一倍叶频地震波传播衰减速率在同等振幅条件下小于 2 倍叶频,同时根据数值模拟计算结果,在相同机组负荷时 1 倍叶频荷载引发的地表振动强度大于 2 倍叶频,限于篇幅,本文只讨论在 1 倍叶频脉动压力荷载作用下管道水力振动在围岩中的传播情况。假定管道环向压力大小相等,引水管道施加荷载部位示意图见图 1,引水管道各部位水力脉动计算输入荷载见表 1。



图 1 引水管道沿程荷载施加位置示意图

表 1 引水管道各部位水力脉动计算荷载(1 倍叶频)

机组负荷/MW	蜗壳进口/kPa	下斜管段/kPa	中平段/kPa	上斜管段/kPa	上平段/kPa
67.10	71.68	15.26	19.36	14.84	13.68
99.79	75.60	16.10	21.93	15.81	14.44
315.80	57.36	17.78	20.08	19.50	16.06

3 水力荷载-管道-围岩耦合数值模拟

3.1 水力荷载-管道-围岩耦合模型

选取抽水蓄能电站地下厂房、引水管道所在区域场地为研究对象,区域范围为 1 180 m × 208 m (长 × 宽),高程随地面地势起伏在 562 ~ 972 m 之

间变化。场地表面是风化强度较高的覆盖层,地下洞室围岩总体为Ⅱ、Ⅲ类,少量为Ⅳ、Ⅴ类。区域内存在一条宽约 3 ~ 4 m、厚 3 ~ 5 cm 的断层破碎带,主要由碎裂岩、碎粉岩及角砾岩等构成。由于所选场地区域范围较大,地质组成复杂,将模型简化为 3 层,底层为Ⅱ类围岩,中间层为Ⅲ类围岩,最上层为覆盖层,引水管道及一条主要断层破碎带按实际位置布置在其中。

运用大型有限元计算分析软件 ABAQUS 建立包括引水管道和周围地形原型的有限元模型,引水管道、断层破碎带和分层的山体地形间通过绑定作用耦合形成一个有限元模型整体,计算时整体模型视为弹性体,不考虑塑性变形。再以引水管道上库入口为极点,建立三维映射无限元模型。取无限元近点和远点的距离与近点到极点的距离相同,模型范围包括除山体以外无限元边界,即地形上表面为自由面,地形底面和侧面均用无限元模拟。无限元单元类型为 CIN3D8,该单元包含 6 个面,其中 1 个面与有限元接触,表示无限元与有限元的交界面,其他对应面表示无限远。网格划分时,山体围岩采用 C3D10 单元,断层破碎带采用 C3D8R 单元,引水管道采用 S4R 单元。模型总体网格单元数量约为 120×10^4 ,节点总数约为 167×10^4 ,引水管道及地形整体有限元模型如图 2 所示。

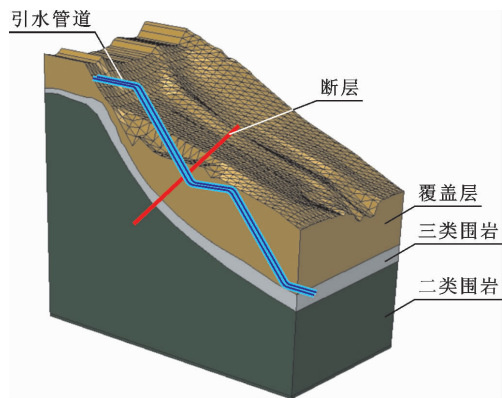


图 2 引水管道及地形整体有限元模型

3.2 阻尼参数设定

阻尼是结构动力学的基本参数,反映了结构体系在振动过程中具有能量耗散的特征^[19]。对于抽水蓄能电站场地振动系统而言,电站运行过程中必须考虑阻尼的影响^[20]。

在系统振动问题研究中,Rayleigh 阻尼模型简单实用,广泛应用于工程实例分析。该模型将阻尼项转换为系统质量矩阵和刚度矩阵的线性代数和的

形式:

$$C = \alpha M + \beta K \tag{7}$$

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j\xi}{\omega_i + \omega_j} \tag{8}$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \tag{9}$$

式中: C 为结构整体阻尼矩阵; M 为质量矩阵; K 为刚度矩阵; α 和 β 为阻尼比例系数; ξ 为阻尼比; ω_i 和 ω_j 为结构自振频率,Hz。根据《建筑物抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[21], ξ 取 0.05。

模型前 30 阶结构自振频率见表 2,考虑到输入荷载的激励频率 78.6 Hz 远大于模型前 30 阶自振频率,对模型结构动力计算影响较小,因此选取对模型结构动力分析影响较大的前 2 阶结构自振频率 1.41 和 1.46 Hz 代入计算,得到阻尼比例系数 α 为 0.449, β 为 0.005 5。

表 2 模型前 30 阶结构自振频率

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	1.41	11	2.36	21	2.88
2	1.46	12	2.44	22	2.92
3	1.69	13	2.47	23	2.93
4	1.77	14	2.57	24	2.98
5	1.94	15	2.59	25	3.09
6	2.01	16	2.61	26	3.13
7	2.09	17	2.69	27	3.19
8	2.21	18	2.74	28	3.23
9	2.29	19	2.75	29	3.25
10	2.33	20	2.80	30	3.28

3.3 材料参数设定

根据引水管道和地质资料,数值模拟计算采用的各材料主要物理力学参数见表 3。

表 3 模型各材料主要物理力学参数取值

围岩及引水管道	动弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
引水管道(钢材)	2.10×10 ⁵	0.30	7800
Ⅱ类围岩	5.84×10 ⁴	0.21	2690
Ⅲ类围岩	3.68×10 ⁴	0.23	2600
断层破碎带	0.60×10 ³	0.38	2500
覆盖层	8.60×10 ²	0.27	2550

4 耦合数值模拟结果与分析

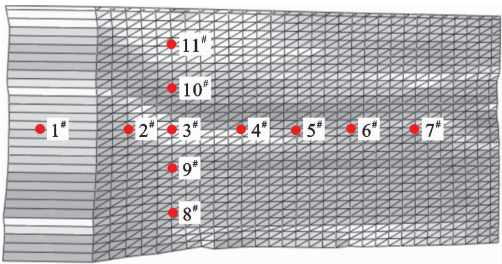
4.1 计算工况

为研究围岩弹性模量、阻尼比和电站机组运行工况对管道振动在围岩中传播的影响,采用表 4 中 10 种不同的工况进行计算。

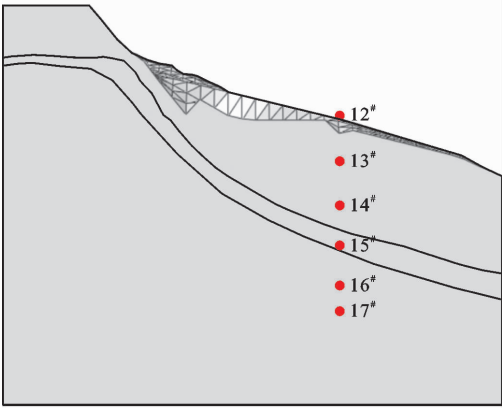
表 4 水力荷载-管道-围岩耦合模型计算工况

工况	加载荷载 管道数量	蜗壳进口 压强/kPa	围岩种类	阻尼比 ξ
1	1	75.60	按图 2	0.05
2	2	71.68	按图 2	0.05
3	2	75.60	按图 2	0.05
4	2	57.36	按图 2	0.05
5	2	75.60	全为Ⅱ类围岩	0.05
6	2	75.60	全为覆盖层	0.05
7	2	75.60	按图 2	0.02
8	2	75.60	按图 2	0.10
9	2	75.60	按图 2	0.20
10	2	75.60	按图 2	0.30

选取模型地表 11 个测点(1[#]~11[#])和典型垂断面上 6 个测点(12[#]~17[#])为研究对象,其中 1[#]~7[#]、12[#]~17[#]测点位于引水管道正上方,8[#]~11[#]测点与 3[#]测点位于同一个横断面,测点编号及位置见图 3。



(a) 地表1[#]~11[#]测点布置



(b) 典型垂断面12[#]~17[#]测点布置

图 3 模型测点编号及位置分布

4.2 弹性模量的影响分析

选取工况 3、5、6 进行计算,比较模型地表横断面处 3[#]、8[#]~11[#]测点和垂断面处 13[#]~17[#]测点在围岩弹性模量变化时的振动强度变化。工况 3、5、6 不同

弹性模量下振动强度(以振动加速度标准差表示)随各测点距管道中心距离的变化曲线见图 4,测点 3[#]、8[#]~11[#]为地表一个横断面处的 5 个测点,测点 12[#]~17[#]为地下厂房附近一个垂直断面处的 6 个测点。

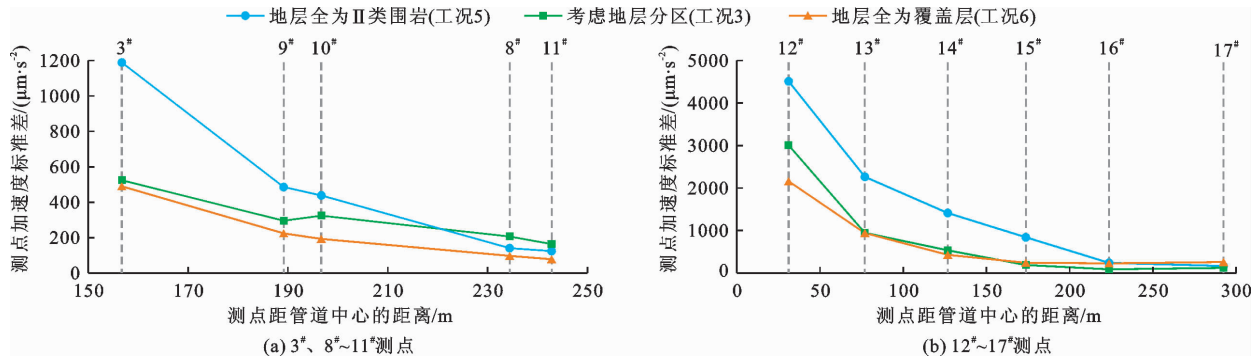


图 4 工况 3、5、6 各测点振动强度随测点距管道中心距离的变化曲线

由图 4 可看出,随着测点距引水管道中心距离的增大,测点的振动强度不断减小。当山体围岩材料属性设置从全是Ⅱ类围岩(工况 5)→考虑地层分区(工况 3)→全是覆盖层(工况 6)变化时,管道水力振动引起场地垂直断面处和地表横断面处测点的振动强度总体上不断减小,其中工况 6 时测点的振动强度远小于工况 5。由此可见,随着围岩弹性模量的不断增大,管道水力振动在围岩中的衰减速率变慢,而山体表面的软覆盖层具有一定的减振作用。

4.3 阻尼比的影响分析

土体的剪切模量比和阻尼比会随剪应变不断变化^[22],因此,调整围岩的阻尼比在 0.02~0.30 之间变化,研究围岩阻尼比对管道水力振动在岩体中传播的影响。选取工况 3、7、8、9、10 进行计算,比较引水管道正上方地表处 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]、5[#]、6[#]、7[#]测点在山体围岩阻尼比变化时的振动强度变化,1[#]~7[#]测点振动强度随阻尼比的变化曲线见图 5。

由图 5 可知,各测点的振动强度随着围岩阻尼比的增大而逐渐减小。在 7 个测点中,阻尼比为 0.02 时,振动强度最大为 1 223.83 $\mu\text{m}/\text{s}^2$;阻尼比为 0.05 时,振动强度最大为 833.21 $\mu\text{m}/\text{s}^2$;阻尼比为 0.10 时,振动强度最大为 491.36 $\mu\text{m}/\text{s}^2$;阻尼比为 0.20 时,振动强度最大为 305.11 $\mu\text{m}/\text{s}^2$;阻尼比为 0.30 时,振动强度最大为 220.01 $\mu\text{m}/\text{s}^2$ 。图 5 显示,阻尼比从 0.02 增大到 0.05 时,各测点的振动强度急剧减弱。阻尼比增大至 0.10 后,测点振动强度减弱的趋势放缓。阻尼比从 0.02 增大到 0.01 时,地表振动强度衰减了 85%~97%;阻尼比从 0.20 增大到 0.30 时,地表振动强度衰减了 0.1%~

1.0%,变化比较平缓。对于同一种岩石,风化程度越严重,其阻尼比越大,则管道水力振动在岩石中衰减越快,而岩石风化程度越小,阻尼比越小,则管道水力振动在其中衰减越慢。

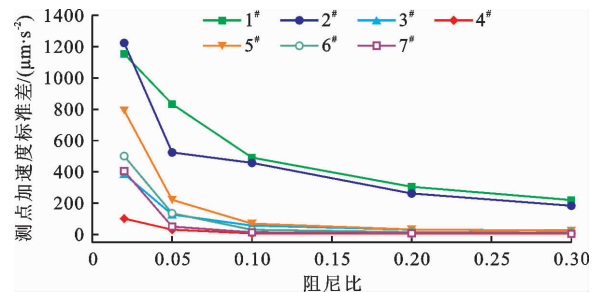


图 5 地表 1[#]~7[#]测点振动强度随阻尼比的变化曲线

4.4 机组运行工况的影响分析

选取工况 1、2、3、4 进行计算,比较引水管道正上方地表处 3[#]、4[#]、5[#]、6[#]、7[#]测点在 4 种机组运行工况下的振动强度变化,3[#]~7[#]测点振动强度变化曲线见图 6。

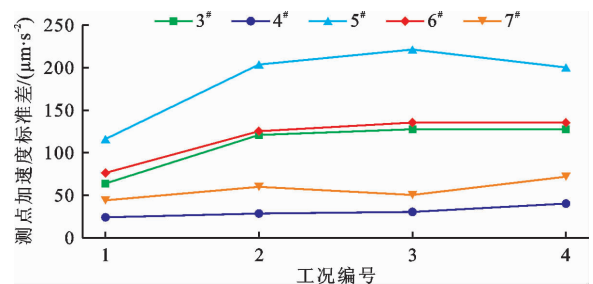


图 6 机组不同运行工况下地表 3[#]~7[#]测点的振动强度变化曲线

由图 6 可知,3[#]~7[#]测点在只有 1 条管道加载

水力荷载时(工况1)引起的地表振动强度最小,即4台机组运行工况下的地表振动强度大于2台机组运行工况下的地表振动强度。当机组发电运行时,蜗壳进口压力幅值75.60 kPa(工况3)比71.68 kPa(工况2)的输入荷载大,引起测点的振动强度更大,但整体变化趋势相似。当机组在抽水工况下运行时(工况4),计算所得输入荷载最大,引起地表各测点的振动强度基本为最大。

根据《城市区域环境振动标准》(GB 10070—1988)^[23],城市各类区域铅垂向振级标准中,要求最高的是特殊住宅区,即昼夜间环境振动强度不得高于65 dB;要求最低的是铁路干线两侧,即昼夜间环境振动强度不得高于80 dB。抽水蓄能电站机组运行时产生的环境振动、噪声等问题,主要是由机组的振动及其诱发的管道水力振动所引起,可从振源、振动波的传播、建筑结构等方面采取减振措施,例如给管道内衬软橡胶层、在管道外围加设垫层等,以达到减振的目的。

4.5 讨论

本研究运用了有限元-无限元耦合模型的方法,围岩的底部和四周采用无限元边界,而部分相关研究^[1]采用了黏弹性边界。虽然模型边界条件所设不同,但其目的都是为了使波传播至边界自由面时不发生反射,不对结构计算造成影响。采用有限元-无限元耦合的方法,既能保证计算精度,还可大大减小计算规模,降低了有限元计算的成本。为模拟抽水蓄能电站运行时管道中的压力脉动,基于水力振动理论、传递矩阵法和水力阻抗法计算得到压力荷载,将其以表面压力的形式施加于管道内壁,这与其他一些研究^[24-26]所采用的流固耦合方法不同。直接施加压力荷载的方法更加简便,且可以通过简谐波的形式模拟出管道振动波的频率和幅值,方便荷载的施加。

本研究分析了围岩弹性模量、阻尼比以及不同机组运行工况等因素对管道水力振动在围岩中传播的影响,结果表明,围岩弹性模量增加时,引水管道区域传至地表的地表振动强度变大;围岩阻尼比在0.02~0.30之间增加时,引水管道振动诱发的地表振动强度变小。这与刘长卿^[27]进行的土层弹性模量对地铁引起建筑结构噪声的影响分析和陈鹏等^[28]研究阻尼比对厂房振动的影响所得出的结论类似,说明围岩阻尼比的增大和弹性模量的减小对于振动的传播有明显的削弱作用。研究中设置机组运行工况时,比较了单管运行、多管运行、抽水工况

和发电工况时诱发地表的地表振动情况,结果显示,较运行机组较少时,抽水蓄能电站多台机组运行时诱发的引水管道区域地表振动更大,这与文献[1]研究抽水蓄能电站诱发环境振动的结果类似,但与之相比,本研究考虑的工况更为复杂、全面,且模型对地层进行了分层并模拟了主要的断层,模拟的条件更符合实际情况。根据研究结果,建议前期进行地质勘察时,注意场地各层围岩的风化程度和物理性质等对场地振动的影响;在抽水蓄能电站运行时,也可通过运行调控来减小电站诱发的场地振动。

5 结论

针对抽水蓄能电站管道水力振动引起的场地振动问题,本文结合实际工程,建立“水力荷载-管道-围岩”耦合模型,分析围岩弹性模量、阻尼比和机组运行工况变化时,管道的水力振动在围岩中的传播规律,主要得出以下结论:

(1)不同岩性测点振动强度大小关系为:地层岩性全为覆盖层<考虑地层分区<地层岩性全为Ⅱ类围岩。地层岩性越好、完整度越高、弹性模量越大,则管道水力振动在围岩中衰减得越慢,同时引水管道区域传至地表的地表振动强度越大。

(2)随着岩石阻尼比的增大,管道水力振动在围岩中衰减速率变大,引起地表的地表振动强度减小。阻尼比从0.02增加到0.10时,地表振动强度减小幅度较大;阻尼比增大至0.20后,地表振动强度变化较为平缓。

(3)该抽水蓄能电站4台机组运行时,较2台机组运行时产生的管道水力振动更大,引发的场地振动强度也更大。电站在抽水工况下运行产生的管道水力振动较发电工况时更大,应注意电站在抽水运行时引发的场地振动,做好安全防护措施。

(4)针对抽水蓄能电站运行时产生的场地振动、噪声大等问题,可采取给管道内衬软橡胶层或在管道外围加设垫层等措施,以削弱管道水力振动在场地中的传播。

参考文献:

- [1] 向明,杨恒,郑建兴,等.大型抽水蓄能电站机组与区域环境振动联合测试研究初探[J].水力发电,2021,47(8):73-77+98.
- [2] 何一纯,王兰普,侯奇东,等.大型地下厂房含蚀变带围岩变形特征与机理分析[J].水资源与水工程学报,2021,32(4):206-213.
- [3] 张鹏,宋志强.蜗壳脉动压力作用下抽水蓄能电站的振动

- 路径研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 154–160.
- [4] 童恩飞, 张智敏, 伍鹤皋, 等. 琼中抽水蓄能电站地下厂房结构振动特性分析[J]. 水利水电技术, 2016, 47(11): 29–35.
- [5] 崔琦, 侯建国, 宋一乐. 抽水蓄能电站地下厂房围岩约束及结构振动特性分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 809–817.
- [6] MENÉNDEZ J, SCHMIDT F, KONIETZKY H, et al. Stability analysis of the underground infrastructure for pumped storage hydropower plants in closed coal mines[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2019, 94: 103117.
- [7] TERRIER S, BIERI M, CESEARE G D, et al. Surge wave propagation in a common tailrace channel for two large pumped-storage plants[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(2): 218–225.
- [8] 陶明, 向恭梁, 赵瑞. 深埋引水隧洞对应力波的散射与动应力集中[J]. 应用力学学报, 2022, 39(5): 859–868.
- [9] 李建春, 范立峰, 李郑梁. 岩体中应力波传播规律研究方法进展[J]. 应用力学学报, 2022, 39(5): 845–858.
- [10] 王田友, 丁洁民, 楼梦麟. 地铁运行引起场地振动的荷载与分析方法[J]. 工程力学, 2010, 27(1): 195–201.
- [11] 陈国兴, 苏晓梅, 陈斌. 地铁列车运行引起的环境振动评价[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(1): 70–74.
- [12] 马震岳, 董毓新. 水电站机组及厂房振动的研究与治理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [13] 欧阳金惠, 耿峻, 许亮华, 等. 某大型抽水蓄能电站厂房强烈振动原因分析与减振措施研究[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 1029–1037.
- [14] YAN Wenjie, YANG Jiebin, ZHAO Zhigao, et al. Global matrix method for frequency-domain stability analysis of hydropower generating system[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 333: 130097.
- [15] WYLIE E B, STREETER V L, SUO L S. Fluid transients in systems[M]. New York: Prentice–Hall, 1993.
- [16] ZHOU Xijun, YE Yongjin, ZHANG Xianyu, et al. Refined 1D–3D coupling for high-frequency forced vibration analysis in hydraulic systems[J]. Energies, 2022, 15(16): 6051.
- [17] 高冉冉. 复杂长引水电站水力振动特性分析研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [18] 周建旭. 长输水系统电站振动特性与稳定性分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [19] 王光远. 建筑结构的振动[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [20] 杨仁树, 李炜煜, 方士正, 等. 波阻抗对岩石动力学特性影响的模拟试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(3): 178–185.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [22] MARTIN P P, SEED H B. One-dimensional dynamic ground response analyses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1982, 108(7): 935–952.
- [23] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准: GB 10070—1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [24] 张建伟, 王涛, 曹克磊, 等. 基于流固耦合效应的梯级泵站输水管道振动特性分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 134–140.
- [25] 侯慧敏, 周冬蒙, 田俊姣, 等. 泵站压力管道振动特性分析及减振优化设计[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 95–99.
- [26] 倪广健, 林杰威. 基于波有限元法的流固耦合结构波传导问题[J]. 振动与冲击, 2016, 35(4): 204–209.
- [27] 刘长卿. 结构参数对地铁引起建筑结构噪声影响分析[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(3): 223–227.
- [28] 陈鹏, 方丹, 李良权. 阻尼比对水电站厂房结构脉动压力数值计算的影响[J]. 水力发电, 2019, 45(9): 93–96.