文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

附加质量法无损检测技术在抽水蓄能电站面板堆石坝填筑工程中的应用

汪筱童
中国水利水电第十一工程局有限公司
DOI:10.32629/hwr.v10i9.7131

[摘　要] 干密度是混凝土面板堆石坝坝料填筑碾压质量检测的核心指标,检测频次高,传统坑测法耗时长、制约填筑进度。依托河南天池抽水蓄能电站上、下水库面板堆石坝工程,研究附加质量法无损检测技术在硬岩类堆石料干密度检测中的应用。该方法将堆石体等效为单自由度弹簧振动体系,通过附加质量块激振测取各级参振频率,建立D－Δm曲线求解参振质量,结合纵波波速与等效深度解析测点密度。工程应用表明,附加质量法与坑测法检测成果的相对误差在0.45%～1.43%之间,满足不大于5%的规范要求；单组检测时间由坑测法的8.5h缩减至2h,累计完成500个单元工程检测,同时实现了填筑质量的实时跟踪与动态控制,可为同类抽水蓄能电站堆石坝填筑质量检测提供参考。
[关键词] 附加质量法；无损检测；面板堆石坝；干密度；抽水蓄能电站
中图分类号：S277.1　文献标识码：A

Application of additional mass method nondestructive testing technology in the filling project of concrete face rockfill dam of pumped storage power station

Xiaotong Wang
China 11th Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau Co., Ltd.

[Abstract] Dry density is the core index for testing the rolling quality of concrete face rockfill dam. The testing frequency is high, and the traditional pit testing method takes a long time, which restricts the filling progress. Relying on the upper and lower reservoir face rockfill dams of Tianchi Pumped Storage Power Station in Henan Province, the application of additional mass method nondestructive testing technology in dry density detection of hard rock rockfill is studied. In this method, the rockfill body is equivalent to a single-degree-of-freedom spring vibration system, and the frequency of each level of parametric vibration is measured through the excitation of additional mass blocks, and the D－δ M curve is established to solve the parametric vibration mass, and the density of measuring points is analyzed by combining the longitudinal wave velocity and equivalent depth. The engineering application shows that the relative error between the additional mass method and the pit measurement method is between 0.45% and 1.43%, which meets the specification requirement of no more than 5%. The single group inspection time was reduced from 8.5h to 2h by pit inspection method, and 500 unit engineering inspections were completed in total. At the same time, the real-time tracking and dynamic control of the filling quality were realized, which can provide reference for the filling quality inspection of rockfill dams of similar pumped storage power stations.
[Key words] additional mass method; Nondestructive testing; Face rockfill dam; Dry density; pumped storage power station

引言

干密度作为混凝土面板堆石坝坝料填筑碾压质量检测的重要指标，其检测频次远高于其他检测项目，传统上采用坑测法（灌水法）检测。坑测法需要在已碾压成型的坝面上开挖试坑、灌水测体积，单组检测耗时约8.5h，且对坝体表面造成破坏，在填筑强度高、工作面大的抽水蓄能电站面板堆石坝施工中，检测作

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2529-7821 /（中图刊号）：868GL002

业与填筑碾压相互制约,成为影响进度的重要因素[1]。近年来碾压质量检测方法不断革新,先后出现了K30法、K50法、附加质量法、全质量法等,其中附加质量法以其无损、快速、可连续跟踪的特点,在部分堆石坝工程中得到尝试性应用,但尚未在硬岩类堆石坝中系统推广。

此外,坑测法开挖试坑对坝体表面造成扰动,试坑回填质量若控制不严还可能形成局部薄弱面；随着高坝大库建设增多,检测频次与进度的矛盾日益突出,发展快速、无损、可连续跟踪的检测技术成为行业共识。河南天池抽水蓄能电站上、下水库大坝均为钢筋混凝土面板堆石坝,坝料为硬岩类花岗岩。大坝填筑施工初期采用坑测法对主、次堆石料及过渡料进行干密度检测,鉴于坑测法耗时较长、制约进度,项目与各参建方商讨并经专家咨询会论证,确定采用坑测法与附加质量法相结合的方式进行质量检测。本文结合该工程实践,系统阐述附加质量法的检测原理、工艺流程与应用效果,为同类工程提供借鉴。

1 附加质量法检测原理

附加质量法是一种无损检测技术,其物理基础是激振波在不同压实干密度的介质中传播速度不同。该方法将目标堆石体等效为单自由度线性弹簧振动体系,通过附加质量求解目标堆石体的参振质量,再检测目标体动刚度及弹性纵波波长,进而求得目标堆石体密度[2]。

1.1单自由度振动体系模型

理想的单自由度弹簧振动体系中,完全弹性体的弹簧一端固定,另一端连接质点m。依据单自由度弹簧体系的振动理论,其振动位移函数与动刚度表达式为：

$$Z=A\sin(\omega t+\varphi) \quad (1)$$

$$K=m\omega^2 \quad (2)$$

式中：Z为振动位移函数；t为振动时间；ω为体系振动圆频率；A为振幅；φ为初相；K为体系动刚度；m为振子质量。

实际构造模型与理想模型的差别在于弹簧体：弹性地基具有质量和体积,并非理想的无质量弹簧。为处理这一差异,试验研究中将振子等价为一个变动的多级质量体(m0+Δm),即在承压板上逐级增加附加质量块Δm,测出各级质量下参振体系的自振频率f[3]。由式(2)可得：

$$D=1/\omega^2=(m0+\Delta m)/K \quad (3)$$

式中：D为与频率相关的参量；m0为压板下参振体质量。由式(3)可知,D与Δm呈线性关系,直线在横坐标轴上的截距绝对值乘以刚度K即为参振质量m0,或依D-Δm曲线解析求解。

1.2参振体密度解析

令参振质量m0的动能等于压板下介质薄片动能沿深度方向积分的动能,设参振体等效深度为h0,则可建立压板下介质密度解析式：

$$\rho=m0/(A\cdot h0) \quad (4)$$

式中：ρ为测点密度;A为压板面积(即模型介质振动面积)。h0的求解设定振动模型中参振质量m0的动能等于压板下介质薄片动能dE0沿无穷深度的积分,代入弹性纵波波长λ、介质纵波速度Vp及介质自振频率f0,可得：

$$h0=N\lambda/(2\pi)=N\cdot Vp/(2\pi f0) \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),得密度解析式：

$$\rho=2\pi Nm0f0/(A\cdot N\cdot Vp)=Nm0/(A\cdot h0) \quad (6)$$

式中:N为校正系数,用于修正α角(小于1°,简化计算取α=0)的影响。由式(6)可知,只要解决Vp、m0、f0、N的测定与计算问题,经附加质量法软件包处理,即可较精确地计算堆石体密度。

2 工程概况

河南天池抽水蓄能电站位于河南省南阳市南召县境内,电站由上水库、输水系统、地下厂房系统、下水库及地面开关站等建筑物组成。地下厂房内安装4台单机容量300MW的混流可逆式水泵水轮发电机组,总装机容量1200MW。上水库混凝土面板堆石坝坝高118.4m,填筑总量约293.3万m³；下水库混凝土面板堆石坝坝高100.6m,填筑总量约148.5万m³。坝体填筑料包含反滤料、过渡料、主堆石料、次堆石料、垫层料及特殊垫层料,其中主、次堆石料总量378.2万m³,过渡料总量46.3万m³,坝料岩性均为硬岩花岗岩,微新～中等风化岩石单轴饱和抗压强度在120MPa以上。

主堆石填筑料采用开挖的微风化～新鲜或弱风化花岗岩石料,最大粒径800mm,粒径小于5mm的含量不超过20%,小于0.075mm的含量不超过5%,曲率系数1～3,不均匀系数大于10,设计压实后干密度不小于2.09g/cm³,孔隙率不大于21%。次堆石填筑料采用弱风化及强风化下部花岗岩石料,级配要求与主堆石相同,设计干密度不小于2.03g/cm³,孔隙率不大于23%。

3 检测工艺与实施流程

3.1总体工艺流程

附加质量法检测的总体工艺流程为：附加质量法测试→坑测灌水法比对→试验对比确定N值→计算相对误差→周期性试验复核。附加质量法在正式用于质量评定前,必须与坑测法进行同点位比对,确认相对误差满足规范要求(不大于5%)后方可推广应用,此后仍按月度周期进行比对复核。

3.2附加质量法操作要点

附加质量法试验流程为：确定检测点位置→检测测点波速Vp→放置承压板(中心粘结振动传感器)→逐级增加质量块并激振→求取振动主频→求得m0、f0并试算干密度→反推N值→计算干密度。

(1)测点布置与波速测试。以检测点为中心,沿十字方向布设2条测线,道间距1m,采用铁锤锤击地面激发地震波,用PDS-PS基桩动态测量仪采集地震波传播信息,制作各测点的地震P波时距曲线,曲线斜率的倒数即为纵波速度,取十字交叉两测线Vp1和Vp2的平均值作为该点波速Vp。

(2)承压板安置。平整测点场地,铺设2cm厚粗砂作为耦合层,将1m×1m承压板平放于砂垫层上,用黄油将振动传感器黏结于承压板中心位置[4]。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

(3)逐级激振与主频采集。在承压板上分别加2、4、6、8、10块质量块(每块112kg),利用磁铁吸盘吸附90kg激振锤,经手拉葫芦提升至距地面1.2m、距承压板边缘水平0.2m处,断开吸盘使激振锤自由落下激振,PDS-PS测量仪自动记录振动信号并作FFT变换,得到各级质量下的频谱曲线。

(4)参数求解。在D-Δm坐标系中,延长拟合直线与纵轴相交,结合式(3)求得m0与f0,试算测点干密度ρ′。附加质量不少于4级,且质量级差应保证各级自振频率变化值大于1Hz。

3.3坑测法比对与N值率定

坑测灌水法在附加质量法相同点位进行：人工利用工器具开挖试坑,灌水测定体积计算湿密度,另取部分坝料室内烘干计算含水率与干密度。利用坑测法成果反推各测点Ni值(i=1,2,3,4,5),对5个测点的N值取平均值作为该填筑区的率定系数N,再按式(6)计算各测点附加质量法干密度ρ附,与坑测法结果比对计算相对误差。

3.4周期性试验复核

每月开展一次附加质量法与坑测法对比试验,分析两种方法干密度测试结果的相对误差是否满足不大于5%的规范要求;若相对误差超限,则依据对比试验重新调整N值,直至相对误差降至5%以下。长期数据积累表明,前期数据相对离散较大,后期数据基本无离散,相对误差稳定在4%以内,检测体系运行可靠。

4 应用效果分析

4.1两种方法检测成果比对

大坝填筑期间,选取主堆石区、次堆石区各代表测点开展同点位比对试验,成果见表1。由表1可知,5个比对测点两种方法检测结果的相对误差在0.45%～1.43%之间,远小于5%的规范限值;本工程主堆石、次堆石设计干密度指标分别为不小于2.09g/cm³、2.03g/cm³,附加质量法计算值均满足设计要求,满足推广应用的前提条件。

表1 附加质量法与坑测法干密度比对成果统计表

比对测点	比对部位	附加质量法干密度(g/cm³)	坑测法干密度(g/cm³)	绝对误差(g/cm³)	相对误差(%)
主堆J1	坝0-037.58,坝左0+17.82,EL469.2	2.15	2.18	-0.03	1.38
主堆J2	坝0-029.65,坝右0+05.43,EL469.2	2.22	2.24	-0.02	0.89
主堆J3	坝0-016.37,坝左0+11.36,EL469.2	2.14	2.12	0.02	0.94
次堆J4	坝0-072.62,坝左0+20.31,EL484.6	2.13	2.10	0.03	1.43
次堆J5	坝0-063.71,坝左0+39.68,EL484.7	2.22	2.21	0.01	0.45

4.2检测效率与社会效益

传统坑测法每组检测需投入人员6人,工期1.06天,单组检测全程耗时约8.5h,检测期间相应作业面需暂停碾压等待结果;而附加质量法每组检测需投入人员3人,工期0.25天,单组检测耗时约2h,可与填筑碾压流水衔接,基本实现随碾压随检测,检测效率显著提升。在社会效益方面,基于该模式,能够形成新的检测模式和工作机制,发挥新技术应用的实践成效,实时跟踪检测成果,动态控制填筑质量,有效解决了工程进度与质量之间的关系,采用与原始检测方法(坑测法)有机搭配,确保了检验成果科学性、有效性,为早日发电缓解用电高峰电力紧张作出贡献,具有良好的社会效益。

4.3质量控制要点

检测质量控制执行《碾压式土石坝施工规范》(DL/T 5129-2013)[5]。仪器配置方面,振动信号分析仪频率精度不低于0.5Hz,频带2Hz～2kHz；激振锤采用90kg自由落锤；速度检波器灵敏度优于250 mV·cm⁻¹·s⁻¹,频带宽度10Hz～120Hz；承压板选用方形钢板,厚度与边长之比不小于0.02,承压板边长不宜大于被检测层厚度的1.5倍,且不宜小于堆石体最大粒径。检测过程方面,附加质量不少于4级且等差设置；当被检测层厚度小于介质最大粒径的4倍时,应以测点为中心检测2～4次；测试密度值按位置绘制点位图并列表归档,计算率定系数、各级附加质量对应的共振频率、参振质量与密度,保证资料可追溯。

5 结语

针对抽水蓄能电站面板堆石坝填筑中坑测法耗时、制约进度的问题,河南天池抽水蓄能电站上、下水库工程将附加质量法与坑测法有机结合应用于硬岩类堆石料干密度检测。实践表明：两种方法比对相对误差为0.45%～1.43%,满足规范要求;单组检测时间由8.5h缩减至2h；通过月度周期性比对持续校核N值,实现了对填筑质量的实时跟踪与动态控制,有效化解了工程进度与质量之间的矛盾。附加质量法作为一种成熟可行的无损检测手段,在硬岩类面板堆石坝中具有推广价值,后续可结合全质量法与实时监测技术,进一步完善坝体填筑质量的全过程数字化管控。

[参考文献]

[1]夏康,蔡伟,赵伟.基于材料密度参数化的附加质量优化方法[J].中国农村水利水电,2025,(9):176-181.

[2]李明昊.附加质量法检测掺砾心墙料密度的试验及数值模拟研究[D].郑州大学,2024.

[3]代志宇,张帆,杨浩明,等.堆石料粒径对附加质量法测试的影响研究[J].人民黄河,2023,45(12):141-147.

[4]徐思远,陈生水,傅中志,等.附加质量法在土石混合料密度检测中的适用性研究[J].岩土工程学报,2023,45(S1):1-5.

[5]王峰,朱伟玺,胡存宝,等.基于附加质量理论模型的心墙砾石土密实度求解[J].人民长江,2023,54(11):134-138.

作者简介：

汪筱童(1994--),女,汉族,河南荥阳人,大学本科,工程师,水利水电。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.