

# 基于稳态表面波法检测压力钢管灌浆质量

赵文波<sup>1,2</sup> 李春风<sup>1,2</sup> 刘含漪<sup>1,2</sup>

1 中国水利水电科学研究院 2 北京中水科工程集团有限公司

DOI:10.12238/hwr.v8i11.5874

**[摘要]** 本文简要介绍了稳态表面波技术原理和检测系统,并应用该技术开展水电站压力钢管混凝土回填灌浆质量检测现场试验,结果表明:采用稳态表面波法能够准确识别压力钢管外回填混凝土不密实区,结果准确可靠,可作为二次回填灌浆施工依据,为压力钢管段消缺提供可靠支撑。

**[关键词]** 稳态表面波检测; 压力钢管; 回填混凝土; 检测技术

**中图分类号:** TV732.4+1 **文献标识码:** A

## Detection of grouting quality of pressure steel pipes based on steady-state surface wave method

Wenbo Zhao<sup>1,2</sup> Chunfeng Li<sup>1,2</sup> Hanyi Liu<sup>1,2</sup>

1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research 2 Beijing IWHR Corporation

**[Abstract]** In this paper, the principle and testing system of the steady-state surface wave method are briefly introduced, and the field test of testing the quality of backfill grouting of pressurized concrete-filled steel tube in hydropower station is carried out by using this method. The results show that the steady-state surface wave method can accurately identify the non dense area of backfill concrete outside the pressure steel pipe, and the results are accurate and reliable. It can be used as a basis for secondary backfill grouting construction and provide reliable support for defect elimination of pressure steel pipe sections.

**[Key words]** Steady state surface wave method; Penstock; Backfilling concrete; Detection technology

### 引言

西部某水电站在建设过程中,受强降雨、工程地质等多种原因所致厂房底板出现裂缝。厂房底板的稳定性直接关系到厂房和发电机组的安全,所以需要及时对厂房底板裂缝深度及其他缺陷情况进行检测。大体积混凝土裂缝检测方法,通常采用超声波法。但该厂房底板厚度达2.4m,超声波法无法达到这一检测深度,故采用了稳态表面波法进行检测试验。试验结果表明,稳态表面波法能够快速检测大体积混凝土裂缝的深度,检测结果准确可靠。

### 1 概述

表面波是一种常见的弹性波,也称瑞利波或者R波。在均质弹性半无限空间中,通过竖向动荷载作用而产生,呈椭圆形波面沿介质表面向前传播,其能量绝大部分集中在一个波长深度范围内。在各向同性半无限弹性体中传播时波动方程可由下面的方程式表示:

$$U_x = Ak(e^{-qz} - \frac{2qs}{k^2 + s^2}e^{-sz}) \cdot e^{i(kx - \omega t - \pi/2)}$$

$$U_z = Aq(e^{-qz} - \frac{2k^2}{k^2 + s^2}e^{-sz}) \cdot e^{i(kx - \omega t)}$$

$$\text{式中: } q = \sqrt{k^2 - k_e^2} \quad s = \sqrt{k^2 - k_t^2}$$

$k$ : 表面波波动常数  $k_e$ : 纵波波动常数  $k_t$ : 横波波动常数

$U_x$ : 表面波水平方向振幅  $U_z$ : 表面波垂直方向振幅

在理想半无限弹性体的表面点振源发振时,所产生的各成分弹性波的分配比率大概是表面波(R波)67%,纵波(P波)7%,横波或剪切波(S波)26%,表面波能量最大。相比于纵波和横波,表面波在传播路径上的衰减也小。这有利于表面波信号的采集与处理。

表面波检测有两种方法:稳态表面波检测法和瞬态表面波检测法。瞬态表面波的震源常用锤击、爆炸等瞬态震源产生脉冲波的方式产生瞬态表面波,包含有很多种频率成分的表面波,后续的分析处理信号时需要将各种频率成分进行分离处理,信号分析系统的要求较高,测试精度不好掌握。稳态表面波检测法利用专用的激振器发射系统连续发射单一频率的表面波进行测试。它的发射系统较复杂,表面波发射信号和接收信号精度高,有利于后续的分析处理。

### 2 稳态表面波检测原理

表面波传播于半无限弹性体介质中,表面波波速 $V_R$ ,横波波速 $V_S$ 及纵波波速 $V_P$ 之间的关系可用以下简化公式来表示:

$$V_S = \frac{1+\mu}{0.87+1.12\mu} V_R \quad V_P = \sqrt{\frac{2-2\mu}{1-2\mu}} V_S$$

式中 $\mu$ 为泊松比

一般情况下,混凝土的泊松比在0.20~0.25。 $\mu=0.2$ , $V_R=0.91V_S$ , $V_R=0.56V_P$ 。 $V_R$ 与混凝土抗压强度、弹性模量等力学参数有着较好的相关性。

表面波的传播速度 $V_R$ 与激振频率 $f$ 之间存在如下关系:

$$V_R = f \cdot \lambda_R$$

式中 $\lambda_R$ 为表面波的波长

在已知介质中,表面波的波速只与传播介质有关,在正常混凝土中约1500~2500m/s,是一个确定值。若改变表面波的发射频率即能改变表面波的波长,就是改变表面波在介质中的传播深度。传统均值弹性半空间中,表面波的能量绝大部分集中在一个波长深度范围内,在无限半空间的等效传播深度 $D=\lambda_R/2$ 。当改变表面波的发射频率,便能改变表面波等效传播深度。

现场检测时,表面波激振器向被检测混凝土发射固定频率 $f_0$ 的表面波,沿表面波传播路径布置传感器接收表面波信号。将接收信号进行分析处理,求取表面波在该传播路径上不同测点之间的信号时间延迟值 $\tau$ 。利用公式 $V_R=d/\tau$ ( $d$ 为表面波的传播路程),最终得到频率为 $f_0$ 的表面波在该路径上的传播波速。改变发射频率 $f_0$ ,就能得到所有频率表面波在该路径上的传播速度,这就是表面波在这一传播路径上的频散曲线。通过对表面波的接收波形、频散特性进行计算分析,能够评价混凝土不同深度范围内的质量及可能存在的缺陷。

### 3 稳态表面波检测方法及其现场布置

稳态表面波无损检测系统由笔者单位自主研发。发射系统采用单频率的调制脉冲波作为激发震源,采用多通道高精度加速度传感器来接收表面波信号。信号接收后,经信号放大、信号跟踪滤波、信号采集、信号同步叠加,最终进入计算机,并通过处理软件完成计算处理,将处理结果显示及存储记录。

某大II型水利枢纽工程,工程以防洪、供水为主,兼顾发电等综合效益。该工程引水隧洞靠近机组段是一段40米长的压力钢管隧洞,洞径2.5m,钢管厚度16mm,采用平均厚度为40cm混凝土衬砌,对钢管与混凝土之间的缝隙进行了接缝灌浆。因隧道所处位置,地质构造主要为灰岩、泥岩,裂隙较多。根据业单位需求,须对隧洞压力钢管进行回填混凝土灌浆质量检测,经多方调研,拟采用稳态表面波法对压力钢管衬砌段进行检测。

根据检测现场实际情况,共布置3条测线,分别位移顶拱和两个拱腰部位。顶拱的测点间距为2m,拱腰的测点间距4m,共布置测点40个。沿顺水流方向,采用红色油漆标注测点,组织人员进行测线放样布置,记录现场测点布置图。

测点内激振器和传感器的布置示意图如图1所示,图中G点为稳态表面波激振器的激振点,P1、P2为高精度加速度传感器的安装点。现场布置G、P1、P2处于同一条直线上,通常情况下, $d_1=0.5m$ , $d_2=1.0m$ 。

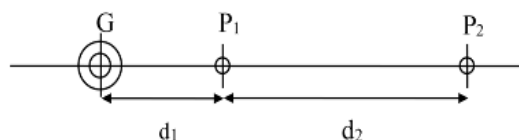


图1 稳态表面波检测测点布置示意图

测点、测线确定后,将激振器与传感器布置在同一个水平面,使得表面波传播路径平行于水平线。激振器的发射头安装了一个强吸附力的磁性材料,便于激振器与钢管进行紧密表面贴合,安排专人托扶,进行安全性保护。加速度传感器通过粘结剂与钢管固定。

仪器布置好后,启动测试仪器。发射频率按从高频到低频(8000Hz~700Hz等效深度约1.2米)的方式逐一扫频测量,传感器接收从G点发射分别到达P1、P2点的表面波信号,信号经过滤波、互相关计算及Hilbert变换后,求取该测试点所有频率的表面波在P1、P2之间的时间延迟及幅度衰减等参数,现场记录所有测试波形和频散特性测量值。通过后续的资料整理分析,我们得到各测试点的混凝土灌浆质量。

### 4 现场检测结果

通过现场的检测和资料整编分析,得到所有40个测量点的全部频率点的现场实测波形和频散曲线。限于篇幅,我们抽取少量测点进行分析说明。

如图2压力钢管YC8测点及DG5测点的频率-时间曲线图,随着测试频率的降低,测试深度的增加,通过计算表面波波速,未出现低速异常区间,表明该测点不存在不密实区。对应的该测试点2000Hz实测波形图分别见图4,波形正常。

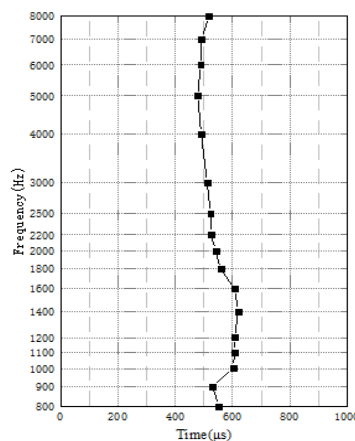


图2 YC8测点频率-时间曲线图(正常测点)

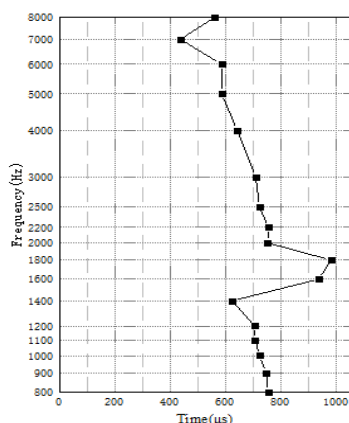


图3 DG9测点频率-时间曲线图(有异常)

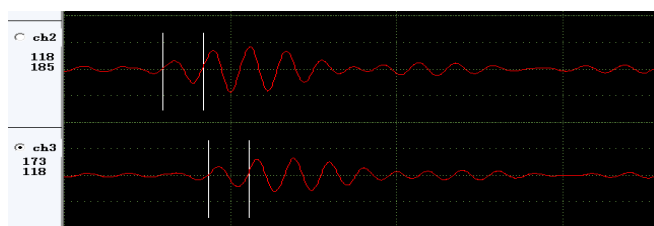


图4 YC8测点2000Hz信号(正常信号)

如图3, 压力钢管DG9测点, 随着测试频率的降低, 测试深度的增加, 表面波传播时间异常增加, 判断出现低速异常区。从图中可得到: 特征频率 $f_1=6000\text{Hz}$ , 瑞利波在二拾振器之间的传播时间 $t=586\text{s}$ ; 特征频率 $f_2=1600\text{Hz}$ , 瑞利波在二拾振器之间的传播时间 $t=937\text{s}$ , 根据瑞利波检测原理计算, 压力钢管DG9测点 $0.15\text{m}\sim 0.35\text{m}$ 深度范围内存在不密实区。对应的该测点 $6000\text{Hz}$ 、 $1600\text{Hz}$ 实测波形出现了回波多和信号共振的情况。见图5、图6。

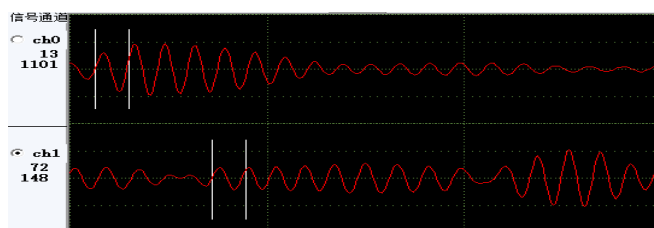


图5 DG9 6000Hz信号(回波多)

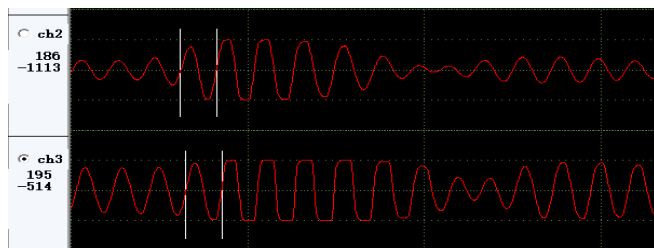


图6 DG9 1600Hz信号(信号共振)

通过现场检测和数据分析, 得到以下结论:

压力钢管衬砌段 $0+418\sim 0+458$ 共布置了40个表面波检测点,

通过检测, 压力钢管段衬砌混凝土与围岩间存在不密实区的测点数为6个, 分别位于在 $0+419.0\sim 0+420.0$ 、顶拱 $0+434.7\sim 0+435.7$ 、顶拱 $0+440.7\sim 0+441.7$ 、顶拱 $0+446.7\sim 0+447.7$ 、顶拱 $0+453.0\sim 0+454.0$ 、顶拱 $0+455.5\sim 0+456.5$ 区域存在深度范围不同的不密实区。

## 5 结果验证

根据上述检测成果, 业主要求施工单位对检出的不密实区进行钻孔验证。钻孔验证结果表明, 实际情况与检测结果相符, 检测结果准确可靠, 可以作为二次回填灌浆的依据。

施工点位根据检测成果, 对检出的不密实区域进行二次回填灌浆。灌浆结束后7d, 再次对第一次检测的不密实区进行复测, 发现不密实区均已充填密实, 不密实区隐患已排除, 可为压力钢管段消缺提供可靠支撑。

## 6 结束语

综上所述, 稳态表面波检测法对于压力钢管段混凝土灌浆质量检测是有效的, 能够检测出钢板下和较密集钢筋层下混凝土浅层的质量缺陷。它是一种无损、便捷、快速的检测方法, 能够为设计、施工服务。利用稳态表面波检测法, 我们已经在多个水利水电工程进行了系列的检测试验, 取得了较好的效果。当然, 通过现场的实际应用, 我们也发现了该方法存在一些不足。比如: 大口径的洞径, 激振器的安装问题; 传感器在潮湿环境下, 传感器快速布置等问题。我们相信: 随着稳态表面波检测技术的不断完善, 该检测方法的前景和应用会越来越广泛。

## 【参考文献】

- [1]张震夏,李平,赵文波,等.表面波无损检测技术及其在大坝安全监测中的应用[J].大坝观测与土工测试,1996,(1):42-45.
- [2]李平,赵文波,姚成林,等.无损检测技术在葛洲坝船闸上的应用[J].水运工程,1998,(3):28-31.
- [3]姚成林,程利华,张震夏,等.稳态表面波法检测混凝土裂缝[C]大坝安全与堤坝隐患探测国际学术研讨会论文集,2005.
- [4]邓中俊,姚成林,贾永梅.基于稳态表面波法的水工混凝土无损检测技术应用进展[J].水利水电技术,2015,46(4):108-113.
- [5]贾永梅,姚成林,邓中俊等.稳态表面波法检测地下混凝土防渗墙接缝质量[C]2015水利水电地基与基础工程——中国水利学会地基与基础工程专业委员会第13次全国学术研讨会论文集,2019.
- [6]杨天春,何继善.层状介质中瑞利波频散特性[M].中南大学出版社,2013.
- [7]智斌,赵文波,邓中俊,等.混凝土裂缝深度稳态表面波检测技术[C].中国水利学会2019学术年会论文集,2019.

## 作者简介:

赵文波(1967--),男,汉族,湖北武汉人,本科,高级工程师,主要从事水利水电工程检测、仪器研发工作。