



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.021

黄涛, 冯少孔, 朱新民, 等. 基于横波冲击映像法的水闸底板脱空缺陷检测[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 134-140. HUANG Tao, FENG Shaokong, ZHU Xirmin, et al. Void detection of sluice floor based on shear wave impact imaging method[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 134-140. (in Chinese)

基于横波冲击映像法的水闸底板脱空缺陷检测

黄涛¹, 冯少孔², 朱新民¹, 商峰¹, 赵丽娜¹

1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 某水利枢纽下游侧存在渗水、冒水等严重问题, 采用横波冲击映像法对进水闸底板与基础围岩脱空情况进行探查, 结果表明该法不受水和钢筋网等因素干扰, 为修补加固设计方案提供可靠基础资料。文中阐述了检测方法原理、设备及检测过程, 给出了数据处理流程, 通过数值模拟制定脱空标准, 完成闸底板脱空缺陷分布图。检测结论: (1) 水闸底板存在脱空, 部分底板脱空区形成渗漏通道, 造成下游侧涌水; (2) 脱空率大于 20% 的闸底板, 需要及时灌浆处理, 中等程度脱空的闸底板, 还需做进一步探查, 其他的脱空不严重水闸底板无需处理; (3) 建议对水闸进行垂直变形和水平变形监控, 严格控制最高运行水位, 防范水闸塌陷和下滑。横波冲击映像法为类似工程缺陷问题的探查提供了借鉴。

关键词: 脱空检测; 横波勘探; 冲击映像法; 水闸底板

中图分类号: TV 698.22 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)05-0134-07

Void detection of sluice floor based on shear wave impact imaging method

HUANG Tao¹, FENG Shaokong², ZHU Xirmin¹, SHANG Feng¹, ZHAO Lina¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: There are serious seepage and gushing problems on the downstream side of a certain hydraulic project. We investigated the void situation between the sluice floor and the foundation surrounding rocks using the shear wave impact imaging method (SIIM). The results showed that SIIM was free from the interference of water and steel mesh. The investigation provided reliable basic data for the repair and reinforcement designing scheme of the hydraulic project. This paper first describes the principle of the detection method and the procedures of detection and data processing, then develops void standards by numerical simulation, and finally presents the distribution of the void defects of the sluice floor. The conclusions are as follows: 1) There were voids beneath the sluice floor and some voids formed leakage passages which caused water gushing on the downstream side. 2) The sluice floors with greater than 20% void area needed timely grouting treatment; the floors with moderate void area needed further examination; the other floors with less severe voids needed no treatment. 3) Measures should be taken to monitor the vertical deformation and horizontal deformation of the sluice, strictly control the maximum operating water level, and prevent sluices from collapsing and falling. SIIM provides a reference method for defects exploration in similar hydraulic projects.

Key words: void detection; shear wave exploration; impact imaging method; sluice floor

收稿日期: 2016-04-12 修回日期: 2016-07-11 网络出版时间: 2017-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1922.009.html>

基金项目: 国家“973”计划课题(2013CB036406); 国家自然科学基金(51209121; 51578544)

Funds: National 973 Program(2013CB036406); National Natural Science Foundation of China(51209121; 51578544)

作者简介: 黄涛(1978-), 山东枣庄人, 博士, 高级工程师, 主要从事水工建筑物数值计算与缺陷检测及安全评估方面研究。E-mail: huangt@iwhr.com

在水利闸坝枢纽建筑物中,水闸底板安全处于重要位置,它的安全与否直接影响水闸的承载力和抗滑稳定性^[1-3]。由于长期受到上下游水压力及其冲刷,水闸底板很容易形成掏空等隐患。而这种安全隐患处在水面之下,用常规的方法很难发现,因此需要有一套简便、快速、质量可靠的手段进行检测^[4-6]。目前常用底板脱空渗漏检测方法有地质雷达法、冲击回波法、钻心取样法等方法。基于电磁波的地质雷达法受钢筋网、水、外界高压线等影响比较大^[7-8],钻芯取样法会导致底板和钢筋网破坏,基于弹性波的冲击映像法可以消除上述方法的局限性^[9]。

地震波(弹性波)分为纵波和横波,纵波质点位移的方向与波的传播方向一致,横波的质点位移方向与波的传播方向垂直。目前常见的地震波勘探采集的是纵波信号,而横波勘探采集的是横波信号^[10-12]。在松散浅地层中横波具有低速度、短波长等特点,使得横波勘探精度远大于纵波,另外横波基本不受地层水饱和度的影响^[13]。横波在超声波检测含水或夹泥层裂缝深度时,试验也取得较好的结果^[14-15]。冲击映像法是基于弹性波理论,接收反射波与瑞雷面波的垂直分量,该法已成功应用于检测渡槽空鼓裂缝^[16]、海河沉管隧道基础注浆密度质量控制^[17]。鉴于此,本文欲采用基于横波的冲击映像法对某水利枢纽闸底板脱空区域进行检测,为后期修补加固提供基础数据。

1 工程概况

某水利枢纽工程位于内蒙古赤峰市西拉木伦河干流上,工程始建于1976年1月,1978年8月竣工并投入使用。该枢纽控制流域面积28 173 km²,是一座以灌溉为主,兼有交通、发电、治沙、防洪等综合效益的水利枢纽工程,为赤峰市农牧业经济发展及社会稳定发挥了巨大作用。枢纽工程由拦河闸、土坝、左右岸进水闸、公路桥和河床式水电站等五项工程组成。拦河闸24孔,为10×4.2 m钢质平卧门,闸总宽260.7 m,设计过闸流量4 120 m³/s;土坝总长1 013 m。枢纽两岸均为赤峰花岗岩粗粒构造,表面球状风化严重,风化层厚2~3 m。左岸主要节理为NE30°~60°,右岸主要节理为NE60°~30°,河道宽1 300 m,河床覆盖层厚30~50 m,上层为中砂夹有极少量的细砂,厚10~25 m,下层为砂卵石,厚5~15 m,底部基础为花岗岩,与两岸相同,拦河闸处于饱和和紧密的中砂层上。

2011年7月25日至26日,西辽河上游查干木伦河发生1 500 m³/s的洪水。7月27日,西拉木伦

河洪峰流量达到1 424 m³/s,洪峰经过水利枢纽后,枢纽下游海漫水平段上淤积的40 cm厚的泥沙面上出现二十多处线状分布的涌水点,横贯海漫水平段,在海漫水平段与斜坡段的结构缝位置,也有零星的涌水点。清除局部的淤积层后,显示海漫水平段混凝土剥蚀严重,裂缝渗漏已形成射流,图1给出了海漫水平段带状裂缝涌水情况。

本文采用基于横波冲击映像法的检测技术探查该水利枢纽工程脱空情况,为后期修补加固设计提供基础依据。

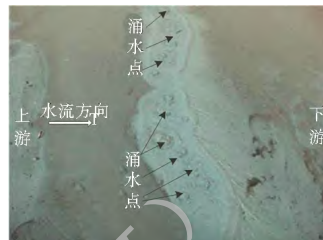


图1 海漫水平段带状裂缝涌水

Fig. 1 Gushing from strip cracks on horizontal section of the apron

2 检测方法原理及设备

2.1 横波冲击映像法

冲击映像法利用的是近源弹性波。所谓近源,是指接收点离激发点很近,体波和面波以及体波的直达波和反射波等混杂在一起,不能用通常的地震反射法的方法去分析数据。如果介质模型比较简单,缺陷属性单一(例如只存在脱空,或只存在厚度变化等),检测时只需要确定缺陷的平面位置,这时可以不对波场进行分离,直接从波形特征变化判断。如果介质模型复杂,存在多种缺陷,就需要通过复杂的数学方法对波场进行分离分析。一般说来,频率越高,波速越低,各种波就越容易分离。但是,频率越高,激发力度和冲击锤的质量就需要越小,激发信号就越弱,信号也越不稳定。同时弹性波频率越高,衰减就越大,检测深度就越浅,因此需要根据实际检测需要综合考虑以平衡各种优缺点^[18-20]。

横波(S波)冲击映像法,根据弹性波传播理论,弹性波由激发点向外传播,遇到界面会产生反射、折射和类型转换等。由于冲击映像法设置的接收点离激发点很近,波动几乎是垂直入射到介质内部的界面上,然后又被垂直的反射回来,形成一次反射波,一次反射波入射到介质表面后,一部分能量又被反射回去,然后再次被反射回来形成二次反射波,依次类推。为了从理论上进行分析,可以把这一过程展开成图2的形式,各反射波可以表达为:

$$A_1 = A_0 R_1 e^{i\omega t}$$

$$A_2 = A_1 R_0 R_1^{i w} = A_0 R_1^2 R_0 e^{i 2 w}$$

.....

$$A_{n-1} = A_{n-1} R_0 R_1 e^{i w} = A_0 R_1^{n-1} R_0 e^{i(n-1) w}$$

$$A_n = A_{n-1} R_0 R_1 e^{i w} = A_0 R_1^n R_0 e^{i n w}$$

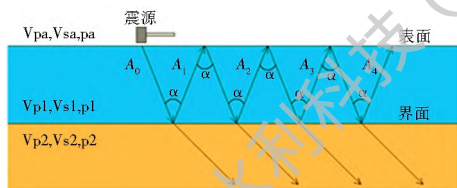


图 2 弹性波在界面间的多次反射

Fig. 2 Multiple reflections of elastic waves between the interfaces

上述分析可知,由检波器接收到的弹性波是各次反射波信号的叠加,信号强度以及波动的延续时间主要由界面的反射系数和介质对弹性波的衰减特性决定,由于衰减特性是材料本身的物理性质,因此,接收到的弹性波主要反映介质内部界面的反射系数。由弹性波理论可知,当弹性波垂直入射时,反射系数可表示为:

$$R_{0p} = \frac{\rho_a V_{pa} - \rho_1 V_{p1}}{\rho_a V_{pa} + \rho_1 V_{p1}}, R_{0s} = \frac{\rho_a V_{sa} - \rho_1 V_{s1}}{\rho_a V_{sa} + \rho_1 V_{s1}}$$

$$R_{1p} = \frac{\rho_2 V_{p2} - \rho_1 V_{p1}}{\rho_2 V_{p2} + \rho_1 V_{p1}}, R_{1s} = \frac{\rho_2 V_{s2} - \rho_1 V_{s1}}{\rho_2 V_{s2} + \rho_1 V_{s1}}$$

式中: V_{pa}, V_{sa}, ρ_a 分别表示空气的 P 波速度, S 波速度 ($\equiv 0$) 和密度, V_{p1}, V_{s1}, ρ_1 分别表示介质 1 (结构物本身) 的 P 波速度, S 波速度和密度, V_{p2}, V_{s2}, ρ_2 分别表示介质 2 (缺陷处) 的 P 波速度, S 波速度和密度。

对于介质表面, $V_{sa} \equiv 0, \rho_a \approx 0$, 因此,无论是 P 波还是 S 波的反射系数都为 -1 , 即产生全反射 (-1 表示反射波和入射波相位相反)。介质内部的反射界面一般为缺陷区域的包络面, V_{p2}, V_{s2}, ρ_2 即为缺陷区域的介质物理参数。对于水面下的脱空区,其内部充满水或软泥, $V_{p2} \approx V_{pw}$ (水的 P 波速度), $V_{s2} \approx 0$, 因此,反射系数 $|R_s| \gg |R_p|$ (横波反射系数远大于纵波反射系数), 可见如果采用 S 波的冲击映像法检测混凝土底板下脱空情况会比利用 P 波更为有效。

2.2 检测设备

横波冲击映像法所用仪器设备数量以及技术指标见表 1。

3 检测过程及结果分析

3.1 测线 布置

检测测线及测点布置见图 3。面向下游方向,以闸门与右闸墩的交点为坐标原点,由右闸墩向左

表 1 所用仪器设备一览表

Tab. 1 Overview of the equipment to be used

仪器名称	生产厂家	数量	技术指标
地震仪	美国	1	通道数: 24 频率范围: 1.75~ 20,000 Hz A/D 转换: δ - Σ 式 24bit
检波器	国产	2	固有频率: 100 Hz 形式: 动圈式速度型 分量: 3 分量
震源	国产	1	长宽高分别为 0.15 m \times 0.15 m \times 0.15 m 正方形钢锭一个 (质量约 25 kg); 钢质圆顶锤子 1 把 (质量约 250 g)
其他	国产		12V 电瓶 1 块 笔记本电脑 1 台

闸墩为横坐标 (x 轴) 的正方向,由上游向下游为纵坐标 (y 轴) 的负方向。共布设 13 条测线,测线间距为 0.5 m,第 1 条测线 L1 的纵坐标为 -0.5 m,第 2 条测线 L2 的纵坐标为 -1.0 m,依次类推,第 13 条测线 L13 的纵坐标为 -6.5 m。每条测线设置 34 个检测点,检测点间距 0.25 m,第一个检测点的横坐标为 0.5 m,第 2 个检测点的横坐标为 0.75 m,依次类推,第 34 个检测点的横坐标为 8.75 m。

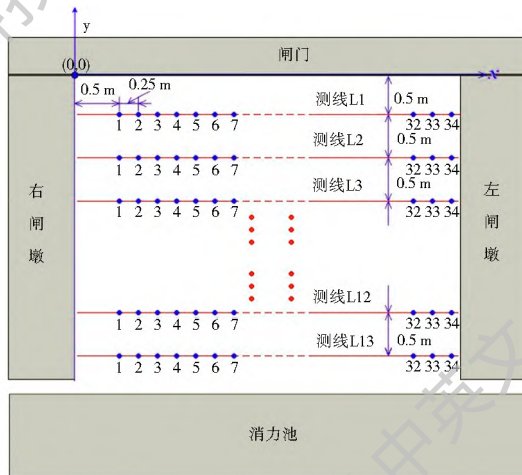


图 3 测线与测点布置

Fig. 3 Configuration of measuring lines and measuring points

3.2 检波器和震源设置

如图 4 所示,将 3 分量检波器设置与检测点正上方并调平检波器,且检波器的中心对准检测点,检波器的 X 分量指向测线终点方向, Y 分量与测线垂直, Z 分量垂直于底板表面,图 4 中横波震源上的字母 F、B 分别表示前方、后方, R、L 分别表示右边和左边。共布置 2 个 3 分量检波器,检波器间距 0.5 m。震源设置于测线起点一侧,距离第 1 个检波器距离 (震源偏移距) 为 0.5 m。设置震源时,首先把重约 25 Kg 的正方形钢锭设置于激发点正上方,钢

锭中心对准激发点,使钢锭的一边平行于测线方向并调稳。

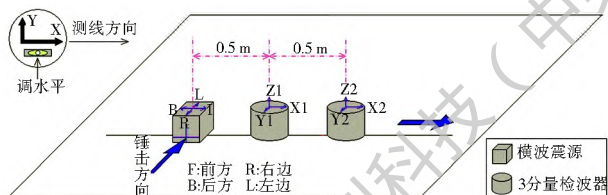


图4 检波器与震源设置图

Fig. 4 Layout of geophones and wave source

横波激发方式:如图5所示,激发横波时,首先把重约 25 kg 的正方形钢锭设置于激发点正上方,钢锭中心对准激发点,使钢锭的一边平行于测线方向并调稳,然后用质量约 250 g 的钢质圆顶锤子,对准钢锭平行于测线的侧面的中心偏下位置敲击,锤击方向垂直于测线并平行于底板表面。当锤子反弹回来后,应及时止住激发锤避免第 2 次激发。另外,在整个检测工程中尽量保持锤击力度和敲击方向不变。

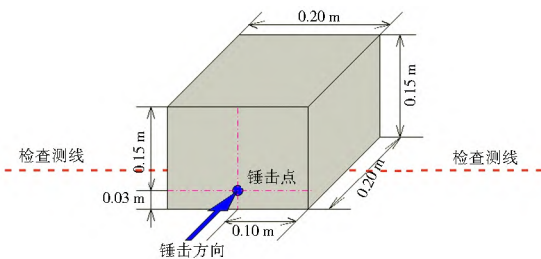


图5 横波激发方式示意图

Fig. 5 Schematic of shear wave excitation

数据采集参数设定见表 2。

表2 采集数据参数一览表

Tab.2 Parameters of data collection

采集参数	设置
数据通道数	6
采样间隔(秒)	0.000020833
记录长度(个数)	4096
检测点间隔(m)	0.25
震源偏移距(m)	0.50
震源发振方向	垂直于测线方向,由右向左激发

为了确认横波震源所激发的波是否为横波(SH波),在正式数据采集前首先进行了震源试验。实验首先将震源设置好,然后垂直于测线方向,分别由右向左锤击和由左向右锤击钢锭并记录波形,最后比较两个波形的相位。由于两次激发的发振方向相反,在其他条件都一样的情况下,接收到的波形应该一样,但其相位应相反。

由图6可以看出,虽然受各种干扰影响在局部上两个波形的相位并不完全相反,但整体看来,两波

形的相位相反,证明用上述方法激发出的弹性波就是横波,符合横波勘探要求。

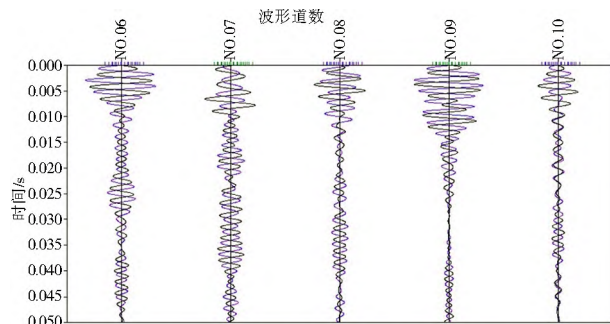


图6 横波震源实验波形验证

Fig. 6 Verification experiment of the shear wave source

3.3 数据分析流程

横波冲击映像法的数据分析流程见图7。数据分析工作可分为数据处理、数值模拟和结果解释3大部分。

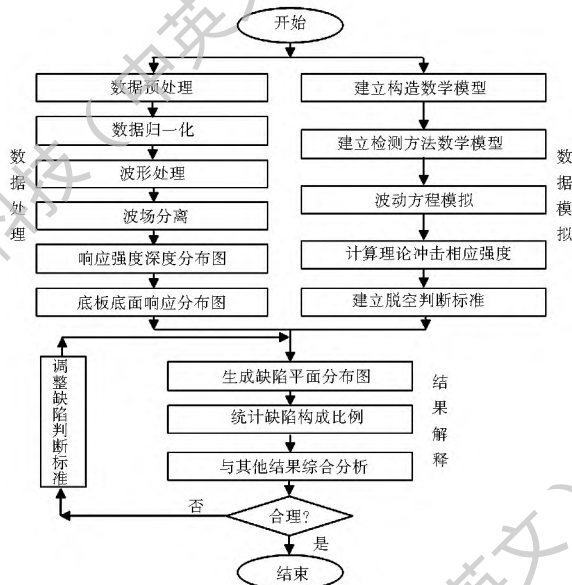


图7 横波冲击映像法数据处理流程

Fig. 7 Data processing procedure of SIIM

3.4 缺陷判别标准

一般说来,由冲击响应强度判断密实状况需要根据数值模拟结果和少量的取芯数据,不断调整判断标准。但是由于本检测项目没有取芯数据,只能根据理论计算波形,获取冲击响应强度与输入模型脱空范围的对应关系。应该指出,由于数值模拟并不能完全模拟底板及其下地质情况的细节,这势必影响结果的解释。另外,在脱空区的边界附近,当激发点和接收点分别位于脱空区边界的两侧时,无法精确判定脱空区的边界。考虑到以上因素,在制定脱空判断标准时,设有疑似脱空区域(过渡区)。

数值模拟是根据检测建筑物的内部结构以及工

程地质信息, 建立检测建筑物和地基的数学物理模型, 然后根据检测原理和检测参数, 建立检测方法的数学模型, 最后通过数值求解给定模型下的波动方程, 从理论上分析底板脱空与冲击响应强度的关系, 为实际检测数据的分析和结果解释提供判别标准。

图 8 为底板及其下部地层的数学物理模型, 其中, 第一层厚度为 0.5 m, 对应于后来在原底板上二次浇筑的混凝土层, 纵波波速 $V_p = 4500$ m/s, 横波波速 $V_s = 2000$ m/s, 第 2 层厚度为 1.5 m, 对应于原先浇筑的底板, 纵波波速 $V_p = 4000$ m/s, 横波波速 $V_s = 1800$ m/s, 第 3 层为底板基础, 纵波波速 $V_p = 2000$ m/s, 横波波速 $V_s = 800$ m/s, 在中间设置了 2 m(长) \times 0.5 m(厚) 的模拟脱空区域, 脱空区内设定充满水, 纵波波速 $V_p = 1550$ m/s, 横波波速 $V_s = 0$ m/s。波动方程数值求解采用有限差分法。为了减少拼接效应的影响, 除了采用透射-吸收混合型边界条件外, 还在模型的左右两侧各增加 5 m 的附加计算域, 计算网格大小为 0.05 m 的正方形网格。

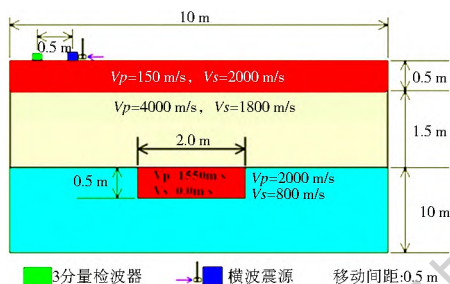


图 8 闸底板数学物理模型

Fig. 8 Mathematical physical model of the sluice floor

横波冲击映像法的数学模型: 冲击映像法的数学模型主要指震源子波波型、频率范围以及采集参数等。数值模拟所用震源波形见图 9, 其频谱(振幅谱)见图 10。由图 10 可见, 所用震源子波的频谱在 250~ 2500 Hz 的频率范围内, 其幅值基本不变, 平坦、平滑, 符合震源波形的特点。

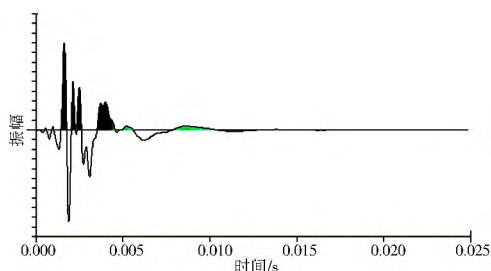


图 9 数值模拟所用震源子波波形

Fig. 9 Shape of the source wavelet used in numerical simulation

图 11 为根据数值模型计算波形的冲击响应强度确定的脱空状况的判定标准, 图中纵坐标为平均

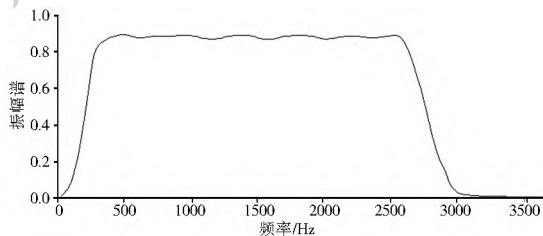


图 10 数值模拟所用震源子波的特征频谱

Fig. 10 Characteristic spectrum of the source wavelet used in numerical simulation

振幅经归一化处理, 单位无量纲。根据数值模拟结果, 当底板下有脱空时, 冲击响应强度 ≥ 0.7 , 因此, 根据实际检测数据得到的冲击响应强度 ≥ 0.7 时, 判断底板下存在脱空; 由于(受检器和震源)跨边界影响, 当理论冲击响应强度在 0.5~ 0.7 之间时, 一部分区域对应脱空, 一部分区域对应密实, 因此, 根据实际检测数据得到的冲击响应强度在 0.5~ 0.7 之间时定义为疑似脱空(过渡区); 当检波器和冲击点都在密实区时, 理论冲击响应强度 ≤ 0.5 , 因此, 根据实际检测数据得到的冲击响应强度在 0.5 以下时(≤ 0.5), 判断底板下为密实区域。

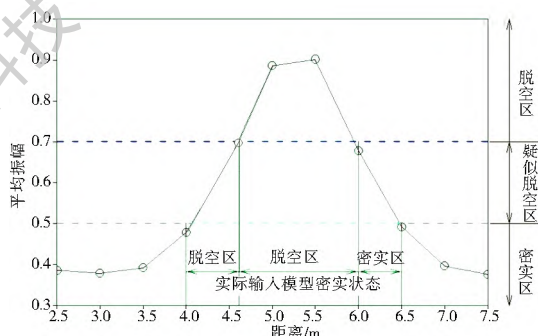


图 11 缺陷判别标准

Fig. 11 Defect criteria

3.5 结果分析

数据处理共得到 2 套结果: 冲击响应强度深度分布图和底板冲击响应强度分布图^[9, 16]。响应强度深度分布图主要反映闸底板的内部结构是否存在内部缺陷, 而底板冲击响应强度平面分布图主要反映底板下脱空情况的平面分布。

图 12 为第 7 孔闸门底板测线 L8 的冲击响应强度深度分布图。从图中可以看出, 深度 0.5 m 附近的冲击响应强度反映的是后期浇筑混凝土与原底板顶面的界面结合面的反射系数强弱, 底板深度为 2.0 m 附近的冲击响应强度则反映的是闸底板深度为 2 m 的底面的反射系数强弱。由于底板底面反射系数越强, 说明底板下方地层的横波速度越小, 亦间接揭示了水闸底板下的脱空状况。

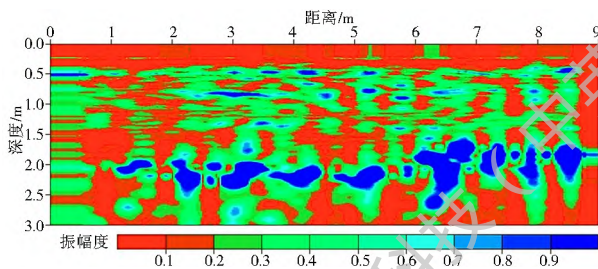


图 12 第 7 孔闸底板测线 L8 的冲击响应强度深度分布
Fig. 12 Depth profile of impact response intensity at L8 of the 7th sluice floor

图 13 为第 7 孔闸门底板面的冲击响应强度分布图。如图所示,在横向(由左向右)5~ 6.5 m 处,大于 0.7 的冲击强度响应值由上游向下游呈一条带状分布,虽然这一条带没有贯通到下游,但是有向下游发展的趋势,或者已经形成了很小的漏水通道,由于冲击响应强度标尺与脱空缺陷判别准则不一致,导致不能清楚看出闸底板各缺陷分布位置。

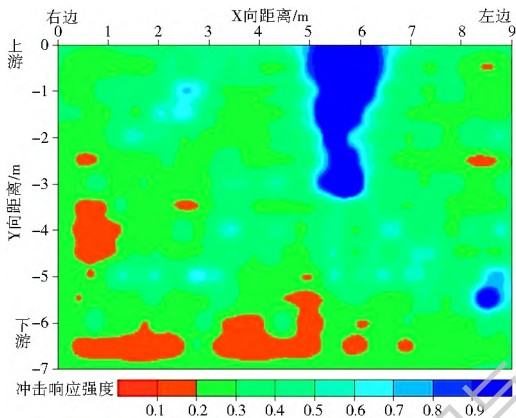
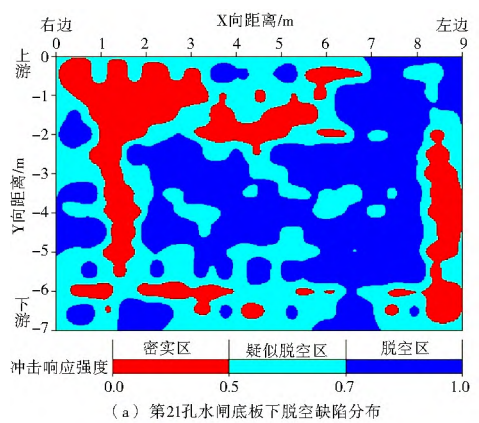


图 13 第 7 孔闸底板底面冲击响应强度分布
Fig. 13 Impact response intensity distribution on the 7th sluice floor

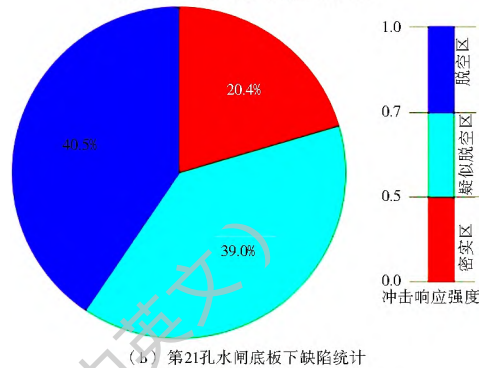
根据各孔水闸底板的弹性波(横波)冲击响应强度分布以及数值模拟分析结果,并根据 3.4 节给定的脱空缺陷判别标准,可准确推断各水闸底板下的脱空状况。图 14 给出了第 21 闸底板的脱空缺陷探测结果,水闸底板检测结果由 A、B 两图构成,图 14 中的 A 图为脱空平面分布图,根据脱空判别标准分为密实区、疑似脱空区(过渡区)和脱空区 3 个等级,从图 14(a)中可以看出 21 闸底板脱空区分布范围广,其中横河向 7 m~ 8 m 处脱空区分布从上游开始基本贯穿到下游区;图 14(b)图给出了底板各缺陷等级百分比:脱空区占 40.5%,疑似脱空占 39.0%,密实区域占 20.4%,可以看出脱空区和疑似脱空区占比达到 79.5%。

4 结语

采用横波冲击映像法对水闸底板的脱空进行探



(a) 第 21 孔水闸底板下脱空缺陷分布



(b) 第 21 孔水闸底板下缺陷统计

图 14 第 21 孔水闸底板下横波冲击映像法脱空情况的检测结果

Fig. 14 Test results of voids beneath the 21st sluice floor based on the SIIM

测,通过检测数据处理和数值模拟制定脱空判别标准,可得检测结论如下。

(1) 结果发现部分拦河闸闸底板有脱空,严重的闸底板脱空区连成渗漏通道,这很好的解释了为什么下游侧消力池、海漫水平段存在大量涌水点,海漫水平段裂缝冒水的现象,这严重危及水闸的安全运行。

(2) 检测过的 13 孔水闸中,有 3 孔水闸底板下脱空率超过 20%,推断为向下游形成漏水通道的主要原因,危害程度定义为“极大”,需尽快做进一步的调查和灌浆处理;有 2 孔水闸底板下脱空率约为 5%,疑似脱空区域 10% 以下,危害程度定义为“中”,需做进一步调查;其余各孔水闸底板下脱空率小于 5%,且疑似脱空区域小于 5%,判断其危害程度为“小”,无需处理。

(3) 建议对水闸进行水平位移和垂直位移的变形监控,同时防控上游最高运行水位,根据变形监测结果制定水闸危险报警阈值,以免带来闸坝塌陷或下滑的灾害。

(4) 基于横波冲击映像法的水闸底板缺陷检测结果表明该方法不受水和钢筋网等外界因素的干扰,为类似水工建筑物缺陷探查提供一种借鉴方法。

参考文献(References):

- [1] SL 265 2001. 水闸设计规范[S]. (SL265 2001. Design specification for sluice[S]. (in Chinese))
- [2] SL214 98. 水闸安全鉴定规定[S]. (SL214 98. Stipulation for safety appraisal of sluice[S]. (in Chinese))
- [3] 任旭华, 刘丽. 水闸病害分析及其防治加固措施[J]. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(6): 49-52. (REN Xu hua, LIU Li. Defect Inspection and reinforcement of sluice[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2003, 27(6): 49-52. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-3893.2003.06.015
- [4] 戴呈祥. 江河水闸隐患探测技术[J]. 广东水利水电, 2002(1): 13-15. (DAI Cheng xiang. Technology of the detection of hidden damages in sluice[J]. Guangdong Water Resource and Hydropower, 2002(1): 13-15. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-0112.2002.01.005
- [5] 戴呈祥, 王士恩. 水闸闸基隐患类型特征分析[J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(4): 353-357. (DAI Cheng xiang, WANG Shi en. The Character analysis of Hidden Danger Types of the Floodgate Base[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(4): 353-357. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-7940.2004.04.013.
- [6] 李艳, 田正宏, 王永泉. 淮河流域水闸混凝土缺陷调查与分析[J]. 混凝土, 2013, 285(7): 131-134. (LI Yan, TIAN Zheng hong, WANG Yong quan. Investigation and analysis on concrete defects of sluices at Huaihe river basin[J]. Concrete, 2013, 285(7): 131-134. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2013.07.037
- [7] 安锋, 陆新宇, 李经纬. 基于探地雷达技术的水闸脱空检测方法研究[J]. 人民长江, 2014, 45(Sup2): 202-205. (AN Duo, LUN Xir yu, LI Jing wei. Sluice void detection method based on ground penetrating radar technology[J]. Yangtze River, 2014, 45(S2): 202-205. (in Chinese))
- [8] 李俊杰, 何建设, 荣鑫. 地质雷达法检测水闸底板混凝土质量[J]. 低温建筑技术, 2015, 207(9): 152-154. (LI Jun jie, HE Jian she, RONG Xin. Using ground penetrating radar to detect the quality of concrete sluice floor[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015, 207(9): 152-154. (in Chinese)) DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2015.09.057
- [9] 黄涛, 冯少孔, 朱新民, 等. 冲击映像法在渡槽竖墙空鼓裂缝检测中的应用[J]. 水利水电技术, 2015, 46(1): 60-64. (HUANG Tao, FENG Shao kong, ZHU Xir min, et al. Application of impact imaging method to detecting hollowing cracks of vertical wall of aqueduct[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(1): 60-64. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0860.2015.01.014.
- [10] 陈国玉, 陆晓春, 茆育龄. 横波勘探在基岩埋深调查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2014, 11(1): 89-95. (CHEN Guo yu, LU Xiao chun, GONG Yu ling. The application of shear wave prospecting method to buried depth of bedrock[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, 11(1): 89-95. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-7940.2014.01.017
- [11] 陈相府, 安西峰. 地震横波勘探及其在浅层岩土分层中的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1655-1659. (CHEN Xiang fu, An Xi feng. Application of seismic shear wave detection in dividing shallow strata of rock and soil[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(5): 1655-1659. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2007.05.049
- [12] 孔庆河, 李铭铭, 张文德, 等. 横波震源的设计及激发效果[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2012, 31(1): 50-53. (KONG Qing he, LI Ming ming, ZHANG Wen de, et al. Design and analysis of S wave seismic sources and its stimulating effect[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2012, 31(1): 50-53. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-0562.2012.01.012
- [13] 王大兴, 辛可锋, 李幼铭, 等. 地层条件下砂岩含水饱和度对波速及衰减影响的实验研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(3): 908-914. (WANG Da Xing, Xin Ke Feng, LI You Ming, et al. An experimental study of influence of water saturation on velocity and attenuation in sandstone under stratum conditions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(3): 908-914. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.03.037
- [14] 高红兵. 混凝土裂缝充水条件下深度检测技术研究[J]. 声学技术, 2010, 29(4): 342-344. (GAO Hong-bing. The research about measurement technique of concrete cracks depth in charge of water conditions[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(4): 342-344. (in Chinese))
- [15] 杨燕. 夹泥浆裂缝深度横波检测技术研究[J]. 声学技术, 2010, 29(4): 353-355. (YANG Yan. The study of shear wave testing technique for depth of concrete cracks filled by slp[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(4): 353-355. (in Chinese))
- [16] 冯少孔, 黄涛, 李海枫. 大型预应力混凝土立墙内裂缝检测与成因浅析[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 977-982. (FENG Shao kong, HUANG Tao, LI Hai feng. Detection and Cause Analysis of Internal Cracks for Large Scale 2-Directional Pre-Stressed Concrete Walls[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(7): 977-982. (in Chinese)) DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2015.07.010
- [17] 李秀华. 中央大道海河沉管隧道基础注浆施工技术[J]. 国防交通工程与技术, 2013(4): 55-59. (LI Xiu hua. Grouting construction techniques for large immersed tube tunnel foundation[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2013(4): 55-59. (in Chinese))
- [18] 刘喜武. 弹性波场论基础[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2008. (LIU Xi wu. Fundamentals of elastic wave field theory [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2008. (in Chinese))
- [19] LIU C, CHE A, FENG S. Propagation characteristics of elastic wave in layered medium and applications of impact imaging method[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2013, 18(4): 479-485. DOI: 10.1007/s12204-013-1424-z
- [20] Feng S, Che A, Wang H, et al. Study on the theory, method, and application of impact imaging method for grouting evaluation[C]. Proceeding of the 11th SEGJ International Symposium, 2013.