

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220871

何家沟水库大坝“台阶式”混凝土防渗墙质量综合物探检测与评价

张廷华¹, 蒋景东^{2, 3}, 李 卓^{2, 3}, 范光亚^{2, 3}, 毕朝达^{2, 3}

(1. 宁夏六盘山水务有限公司, 宁夏 固原 756000; 2. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029; 3. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029)

摘要: 为评价何家沟水库大坝“台阶式”混凝土防渗墙质量, 先采用地质雷达法对防渗墙全段进行检测, 并在混凝土防渗墙“台阶”两侧预埋钢管采用跨孔超声波法进行检测, 对可能存在异常的区域钻孔取芯并开展压水试验, 结合坝基防渗墙前后渗压计监测资料对防渗墙质量进行综合评价。结果表明, 防渗墙未见重大质量缺陷, 局部存在异常, 整体工作性态正常。可见综合物探检测方法可有效地反映“台阶式”防渗墙的实际质量, 相关技术的综合利用可为类似工程提供借鉴。

关键词: “台阶式”防渗墙; 质量评价; 综合物探; 地质雷达; 跨孔超声波法

中图分类号: TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)01-0096-04

1 概况

何家沟水库为宁夏固原市黄河水调蓄工程中的水库工程, 总库容 $997 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。大坝为碾压式均质土坝, 坝顶长 495.0 m, 宽 8.0 m, 坝顶高程 1 754.10 m, 最大坝高 64.10 m。大坝左岸下部的砾岩层属中等透水层, 为孔隙型渗漏通道, 主沟道及右岸上部强风化的泥岩为裂隙型渗漏通道,

采用塑性混凝土防渗墙方式处理。河谷地形高差较大, 防渗墙在纵断面上呈“台阶”状, 见图 1。防渗墙轴线长度为 426.0 m, 总面积约 11 165.54 m^2 , 墙厚 0.6 m, 防渗墙墙底进入 5 Lu 泥岩下 0.5 m, 墙顶部伸出建基面 3~6 m, 墙体与填筑坝体接触部位 8.0 m 范围内采用高塑性土回填保护。施工采用槽孔型墙体型式, 分为 64 槽浇筑, 标准槽宽 6.6 m, 从左侧向右侧依次为 # 1、# 2、...、# 64 槽。由于防渗墙施工产生的质量缺

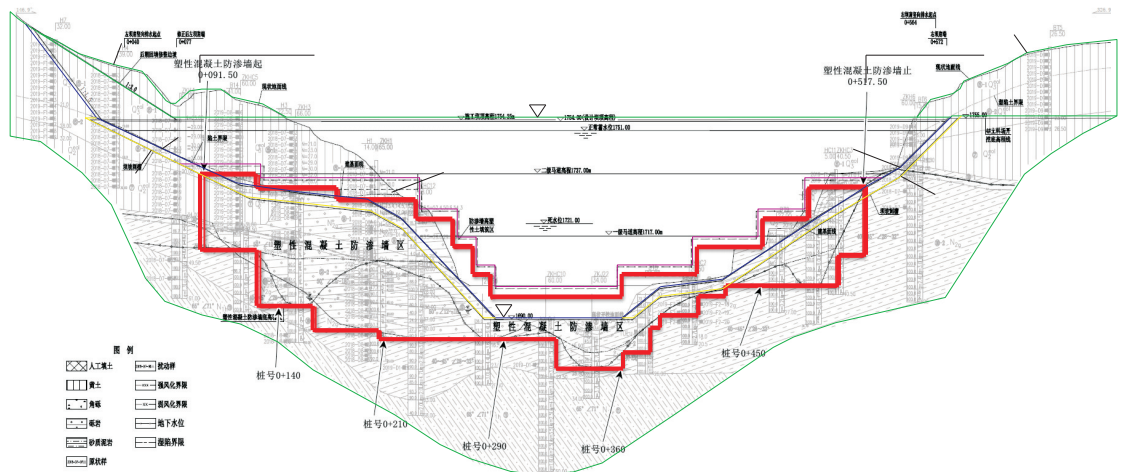


图 1 坝轴线剖面图

Fig. 1 Profile of the dam axis section

收稿日期: 2022-04-28, 修回日期: 2022-07-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979173)

作者简介: 张廷华(1978-), 男, 高级工程师, 研究方向为水利工程管理及水务运行管理等, E-mail: 736440519@qq.com

通讯作者: 蒋景东(1988-), 男, 博士、高级工程师, 研究方向为土石坝水利工程安全评价及灾变模拟, E-mail: jdjiang

@nhri. cn

陷主要表现为各连接段防渗墙接合不好、墙体连续性差、底部缩径及混凝土蜂窝离析。对于高差较大的“台阶式”混凝土防渗墙,其搭接质量直接影响防渗墙的防渗质量。为准确评价何家沟水库大坝坝基混凝土防渗墙质量,需对防渗墙进行检测,特别是防渗墙“台阶”处的连接质量。混凝土防渗墙质量检测最直接的方法是采用钻孔取样检查或局部开挖检查等方法。其中钻孔取样发现问题具有偶然性,非钻孔位置的质量缺陷难以摸清;局部开挖检查对深部的质量缺陷难以发现且需返工修复,费时费工。近年来,无损物探方法在混凝土防渗墙质量检测中逐渐得到广泛应用。常用的防渗墙质量检测物探方法主要有高密度电法、探地雷达法、声波法、地震波法、弹性波 CT 技术等,均取得了一定的探测成果。但单一物探方法检测存在一定局限性,易受不同环境因素的干扰,难以普遍适用^[1,2]。为此,本文以何家沟水库大坝塑性混凝土防渗墙质量检测为例,首先使用地质雷达法对防渗墙全段进行检测,并在混凝土防渗墙“台阶”两侧预埋 $\Phi 75$ 钢管采用跨孔超声波法进行检测,通过分析比较检测结果指出混凝土防渗墙可能存在的缺陷位置;然后在存在疑问的区域进行钻孔取芯及压水试验,最后结合蓄水后的渗流监测资料评价了防渗墙防渗效果,发现防渗墙未见重大质量缺陷。

2 检测方法与测点布置

大坝塑性混凝土防渗墙质量现场检测综合采用地质雷达法^[3]和跨孔超声波法^[4]。地质雷达法可检测防渗墙整体质量,跨孔超声波法可检测台阶跳跃处与部分深度超过 30 m 非台阶处不同施工槽孔搭接处的防渗墙完整性,检测时在台阶跳跃的左右侧各埋设一根声测管,间距为 0.9~2.2 m,见图 2。地质雷达设备采用美国地球物理测

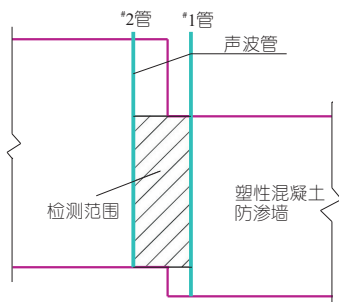


图 2 台阶跳跃处跨孔超声测试示意图
Fig. 2 Schematic diagram of cross hole ultrasonic test at step jump

量系统公司生产的 SIR-3000 型地质雷达,40 MHz 天线。跨孔超声波测试设备采用 RS-ST06D(T)型跨孔超声波检测仪。

根据防渗墙施工进度,分 4 次进场检测。雷达累计测线长度 426 m,即对防渗墙轴线全线进行了探测。跨孔超声波共检测 6 组,包括防渗墙跳跃处 5 组,非台阶跳跃槽间搭接处测试 1 组,测线布置见图 3。

3 探测结果

3.1 地质雷达检测结果

根据雷达反射波组的振幅、频率、连续性、波形等变化特征,排除外界干扰所引起的电磁信号异常对各测线地质雷达检测剖面进行综合解释。经检测,防渗墙大部分区域中雷达波同相轴总体连续,振幅、频率、波向一致性均较好,表明雷达波在防渗墙中传播时速度恒定,能量均匀衰减,防渗墙密实性总体良好,局部存在可疑缺陷。选取桩号 0+276~0+410 部分存在可疑处典型断面进行分析。

(1)测线[#]1 地质雷达检测范围为桩号 0+276~0+356 防渗墙([#]29~[#]40 槽段),剖面见图 4(a),检测结果显示在桩号 0+290~0+293、深度 7~12 m 范围内,存在雷达波强振幅异常,与

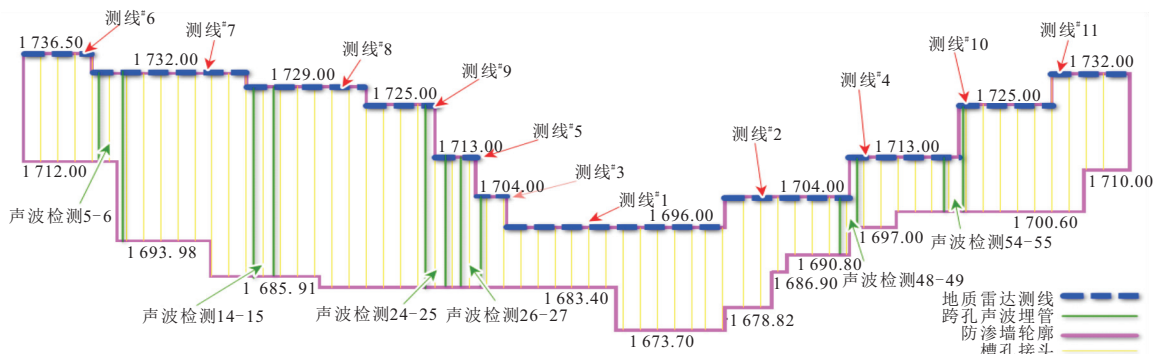


图 3 防渗墙地质雷达和超声波检测测点布置图

Fig. 3 Layout of measuring points for geological radar and ultrasonic detection of cut-off wall

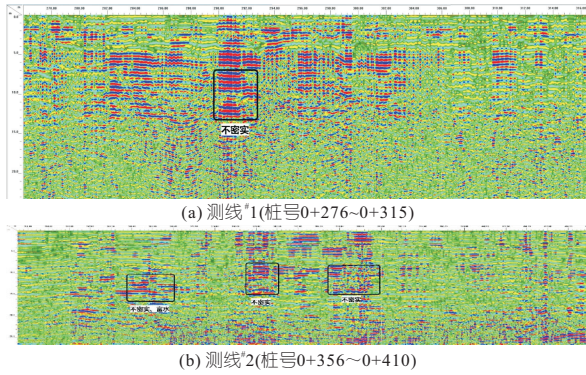


图 4 防渗墙雷达探测剖面

Fig. 4 Detection profile of cut-off wall

周围防渗墙的雷达反射波存在明显区别,推断该区域的防渗墙局部含水率较大。

(2)测线#2 地质雷达检测检测范围为桩号 0+356~0+410 防渗墙(#41~#48 槽段)剖面见图 4(b),最大检测深度 25 m 左右。检测结果显示在该段防渗墙存在 3 处不密实异常区:①桩号 0+365~0+370、深度 10~15 m,该区域雷达成同相轴中断,粗波形,弱振幅,推断该区域防渗墙体含水率大,相对周围不密实。②桩号 0+377~0+380、深度 8~13 m,存在雷达波强振幅异常,与周围防渗墙的雷达反射波存在明显区别,推断该区域的防渗墙相对周围有异常。③桩号 0+385~0+390、深度 8~13 m,该区域雷达成同相轴中断,粗波形,强振幅,波形紊乱,推断该区域防渗墙体存在异常。

3.2 跨孔超声波检测结果

对防渗墙“台阶”处进行了跨孔超声波检测,共 5 组,槽间非“台阶”搭接处测试 1 组。选取“台阶”搭接处#24~#25 槽及非“台阶”搭接处#14~#15 槽进行具体分析。

编号#24~#25 检测结果见图 5(a),#24、#25 槽墙顶高程分别为 1 725.00、1 713.00 m,底高程均为 1 683.40 m,跳跃处墙顶高差为 12 m,该组测试的有效深度为墙顶以下的 29.6 m 范围。从测试波形上看,在墙体有效测试范围内,平均波速约 3.788 km/s;在墙顶(高程 1 713.00 m)以下 10.5~10.9 m(高程 1 702.50~1 702.10 m)、11.2~12.6 m(高程 1 701.80~1 700.40 m)范围内,波速、振幅偏低,推测该处完整性较差或含水高导致的参数异常;该组所测其他区段波形、波速基本正常,说明墙体较为完整、连续。

编号#14~#15 检测结果见图 5(b),#14、#15 槽墙顶高程均为 1 729.00 m,墙底高程均为 1 685.91 m,该组测试的有效深度为墙顶以下约 43 m 范围。从波形图可看出,该组平均波速为

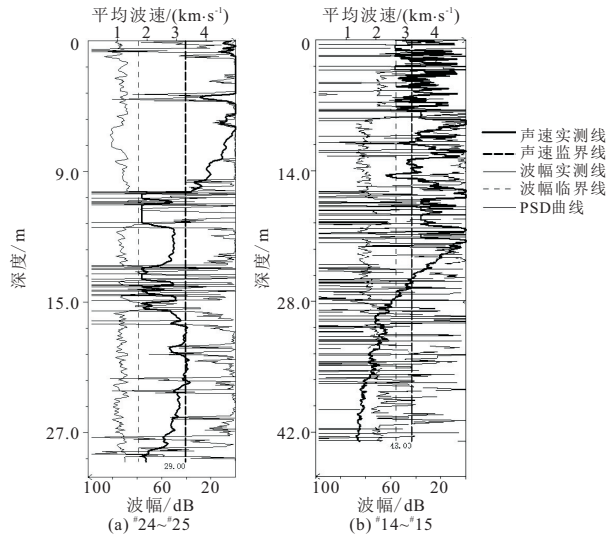


图 5 超声波检测图

Fig. 5 Ultrasonic testing diagram

3.687 km/s,在 22 m 以下,由于声测管安装倾斜,间距越来越大,导致下部因间距过大超声信号较弱。在墙顶(高程 1 729.00 m)以下 7.7~8.5、17.5~19.0 m 范围内,波速、振幅偏低,推测该处完整性较差或含水高导致的参数异常;该组所测其他区段波形、波速基本正常,说明墙体较为完整、连续。

3.3 检测成果分析

雷达探测结果显示墙体混凝土可能存在密实性或完整性异常的部位有 7 处,超声波检测显示局部存在异常的部位有 5 处,统计结果见表 1。

表 1 地质雷达、超声波检测异常统计

Tab. 1 Statistical of anomaly detected by geological radar and ultrasonic method

检测方法	序号	异常位置	异常深度范围/m
地质雷达	1	0+290~0+293	7~12
	2	0+365~0+370	10~15
	3	0+377~0+380	8~13
	4	0+385~0+390	10~13
	5	0+272~0+273	10~13
	6	0+262~0+264	9~12
	7	0+198~0+202	10~13
超声波	1	#5 槽~#6 槽搭接(0+124.5)	5.6~6.3、19.5~20.0
	2	#24 槽~#25 槽搭接(0+249.9)	10.5~10.9、11.2~12.6
	3	#26 槽~#27 槽搭接(0+263.1)	3.3~3.9
	4	#54 槽~#55 槽搭接(0+447.9)	6.8~7.6
	5	#14 槽~#15 槽搭接(0+183.9)	7.7~8.5、17.5~19.0

根据探地雷达及跨孔超声波检测成果,选取其中可能存在异常的 5 个区域进行钻孔取芯并开展压水试验。桩号 0+124.5(取芯长度 7.0 m)、0+200(取芯长度 13.5 m)、0+263.6(取芯长度 14.0 m)、0+368(取芯长度 11.0 m)、0+388(取芯长度 11.5 m),取芯率分别为 96%、95%、98%、95%、97%。其中桩号 0+368 防渗墙钻孔芯样见

图 6,所取芯样均为塑性混凝土,材质均一,无夹泥等现象。由图 6 可知,防渗墙中上部芯样较完整,但中下部的芯样较为松散,与物探检测成果基本一致。同时对存在可疑部位进行了检查孔压水试验,结果见表 2。由表 2 可知,墙体渗透系数符合设计要求。



图 6 桩号 0+368 防渗墙芯样

Fig. 6 Core sample of cut-off wall at 0+368

表 2 压水试验结果统计

Tab. 2 Statistical of water pressure test results

序号	桩号	深度 /m	试验深度 /m	段长 /m	渗透系数 / $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	0+124.5	7.0	3.0~7.0	4.0	1.88×10^{-8}
2	0+200	13.5	8.5~13.5	5.0	9.66×10^{-8}
3	0+263.6	14.0	10.0~14.0	4.0	1.52×10^{-9}
4	0+368	11.0	5.4~10.4	5.0	3.71×10^{-9}
5	0+388	11.5	7.0~11.5	4.5	1.58×10^{-8}

3.4 渗流监测资料分析验证

为了解坝基渗流性状及防渗墙处理效果,在大坝桩号 0+140、0+210、0+290、0+360、0+450 断面防渗墙前、后 1.5 m 处各埋设 1 支渗压计,其中桩号 0+210 断面防渗墙前渗压计损坏且无法修复,其余渗压计工作正常。由于工程自完工以来,水位还未到达正常蓄水位,选取库水位最高时(库水位 1 730.10 m)的渗压计数据进行分析,渗压计布设及监测数据见表 3。

表 3 渗压计布设高程及渗压水位监测数据

Tab. 3 Osmometer layout elevation and monitoring data

断面位置	墙底高程/m	仪器编号	埋设部位/m	埋设高程/m	渗压水位/m	渗压水头/m	水头差/m
0+140	1 693.98	P1-1	墙前 1.5	1 694.20	1 712.01	17.81	9.08
		P1-3	墙后 1.5	1 694.20	1 702.93	8.73	
0+290	1 683.40	P3-1	墙前 1.5	1 683.90	1 700.62	16.72	2.12
		P3-2	墙后 1.5	1 683.70	1 698.30	14.60	
0+360	1 673.70	P4-1	墙前 1.5	1 674.20	1 698.96	24.76	0.25
		P4-2	墙后 1.5	1 673.70	1 698.21	24.51	
0+450	1 700.60	P5-1	墙前 1.5	1 700.10	1 709.55	9.45	0.14
		P5-3	墙后 1.5	1 700.10	1 709.41	9.31	

由表 3 可看出,桩号 0+140、0+290 断面墙前、墙后渗压水位变化趋势基本一致,桩号 0+360、0+450 断面墙前、墙后渗压水位相关性较小。墙前渗压计所测渗压水头均大于墙后所测渗压水头。结合坝基地质状况,大坝左岸坝基主要

是强风化的泥岩、砾岩,互层状,胶结程度弱,部分为散体结构,渗透性相对较强,为孔隙型渗漏通道;主沟道及右岸坝基上部强风化的泥岩属裂隙型渗漏通道。因此,推测主沟道桩号 0+360 及右岸桩号 0+450 断面坝基渗压计水位主要受坝基地下水水位的影响。根据左岸桩号 0+140 断面渗压计数据,墙前、后水位差较大,防渗墙消杀水头明显,表明防渗墙工作性状正常。0+290 断面防渗墙后渗压水位降幅相对较小,可能与探地雷达揭示的防渗墙局部缺陷有关。综合物探检测成果、钻孔取芯、压水试验和坝基防渗墙前、后渗压水位监测数据,表明坝基防渗墙无重大质量缺陷,局部存在异常,整体工作性状正常。可见本文地质雷达和跨孔超声波综合物探检测方法可有效地反映“台阶式”防渗墙的实际质量。

4 结论

a. 采用地质雷达和跨孔超声波的综合物探方法检测了何家沟水库大坝“台阶式”塑性混凝土防渗墙质量,雷达探测结果显示墙体混凝土可能存在密实性或完整性异常的部位有 7 处,超声波检测显示“台阶处”局部存在异常的部位有 5 处。对存在疑问区域进行钻孔取芯验证,芯样材质均一,无夹泥,局部芯样松散,钻孔取芯率均在 95% 以上,同时对该孔开展压水试验,测得渗透系数满足设计要求。

b. 综合物探检测成果、钻孔取芯、压水试验和坝基防渗墙前、后渗压水位监测数据,表明坝基防渗墙无重大质量缺陷,局部存在异常,整体工作性状正常。

参考文献:

[1] 马宏新,李卓,范光亚,等. 某水库大坝防渗加固效果综合物探检测与分析评价[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 193-200.

[2] 张涛,张世宝,张家宏,等. 混凝土内部缺陷精准探测方法研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(2): 149-152,113.

[3] ZAJÍCOVÁ K, CHUMAN T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review[J]. Geoderma, 2019, 343: 116-129.

[4] KAWANISI K, RAZAZ M, YANO J, et al. Continuous monitoring of a dam flush in a shallow river using two crossing ultrasonic transmission lines[J]. Measurement science and technology, 2013, 24(5): 55-303.

参考文献:

- [1] 薛丽芳,谭海樵.沂河流域水文特征变化及其驱动因素[J].地理科学进展,2011,30(11):1354-1360.
- [2] 崔恩贵,郭小东,杜静,等.沂河流域“2020.8.14”暴雨洪水分析[J].中国防汛抗旱,2021,31(1):43-47.
- [3] SATGÉ F, BONNET M P, GOSSET M, et al. Assessment of satellite rainfall products over the Andean plateau[J]. Atmospheric research, 2016, 167: 1-14.
- [4] 孙桂凯,魏义熊,王亚芳,等.IMERG 卫星降水产品融合校准及其水文效用[J].水电能源科学,2021,39(11):23-26.
- [5] 黄依之,张行南,方园皓. CMORPH 卫星反演降水数据质量评估及水文过程模拟[J].水电能源科学,2020,38(9):1-4.
- [6] 沈艳,潘旸,宇婧婧,等.中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J].大气科学学报,2013,36(1):37-46.
- [7] 周璇,罗亚丽,郭学良. CMORPH 卫星—地面自动站融合降水数据在中国南方短时强降水分析中的应用[J].热带气象学报,2015,31(3):333-344.
- [8] SUN R, YUAN H, LIU X, et al. Evaluation of the latest satellite-gauge precipitation products and their hydrologic applications over the Huaihe River basin[J]. Journal of hydrology, 2016:302-319.
- [9] 张浪,李俊,黄晓荣,等. HEC-HMS 模型在四川省清溪河流域山洪预报中的应用[J].中国农村水利水电,2020(1):130-135.
- [10] 王璐,叶磊,吴剑,等.山丘区小流域水文模型适用性研究[J].中国农村水利水电,2018(2):78-84,90.
- [11] 田竞,夏军,张艳军,等. HEC-HMS 模型在官山河流域的应用研究[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(1):8-14.
- [12] 中华人民共和国水利部.水文情报预报规范:GB/T 22482-2008[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [13] 刘畅,陈兴伟,刘传铭.晋江流域 HEC-HMS 模型关键参数的分区率定[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):40-47,96.
- [14] 程旭,马细霞,王武森,等. HEC-HMS 模型参数区域化在河南省小流域适用性研究[J].水文,2022,42(1):40-46,102.

Applicability Evaluation of CMORPH Merged Rainfall in Hydrologic Simulation Yihe River Basin

ZHANG Guo-rui^a, YANG Chuan-guo^{a,b}, LU Shu-mei^a, CHEN Yu^a

(a. College of Hydrology and Water Resources; b. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To analyze the applicability of CMORPH merged hourly gridded precipitation product in Northern China, the statistical indicators between the observed grid precipitation and CMORPH merged gridded precipitation in temporal and spatial distribution of flood season from 2008 to 2012 were evaluated in the Yihe River Basin. Using the two precipitations as the input of HEC-HMS model, the feasibility of floods forecast of the CMORPH merged precipitation was evaluated. The results show that the CMORPH merged precipitation has a high correlation with the observed grid precipitation, and the flood simulation accuracy is comparable to the result of observed grid precipitation, and performing better in the simulations both runoff volume and flood peak. The satellite merged precipitation has good applicability in flood forecasting in the study area.

Key words: CMORPH merged precipitation; hydrologic simulation; HEC-HMS model; Yihe River Basin

(上接第 99 页)

Comprehensive Geophysical Detection and Evaluation of Quality of "Stepped" Concrete Cut-off Wall of Hejiagou Reservoir Dam

ZHANG Ting-hua¹, JIANG Jing-dong^{2,3}, LI Zhuo^{2,3}, FAN Guang-ya^{2,3}, BI Chao-da^{2,3}

(1. Ningxialiapanshan Water Affairs Co., Ltd., Guyuan 756000, China; 2. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Dam Safety Management Center of The Ministry of Water Resource, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to evaluate the quality of "stepped" concrete cut-off wall of Hejiagou reservoir dam, the ground penetrating radar was used to detect the whole cut-off wall, and the cross-hole ultrasonic method was used to detect the "steps" of the concrete cut-off wall. The detection shows that the overall quality of the cut-off wall is good. Core drilling and water pressure test were carried out in the areas where there may be abnormalities, and the quality of the cut-off wall was comprehensively evaluated in combination with the monitoring data of the osmometer in front of and behind the cut-off wall. The results show that no major quality defects are found on the cutoff wall, local abnormalities exist, and the overall working performance is normal. This comprehensive geophysical detection method can effectively reflect the actual quality of the "stepped" cutoff wall, and the comprehensive utilization of relevant technologies can provide reference for similar projects.

Key words: "stepped" concrete cut-off wall; quality evaluation; comprehensive geophysical detection method; ground penetrating radar; cross-hole ultrasonic method