

文章编号: 1007-2993(2022)01-0043-06

跨孔声波法在某水库坝址区岩体检测中的应用

古今用 王 红

(贵州省水利科学研究院, 贵州贵阳 550001)

【摘要】 跨孔声波法是混凝土检测的重要方法, 为掌握下把比水库大坝坝址区岩体节理裂隙发育、岩体性状及其分布, 选择了坝址区 A、B 两处部位各 3 个钻孔, 采用跨孔声波探测技术进行钻孔岩体声波波速测试。测试结果表明: 大坝坝址水平段基础岩体组织结构部分破坏, 岩体纵波波速值 v_{pm} 一般在 2000 ~ 4000 m/s, 岩体风化裂隙发育、较破碎, 存在裂隙、破碎带及局部软弱夹层等缺陷。研究结果为大坝坝址基础岩体完整性程度评价提供数据支撑, 为解决大坝坝址稳定及渗漏问题提供提供详实可靠的依据。

【关键词】 岩体; 跨孔声波法; 波速; 裂隙

【中图分类号】 TU 45

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.01.008

Application of Cross Hole Sonic Wave Method in Rock Mass Detection of Dam Site of a Reservoir

Gu Jinyong Wang Hong

(Guizhou Provincial Water Conservancy Research Institute, Guiyang 550001, Guizhou, China)

【Abstract】 The cross hole sonic wave detecting technology is an important method for concrete inspection. To study the development of joints and fissures, rock properties and distribution of the rock mass in the dam site area of Xiababi Reservoir, three boreholes in each of the two locations in the dam site area were selected. Cross hole sonic wave detection technology was used to test the sonic wave velocity of rock mass. The test results show that the basic rock mass organization structure of the horizontal section of the dam site is partially damaged. The longitudinal wave velocity of the rock mass is generally 2000 ~ 4000 m/s. The weathering cracks of the rock mass are developed and relatively broken. There are cracks, broken zones and local weak interlayers. The research results could provide data support for the evaluation of the integrity of the foundation rock mass of the dam site, and provide a detailed and reliable basis for solving the stability and leakage problems of the dam site.

【Key words】 rock mass; cross hole sonic wave detecting; acoustic wave velocity; fissure

0 引言

目前, 混凝土结构在各类建设工程项目中占主导地位, 为保证工程质量, 须对混凝土的强度与缺陷进行非破损检测^[1]。声波检测法自 20 世纪 30 年代运用到混凝土检测中, 经过几十年的发展, 该技术已被广泛运用于混凝土缺陷、桥梁灌注桩、坝基岩体勘测检测中^[2-6]。声波检测技术主要以混凝土中声波传播速度、振幅、频谱等特征来进行质量判定, 通过对混凝土进行声波测试, 可分析判断混凝土内部存在的裂隙、断裂等缺陷^[7-9]。简文彬等利用声波探测技术判别水电站坝址区岩体缺陷, 发现拟建坝址区岩体完

整区域波速明显高于节理裂隙发育、断层带区域^[10]; 邓 娜通过声波技术解决了坝体质量分级、砂层地震液化等问题^[11]; 夏国军等将跨孔、单孔声波技术应用于坝基处理设计, 结果表明为增强基岩的整体性和耐久性, 须将坝基进行固结灌浆处理^[12]; 付渝渝等利用声波技术检测公路基桩完整性, 工程实例验证了该技术可通过波速、波幅、PSD 曲线等快速准确地确定缺陷的大致范围^[13]。声波技术已成为混凝土质量检测的重要方法, 跨孔声波属声波检测法的一种, 与其他方法相比, 具有无损于材料的组织与结构、测试简便、快捷、探测距离大等优点, 是非破损检测的重

基金项目: 贵州省水利厅科技项目(KT201705)

作者简介: 古今用, 男, 1980 年生, 贵州兴仁人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事农田水利方向研究。E-mail: hong_wangnet@163.com

要方法之一。

在前人研究的基础上,以下把比水库大坝坝址基础岩体跨孔声波测试为例,综合分析了跨孔声波检测法的具体操作技术及测试结果,通过声波测试技术判别水库大坝坝址地基岩体缺陷,进一步摸清大坝坝址岩体结构(裂隙发育程度、破碎等),对大坝坝址质量进行准确的判定,为大坝坝址地基岩体完整性评价提供数据支撑,为解决大坝坝址稳定及渗漏问题提供详实可靠的依据。

1 工程概况及坝址区地质条件

1.1 工程概况

下把比水库位于龙里县东北部,距离龙里县约55 km,距离洗马镇约6 km。水库位于洗马河支流沙田溪沟上,坝址集雨面积4.5 km²,多年平均径流量2.34×10⁶ m³,多年平均流量为0.074 m³/s。

水库校核洪水位1204.33 m,总库容1.81×10⁶ m³,工程等别为IV等,工程规模为小(1)型。水库正常蓄水位为1202.0 m,相应库容1.64×10⁶ m³,死水位1171.0 m,相应库容1.88×10⁵ m³,兴利库容1.45×10⁶ m³。下把比水库坝型为面板堆石坝,坝轴线方位角为NE4.651°,坝顶高程为1205.3 m,大坝趾板基础置弱风化上部,河床趾板建基面高程为1148.0 m,最大坝高57.3 m。坝顶宽6.0 m,上下游坝面坡比均为1:1.4,坝顶轴线长145.8 m。大坝采用右岸岸坡开敞式溢洪道泄洪,堰顶高程1202.0 m,堰宽8 m,取水建筑物布置于右岸。

1.2 坝址区工程地质条件

根据钻探揭露,坝址区出露地层主要为第四系(Q)残坡积、冲积黏土夹风化碎石和下二叠统茅口组(P₁m)灰岩,岩石较破碎,裂隙发育,完整性差,岩性为灰白色中厚层灰岩。

2 试验原理与方法

2.1 混凝土缺陷检测原理

由于介质的声学性质与其结构及物理力学性质有关,地质体因岩性、结构特征、力学性能等因素形成不同的声学特征,通过测试声学信息(声速、振幅、频率等)并加以处理解释,可判断岩体的物理力学特性及构造(或缺陷)特征,从而进行岩体质量的分级、工程应力分析和稳定性评价等^[14-15]。跨孔声波法检测混凝土结构完整性即运用该原理进行检测,通过超声波发射高频弹性脉冲,声波接收系统随即记录传播情况^[16]。

声波在完整混凝土中传播能量较强,衰减幅度较小;当发射超声波时,若混凝土内部存在破损界面,

缺陷面脉冲波会形成波抗阻界面,随即发生波的透射和反射,导致波能下降,波幅衰减明显;当混凝土内部存在严重破损界面(如结构松散、蜂窝、坑洞等)时,脉冲波将会发生散射^[17]。因此,通过超声波波幅衰减异常的变化,可推断出混凝土内部是否存在缺陷以及缺陷的实际情况。

2.2 试验钻孔布设

跨孔声波法测试时,通常情况下等间距布设三个试验钻孔,且各个钻孔测试点测试时选择相同的仪器触发电压和增益等参数^[18]。声波测试的波速及其随孔深的变化规律与岩体风化规律、破碎、裂隙、溶蚀程度、岩石矿物成分、岩体结构构造紧密相关。本次试验根据现场踏勘以及坝址处岩体节理裂隙发育、破碎情况和风化程度,针对水库大坝趾板基础跨孔声波检测布设2处部位共6个钻孔。对6个钻孔的岩体剖面进行跨孔声波测试,跨孔超声波法测试孔号分别为:Azk1—Azk2、Azk2—Azk3、Azk1—Azk3、Bzk1—Bzk2、Bzk2—Bzk3、Bzk1—Bzk3,跨孔超声波钻孔平面布置图见图1。

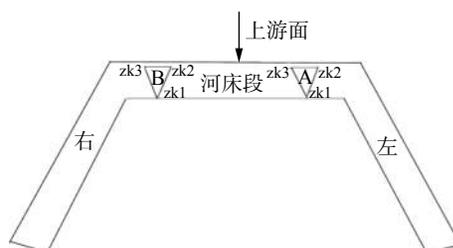


图1 跨孔超声波布孔平面图

2.3 坝址岩体岩样声波测试

利用声波测试仪对下把比水库大坝坝址6个岩体剖面(6个钻孔)进行数据采集,并进行室内波形回放、波速计算、成果分析。主要检测岩体水平和竖直方向的裂隙和溶洞发育情况,以了解其岩体完整性和风化情况。此外,为进一步了解坝址区岩体的完整性,进一步对6个钻孔采集钻孔岩芯进行室内波速测试。测试前对所取圆柱状岩芯头尾进行切割磨平、制样,待岩芯符合测试要求后对(天然含水状态下)岩芯进行超声波测试。

2.4 试验资料分析

在试验结束后,应尽快分析试验结果。首先进行岩体纵波波速 v_p 值的计算,试验中以收发点的间距与岩体纵波传播时间的比值作为岩体纵波波速 v_p 值;利用岩体纵波波速 v_p 值与测试岩样纵波波速 v_p 值比值的平方计算出岩体各段的完整性系数 K_v ^[19]。其次根据剖面(沿钻孔深度)的纵波波速与岩体各段的完

完整性系数的变化特征, 综合分析并评价该岩体结构(裂隙发育程度、破碎等)、岩性划分、不同岩体的风

化程度。最后根据各孔段(点) v_p 值(见表1、表2)以及岩体的总体特征来进行岩体单位划分。

表1 纵波速划分岩质单元指标(硬质岩)

岩质单元	纵波速/($m \cdot s^{-1}$)	岩性描述
A	>5000	岩质新鲜, 未见内化痕迹, 未风化
B	4000 ~ 5000	组织结构基本未变, 有少量的风化裂隙, 微风化
C	2000 ~ 4000	组织结构部分破坏, 风化裂隙发育, 中等风化
D	1000 ~ 2000	组织结构已大部分破坏, 裂隙很发育, 岩体破碎, 强风化
E	500 ~ 1000	组织结构已基本破坏, 但尚可辨认, 全风化
F	<500	岩体结构已破坏, 硬质岩石残积土

表2 岩体完整性分类标准

完整性系数 K_v	>0.75	0.55 ~ 0.75	0.35 ~ 0.55	0.15 ~ 0.35	<0.15
岩体完整程度	完整	较完整	完整性差	较破碎	破碎

3 试验结果与分析

3.1 岩体声波测试成果与分析

利用声波测试仪对下把比水库大坝坝址6个岩体剖面(6个钻孔)进行跨孔声波测试, 检测岩体水平和垂直方向的裂隙和溶洞发育情况, 以了解其岩体完整性和风化情况。测试在钻孔中进行, 钻孔测试每隔0.2 m采集一组数据, 钻孔声波测试孔深A组深16.75 m, B组深11.5 m, 测试结束后绘制钻孔声波波速随测试深度变化曲线, A、B两组6个岩体剖面钻孔声波波形和现场岩声波测试结果见图2、图3(因A组0.75 m、B组0.5 m以上岩石破碎严重, 起始点分别从0.75 m和0.5 m开始)、表3—表8所示。从

图可以看出, 原位测试声波值变化较大, 其中, A组Azk1—Azk2、Azk2—Azk3、Azk1—Azk3剖面合计分别有1.4 m、0.2 m、1.6 m段岩体声波波速在1813 ~ 1991 m/s区间, 岩体破碎, 裂隙发育完全, 属于强风化岩体, 为D岩质单元, 各剖面其余段声波波速均在2008 ~ 3329 m/s区间, 风化裂隙发育, 属于中等风化岩体, 为C岩质单元。

B组Bzk1—Bzk2、Bzk2—Bzk3、Bzk1—Bzk3剖面共计分别有2 m、1.2 m、1.8 m段岩体声波波速在1646 ~ 1994 m/s区间, 岩体组织结构大部分已被破坏, 裂隙发育, 岩体破碎, 属于强风化岩体, 为D岩质单元, 其余段声波波速均在2007 ~ 3702 m/s区间,

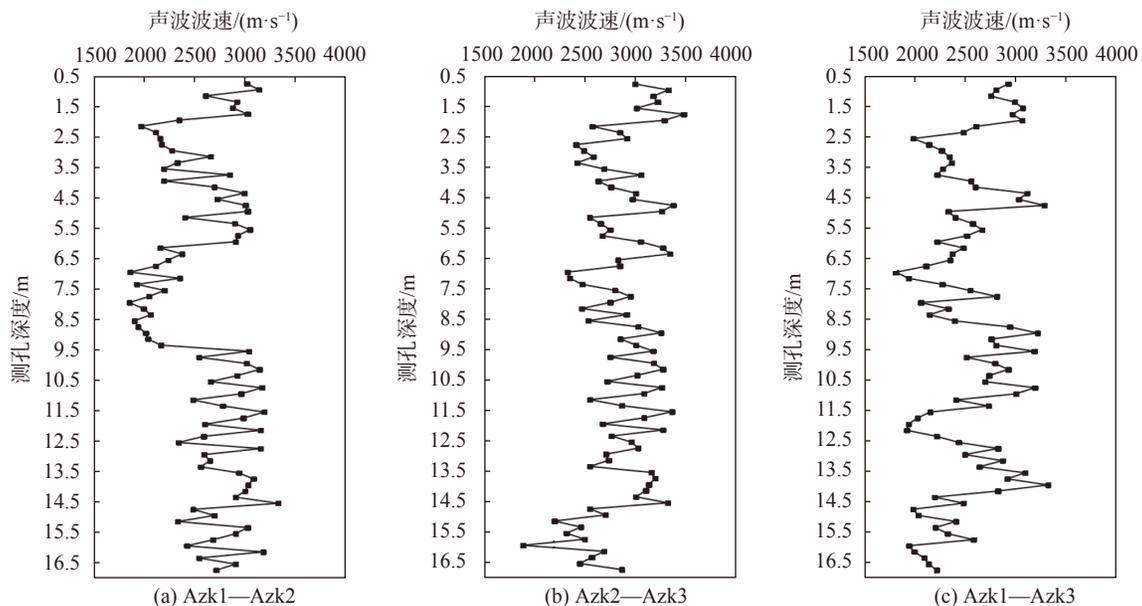


图2 A组钻孔1、2、3岩体声波波速随深度变化曲线图

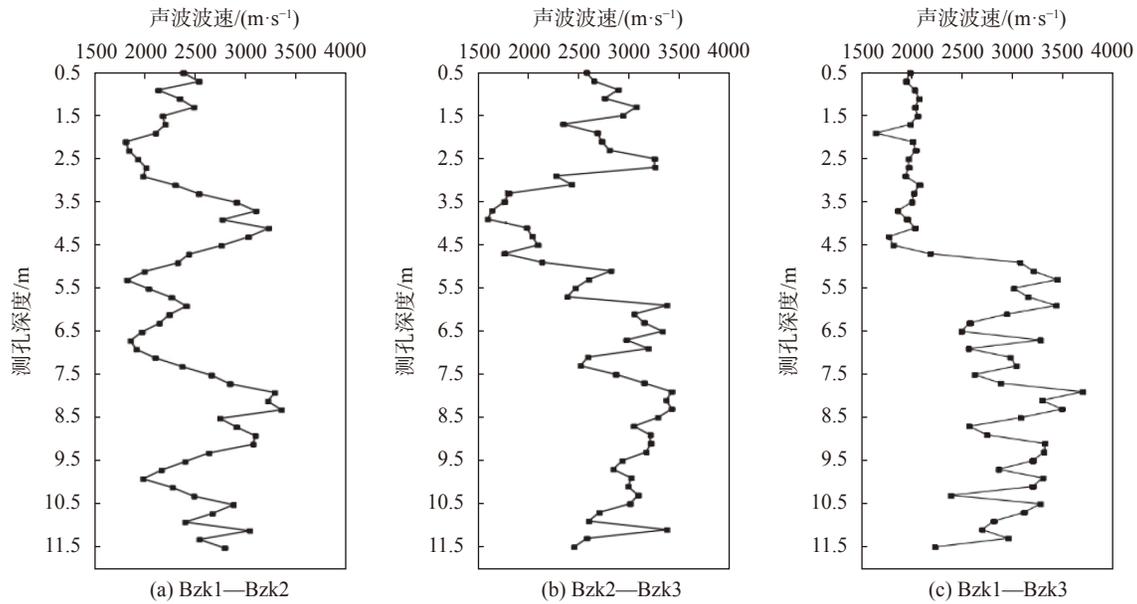


图3 B组钻孔1、2、3岩体声波波速随深度变化曲线图

表3 Azk1 现场岩声波测试结果

深度/m	岩体声波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$	岩性描述	深度/m	岩体声波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$	岩性描述
0.75 ~ 1.95	2342 ~ 3136	较破碎中等风化灰岩	7.55 ~ 7.75	2196	较破碎中等风化灰岩
2.15	1962	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩	7.95 ~ 8.15	1846 ~ 1986	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩
2.35 ~ 6.75	2110 ~ 3025	较破碎中等风化灰岩	8.35	2057	较破碎中等风化灰岩
6.95	1854	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩	8.55 ~ 8.75	1898 ~ 1934	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩
7.15	2349	较破碎中等风化灰岩	8.95 ~ 16.75	2008 ~ 3329	较破碎中等风化灰岩
7.35	1920	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩			

表4 Azk1 现场岩声波测试结果

深度/m	岩体声波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$	岩性描述
0.75 ~ 15.75	2336 ~ 3487	较破碎中等风化灰岩
15.95	1893	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩
16.15 ~ 16.75	2456 ~ 2874	较破碎中等风化灰岩

表5 Azk3 现场岩声波测试结果

深度/m	岩体声波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$	岩性描述	深度/m	岩体声波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$	岩性描述
0.75 ~ 2.35	2479 ~ 3071	较破碎中等风化灰岩	12.35 ~ 14.55	2196 ~ 3322	较破碎中等风化灰岩
2.55	1981	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩	14.75	1979	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩
2.75 ~ 6.75	2110 ~ 3282	较破碎中等风化灰岩	14.95 ~ 15.75	2031 ~ 2581	较破碎中等风化灰岩
6.95 ~ 7.15	1813 ~ 1934	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩	15.95 ~ 16.15	1939 ~ 1991	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩
7.35 ~ 11.75	2023 ~ 3217	较破碎中等风化灰岩	16.35 ~ 16.75	2089 ~ 2214	较破碎中等风化灰岩
11.95 ~ 12.15	1918 ~ 1934	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩			

可见该钻孔岩体组织结构部分被破坏, 裂隙较发育, 属于中等风化岩体, 为 C 岩质单元。

结合图表可以得出, A、B 两组 6 个岩体声波测试结果与地质钻探结果无明显差异, 总体上岩体破碎,

裂隙较发育, 属于中等风化岩体, 为 C 岩质单元。

3.2 岩样波速测试

本次现场取样 6 件(岩块), 在对所取岩块进行切磨、制样后, 随后对天然含水状态下岩块进行了超声

表 6 Bzk1 现场岩声波测试结果

深度/m	岩体声波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$	岩性描述	深度/m	岩体声波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$	岩性描述
0.5 ~ 1.9	2105 ~ 2537	较破碎中等风化灰岩	5.5 ~ 6.3	2036 ~ 2411	较破碎中等风化灰岩
2.1 ~ 2.5	1806 ~ 1929	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩	6.5 ~ 6.9	1855 ~ 1968	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩
2.7	2012	较破碎中等风化灰岩	7.1 ~ 9.7	2102 ~ 3358	较破碎中等风化灰岩
2.9	1980	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩	9.9	1980	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩
3.1 ~ 4.9	2301 ~ 3230	较破碎中等风化灰岩	10.1 ~ 11.5	2274 ~ 3043	较破碎中等风化灰岩
5.1 ~ 5.3	1821 ~ 1994	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩			

表 7 Bzk2 现场岩声波测试结果

深度/m	岩体声波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$	岩性描述	深度/m	岩体声波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$	岩性描述
0.5 ~ 3.1	2281 ~ 3264	较破碎中等风化灰岩	4.7	1770	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩
3.3 ~ 4.1	1605 ~ 1990	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩	4.9 ~ 11.5	2141 ~ 3428	较破碎中等风化灰岩
4.3 ~ 4.5	2045 ~ 2102	较破碎中等风化灰岩			

表 8 Bzk3 现场岩声波测试结果

深度/m	岩体声波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$	岩性描述	深度/m	岩体声波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$	岩性描述
0.5 ~ 0.7	1848 ~ 1886	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩	3.1 ~ 3.5	2007 ~ 2080	较破碎中等风化灰岩
0.9 ~ 1.5	2035 ~ 2077	较破碎中等风化灰岩	3.7 ~ 3.9	1865 ~ 1958	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩
1.7 ~ 1.9	1646 ~ 1989	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩	4.1	2037	较破碎中等风化灰岩
2.1 ~ 2.3	2013 ~ 2046	较破碎中等风化灰岩	4.3 ~ 4.5	1779 ~ 1820	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩
2.5 ~ 2.9	1940 ~ 1976	很破碎, 裂隙发育, 强风化灰岩	4.7 ~ 11.5	2189 ~ 3702	较破碎中等风化灰岩

波测试。所检测的岩块试样波速值相差不大(见表 9), 由超声波测试结果得到此次试样岩块纵波波速, 从而进一步计算得到岩样纵波波速平均值为 5714 m/s, 将该值作为下把比水库大坝坝址完整岩体的平均纵波波速值。

表 9 岩块试样波速测试成果表

编号	取样孔	取样深度/m	岩块纵波波速 $v_{pr}/(m \cdot s^{-1})$	岩块纵波波速平均值 $\bar{v}_{pr}/(m \cdot s^{-1})$
23 [#]	Azk1	5.15	5786	5714
161 [#]	Azk2	16.75	5802	
221 [#]	Azk3	12.55	5619	
264 [#]	Bzk1	4.7	5811	
338 [#]	Bzk2	8.3	5671	
405 [#]	Bzk3	10.7	5532	

3.3 岩体完整性评价

将岩块纵波波速平均值 5714 m/s 作为本场地完整岩体的平均纵波波速值, 以此求取实测岩体剖面的完整性指数 K_v , K_v 值由公式(1)^[14]进行计算, K_v 值可反映所测试岩体相对于岩块(或完整岩体)的破碎情况, 其中表 10 为各孔岩体完整性指数计算结果。根据现场岩体纵波波速特征, 对本场声波测试范围及完

整性指数进行综合统计, 大坝基础岩体声波测试结果分析(见表 11)表明, 当混凝土位置的波速值不计入统计时, A 部位岩体声波值最大值 3487 m/s, 最小值 1813 m/s, 平均值为 2664 m/s; B 部位岩体声波值最大值 3702 m/s, 最小值 1605 m/s, 平均值为 2610 m/s, 测试岩体缺陷主要发育于中等风化岩中的破碎带、节理、裂隙带, 少数发育于强风化岩中, 岩体主要为 C 类岩质单元且岩体完整性主要呈现较破碎现象。

结合岩体、岩样声波测试结果与完整性评价分析, 下把比水库大坝水平段基础岩体组织结构部分破坏, 风化裂隙发育, 属于中等风化。从岩体声波波速随钻孔深度变化曲线(见图 2、图 3)可以初步判断, 大坝坝址基础水平段岩体完整性评价主要为较破碎, 此外, 结合现场钻探情况与声波测试数据综合分析, 所测试该段岩体较破碎, 局部存在软弱夹层。

$$K_v = \left(\frac{v_p}{v_{pr}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: K_v 为完整性指数; v_p 为现场岩体声波波速, m/s; v_{pr} 为岩石试样纵波波速, m/s。

4 结论

(1)在跨孔声波检测法的实际应用中, 声波在完整混凝土中传播能量较强, 衰减幅度较小, 当超声脉

表 10 岩体完整性综合统计表

检测剖面	检测间距/mm	岩体纵波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$			岩体完整性指数 K_v	岩体完整性程度	岩体单元
		v_{pmax}	v_{pmin}	\bar{v}_p			
Azk1—Azk2	910	3329	1846	2607	0.21	较破碎	C
Azk2—Azk3	810	3487	1893	2863	0.25	较破碎	C
Azk1—Azk3	810	3322	1813	2522	0.19	较破碎	C
Bzk1—Bzk2	680	3358	1806	2463	0.19	较破碎	C
Bzk2—Bzk3	750	3428	1605	2751	0.23	较破碎	C
Bzk1—Bzk3	590	3702	1646	2616	0.21	较破碎	C

表 11 岩体声波测试结果

检测部位	岩体纵波波速 $v_{pm}/(m \cdot s^{-1})$			岩体性状描述
	v_{pmax}	v_{pmin}	\bar{v}_p	
A组	3487	1813	2664	中等风化岩体, 裂隙中等发育, 块状结构, 组织结构部分破坏, 岩体较破碎
B组	3702	1605	2610	中等风化岩体, 裂隙中等发育, 裂隙块状结构, 组织结构部分破坏, 岩体较破碎

冲波遇到混凝土缺陷时, 声波速度将低速突变, 声波值往往低于完整混凝土正常声波值, 声波振幅有所衰减。

(2)下把比水库大坝测试区岩体纵波波速自上(地表)而下总体呈一定规律变化。岩体较完整段声波波速较高, 裂隙发育段声波波速变化明显, 波速值迅速减小。总体来看, 岩体纵波波速值 v_{pm} 在 2000~4000 m/s 区间, 大坝坝址水平段地基岩体组织结构部分破坏, 风化裂隙发育, 属中等风化。结合岩体声波波速曲线、完整性评价及现场钻探成果可综合判断, 下把比水库大坝坝址地基水平段岩体较破碎, 存在裂隙发育、破碎带及局部软弱夹层等缺陷。

(3)通过跨孔声波测试判断岩体缺陷, 进一步摸清大坝坝址岩体结构(裂隙发育程度、破碎等), 为下把比水库大坝坝址地基岩体完整性程度评价提供数据支撑, 为解决大坝坝址稳定及渗漏问题提供详实可靠的依据。

参 考 文 献

- [1] 王 育. 利用声波透射法检测桩基混凝土质量的研究[J]. 四川建材, 2019, 45(1): 25-26.
- [2] 李张明, 郭念森. 弹性波测试在三峡工程建基岩体检测中的应用[J]. 人民长江, 1999, (12): 14-16, 57.
- [3] 肖国强, 刘天佑. 声波法在大体积结构混凝土质量检测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2004, (5): 43-47.
- [4] 陈龙珠, 沙 玲, 邓俊杰. 混凝土波速受检测方法影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, (6): 685-688.
- [5] 卢海军. 低应变法和声波透射法在岩土工程桩基检测中的综合应用研究[J]. 中国金属通报, 2020, (2): 232-233.
- [6] 赵 瑜. 桥梁钻孔灌注桩跨孔声波透射法缺陷检测分

析[J]. 山西建筑, 2020, 46(2): 127-128.

- [7] 刘 群, 龚贵林. 基于声波透射法的桩基无损测试分析[J]. 山东工业技术, 2019, (12): 110-112.
- [8] 姚德元, 李春生, 沙 椿. 跨孔声波在检测混凝土裂缝深度中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2009, (S1): 103-105.
- [9] 檀 军. 利用声波透射法检测基桩混凝土质量分析[J]. 安徽建筑, 2019, 26(4): 167-168.
- [10] 简文彬, 简洪钰. 声波探测技术判别某水电站坝址区岩体缺陷[J]. 地下空间与工程学报, 2006, (6): 1053-1056.
- [11] 邓 娜. 西南地区高坝水电站地球物理探测技术应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [12] 夏国军, 张著彬. 跨孔声波法在罗坡坝水电站坝基处理设计中的应用[J]. 建筑工程技术与设计, 2017, (20): 2565-2566.
- [13] 付渝渝, 鲁光银, 朱自强, 等. 声波透射法检测公路基桩完整性[J]. 中国科技信息, 2019, (7): 86-87.
- [14] 刘 刚. 跨孔声波测试在团结水库除险加固工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, (z1): 1821-1822.
- [15] 曹西文. 低应变反射波法与声波透射法在灌注桩检测中的综合应用[J]. 福建建材, 2019, (7): 8, 22-23.
- [16] 杨胜强. 桩基完整性检测中超声波透射法的应用[J]. 百科论坛电子杂志, 2019, (8): 236.
- [17] 孙 民. 声波透射法在桩基检测中的理论与实验研究[J]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [18] 王 飞. 低应变法和声波透射法在桩基检测中的综合应用研究[J]. 江苏建材, 2018, (2): 27-29.
- [19] 赖晓君. 探讨跨孔超声波检测法在桩基质量检测中的应用[J]. 建筑工程技术与设计, 2015, (2): 390.

收稿日期: 2020-11-09