

超声波及表面波法在检测含水裂缝深度中的应用分析

张小龙¹, 赵鹏^{1,2}, 徐浩铭¹, 徐港^{1,2}

(1. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要:介绍了基于单面平测法、双面斜测法、钻孔对测法及表面波法的混凝土裂缝深度测量原理, 结合工程实例, 对比分析了单面平测法及表面波法检测含水裂缝和干燥裂缝深度的结果。当裂缝干燥、表面及内部仅有少量或者无粉尘等杂质填充时, 单面平测法及表面波法检测结果较为接近, 均与钻孔直接测量结果一致; 当裂缝内有大量泥水及杂物时, 仅表面波法测得结果与钻孔直接测量结果吻合。分析表明, 单面平测法受裂缝中水及填充物影响较大, 而表面波法受其影响较小, 建议对于类似大坝混凝土等近似半无限平面体裂缝的测量优先选用表面波法, 对于干燥裂缝视具体情况而定。

关键词:含水裂缝; 裂缝深度检测; 超声波法; 表面波法

中图分类号:TV61

文献标志码:A

引言

受浇筑质量、自身体积变形、水分蒸发、不均匀沉降及后期荷载作用的影响, 钢筋混凝土等结构物易形成不同深度的裂缝(大坝、渡槽、水池和涵洞等水工构造物尤为如此), 对建筑物有很大危害性。国际坝工委员会(ICOLD)1988年所作的关于大坝工作状态的调查报告^[1]指出, 世界各国已建成的混凝土坝中绝大部分存在着裂缝。因裂缝的存在, 坝体耐久性 & 稳定性将面临威胁, 影响其运行、效益, 严重者甚至失事。我国青铜峡大坝电站、李家峡大坝电站^[2]及奥地利施莱盖斯拱坝等皆因坝体出现大量裂缝而影响其运行, 大坝甚至处于危险状态, 对人民生命财产安全造成严重威胁。因此, 必须对这些裂缝进行检测, 掌握其状况及有关参数, 以判断对建筑物的危害程度及研究相应补强措施。目前, 国内外裂缝深度检测方法众多, 本文主要介绍超声波法、表面波法的检测原理及要点, 结合工程实例, 对含水与不含水裂缝使用以上两种方法分别进行检测, 并对检测结果进行分析, 相关结论可为后续工程提供借鉴。

1 检测原理

1.1 超声波法

超声脉冲波以其穿透能力强、定向性好、检测设备简单等优点, 广泛应用于混凝土缺陷等领域, 目前已写入《大坝混凝土声波检测技术规程》(DL/T5299-2013)^[3]及《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CEC S21-2000)^[4]。在检测混凝土裂缝深度方面, 根据被测裂缝所处部位, 超声波法可分为单面平测法、双面斜测法及钻孔对测法。

1.1.1 单面平测法

当混凝土被检测部位只有一个表面可供检测时, 可采用单面平测法进行裂缝深度测量, 如混凝土路面、大坝侧壁、廊道及其他大体积混凝土的浅裂缝等。受平测时超声波传播距离所限, 此法只适用于检测裂缝深度在 500 mm 以内的裂缝, 但相关学者研究表明, 该方法仅能有效测量深度小于 200 mm 的裂缝^[5]。如图 1 所示。该方法检测裂缝深度时基于以下假设: (1) 假设裂缝附近混凝土质量基本一致, 跨缝与不跨缝时超声波波速相

收稿日期:2015-05-25

作者简介:张小龙(1989-), 男, 湖北宜昌人, 硕士生, 主要从事混凝土结构耐久性方面的研究, (E-mail)15571708281@163.com;

徐港(1974-), 男, 内蒙古达茂旗人, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构耐久性方面的研究, (E-mail)postxg@163.com

同;(2)跨缝测量时首波发射换能器的首波信号能绕过裂缝末端传至接收换能器。

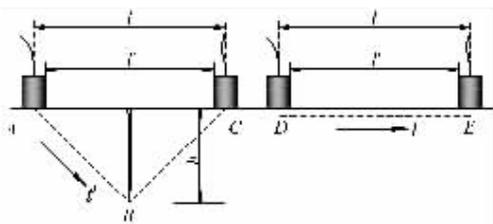


图 1 单面平测裂缝示意图

进行检测作业时,选取被测裂缝较宽且便于测量操作的部位、尽量避开钢筋影响,清理被测裂缝,去除表面的泥土等杂物,若被测区域不平整,用打磨机进行打磨至平整,以保证换能器与混凝土表面耦合良好,实际操作过程中影响裂缝深度测试准确性的因素很多^[6],因此在操作过程中,应规范每一步操作。在进行裂缝深度检测时首先应进行不跨缝声时测量,即将 2 个换能器分别置于裂缝附近同一侧(混凝土完好区域),以两个换能器内边缘间距 (l') 等于 100 mm、150 mm、200 mm、250 mm,分别读取声时值 (t_i),绘制“时-距”坐标图(图 2)或用回归分析的方法求出声时与测距之间的回归直线方程 $t_i = a + bt_i$; 然后进行跨缝的声时测量,即将收发换能器分别置于以裂缝为对称轴的两侧, l' 取 100 mm、150 mm、200 mm、……分别读取声时值,同时观察首波相位的变化^[7]。

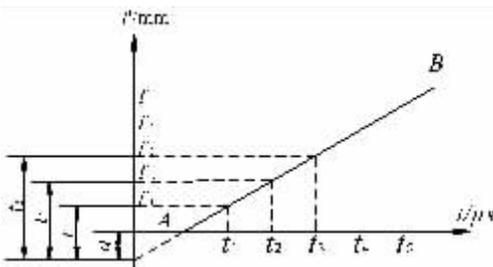


图 2 平测“时-距”图

结合超声波传播的路径,并根据几何学原理,计算得到推定的裂缝深度。

$$h^2 = AC^2 - (L/2)^2 = (vt'/2)^2 - (L/2)^2 = (lt'/2t)^2 - (L/2)^2$$

故

$$h = \sqrt{(lt'/2t)^2 - (L/2)^2} = L/2 \cdot \sqrt{(t'v/L)^2 - 1}$$

式中, h 为裂缝深度; l 为超声波实际传播的距离,取换能器内间距与“时-距”图截距 a 之和, $l = l' + a$ 。

裂缝深度具体计算方法及取值要求参见《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CEC S21-2000) 5.2.2 及

5.2.3 条。使用该方法时,换能器连线应距钢筋一定距离或与其走向呈一定夹角,以排除钢筋影响。

部分学者在单面平测法推定混凝土裂缝深度的试验中发现:当首波反向时的测距 l' 与裂缝深度 h 存在一定关系^[8],若置换能器于裂缝两侧,当换能器与裂缝间距 a 分别大于、等于、小于裂缝深度 d_c 时,超声波接收波形如图 3 所示。利用此方法可大致判断裂缝深度,在钢筋密集区混凝土裂缝亦可如此。

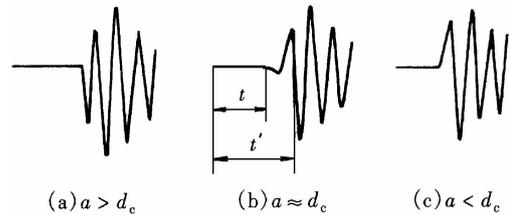


图 3 首波相位反转示意图

实际工程中,裂缝很可能会倾斜,利用以上方法测量将有误差,此时可利用椭圆交会法作图按比例求出(图 4),即将其中一个换能器置于 A 点,将另一个换能器分别置于 B、C 点,读取声时值并计算超声波传播距离,分别以 A、B 及 A、C 为焦点,以 AEB、AEC 长为常数画椭圆,交于点 E,利用比例关系即可求得斜裂缝深度。

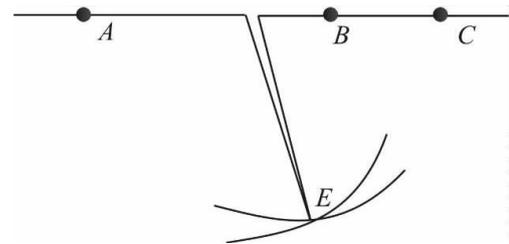


图 4 椭圆交会法

1.1.2 双面斜测法

该方法适用于被测构件具有两个相互平行的表面,如梁、柱、墙等。如图 5 所示。双面斜法是在保持 T、R 换能器连线的距离相等、倾斜角一致的条件下进行跨缝与不跨缝检测,分别读取相应的声时、波幅和主频值。当超声波通过裂缝时,由于空气或水分的反射作用,仪器接收到的首波信号较微弱,其波幅、声时测值与不跨缝测点相比有明显差别(一般波幅差别最明显),据此可判定裂缝深度以及是否在所处断面内贯通^[9]。同单面平测法相比,此法受裂缝中填充物影响较小,测量结果较为可靠,若满足该方法检测条件,建议优先选用双面斜测法。

1.1.3 钻孔对测法

钻孔对测法是在裂缝两侧分别钻出直径略大于换

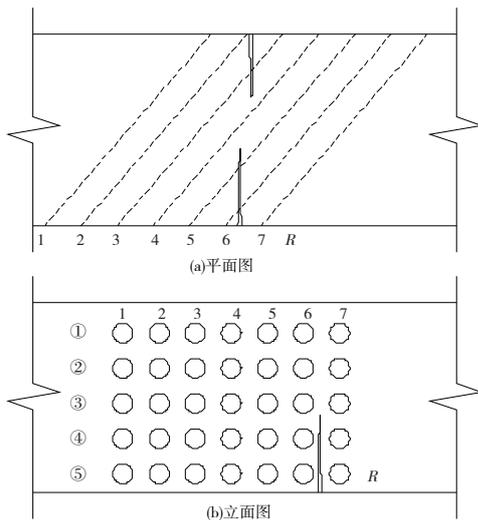


图5 双面斜测法测点布置示意图

能器直径的测试孔,将径向换能器置于测试孔中,用水耦合进行裂缝深度检测的方法。该方法适用于大坝、桥墩、承台等大体积混凝土,预计裂缝深度大于 500 mm 的裂缝检测,被测结构允许在裂缝两侧进行钻孔。如图 6 所示。在运用钻孔对测法检测裂缝深度时,在裂缝两侧应分别钻孔,钻孔直径一般较换能器直径大 5~10 mm,钻孔深度应大于裂缝深度 50 cm 以上,经测试如浅于裂缝深度,则应加深钻孔;当裂缝倾斜时,应确保裂缝底部不致超出两孔之间。一般情况下两孔间距为 1~3 m,对应的两个测试孔,必须始终位于裂缝两侧。

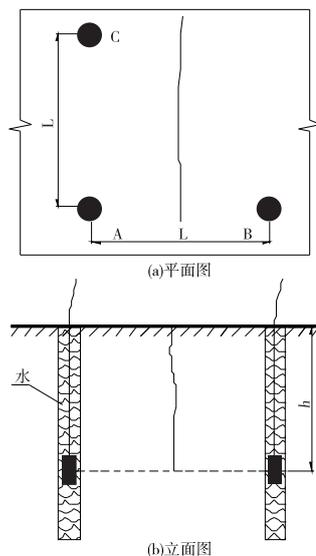


图6 钻孔对测法示意图

孔中粉末碎屑应清理干净(若测孔中存在粉尘碎屑,注水后将形成悬浮液,超声波在测孔中大量散射而衰减,影响测试数据分析和判断),待测孔中注满清水后,将发、收换能器分别置于两钻孔中同样高程上,等速

从上至下同步移动并定点记录声学参数(测点间距视所检测裂缝深度精度要求而定,一般可 20 cm 左右测一点)。一般而言,裂缝上宽下窄,随着换能器逐渐下移,裂缝逐渐变窄,超声波传达至接收换能器所损耗能量渐小,即波幅逐渐增大,当振幅增至最大值并基本趋于稳定,此时发、收换能器之间混凝土部分完好。裂缝深度即为达到最大振幅值测点对应的深度,如图 7 所示。为消除测量中的误差,当达到最大振幅时应继续向下测量 2~3 个点,且应再从孔底至孔口返回测一次,取两次测值的平均值作为最后结果。

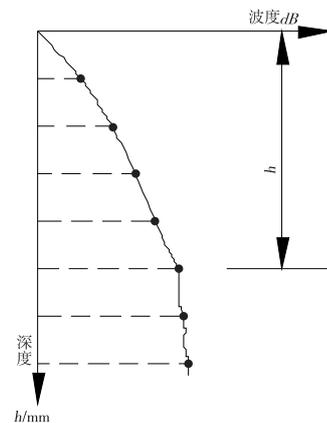


图7 孔深-振幅曲线

当裂缝倾斜时,可用图 8 所示方法进行测量:使换能器在两孔中不同深度以等速移动方式斜测,寻找测量参数突变时换能器中部的连线,多条连线的交点 N 即为裂缝的末端^[9]。由于混凝土质量存在波动以及孔中杂质的影响等,实测的波幅-深度曲线不如规范中的曲线理想,给准确测量裂缝深度带来干扰。因此在实测过程中应注意曲线中各测点波幅的相对变化趋势,把握特征,方能准确判断裂缝深度^[10-12]。

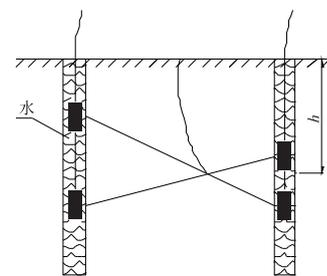


图8 斜裂缝测深示意图

1.2 表面波法

表面波法又称瑞利波法^[13],于上世纪 60 年代被提出,由于对能量衰减测试误差较大,一直未能得到广泛应用。近年来经过进一步研究开发,使用双方向激振技术可较大程度提高能量衰减测试的精确性^[14],从而提高

了表面波法的测试精度和实用性。

外荷载作用于地表时地基中波主要以瑞利波形式传播,该波依存于材料的剪切力学特性,在水平方向上衰减慢,而在竖直方向上衰减很快,从而对裂缝更敏感,且有效传播深度为 1.5 倍波长^[15]。通过采用新技术,瑞利波在传播过程中所发生的几何衰减和材料衰减可通过系统补正而保持其振幅不变。但瑞利波在遇到裂缝时,其传播在某种程度上被阻断,通过裂缝后波的能量和振幅均会减小(图 9)。利用此特性,根据裂缝前后波的振幅变化(振幅比),便可以推算其深度。根据试验资料和理论分析:

$$h = -0.7429\lambda \ln x$$

式中, h , λ 和 x 分别为裂缝深度、表面波波长和裂缝后/前的振幅比(需经几何衰减修正)。

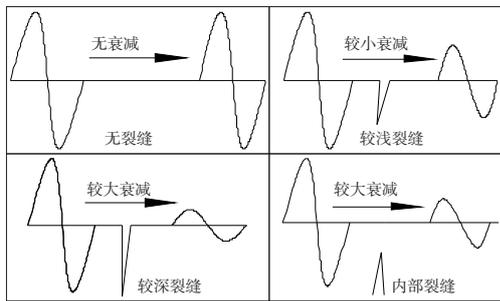


图 9 瑞利波通过不同裂缝后衰减示意图

进行表面波法测量作业时,先将测试面打磨平整。在裂缝开口两侧布设测线,传感器和敲击点在一条直线上,并布置两个传感器使其轴线垂直于裂缝走向(图 10),其中, d 、 d_0 应大于激发的面波波长 λ ,可取 1~2 倍 λ (可按 $\lambda \approx 2t_c \cdot c_R$, t_c 为冲击持续时间, s; c_R 混凝土面波波速, m/s, 估算时可取 2000 m/s)。敲击产生的面波传递至裂缝另一侧传感器的振幅比 x 计算为:

$$x = \frac{A_2}{A_1} \sqrt{\frac{2d + d_0}{d_0}}$$

式中, A_1 为传感器 1 测试得到的面波最大振幅; A_2 为传感器 2 测试得到的面波最大振幅。当裂缝穿过钢筋时,振幅比 x 可按 $\hat{x} = x - n$ 进行修正,式中 n 为钢筋率^[9]。

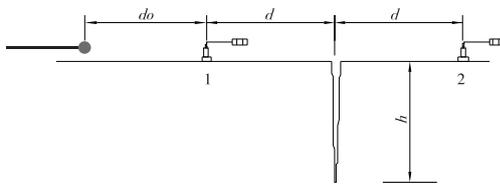


图 10 表面波法检测裂缝深度示意图

该方法测试裂缝的深度范围很广,可达数米(现阶段

为 2 m),受裂缝中填充物、水分及裂缝内钢筋影响较小,其中,钢筋影响可以修正,裂缝深度测量值较为可靠。瑞利波需在弹性半空间中波速方可保持稳定,受边界条件(侧壁、边角等)的影响较大,故该方法也有一定局限性,对于坝面等近似于半无限平面体,适合表面波法测试,而对于狭窄结构(如梁、柱等)则不适合。在运用该方法进行测试时,宜选择结构未剥离的区域,避免引起板波和振动导致测量误差加大,若裂缝深度检测结果 h 大于 1.3 倍面波波长 λ , 则应更换冲击锤重新测试。

2 工程实例

2.1 工程概况

某抽水蓄能电站已运行近 10 年,工作人员在例行检查时发现,上、下库坝体廊道内有大量渗水沿坝段横缝喷涌,某一横向廊道入口段底板有明显纵向裂缝发育。为探明渗水来源及裂缝开展情况,分别对坝体渗漏区域及裂缝宽度、深度、间距等进行了检测(本文主要以裂缝深度测量为主)。自该廊道入口位置起,沿垂直于廊道底板轴线方向以近似等间距分布了若干条裂缝(以 Z1~Z5 为例),如图 11 所示,其中 Z3、Z4 裂缝及其附近有水渗出,且缝内有较多泥土等杂物,Z1、Z5 较为干燥,Z2 裂缝处湿润,但无水渗出。针对此情况,分别使用超声波平测法、表面波法对以上裂缝深度进行了测量,最后使用钻孔直接测量法对 Z1、Z3 进行测量,以验证前两种方法测量结果的准确性。

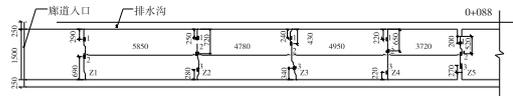


图 11 裂缝分布及测点位置示意图

2.2 检测方案

测量使用基于超声波原理的裂缝测深仪器:NM-4A 非金属超声检测分析仪和 KON-FSY 裂缝测试仪,基于表面波法的裂缝测深仪器:SCE-MATS-S 混凝土多功能无损检测仪,以及钻孔直接测量所需要的相关仪器。检测流程如图 12 所示,首先使用基于表面波法的混凝土多功能无损检测仪对 Z4 深度进行试测,了解裂缝大致深度后,确定无需使用钻孔对测法进行测量,进而确定测量方案。长裂缝选取 3 个测点,短裂缝选取 2 个测点进行深度测量,分别采用超声波单面平测法及表面波法对 Z1~Z5 进行测量,使用钻孔直接测量法对 Z1、Z3 进行测量,以上检测均严格按照《超声法检测混凝土

缺陷技术规程》(CEC S21 - 2000)及《大坝混凝土声波检测技术规程》(DL/T 5299 - 2013)等要求进行。

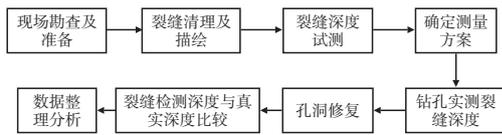


图 12 检测流程图

2.3 检测结果及分析

检测结果见表 1, 所测裂缝深度均不超过 300 mm (钢筋距混凝土表面 350 mm), Z2、Z3、Z4 裂缝处湿润或有水渗出, 超声波平测法测得结果偏小, 表面波法测得结果较大, Z3-3 处用表面波法测得深度值与用钻孔直接测量法测得深度值吻合较好; Z1、Z5 裂缝处较为干燥, 超声波平测法与表面波法测得结果比较接近, Z1-2 处裂缝深度与钻孔直接测量法测得结果一致。

表 1 裂缝深度测量结果

裂缝编号	测点编号	裂缝深度测量值/mm			裂缝深度取值/mm
		超声波平测法	表面波法	钻孔直接测量法	
Z1	1	49	56		56
	2	46	48	45	45
Z2	1	122	193		193
	2	36	235		235
	3	83	257		257
Z3	1	84	138		138
	2	42	30		42
	3	27	147	148	148
Z4	1	22	183		183
	2	76	190		190
	3	33	180		180
Z5	1	80	76		80
	2	79	79		79

一般而言, 钻孔直接测量法测得裂缝深度最为真实。如图 13 所示, 对比 Z1-2 测量结果可知, 三种方法测得结果基本吻合, 超声波平测法与钻孔直接测量法相对误差为 2.2%, 表面波法与钻孔直接测量法相对误差为 6.7%, 在工程要求误差范围之内; 对比 Z3-3 测量结果可知, 表面波法与钻孔直接测量法测得裂缝深度值较为接近, 二者相差 1 mm, 相对误差仅为 0.7%, 而超声波平测法与钻孔直接测量法测量结果则相差较大; 对比超声波平测法及表面波法测量结果可知, Z1、Z5 测量结果较为接近, 而 Z2、Z3、Z4 测量结果则相差较大。究其原因, Z1、Z5 裂缝处较为干燥, 裂缝内无水分填充, Z2、Z3、Z4 则有水分填充, 其中, Z3、Z4 渗水较为严重, 且有泥土等杂质填充。超声波单面平测法测量原理基于跨缝测读的首波信号绕过裂缝末端至接收换能器, 裂缝中水分和杂质的存在使得超声波首波信号未能绕过裂缝末端传

达至接收换能器; 而表面波法测量原理则基于瑞利波通过裂缝后振幅和能量的衰减大小来测取裂缝深度, 受裂缝中水分和杂质的影响较小, 故在干燥裂缝处, 超声波平测法与表面波法测得结果均与裂缝真实深度较为接近, 而在有水分或杂物填充处只有表面波法测得结果与裂缝真实深度值较为接近, 超声波平测法测得结果则偏小。

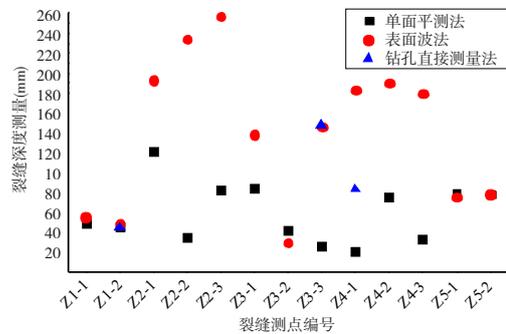


图 13 不同测量方法测量值对比图

3 结论

(1) 在检测环境较好, 即当裂缝干燥, 裂缝表面及内部仅有少量或者无粉尘、杂质填充时, 基于超声法的单面平测法及表面波法检测裂缝深度准确性均较高, 与钻孔直接测量法测得结果吻合。

(2) 超声波单面平测法检测结果受裂缝中水及其他填充物影响较大, 裂缝中有大量水及杂物填充时, 其检测结果较钻孔直接测量法测得结果小; 而表面波法检测结果基本不受裂缝中水及其他填充物的影响, 所测裂缝深度与钻孔直接测量所得结果较为吻合。

(3) 检测类似大坝等近似于半无限平面体混凝土的裂缝时, 若缝中有水或杂质物, 建议优先选用表面波法进行检测, 超声单面平测法仅可作为参考; 当裂缝干燥, 杂物较少时, 测量方法视钢筋网密集程度及保护层厚度而定, 若裂缝较浅, 可使用首波相位反转法进行测量。

(4) 若条件允许, 建议使用多种方法进行裂缝深度测量, 对比分析, 择优选取裂缝深度值, 如此可提高检测结果的可靠性。

参考文献:

[1] ICOLD. The World Register of Dams[R]. Paris: 4th edition Paris, 1988.
 [2] 钱宁, 薛振江. 李家峡水电站主坝混凝土裂缝及缺陷处理[J]. 西北水电, 2004(4): 29-31, 63, 67.
 [3] 大坝混凝土声波检测技术规程, DL/T5299-2013[S].

- [4] 超声法检测混凝土缺陷技术规程,CEC S21-2000[S].
- [5] 吴家晔,张志国,高峰.土木工程检测与测试[M].北京:高等教育出版社,2015.
- [6] 田晖,辛纯涛,张坤.超声波单面平测法检测混凝土构件裂缝深度可靠性分析[J].兰州理工大学学报,2013,39(6):133-136.
- [7] 林维正.土木工程质量无损检测技术[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [8] 董寿兴,张晓燕,金元.超声波首波相位反转法检测混凝土裂缝深度[J].建筑材料学报,1998(3):287-290.
- [9] 徐存东.水工建筑物检测与健康诊断[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [10] 孙影.超声波钻孔对测法检测闸底板裂缝深度浅析[J].江淮水利科技,2014(4):43-44.
- [11] 杨正刚,杜兴忠,江晓涛.声波穿透及钻孔录像在混凝土裂缝检测及灌浆质量评价中的应用[J].工程地球物理学报,2015,12(1):101-105.
- [12] 杨军.官地水电站大坝混凝土裂缝检测及处理技术[J].施工技术与测量技术,2013,33(4):138-140.
- [13] 陈晓峰.瑞利面波法检测混凝土裂缝的方法研究[D].荆州:长江大学,2014.
- [14] 吴佳晔,吴曾炜,海野忠行.采用双方向发振技术减小弹性波动信号测试误差的技术:200510021851.5 [P].2006-11-29.
- [15] 王文中,俞丽娅,黄金安.表面波检测水工混凝土裂缝深度的理论探讨[J].浙江水利科技,1999(31):45, 86.

Application Analysis of Ultrasonic Wave and Surface Wave for Water-filled Crack Depth Detection

ZHANG Xiaolong¹, ZHAO Peng^{1,2}, XU Haoming¹, XU Gang^{1,2}

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Hubei Province, Yichang 443002, HuBei)

Abstract: The measuring principle of concrete crack depth based on single plane detecting, double oblique method, drilling method and surface wave method are introduced, and combined with the engineering example, the depth results of water-filled crack and dry crack detected by single plane detecting method are compared with those by surface wave method. When the crack dry and the surface and internal of crack is filled with little or no dust and other impurities, the results of single plane detecting and surface wave method are closed to each other, and both of the results are similar to the direct measured depth of drilling; When the crack is filled with lots of mud water and impurities, only the result of surface wave method is similar to the true depth. The analysis shows that single plane method is greatly affected by water and infills, while there is little influence on surface wave method. Therefore it is suggested that surface wave method is the first choice for dam concrete and other similar semi infinite plane crack, and it depends on the specific circumstances for dry crack.

Key words: water-filled crack; crack depth detection; ultrasonic wave method; surface wave method