

# 探地雷达检测混凝土内含水量梯度

肖小汀<sup>1</sup>, 田贵云<sup>1</sup>, 高斌<sup>1</sup>, GERALDINE Villain<sup>2</sup>, XAVIER Derobert<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学 自动化工程学院, 成都 611731; 2. IFSTTAR 研究所, 布格奈 44344)

**摘要:** 由于水分是引起混凝土劣化的主要原因之一, 混凝土含水量的检测问题也成为近年来的研究热点。利用材料的毛细管效应设计了一个吸水试验装置来模拟混凝土中的水分传递。其主要目的是通过电磁(EM)导波监测水分在混凝土板中随时间的变化过程。混凝土的渗吸试验中使用了新的经验模型  $\arctan(x)$ , 且以  $\gamma$  射线的测量结果作为试验的参考数据。结果显示, 融合使用多层波导(WG)模型和探地雷达(GPR)检测, 可以有效估计混凝土板的内部梯度曲线。

**关键词:** 探地雷达; 混凝土; 含水量梯度; 波导

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2017)10-0017-04

## Inspection of Water Content Gradients in Concrete with Ground Penetrating Radar

XIAO Xiaoting<sup>1</sup>, TIAN Guiyun<sup>1</sup>, GAO Bin<sup>1</sup>, GERALDINE Villain<sup>2</sup>, XAVIER Derobert<sup>2</sup>

(1. College of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks, Bouguenais 44344, France)

**Abstract:** In recent years, many studies have been done on concrete about the detection of its water content, since it is one of the main causes of degradation. In this study, an experimental set-up of imbibition by capillary effects is used to model the water transfer in concrete. The main objective is to monitor the water transfer through time by electromagnetic (EM) guided waves. The new empirical model -  $\arctan(x)$  was applied to the experiments on concrete slabs of imbibition. The water content distributions measured by gammadensimetry are set as reference. The results show that the combination of the multi-layer waveguide (WG) model and ground penetrating radar (GPR) measurements allowed to estimate the gradient curves inside concrete slabs.

**Key words:** ground penetrating radar; concrete; water content gradient; waveguide

混凝土作为当今最常见的一种建筑材料, 被广泛地应用于工厂、桥梁、堤坝等的设施建设中。因此, 混凝土的耐久性也成为人们的关注焦点。目前在实际工程中广泛应用的混凝土无损检测方法有回弹法、声波法、探地雷达法、红外线法等。其中, 探地雷达作为一种基于电磁波发射和接收的无损检测技术, 起初用于勘探地下结构和埋设物<sup>[1]</sup>。近年来, 国内也有大量关于探地雷达法应用于混凝土的研究中, 主要集中在对混凝土内部结构的检测上, 如质量缺陷、裂缝的探测<sup>[2-3]</sup>, 结构内部钢筋的定位<sup>[4]</sup>等。

收稿日期: 2017-06-25

作者简介: 肖小汀(1988—), 女, 博士后, 助理研究员, 主要研究方向为探地雷达和建筑材料的无损检测

通信作者: 肖小汀, xt\_xiao@foxmail.com

随着探地雷达技术的日趋成熟, 国内外越来越多的专家学者将其应用于混凝土介电性能<sup>[5-6]</sup>、色散特性<sup>[7]</sup>的研究中, 此外 LAURENS S 和 DEROBERT X 等<sup>[8-10]</sup>将探地雷达法应用于混凝土含水量和氯含量的分析中, 获得了很好的进展。

研究表明, 水分是引起混凝土劣化的主要因素之一。由于探地雷达检测的便利性和电磁波对水分变化的敏感性, 越来越多的研究将探地雷达应用到了混凝土含水量的检测上<sup>[10-12]</sup>。然而, 这些研究都是在设定含水量均匀的基础上进行的。如何利用探地雷达的方法检测出混凝土含水量的梯度变化仍是一大难题。笔者利用孔隙材料的毛细管效应进行了混凝土的渗吸试验。试验中, 融合使用了水分梯度模型  $\arctan(x)$  与波导(WG)模型, 来估计吸水期间混凝土板中的水分梯度分布情况。

## 1 方法论述

### 1.1 电磁波导模型

在试验检测过程中,混凝土样品(介质1)放置于水(介质2)中满足波导的形成条件,即混凝土样品的介电常数或电导率远远低于水的介电常数 $\epsilon$ 或电导率 $\sigma$ ( $\epsilon'_1 \ll \epsilon'_2$ 或 $\sigma_1 \ll \sigma_2$ )。在此条件下,电磁波在波导介质中的传播方程可以用模态理论来表示<sup>[13-14]</sup>。

$$1 - \tilde{R}_{12}(\tilde{\theta})\tilde{R}_{10}(\tilde{\theta})\exp[-2\tilde{\gamma}_1 h \cos(\tilde{\theta})] = 0 \quad (1)$$

式中:符号 $\sim$ 表示变量与频率相关; $\tilde{R}_{10}$ 和 $\tilde{R}_{12}$ 分别为波导上表面和下表面的反射系数; $\tilde{\theta}$ 为电磁波的入射角; $\tilde{\gamma}_1$ 为传播常数,且可如式(2)表示。

$$\tilde{\gamma}_1 = j\omega \sqrt{\epsilon'_1} / c_0 \quad (2)$$

式中: $j = \sqrt{-1}$ ; $\epsilon'_1$ 为波导介质中相对介电常数的实部; $c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,为电磁波在真空中的传播速度。

在理想传播情况下,总相位变化应为 $2\pi$ 的整数倍,设 $m$ 为整数,则:

$$\Phi(\tilde{\theta}) - 4\pi f \sqrt{\epsilon'_1} h \cos(\tilde{\theta}) / c_0 = -2m\pi \quad (3)$$

其中:

$$\Phi(\tilde{\theta}) = \arctan \left[ \frac{\Im(\tilde{R}_{10})}{\Re(\tilde{R}_{10})} \right] + \arctan \left[ \frac{\Im(\tilde{R}_{12})}{\Re(\tilde{R}_{12})} \right] \quad (4)$$

为满足上式,传播应在上下界面都获得全反射,即入射角应该大于临界角 $\theta_c$ 。

$$\theta_c = \arcsin \left( \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\epsilon_b}} \right) \quad (5)$$

式中: $a, b = 0, 1$ 或 $2$ 。

相速度 $\tilde{v}_\varphi$ 为与频率相关的变量,且可以根据入射角的变化而变化,定义为:

$$\tilde{v}_\varphi = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon'_1 \sin \tilde{\theta}}} \quad (6)$$

为简化模型,假定波导为无损且非磁性的介质( $\sigma \rightarrow 0, \mu = 1$ )。

### 1.2 介电混合模型

笔者引入了一个介电混合模型来实现多层波导的表征。该模型源于Lichtenecker-Rother公式<sup>[15]</sup>,当几何因子为1,在多层介质的分界面之间相互平行且无限大的条件下,介质的整体介电常数 $\epsilon'_e$ 可由下式计算获得。

$$\epsilon'_e = \sum_{i=1}^n h_i \epsilon'_i / \left( \sum_{i=1}^n h_i \right) \quad (7)$$

式中: $\epsilon'_i$ 和 $h_i$ 分别为第 $i$ 层介质的介电常数和厚度。

### 1.3 水分梯度模型

根据以往的实践经验,含水量在混凝土内的梯度分布近似于翻转的反正切函数 $\arctan(x)$ 曲线。由此建立的介电常数关于混凝土高度的经验模型可如下式表示。

$$\epsilon'(x) = \frac{b-c}{\pi} \arctan \left( \frac{2d}{a} - \frac{2x}{a} \right) + \frac{b+c}{2} \quad (8)$$

式中: $x \in [0, h]$ , $h$ 为波导的总厚度; $b$ 和 $c$ 分别为介电常数的上限和下限; $d$ 为梯度曲线的中点; $a$ 决定梯度的斜率,且当 $a \rightarrow 0$ 时,介质被分为两层且 $d$ 为较高介电常数层的厚度。

根据多层介电混合模型,该介质的有效介电常数可表示为:

$$\epsilon'_e = \frac{\int_0^h \epsilon'(x) dx}{h} \quad (9)$$

笔者在MATLAB中对该模型进行了建模,参数设置如下: $h = 0.13, a = 0.01, b = 15, c = 6, d = 0.02$ 。所得介电常数曲线如图1所示。值得注意的是在 $a \rightarrow 0$ 这种特殊情况下(红线所示),介质被分为了平行的两层,此时上下表面的介电常数值 $\epsilon'_2 = b, \epsilon'_1 = c$ 。而通常情况下该值和 $b, c$ 是不相等的。

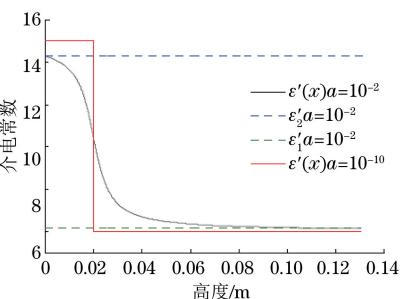


图1 介电常数梯度曲线的建模

通过雷达多偏移数据计算波的相速度,可以在已知 $h$ 的情况下最小化成本函数 $C^{\text{TE}}$ 来反演参数 $[a, b, c, d]$ ,如下式表示。

$$C^{\text{TE}} = \sum_{n=1}^N \frac{|v_\varphi[\tilde{\theta}(f, a, b, c, d)] - v_\varphi^m|}{N} \quad (10)$$

式中: $v_\varphi$ 和 $v_\varphi^m$ 分别为相速度的理论值和测量值; $N$ 为相速度的总频点数。

## 2 试验设计

试验采用的混凝土样品是孔隙率为15.9%,水灰比为0.62的无钢筋混凝土。根据孔隙材料的毛

细管效应,两种不同尺寸的混凝土样品被置于水池中进行渗吸试验,用于探地雷达(GPR)和 $\gamma$ 射线(Gammadensimetry)的检测,试验装置如图2所示。图中T为GPR发射天线,R为接收天线;Gammadensimetry<sup>[16]</sup>是一种利用 $\gamma$ 射线穿透建筑材料来测量其密度变化的无损检测方式。在试验开始前,混凝土样品被放置在温度为20℃,相对湿度为70%的保温室里两个月时间,以确保样品内部的水分均匀分布。然后在放入水池之前,混凝土板的4个侧面被涂上树脂以保持渗吸的方向始终向上。入水后,混凝土下表面和水面保持2 cm左右的距离。混凝土板在入水前,以及入水后每隔一定时间进行雷达数据的采集。探地雷达采用GSSI<sup>®</sup>的SIR-3000系统搭载1.5 GHz的收发天线进行共中点法(CMP)的测量。收发天线从混凝土板中间向两端移动至最大偏移距离为 $X_{\max}=28$  cm处,偏移步长 $\Delta x=1$  cm。在相同的渗吸过程中,用 $\gamma$ 射线对圆柱形样品进行密度分布的检测,以其数据作为探地雷达检测结果的参考数据。

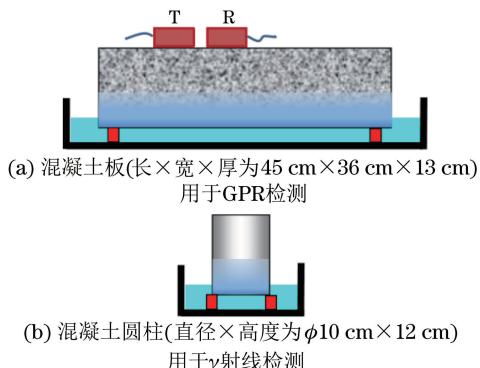


图2 渗吸试验装置示意

如图3所示为 $\gamma$ 射线检测结果,样品每隔6 mm(样品在水中时从下往上方向)被用于密度的检测以获得整体关于样品高度的密度变化曲线。图中 $t_0$ 表示入水前的密度变化,设此时相对密度变化为0。

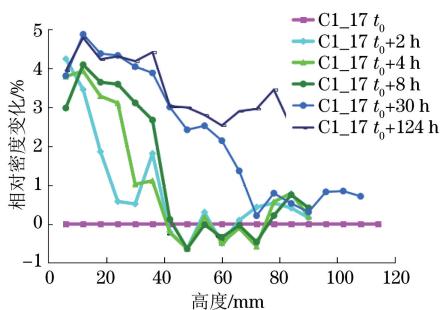


图3 圆柱形样品C1-17在渗吸过程中的相对密度变化检测结果

可以看出在渗吸的前30 h,上表面和下表面的含水量基本保持不变,且水分梯度曲线随时间向上表面平移。在124 h后,上表面和下表面的密度非常接近,表示此时样品的含水量接近饱和。

### 3 数据反演与试验结果

#### 3.1 雷达数据反演过程

对探地雷达所采集的多偏移数据进行二维傅里叶变换,可从中提取导波在不同TE模式下的相速度曲线<sup>[17]</sup>。通过对模型成本函数的计算可知,反演拥有唯一解的同时,函数很容易陷入局部最小值而得到错误的估值。研究表明,在预估参数c的值过后对参数 $[a, b, d]$ 进行反演可以大大提升反演的准确性和稳定性。因此,arctan(x)模型的反演主要分为以下几个步骤。

##### 3.1.1 频带的选取

由于相速度曲线的准确度直接影响到反演结果的准确度,故工作频带的选取是至关重要的一步。结合曲线的成型情况和检测天线的中心频率,最终选择两个传播模式的频带进行联合反演计算:TE<sub>1</sub>(0.9 GHz~1.0 GHz)和TE<sub>2</sub>(1.2 GHz~1.3 GHz)。

##### 3.1.2 初始值的设定

在该试验中,参数c和混凝土上表面的介电常数值 $\epsilon'_1$ 非常接近。由入水前 $t_0$ 时的检测数据预估获得介电常数 $\epsilon'_1=8.1$ ,则c=8.1作为已知参数,对 $[a, b, d]$ 进行反演。当条件满足 $\epsilon'_{1\text{ inv}} - \epsilon'_1 < 0.1$ 时,则输出结果;否则将c的值减小0.1,重新进行反演运算。而被反演参数 $[a, b, d]$ 则被赋予不同的初始值进行最小成本函数的搜索运算,如表1所示。其中a通常在0.01~0.04的范围内;b接近于混凝土下表面的介电常数,根据经验限定在12~18间;d代表含水量变化的中点,其应不大于样品总高度,也可根据实际情况缩小设定范围。

表1 反演参数的初始值设定情况

项目	参数		
	a	b	d/m
设定范围	0.01~0.02	8~11	0.01~0.13
间隔	0.01	1.00	0.01

##### 3.1.3 最小成本函数的搜索

最小成本函数的搜索采用了最小二乘非线性回归算法。三个未知参数组成的每一个初始模型对应了一个最小成本函数 $\min(C)$ 。所有初始模型获得的 $\min(C)$ 中的最小值即被认为是要找的全局最小

值,对应的参数值即为所求的反演结果。

### 3.2 结果对比和分析

根据所得的参数值 $[a, b, c, d]$ ,可以画出混凝土板在不同渗吸阶段的介电常数梯度曲线,如图4所示。可以看出,除了在 $T_0+10$  h处的曲线存在问题,其他时候的含水量一直呈稳定上升的趋势。虽然下表面的介电常数在一定范围内变动([8.9~9.5]),但上表面的介电常数基本保持稳定,这和图3的曲线特点相吻合。

根据图4曲线得到参数 $[\epsilon'_1, \epsilon'_2, h_2]$ 的反演结果如表2所示。其中 $h_2$ 表示混凝土中的水位上升高度,和 $\gamma$ 射线(Gammadensimetry)的检测结果进行

表2 参数 $[\epsilon'_1, \epsilon'_2, h_2]$ 的梯度模型反演结果及 $\gamma$ 射线的检测结果

渗吸时间/h GPR/ $\gamma$ 射线	$\min(C^{TE0,\dots,m})/(\times 10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\epsilon'_1$ 反演	$\epsilon'_2$ 反演	$h_2 \text{ min}/\text{m}$ 反演/ $\gamma$ 射线	$h_2 \text{ max}/\text{m}$ 反演/ $\gamma$ 射线
2/2	2.70	8.1	9.2	0/0	0.020/0.024
4/4	2.56	8.1	8.9	0.030/0.024	0.050/0.030
10/8	4.68	8.2	9.7	0.015/0.036	0.035/0.048
30/30	5.25	8.0	9.5	0.045/0.054	0.060/0.072
168/124	6.07	8.1	9.1	0.085/—	0.100/—

## 4 结语

介绍了一种利用探地雷达检测混凝土内含水量梯度的检测方法。使用一种常见的混凝土作为试验样品进行了渗吸试验,用于探地雷达和 $\gamma$ 射线的检测,其中 $\gamma$ 射线的检测结果作为试验参考数据。在混凝土板可形成电磁波导的前提下,提出一种新的经验模型 $\arctan(x)$ 模型来描述混凝土内部的梯度曲线。结合多层波导模型的反演,得到这种模型的检测结果和参考数据基本一致的结论。试验表明, $\arctan(x)$ 模型结合波导模型,可有效用于此类试验中含水量梯度的反演,其准确度主要取决于相速度的计算结果。

## 参考文献:

- [1] 李大心. 探地雷达方法与应用[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [2] 苗壮, 朱良. 探地雷达在混凝土面板结构厚度检测中的应用[J]. 人民珠江, 2014, 35(6): 105-107.
- [3] 周黎明, 王法刚. 地质雷达法检测隧道衬砌混凝土质量[J]. 岩土工程界, 2003, 6(3): 74-76.
- [4] 卞可, 俞顺. 探地雷达在混凝土质量检测中的应用[J]. 河南科技, 2014(9): 14-15.

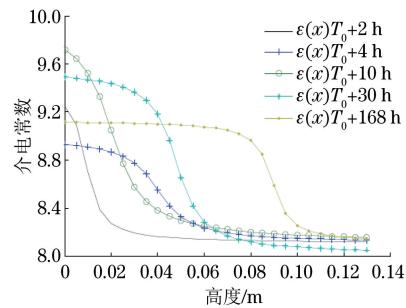


图4 不同渗吸时间混凝土板介电常数梯度的反演结果

了对比。可以看出最终得到的最小成本函数都保持在较小的数量级( $10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。除了 $T_0+10\text{h}$ 时,反演得到的 $h_2$ 的变化和 $\gamma$ 射线的结果基本保持一致。

表2 参数 $[\epsilon'_1, \epsilon'_2, h_2]$ 的梯度模型反演结果及 $\gamma$ 射线的检测结果

- [5] 韦文兵, 叶盛. 探地雷达检测中混凝土相对介电常数取法的探讨[J]. 四川建材, 2007, 33(5): 187-189.
- [6] KLYSZ G, BALAYSSAC J P, FERRIERES X. Evaluation of dielectric properties of concrete by a numerical FDTD model of a GPR coupled antenna - Parametric study[J]. NDT & E International, 2008, 41(8): 621-631.
- [7] LAI W L, KIND T, WIGGENHAUSER H. Frequency-dependent dispersion of high-frequency ground penetrating radar wave in concrete[J]. NDT & E International, 2011, 44(3): 267-273.
- [8] LAURENS S. Non-destructive evaluation of concrete moisture by GPR: experimental study and direct modeling[J]. Materials and Structures, 2005, 38(9): 827-832.
- [9] DEROBERT X, VILLAIN G, CORTAS R., et al. EM characterization of hydraulic concretes in the GPR frequency-band using a quadratic experimental design[C]//NDTCE 2009. Nantes:[s.n.], 2009: 177-182.
- [10] KALOGEROPOULOS A. Non-destructive determination of chloride and Water content in concrete using ground penetrating radar[D]. Lausanne: Federal Institute of Technology in Lausanne, 2012.

(下转第23页)

常,但总是规律性地出现数据丢失的问题。根据分析,认为这种现象应该是超声探头周向旋转速度和控制棒轴向线性速度间的不匹配造成的。该信号采集时超声探头周向旋转速度为  $450 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 轴向分辨率为  $2 \text{ mm}$ , 根据式(1), 可以得出轴向最大运动速度应为  $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而检测控制棒轴向运动速度约为  $31 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 大于理论值, 因此出现了信号丢失现象。

由式(1)可以得出不出现信号丢失的条件为, 周向旋转一周所用的时间小于等于轴向运动一个螺距的时间, 即:

$$60/n \leq l/v \quad (2)$$

从式(2)中可以看出, 在轴向分辨率不变的情况下, 提高探头旋转速度或者降低控制棒轴向运动速度, 都能解决如图 5 所示的信号丢失问题。对于设备的最高转速  $700 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 由式(2)可得知, 控制棒轴向最大运动速度为  $23.3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 大于该值将出现信号丢失现象。

### 2.3 异常信号三

现场检测中也时常出现图 6 所示的异常信号, 其特点是在周向某一角度上出现连续或者断续的信号丢失, 几乎贯穿整个轴向长度, 而且是个别通道才出现这种现象。所有标准伤信号及其周向、轴向位置均正常。经分析认为这是齿轮配合不畅引起的, 12 个超声探头的周向同步旋转要依靠齿轮结构齿面之间的相互配合来完成, 齿轮齿数相同, 因此相邻齿轮的啮合面总是一一对应; 而更换探头后, 如果不

能保证原齿面的对应关系, 则新的配合会由于磨损不同, 需要一定的“磨合期”, “磨合期”内新齿面之间配合不畅, 就会导致齿轮出现轻微震动、卡涩, 当这种配合正好出现在某一角度时, 则出现图 6 所示的异常信号。当更正齿轮位置到原位置后, 异常信号消失。

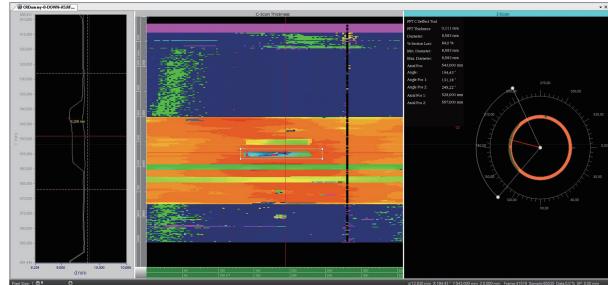


图 6 异常信号 3

## 3 结语

介绍了 RCCA 信号采集设备的工作原理, 分析了三种现场检测过程中出现的异常信号, 并找出了其产生的原因, 可为设备的调试和故障排除提供一定的借鉴。

## 参考文献:

- [1] 广东核电培训中心.900 MW 压水堆核电站系统与设备[M].北京:原子能出版社,2005.
- [2] 蔡家藩,陈增武,乔维,等.核电站反应堆控制棒束组件自动检查[J].无损检测,2013,35(5):71-77.
- [3] 张丽琴,钟志民,李劲松,等.燃料组件控制棒包壳在役超声涡流自动检测[J].无损检测,2005,27(1):38-40.
  
- (上接第 20 页)
- [11] KLYSZ G, BALAYSSAC J P. Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating radar[J]. Cement & Concrete Research, 2007, 37(8):1164-1171.
- [12] VILLAIN G, IHAMOUTEN A, DEROBERT X. Determination of concrete water content by coupling electromagnetic methods: Coaxial/cylindrical transition line with capacitive probes[J]. Ndt & E International, 2017, 88:59-70.
- [13] ARNONE S A. Field observations of electromagnetic pulse propagation in dielectric slabs[J]. Geophysics, 1984, 49(10):1763-1773.
- [14] KRUJ J V D, ARNONE S A, LIU L. Fundamental and higher mode inversion of dispersed GPR waves propagating in an ice layer[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 45(8):2483-2491.
- [15] MARTINEZ A, BYRNES A P. Modeling dielectric-constant values of geologic materials: An aid to ground-penetrating radar data collection and interpretation [J]. Current Research in Earth Sciences, 2001, 247(1):1-16.
- [16] VILLAIN G, THIERY M. Gammadensimetry: A method to determine drying and carbonation profiles in concrete[J]. Ndt & E International, 2006, 39(4):328-337.
- [17] XIAO X, IHAMOUTEN A, VILLAIN G, et al. Use of electromagnetic two-layer wave-guided propagation in the GPR frequency range to characterize water transfer in concrete [J]. Ndt & E International, 2017, 86: 164-174.