



非均质机场水泥道面板底脱空 雷达波响应

张一鸣¹ 鲍帆² 童峥¹ 马涛¹ 张伟光^{1,2} 范剑伟¹ 黄晓明¹

(¹ 东南大学交通学院, 南京 211189)

(² 中国电子科技集团公司第二十八研究所, 南京 210007)

摘要: 为研究机场刚性道面配筋与非均质材料对板底脱空探地雷达波响应的影响规律, 采用 PFC3D 离散元模拟和 gprMax 电磁仿真构建道面多相非均质电磁差分模型, 进而建立板底脱空长度与脱空顶部反射波幅值的函数关系. 研究表明: 雷达波信号在非均质中的波场快照和剖面图呈现随机扰动特征, 含水脱空回波信号受非均质材料衰减作用影响显著; 脱空与钢筋层间形成能量团, 增强了脱空回波信号, 空气脱空回波信号受能量团增强作用显著. 脱空长度小于第一临界点时, 回波信号振幅强度与脱空长度呈二次函数相关; 脱空长度大于第一临界点时, 随脱空长度的增长, 振幅先下降, 后在第二临界点保持不变. 该研究为探地雷达定量估算水泥道面板底脱空的长度发展提供了理论依据.

关键词: 道面工程; 板底脱空; 多相非均质; 雷达波响应

中图分类号: V351.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2023)01-0137-12

Radar wave response of slab bottom voids in heterogeneous airport concrete pavement

Zhang Yiming¹ Bao Fan² Tong Zheng¹ Ma Tao¹

Zhang Weiguang^{1,2} Fan Jianwei¹ Huang Xiaoming¹

(¹ School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

(² The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China)

Abstract: To study the influence principles of rebars and heterogeneous materials on the ground-penetrating radar wave responses of slab bottom voids, the simulations of PFC3D discrete element and gprMax electromagnetic were adopted to build multiphase heterogeneous electromagnetic difference models. The models were used to build a relationship between the lengths of the slab bottom voids and the amplitudes of radar echo signals in the top of the voids. The results of numerical experiments demonstrate that wavefield snapshots and profiles of radar wave signals in heterogeneous medium show random disturbance characteristics. The echo signals of a water-containing void are significantly affected by the attenuation of heterogeneous materials. There is an energy cluster between the bottom void and the rebar layer, which enhances the amplitudes of the void echo signals. The echo signals of the air-filled voids are significantly enhanced by the energy cluster. When the void length is smaller than the first critical point, the amplitude of a void echo signal is quadratically related to the void length, while when the void length is larger than the first critical point, the amplitude first decreases with the increase in the void length and then remains unchanged at the second critical point. This study provides a theoretical basis for the quantitative measurement of the voids at the bottom of concrete pavement slab by ground-penetrating radar.

Key words: pavement engineering; slab bottom voids; multiphase heterogeneous; radar wave response

收稿日期: 2022-08-22. **作者简介:** 张一鸣(1998—), 男, 博士生; 张伟光(联系人), 男, 博士, 副教授, wgzhang@seu.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1600102)、国家自然科学基金面上资助项目(52278443)、空中交通管理系统与技术国家重点实验室开放课题资助项目(SKLATM202005).

引用本文: 张一鸣, 鲍帆, 童峥, 等. 非均质机场水泥道面板底脱空雷达波响应[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(1): 137-148.

DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2023.01.017.

板底脱空是机场水泥混凝土道面结构的常见隐性病害^[1],通常表现为外界环境与荷载作用下水泥面板与基层的局部脱离^[2],大多产生于水泥面板底部,无法通过表面观测确定其存在位置及尺寸大小,其产生和发展受到荷载-道面板-水-基层等多个因素的耦合影响.如果采取措施不及时,脱空将在飞机荷载与其他因素作用下快速发展,引起裂缝、破碎、错台等病害,并最终发展为道面板整块断裂,造成机场安全运营隐患^[3].

探地雷达是目前检测机场道面板底脱空的有效方法,具有无损、高效、连续等优点^[4].探地雷达基于电磁传播理论,由激发天线发射高频窄带电磁波.电磁波在道面结构内部传播时遇到不同介质交界面会产生反射,反射波由接收天线接收后,可根据回波波形、振幅等动力学信息和双程走时等运动学特征推断隐性病害的空间位置、几何形态和电磁特性.受道面材料非均匀特性和钢筋强反射的影响,机场道面板底脱空的回波特征尚不明确,脱空形态变化与回波特征的关系无法定量评价.因此,需要对不同脱空形态下的雷达波响应特征开展数值模拟研究.

现有研究多将道面结构材料等效为层状均匀介质,忽略了材料的非均匀特性影响^[5-8].真实道面材料是由集料颗粒、水泥砂浆和内部孔隙组成的多相非均匀混合物,具有体积含量不等、几何形状各异、空间位置随机、介电特性不同的典型非均质特性.非均质材料粒径与雷达波波长在数量级上相近,造成的回波扰动与厘米级尺寸病害引起的雷达波响应在尺度上相似,致使厘米级隐性病害存在广泛的误判和漏判.

道面结构类型方面,数值模拟多集中于对公路路面、隧道衬砌与无砟轨道结构内部病害的特征分析,缺少对机场道面结构病害雷达波特征的针对性研究^[9-14].与水泥路面和隧道衬砌相比,机场道面的水泥面板较厚,且配筋形式有所差异.钢筋作为良导体对雷达波的传播与反射存在显著影响,进而影响了板底脱空病害的检测.

病害形态测量方面,现有研究定性分析了不同形状和填充介质的脱空对雷达剖面图中灰度和同相轴等图像信息的影响程度^[15-18].对机场道面板底脱空发展的定量评价不足,影响了机场道面预防性养护措施的制定.

本文针对上述技术瓶颈,研究民用机场刚性道面中配筋和非均质材料特性对探地雷达场波响应及脱空病害的量化影响.联合 PFC3D 离散元模拟

和 gprMax 电磁仿真方法构建机场道面多相非均质电磁差分模型,对比分析雷达波在非均匀介质和均匀介质中的响应特征差异,揭示脱空中不同填充介质对钢筋反射信号和非均质散射信号的敏感程度和作用规律,建立板底脱空长度与脱空顶部反射波幅值的函数关系.该研究可为机场水泥道面脱空形态的实际检测提供理论与方法支撑.

1 多相非均质电磁差分模型

1.1 PFC3D 离散元三维建模

本文以西安咸阳机场南飞行区跑道为基础进行模型构建,该跑道面板材料为水泥混凝土,基层材料为水泥稳定碎石,均由集料、水泥砂浆和孔隙等按照一定体积分数组成的多相非均匀介质.为表征各相介质在机场道面结构层中的非均匀特性,采用 PFC3D 离散元软件三维重建各道面结构层的非均质模型.

基于各相介质在混凝土介电模型中的体积占比,构建单一表征的小体积多介质复合相.粒径大于 0.6 mm 的集料占刚性道面板和基层体积的大部分,而粒径小于 0.6 mm 的集料、水泥砂浆和孔隙的体积比例较小.将粒径大于 0.6 mm 的集料颗粒按级配中值分级投放,互相叠加填充后形成尺寸形态各异的集料.由于集料相介质单一,不同位置处的介电常数差异较小,参照水泥混凝土常用介电常数进行设定.考虑到计算效率,离散元建模过程中无法准确构建粒径小于 0.6 mm 的集料以及水泥砂浆和孔隙的单一相,因此将粒径小于 0.6 mm 的集料、水泥砂浆和孔隙组合成复合相,即非均质水泥面板和基层模型由集料相(粒径 $\phi \geq 0.6$ mm)和集料($\phi \leq 0.6$ mm)-水泥砂浆-孔隙复合相 2 部分组成.考虑水泥混凝土材料的频散特性,用于表征水泥混凝土中集料($\phi \leq 0.6$ mm)-水泥砂浆-孔隙复合相材料的介电模型^[19]可表示为

$$\varepsilon_m = \sum_{i=1}^3 v_i \varepsilon_i - \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 v_i (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}) \ln \varepsilon_i \quad (1)$$

式中, ε_m 为集料($\phi \leq 0.6$ mm)-水泥砂浆-孔隙复合相的等效介电常数; $\bar{\varepsilon}$ 为平均介电常数; ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为集料($\phi \leq 0.6$ mm)、水泥砂浆和孔隙的介电常数; v_1 、 v_2 和 v_3 分别为集料($\phi \leq 0.6$ mm)、水泥砂浆和孔隙的体积分数.

基于多角度激光扫描技术获取真实集料的点云坐标数据,采用不同尺寸的圆球拟合集料曲面形体,实现集料相轮廓的三维重构^[20].选择 6 种不同尺寸和几何形态的真实集料创建三维集料颗粒模

型,如图 1(a)所示. 获取真实集料表面点云坐标信息后,用多个大小不一的圆球对集料颗粒进行拟合,将各圆球与扫描获取的点云坐标进行信息拼接,使用四面体元素填充轮廓模拟不同尺度的曲面形体,如图 1(b)所示.

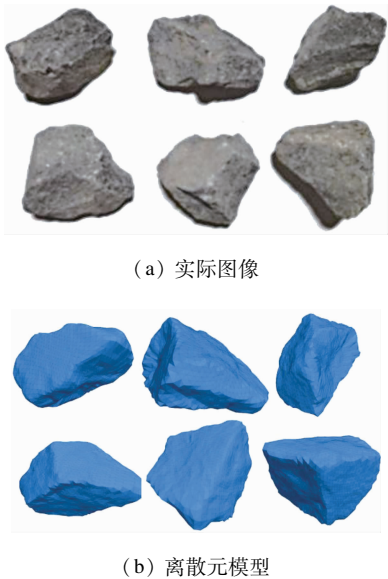


图 1 六种集料和对应的三维颗粒模型

依据《民用机场水泥混凝土面层施工技术规范》(MH 5006—2015)和《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)计算得水泥面板集料相各档粒径的质量占比,依据《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)和《公路路面基层施工技术规范》(JTJ 034—2000)计算得水稳基层中集料相各档粒径的质量占比,如表 1 所示. 生成的集料三维模型作为 clump 模板导入离散元软件 PFC3D 中,在生成水泥面板和水稳基层三维模型时,按照粒径从大到小的顺序根据级配中值曲线分级投放,较小粒径的集料填充于较大粒径集料之间形成的空隙中,从而形成逐级填充结构,实现机场刚性道面结构层的三维重构.

表 1 水泥面板与水稳基层集料相各档粒径的质量分数

粒径/mm	质量分数/%	
	水泥面板	水稳基层
0.6~1.18	11.01	11.85
1.18~2.36	11.79	14.07
2.36~4.75	7.67	16.30
4.75~9.5	10.86	20.00
9.5~16	10.67	
16~19	12.45	11.11
19~26.5	16.00	8.89
26.5~31.5	17.78	
31.5~37.5	1.78	17.78

在重构后的机场刚性道面结构层模型上沿宽度方向进行纵向切割,获取离散元重构后的道面材料剖面图,如图 2 所示. PFC 软件自动生成的剖面图中,蓝色表示 $\phi\geq 0.6\text{ mm}$ 的集料相,白色表示 $\phi\leq 0.6\text{ mm}$ 集料-水泥砂浆-孔隙的复合相. 但是采用蓝、白色表征材料会造成各相介质边缘存在颜色过渡区,因此为了准确提取集料相与复合相的轮廓信息,将剖面图进行二值化处理. 二值化处理之后,图像中仅存在黑白两种颜色,其中黑色表示集料相,白色表示复合相. gprMax 内置命令可以通过图像中几何图形的黑白两色的差异,按照点击不同颜色区域顺序对各相介电特性进行赋值,再依据各结构层厚度定义剖面图在模型中的位置信息,将介电特性赋值后的道面材料剖面图引入电磁差分模型中.

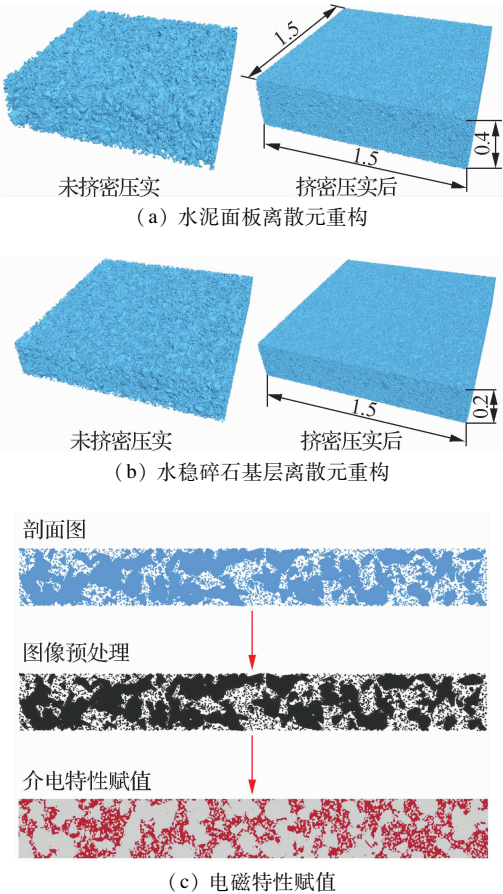


图 2 离散元重构道面材料及电磁特性赋值(单位:m)

考虑道面板底脱空的发展位置与雷达波的传播深度,本文构建的机场刚性道面电磁差分模型仅包含水泥面板和厚水泥稳定碎石上基层,厚度分别设为 0.4 和 0.2 m,水平尺寸设为 1.5 m. PFC3D 软件中构建的水泥面板和水稳基层模型如图 2 所示. 与层状匀质模型和基于统计学中自相关函数理论的多相离散随机介质模型^[21]相比,本文构建的

多相非均质模型还原了各相材料在结构层中的真实形态,更接近实际道面结构。

1.2 电磁差分模型构建

基于时域有限差分法(FDTD)构建电磁差分模型,需要确定模型尺寸、网格大小、扫描时长、结构层厚度与电磁参数、内部病害位置与属性、天线位置与移动步长。

1.2.1 模型尺寸

本文依据西安咸阳机场典型刚性道面的结构形式,考虑道面板底脱空的发展位置与雷达波的传播深度,设置模型尺寸为 1.5 m×0.62(0.02+0.4+0.2) m,自上而下由 0.02 m 空气层、0.4 m 水泥面板、0.2 m 水稳碎石基层组成。设置空气层是为了防止天线位于模型边界中,导致边界条件不满足。

1.2.2 天线频率

选用 Ricker 小波 $W(t)$ 模拟电磁波,可用下式描述:

$$W(t) = [1 - 2(\pi f_0 t)^2] e^{-(\pi f_0 t)^2} \tag{2}$$

式中, f_0 为 Ricker 小波中心频率; t 为电磁波传播时间。依据天线频率、有效深度和检测精度三者间的制约关系^[22],道面板底脱空与接收天线垂直距离 0.4 m,天线频率为 1.0 GHz。

1.2.3 网格设置

模型网格应小于电磁波传播的最小波长,最小波长与最高频率相关,按下式计算:

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon_i}} \tag{3}$$

式中, λ 为 Ricker 小波最小波长; c 为光速; f 为电磁波最高频率; ε_i 为结构层等效介电常数。Ricker 小波的最高频率为中心频率的 2~3 倍,设为 3.0 GHz。

同时,考虑非均质材料离散元重构模型的剖面图像素比与电磁差分模型的实际尺寸,网格大小由模型尺寸与剖面图像素共同确定,即

$$\left. \begin{aligned} g_l(x,y) &= \frac{l(x,y)}{p_l(x,y)} \\ g_h(x,y) &= \frac{h(x,y)}{p_h(x,y)} \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式中, $g_l(x,y)$ 和 $g_h(x,y)$ 分别为依据模型与材料剖面图像计算的网格大小; $l(x,y)$ 和 $h(x,y)$ 分别为模型的长度和深度; $p_l(x,y)$ 和 $p_h(x,y)$ 分别为非均质材料剖面图像在长度和深度方向上的像素; x,y 分别为模型的长度和深度方向。

当依据模型与材料剖面图像长度与深度计算

<http://journal.seu.edu.cn>

的 2 个网格大小不等时,宜选择依据长度计算的网格,深度方向可通过层位顺序的添加进行覆盖。

1.2.4 时窗大小

采样时窗 W 由电磁波在道面内部的传播时间确定,即

$$W = \alpha \frac{2h}{v} = \alpha \frac{2h\sqrt{\varepsilon_i}}{c} \tag{5}$$

式中, h 为检测深度; v 为介质中电磁波的波速; α 为经验放大系数,一般取 1.3。

1.2.5 介电常数

脱空设置在面板与基层之间,可通过调整介电常数大小模拟不同填充介质。当脱空内部完全干燥时,填充介质为空气,相对介电常数为 1;当脱空内部完全饱水时,填充介质为水,相对介电常数为 81。多相非均匀介质中集料相($\phi \geq 0.6$ mm)为玄武岩,介电常数设为 8,集料($\phi \leq 0.6$ mm)-水泥砂浆-孔隙复合相的介电常数采用式(1)计算,计算结果为 10.32;当水稳基层含水时,材料介电常数大于干燥时的介电常数,水稳基层集料相($\phi \geq 0.6$ mm)的介电常数设为 10,集料($\phi \leq 0.6$ mm)-水泥砂浆-孔隙复合相的介电常数采用式(1)进行计算,计算结果为 18.42。匀质模型中面板的介电常数设为 8.35,基层的介电常数设为 10.55。

表 2 集料相和复合相的体积分数与介电常数

结构层	体积分数/%		等效介电常数	
	集料相	复合相	集料相	复合相
水泥面板	72.23	27.77	8	10.32
水稳基层	76.98	23.02	10	18.42

1.2.6 面板配筋

机场跑道受飞机重荷载的反复作用,刚性道面水泥面板中设有钢筋层进行局部补强和裂缝预防。钢筋作为良导体,相对介电常数可视为无穷大。依据《民用机场水泥混凝土道面设计规范》(MH/T5004—2010),钢筋采用螺纹钢,布设在距水泥面板下 1/3~1/2 处,横向布设 8 根,设定间距为 200 mm,钢筋直径大小设为 16 mm,如表 3 所示。

表 3 钢筋的最小直径和最大间距 mm

钢筋类型	最小直径	纵向最大间距	横向最大间距
光圆钢筋	8	150	300
螺纹钢	12	300	500

1.2.7 模型准确性验证

通过双程走时法计算不同介质对应回波的传播时间。对比双程走时计算结果与波形图中目标波形对应时间,可以评估数值模拟的准确性。双程走时法计算结果可表示为

$$t = \frac{2h_0}{v} = \frac{2ch_0}{\sqrt{\varepsilon_i}}$$

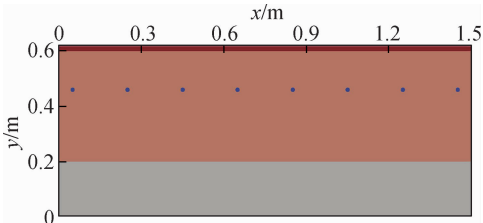
(6)

式中, h_0 为目标介质与接发天线的垂直距离.

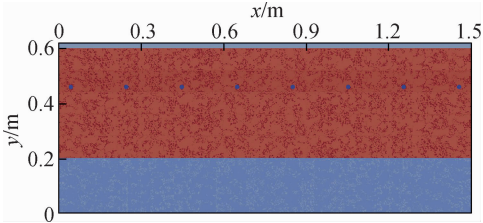
根据时域有限差分法解的稳定性条件、数值色散条件以及探地雷达在实测工作中的相关经验,正演模拟参数设置如表 4 所示. 联合 PFC3D 离散元模拟和 gprMax 电磁仿真建立的机场道面多相非均质电磁差分模型如图 3 所示.

表 4 正演模拟参数设置

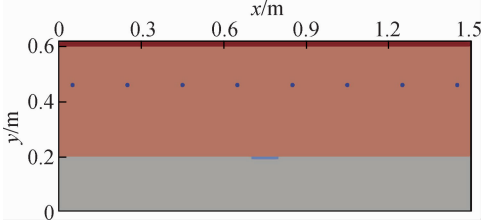
参数类型	数值
正演模型大小/(m × m × mm)	1.5 × 0.62 × 0.44
网格步长/(mm × mm × mm)	0.44 × 0.44 × 0.44
时窗/ns	16
第一通道发射天线坐标/m	(0.02, 0.6)
第一通道接收天线坐标/m	(0.04, 0.6)
天线步距/m	0.01
测线道数	144
激励源类型	Ricker
激励源频率/GHz	1.0



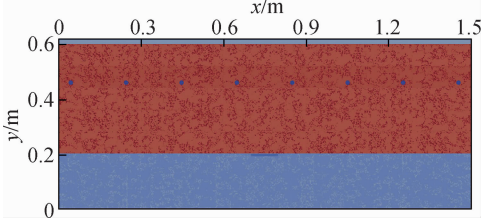
(a) 无板底脱空匀质模型



(b) 无板底脱空非均质模型



(c) 板底脱空匀质模型



(d) 板底脱空非均质模型

图 3 机场道面电磁差分模型

2 多相非均匀介质对雷达波场影响

为表征内部介质非均匀特性造成的随机扰动,将 16 ns 的扫描时窗每隔 0.1 ns 记录雷达波在道面内部不同时刻传播的波场快照,如图 4 所示. 由图 4(c)、(d)、(g)、(h)可知,4.4 和 9.1 ns 时钢筋回波和脱空回波即将到达接收天线. 模型中钢筋层与接发天线的垂直距离为 0.14 m,板底脱空顶部与接发天线的垂直距离为 0.4 m. 由式 (6) 计算得,钢筋层回波信号应在 4.5 ns 时第 1 次被天线接收,脱空回波信号应在 9.4 ns 时第 1 次被天线接收. 与波场快照中钢筋层与板底脱空的回波时间一致,验证了数值模拟雷达波在机场刚性道面非均质模型中传播规律的准确性和可靠性.

由图 4(a)、(b)、(c)、(d)可知,当 2 个钢筋的回波在接收天线前交叠时,波场颜色呈明显的深红色,表明其反射波能量较强,回波特征为双曲线波形. 由图 4(e)、(f)、(g)、(h)可知,板底脱空的回波特征表现为 2 组不同颜色的近似水平同相轴波形,这是因为板底脱空存在一定厚度,电磁波在脱空顶面和底面均发生反射,且顶面回波能量要强于底面回波能量. 由于空气的介电常数较小,在回波过程中受非均质和钢筋的共同作用,脱空回波在到达接收天线前其波场颜色与背景相似,表明脱空反射波能量较小. 这说明钢筋信号与板底脱空信号在雷达波场中不同时刻下产生的回波特征存在差异. 钢筋回波信号的传播时间较短,能量较强,信号振幅较大;板底脱空回波信号的传播时间较长,能量较弱,信号振幅较小. 通过波场特征差异可在时域图中基于回波波形的双程走时与振幅大小来区分钢筋和板底脱空信号.

对比分析图 4 中匀质模型和非均质模型不同时刻的波场快照可知,在多相非均匀介质中,雷达波出现了小尺度随机散射,导致雷达波波面不光滑、波形模糊不清,波场快照图谱具有明显的随机扰动和图像噪声. 在均匀介质中,雷达波未发生散射,波面光滑、波形并未发生畸变. 因此,非均质模型模拟的波场特征更符合雷达波在结构内部传播时不断衰减的实际情况. 然而,从波场和时域信息上仅能反应板底是否存在脱空,无法反应脱空的形态特征以及非均质对板底脱空信号的影响程度. 因此,需要对非均匀介质中板底脱空目标信号的波形和剖面图特征开展进一步研究.

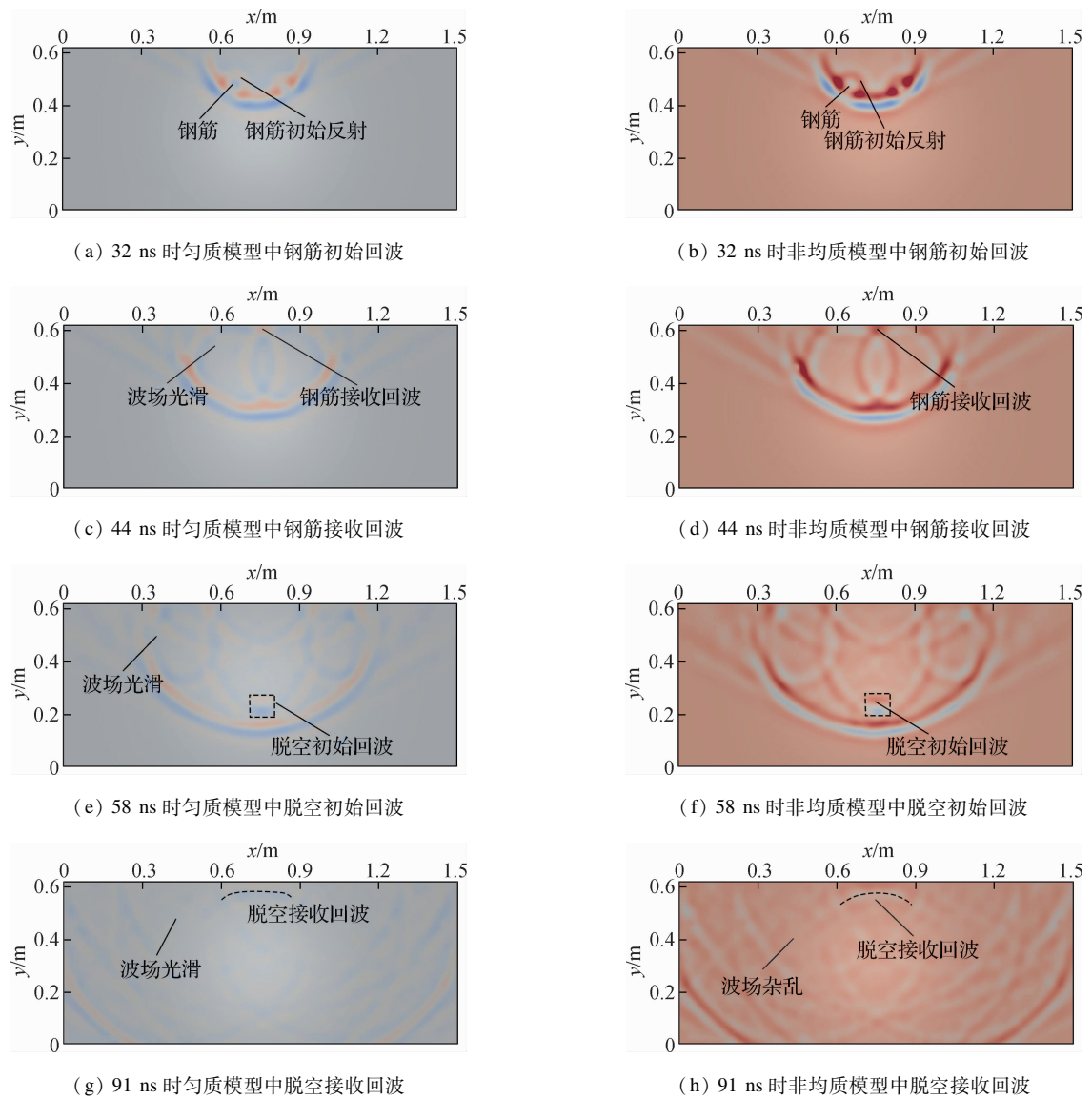


图 4 雷达波在匀质和非均质模型中的波场快照

3 脱空长度对雷达波幅值的影响分析

为研究板底脱空长度对雷达波动力学响应特征的影响规律,在模型 3 ~ 50 cm 区间设置了 1 cm 间隔的板底脱空长度,合计 192 个工况. 机场道面板底脱空厚度一般小于 4 cm^[23],故将脱空厚度统一设置为 1 cm. 机场道面板底脱空长度一般小于 35 cm,故在脱空长度为 5、15、25、35 cm 时,提取空气和含水脱空在非均质与匀质模型中的波形特征与振幅响应,对比分析脱空回波信号受非均质和配筋的影响程度,以及脱空信号振幅随长度增加的变化趋势.

3.1 5 cm 板底脱空

如图 5(a)所示,当空气脱空长度为 5 cm 时,对比非均质与匀质空气脱空在 8.75 ~ 9.75 ns 范围内的电场强度可知,非均质模型中脱空回波信号

<http://journal.seu.edu.cn>

的幅值均小于匀质模型中的脱空信号幅值. 这表明道面材料的非均匀特性造成了空气脱空信号衰减,这是由于高频窄带电磁波在集料粗糙表面与小尺度介质中发生随机无序散射. 这种散射现象可使得穿过非均质材料到达脱空处的雷达波信号能量产生损耗,又会与脱空回波信号相互叠加,造成脱空回波信号幅值降低.

对比匀质配筋与无配筋空气脱空曲线在 8.75 ~ 9.75 ns 范围内波峰与波谷的位置可知,当面板配筋时,空气脱空回波信号出现了时延. 这是因为道面结构配筋常采用螺纹钢,钢筋外表面起伏不平、边缘粗糙尖锐,且钢筋作为一种金属材料,介电常数可视为无穷大,当电磁波到达钢筋时会发生边缘绕射并产生绕射波. 单层钢筋的间距较小,绕射波在钢筋之间相互绕射叠加,导致雷达波穿过钢筋层时发生第 1 次时延,雷达波到达脱空处反射回钢

筋层时发生第 2 次时延,最终导致了脱空回波信号的时延现象.

对比匀质配筋与无配筋空气脱空曲线在 8.75 ~9.75 ns 范围内的电场强度可知,当面板设有单层钢筋时,空气脱空回波信号的波峰较无配筋时空气脱空回波信号的波峰略小,但波谷却远低于无配筋时空气脱空回波信号的波谷. 这表明面板配筋增强了空气脱空信号的回波幅值. 这是由于绕射波在钢筋边缘绕射后到达道面板底脱空处再反射回钢筋层,反射波在到达钢筋时一部分绕射后被天线接收,一部分绕射后再次向下传播至脱空处,形成钢筋层与脱空之间的多次反射. 这种多次反射波与脱空回波相互叠加,在钢筋层与脱空之间形成能量团,致使脱空信号的振幅得到增强.

脱空时(介电常数为 81),介电常数由小变大,因此 2 种填充介质时脱空回波信号的相位相反. 对比分析非均质与匀质无配筋含水脱空曲线在 8.75 ~9.75 ns 范围内的电场强度可知,非均质对含水脱空的回波能量同样产生了衰减,造成含水脱空信号幅值的降低. 对比分析匀质配筋与无配筋含水脱空曲线在 8.75 ~9.75 ns 范围内的电场强度可知,钢筋信号对含水脱空信号的回波幅值同样有增强作用. 造成这种现象的原因与上述对空气脱空回波信号的解释相同. 可见,当脱空长度为 5 cm 时,空气脱空与含水脱空的回波信号均受非均质扰动影响,造成脱空信号幅值的减小;面板配筋时增强了空气脱空与含水脱空回波信号的幅值.

3.2 15 cm 板底脱空

如图 6(a)所示,当空气脱空长度为 15 cm 时,对比非均质与匀质无配筋空气脱空曲线在 8.75 ~9.75 ns 范围内的电场强度可知,2 条曲线基本重合,空气脱空在非均质与匀质背景下的幅值近似相同. 这表明当脱空长度为 15 cm 时,介质非均匀性对空气脱空回波信号造成的干扰可忽略不计. 这是由于 15 cm 的脱空长度已经远大于非均质材料中集料的最大粒径,非均质散射造成的小尺度扰动在动力学响应上远小于空气脱空回波信号的能量. 对比分析非均质与匀质配筋空气脱空曲线在 8.75 ~9.75 ns 范围内的电场强度可知,当面板配筋并且背景介质非均匀时,空气脱空回波信号的幅值仍有较大衰减. 这表明当面板配筋后非均质随机扰动得到了增强. 这是由于当面板配筋后,由于钢筋层与空气脱空间产生多次反射,当背景介质非均匀时,非均质随机扰动与多次波相互混叠,导致非均质随机扰动对空气脱空信号的衰减作用得到增强.

图 6(b)为 15 cm 含水脱空时的回波曲线,对比分析非均质与匀质无配筋含水脱空曲线在 8.75 ~9.75 ns 范围内的电场强度可知,与空气脱空相比,非均质随机扰动对含水脱空信号幅值仍造成了衰减. 这是由于水的介电常数与非均质材料的介电常数差异较大,雷达波在非均质材料处产生的散射波到达含水脱空后反射的信号能量较强,无法忽略不计. 然而对比分析非均质与匀质配筋含水脱空曲线在 8.75 ~9.75 ns 范围内的电场强度可知,当面板配筋并且背景介质非均匀时,2 条曲线近似重合. 这表明当面板配筋后,非均质随机扰动对含水脱空回波信号造成的衰减可忽略不计. 这是由于钢筋(介电常数可视为无穷大)与水的介电常数均远大于非均质材料的介电常数,非均质散射波在含水

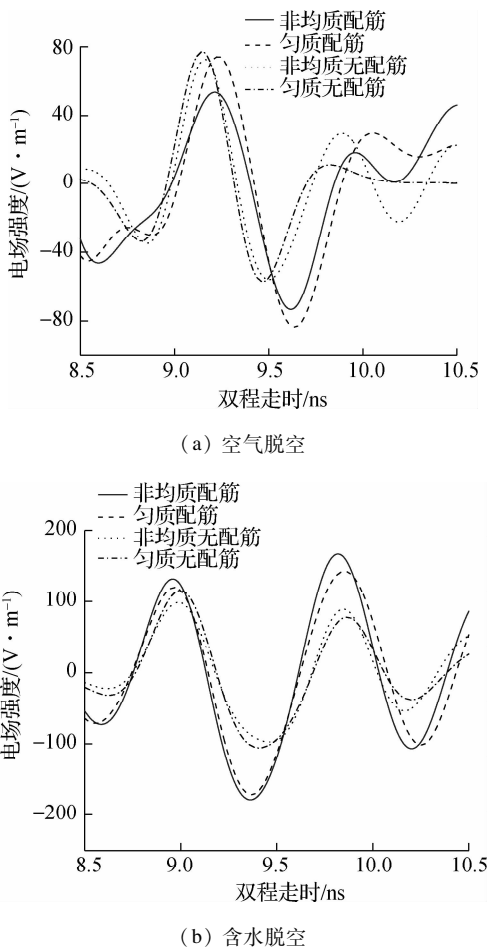


图 5 不同填充介质 5 cm 脱空时的波形图

图 5(b)为含水脱空时的回波曲线,与空气脱空相比,脱空含水时回波信号的相位与空气脱空相反,由 2 个波峰与 1 个波谷组成. 造成这种现象的原因是因为当雷达波从非均质材料中(介电常数为 7)入射至空气脱空时(介电常数为 1),介电常数由大变小;当雷达波从非均质材料中入射至含水

脱空处回波信号的能量相较于钢筋层与含水脱空间多次反射波的能量可忽略不计.

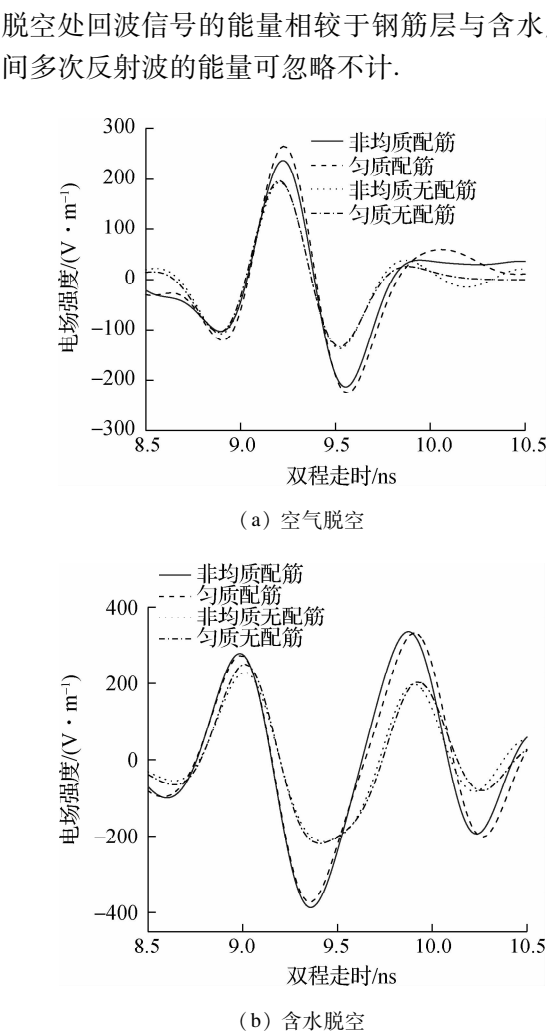


图 6 不同填充介质 15 cm 脱空时的波形图

3.3 25 cm 板底脱空

如图 7(a)所示,当空气脱空长度为 25 cm 时,综合 4 条曲线在 8.75 ~9.75 ns 范围内的电场强度可知,当面板配筋且背景介质均匀时,空气脱空信号的幅值最大. 这表明钢筋显著增强了空气脱空信号的回波能量. 这是由于当脱空长度为 25 cm 时,模型中钢筋层单个钢筋间的水平距离为 20 cm. 此时,脱空长度大于钢筋间距,部分脱空位于钢筋正下方,导致钢筋与脱空间多次反射的现象更加频繁,增加了多次波与脱空回波相互叠加形成的能量团,使得配筋后空气脱空信号的振幅产生了较大提升.

图 7(b)所示为 25 cm 含水脱空时的回波曲线,与 5 和 15 cm 含水脱空时的波形特征相同,非均质随机扰动仍对含水脱空回波信号的幅值产生衰减,但当面层配筋后,非均质随机扰动造成的含水脱空信号衰减可忽略不计. 造成这种现象的原因与上述分析一致.

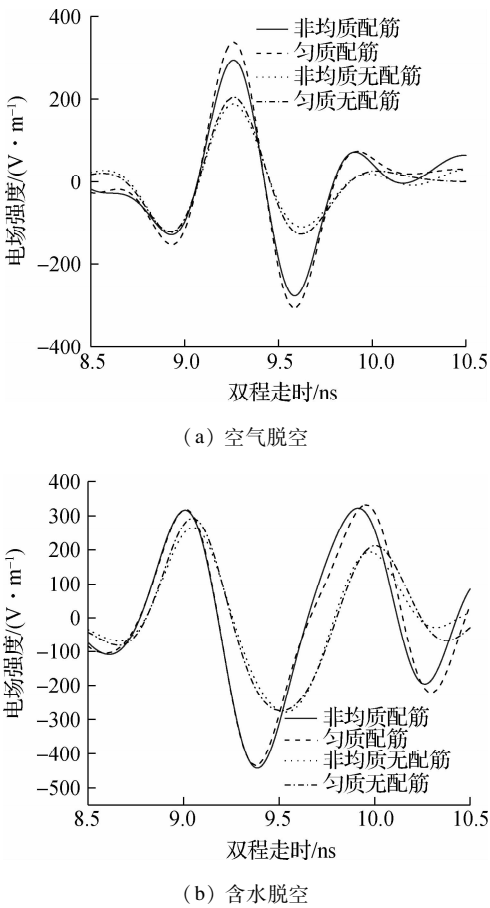


图 7 不同填充介质 25 cm 脱空时的波形图

3.4 35 cm 板底脱空

如图 8(a)、(b)所示,当脱空长度为 35 cm 时,无论脱空内部介质为空气或含水,脱空信号的幅值均小于 25 cm 脱空回波信号的幅值,但却大于 5 和 15 cm 脱空回波信号的幅值. 为了准确描述并揭示不同填充介质板底脱空在不同长度时信号振幅的变化趋势,本文提取空气脱空和含水脱空在不同长度时脱空顶部反射波的振幅,如图 9 所示. 可知,随着脱空长度的增加,脱空顶部的信号振幅先增大后减小,并最终趋于平稳. 对不同填充介质板底脱空在不同长度时的信号振幅进行最小二乘法多项式拟合,拟合结果如图 9(a)、(b)所示. 横坐标为板底脱空的长度,纵坐标为板底脱空顶部反射波的振幅,曲线的拟合函数可表示为

$$E_{\text{air}} = \begin{cases} -1.130x^2 + 55.783x - 124.728 & x \leq x'_{\text{air}} \\ E'_{\text{air}} & x > x'_{\text{air}} \end{cases} \quad (7)$$
$$E_w = \begin{cases} -1.554x^2 + 68.078x + 47.989 & x \leq x'_w \\ E'_w & x > x'_w \end{cases} \quad (8)$$

式中, E_{air} 和 E_w 分别为空气脱空和含水脱空顶部反

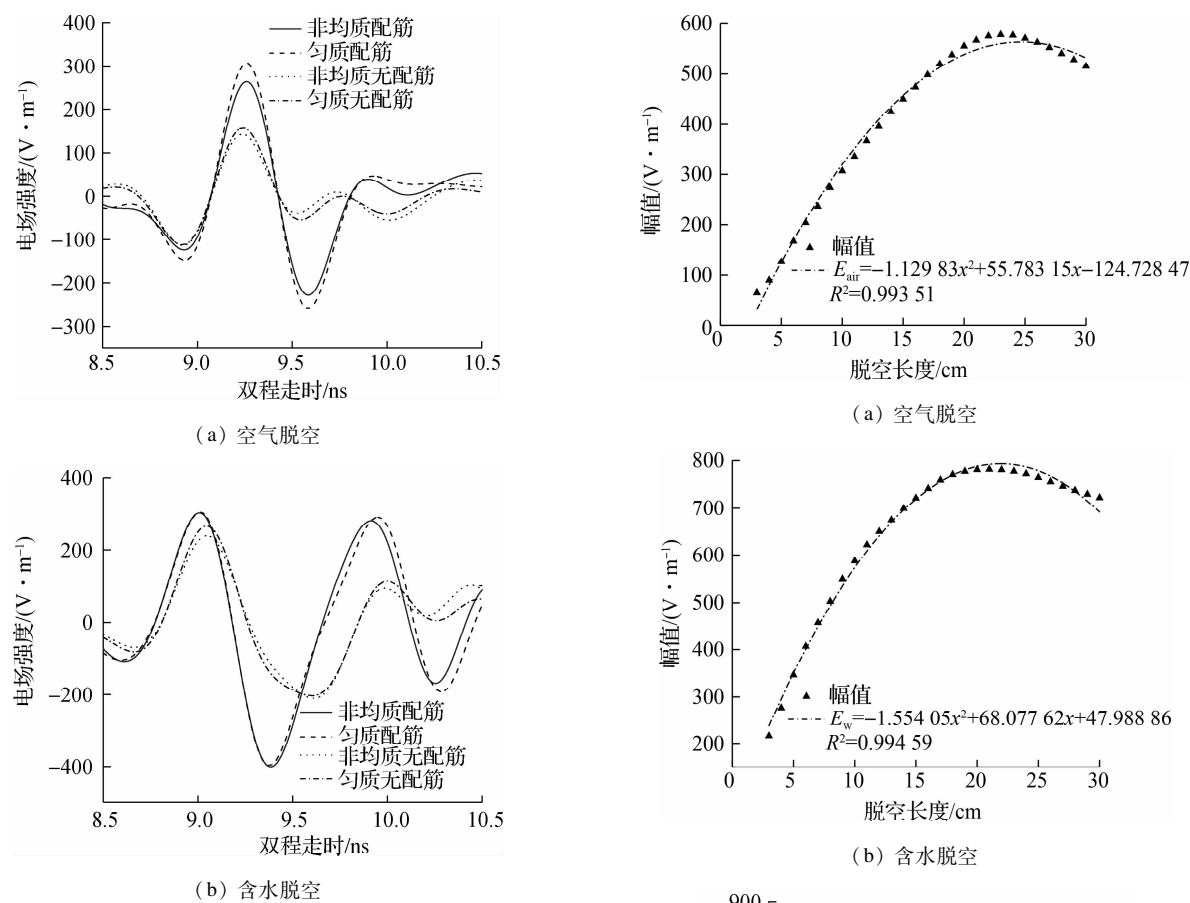


图 8 不同填充介质 35 cm 脱空时的波形图

射波的振幅; E'_{air} 和 E'_w 分别为空气脱空和含水脱空反射波振幅保持稳定时的振幅强度; x 为脱空的长度; x'_{air} 和 x'_w 分别为空气脱空和含水脱空反射波振幅保持稳定时的脱空长度. 这为探地雷达定量测量水泥道面板底脱空形态提供了理论依据.

3.5 脱空长度与反射波幅值的物理关系

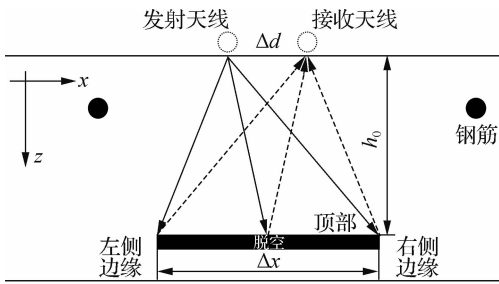
为揭示脱空顶部反射波幅值随脱空长度变化的内在机理,提出了雷达波在脱空顶部不同位置处反射波叠加的关系. 如图 10(a)所示,脱空长度为 Δx ,接发天线位于脱空中心线上,左侧或右侧边缘与脱空中心线之间的距离为 $\Delta x/2$. 天线距为 Δd ,发射或接收天线到天线中心线之间的距离为 $\Delta d/2$. 脱空顶部与接发天线之间的距离为 h_0 . 电磁波在脱空顶部中间位置处的传播路径为脱空信号的最短发射和反射路径,反射波记录为 W_{mid} . 电磁波在脱空顶部左右端点位置处的传播路径为脱空信号的最长发射和反射路径,2 条路径关于脱空中心线左右对称且距离相等,雷达波在左侧边缘时反射的最长路径记为 W_{left} . 这些波形由同一个发射天线产生,因此 W_{mid} 和 W_{left} 的中心频率 f_0 、主瓣宽度 T_1 和周期 T_2 相同. 接收天线接收到 W_{mid} 和 W_{left} 的回波时间 t_{mid} 和 t_{left} 可通过下式计算:

图 9 脱空信号幅值随长度增加的变化趋势

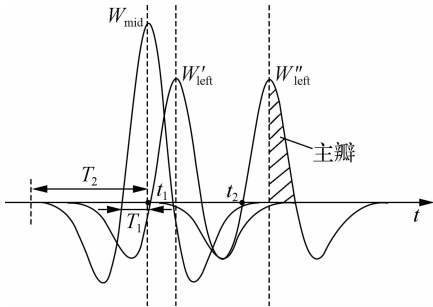
(c) 总体趋势

$$\left. \begin{aligned} t_{\text{left}} &= \frac{\left[\frac{1}{4}(\Delta x - \Delta d)^2 + h_0^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{v} + \frac{\left[\frac{1}{4}(\Delta x + \Delta d)^2 + h_0^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{v} \\ t_{\text{mid}} &= 2 \frac{\left(\frac{1}{4}\Delta d^2 + h_0^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{v} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

如图 10(b)所示,比较回波信号中 W_{mid} 和 W_{left} 在不同时刻下的相对位置, W'_{left} 为位于 $\Delta t_1 = t_{\text{left}} - t_{\text{mid}} = T_1$ 的第一临界点位置 t_1 处脱空信号最长反射路径, W''_{left} 为位于 $\Delta t_2 = t_{\text{left}} - t_{\text{mid}} = T_2$ 的第一临界点位置 t_2 处脱空信号最长反射路径.



(a) 电磁波在脱空处的传播路径



(b) 电磁波叠加机理

图 10 幅值随长度变化

由式(9)可知, $\Delta t = t_{\text{left}} - t_{\text{mid}}$ 随脱空长度 Δx 的增大而增大. 当 $0 \leq \Delta t \leq T_1$ 时, W_{left} 增强了 W_{mid} 的波峰和波谷, 随着 Δt 的逐渐增加, 这种增强作用逐渐减弱, 但总体仍是增强趋势. 当 $\Delta t = \Delta t_1 = T_1$ 时, W_{left} 对 W_{mid} 的波峰无影响, 脱空顶部反射波的幅值最大, 该点为 t_1 . 这表明随着脱空长度 Δx 的增加, 脱空顶部反射波的振幅也逐渐增大, 当达到第一临界点 t_1 时, 脱空反射波幅值最大. 回波信号中脱空反射信号的振幅是由 W_{mid} 和 W_{left} 及其之间各反射波叠加形成. 由于 W_{left} 为最长回波路径, 因此各反射波的回波波形均在 t_1 点左侧, 对脱空信号均呈增强作用.

当 $T_1 < \Delta t < T_2$, W_{left} 减弱了 W_{mid} 的波峰, 对波谷仍呈增强作用, 但随着 Δt 的逐渐增加, 对波谷的增强逐渐变小至可以忽略不计, 总体呈衰减趋势. 当 $\Delta t = \Delta t_2 = T_2$ 时, W_{left} 对 W_{mid} 的幅值无影响, 脱空顶部反射波的幅值衰减至最小, 该点为第二临界点 t_2 . 这表明随着脱空长度 Δx 的增加, 脱空顶部反射波的振幅在到达最大值后开始下降, 当达到第二临界点 t_2 时, 脱空反射波幅值衰减至最小. 在点 t_1 、 t_2 范围内, W_{mid} 和 W_{left} 之间的各反射波对脱空回波信号有些呈增强, 有些呈减弱, 相较 t_1 点的整体增强, 各反射波对脱空信号呈减弱趋势.

当 $\Delta t \geq T_2$ 时, W_{left} 对 W_{mid} 的幅值无影响, 这表明脱空顶部叠加反射波的振幅随脱空长度 Δx 的增加而保持不变.

各回波的主瓣宽度 T_1 和周期 T_2 之间的比值可由下式计算:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{2\pi f_0}}{\frac{1}{f_0}} = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \tag{10}$$

波长 λ 、中心频率 f_0 、波速 v 和电磁波周期 T 之间的关系为

$$\lambda = \frac{v}{f_0} = vT \tag{11}$$

联立式(9)~(11), 由于实际情况中天线距 Δd 较小, 对计算结果的影响较小, 故仅给出雷达天线为接发一体天线 $\Delta d = 0$ 时, 脱空长度 Δx 与脱空顶部叠加反射波幅值间的关系, 即

$$\left. \begin{aligned} \Delta x < \Delta x_1 & \quad 0 \leq \Delta t \leq T_1 \\ \Delta x_1 < \Delta x < \Delta x_1 & \quad T_1 < \Delta t < T_2 \\ \Delta x > \Delta x_1 & \quad \Delta t \geq T_2 \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_1 &= \sqrt{\left(\frac{\sqrt{2}}{2\pi}\right)^2 \left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon_i} f_0}\right)^2 + 4\left(\frac{\sqrt{2}}{2\pi}\right) \left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon_i} f_0}\right) h_0} \\ \Delta x_2 &= \sqrt{\left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon_i} f_0}\right)^2 + 4\left(\frac{c}{\sqrt{\epsilon_i} f_0}\right) h_0} \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

数值模拟中天线频率为 1.0 GHz, 等效介电常数 $\epsilon_i = 8.35$, 脱空埋深 h_0 为 0.4 m, 计算结果表明: ①当 $\Delta x \leq 20$ cm 时, 脱空顶部的振幅强度随长度增加而增大. ②当 $20 \text{ cm} < \Delta x \leq 42$ cm 时, 脱空顶部的振幅随长度增加而减小. ③当 $\Delta x \geq 42$ cm 时, 脱空顶部的振幅将不会随长度增加而变化, 趋于一个稳定值. 由图 9 可以看出, 脱空顶部振幅由增到减的点为 22 cm, 趋于稳定的点在 40 cm, 与不考虑天线距时通过公式推导的临界点值相差不大, 相较于脱空长度在数量级上该差异可忽略不计.

为了便于对比分析, 将匀质模型中脱空长度 5 cm 和非均质模型中脱空长度为 5、10、15、20、25、30 cm 时的回波特征放在同一个剖面图中, 如图 11 所示. 从图中可以看出, 5 cm 长度的脱空在匀质模型和非均质模型中的差异体现在面板配筋之上的区域, 匀质模型中该区域内无其他回波, 而非均质模型中该区域内产生了一些随机的小尺度扰动, 面板配筋以下区域由于钢筋信号的强反射作用, 这些小尺度的非均质扰动特征并不显著. 随着脱空长度增加, 雷达剖面图上横向异常差异不大, 在雷达剖面图上无法直接确定脱空横向长度上 2 个端点的位置. 然而, 脱空长度在 20 和 25 cm 处时, 脱空回波信号的灰度最为明显, 脱空长度在 5~15 cm 时,

回波信号其同相轴的灰度逐渐增加,脱空 30 cm 时,信号同相轴灰度有所衰减,这验证了当脱空长度逐渐增加时,脱空回波信号的幅值呈现先增加后减小再稳定的变化趋势。

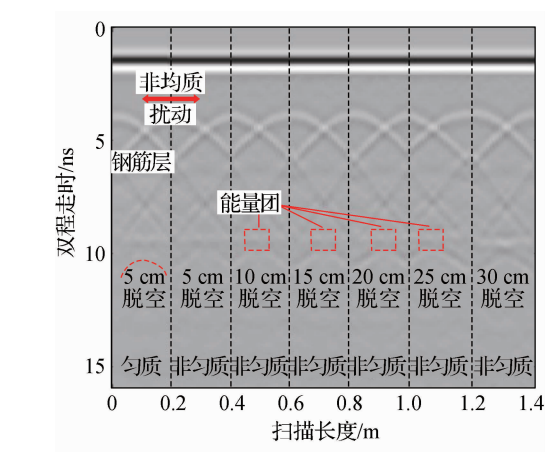


图 11 匀质与非均质模型中不同长度脱空的剖面图

4 结论

- 1)多相非均质水泥道面板底脱空模型准确地模拟了机场道面结构层实际的材料组成特点。
- 2)明确脱空形态对顶部反射电磁波幅值的影响临界点,当脱空长度小于第一临界点时,脱空顶部反射波振幅强度随脱空长度的增加呈二次相关,大于第一临界点时,振幅强度先下降,后在第二临界点趋于稳定。
- 3)雷达回波信号在非均匀介质中发生散射衰减,含水脱空回波信号受非均质材料衰减作用影响显著;脱空与钢筋层之间形成能量团,空气脱空回波信号受能量团增强作用影响显著。
- 4)在考虑道面配筋时,非均质随机扰动对空气脱空回波信号的能量衰减影响较大,对含水脱空回波信号能量衰减无显著作用。

参考文献 (References)

[1] 张宇辉,张献民. 机场道面及其下部地基脱空的测试方法[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(6): 1-11. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2016.06.001.
Zhang Y H, Zhang X M. Test methods of airport pavement and subjacent foundation void[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2016, 16(6): 1-11. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2016.06.001. (in Chinese)

[2] 国洋. 机场刚性道面板底脱空定量分析和寿命预估[D]. 西安: 长安大学, 2019.
Guo Y. *Quantitative analysis and residual life prediction*

of void beneath airport rigid pavement [D]. Xi'an: Changan University, 2019. (in Chinese)

[3] 靳美倩. 机场水泥混凝土道面典型病害分析及处治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
Jin M Q. *Research on typical diseases analysis and treatment technology of airport cement concrete pavement*[D]. Xi'an: Changan University, 2015. (in Chinese)

[4] 徐浩,刘江平,范承余,等. 隧道衬砌病害的探地雷达波场模拟与特征分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(11): 4581-4587.
Xu H, Liu J P, Fan C Y, et al. Forward modeling of tunnel lining diseases ground penetrating radar wave field and characteristics analysis[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(11): 4581-4587. (in Chinese)

[5] 戴前伟,冯德山,王启龙,等. 时域有限差分法在地质雷达二维正演模拟中的应用[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(4): 898-902. DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2004.04.033.
Dai Q W, Feng D S, Wang Q L, et al. The apply of finite difference time domain method in the ground penetrating radar (GPR) two-dimension forward simulate [J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19(4): 898-902. DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2004.04.033. (in Chinese)

[6] 李世念,王秀荣,林恬,等. 基于 GprMax 的道路空洞三维探地雷达正演数值模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 132-138. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.18.
Li S N, Wang X R, Lin T, et al. Numerical simulation of 3D ground penetrating radar based on GprMax for the road cavity[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(3): 132-138. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.03.18. (in Chinese)

[7] Zhao S, Al-Qadi I. Pavement drainage pipe condition assessment by GPR image reconstruction using FDTD modeling [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 154: 1283-1293. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.103.

[8] Luo T X H, Lai W W L, Giannopoulos A. Forward modelling on GPR responses of subsurface air voids[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 103: 103521. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103521.

[9] 李尧,李术才,徐磊,等. 隧道衬砌病害地质雷达探测正演模拟与应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3627-3634. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.12.035.
Li Y, Li S C, Xu L, et al. Forward simulation of ground penetrating radar and its application to detection of tunnel lining diseases[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(12): 3627-3634. DOI: 10.16285/j.rsm.

- 2016, 12, 035. (in Chinese)
- [10] 薛彦卿, 黄晓明. 基于 NDT 技术的脱空判别改进方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(6): 1187–1193. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.06.030.
- Xue Y Q, Huang X M. Improvement on recognition method of void beneath slab based on nondestructive testing technology[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2012, 42(6): 1187–1193. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.06.030. (in Chinese)
- [11] 张军, 陈思茹, 张子琛, 等. 基于 GPR 和 F-K 法的桥面隐性病害无损检测方法[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7): 110–116. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.07.014.
- Zhang J, Chen S R, Zhang Z C, et al. Non-destructive detection method for bridge hidden diseases based on GPR and F-K method[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(7): 110–116. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.07.014. (in Chinese)
- [12] 舒志乐, 朱思宇, 张华杰. 无砟轨道 CA 砂浆层病害探地雷达检测及三维正演模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(7): 1679–1685. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20200819.
- Shu Z L, Zhu S Y, Zhang H J. Ground penetrating radar detection and three-dimensional forward modeling of CA mortar layer disease on ballastless track[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(7): 1679–1685. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20200819. (in Chinese)
- [13] Qin H, Xie X Y, Tang Y, et al. Experimental study on GPR detection of voids inside and behind tunnel linings[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2020, 25(1): 65–74. DOI: 10.2113/jjeeg18-085.
- [14] Yang Y, Zhao W G. Curvelet transform-based identification of void diseases in ballastless track by ground-penetrating radar[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, 26(4): e2322. DOI: 10.1002/stc.2322.
- [15] 郭士礼, 朱培民, 施兴华, 等. 裂缝宽度对探地雷达波场影响的对比分析[J]. 电波科学学报, 2013, 28(1): 130–136. DOI: 10.13443/j.cjors.2013.01.009.
- Guo S L, Zhu P M, Shi X H, et al. Comparative analysis on response of ground penetrating radar wave field to crack width[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(1): 130–136. DOI: 10.13443/j.cjors.2013.01.009. (in Chinese)
- [16] 魏国杰. 混凝土路面脱空雷达检测及处治关键技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- Wei G J. *The key technology research on radar detection and treatment of void concrete pavement* [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [17] 郭士礼, 闫飞, 朱培民, 等. 裂缝宽度探地雷达波场响应的数值研究[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(4): 1803–1808. DOI: 10.6038/pg20160451.
- Guo S L, Yan F, Zhu P M, et al. Numerical study on response of ground penetrating radar wave field to crack width[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(4): 1803–1808. DOI: 10.6038/pg20160451. (in Chinese)
- [18] Fernandes F M, Pais J C. Laboratory observation of cracks in road pavements with GPR[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 154: 1130–1138. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.022.
- [19] 孟美丽. 基于频率和温度的混凝土与沥青混合料介电模型研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- Meng M L. *Study on dielectric model including the frequency and temperature of concrete and asphalt mixture* [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014. (in Chinese)
- [20] 付玉杰. 大粒径土石混合体填料的探地雷达正演模拟与信号分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- Fu Y J. *Forward modeling and signal analysis of GPR in large particle size soil-rock mixture filler* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [21] 郭士礼, 岳光华, 蔡文才, 等. 多相离散随机介质探地雷达波传输特性研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(1): 351–360. DOI: 10.6038/pg2021EE0106.
- Guo S L, Yue G H, Cai W C, et al. Study on transmission characteristics of GPR in multiphase discrete random medium[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(1): 351–360. DOI: 10.6038/pg2021EE0106. (in Chinese)
- [22] 魏文涛. 公路隧道车载探地雷达检测技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- Wei W T. *Study on vehicle-mounted GPR detection technology for highway tunnel* [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [23] 谭悦, 凌建明, 袁捷, 等. 脱空对机场水泥混凝土道面荷载应力的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 552–556, 568. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2010.04.015.
- Tan Y, Ling J M, Yuan J, et al. Influence of voids to loading stresses of airport cement concrete pavement[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(4): 552–556, 568. DOI: 10.3969/j.issn.0253-374x.2010.04.015. (in Chinese)