

基于土石混合体随机重构的路基空洞地质雷达响应特征

师文豪^{1,2,3}, 吴伊锋^{1,3}, 张永辉³, 朱晓丹³, 樊绿叶^{3,4}

(1. 苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011; 2. 安徽理工大学 深部煤炭资源智能绿色开采安徽省联合共建学科重点实验室, 安徽 淮南 232001; 3. 昆山市地下空间技术研究院有限公司, 江苏 苏州 215337; 4. 昆山市建设工程质量检测中心有限公司, 江苏 苏州 215337)

摘要: 为研究土石混填路基空洞对地质雷达波的响应特征, 考虑土石混合体的随机性和非均性, 提出以椭圆伸缩变形法构造碎石颗粒, 以随机投放和随机生长算法重构含孔隙的土石混合体细观模型, 借助 GprMax 软件开展了土石混填路基空洞的地质雷达正演模拟, 基于等效介电常数对模型的适用性进行了验证, 进一步研究了路基碎石含量、孔隙率、含水率对空洞反射信号的影响规律。结果表明: 电磁波传播至空洞时会强烈反射, 土石混填路基中电磁波散射明显, 波形模糊且波面不光滑, 碎石粒径越大, 反射波波形畸变越严重, 可辨识度越低; 碎石是引起电磁波散射的主要原因, 适当的碎石含量可以增强空洞信号振幅, 超过一定含量后, 会造成信号衰减; 孔隙率和含水率主要通过介电常数影响空洞反射信号特征。该研究可为土石混填路基空洞的地质雷达图像识别提供理论依据。

关键词: 非均匀; 土石混合体; 路基空洞; 电磁波; 正演模拟

中图分类号: U418.5

文献标识码: A

文章编号:

作者简介: 师文豪(1988—), 男, 河南洛阳人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的教学和研究工作。Email: shiwenhaoneu@126.com.

Response characteristics of ground-penetrating radar for subgrade void based on random reconstruction of soil-rock mixture

SHI Wenhao^{1,2,3}, WU Yifeng^{1,3}, ZHANG Yonghui³, ZHU Xiaodan³, FAN Lvye^{3,4}

(1.School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China; 2. Anhui Province Key

Laboratory of Intelligent and Green Mining of Deep Coal Resources, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui

232001, China; 3. Kunshan Underground Space Technology Research Institute Co., Ltd, Suzhou, Jiangsu 215337, China; 4. Kunshan

Construction Engineering Quality Inspection Center Co., Ltd, Suzhou, Jiangsu 215337, China)

Abstract: In order to study the response characteristics of geological radar waves to soil-rock mixed subgrade void, a microscopic model of soil-rock mixture with pores was built with considering the randomness and non-uniformity of soil-rock mixtures. The random placement method together with the random growth method were employed for the model, in which the gravel particle model was built by the elliptical expansion deformation method. The geological radar forward simulations of soil-rock mixed subgrade void were carried out by using GprMax software. And the applicability of the model was verified by the equivalent dielectric constant. Furthermore, the influence of subgrade roadbed gravel content, porosity, and moisture content on the reflection signal of voids were simulated. The results show that the electromagnetic waves will be strongly reflected when it propagates to the void. The electromagnetic wave scattering in the soil-rock mixed subgrade is obvious, the waveform is blurry, and the wave surface is not smooth. The larger the particle size of the gravel particle, the more severe the distortion of the reflected wave, and the lower the distinguishability. Gravel is the main cause of electromagnetic wave scattering, and an appropriate amount of gravel can enhance the amplitude of cavity signals. If it exceeds a certain amount, the signal will attenuate. The porosity and moisture content mainly affect the reflection signal characteristics of void through the dielectric constant. This study can provide a theoretical basis for the recognition of geological radar images of void in soil-rock mixed subgrade.

Keywords: heterogeneous; soil-rock mixture; subgrade void; electromagnetic wave; forward modeling

0 引言

路面塌陷是一种突发性的地质灾害, 严重威胁着道路安全和人民的生命安全, 是相关工作者关注的重

基金项目: 国家自然科学基金项目(42202306); 苏州市科技计划(基础研究)项目(SJC2023002); 深部煤炭资源智能绿色开采安徽省联合共建学科重点实验室开放课题(IGMDCR202406)
收稿日期: 2024-7-29

点问题^[1-2]。路面塌陷常常与地下病害体有关，其中由于路基空洞引发的路面塌陷事故较为普遍，采用地质雷达法对路基空洞进行无损探测是防控塌陷风险的重要手段^[3]。地质雷达法是通过激发天线向地下介质发射高频带宽电磁波束，并由接收天线接收回波信号，当遇到不同电性的介质，电磁波发生反射，根据回波信号的振幅与双程走时等参数变化反演地下隐患的空间位置和电磁特征^[4-5]。地质雷达探测效果与被测介质的介电常数密切相关^[6-7]，细观结构复杂的路基必然影响地质雷达波的传播，研究路基空洞的地质雷达特征对于提高地质雷达的探测效果具有重要意义。

土石混填路基是一种典型的非均匀混合体介质。土石混合体细观模型构建常用的有两种方法^[8]，一种是通过采集土石混合体的图像，获取具体的碎石形状、分布特征，利用数字图像处理技术建立几何模型，然后导入 FLAC、PFC^{2D/3D} 和 ABAQUS 等软件进行重构^[9-11]；另一种是基于统计学规律衍生出来一系列碎石随机生成算法，如使用 Monte Carlo 随机采样方法的随机骨料重构程序^[12]；基于随机场理论构建自相关函数表征土石混合体尺度的差异，通过在均质地质模型上添加随机扰动，构建土石混合体模型^[13]。喻江武等^[14]运用傅里叶逆变换生成任意形状的碎石并构建土石混合体模型。王宇等^[15]利用分形理论来模拟土石混合体的复杂几何形态和非均匀性。这些研究为非均匀土石混合体的模型重构提供了方法基础。

针对路基病害体的地质雷达响应特性，学者们围绕病害体的形状、大小、深度、类型以及不同填充介质进行了丰富的研究^[16-18]，通常假定路基为均匀各向同性介质，忽略了土石混填路基非均匀性的影响。实际上，地质雷达波在非均匀介质中传播时，介电属性在空间上的非均匀性会导致波的散射效应，较均质介质中的传播更为复杂。本文考虑土石混合体的随机性和非均匀性，提出采用土石混合体随机重构的方法，构建非均质土石混填路基空洞细观模型，模拟分析地质雷达波在非均匀路基中的响应特征，揭示土石混填路基参数对空洞反射信号的影响规律，为非均质土石混填路基空洞识别与解释提供理论依据和方法。

1 土石混合体随机重构方法

公路路基通常选用级配良好的碎石、砂砾和黏性土混合堆填后压实形成，是一种非均匀、不连续、构造复杂的土石混合体，其中碎石、砂砾等粗骨料构成土石混合体的骨架介质，黏性土等细颗粒为填充介质，同时包含有一定的孔隙，具有松散多孔介质结构特征，如图 1 所示。

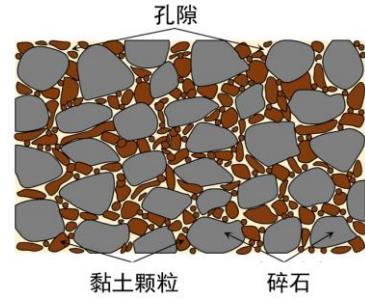


图 1 土石混合体示意图

Fig 1 Schematic diagram of soil-rock mixture

1.1 不规则单颗粒构造方法

为了模拟形态各异的碎石颗粒，采用对椭圆曲线进行伸缩变形的方法构造几何形态不规则的粗颗粒细观模型。首先，以椭圆为基本形状，构建形心坐标为 $O(x_0, y_0)$ ，半长轴为 a ，半短轴为 b ，椭圆长轴与 x 轴正向夹角为 φ 的椭圆参数方程，可表示为

$$Z(\theta) = \begin{bmatrix} x(\theta) \\ y(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \cos \theta \\ b \sin \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： θ 为角度变量，取值范围为 $0 \sim 2\pi$ 。

然后确定曲线基本伸缩因子，设 $[a_0-k_1, a_0+k_1]$ 和 $[a_0-k_2, a_0+k_2]$ 是 Ω 上关于 a_0 对称的两个区间，其中 $0 \leq k_1 < k_2$ ，令 $\theta = (s-a_0)^2$ ，作 Ω 上的 C^∞ 函数

$$g(s) = \begin{cases} e^{\frac{1}{(s-k_1^2)(s-k_2^2)}} & 0 \leq k_1^2 < s < k_2^2 \\ 0 & s \leq k_1^2, s \geq k_2^2 \end{cases} \quad (2)$$

构造 Ω 上的基本伸缩因子 $B(\theta)$ ，可表示为

$$B(\theta) = \frac{\int_{\theta}^{+\infty} g(s) ds}{\int_{-\infty}^{+\infty} g(s) ds} \quad (3)$$

式中： e 为自然底数； s 为伸缩函数变量； $[a_0-k_1, a_0+k_1]$ 为变形支区间， $[a_0-k_2, a_0+k_2]$ 为变形峰值区间。

选取椭圆曲线的若干个变形支区间 I_i ，支区间中点作为变形峰值区域，根据式(3)对椭圆曲线进行伸缩变形，得到不规则碎石颗粒的轮廓曲线，可表示为：

$$Z_d(\theta) = \begin{bmatrix} x(\theta) \\ y(\theta) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \{ [D_i B_i(\theta) + E] [P(\theta) - O] + O \} \quad (4)$$

式中： α_1, α_2 为伸缩系数，取值范围为 $-0.125 \sim 0.105$ ； $D_i = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2)$ 为伸缩系数矩阵； E 为单位矩阵； O 为形心坐标。不规则碎石构造过程如图 2 所示。

单个碎石颗粒的面积 s 可表示为

$$s = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \|Z_d(\theta) - O\|^2 \quad (5)$$

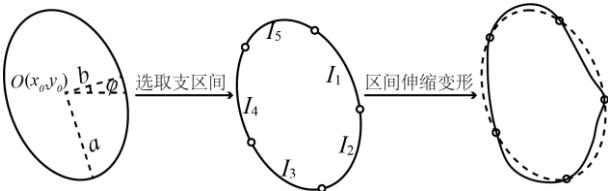


图 2 碎石颗粒生成过程示意图

Fig 2 Schematic diagram of the process of generating gravel particles

1.2 粗颗粒骨料随机生成

1.2.1 颗粒级配曲线

富勒理想级配曲线可用于表示土石混合体中碎石颗粒分布情况，其表达式为：

$$P = 100 \sqrt{\frac{D}{D_{\max}}} \quad (6)$$

式中： P 为通过筛孔 D 碎石的质量百分数， D_{\max} 为最大碎石粒径。

级配一定时，为确保碎石分布在二维和三维条件下的等效性，根据 Walraven 等^[19]的研究，即土石混合体中碎石级配与二维截面内碎石面积之间的关系，可将富勒级配曲线转换为土石混合体二维截面中 $D < D_0$ 的出现概率 P_c ，表示为

$$P_c(D < D_0) = P_k (1.065 D_0^{0.5} D_{\max}^{-0.5} - 0.053 D_0^4 D_{\max}^{-4} - 0.012 D_0^6 D_{\max}^{-6} - 0.0045 D_0^8 D_{\max}^{-8} + 0.0025 D_0^{10} D_{\max}^{-10}) \quad (7)$$

式中： D_0 为某一指定碎石粒径； P_k 为碎石占土石混合体总面积的百分比。

1.2.2 颗粒入侵判定

采取分步入侵判定算法进行碎石投放，构建数学函数 $\eta(x, y)$ ，判断新增椭圆中心 $O_0(x, y)$ 与已有椭圆的位置关系。

$$\begin{aligned} \eta(x, y) &= (x - x_0, y - y_0) \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 & 0 \\ 0 & 1 \\ b^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \end{bmatrix} - 1 \end{aligned} \quad (8)$$

$\eta(x, y) < 0$ 表示新增颗粒中心在已有颗粒内部； $\eta(x, y) = 0$ 表示新增颗粒中心在已有颗粒边界上； $\eta(x, y) > 0$ 表示新增颗粒中心在已有颗粒外部。只有 $\eta(x, y) > 0$ ，才可以生成新的碎石颗粒。然后计算新增颗粒中心距离已有碎石颗粒边界的最小距离 d ，同时满足 $d > a$ ，则生成新碎石颗粒。

1.3 土石混合体随机重构

采用随机投放方式构建土石混合体模型中碎石颗粒，采用随机生长方式生成孔隙。土石混合体模型构建流程如图 3 所示，具体步骤为：

(1) 确定模型区域，设定初始碎石面积 $s=0$ ，输入最终碎石总面积 S ，各粒径碎石分布概率 P_{ci} 、孔隙分布概率 P_a 、生长概率 P_{di} 和孔隙率 e 等控制参数。

(2) 依据碎石级配曲线，在模拟区域内依次随机生成椭圆的形心坐标、长半轴 a 、短半轴 b 和倾角 θ ，利用伸缩因子对椭圆变形得到不规则形状碎石颗粒。

(3) 随机投放碎石颗粒，进行颗粒入侵判定，确保新增颗粒与已有颗粒互不重叠，计算碎石颗粒累计面积 s 。

(4) 如果 $s > S$ ，转至下一步；否则，循环第 2 步。

(5) 划分网格，对除碎石以外的网络区域，每个单元网格赋予(0, 1)的伪随机数，网络节点随机数不大于 P_a 的网格作为孔隙生长核。

(6) 根据各方向上的生长概率 P_{di} ，孔隙生长核依次向周围八等分方向的相邻网格生长。当该网格节点的随机数不大于该方向上的 P_{di} 时，该网格即成为孔隙生长相。

(7) 重复步骤 (6) 直至达到给定的孔隙率 e 。

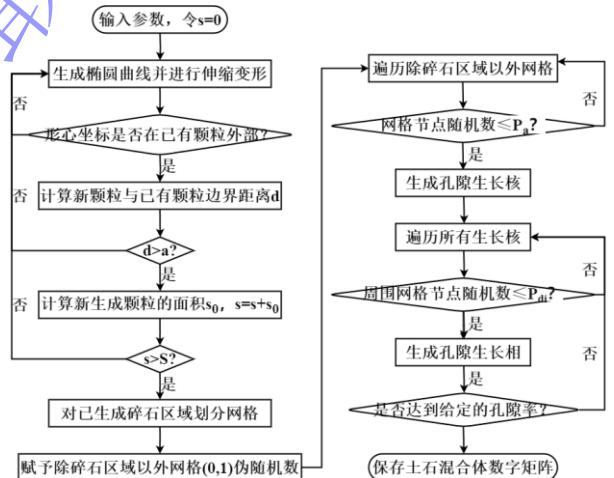


图 3 土石混合体随机重构流程图

Fig 3 Random reconstruction process diagram of soil-rock mixture

1.4 土石混合体介电模型

土石混合体模型包括骨料、土体和孔隙三相，其中土体相是由土颗粒和水组成的固液混合物，其介电常数主要取决于土体含水率。根据 Topp 模型^[20]，含水土体的介电常数可由含水率表示为

$$\varepsilon_v = 3.03 + 9.3w + 146w^2 - 76.6w^3 \quad (9)$$

式中： ε_v 为含水土体介电常数， w 为土体含水率。

土石混合体中组成材料的介电常数和电导率，如表 1 所示。采用土石混合体随机重构方法生成土石混

合体介电模型如图 4 所示。

表 1 模型中的电磁参数

Table 1 Electromagnetic parameters for numerical model

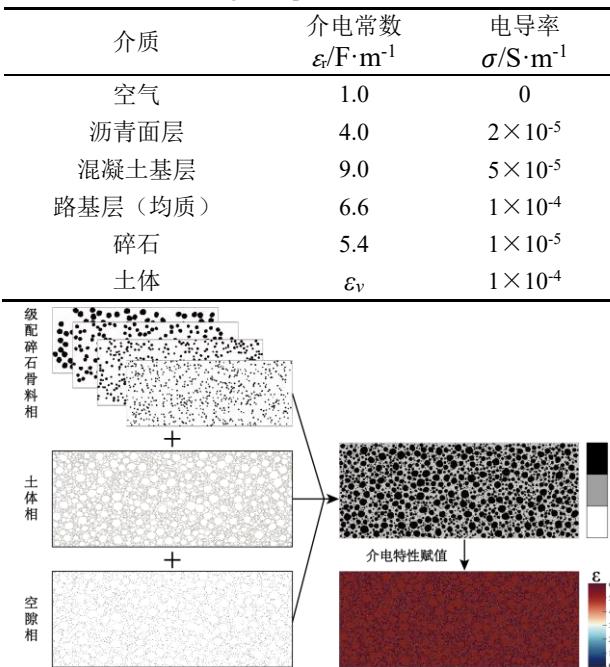


图 4 土石混合体介电模型生成过程

Fig 4 Generation process of dielectric model for soil-rock mixture

2 土石混填路基空洞地质雷达正演模拟

2.1 土石混合体介电模型验证

为验证土石混合体介电模型的适用性。建立如图 5 所示的路基地质雷达正演模型，模型分上下两层，依次为土石混合体层和金属层，厚度分别为 80 mm、10 mm，设置金属层的目的是为了增强反射信号。借助 GprMax 软件进行地质雷达正演模拟，采用 Ricker 子波模拟地质雷达信号的激励源，中心频率为 900 MHz。使用空间步长为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的网格对模型进行离散化，采样时窗设置为 30 ns。地质雷达天线位于空气层且沿土石混合体表面右移，每 2 cm 移动一次，总计得到 98 道记录波。

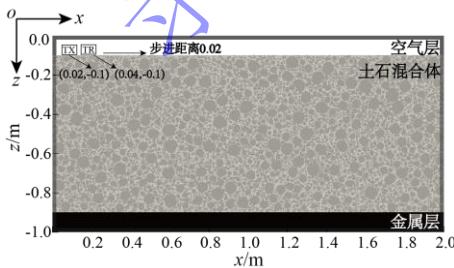


图 5 土石混合体正演模型

Fig 5 Forward modeling of soil-rock mixture

图 6 是土石混合体正演模拟第 49 道单道波形图，以直达波第一个负峰和金属反射信号第一个正峰之间

时间为电磁波在土石混合体层的传播时时间，土石混合体的介电常数 ϵ' 可表示为

$$\epsilon' = \frac{(c \cdot t)^2}{2h} \quad (10)$$

式中： c 为电磁波在真空中传播速度，约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ； t 为双程走时； h 为土石混合体层的厚度。

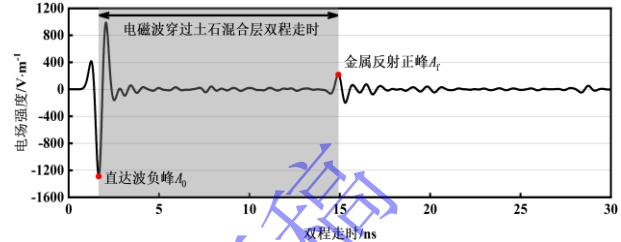


图 6 模拟的第 49 道单道波形图

Fig 6 Simulated single channel waveform of channel 49

常用的土石混合体等效介电常数理论模型有 Lichtenegger 模型、CRIM 模型、Maxwell-Garnett 模型 [21]。不同含水率条件下，本文的模拟结果与常见经验模型计算结果如图 7 所示。由图可知，对于土石混合体三相介质，含水率小于 16% 时，通过模拟得到的等效介电常数与 Lichtenegger、CRIM 和 Maxwell-Garnett 等公式计算得到的等效介电常数基本吻合；当含水率高于 16% 时，模拟结果与 CRIM 模型结果较为吻合；土石混合体的含水率越高，等效介电常数越大。进一步表明本文的数值模型可以用于模拟土石混合体的介电特性。

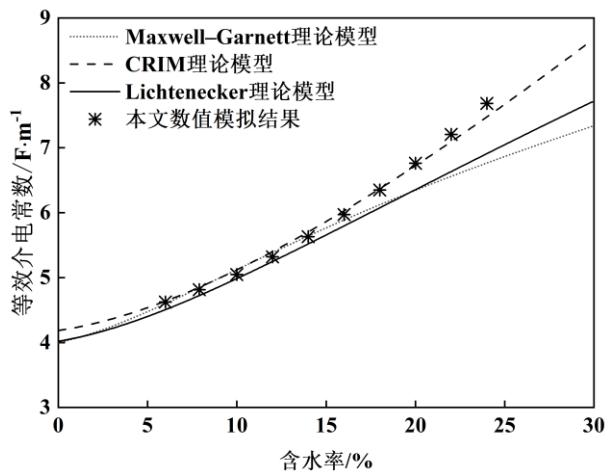


图 7 土石混合体等效介电常数结果对比

Fig 7 Comparison of equivalent dielectric constant results of soil-rock mixture

2.2 土石混填路基空洞地质雷达模拟

根据二级公路浅层结构特征^[22]，建立公路浅层结构的二维数值模型，如图 8 所示。模型整体宽 2 m，高 1.2 m。含三层连续的结构层，从上到下依次为沥青

面层、混凝土基层、土石混填路基层，厚度分别为0.1 m、0.2 m、0.8 m。在模型中设置一处矩形空洞，空洞宽0.4 m，高0.2 m，空洞中心点坐标为(1.0, -1.0)。

为分析土石混合体非均匀程度对地质雷达波的影响，设置三种工况进行模拟，每种工况对应一种土石混合体级配曲线，级配1、2、3中的最大碎石粒径分别为15.98 mm、26.3 mm、37.17 mm，三种级配曲线中9.5 mm粒径以下的颗粒分布保持一致，如图9所示，模型中的介电参数如表1所示。

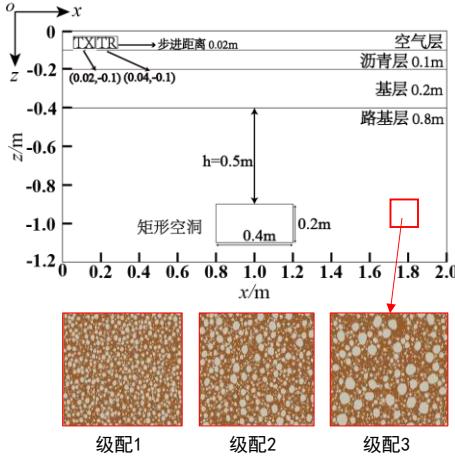


图 8 路基空洞数值模型

Fig 8 Numerical model of subgrade void

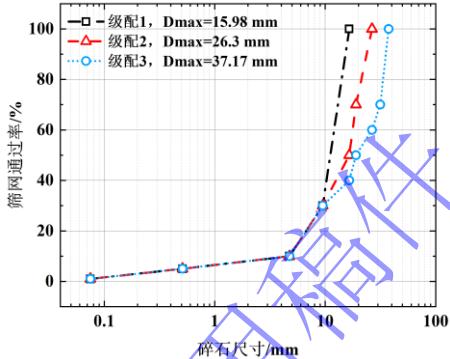


图 9 三种土石混合体级配曲线

Fig 9 Grading curves of three different soil-rock mixture

2.3 非均质路基层对地质雷达波的影响

图10给出了不同时刻地质雷达电磁波的波场快照。由图可知，9.3 ns时电磁波遇到空洞顶部发生强烈反射，在均质介质中，路基土层的电磁波传播速度恒定不变，电磁波未发生散射，反射波以光滑的双曲线波形向路面反射，波形未发生畸变。而在非均质土石混填路基中，不同粒径碎石随机分布，非均匀性明显，不同位置电磁波传播速度存在差异，出现不同角度随机散射，导致波形模糊且波面不光滑，且在不同碎石粒径级配下，电磁波传播特征也不尽相同。随碎石级配粒径增大，空洞反射波波形畸变越严重，反射波能

量越低，同时波面也越粗糙，波形的可辨识度越弱。

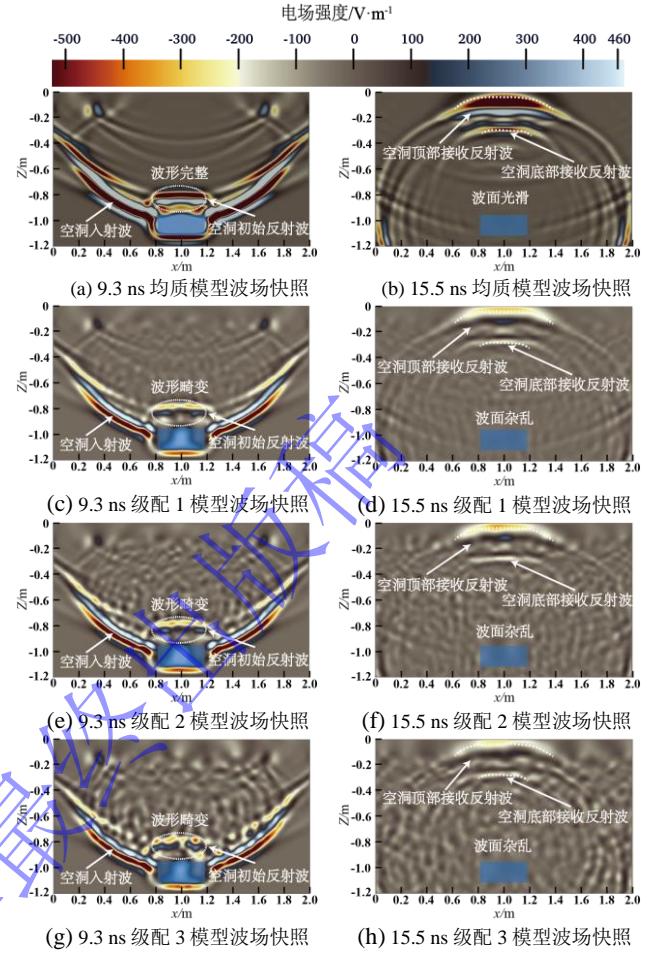
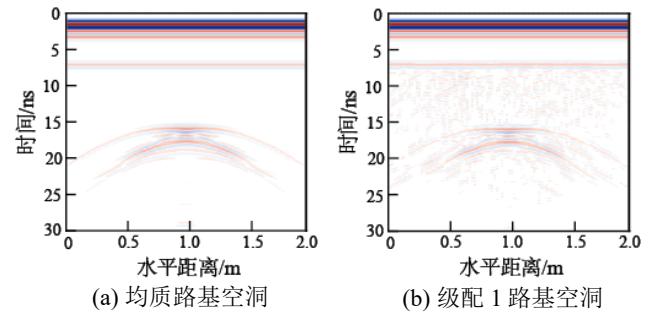


图 10 不同级配路基空洞波场快照

Fig 10 Wave field snapshots of different subgrade media

图11为不同级配路基空洞的地质雷达图像，由图可知，均质路基空洞的反射波波形顶部呈现水平状，周围角点呈现明显绕射波，底部伴有多次波发育，波形清晰波面光滑。在非均质路基空洞周围绕射波不明显，多次波与土石混合体散射波区分度不明显，波面模糊杂乱，且级配差异越大，波面越杂乱，空洞反射波和绕射波的区分度均越弱，造成探测目标的地质雷达图像解译越困难^[23]。



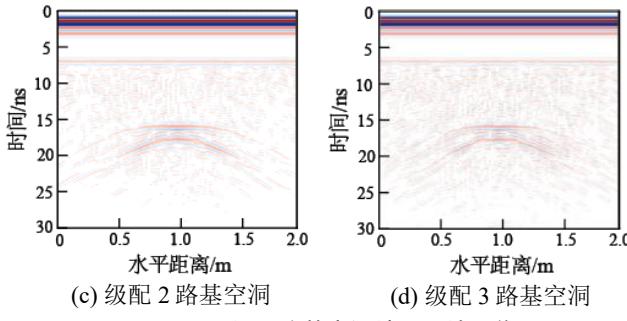


图 11 不同级配路基空洞地质雷达图像

Fig 11 Geological radar images of different graded roadbed media

提取模型竖向中心线的单道波形曲线,如图 12 所示。电磁波从发射到接收先后经过三次反射,且经过不同界面时,相位发生变化,沥青面层的介电常数小于混凝土基层,其反射相位为由负到正,经过混凝土基层和空洞的反射相位均为由正到负。根据 6~20 ns 区间的波形可知,电磁波穿过土石混填路基层时受非均质介质干扰导致波形出现不规则多次震荡,土石混合体的散射作用导致电磁波能量耗散,且碎石粒径越大,散射作用越强,空洞顶部反射负峰幅值越小。

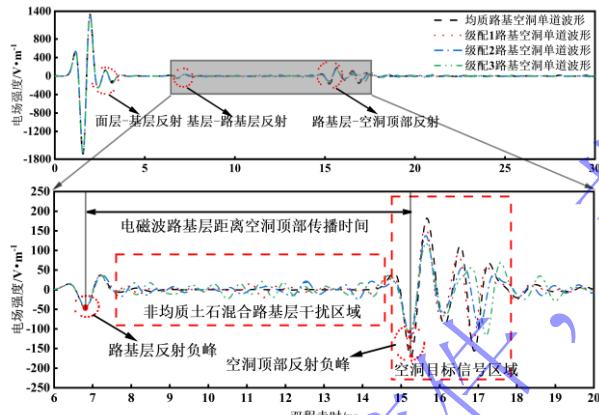


图 12 竖向中心线的单道波形

Fig 12 Single waveforms on the vertical centerline

3 土石混合体参数的影响分析

采用控制变量法,研究在三种不同碎石级配情况下,土石混合体中碎石含量、孔隙率、含水率等参数对空洞顶部反射负峰电场强度(波前振幅强度)以及路基层距离空洞顶部传播时间的影响规律。

3.1 碎石含量对空洞反射信号影响

图 13 为不同碎石含量对空洞反射信号的影响曲线。由图可知,对于同一种级配的土石混合体,随着碎石含量的增加,波前振幅强度随碎石含量的变化呈现先增大后降低的趋势。碎石含量低于 40% 左右时,碎石含量增加,反射界面增多,电磁波在传播时在界面处产生额外的反射信号,与空洞顶部的反射信号叠加,

增强信号振幅;当碎石含量继续增加时,碎石分布变得更加复杂和密集,电磁波的多重散射效应占主导,空洞反射波能量逐渐衰减,最终导致空洞信号振幅整体降低。由于碎石介电常数相对较小,碎石含量的增加,使得电磁波传播过程中受到的电磁损耗降低,传播时间逐渐变短。

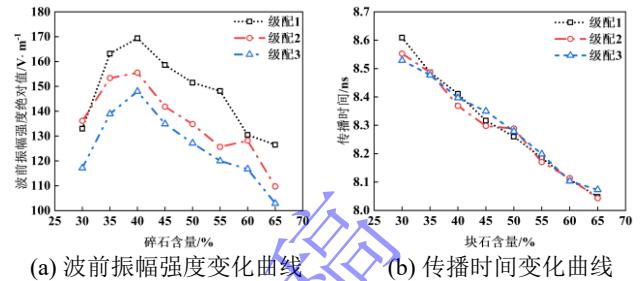


图 13 不同碎石含量对空洞反射波的影响

Fig 13 Effects of different rock content on cavity reflection wave

3.2 孔隙率对路基空洞反射信号影响

图 14 为不同孔隙率对空洞反射信号的影响曲线,由图可知,随着土石混合体中孔隙率的增大,空洞回波信号的波前振幅强度整体呈现下降趋势。主要是因为孔隙率越大,土石混合体中空气含量越多,对电磁波的散射损失也逐渐增大。同时,孔隙率增加造成土石混合体等效介电常数减小,反射系数降低,致使空洞的波前振幅强度和能量均降低。此外,随着孔隙率增加,传播时间总体也呈下降趋势,孔隙率从 2% 至 20% 变化时,平均传播时间约减少 9.2%,孔隙率对传播时间的影响较碎石含量变化更为明显。

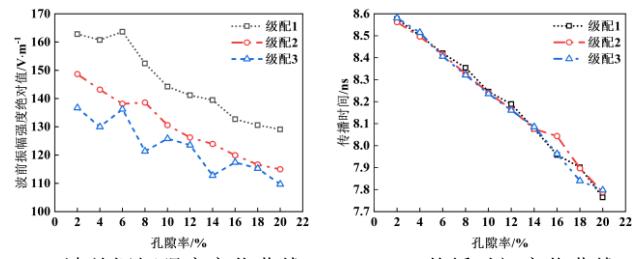


图 14 不同孔隙率对空洞反射波的影响

Fig 14 Effect of different porosities on cavity reflection wave

3.3 含水率对路基空洞反射信号影响

图 15 为不同含水率对空洞反射信号的影响曲线,由图可知,随着含水率的增大,波前振幅强度呈先增大后减小的趋势,含水率约小于 16% 时,空洞反射波能量逐步增大,当超过 16% 时,呈逐步减小趋势。主要是因为在较低含水率情况下,含水率增大,使得空洞与路基反射系数增大,增强空洞波前振幅强度,而超过一定含水率,电磁波的被吸收能量增加,致使空洞回波信号严重衰减,波前振幅强度降低。传播时间与含水率呈正相关关系,孔隙率从 2% 增加至 24% 时,

平均传播时间由 7.1ns 增加至 9.8ns，约延迟了 38%，含水率变化对电磁波传播的影响高于碎石含量和孔隙率的影响。

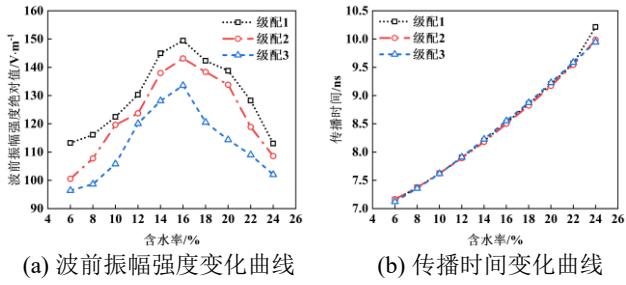


图 15 不同含水率对空洞反射波的影响

Fig 15 Effect of different water contents on cavity reflection wave

4 结 论

(1) 提出了考虑土石混填路基非均匀性和随机性特征的土石混合体随机重构建模方法，应用该方法可构造颗粒级配、孔隙率和含水率等参数不同的土石混合体细观数值模型，可用于土石混填路基病害的地质雷达正演模拟分析。

(2) 基于数值模结果可以得到土石混合体路基的等效介电常数，且模拟结果与 CIRM 模型计算的等效介电常数较为一致，进一步验证了本文模型能够较好地模拟土石混合体中地质雷达电磁波传播特征。

(3) 电磁波遇到空洞时会强烈反射，遇均质路基空洞时，以光滑的双曲线波形向路面反射，波形不发生畸变；遇非均质土石混填路基空洞时，电磁波散射明显，波形模糊且波面不光滑，且碎石粒径越大，反射波波形畸变越严重，波形的可辨识度越低。

(4) 土石混填路基空洞的波前振幅强度随碎石含量的增加呈先增大后减小的趋势，当碎石含量较小时，反射界面的增加会增强空洞反射信号，而当碎石含量超过一定数值时，碎石的散射作用将占主导地位，导致信号衰减。孔隙率和含水率主要通过影响路基等效介电常数来影响空洞反射波信号，孔隙率越大，空洞波前振幅越低；含水率越大，空洞波前振幅强度越大，但含水率增大到一定程度会造成信号衰减。

参 考 文 献

- [1] 王大为, 吕浩天, 汤伏蛟, 等. 三维探地雷达道路隐性病害检测分析与数字化技术综述 [J]. 中国公路学报, 2023, **36**(03): 1-19. (WANG Dawei, LYU Haotian, TANG Fujiao, et al. Research on road underground disease detection by dual-frequency GPR based on high-dynamic range technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, **36**(03): 1-19. (in Chinese))
- [2] 师文豪, 鞠俊杰, 王源, 等. 基于地质雷达探测和熵权二维云模型的城市道路塌陷风险评价方法 [J]. 安全与环境工程, 2024, **31**(06): 161-8+99. (SHI Wenhao, JU Junjie, WANG Yuan, et al. Safety and Environmental Engineering [J]. Risk evaluation of urban road collapse based on ground penetrating radar detection and entropy weight two-dimensional cloud model, 2024, **31**(06): 161-8+99. (in Chinese))
- [3] 郭士礼, 段建先, 张建锋, 等. 探地雷达在城市道路塌陷隐患探测中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2019, **34**(04): 1609-1613. (GUO Shili, DUAN Jianxian, ZHANG Jianfeng, et al. Application of GPR in urban road hidden diseases detection [J]. Progress in Geophysics, 2019, **34**(04): 1609-1613. (in Chinese))
- [4] 张劲松, 丛鑫, 杨伯钢, 等. 地下管线探测雷达图特征分析[J]. 地球物理学进展, 2019, **34**(03): 1244-1248. (ZHANG Jingsong, CONG Xin, YANG Bogang, et al. Characteristics analysis of radar map on underground pipeline detection [J]. Progress in Geophysics, 2019, **34**(03): 1244-1248. (in Chinese))
- [5] 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**(03): 132-138. (LI Shimian, WANG Xiurong, LIN Tian, 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**(03): 132-138. (in Chinese))
- [6] 张建智. 城市道路病害特征地质雷达正演模拟及快速识别 [J]. 科学技术与工程, 2020, **20**(14): 5499-5505. (ZHANG Jianzhi. GPR Forward Modeling and Rapid Identification Technology of Urban Road Disease Characteristics [J]. Science Technology and Engineering, 2020, **20**(14): 5499-5505. (in Chinese))
- [7] LUO T. X., LAI W. W., GIANNOPoulos A. Forward modelling on GPR responses of subsurface air voids [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2020, **103**: 103521.
- [8] 王宇, 李晓, 赫建明, 等. 土石混合体细观特性研究现状及展望 [J]. 工程地质学报, 2014, **22**(01): 112-123. (WANG Yu, LI Xiao , HAO Jianming, et al. Study of mesoscopic fractal feature and mechanical properties for rock and soil aggregates samples [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **22**(01): 112-123. (in Chinese))
- [9] SHAN P F, LAI X P. Mesoscopic structure PFC~2D model of soil rock mixture based on digital image [J]. Journal of Visual

- Communication and Image Representation, 2018, **58**: 407-415.
- [10] 赵鑫曜, 陈建功, 张海权, 等. 基于碎石形状数据库的土石混合体模型随机生成方法 [J]. 岩土力学, 2018, **39**(12): 4691-4697. (ZHAO Xinyao, CHENG Jiangong, ZHANG Haiquan, et al. Random generation of soil-rock mixture models by rock shape database using digital imaging technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(12): 4691-4697. (in Chinese))
- [11] LI C S, ZHANG D, DU S S, et al. Computed tomography based numerical simulation for triaxial test of soil–rock mixture [J]. Computers and Geotechnics. 2016, **73**: 179-188.
- [12] 刘晓华, 韦彬, 唐皓, 等. 基于蒙特卡洛随机采样的土石混合体数值模型构建方法 [J]. 湖南交通科技, 2020, **46**(02): 18-24+53. (LIU Xiaohua, WEI Bing, TANG Hao, et al. Numerical model construction method of soil-rock mixture based on Monte Carlo random sampling[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2020, **46**(02): 18-24+53. (in Chinese))
- [13] XU H, YU X J, CHENG F, et al. Effects of Earth–Rock Dam Heterogeneity on Seismic Wavefield Characteristics [J]. Energies, 2023, **16**(5): 2423-2423.
- [14] 喻江武, 荀志龙, 雷瑜, 等. 基于傅里叶逆变换的土石混合体模型生成研究 [J]. 水利水电技术, 2019, **50**(04): 7-15. (YU Jiangwu, GOU Zhilong, LEI Zhilong, et al. Inverse Fourier transform-based study on generating model of soil-rock mixture [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, **50**(04): 7-15. (in Chinese))
- [15] 王宇, 李晓. 土石混合体细观分形特征与力学性质研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(S1): 3397-3407. (WANG Yu, LI Xiao. Study of mesoscopic fractal feature and mechanical properties for rock and soil aggregates samples [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S1): 3397-3407. (in Chinese))
- [16] 曾雄鹰, 王佳龙, 梁晓东, 等. 基于双频高动态探地雷达技术的道路地下病害检测研究 [J]. 地球物理学进展, 2022, **37**(05): 2225-2232. (ZENG Xiongyin, WANG Jialong, LIANG Xiaodong, et al. Research on road underground disease detection by dual-frequency GPR based on high-dynamic range technology [J]. Progress in Geophysics, 2022, **37**(05): 2225-2232. (in Chinese))
- [17] 杨洁, 王云龙, 张雪, 等. 基于正演模拟的地下典型目标体探地雷达图像特征分析与评价 [J]. 科学技术与工程, 2023, **23**(20): 8540-8551. (YANG Jie, WANG Yunlong, ZHANG Xue, et al. Ground Penetrating Radar for Typical Underground Target Based on Forward Modeling Image Feature Analysis and Evaluation [J]. Science Technology and Engineering, 2023, **23**(20): 8540-8551. (in Chinese))
- [18] KANG X. T., SHENG S. M., FU C. J. Characterization of 3D-Radar images of pavement devoid damage based on FDTD [J]. Journal of Measurements in Engineering, 2023, **11**(4): 467-481.
- [19] WALRAVEN J C., REINHARDT H W. Theory and experiments on the mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading [J]. 1981.
- [20] 廖红建, 孙俊煜, 皎月稳, 等. 土的介电常数模型及其工程运用探讨 [J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(S2): 36-41. (LIAO Hongjian, SUN Junyu, JIU Yuewen, et al. Dielectric constant model for soil and its application in engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(S2): 36-41. (in Chinese))
- [21] FAN B H, BOSC F, SMANIOTTO B, et al. Dielectric characterisation of rock aggregates with different grain size distributions [J]. Road Materials and Pavement Design, 2024, **25**(4): 776-789.
- [22] JTGT 3610-2019, 公路路基施工技术规范 [S]. (JTGT 3610-2019, Technical specifications for construction of highway subgrades [S]. (in Chinese))
- [23] YI L, DANG P F, XU X H, et al. Deep Learning for Improved Subsurface Imaging: Enhancing GPR Clutter Removal Performance Using Contextual Feature Fusion and Enhanced Spatial Attention [J]. Remote Sensing, 2023, **15**(7): 1729-1729.