DOI:10.19322/j. cnki. issn. 1006-4710. 2018. 02. 010

## 黄土地基不良地质界面瞬态 地质雷达波形 FDTD 正演分析

### 吕高<sup>1</sup>,杨杰<sup>1</sup>,李宁<sup>1</sup>,胡德秀<sup>1</sup>,张岩<sup>2</sup>

(1.西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048;2.西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054)

**摘要:**黄土地层容易受到侵蚀形成缺陷,基于地质雷达方法,可有效探测出黄土地层中不良地质体的形态及分布。本文以解析方法研究并推导了地质雷达波在黄土界面的反射波幅、折射波幅及电磁场强度;通过时域有限差分方法对几种特殊地电模型进行数值模拟,研究地质雷达波在不良地质体界面的入射波、反射波的波幅及其分布形态。结果表明:黄土地层中不良地质体的相对介电常数直接影响地质雷达反射波幅,当地层中含水量增加时,地质雷达反射波幅增大、折射波幅减小;特殊地层中,地质雷达波在黄土-空气界面的反射强度为0,透射强度为1,在黄土-金属界面的反射强度为1,透射强度为0。

关键词:相对介电常数;地质雷达;时域有限差分法;瞬态波幅 中图分类号:U459.2 **文献标志码:A 文章编号:**1006-4710(2018)02-0185-07

# FDTD forward of transient GPR waveform on adverse geological interface of loess foundation

LÜ Gao<sup>1</sup>, YANG Jie<sup>1</sup>, LI Ning<sup>1</sup>, HU Dexiu<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>

(1. School of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi' an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China) **Abstract:** As an important nondestructive detection method, it is convenient and applicable for the ground penetrating radar(GPR) to detect the morphology and distribution of unfavorable geological body of loess construction project. In this study, reflection amplitude, refracted amplitude and electromagnetic field intensity of GPR waves in the loess interface are deduced by the analytic method. Several special geo-electric models are numerically simulated by the finite-difference time-domain(FDTD) method. In addition, the amplitude and distribution of incident wave and reflected wave at the interface of unfavorable geological bodies are studied. The main conclusions in this study are as follows: The reflected amplitudes of GPR waves are directly affected by the dielectric constants of the unfavorable geological body of loess; the reflected amplitudes of GPR waves are proportional to moisture content of loess, with refracted amplitudes being inversely proportional to moisture content; the reflected intensity of GPR wave at the interface between loess and air is equal to zero; the reflected intensity of GPR wave at the interface between loess and metal is equal to one.

Key words: relative permittivity; ground-penetrating radar; FDTD forward; transient waveform

中国西北地区的持续开发促使黄土填方工程日 益增加,对黄土地区坳、沟、梁地质进行改造的过程 中,受原黄土地基的承载力以及降水、地质活动等外 在因素影响,极易导致黄土填层出现缺陷形成不良 地质体<sup>[1-2]</sup>。填方地层的缺陷以及不良地质体的有 效监测方法一直是国内外专家的热点话题。因此借

收稿日期: 2017-04-17

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(41301597,11572246,51509200);国家重点实验室培育基地基金资助项目 (2016ZZKT-8);中国博士后科学基金资助项目(2017M613175)

作者简介: 吕高,男,博士,研究方向为水利工程安全监测、无损探测等。E-mail:lvgao116@xaut.edu.cn

助地质雷达(Ground Penetrating Radar,GPR)方法 对填土层中的缺陷进行分析,可及时有效确认其空 间位置及填充形态。而地质雷达对土层缺陷的识别 与分析,必须以地质雷达波在土层-缺陷界面的反射 规律研究为基础<sup>[3-5]</sup>。

目前,针对高填方工程的安全监测方法主要有 沉降监测、土应力监测等。朱才辉等<sup>[6,7]</sup>对黄土填 方工程中的冲沟和暗穴,以变形和应力变化的形式, 进行稳定性和时空效应分析;刘奉银等<sup>[8]</sup>利用孔压 系数法及非饱和土一维固结,计算并分析了黄土填 方高路堤的变形及沉降;葛苗苗等<sup>[9]</sup>通过室内压实 黄土一维固结蠕变试验,分析含水率及压实度对黄 土蠕变特性的影响。Sass等<sup>[10]</sup>基于地质雷达在土 壤与岩石界面的反射特征,在德国巴伐利亚山脉调 查边坡基岩位置;Gerber等<sup>[11]</sup>通过室内实验研究土 壤的含水率与相对介电常数之间的变化关系以及岩 层含水率的增加对地质雷达图像的影响;Zieliński 等<sup>[12]</sup>从 GPR 图像中提取界面反射特征,对比分析 了土质滑移面的含水率以及土壤结构性特征。

以上研究中,对土质填层的沉降变形机理及探测手段均有深入研究,而从不良地质界面的地质雷 达波瞬态反射特性入手,研究实际工程中的潜在地 质灾害还鲜有文献提及。本文结合黄土填土层的具 体特点,基于时域有限差分方法,针对潜在不良地质 体建立地电模型,研究不同介电性能的介质界面反 射特性及规律,从而为实际探测中不良地质体的分 析解译提供佐证。

#### 1 黄土填层介电特性及界面反射规律研究

#### 1.1 黄土填层的介电特性研究

黄土由固、气、液三相组成,黄土的相对介电常数是三相介质的相对介电常数的混合值。本文引入 三种应用较为广泛的土壤相对介电常数计算模型作 为参考,以揭示我国西北地区黄土混合相对介电常数的取值范围以及不同含水率下,黄土相对介电常数的变化规律和趋势。

1) Topp 公式<sup>[13]</sup>。Topp 等人研究"固-液"混合 试样,并调整其固相材料,以时域反射仪测试混合体 的相对介电常数,拟合得出介质相对介电常数与含 水率的经验关系式:

$$\varepsilon_{\rm r} = 3.03 + 9.3\theta_{\rm v} + 146.0\theta_{\rm v}^2 - 76.6\theta_{\rm v}^3$$
 (1)

$$\theta_{\rm v} = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_{\rm r} - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_{\rm r}^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_{\rm r}^3$$
(2)

式中, ε<sub>r</sub> 是相对介电常数; θ<sub>v</sub> 是体积含水率。

2) 复合折射系数模型(Complex Reflective In-

dex Model, CRIM)<sup>[14]</sup>:

$$\sqrt{\varepsilon_{\rm r}} = (1 - \phi) \ \sqrt{\varepsilon_{\rm m}} + S_{\rm w} \phi \ \sqrt{\varepsilon_{\rm w}} + (1 - S_{\rm w}) \phi \ \sqrt{\varepsilon_{\rm a}}$$
(3)

式中, ε<sub>m</sub>、 ε<sub>w</sub>、 ε<sub>a</sub>分别为土中固体颗粒、水及空气的相 对介电常数; φ为含水率; S<sub>w</sub>为含水饱和度。式中 水的相对介电常数值为 81, 黄土相对介电常数的参 考值为 5, 因此式(3)可简化为:

$$\sqrt{\varepsilon_{\rm r}} = \phi \ \sqrt{\varepsilon_{\rm m}} + (1 - \phi) \ \sqrt{\varepsilon_{\rm w}} \tag{4}$$

3) Dobson<sup>[15]</sup>公式。Dobson 认为土壤中的水 是由结合水和自由水组成。因此 Dobson 将土壤的 混合介质由固、气、液三相分解为固体、孔隙、结合水 与自由水组成的四项混合物。基于以上研究,Dobson 得到非饱和土相对介电常数与含水率的简化计 算模型为:

$$\epsilon_{\rm soil}^{\alpha} = 1 + \frac{\rho_{\rm b}}{\rho_{\rm ss}} (1 - \epsilon_{\rm ss}^{\alpha}) + m_{\rm v}^{\beta} (\epsilon_{\rm fw}^{\alpha} - 1) \qquad (5)$$

式中, $\epsilon_{soil}$ 是指土壤相对介电常数; $\rho_b$ 为干土密度; $\rho_{ss}$ 为土骨架密度; $\epsilon_{ss}$ 为土中固体颗粒相对介电常数;  $m_v$ 为固体颗粒质量;经验系数  $\alpha = 0.65$ ; $\beta = 1.0 \sim$ 1.17(砂土到黏土); $\epsilon_{fw}$ 为自由水相对介电常数。

对比 Topp、CRIM、Dobson 公式可知, Topp 公 式主要针对整体含水率, CRIM 公式考虑到了各组 分体积比对相对介电常数的影响, Dobson 公式则更 为细致的对土壤固体密度、自由水、结合水等组分进 行分析和实验。将固、气、液各成分相对介电常数代 入三种计算模型,即可得到黄土相对介电常数与含 水率的基本关系曲线, 如图 1 所示。





通过三种计算模型对比,黄土相对介电常数随 含水率增加而增加。当含水率为10%时,黄土相对 介电常数值约为5~8;当含水率为极限状态的 100%时,黄土相对介电常数值为69~82。该规律 基本揭示了黄土相对介电常数与含水率的关系以及 干土与水的取值范围。

三种计算模型在含水率为10%~50%的范围 内,土壤相对介电常数值差异并不明显,而Topp计 算模型采用的计算参数较少,对现场土层相对介电 常数值的计算更为简易方便。因此,本文采用Topp 模型计算压实黄土的相对介电常数值以及空气、纯 水和金属的相对介电常数值,如表1所示,并将这三 种特殊介质作为不良地质体进行数值模拟,以获得 地质雷达波在几种特殊介质界面的反射特性和 规律。

表 1 相对介电常数、电导率表[13-15]

Tab. 1	Parameters table of I	permittivity and resistivity
介质	相对介电常数 er	电导率 σ/(S/m)
空气	1.00	0
纯水	81.00	1. $00 \times 10^{-4} \sim 3.00 \times 10^{-2}$
压实黄土	5	$1.40 \times 10^{-4}$
金属	350	_

#### 1.2 地质雷达波界面反射机理及规律研究

黄土分层填方工程中,每层填土的碾压夯实过 程相同,理论而言并不存在相对介电常数的差异。 但受气候等因素影响,雨季填土的含水率相对较高, 从而导致土层出现相对介电常数差异,这种差异为 地质雷达探测创造了条件。

在不同介电属性的地层界面,地质雷达波在界 面出现反射与折射现象。图 2 是电磁波从介质 1 以 角度 θ 入射至介质 2,在界面产生反射波与折射波 的示意图。



Fig. 2 Reflection and refraction of GPR interface

图 2 中,地质雷达入射波以  $\theta$  角度从介质 1 进 入介质 2,在界面产生反射角为  $\theta'$ 的反射波以及折 射角为 $\theta''$ 的折射波。 $E \times E' \times E''$ 分别为入射波、反射 波和折射波的电场强度, $H \times H' \times H''$ 分别为入射波、 反射波和折射波的磁场强度。

设  $R_{12}$  为反射系数,  $T_{12}$  为折射系数, n 为折射 率,则反射与折射公式<sup>[16,17]</sup> 为:

$$R_{12} = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}$$
(6)

$$\Gamma_{12} = \frac{2\cos\theta}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \tag{7}$$

为简化计算,当地质雷达波垂直入射至介质时, 可令 $\theta=0$ ,带入式(6)~(7),有:

$$R_{12} = (1-n)/(1+n) \tag{8}$$

$$T_{12} = 2/(1+n) \tag{9}$$

根据式(8)、式(9),反射系数 *R*<sub>12</sub>、折射系数 *T*<sub>12</sub> 与折射率的关系如图 3 所示。



图 3 反射系数与折射系数的关系曲线 Fig. 3 The relationship curve of reflection and refraction

图 3 中反射系数 R<sub>12</sub>和折射系数 T<sub>12</sub>均随着折 射率增大而减小,根据图中的关系可进行如下讨论:

1) 当 n > 1 时,即地质雷达波由低相对介电常数介质入射至高相对介电常数介质,基本规律为 $R_{12} < 0, T_{12} < 1$ ,说明地质雷达入射波电场方向发生反转,且E > E''。

2) 当 n < 1 时,即地质雷达波由高相对介电常数介质入射至低相对介电常数介质,基本规律为 $R_{12} > 0, T_{12} > 1$ ,说明地质雷达入射波电场与反射波电场方向一致,且E < E''。

根据以上规律可归纳如下:反射系数和界面两 侧介质的相对介电常数的差值相关,差值越大,反射 系数越大,且回波幅值越大。

#### 1.3 多层界面的地质雷达波成像特征研究

在黄土工程的实际探测过程中,地质雷达波从 表层入射至黄土深层,在土性分界面必然发生反射 与折射现象,而最终反射至地表的电磁波即为回波, 回波蕴含着地质雷达波在地层中经历的反射、折射 信息,对回波信息的解译有助于认识地质深层的构 造。设入射波的能量为 1,通过解析方法研究地质 雷达波在地层中的传播规律,见图 4。



图 4 地质雷达波垂直入射与反射机理

Fig. 4 Refraction and reflection mechanism of GPR waves

图 4 中, h<sub>1</sub>、h<sub>2</sub> 分别为第一层、第二层的厚度; R<sub>1</sub>为第一层的反射系数, T<sub>1</sub>为第一层中地质雷达 波的衰减系数;同理, R<sub>2</sub>、T<sub>2</sub>分别为第二层表面的反 射系数、第二层雷达波的衰减系数。根据图 4 中地 质雷达波的传播规律,显然,回波信息中包含着各地 层中的折射波信号,因此雷达设备接收到的信号 E 是多次反射信号的集合。

$$E = R_1 + R_2 (1 - R_1^2) T_1^2$$
(10)  
代入式(8)、式(9)可得:

$$E_{\square\underline{w}} \sim A_{\underline{w}}^2 \sim f(\boldsymbol{\varepsilon}_1, \boldsymbol{\varepsilon}_2) = \left[\frac{\sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_1} - \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_2}}{\sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_1} + \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_2}} + \frac{4\sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_1} \cdot \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_2} \cdot (\sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_2} + \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_1})}{(\sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_1} + \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_2})^3} \cdot T_1^2\right] \cdot E_{\lambda\underline{y}}$$
(11)

式中, $E_{\text{Dig}}$ 、 $E_{\lambda g}$ 分别为地质雷达回波的电场强度、 入射波的电场强度; $A_{iggg}$ 为地质雷达回波的振幅;  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 分别为第一层、第二层的相对介电常数; $f(\epsilon_1, \epsilon_2)$ 为 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 的非线性函数。

式(11)为地质雷达回波强度的解析模型,该模型中,地质雷达回波强度和土层相对介电常数值相关。对回波信息中的波幅进行分解以及递推计算各层相对介电常数,就可以对各地层岩土体介电性质及其对应的地质结构进行初步分析和判断。

#### 2 特殊界面的反射机理及规律研究

仅考虑地质雷达波垂直入射这种特殊情况。设 地质雷达波由真空入射至黄土表面,在界面处产生 反射波和传播至黄土内的折射波。电磁波的界面反 射系数及波幅解析表达式为<sup>[18]</sup>:

$$\frac{E'}{E} = \frac{1 - \sqrt{\frac{\sigma}{2\omega\varepsilon_0}} (1 + i)}{1 + \sqrt{\frac{\sigma}{2\omega\varepsilon_0}} (1 + i)} =$$
$$-\frac{\sqrt{\frac{\sigma}{2\omega\varepsilon_0}} (1 + i) - 1}{\sqrt{\frac{\sigma}{2\omega\varepsilon_0}} (1 + i) + 1} = -\frac{1 + i - \sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_0}{\sigma}}}{1 + i + \sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_0}{\sigma}}} (12)$$

式中,E、E'分别为入射波强度、回波强度; $\sigma$ 为电导率(S/m); $\omega$ 为回旋角频率; $\varepsilon_0$ 为真空的介电常数;i 为虚数单位。

本节对三种特殊情况的反射系数进行分析和讨论,以研究自然条件下,地质雷达波回波幅值的上限和下限。

1) 黄土-金属界面的反射系数分析:

在良导体中,
$$\sqrt{\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}} \gg 1$$
,因此 $\sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_0}{\sigma}} \ll 1$ ,式(12)

可近似转化为:

$$R \approx \frac{1 - 2\sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_0}{\sigma}} + 1}{1 + 2\sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_0}{\sigma}} + 1} = \frac{1 - \sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_0}{\sigma}}}{1 + \sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_0}{\sigma}}} \approx \left(1 - \sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_0}{\sigma}}\right)^2 \approx 1 - 2\sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_0}{\sigma}} \approx 1 \quad (13)$$

式中,R为反射系数。

式(13)表明,相对介电常数值不变,电导率σ值 越大时,反射系数 R 越接近于 1。金属体的相对介 电常数的参考值为 380,地质雷达波在黄土-金属界 面必然产生波幅、电场的全反射现象,回波的绝对值 等于入射波绝对值。因而在地质雷达的回波成像中 表现出强烈的反射信号。

2) 黄土-空气界面的反射系数分析:

可将空气视为不良导体,电导率 $\sigma$ 较小,约等于 0,地质雷达频率取 400 MHz, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m,

$$\sqrt{\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_{0}}} \approx 0, 因此 \sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_{0}}{\sigma}} \approx 1, \mathbf{\mathfrak{C}}(12) \mathsf{可近似转化为}:$$

$$R \approx \frac{1 - 2\sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_{0}}{\sigma}} + 1}{1 + 2\sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_{0}}{\sigma}} + 1} = \frac{1 - \sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_{0}}{\sigma}}}{1 + \sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_{0}}{\sigma}}} \approx \frac{-\sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_{0}}{\sigma}}}{\sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_{0}}{\sigma}}} = -1 \qquad (14)$$

式(14)中,空气的电导率 o 可视为 0,反射系数 R 为一1。因而,当地质雷达波在空气-金属界面产 生全透射现象时,波幅及能量产生反转。

3) 黄土-水界面的反射系数分析:

水的相对介电常数约为 81,介于金属与空气的 相对介电常数值之间,地质雷达主频取 400 MHz, 以蒸馏水电导率  $1.0 \times 10^{-3}$  S/m 为参考进行计算,  $\sqrt{\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}} \approx 3.49 \times 10^{-3}$ ,因此 $\sqrt{\frac{2\omega \varepsilon_0}{\sigma}} \approx 405.45$ ,式(12) 可近似转化为:

$$R \approx \frac{\left(1 - \sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_0}{\sigma}}\right)^2 + 1}{\left(1 + \sqrt{\frac{2\omega\varepsilon_0}{\sigma}}\right)^2 + 1} = \frac{(1 - 405.45)^2 + 1}{(1 + 405.45)^2 + 1} \approx 0.99$$
(15)

式(15)表明,水的反射系数 R 接近于 1,说明在 水中地质雷达波传播能力有限,导致地质雷达对水 的探测深度较浅。

综合以上三种特殊介质的反射系数分析结果, 本文可以得出以下结论:①黄土-金属界面,地质雷 达波发生全反射现象,入射波经反射后全部成为回 波返回至雷达接收设备,界面反射系数为1;②黄 土-空气界面,地质雷达波信号全部透射,反射系数 为-1;③黄土-水界面,地质雷达波反射能量较多, 反射系数为0.99。经对比分析,在填土层中,随着 底层黄土的相对介电常数由5增加到81,地质雷达 波反射系数由0逐渐增加至0.99,因此,非饱和黄 土界面的地质雷达波反射强度逐渐增强。

#### 3 地质雷达瞬态回波 FDTD 正演

为了进一步揭示地质雷达波在三种特殊界面的 反射与折射特征,研究黄土层中的地质雷达波传播 和回波机理,以时域有限差分方法<sup>[19]</sup>对解析模型进 行进一步分析,研究黄土地层中,地质雷达波在黄 土-空气、黄土-水、黄土-金属界面的反射波幅及波场 的瞬时分布情况。具体方案如图 5 所示。





如图 5 所示,地质雷达主频为 100 MHz,模型 的水平距离为 20 m,有效测试深度为 10 m。反射 模型分为两层,表层为黄土,厚度为 5m,相对介电常 数为 5,电导率为 0.000 1 S/m;垫层为特殊介质,厚 度 5 m,其介电参数如下:①空气层,相对介电常数 为 1,电导率为 0 S/m;②水层,相对介电常数为 81, 电导率为 0.03 S/m;③金属层,相对介电常数为 380,电导率为 1 S/m。 1) 黄土-空气界面的瞬态波场数值模拟

图 6 是地质雷达在黄土-空气地电模型中的地 质雷达波传播瞬态波场分布图。





对比在深度为 5 m 处的波幅与电场分布,可直 观发现,地质雷达波在黄土-空气界面产生较为明显 的透射波和反射波,且透射波的振幅方向与入射波 相反。因此,在实际探测过程中,容易从地质雷达扫 描图中识别出土层中的脱空、空洞等不良地质现象。 2) 黄土-水界面的瞬态波场数值模拟
 图 7 是地质雷达在黄土-水地电模型中的地质
 雷达波传播瞬态波场分布图。





由图 7 可知,地质雷达波在黄土-水界面产生明显的反射现象,其中大部分能量反射到地表,小部分电磁波透射至水层中,但透射能量明显减弱,探测能力急剧下降。实际探测过程中,黄土填层中的充水、溶洞等不良地质的地质雷达扫描图,均呈现反射信号明显,但透射信号削弱的现象。

3) 黄土-金属界面的瞬态波场数值模拟

图 8 是地质雷达在黄土-金属地电模型中的地 质雷达波传播瞬态波场分布图。





由图 8 可知,地质雷达波在黄土-金属界面的反 射现象最为明显,文中已提到,入射信号及能量全部 反射至地表,不会发生透射现象。实际探测过程中, 当黄土填层中出现金属填埋物时,会形成具有较为 明显反射,但无透射信号的地质雷达扫描图。

综上所述,地质雷达波在黄土-空气、黄土-水、

黄土-金属界面的瞬态反射特征差异较大,在地质雷 达探测过程中,可以根据本文研究得出的反射特征 对填土层不良地质体进行区分。

#### 4 结 论

通过对黄土相对介电常数的经验关系的归纳、 对特殊界面的地质雷达反射波与透射波的理论分析 以及利用时域有限差分方法对特殊界面地质雷达波 瞬态特征数值的模拟,得出几点主要结论:

 1) 黄土相对介电常数随含水率增加而增加,当 含水率为10%时,黄土相对介电常数值约为5~8; 当含水率为极限状态的100%时,黄土相对介电常 数值为69~82;

2) 黄土-金属界面,地质雷达波信号具有最为 明显的反射,几乎所有的地质雷达波能量均被完全 反射,反射系数为1;黄土-空气界面,地质雷达波信 号全部透射,反射系数为-1;黄土-水界面,地质雷 达波反射能量较多,反射系数为0.99。经对比分 析,在填土层中,随着底层黄土的相对介电常数由5 增加到81,地质雷达波反射系数由0逐渐增加至 0.99,因此,非饱和黄土界面的地质雷达波反射强度 逐渐增强;

3)通过瞬态时域有限差分数值模拟分析可知: 黄土-空气界面的入射波与反射波均较为明显,容易从地质雷达扫描图中识别出黄土填层的脱空、空洞 等不良地质;黄土-水界面的反射信号明显,但透射 信号削弱;黄土-金属界面反射信号明显,但无透射 信号。

#### 参考文献:

[1] 胡长明,梅源,刘增荣,等.湿陷性黄土高贴坡变形模式和稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31
 (12):2585-2592.

HU Changming, MEI Yuan, LIU Zengrong, et al. Deformation mode and stability analysis of high sticking slope of collapsible losse [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2585-2592.

- [2]马闫,王家鼎,彭淑君,等. 黄土贴坡高填方变形破坏 机制研究 [J]. 岩土工程学报,2016,38(3):518-528.
  MA Yan, WANG Jiading, PENG Shujun, et al. Deformation and failure mechanism of high sticking loess slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016,38(3):518-528.
- [3] 朱才辉,李宁. 基于土电阻率的黄土高填方地基细观变 形机制 [J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(3): 640-648.

ZHU Caihui, LI Ning. Mesoscopic deformation mechanism of loses high-fill foundation based on soil electrical resistivity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 640-648.

 [4]朱才辉,李宁,刘明振,等. 吕梁机场黄土高填方地基 工后沉降时空规律分析 [J]. 岩土工程学报,2013,35
 (2):293-301.
 ZHU Caihui, LI Ning, LIU Mingzhen, et al. Spatio-

temporal laws of post-construction settlement of loessfilled foundation of Lüliang airport [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 293-301.

- [5] 苏立海,李宁,吕高,等. 黄土机场近地表填土层含水 率快速无损检测研究 [J]. 西安理工大学学报,2015, 31(1):40-44.
  SU Lihai, LI Ning, LÜ Gao, et al. Loess soil moisture content fast nondestructive testing of airport surface [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(1):40-44.
- [6] 朱才辉, 李宁. 黄土高填方地基中暗穴扩展对机场道面 变形分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 198-206.

ZHU Caihui, LI Ning. Analysis of airstrip deformation due to expansion of hidden cavities in loess filled high embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 198-206.

[7]朱才辉,李宁,袁继国.黄土冲沟中高填方土压力量测及分布规律探讨[J].岩土力学,2015,36(3):827-836.

ZHU Caihui, LI Ning, YUAN Jiguo. Measurement and distribution of earth pressure of high fill in loess gully [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 827-836.

- [8] 刘奉银,赵然,谢定义,等.黄土高填方路堤沉降分析
  [J].长安大学学报(自然科学版),2003,23(6): 23-28.
  LIU Fengyin, ZHAO Ran, XIE Dingyi, et al. Settlement of loess-filled highway embankment [J]. Journal of Chang' an University (Natural Science Edition), 2003,23(6): 23-28.
- [9] 葛苗苗,李宁,郑建国,等. 基于蠕变试验的黄土高填 方工后沉降规律数值研究 [J]. 西安理工大学学报, 2015,31(3):295-300.

GE Miaomiao, LI Ning, ZHENG Jianguo, et al. Numerical analysis of the post-construction settlement regularity of loess-high filled embankment based on creep test [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31(3): 295-300. Observation of atomic coherence in strontium tripletwith double coupling fields [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0402001.

- [11] HERRMANN S, SENGER A, MÖHLE K, et al. Rotating optical cavity experiment testing Lorentz invariance at the 10<sup>-17</sup> level [J]. Physical Review D, 2010, 80(10): 105011.
- [12] 孙旭涛,陈卫标. 注入锁定激光器的边带锁频技术稳频系统优化分析 [J]. 光子学报, 2008, 37(9): 1748-1752.
  SUN Xutao, CHEN Weibiao. Optimization of Pound-Drever-Hall frequency stabilization of injection-locked laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(9): 1748 1752.
- [13] LAM T T Y, SLAGMOLEN B J J, CHOW J H, et al. Digital laser frequency stabilization using an optical cavity [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(8): 1178-1183.

- [14] POUND R V. Electronic frequency stabilization of microwave oscillators [J]. Review of Scientific Instruments, 1946, 17(11): 490-505.
- [15] DREVER R W P, HALL J L, KOWALSKI F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry, 1983, 31(2): 97-105.
- [16] BLACK E D. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization [J]. American Journal of Physics, 2001, 69(1): 79-87.
- [17] 吴玛. 驱动 PZT 的电压控制电路 [D]. 长春:吉林大学, 2007:27-30.
  WU Ma. High voltage control circuit to drive PZT [D]. Changchun; Jilin University, 2007:27-30.
- [18] 张厥盛,郑继禹,万心平. 锁相技术 [M]. 西安:西安 电子科技大学出版社,1994:64-66.

(责任编辑 王绪迪)

#### (上接第191页)

- [10] SASS O, WOLLNY K. Investigations regarding Alpine talus slopes using ground-penetrating radar (GPR) in the Bavarian Alps, Germany [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(10): 1071-1086.
- [11] GERBER R, SALAT C, JUNGE A, et al. GPR-based detection of pleistocene periglacial slope deposits at a shallow-depth test site [J]. Geoderma, 2007, 139(3): 346-356.
- [12] ZIELINSKI A, MAZURKIEWICZ E, ŁYSKOWSKI M, et al. Use of GPR method for investigation of the mass movements development on the basis of the landslide in Krakow [J]. Roads and Bridges-Drogi i Mosty, 2016, 15(1): 61-70.
- [13] TOPP G C, DAVIS J L, ANNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines [J]. Water Resources Research, 1980, 16(3): 574-582.
- [14] WANG J R. The dielectric properties of soil-water mixtures at microwave frequencies [J]. Radio Science,

1980, 15(5): 977-985.

- [15] DOBSON M C, ULABY F T, HALLIKAINEN M T, et al. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: dielectric mixing models [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985,(1): 35-46.
- [16] VILLASENOR J, BUNEMAN O. Rigorous charge conservation for local electromagnetic field solvers [J]. Computer Physics Communications, 1992, 69 (2-3): 306-316.
- [17] YANG C N, MILLS R L. Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance [J]. Physical Review, 1954, 96(1): 191.
- [18] MAXWELL J C. A dynamical theory of the electromagnetic field [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1865, 155: 459-512.
- [19] IRVING J, KNIGHT R. Numerical modeling of ground-penetrating radar in 2-D using MATLAB [J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(9): 1247-1258. (责任编辑 周 蓓)