

电磁波在饱和无粘性土中的传播特性 及试验研究*

陈云敏 梁志刚 陈仁朋

(浙江大学岩土工程研究所, 杭州 310027)

PROPAGATION PROPERTIES OF ELECTROMAGNETIC WAVE IN SATURATED NONCOHESIVE SOIL AND LABORATORY TEST

Chen Yunmin Liang Zhigang Chen Renpeng

(The Geotechnical Engineering Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

关键词 同轴电缆电磁波反射技术; 孔隙比; 饱和无粘性土

中图分类号 TU441⁺.2, TU411.2 文献标识码 A

目前工程中大多采用取样法测试土的孔隙比, 该方法对土层产生扰动, 深层取样困难, 不能长期定点监测且测试有时间滞后性。与之相比, 现场测试方法能克服这些缺点, 具有取样法无法比拟的优势。电磁法是近年来发展很快的一种快速的现场测试方法。该方法利用电磁波在土中的传播速度和土介质介电常数与土的物理性质指标关系测土的孔隙比和含水量。研究电磁波在土中的传播特性, 进而获得电磁波在土中的传播速度和土介质介电常数与土的孔隙比和含水量之间的关系, 作为现场测试土的孔隙比和含水量的依据, 具有重要的意义。

为了探索这种关系, 国内外不少学者进行了研究。目前描述这种关系的模型分为三大类: 经验模型^[1]、扩散模型^[2,3]和体积混合模型^[4-10]。

扩散模型是根据分子极化和扩散理论提出来的, 强调的是扩散颗粒与其周围环境之间相互作用的细观效应。扩散模型认为混合介质由一种充当母相的介质和几种充当子相的介质组成, 假定各子相间没有相互作用, 子相介质均基于平面相聚合物在母相介质中进行扩散, 计算混合介质的平均电位移矢量和平均电场之商而得到混合介质介电常数。因

此扩散模型的表达式是不对称的, 必须先确定母相介质和子相介质。该模型忽略了各子相间相互作用, 忽略了介质间的边界效应。Heimovaara 认为这个模型只能用于 > 500 MHz 的高频范围^[10], 因为这时边界效应不起主要作用。虽然扩散模型的公式比较简洁而且各个参数物理意义比较明确, 但该模型只将各种介质进行简单的混合, 而没有考虑介质的电学特性, 在原理上存在这个缺陷, 而且实验结果证明该式与实际情况符合较差, 因而现在已经应用得很少了。

体积混合模型是对混合介质中各组分介电性质进行体积平均提出来的。不同的体积混合模型中进行加权平均的介电参数是不同的。Silberstein 模型认为混合介质的介电常数就可用各组分的介电常数的体积加权平均来代替^[2]; Birchak 模型引入电磁波复传播常数, 假定混合介质的复传播常数等于各组分复传播常数的体积加权平均^[4], 该模型被很多学者采用, 与实测数据符合较好, 但电磁波复传播常数的物理意义不明确; Kraszewski 假定电磁波在混合介质中的传播时间等于电磁波在各组分中传播时间的体积加权平均, 得到了与 Birchak 相同形式的体积混

* 国家自然科学基金项目(50278087)资助

作者简介: 陈云敏(1962~), 男, 浙江温岭人, 教授, 博士生导师, 从事土力学与环境土工教学和科研 E-mail: bang88@163.com

收稿日期: 2004-05-25; 收到修改稿日期: 2005-05-25

合模型^[5]。有学者在 Birchak 模型的基础上加以改进^[7,8],他们提出采用

$\epsilon^\alpha = v_a \epsilon_a^\alpha + v_s \epsilon_s^\alpha + v_{fw} \epsilon_{fw}^\alpha + v_{bw} \epsilon_{bw}^\alpha$ 来计算土的介电常数 ϵ 。式中 $\epsilon_a, \epsilon_s, \epsilon_{fw}, \epsilon_{bw}$ 分别为空气、土颗粒、自由水和结合水的介电常数, v_a, v_s, v_{fw}, v_{bw} 分别为空气、土颗粒、自由水和结合水在土中所占的体积百分比, 参数 α 需通过拟合来得到。因此, 体积混合模型都是基于对某个介电参数的体积加权平均等于该混合介质的介电常数提出的, 在理论上存在着一定的近似。

笔者从电磁波的基本传播方程——麦克斯韦方程出发, 根据土中粒子的极化机制, 通过对土颗粒微观电磁运动特性分析, 推导出电磁波作用下饱和无粘性土的介电常数与孔隙比的关系模型。设计了室内试验对不同级配的饱和砂样进行验证, 得到饱和砂样孔隙比与介电常数之间的关系曲线, 为同轴电缆电磁波反射技术应用于饱和土孔隙比现场测试提供依据。

1 电磁波在饱和无粘性土中传播特性

我们从电磁波传播的最基本的规律—麦克斯韦方程出发来推导电磁波在饱和无粘性土中的传播特性, 可以得到下述模型。

基本假定如下:

- (1) 土介质在宏观上表现为各向同性;
- (2) 在低于光频的电磁波作用下, 介质发生电子极化和其他形式极化, 其他形式的极化在极化结果上可等效为一定量的电子极化;
- (3) 土的磁导率等于真空中的磁导率;
- (4) 在电磁波传播过程中, 土的介电常数 ϵ 和电导率 σ 保持不变。
- (5) 由于电磁波的交变磁场强度相对于恒定磁场 B_0 要小得多, 而且也远小于电场力的作用, 故在计算总的受力时, 忽略交变电磁场的作用。

电磁波的基本传播方程——麦克斯韦方程包括以下四个方程。

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}_c \quad (4)$$

其中 \vec{D} 为电通量密度 ($C \cdot m^{-2}$), \vec{B} 为磁通量密度 ($Wb \cdot m^{-1}$), \vec{E} 为电场强度 ($V \cdot m^{-1}$), \vec{H} 为磁场强度 ($A \cdot m^{-1}$), ρ_e 为电荷密度 ($C \cdot m^{-3}$), \vec{J}_c 为电流密度 ($A \cdot m^{-2}$)。

电子极化所需时间极短, 因此, 即使电场以光频变化, 电子极化也能及时跟上。此时, 对应于电子极化的介电常数为介质光频介电常数 ϵ_∞ 。^[11]

$$\frac{\epsilon_\infty - 1}{\epsilon_\infty + 2} = \frac{1}{3\epsilon_0} N_e \alpha_e \quad (5)$$

其中 N_e 为电介质每单位体积的分子数, α_e 为电子极化率。

对于其他形式的极化, 用相同极化效果的电子极化进行等效, 但其极化速度并不如真实的电子极化那样快, 因此通过对电子受力分析来研究。自然状态下的介质不可避免地处于空间电磁场的作用中, 其中最典型的是地磁场。为了考虑这些因素, 设考察的介质中存在一个与电磁波传播方向一致的外加恒定磁场 B_0 , B_0 和传播方向一致。介质中的电子不但受电场力的作用, 而且还受磁场力的作用; 同时, 由于电子在电场的作用下发生位移极化后, 将受到带反号电荷的粒子的回复力作用, 因此电子总的受力为:

$$\vec{F} = -q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}_0) + k \vec{s} \quad (6)$$

其中 q 是电子的电量, \vec{v} 是电子运动的平均速度, k 为回复力弹性系数, \vec{s} 为电子的位移。电子在土中电子状态如图 1 所示。

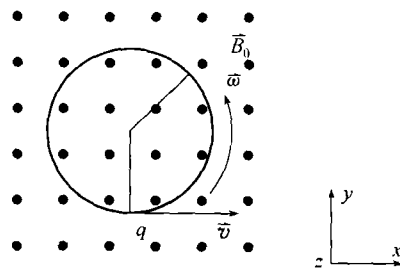


图 1 电磁场作用下土中电子状态

若外加电场在空间传播, 电子将在外加电场作用下运动。设在 x 方向上, 电子离开正离子的位移为 x , 根据牛顿第二定律有,

$$\begin{aligned} \vec{F}_x &= m \frac{\partial^2 \vec{x}}{\partial t^2} = -q(\vec{E}_{xloc} + \vec{v} \times \vec{B}_0) + k \vec{x} \\ &= -q\left(\vec{E}_{xloc} + \frac{\partial \vec{y}}{\partial t} \times \vec{B}_0\right) + k \vec{x} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, m 是电子的质量, \vec{E}_{xloc} 表示电子受到的 x 方向

上的有效电场。同样可得到 y 方向上的关系式。

由于电子在 z 方向上的速度与 \vec{B}_0 方向一致,所以只与电场力有关,

$$m \frac{\partial^2 \vec{z}}{\partial t^2} = -q\vec{E}_{zloc} + k\vec{z} \quad (8)$$

因此式(7)、式(8)可改写成下列复数分量形式:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \vec{x}}{\partial t^2} = -\frac{q}{m} \vec{E}_{xloc} - \vec{\omega}_c \cdot \frac{\partial \vec{y}}{\partial t} + k \frac{\vec{x}}{m} \\ \frac{\partial^2 \vec{y}}{\partial t^2} = -\frac{q}{m} \vec{E}_{yloc} - \vec{\omega}_c \cdot \frac{\partial \vec{x}}{\partial t} + k \frac{\vec{y}}{m} \\ \frac{\partial^2 \vec{z}}{\partial t^2} = -\frac{q}{m} \vec{E}_{zloc} + k \frac{\vec{z}}{m} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\vec{\omega}_c = \frac{q}{m} \vec{B}_0$ 称为回旋角频率。

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_0 E_x + P_x \\ \epsilon_0 E_y + P_y \\ \epsilon_0 E_z + P_z \end{bmatrix}$$

$$= \epsilon_0 \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_0 E_x + \frac{Nq^2}{m} \cdot \frac{(\omega + k/(m\omega))}{\omega(\omega + k/(m\omega))^2 + \omega \cdot \omega_c^2} E_{xloc} - j \frac{Nq^2}{m} \cdot \frac{\omega_c}{\omega} \cdot \frac{1}{(\omega + k/(m\omega))^2 + \omega_c^2} E_{yloc} \\ -j \frac{Nq^2}{m} \cdot \frac{\omega_c}{\omega} \cdot \frac{1}{(\omega + k/(m\omega))^2 + \omega_c^2} E_{xloc} + \epsilon_0 E_y + \frac{Nq^2}{m} \cdot \frac{(\omega + k/(m\omega))}{\omega(\omega + k/(m\omega))^2 + \omega \cdot \omega_c^2} E_{yloc} \\ \epsilon_0 E_z + \frac{Nq^2}{m} \cdot \frac{1}{\omega^2 + k} E_{zloc} \end{bmatrix} \quad (11)$$

如果外加磁场消失,即 $\vec{B} = 0$,则由 $\vec{\omega}_c = \frac{q}{m} \vec{B}_0$,

得出 $\vec{\omega}_c = 0$,于是

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_0 E_x + \frac{Nq^2}{(m\omega^2 + k)} E_{xloc} \\ \epsilon_0 E_y + \frac{Nq^2}{(m\omega^2 + k)} E_{yloc} \\ \epsilon_0 E_z + \frac{Nq^2}{(m\omega^2 + k)} E_{zloc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

因为土介质在宏观上表现为各向同性,所以 $\epsilon = \epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_z$ 。求解 ϵ 的问题转化为求 \vec{E}_{loc} 的问题。

考虑混合介质中各组分的相互退极化作用,某组分所受电场与外加电场有以下关系:

$$\vec{E}_i = \frac{3\epsilon}{\epsilon_i + 2\epsilon} \vec{E} \quad (13)$$

式中, ϵ 为混合介质介电常数, ϵ_i 为某组分介电常数。考虑该组分分子间相互作用,采用洛仑兹电场,有

$$\vec{E}_{loc} = \frac{\epsilon_i + 2}{3} \vec{E}_i \quad (14)$$

综合考虑电子极化和等效电子极化效果,对于混合

当电磁波随时间在 xy 平面按正弦变化时, $\frac{\partial}{\partial t}$ 的运算等效于乘 $j\omega$, j 为 -1 的平方根,代入求解,得

$$\begin{cases} x = \frac{q(\omega + k/(m\omega)) \cdot E_{xloc} - j\omega_c E_{yloc}}{m(\omega(\omega + k/(m\omega))^2 + \omega \cdot \omega_c^2)} \\ y = \frac{q(\omega + k/(m\omega)) \cdot E_{yloc} - j\omega_c E_{xloc}}{m(\omega(\omega + k/(m\omega))^2 + \omega \cdot \omega_c^2)} \\ z = \frac{qE_{zloc}}{(\omega^2 + k)m} \end{cases} \quad (10)$$

根据偶极矩密度定义, $\vec{P} = Nq\vec{x}$ (其中 N 为单位体积内偶极子数目, x 为正电荷与负电荷之间的距离, \vec{P} 的方向由负电荷指向正电荷),对于该等离子体,考虑到 $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon \vec{E}$ 。用矩阵形式表示如下:

介质,有

$$\begin{aligned} D_x &= \epsilon_0 E_x + \frac{Nq^2}{m\omega^2 + k} \frac{\epsilon(\epsilon + 2)}{\epsilon + 2\epsilon} E_x + 3\epsilon_0 \frac{(\epsilon_{\infty i} - 1)(\epsilon + 2)\epsilon}{(\epsilon_{\infty i} + 2)(\epsilon + 2\epsilon)} E_x \\ &= \epsilon_0 \epsilon_i E_x \end{aligned} \quad (15a)$$

对于某一组分,有

$$\begin{aligned} D_x &= \epsilon_0 E_x + \frac{Nq^2}{m\omega^2 + k} \frac{\epsilon(\epsilon_i + 2)}{\epsilon_i + 2\epsilon} E_x + 3\epsilon_0 \frac{(\epsilon_{\infty i} - 1)(\epsilon_i + 2)\epsilon}{(\epsilon_{\infty i} + 2)(\epsilon_i + 2\epsilon)} E_x \\ &= \epsilon_0 \epsilon_i E_x \end{aligned} \quad (15b)$$

考虑到混合介质中自由电子来源于各个组成成分,可按自由电子的体积比例得到

$$N = \sum_i \nu_i N_i \quad (16)$$

其中 ν_i 为某组分在混合介质中所占的体积百分比。联合式(15a)、式(15b)、式(16),可得

$$(2\sum_i A_i - 3)\epsilon^2 + (\sum_i A_i \epsilon_i + 4\sum_i A_i + 3)\epsilon + 2\sum_i A_i \epsilon_i = 0 \quad (17)$$

其中 $A_i = \frac{\epsilon_i - 1}{\epsilon_i + 2} \nu_i$, 令 $a = 2\sum_i A_i - 3$, $b = \sum_i A_i \epsilon_i + 4\sum_i A_i + 3$, $c = 2\sum_i A_i \epsilon_i$, 根据一元二次方程求根公式

$$\text{即可求得 } \epsilon = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \text{ (负根舍去)}。$$

将此模型应用于饱和土介质,则 ϵ_i 包括土颗粒介电常数 ϵ_s 和自由水介电常数 ϵ_{fw} , A_i 包括 A_s 和 A_{fw} , $A_s = \frac{\epsilon_s - 1}{\epsilon_s + 2} v_s = \frac{\epsilon_s - 1}{\epsilon_s + 2} \frac{1}{1 + e}$, $A_{fw} = \frac{\epsilon_{fw} - 1}{\epsilon_{fw} + 2} v_{fw} = \frac{\epsilon_{fw} - 1}{\epsilon_{fw} + 2} \frac{1}{1 + e}$, 其中 e 为饱和土介质的孔隙比。此时 a, b, c 均为 $\epsilon_s, \epsilon_{fw}, e$ 的函数。一般来说, ϵ_s 和 ϵ_{fw} 都是已知的,所以实际上此时 a, b, c 都是关于 e 的单一变量函数。取 $\epsilon_s = 4, \epsilon_{fw} = 81$, 则 $a = \frac{77}{83} \frac{e}{1 + e} - 2$, $b = \frac{6468}{83} \frac{e}{1 + e} + 7, c = \frac{12628}{83} \frac{e}{1 + e} + 4$, 代入求根公式即可得饱和土介质在某孔隙比下的介电常数 $\epsilon = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$ 。因此,如果已知饱和土样的孔隙比,则可求出土样的介电常数;反过来,如果已知饱和土样的介电常数,则可求出土样的孔隙比。这为现场测试饱和砂层孔隙比提供了依据。

2 模型试验

2.1 试验装置

试验设备除采用 Campbell Scientific 公司的 TDR100 测试系统之外,还设计了一组由试验筒、饱和系统和量测记录系统(天平、电脑)等组成的试验装置。试验筒直径 D 为 10.5 cm,高度 H 为 15 cm;分别采用三针式探头和六针式探头进行量测,两种探头的长度和形状如图 2 所示。

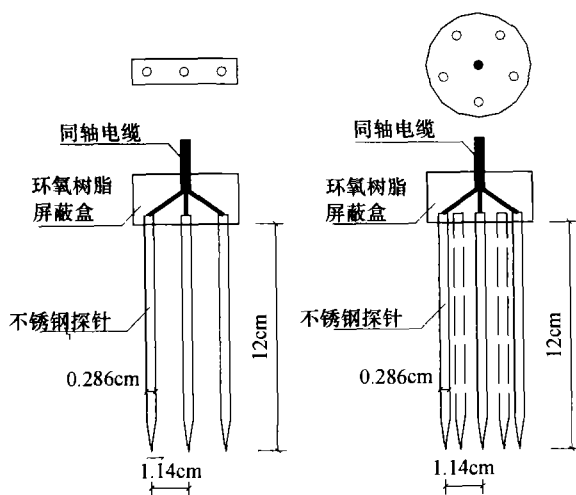


图 2 三针式探头和六针式探头示意图

2.2 试验材料

土样分别为标准砂和杭州地区代表性河砂以及

岩屑。其颗粒级配如图 3 所示。

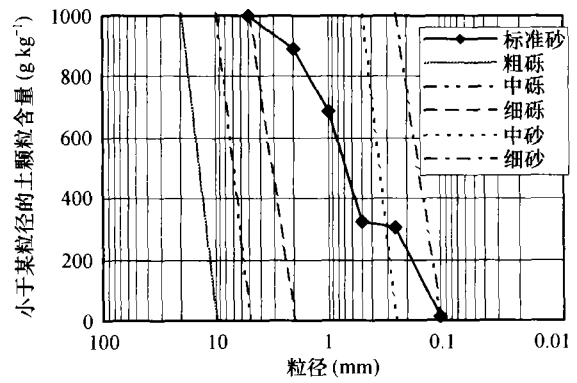


图 3 级配曲线

2.3 试验方法

首先配制不同级配的砂样,称重后煮沸 30 min 至 1 h 使其完全饱和,倒入试验筒中,静置。待上部液体澄清,用吸管小心吸去表面多余的水,然后将探头全部插入土样中测定其介电常数,最后读取体积和测量该土样的重量,计算其孔隙比。一次测试结束后,振动试验筒使土样逐渐密实,测量每振实一次后的介电常数和孔隙比。

2.4 试验结果与分析

饱和和无粘性土的三针式 and 六针式探头反射曲线如图 4 所示。对于某种土样,不同孔隙比下的反射曲线是明显不同的,说明孔隙比对饱和土的介电常数影响很显著。从反射曲线读取各土样在不同孔隙比下的介电常数绘于图 5 中。除砾石外,其他粒径的饱和砂样的试验结果基本在同一曲线上。随着土样孔隙比的增加,其介电常数也随之提高。当孔隙比从 0.3 提高到 0.9 时,介电常数也随着从 16 提高到 38,提高的幅度是比较显著的,也就是说,介电常数对于饱和砂样孔隙比的变化是很敏感的,因此可根据测得的介电常数的变化来计算饱和砂土的孔隙比变化。

由分析可知,不同粒径饱和砂孔隙比与介电常数关系曲线主要受到以下两个因素的影响:

(1) 砂粒本身的介电常数。饱和砂土是两相土介质,由砂粒和水组成。由于砂的晶体结构区别,其介电常数可能会有所不同,但变化不大,如图 6 所示。土颗粒介电常数在 3~5 范围内变动^[11]。由于砂粒本身的介电常数变化范围不大,其对饱和砂介电常数的影响也是比较小的。当砂粒介电常数从 3 增加到 5 时,饱和砂的介电常数变化值在 3 左右。随着孔隙比的提高,饱和砂的介电常数变化值会缓

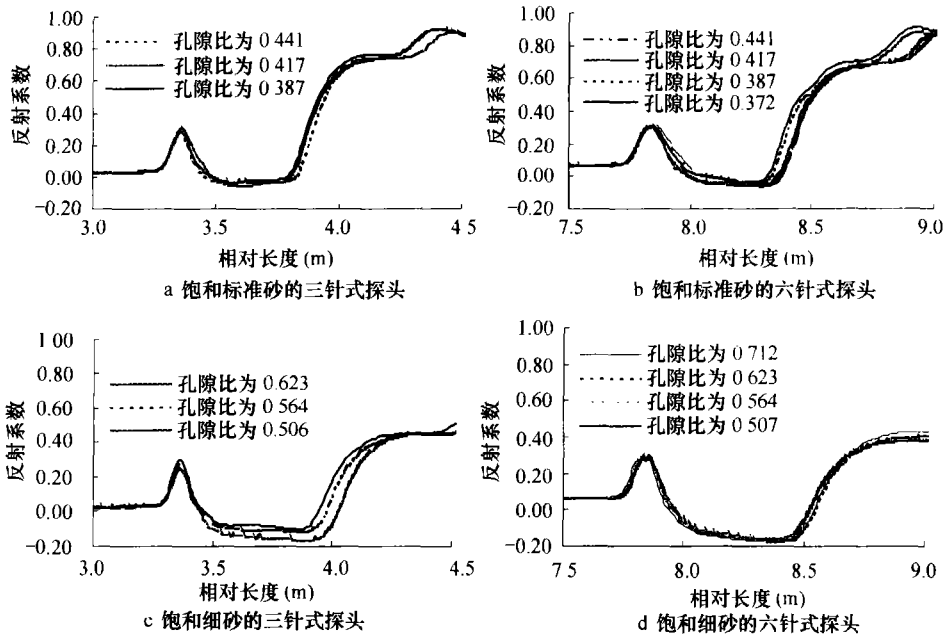


图4 不同砂质和探头的反射曲线

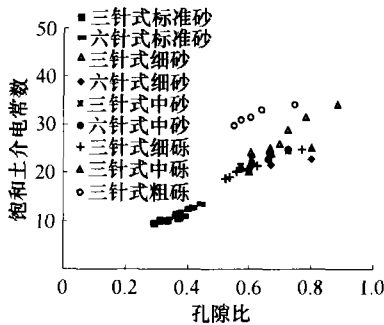


图5 不同孔隙比下无粘性土室内试验结果

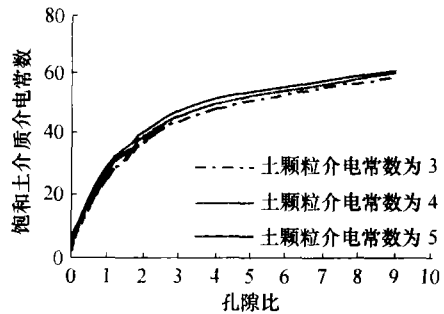


图6 饱和土介电常数与孔隙比关系图

慢增加,但幅度仍然不大。同时,从图中可以看出,在砂粒介电常数不变的条件下,如果饱和砂孔隙比变化0.1,其介电常数变化值在2左右,且随着孔隙比提高而缓慢减少。因此,在孔隙比较大时,砂粒介电常数对孔隙比测定值的影响较明显,必须加以注意;随着孔隙比的降低其影响程度降低。另一方面,由于砂粒本身的介电常数是由砂粒的晶体结构决定的,对于同一场地条件下的砂,其晶体结构基本一致,其介电常数的变化很小,因此其对孔隙比测定值的影响也很小。

(2) 砂粒粒径。理论上,砂粒粒径对测试曲线是没有影响的,但实际上并非如此。从图5中可以看出,砾石的试验曲线与其他土样的试验曲线是不一致的,可能的原因是:对于粒径过大的土样,在土

样中会产生积水现象导致局部测得介电常数过大;探头很难与土样紧密接触;试样的体积测不准。因此该方法是不适用于粒径过大的土样的,如砾石。

由于对大粒径土样测试的不准确性,我们暂且只对砂样的测试结果进行分析。将试验结果和模型曲线绘于图7中。与其他已有模型^{[12-16](1)}相比,本文模型曲线、Birchak模型曲线与Topp方程曲线和试验结果比较接近。在孔隙比较小时,Topp方程的计算结果与实测结果最为接近;在四个模型中,Maxwell-Garnett模型符合最差。

因此,在实际工程中,用同轴电缆电磁波反射技术现场测试饱和砂层孔隙比的方法是可行的。三针式探头和六针式探头的测试结果也比较接近,说明探头对饱和和无粘性土介电常数测量影响不大。

(1) Feng W. Simulation of time domain reflectometry based on soil dielectric properties. Doctoral Thesis, Purdue University, May 1999

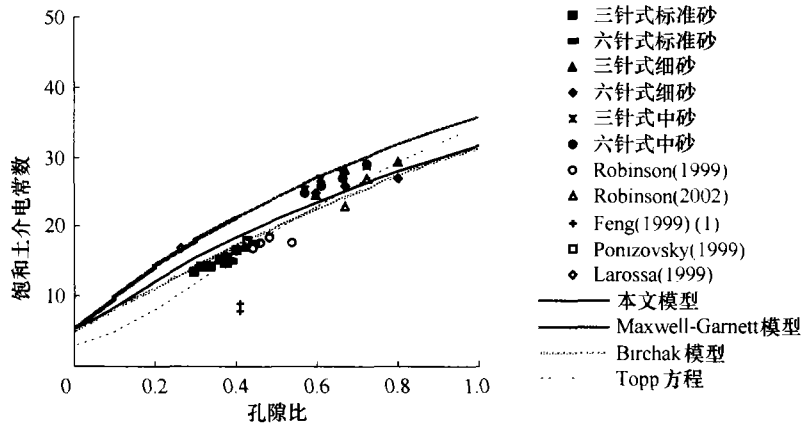


图7 无粘性土介电常数与孔隙比的关系图

3 结 论

1) 从电磁波的基本传播方程-麦克斯韦方程出发,根据土中粒子的极化机制,通过对土颗粒细观电磁运动特性分析,推导出电磁波作用下饱和和无粘性土的介电常数与孔隙比的关系模型。

2) 通过室内试验,选取不同种类不同粒径的砂样进行试验,结果表明不同粒径的饱和砂样孔隙比与介电常数关系曲线基本一致。

3) 本文模型和大部分实测结果符合得很好,这表明本文提出的模型是合理的。由于大粒径土样测试时的不准确性,本文模型与砾石的测试结果存在差异。

4) 三针式探头和六针式探头的测试结果比较接近,探头对饱和和无粘性土介电常数测量影响不大。

5) 利用同轴电缆电磁波反射技术测定饱和砂样孔隙比是可行的,但还需进一步现场试验的验证。

参 考 文 献

- [1] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 1980, 16(3): 574 ~ 582
- [2] Sihvola A. *Electromagnetic Mixing Formulas and Applications*. London: Institution of Electrical Engineers, Stevenage, Herts., 1999. 161 ~ 172
- [3] De Loor G P. Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water. *J. Microwave Power*, 1968, 3(2): 67 ~ 73
- [4] Birchak J R, Gardner C G, Hipp J E. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture. *Proc. IEEE*, 1974, 62(1): 93 ~ 98
- [5] Kraszewski A, Kulinski S, Matuszewski W. Dielectric properties and a model of biphasic water suspension at 9.4 GHz. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(4): 1 275 ~ 1 277
- [6] Wobschall D. A theory of the complex dielectric permittivity of soil containing water: The semidisperse model. *IEEE Trans. on Geoscience Electronics*, 1977, GE15(1): 49 ~ 58
- [7] Wang J R. The dielectric properties of soil-water mixtures at microwave frequencies. *Radio Science*, 1980, 15(5): 977 ~ 985
- [8] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T. Microwave dielectric behaviour of wet soil part II: Dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, GE23(1): 35 ~ 46
- [9] Whalley W R. Considerations on the use of time domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. *J. Soil Sci.*, 1993, 44(1): 1 ~ 9
- [10] Heimovaara T J. Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms 1. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils. *Water Resour. Res.*, 1994, 30(2): 189 ~ 199
- [11] 李翰如编. *电介质物理导论*. 成都: 成都科技大学出版社, 1990
- [12] Carmichael R S. *Handbook of Physical Properties of Rocks*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1982
- [13] Robinson D A, Gardner C M K, Cooper J. D. Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: Comparison, including the effects bulk soil electrical conductivity. *Journal of Hydrology*, 1999, 223: 198 ~ 211
- [14] Robinson D A, Cooper J D, Gardner C M K. Modelling the relative permittivity of soils using soil hygroscopic water content. *Journal of Hydrology*, 2002, 255: 39 ~ 49
- [15] Ponizovsky A A, Chudinova S M, Pachepsky Y A. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. *Journal of Hydrology*, 1999, 218: 35 ~ 43
- [16] Larossa R C G, da Cunha Neto J A B, Prata A T. Using time domain reflectometry to measure moisture content discontinuity of an artificial soil. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1999, 20: 25 ~ 33