

用非饱和三相孔弹模型研究浅层土壤中地震波的传播特性*

丁卫 吴文雯 王驰† 吴智强

(上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

(2014年4月18日收到; 2014年7月12日收到修改稿)

研究浅层土壤中声波耦合的地震波的传播特性, 用于声波探雷技术的机理分析. 根据浅层土壤具有孔隙度和可压缩性的特点, 利用非饱和三相孔隙介质中的地震波模型, 研究了土壤孔隙度、含水饱和度等参数对地震波传播特性的影响. 计算结果显示: 在给定的参数条件下, 地震波的传播速度和衰减系数均随频率的增加而增加; 纵波的传播速度随孔隙度的增加而减小, 横波的传播速度随孔隙度的增加而增加; 地震波的传播特性随含水饱和度的增加变化比较复杂. 通过对计算结果与已发表实验结果的分析, 讨论了解析方法的可行性, 为声-地震耦合机理及其在声波探雷研究中的应用提供了一定的理论基础.

关键词: 声-地震耦合, 地震波, 孔隙度, 声波探雷

PACS: 43.40.At, 43.28.En, 87.85.gp, 87.15.La

DOI: 10.7498/aps.63.224301

1 引言

当低频声波入射到浅层地表时, 大部分声波能量会因为空气与土壤的声阻抗差较大而反射回空中, 但因浅层土壤孔隙度的存在, 也会有相当一部分能量因土壤流体与固相基质之间的动量和黏滞摩擦作用而耦合到地下, 引起地表的振动, 并激发出快纵波、慢纵波、横波、瑞利波等不同成分的地震波, 这种现象称为声-地震耦合^[1]. 若地下有埋藏地雷, 则会使传播至雷体表面的地震波发生反射或散射现象^[2]; 另一方面, 地雷因其柔性较大, 能与其上方的土壤构成等效的有阻尼“质量-弹簧”系统, 在地震波能量作用下发生谐振作用. 这种声波激发地震波、地震波遇到地雷时的反射以及土壤-地雷系统的谐振等作用过程, 最终使反射回地表的地震波能量增强, 引起地表的异常振动, 通过检测这种异常振动可进一步判断掩埋地雷的存在性, 这是声波探雷技术的基本原理^[3-6].

根据声波探雷技术的原理, 声-地震耦合是声

波探雷方法的重要理论基础, 尤其是地震波在浅层土壤中的传播特性对声波探雷的地表振动检测信号有决定性影响. 因此, 声-地震耦合机理是声波探雷方法研究中的重要内容. 然而, 由于土壤介质的复杂性等原因, 至今尚无完整的声-地震耦合理论体系, 其发展经历了一段历史时期. 1956年, Biot^[7,8]建立了双相孔隙介质理论, 用于分析地震波的特性, 并指出孔隙流体的黏滞力是弹性波在孔隙介质传播过程中发生衰减的主要机制, 即黏滞性耗散机制. Biot理论描述了宏观的流体流动, 而含流体孔隙介质中还存在着一种喷射流动. 据此, Dvorkin和Nur^[9]提出了比Biot模型更准确的Biot-squirt模型. Stern等^[10]以及Berryman^[11]在Biot双相介质理论的基础上, 建立了地震波传播模型, 该模型可用来分析流体饱和介质中波的传播特性. Denneman等^[12]建立了一系列饱和双相介质中地震波传播的模型, 分析了孔隙状态与地震波传播速度和衰减的关系. 土壤是由固、液、气三相组成, 非饱和三相介质模型能够更准确地描述地震波

* 国家自然科学基金(批准号: 41104065)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wangchi@shu.edu.cn

的传播特性. Mochizuki^[13]利用等效流体模型, 将频率、流体饱和度和渗透率对非饱和多孔介质中弹性波性质的影响进行了研究, 但等效流体模型的本质是将非饱和介质简化为双向介质模型, 受到很多条件的限制. Santos等^[14]推导了Biot三相介质波动方程, 表明非饱和多孔介质中存在三种压缩波(P1波、P2波、P3波)和一种剪切波(S波), P1波、P2波和S波分别与双相介质中的快纵波、慢纵波和横波对应, P3波是一种与毛细管压力有关的能量很微弱的慢纵波. Beresnev^[15]对Santos方程进行了修正, 考虑孔隙流体压力与体积模量的关系, 并进行了实验验证. 此外, 国内的蔡袁强等^[16]以及李保忠^[17]综合考虑了非饱和多孔介质中固、液、气三相之间的惯性耦合效应、黏性耦合效应和毛细作用等因素, 对频率和含水饱和度等参数对纵波衰减的影响进行研究.

本文在已有研究成果的基础上, 在尚无完善的描述非固结地表土壤介质模型的情况下, 尝试用修正的Biot理论研究浅层地表土壤中地震波的传播特性. 把浅层地表土壤等效为非饱和三相孔隙介质, 利用非饱和三相孔隙介质中的地震波模型解析浅层土壤中地震波的传播特性方程, 数值分析不同地震波的传播速度和衰减系数随声波频率、土壤孔隙度、土壤含水饱和度等参数之间的关系, 并进行计算结果与已发表实验结果进行比较分析, 为声-地震耦合机理以及声波探雷信号的特征分析提供一定的理论依据.

2 浅层土壤中地震波传播特性

浅层土壤系固相、液相和气相构成的三相媒质, 具有可压缩性. 当低频声波激励地表时, 会耦合出慢纵波、快纵波、横波等不同成分的地震波. 研究表明^[3-6], 由声波激发的地震波能量很弱, 在地表振动检测设备灵敏度一定的情况下, 声耦合的地震波遇到地雷时发生反射或散射现象, 这种反射或散射的地震波能量传回地表时一般不足以判定埋藏地雷的存在性, 但地雷因柔性较大而产生的共振机制, 致使反射的地震波能量增强, 这种声波耦合的地震波的反射作用以及地雷的谐振机制共同构成了声波探雷技术的原理基础. 在声波激发的地震波能量很弱的情况下, 本文把浅层土壤等效或简化为非饱和三相孔隙介质, 利用文献^[17]中描述的非饱和三相孔隙介质中的地震波模型, 进行浅层土壤中

声波耦合的纵波和横波的特性研究. 首先, 定义 \mathbf{u} 为固体骨架的位移, \mathbf{v} , \mathbf{w} 分别为孔隙水和孔隙气体相对于固体骨架的位移, 低频地震波的波动方程可表示为

$$\begin{aligned} & \mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda_c + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) \\ & + M \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) + N \nabla(\nabla \cdot \mathbf{w}) \\ & = \frac{\partial^2 (\rho \mathbf{u} + \rho_w \mathbf{v} + \rho_a \mathbf{w})}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & D_1 \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + D_2 \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) + D_3 \nabla(\nabla \cdot \mathbf{w}) \\ & = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\rho_w \mathbf{u} + \frac{\rho_w}{\beta S_w} \mathbf{v} \right) + \frac{\eta_w}{\kappa_w} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & D_4 \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + D_5 \nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) + D_6 \nabla(\nabla \cdot \mathbf{w}) \\ & = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\rho_a \mathbf{u} + \frac{\rho_a}{\beta S_a} \mathbf{w} \right) + \frac{\eta_a}{\kappa_a} \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t}. \end{aligned} \quad (3)$$

波动方程中各参数的表达式以及具体含义参考附录说明. 为求解地震波波动方程, 将位移矢量 \mathbf{u} , \mathbf{v} , \mathbf{w} 分别用标量势 φ 和矢量势 ϕ 表示如下:

$$\mathbf{u} = \nabla \varphi_s + \text{curl} \phi_s, \quad (4)$$

$$\mathbf{v} = \nabla \varphi_w + \text{curl} \phi_w, \quad (5)$$

$$\mathbf{w} = \nabla \varphi_a + \text{curl} \phi_a. \quad (6)$$

设纵波和横波的平面波解为

$$\varphi_k = A_k \exp[i(\omega t - \mathbf{l}_p \cdot \mathbf{r})] \quad (k = s, w, a), \quad (7)$$

$$\phi_k = A_k \exp[i(\omega t - \mathbf{l}_s \cdot \mathbf{r})] \quad (k = s, w, a), \quad (8)$$

其中, \mathbf{l}_p 和 \mathbf{l}_s 分别为纵波和横波的波矢量; \mathbf{r} 表示波的位置矢量. 将(4)–(8)式代入(1)–(3)式中, 并分别对其求散度和旋度, 化简整理可得到如下形式的纵波和横波的弥散方程:

$$A \mathbf{l}_p^6 + B \mathbf{l}_p^4 + C \mathbf{l}_p^2 + D = 0, \quad (9)$$

$$E \mathbf{l}_s^2 + D = 0, \quad (10)$$

式中 A , B , C , D , E 等参数的表达式见附录说明. 通过求解(9)和(10)式可以得到三种纵波的波矢量 \mathbf{l}_{p1} , \mathbf{l}_{p2} , \mathbf{l}_{p3} , 一种横波的波矢量 \mathbf{l}_s , 四种波矢量都是复数. 其中实部表示地震波传播的波速:

$$c_j = \frac{\omega}{\text{Re}(\mathbf{l}_j)} \quad (j = [p_1, p_2, p_3, s]); \quad (11)$$

虚部表示地震波的衰减, 衰减系数可以用下式表示, 单位为 $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$:

$$\alpha_j = -8.686 \text{Im}(\mathbf{l}_j) \quad (j = p_1, p_2, p_3, s). \quad (12)$$

为了进一步研究孔隙度对地震波传播特性的影响, 下面引入土壤孔隙度与固体骨架体积模量之间的关系. 土壤的固体颗粒体积模量 K_g 是土壤的

固有参数, 与固体骨架体积模量 K_s 和孔隙度 β 之间具有以下的近似关系^[18]:

$$K_s = \frac{1 - \beta}{1 + \zeta\beta} K_g, \quad (13)$$

其中, ζ 由固体颗粒的泊松比 ν_m 决定, 表达式为 $\zeta = (1 + \nu_m)/[2(1 - 2\nu_m)]$.

上述地震波特性和方程隐含了声波频率以及土壤的孔隙度、含水饱和度、体积模量、拉梅常数等参数的影响. 下面用数值方法具体分析浅层土壤中地震波传播速度和衰减系数与声源频率、土壤孔隙度、土壤含水饱和度等参数之间的关系, 这些参数及其影响规律是声波探雷信号研究中的重要内容.

3 数值分析结果与讨论

根据浅层土壤中地震波波动方程以及纵波和横波的弥散方程, 利用 Matlab 软件进行数值分析. 选择细沙作为土壤样品, 设置空气残余饱和度 S_{a0} 和束缚饱和度 S_{w0} 的值为 0.1, 其他相关参数如表 1 所示^[19].

3.1 声波频率与波速、衰减的关系

设定浅层土壤的孔隙度为 0.4, 含水饱和度 S_w 的值为 0.2, 在 10—1500 Hz 范围内分别对四种波的波速和衰减系数进行数值分析, 结果如图 1 所示. 根据图 1, 四种波的波速都随着频率的增大而增大.

其中, P1 波的波速随频率变化比较慢; P2 波的波速明显小于 P1 波的波速, 但是随着频率变化相对较快, 并且随着频率的增加 P2 波波速的增加幅度逐渐减慢; P3 波波速在 10—1500 Hz 范围内都小于 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 远远小于其他三种波. 从图 1(c) 中曲线的趋势也可以看出, 随着频率的增加, P3 波波速的增加幅度也逐渐减慢; S 波的波速受频率变化影响最小. 在地震波衰减方面, 四种波的衰减都随频率的增加而增加, 其中 P1 波和 S 波的衰减在 200 Hz 以下的低频段内很小, 虽然在高频段内增加明显, 但整体数值仍然较小; P2 波和 P3 波都有较大的衰减, P3 波的衰减系数远远大于其他三种波.

表 1 土壤参数^[19]

物理量		数值
固体颗粒	体积模量 K_g/Pa	7×10^9
	泊松比 ν_m	0.2
	密度 $\rho_g/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2650
固体框架	剪切模量 μ/Pa	2.61×10^7
	渗透率 κ/m^2	1×10^{-10}
水	体积模量 K_w/Pa	2.25×10^9
	密度 $\rho_w/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1000
	黏滞系数 $\eta_w/\text{Pa}\cdot\text{s}$	1.0×10^{-3}
空气	体积模量 K_a/Pa	1.01×10^4
	密度 $\rho_a/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.28
	黏滞系数 $\eta_a/\text{Pa}\cdot\text{s}$	1.62×10^{-5}

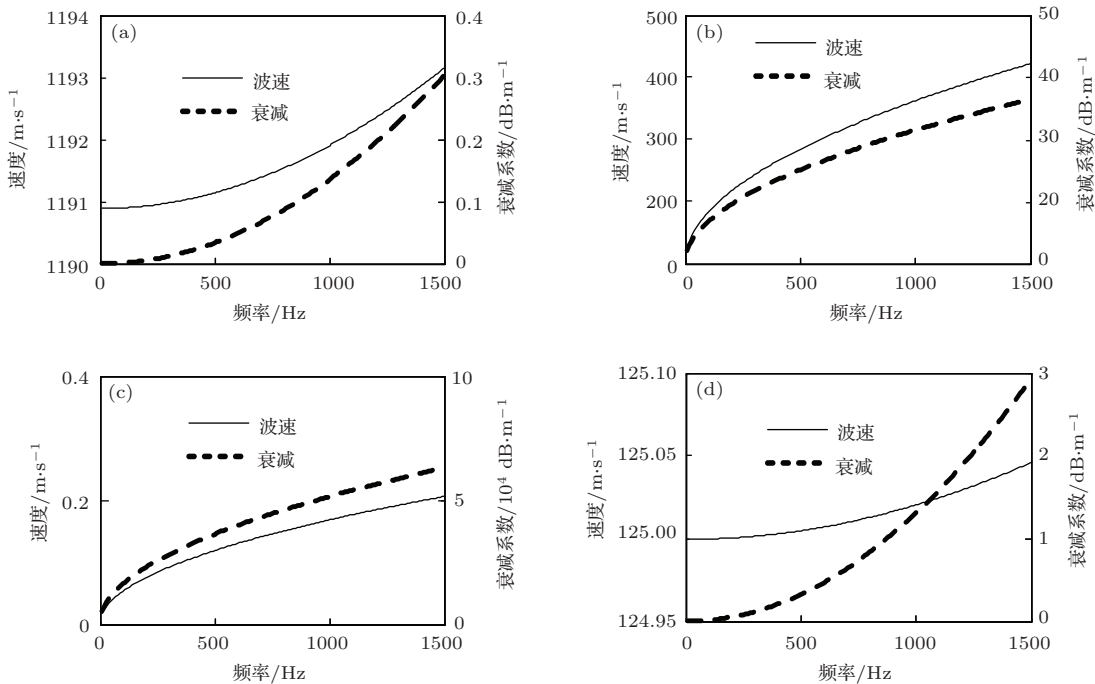


图 1 P1, P2, P3, S 波的波速和衰减系数与频率的关系 (a) P1 波; (b) P2 波; (c) P3 波; (d) S 波

3.2 土壤孔隙度与波速、衰减的关系

当土壤的孔隙度达到一定值时, 固相和流相之间的组成状态将会发生变化, 从流相存在于固体颗粒的孔隙中变为固体颗粒悬浮在流相中. 对于后一种状态, 本文研究的地震波传播特性方程将不再适用. 本文对 $0.1 < \beta < 0.6$ 范围内四种波的波速和衰减进行数值分析, 取介质含水饱和度 S_w 的值为 0.2, 波的频率为 100 Hz. 根据图 2 所示的计算结果, 除 S 波外其余三种纵波的波速都随着孔隙度的增大而减小, 孔隙度变化对地震波传播速度有很大的影响. 在地震波衰减方面, P2, P3 波的衰减系数随孔隙度的增加而增加, P1, S 波的衰减系数随孔隙度的增加而减小. P1, S 波的整体衰减系数较小, 其中 P1 波在整个孔隙度变化范围内的衰减系数最小; 当孔隙度从 0.1 变化为 0.6 的过程中, P2 波的衰减系数从 $4 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$ 左右变为 $11 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$, 增加近三倍; P3 波的衰减系数最大, 其值随孔隙度的增加有较大幅度的增加.

3.3 土壤含水饱和度与波速、衰减的关系

设定土壤孔隙度为 0.4, 在含水饱和度 $0.1 < S_w < 0.9$ 的范围内, 分别计算了四种波在频率为 100 Hz 时的波速和衰减随饱和度的变化, 结果如图 3 所示. 根据图 3, P1 波的波速随含水饱和度的增加而减小; P2 波的波速在饱和度变化范围内有

较大的变化, 在 $0.1 < S_w < 0.2$ 范围内变化尤其明显; P3 波的波速在 $S_w < 0.8$ 范围内随含水饱和度的增加而增加, 在 $S_w > 0.8$ 范围内随含水饱和度的增加而减小; S 波的波速随含水饱和度的增加而减小, 但减小幅度相对较小. 在地震波衰减方面, P1 波的衰减系数在 $S_w < 0.5$ 范围内随含水饱和度增大而减小, 在 $S_w > 0.5$ 范围内随含水饱和度增大而增大; P2 波的衰减系数在 $S_w < 0.85$ 范围内随含水饱和度的增加而增加, 在 $S_w > 0.85$ 范围内随含水饱和度的增加而减小, 衰减系数较大, 最大值达到 $140 \text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$, 且最大值和最小值相差 10 多倍; P3 波的衰减系数随含水饱和度增加而减小, 但其总体衰减系数较大; S 波的衰减系数随含水饱和度的变化很小, 在 $S_w < 0.62$ 范围内随含水饱和度的增加而减小, 在 $S_w > 0.62$ 范围内随含水饱和度的增加而增加.

4 数值计算结果的验证分析

地震波的波速和衰减特性可以通过实验进行测量, 但不同类型的地震波的传播特性有较大差别, 不同类型的地震波传播特性的测量难度亦不相同. 四种地震波中, P2 波、P3 波能量主要集中在流相中传播, 并且具有很大的衰减特性, 其测量难度要远远大于 P1 波. 据作者所知, 目前尚无公认的准确测量方法. 尤其是 P3 波能量很弱, 衰减非常严重, 在声波探雷研究中可以忽略其影响. P1 波和 S

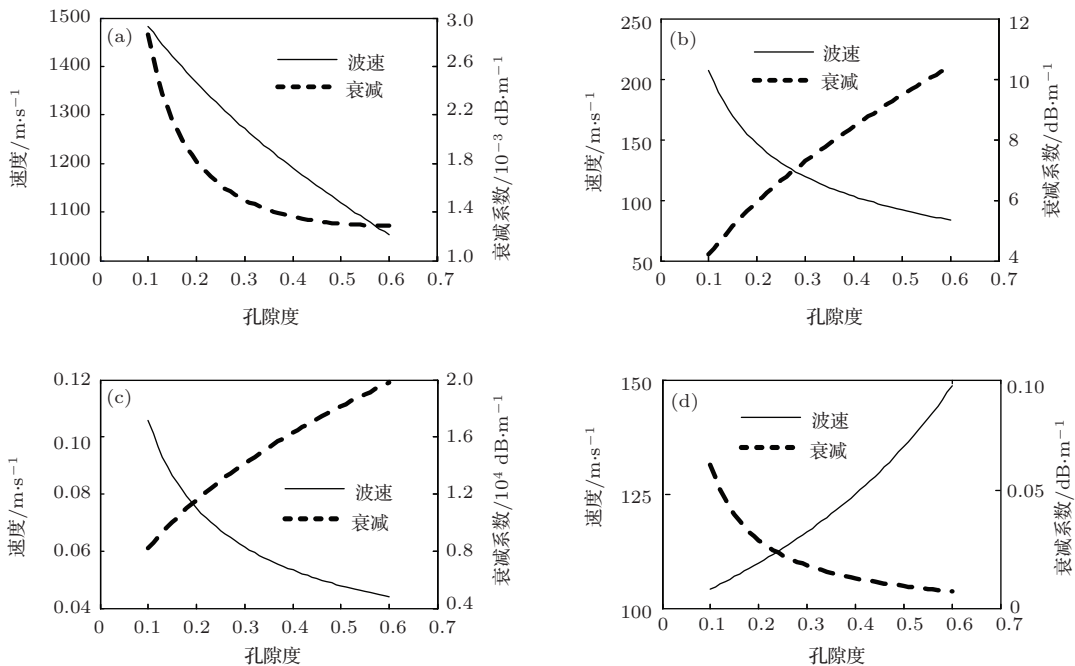


图2 P1, P2, P3, S 波的波速和衰减系数与孔隙度的关系 (a) P1 波; (b) P2 波; (c) P3 波; (d) S 波

波传播方向性强, 并且衰减较小, 容易通过实验方法进行检测. 需要说明的是, 由于目前的实验数据较为分散, 不同实验针对的土壤样品不尽相同, 并且土壤参数的准确测量较为困难, 很多实验结果中并没有给出相应的土壤样本的参数. 本文选择了认可度较高的沙土的参数进行了仿真, 与实验针对的土壤样品参数不同, 导致仿真结果与各个实验数据

在数值上存在一定的差异. 但实验数据表现出来的土壤参数与地震波的传播特性的关系和相应的仿真结果基本一致.

图4所示为文献[2, 20, 21]的实验结果. 图4(a)为文献[20]采用应力-应变技术在实验室条件下测得的P1波和S波的波速与频率的关系; 图4(b)是文献[2]通过麦克风测得的P2波波速和

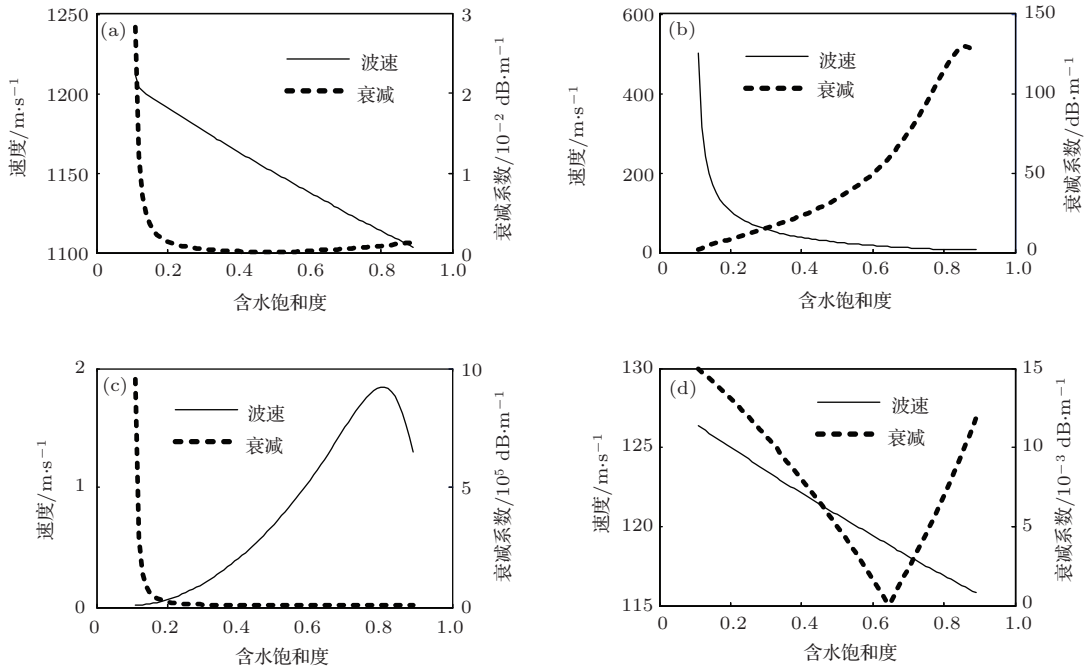


图3 P1, P2, P3, S波的波速和衰减系数与含水饱和度的关系 (a) P1波; (b) P2波; (c) P3波; (d) S波

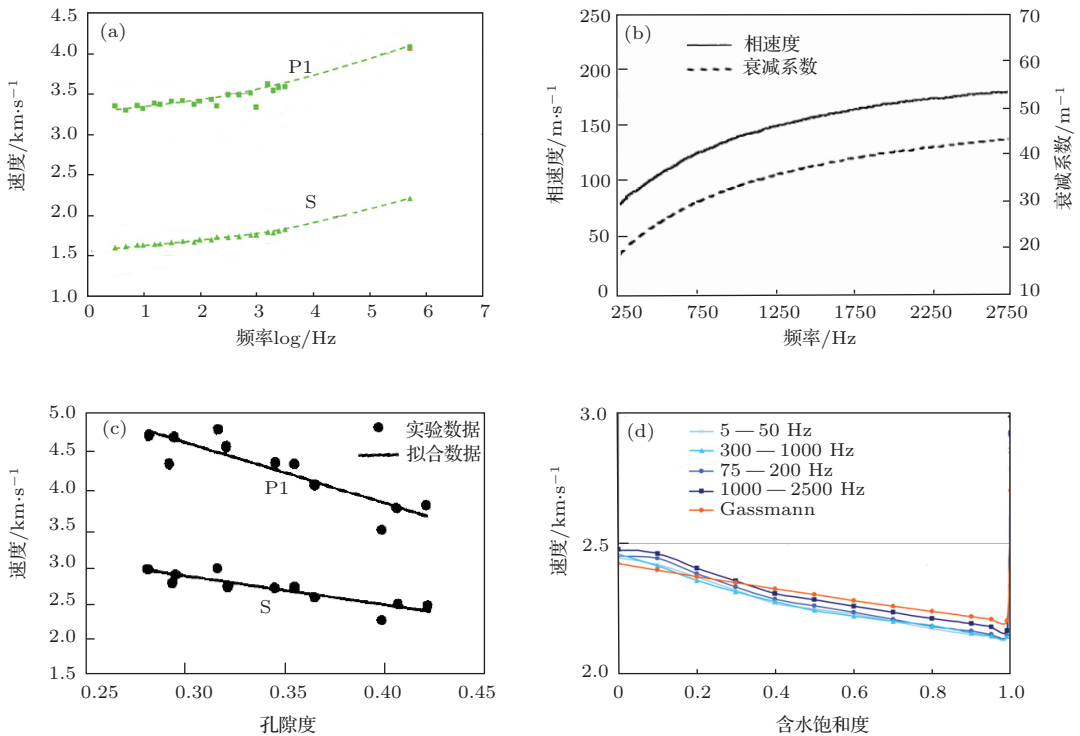


图4 (网刊彩色) 地震波传播特性与频率、孔隙度、含水饱和度的关系 [2,20,21] (a) P1波和S波波速与频率的关系; (b) P2波波速和衰减系数与频率的关系; (c) P1波和S波波速与孔隙的关系; (d) P1波波速与含水饱和度的关系

衰减与频率的关系. 根据图 4(a) 和图 4(b), 频率的增加会增加地震波的速度频散现象, 使得 P1 波、P2 波和 S 波等地震波的传播速度变快, 衰减变大, 实验结果与图 1 所示的仿真结果一致. 图 4(c) 是李亚林等^[21] 采用超声脉冲透射技术在实验室条件下测得的 P1 波和 S 波的波速与孔隙度的关系, 随着土壤孔隙度的增加, P1 波的传播速度减小, 与图 2(a) 通过理论计算绘制的曲线表现的规律一致, 但 S 波和图 2(d) 的理论计算相差较大. 关于这一差异的原因将在今后的研究中进行深入探索. 图 4(d) 是 Baztle 等^[20] 测得的 P1 波与含水饱和度的关系, 随着土壤含水饱和度的增加 P1 波的传播速度减小, 与图 3 所示的计算结果一致.

综合分析结果表明, P1 波能量主要存在于土壤固体颗粒中, 引起较强烈的固体相振动和较弱的流体相振动; P2 波弥散性较强, 能量主要集中于

孔隙流体中, 引起较强烈的流体相振动和较弱的固体相振动; P3 波的传播特性与 P2 波类似, 但衰减更为严重; S 波是一种剪切波, 能量主要集中在固体相. 本文通过对 P1 波和 S 波的传播特性进行仿真的结果与已发表的实验结果的对比分析, 结果表明: 虽然因土壤参数不同造成仿真结果与实验结果在数据上有一定的差异, 但遵循的基本传播规律一致, 从而在一定程度上验证了本文解析方法及数值计算结果的可靠性, 也为 P2 波、P3 波等地震波传播特性的进一步实验研究提供了一定的预言性结论: P2 波(即慢纵波)是声波探雷机理中起主要作用的能量成分, P3 波因能量很弱, 在声波探雷信号研究中可以忽略其影响. 表 2 归纳总结了本文通过数值计算得出的地震波传播特性与声波频率、土壤孔隙度、含水饱和度之间的关系.

表 2 地震波传播特性与声波频率、土壤孔隙度、含水饱和度之间的关系

地震波类型	特性	地震波传播特性变化趋势		
		声波频率增加	土壤孔隙度增加	含水饱和度增加
P1	波速	增加	减小	减小
	衰减	增加	减小	先减小后增加
P2	波速	增加	减小	减小
	衰减	增加	增加	先增加后减小
P3	波速	增加	减小	先增加后减小
	衰减	增加	增加	减小
S	波速	增加	增加	减小
	衰减	增加	减小	先减小后增加

5 结 论

浅层土壤中地震波传播特性是声-地震耦合机理以及声波探雷技术研究的重要内容, 本文在国内外已有研究成果的基础上, 利用非饱和三相孔弹模型解析了浅层土壤中地震波传播特性. 通过对地震波传播特性与声波频率、孔隙度和含水饱和度的关系进行数值计算, 分析了地震波波速和衰减系数的变化规律(表 2), 为声-地震耦合机理及声波探雷信号的特征分析提供了一定的理论依据.

然而, 由于土壤媒质的复杂性, 至今尚无普适的声-地震耦合理论体系, 本文选用的土壤模型、波

动方程构建以及相关参数设置, 目前仍是一种研究声-地震耦合机理的一种尝试或探索. 对于解析并归纳的地震波传播特性, 虽然部分与已发表的实验结果一致, 部分作为预言性结论对后续研究提供一定的理论和数据参考, 但研究方法仍是用一个固相固结的修正 Biot 三相介质孔弹模型研究地表松散的非固结的砂土中地震波传播, 其合理性和适用性需要进一步研究. 此外, 根据低频声学的特点和已有研究, 地雷与埋藏其中的土壤可构成等效的“质量-弹簧”共振体系, 但对松散的非固结的砂土与硬骨架或固结的坚硬介质相比而言, 其共振行为是否一致, 也是一个重要的理论难题. 在今后的声-地震耦合机理及其在声共振探雷的理论及实验研究中,

建议参考文献 [22—28] 中描述的研究方法及成果。

附录

S_w , 含水饱和度;
 S_a , 含气饱和度;
 S_{a0} , 空气残余饱和度;
 S_{w0} , 束缚饱和度;
 ρ_g, ρ_a, ρ_w , 分别表示固体相、空气和水的密度;
 ρ , 表示非饱和三相孔隙介质的平均密度, 表达式为
 $\rho = (1 - \beta)\rho_g + \beta S_w \rho_w + \beta S_a \rho_a$;
 β , 介质孔隙度;
 P , 等效孔隙压力, 表达式为 $p = \chi p_w + (1 - \chi)p_a$;
 p_a , 孔隙气体压力, 表达式为 $-p_a = \rho_a \ddot{u} + \frac{\rho_a}{\beta S_a} \ddot{w} + \frac{\eta_a}{\kappa_a} \dot{w}$;
 p_w , 孔隙水压力, 表达式为 $-p_w = \rho_w \ddot{u} + \frac{\rho_w}{\beta S_w} \ddot{v} + \frac{\eta_w}{\kappa_w} \dot{v}$;
 p_c , 毛细压力, 表达式为 $P_c = P_b \left(\frac{1 - S_{w0}}{S_w - S_{w0}} \right)^{1/\vartheta}$;
 p_b , 泡点压力, 表达式为 $P_b = 52\kappa^{-0.43}$;
 κ , 绝对渗透系数;
 η_a, η_w , 分别为孔隙气体和孔隙水的动力黏滞系数;
 κ_a, κ_w , 分别为不同饱和度下孔隙气体和孔隙水的相对渗透系数, 表达式分别为 $\kappa_a = \kappa(1 - S_e)^2(1 - S_e^{\frac{2+\vartheta}{\vartheta}})$ 和 $\kappa_w = \kappa(S_e)^{\frac{2+\vartheta}{\vartheta}}$, 其中 $S_e = (S_w - S_{w0})/(1 - S_{a0})$;
 ϑ , 为孔隙介质的尺寸分布参数;
 K_g , 固体颗粒体积模量;
 K_s , 固体骨架体积模量, $K_s = \mu + \frac{2}{3}\lambda$;
 λ , 一阶拉梅常数;
 μ , 剪切模量, 二阶拉梅常数;
 α , 考虑固体颗粒压缩变形时的修正系数, 表达式为 $\alpha = 1 - K_s/K_g$;
 δ_{ij} , 克罗内克尔 (Kronecker) 符号, 对正向应力为 1, 对剪切应力为 0;
 χ , 有效应力参数, 表达式为 $\chi = (p_c/p_b)^{-0.55}$;
 ω , 地震波频率;

$$A = (\lambda_c + 2\mu)(D_2D_6 - D_3D_5) + (D_3D_4 - D_1D_6)M + (D_1D_5 - D_2D_4)N;$$

$$B = - \left(\frac{\rho_w D_6}{\beta S_w} - \frac{\rho_a D_2}{\beta S_a} \right) (\lambda_c + 2\mu)\omega^2 - \rho_w \omega^2 (D_3D_4 - D_1D_6 + MD_6 + ND_5) - \rho_a \omega^2 (D_1D_5 - D_2D_4 + MD_3 + ND_2) - \rho \omega^2 (D_2D_6 - D_3D_5) + i \frac{\omega \eta_w}{\kappa_w} (\lambda_c D_2 + 2\mu D_6 - ND_4) + i \frac{\omega \eta_a}{\kappa_a} (\lambda_c D_2 + 2\mu D_6 - MD_1);$$

$$C = - \frac{\rho_w \rho_a}{\beta S_a} (M + D_1 - D_2)\omega^4$$

$$- \frac{\rho \rho_w}{\beta S_w} (N + D_4 - D_6)\omega^4 + (\rho_w \rho_a D_3 + \rho_w \rho_a D_5 - \rho_w^2 D_6 - \rho_a^2 D_2)\omega^4 + (\lambda_c + 2\mu) \left(\frac{\rho_w \rho_a \omega^4}{\beta^2 S_a S_w} - i \frac{\rho_w \eta_a \omega^3}{\beta \kappa_a S_w} - i \frac{\rho_a \eta_w \omega^3}{\beta \kappa_w S_a} - \frac{\eta_w \eta_a \omega^2}{\kappa_a \kappa_w} \right) + i \frac{\rho_a \eta_w}{\kappa_w} (D_4 - D_6 + N)\omega^3 + i \frac{\rho_w \eta_a}{\kappa_a} (D_1 - D_2 + M)\omega^3;$$

$$D = \left(\frac{\rho_w^2 \rho_a}{\beta S_a} + \frac{\rho_a^2 \rho_w}{\beta S_w} - \frac{\rho_w^2 \rho}{\beta S_a S_w} \right) \omega^6 + \frac{\rho \eta_a \eta_w}{\kappa_a \kappa_w} \omega^4 + i \left(\frac{\rho \rho_a \eta_w}{\beta S_a \kappa_w} + \frac{\rho \rho_w \eta_a}{\beta S_w \kappa_a} - \frac{\rho_w^2 \eta_w}{\kappa_w} - \frac{\rho_a^2 \eta_a}{\kappa_a} \right) \omega^5;$$

$$E = \frac{\mu \rho_w \rho_a \omega^4}{\beta^2 S_a S_w} - i \left(\frac{\mu \rho_w \eta_a}{\beta S_w \kappa_a} - \frac{\mu \rho_a \eta_w}{\beta S_a \kappa_w} \right) \omega^3 - \frac{\mu \eta_a \eta_w \omega^2}{\kappa_a \kappa_w};$$

$$\lambda_c = \lambda + \alpha \chi D_1 + \alpha(1 - \chi)D_4;$$

$$M = \alpha \chi D_2 + \alpha(1 - \chi)D_5;$$

$$N = \alpha \chi D_3 + \alpha(1 - \chi)D_6;$$

$$D_1 = (A_1 K_g + \beta) \frac{S_w C_{22} - S_a C_{12}}{C_{11} C_{22} - C_{12} C_{21}};$$

$$D_2 = \frac{C_{22}}{C_{11} C_{22} - C_{12} C_{21}};$$

$$D_3 = \frac{-C_{22}}{C_{11} C_{22} - C_{12} C_{21}};$$

$$D_4 = (A_1 K_g + \beta) \frac{S_a C_{22} - S_w C_{12}}{C_{11} C_{22} - C_{12} C_{21}};$$

$$D_5 = \frac{-C_{21}}{C_{11} C_{22} - C_{12} C_{21}};$$

$$D_6 = \frac{C_{11}}{C_{11} C_{22} - C_{12} C_{21}};$$

$$C_{11} = \frac{\beta S_w}{K_w} + \chi S_w A_1 - A_2;$$

$$C_{21} = \chi S_a A_1 + A_2;$$

$$C_{12} = S_w(1 - \chi)A_1 - A_2;$$

$$C_{22} = \frac{\beta S_a}{K_a} + S_a(1 - \chi)A_1 - A_2;$$

$$A_1 = \left(\frac{1 - \beta}{K_g} - \frac{K_s}{K_g^2} \right);$$

$$A_2 = - \frac{\beta \vartheta p_b^\vartheta (1 - S_{w0})}{p_c^{\vartheta+1}}.$$

参考文献

[1] Sabatier J M, Bass H E, Bolen L N 1986 *J. Acoust. Soc. Am.* **80** 646
 [2] Sabatier J M, Xiang N 1999 *International Society for Optics and Photonics* 215

- [3] Sabatier J M, Korman M S, Xiang N 2002 *Proc. SPIE* **4742** 695
- [4] Wang C, Liu Z G, Li X F, Sun F, Zhang G X 2008 *Acta Acustica* **33** 354 (in Chinese) [王驰, 刘志刚, 李醒飞, 孙斐, 张国雄 2008 声学学报 **33** 354]
- [5] Wang C, Yu Y J, Li X F, Liang G Q 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6319 (in Chinese) [王驰, 于瀛洁, 李醒飞, 梁光强 2010 物理学报 **59** 6319]
- [6] Wang C, Zhou Y Q, Shen G W, Wu W W, Ding W 2013 *Chin. Phys. B* **22** 124601
- [7] Biot M A 1956 *J. Acoust. Soc. Am.* **28** 168
- [8] Biot M A 1956 *J. Acoust. Soc. Am.* **28** 179
- [9] Dvorkin J, Nur A 1993 *Geophysics* **58** 524
- [10] Stern M, Bedford A, Millwater H R 1985 *J. Acoust. Soc. Am.* **77** 1781
- [11] Berryman J G 1981 *J. Acoust. Soc. Am.* **69** 416
- [12] Denneman A I M, Drijkoningen G G, Smeulders D M J, Wapenaar K 2002 *Geophysics* **67** 282
- [13] Mochizuki S 1982 *J. Geophys. Res.: Solid Earth* **87** 8598
- [14] Santos J E, Douglas J, Corberó J, Lovera O M 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **87** 1439
- [15] Beresnev I A 2013 *Geophysics* **79** 1
- [16] Cai Y Q, Li B Z, Xu C J 2006 *Chin. J. Rock Mech. Engineer.* **25** 2009 (in Chinese) [蔡袁强, 李保忠, 徐长节 2006 岩石力学与工程学报 **25** 2009]
- [17] Li B Z 2007 *Ph. D. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [李保忠 2007 博士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [18] Li C G, Wang S L, Zheng H, Ge X R 2007 *Rock and Soil Mechanics* **28** 293 (in Chinese) [李春光, 王水林, 郑宏, 葛修润 2007 岩土力学 **28** 293]
- [19] Chotiros N P 1998 *J. Acoust. Soc. Am.* **103** 2723
- [20] Batzle M L, Han D H, Hofmann R 2006 *Geophysics* **71** N1
- [21] Li Y L, He Z H, Huang D J, Shan Y M, Chen X C, Zhou A B 2001 *Natural Gas Industry* **21** 7 (in Chinese) [李亚林, 贺振华, 黄德济, 单钰铭, 陈晓超, 周阿波 2001 天然气工业 **21** 7]
- [22] Sun Q, Ueno K, Yu H, Kubo A, Matsuo Y, Misawa H 2013 *Light: Sci. Appl.* **2** e118 (doi:10.1038/lssa.2013.74)
- [23] Su Y H, Ke Y F, Cai S L, Yao Q Y 2012 *Light: Sci. Appl.* **1** e14 (doi:10.1038/lssa.2012.14)
- [24] Han H Y, Naranmandula, Shuang S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 059101 (in Chinese) [韩海英, 那仁满都拉, 双山 2012 物理学报 **61** 059101]
- [25] Fang G, Zhang B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154502 (in Chinese) [方刚, 张斌 2013 物理学报 **62** 154502]
- [26] Cui Z W, Liu J X, Yao G J, Wang K X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 084301
- [27] Tang X W, Sun Z F, Cheng G C 2012 *Chin. Phys. B* **21** 100201
- [28] Wu G C 2012 *Chin. Phys. B* **21** 120504

Propagation characteristics of seismic waves in shallow soil with the unsaturated three-phase poroelastic model*

Ding Wei Wu Wen-Wen Wang Chi[†] Wu Zhi-Qiang

(*Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China*)

(Received 18 April 2014; revised manuscript received 12 July 2014)

Abstract

In order to study the mechanism of acoustic landmine detection, the propagation characteristics of acoustically coupled seismic waves in shallow soil are investigated. Based on the porosity and compressibility of shallow soil, the influences of parameters including soil porosity and water saturation on the propagation properties of seismic wave are discussed with the model of seismic waves in unsaturated three-phase porous medium. The calculation results show that under the given parameters, the propagation velocity and attenuation coefficient of seismic wave increase with the increase of acoustic frequency. The propagation velocities of longitudinal waves and those of transverse waves respectively decrease and increase with the increase of soil porosity. In addition, the propagation characteristics of acoustically coupled seismic waves become complicated with the increase of water saturation. The feasibility of the analysis method is discussed by comparing the calculation results with the experimental data published previously. As a result, a theoretical foundation is provided for the acoustic-to-seismic coupling mechanism and its application in the study of acoustic resonance landmine detection.

Keywords: acoustic-to-seismic coupling, seismic wave, porosity, acoustic mine detection

PACS: 43.40.At, 43.28.En, 87.85.gp, 87.15.La

DOI: [10.7498/aps.63.224301](https://doi.org/10.7498/aps.63.224301)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41104065).

[†] Corresponding author. E-mail: wangchi@shu.edu.cn