

柳鸿博,周凤玺.非饱和土中剪切 S 波的传播特性分析[J].地震工程学报,2020,42(4):960-966.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.960

LIU Hongbo,ZHOU Fengxi.Propagation Characteristics of S-waves in Unsaturated Soil[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(4):960-966.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.960

非饱和土中剪切 S 波的传播特性分析

柳鸿博¹,周凤玺^{1,2}

(1.兰州理工大学土木工程学院,甘肃兰州730050;

2.西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心,甘肃兰州730050)

摘要:基于对非饱和多孔介质的研究成果,考虑孔隙中的液相和气相的相互影响,研究非饱和土地基中剪切 S 波的传播特性。通过非饱和土中固相、液相和气相的质量平衡方程、动量平衡方程和非饱和土有效应力原理,建立问题的弹性波动方程,经过理论推导给出非饱和土中剪切 S 波的弥散特征方程。通过数值算例分析剪切 S 波的波速和衰减系数随饱和度、频率和固有渗透系数等因素的变化规律。结果表明,剪切 S 波的波速几乎不受饱和度的影响,但其随着频率的增大而减小,随着固有渗透系数的增大先不变后增大;剪切 S 波的衰减系数随着饱和度和频率的增加均增大,而随着固有渗透系数的增大先不变后增大最后减小。

关键词:非饱和土;剪切 S 波;波速;衰减系数;弥散性

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)04-0960-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.960

Propagation Characteristics of S-waves in Unsaturated Soil

LIU Hongbo¹, ZHOU Fengxi^{1,2}

(1.School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2.Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Based on research into unsaturated porous media, propagation characteristics of S-waves in unsaturated soil were studied by considering the interaction between liquid and gas phases in the pores. Elastic wave equations were established according to the mass balance equation, the momentum balance equation, and the effective stress principle of unsaturated soil. The dispersion equation of S-waves in unsaturated soil was obtained after theoretical deduction. Finally, the influences of saturation degree, frequency, and intrinsic permeability coefficient on S-wave velocity and attenuation coefficient are discussed using numerical examples. Results showed that the wave velocity of S-waves is hardly affected by degree of saturation, but decreases with increasing frequency; it first remains unchanged, then increases with an increasing intrinsic permeability coefficient. The attenuation coefficient of S-waves increases with increasing saturation degree and frequency; however, with increasing intrinsic permeability coefficient, it first remains

收稿日期:2018-05-27

基金项目:国家自然科学基金(51368038);甘肃省陇原青年创新创业人才资助项目(17-059003)

第一作者简介:柳鸿博(1994-),男,硕士研究生,主要从事非饱和土波动理论方面的研究工作。E-mail:lhb_0803@163.com。

通信作者:周凤玺(1979-),男,博士,教授,主要从事岩土力学,复合材料结构力学方面的研究工作。E-mail:geolut@163.com。

unchanged, then increases, then finally decreases.

Keywords: unsaturated soils; S-waves; wave velocity; attenuation coefficient; dispersion characteristics

0 引言

随着科技的进步,不同学科和不同行业之间的联系越来越紧密,弹性波在多孔介质中的传播问题成为岩土工程、地震工程和声学等学科领域的重要研究课题。从 Biot 建立了饱和多孔介质中波的传播理论后,很多学者^[1-7]从不同的角度对饱和土中的弹性波传播问题进行了研究,在很大程度上促进了各科学领域对 Biot 理论的应用,并且对其正确性做出了检验。然而,非饱和土在工程建设中大量存在,其间存在着毛细压力和各相间的耦合效应,使得非饱和土中弹性波的传播特性明显有别于饱和土和单相介质。因此,很有必要考虑固体骨架和孔隙液体和气体构成的三相多孔介质,研究非饱和状态下弹性波的传播特性。Singh 等^[8]分析了平面剪切波在两种不同弹性孔隙介质空间分界面上的反射与透射问题;徐明江等^[9]基于混合物理论给出了体波的传播速度及衰减的解析表达式,并通过数值分析表明 4 种体波均具有不同程度的弥散性;陈炜昀等^[10]基于多相孔隙介质弹性理论,给出了非饱和土中不同弹性波的传播方程,并在数值算例中分别研究了各反射波与透射波的能量比例系数受入射频率、入射角度以及上下土层土体饱和度变化的影响情况;Tomar 等^[11]对无限范围内非饱和膨胀多孔弹性介质中的时间谐波的传播特性问题进行了研究。

虽然目前针对非饱和土中弹性波的传播做了一些研究,但仍不完善,已有的研究中均假设孔隙中液相和气相无相互影响。本文在已有研究的基础上,将液相方程和气相水分方程有机结合起来,通过质量平衡方程、动量平衡方程和有效应力原理等基本方程,经过理论推导得到剪切 S 波的波速和衰减系数的数学表达式,最后通过参数分析讨论了其波速和衰减系数随饱和度、频率和固有渗透系数等参数的变化规律。

1 控制方程

1.1 质量平衡方程

对于非饱和多孔介质,固体骨架间的孔隙由气相和液相共同填充。土的孔隙率用 n 表示,液相饱和度 S^l 和气相饱和度 S^g 是液相和气相分别占据的体积与孔隙总体积之比,故 $S^l + S^g = 1$ 。

忽略各相间的非对流项,固相、液相和气相的质量平衡方程可以表示^[12]:

$$\frac{\partial [(1-n)\rho^s]}{\partial t} + \nabla \cdot [(1-n)\rho^s \dot{\mathbf{u}}^s] = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{\partial (nS^l \rho_w^l)}{\partial t} + \nabla \cdot (nS^l \rho_w^l \dot{\mathbf{u}}^l) + \frac{\partial (nS^g \rho_w^g)}{\partial t} + \nabla \cdot (nS^g \rho_w^g \dot{\mathbf{u}}^g) = 0 \quad (1b)$$

$$\frac{\partial (nHS^l \rho_a^l)}{\partial t} + \nabla \cdot (nHS^l \rho_a^l \dot{\mathbf{u}}^l) + \frac{\partial (nS^g \rho_a^g)}{\partial t} + \nabla \cdot (nS^g \rho_a^g \dot{\mathbf{u}}^g) = 0 \quad (1c)$$

式中: \mathbf{u}^α ($\alpha = s, l, g$) 表示 α 相介质的位移矢量,其中 $\mathbf{u}^s, \mathbf{u}^l$ 和 \mathbf{u}^g 分别表示固相、液相和气相的位移矢量; ρ^s 表示固体颗粒的密度; ρ_i^α 表示 α 相中成分 i ($i = w, a$) 的密度,其中 $\rho_w^l, \rho_w^g, \rho_a^g$ 和 ρ_a^l 分别表示液态水、水蒸气、干气和溶解于液相中的空气的密度; H 为溶解度体积系数。式(1b)和(1c)中,将液态水分和气态水分,干燥气体和溶解气体有机结合起来。

忽略溶于孔隙水中的气体,且考虑 ρ_w^l 和 ρ_a^g 为常数,将式(1)展开,整理后可得到

$$-\frac{\partial n}{\partial t} + (1-n) \frac{1}{\rho^s} \frac{\partial \rho^s}{\partial t} + (1-n) \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^s = 0 \quad (2a)$$

$$n(\rho_w^l - \rho_w^g) \frac{\partial S^l}{\partial t} + n(1-S^l) \frac{\partial \rho_w^g}{\partial t} + [S^l \rho_w^l + (1-S^l) \rho_w^g] \frac{\partial n}{\partial t} + nS^l \rho_w^l \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^l + nS^g \rho_w^g \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^g = 0 \quad (2b)$$

$$(1-S^l) \rho_a^g \frac{\partial n}{\partial t} - n \rho_a^g \frac{\partial S^l}{\partial t} + n(1-S^l) \rho_a^g \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^g = 0 \quad (2c)$$

根据式(2a),孔隙比随时间的变化率可以表示为^[13]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \zeta \left(S^l \frac{\partial P_w}{\partial t} + S^g \frac{\partial P_g}{\partial t} \right) + \zeta K_s \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^s \quad (3)$$

式中: $\zeta = (\alpha - n)/K_s, \alpha = 1 - K/K_s$,其中 K_s 为土颗粒的体积模量, $K = \lambda + 2\mu/3$ 为土骨架的体积模量, λ 和 μ 为拉梅常数; P_w 和 P_g 分别为孔隙水压力和孔隙气压力。

气相中的水蒸气密度可以表示为^[14]:

$$\rho_w^g = RH \rho_w^g \quad (4)$$

式中: $RH = \exp\{-M_w \psi / (RT \rho_w^l)\}$ 表示相对湿度;

ρ_{w0}^g 为饱和水蒸气密度; $M_w = 0.018\ 016\ \text{kg/mol}$ 为水蒸气摩尔质量; $\psi = P_g - P_w$ 为基质吸力; $R = 8.214\ 4\ \text{J/mol/K}$ 为摩尔气体常数; T 为绝对温度。

结合式(4)可以得到水蒸气密度随时间的变化率

$$\frac{\partial \rho_w^g}{\partial t} = -\frac{\rho_w^g M_w}{\rho_w^l R T} \left(\frac{\partial P_g}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) \quad (5)$$

基于 V-G 模型^[15], 饱和度随时间的变化率可以表示为:

$$\frac{\partial S^l}{\partial t} = -\chi m d (1 - S_{w0}) (S_e)^{(m+1)/m} \cdot [(S_e)^{-1/m} - 1]^{(d-1)/d} \left(\frac{\partial P_g}{\partial t} - \frac{\partial P_w}{\partial t} \right) \quad (6)$$

式中: χ 、 m 、 d 均为 V-G 模型的材料参数; $S_e = (S^l - S_{w0}) / (S_{sat} - S_{w0})$ 表示有效含水饱和度, 其中 S_{w0} 为残余饱和度, S_{sat} 为饱和饱和度, 考虑 $S_{sat} = 1$ 。

将式(3)、(5)和(6)代入式(2b)和(2c)并将其展开, 可得到

$$A_{11} \frac{\partial P_w}{\partial t} + A_{12} \frac{\partial P_g}{\partial t} + A_{13} \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^l + A_{14} \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^g + A_{15} \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^s = 0 \quad (7a)$$

$$A_{21} \frac{\partial P_w}{\partial t} + A_{22} \frac{\partial P_g}{\partial t} + A_{24} \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^g + A_{25} \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^s = 0 \quad (7b)$$

式中:

$$A_{11} = -n \left[(\rho_w^l - \rho_w^g) A_{sl} - (1 - S^l) \frac{\rho_w^g M_w}{\rho_w^l R T} \right] + S^l A_{\zeta 1},$$

$$A_{12} = n \left[(\rho_w^l - \rho_w^g) A_{sl} - (1 - S^l) \frac{\rho_w^g M_w}{\rho_w^l R T} \right] + (1 - S^l) A_{\zeta 1},$$

$$A_{13} = n S^l \rho_w^l, A_{14} = n (1 - S^l) \rho_w^g, A_{15} = K_s A_{\zeta 1},$$

$$A_{21} = S^l A_{\zeta 2} + n \rho_a^g A_{sl}, A_{22} = (1 - S^l) A_{\zeta 2} - n \rho_a^g A_{sl},$$

$$A_{23} = 0, A_{24} = n (1 - S^l) \rho_a^g, A_{25} = K_s A_{\zeta 2},$$

$$A_{sl} = -\chi m d (1 - S_{w0}) (S_e)^{(m+1)/m} [(S_e)^{-1/m} - 1]^{(d-1)/d},$$

$$A_{\zeta 1} = \zeta [S^l \rho_w^l + (1 - S^l) \rho_w^g], A_{\zeta 2} = \zeta (1 - S^l) \rho_a^g$$

通过式(7a)和(7b)可以得到

$$-\frac{\partial P_g}{\partial t} = a_{11} \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^l + a_{12} \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^g + a_{13} \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^s \quad (8a)$$

$$-\frac{\partial P_w}{\partial t} = a_{21} \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^l + a_{22} \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^g + a_{23} \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}^s \quad (8b)$$

式中:

$$a_{11} = \frac{A_{13} A_{21}}{A_{12} A_{21} - A_{11} A_{22}}, a_{12} = \frac{A_{14} A_{21} - A_{11} A_{24}}{A_{12} A_{21} - A_{11} A_{22}},$$

$$a_{13} = \frac{A_{15} A_{21} - A_{11} A_{25}}{A_{12} A_{21} - A_{11} A_{22}}, a_{21} = \frac{A_{13} A_{22}}{A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}},$$

$$a_{22} = \frac{A_{14} A_{22} - A_{12} A_{24}}{A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}}, a_{23} = \frac{A_{15} A_{22} - A_{12} A_{25}}{A_{11} A_{22} - A_{12} A_{21}}$$

1.2 渗流连续性方程

广义 Darcy 定律通常被用来描述气体和水在孔隙中的运动规律。对于各相同性介质, 忽略其体积力, 则有

$$n S^l (\dot{\mathbf{u}}_i^l - \dot{\mathbf{u}}_i^s) = -\frac{k_l}{\rho_w^l \mathbf{g}} (\nabla P_w + \rho_w^l \ddot{\mathbf{u}}_i^l) \quad (9a)$$

$$n S^g (\dot{\mathbf{u}}_i^g - \dot{\mathbf{u}}_i^s) = -\frac{k_g}{\rho^g \mathbf{g}} (\nabla P_g + \rho^g \ddot{\mathbf{u}}_i^g) \quad (9b)$$

式中: \mathbf{g} 表示重力加速度; $\rho^g = \rho_w^g + \rho_a^g$ 表示气体总密度; k_l 和 k_g 分别表示孔隙水和孔隙气的渗透系数, 可以表示为

$$k_l = \frac{\rho_w^l \mathbf{g}}{\eta_l} k_{rl} k \quad (10a)$$

$$k_g = \frac{\rho^g \mathbf{g}}{\eta_g} k_{rg} k \quad (10b)$$

其中: η_l 和 η_g 分别表示液相和气相的动态黏滞系数; k 表示固有渗透系数; k_{rl} 和 k_{rg} 分别表示液相和气相的相对渗透系数^[16]

$$k_{rl} = \sqrt{S_e} [1 - (1 - (S_e)^{1/m})^m]^2 \quad (11a)$$

$$k_{rg} = \sqrt{1 - S_e} [1 - (S_e)^{1/m}]^{2m} \quad (11b)$$

通过式(9a)和(9b)可以得到:

$$-\nabla P_w = \frac{\rho_w^l \mathbf{g}}{k_l} n S^l (\dot{\mathbf{u}}_i^l - \dot{\mathbf{u}}_i^s) + \rho_w^l \ddot{\mathbf{u}}_i^l \quad (12a)$$

$$-\nabla P_g = \frac{\rho^g \mathbf{g}}{k_g} n (1 - S^l) (\dot{\mathbf{u}}_i^g - \dot{\mathbf{u}}_i^s) + \rho^g \ddot{\mathbf{u}}_i^g \quad (12b)$$

1.3 动量平衡方程

忽略体积力后, 非饱和多孔介质的动量平衡方程可以表示为:

$$\sigma_{ij,j}^{\text{tot}} = \bar{\rho}^s \ddot{\mathbf{u}}_i^s + \bar{\rho}^l \ddot{\mathbf{u}}_i^l + \bar{\rho}^g \ddot{\mathbf{u}}_i^g \quad (13)$$

式中: $\bar{\rho}^i$ ($i = s, l, g$) 表示 i 相介质的表观密度, 且有

$$\bar{\rho}^s \ddot{\mathbf{u}}_i^s = (1 - n) \rho^s \ddot{\mathbf{u}}_i^s \quad (14a)$$

$$\bar{\rho}^l \ddot{\mathbf{u}}_i^l = n S^l \rho_w^l \ddot{\mathbf{u}}_i^l + n S^g \rho_w^g \ddot{\mathbf{u}}_i^g \quad (14b)$$

$$\bar{\rho}^g \ddot{\mathbf{u}}_i^g = n S^g \rho_a^g \ddot{\mathbf{u}}_i^g \quad (14c)$$

根据有效应力原理, 总应力 σ_{ij}^{tot} 可以表示为^[17]

$$\sigma_{ij}^{\text{tot}} = \sigma'_{ij} - \delta_{ij} \alpha (S^l P_w + S^g P_g) \quad (15)$$

式中: σ'_{ij} 表示有效应力; δ_{ij} 为克罗内克尔记号。对于弹性各向同性材料, 位移-应力本构关系可以表示为

$$\sigma'_{ij} = \lambda \delta_{ij} u_{k,k}^s + \mu (u_{i,j}^s + u_{j,i}^s) \quad (16)$$

将式(14)~(16)代入式(13), 可以得到非饱和多孔介质的动量方程

$$\begin{aligned} \mu u_{i,jj}^s + (\lambda + \mu) u_{j,ij}^s - \alpha (S^l P_{w,i} + S^g P_{g,i}) = \\ (1-n)\rho^s \ddot{u}_i^s + nS^l \rho_w^l \ddot{u}_i^l + n(1-S^l)\rho^g \ddot{u}_i^g \end{aligned} \quad (17)$$

1.4 波动方程

引入液、气两相流体分别相对于固体骨架的相对位移 u_i^f 和 u_i^a

$$u_i^f = nS^l(u_i^l - u_i^s) \quad (18a)$$

$$u_i^a = n(1-S^l)(u_i^g - u_i^s) \quad (18b)$$

将式(8a)、(8b)和式(12a)、(12b)合并,并与式(17)联立,可得到考虑液态水分和气态水分相结合的非饱和和多孔介质的波动方程

$$\begin{aligned} \mu \nabla^2 u^s + (\lambda_s + \mu) \nabla(\nabla \cdot u^s) + r_{sf} \nabla(\nabla \cdot u^f) + \\ r_{sa} \nabla(\nabla \cdot u^a) = \rho \ddot{u}^s + \rho_w^l \ddot{u}^f + \rho^g \ddot{u}^a \end{aligned} \quad (19a)$$

$$\begin{aligned} B_1 \nabla(\nabla \cdot u^s) + B_2 \nabla(\nabla \cdot u^f) + B_3 \nabla(\nabla \cdot u^a) = \\ \rho_w^l \ddot{u}^s + v_f \ddot{u}^f + l_f \dot{u}^f \end{aligned} \quad (19b)$$

$$\begin{aligned} B_4 \nabla(\nabla \cdot u^s) + B_5 \nabla(\nabla \cdot u^f) + B_6 \nabla(\nabla \cdot u^a) = \\ \rho^g \ddot{u}^s + v_a \ddot{u}^a + l_a \dot{u}^a \end{aligned} \quad (19c)$$

式中:

$$\begin{aligned} \lambda_s &= \lambda + \alpha S^l B_1 + \alpha(1-S^l)B_4, \\ r_{sf} &= \alpha S^l B_2 + \alpha(1-S^l)B_5, \\ r_{sa} &= \alpha S^l B_3 + \alpha(1-S^l)B_6, \\ \rho &= (1-n)\rho^s + nS^l \rho_w^l + n(1-S^l)\rho^g, \\ B_1 &= \frac{A_{15}A_{22} - A_{25}A_{12}}{(1-n)(A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21})}, \\ B_2 &= \frac{\rho_w^l A_{22}}{A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21}}, B_3 = \frac{\rho_w^g A_{22} - \rho_a A_{12}}{A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21}}, \\ B_4 &= \frac{A_{15}A_{21} - A_{11}A_{25}}{(1-n)(A_{12}A_{21} - A_{11}A_{22})}, \\ B_5 &= \frac{\rho_w^l A_{21}}{A_{12}A_{21} - A_{11}A_{22}}, B_6 = \frac{\rho_w^g A_{21} - \rho_a A_{11}}{A_{12}A_{21} - A_{11}A_{22}} \\ v_f &= \frac{\rho_w^l}{nS^l}, v_a = \frac{\rho^g}{n(1-S^l)}, l_f = \frac{\eta_1}{\kappa k_{rl}}, l_a = \frac{\eta_g}{\kappa k_{rg}} \end{aligned}$$

2 非饱和土中 S 波的特征方程

为便于分析,引进三相介质位移矢量的 Helmholtz 分解形式,即:

$$u^s = \nabla \psi_s + \nabla \times H_s \quad (20a)$$

$$u^f = \nabla \psi_f + \nabla \times H_f \quad (20b)$$

$$u^a = \nabla \psi_a + \nabla \times H_a \quad (20c)$$

式中: ψ_s, ψ_f, ψ_a 分别为固体骨架、孔隙水和孔隙气体的标量势函数; H_s, H_f, H_a 分别为固体骨架、孔隙水和孔隙气体的矢量势函数。其中:

$$\psi_a = B_a \exp[i(k_s x - \omega t)] \quad (21a)$$

$$H_a = C_a \exp[i(k_s x - \omega t)] \quad (21b)$$

式中: $\alpha = s, f, a; i = \sqrt{-1}; k_s$ 为剪切 S 波的复波数; ω 为频率。

将式(20a)~(20c)代入式(19a)~(19c),并对方程两端进行旋度运算,将波动方程解耦得到剪切 S 波的弥散特征方程:

$$\begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{vmatrix} = 0 \quad (22)$$

其中,特征方程中的元素 c_{ij} 可以分别表示为:

$$\begin{aligned} c_{11} &= \omega^2 \rho - k_s^2 \mu, c_{12} = c_{21} = \omega^2 \rho_w^l, \\ c_{13} &= c_{31} = \omega^2 \rho^g, c_{22} = \omega^2 v_f + i\omega l_f, \\ c_{23} &= c_{32} = 0, c_{33} = \omega^2 v_a + i\omega l_a \end{aligned}$$

在三相多孔介质的波动过程中,存在 1 种剪切 S 波,对于给定的频率 ω ,可以根据剪切波的特征方程求解出相应的波数。对于式(22),可以解出两个不同的 S 波的复波数 $k_s = \text{Re}(k_s) + i\text{Im}(k_s)$,其中 Re 和 Im 分别表示实部和虚部,Re 反映常规波数,Im 反映波的衰减特性。由于振幅沿着波传播的方向衰减,则 $\text{Im}(k_s) > 0$,故而 k_s 只有 1 个有意义的复根。则非饱和和多孔介质中剪切 S 波的波速和衰减系数可以分别表示为 $v_s = 1/\text{Re}(k_s)$ 和 $R_s = \omega \text{Im}(k_s)$ 。

3 数值算例分析

通过数值算例分别分析了非饱和多孔介质中剪切 S 波(以下简称 S 波)的传播特性受频率 $f = \omega/(2\pi)$ 、土体饱和度 S^l 和固有渗透系数 k 的影响。数值算例中所采用的非饱和土体的材料参数如表 1 所列。

表 1 土体材料参数

Table 1 Parameters of soil material	
参数符号(单位)	参数取值
n	0.375
$\rho^s / (\text{kg}/\text{m}^3)$	2 700
$\rho_w^l / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1 000
$\rho_w^g / (\text{kg}/\text{m}^3)$	1.3
$\rho_{g0}^g / (\text{kg}/\text{m}^3)$	0.027
K / kPa	1.02×10^6
K_s / kPa	3.5×10^7
λ / kPa	9.0×10^6
μ / kPa	4.0×10^6
$\eta_l / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.0×10^{-3}
$\eta_g / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	18.2×10^{-6}
$S_{w0} / \%$	5
d	2
m	0.5
χ / Pa^{-1}	0.000 1
$T / ^\circ\text{C}$	25

不同频率下, S 波的波速和衰减系数随饱和度的变化情况如图 1 所示。由图 1(a)可以看出: 饱和度的变化对 S 波的波速影响很小, 随着饱和度的增大 S 波的波速略有减小, 但其减小速率很小。同时可以看出频率越大, S 波的波速越大。图 1(b)表

明: 不同频率下, S 波的衰减系数随饱和度的变化曲线相类似, 均表现为在饱和度低于 20% 时, S 波的衰减系数基本保持不变; 当饱和度超过 20% 且逐渐增大时, 其衰减系数随饱和度增大而近似线性增加。而且随着频率越大, S 波的衰减特性也越强。

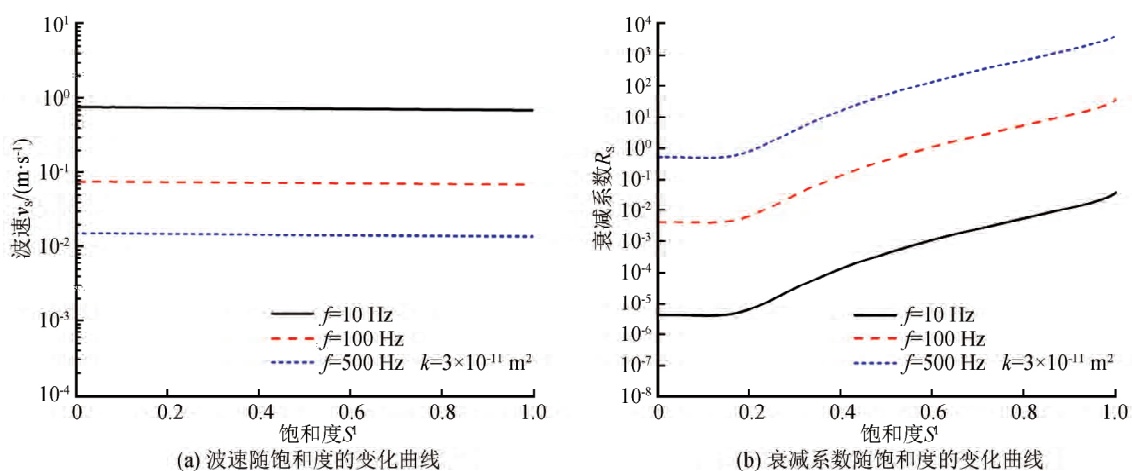


图 1 不同频率下 S 波的波速和衰减系数随饱和度的变化

Fig.1 Variation of wave velocity and attenuation coefficient with saturation for different frequencies

图 2 分别描绘了不同饱和度下 S 波的波速和衰减系数随频率的变化曲线。图 2(a)中三个饱和度下的波速变化曲线几乎相重合, 这与图 1(a)相互印证, 均表明 S 波的波速受饱和度的影响很小; 图 2(a)中, S 波的波速随频率的变化曲线近似呈双曲线分布, 其变化趋势表现为波速随着频率的增大而减小, 并且在低频区, S 波的波速随着频率增大而急剧

减小, 而随着频率逐渐向高频区增大, 其波速减小速率越来越慢, 最后波速趋于稳定。图 2(b)表明 S 波的衰减系数在不同饱和度下随频率的变化趋势相似, 均是在低频区, 衰减系数急剧增大, 而随着频率越来越大, 衰减系数的增大趋势越来越缓慢, 最后趋于稳定状态; 同时, 可以看出饱和度越大其衰减特性越强, S 波的衰减曲线越向低频区移动。

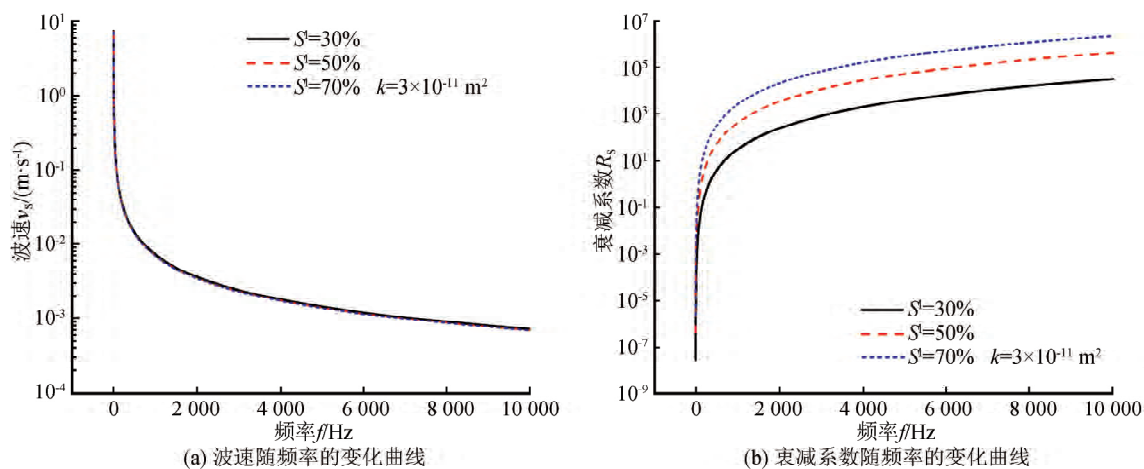


图 2 不同饱和度下 S 波的波速和衰减系数随饱和度的变化

Fig.2 Variation of wave velocity and attenuation coefficient with frequency for different saturations

在固有渗透系数不同时 S 波的波速和衰减系数随饱和度的变化曲线如图 3 所示。图 3(a)表明, 固有渗透系数对 S 波的波速的影响很小; 当土

体不完全饱和时, 在三个不同的固有渗透系数下, S 波在同一频率时的波速均相同; 而在土体逐渐趋于完全饱和时, 较大的固有渗透系数将导致 S 波的波

速略有增加。由图 3(b)可以看出,固有渗透系数对 S 波的衰减系数的影响与频率对其衰减系数的

影响类似,即频率和固有渗透系数越大,S 波的衰减特性越强。

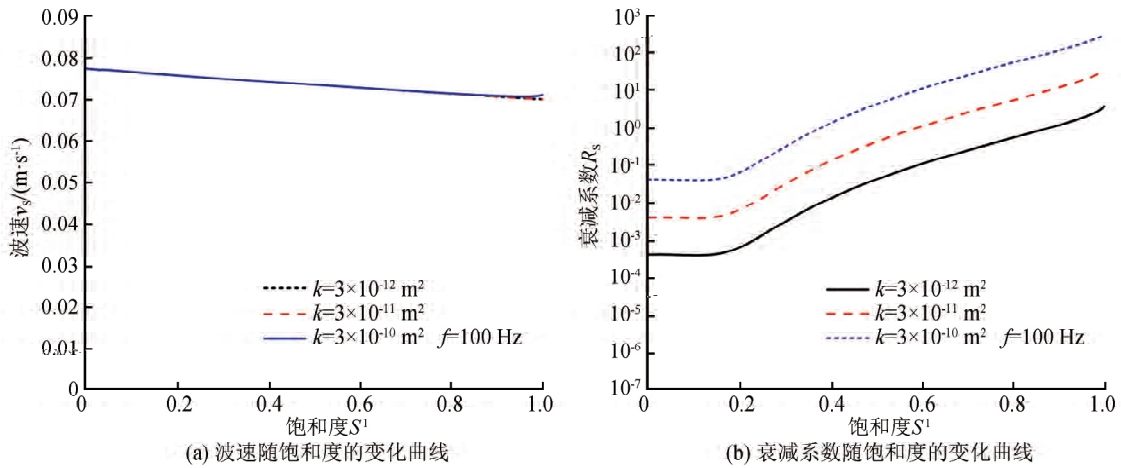


图 3 固有渗透系数不同时 S 波的波速和衰减系数随饱和度的变化

Fig.3 Variation of wave velocity and attenuation coefficient with saturation for different intrinsic permeability coefficients

图 4 分别描述了不同饱和度下 S 波的波速和衰减系数随固有渗透系数的变化曲线。由图 4(a)可知:在低渗透区,固有渗透系数的变化不会引起波速的变化,之后波速随着固有渗透系数的增加而迅速增大,而且随着固有渗透系数的越来越大,其波速变化曲线趋于平缓,且在不同饱和度下的波速趋于一致。图 4(b)表明不同饱和度下 S 波的衰减系数均

是先先在低渗透区经历一个不变段,然后随着固有渗透系数增加迅速增大到一峰值然后减小;饱和度越大,其衰减系数的增幅越大,同时其衰减系数峰值对应的固有渗透系数越小;在衰减系数的增加段,饱和度越大其衰减特性越强;相反,在衰减系数的减小段,饱和度越大,其衰减特性越弱。同时,随着饱和度越大,S 波的波速和衰减系数的变化曲线均会左

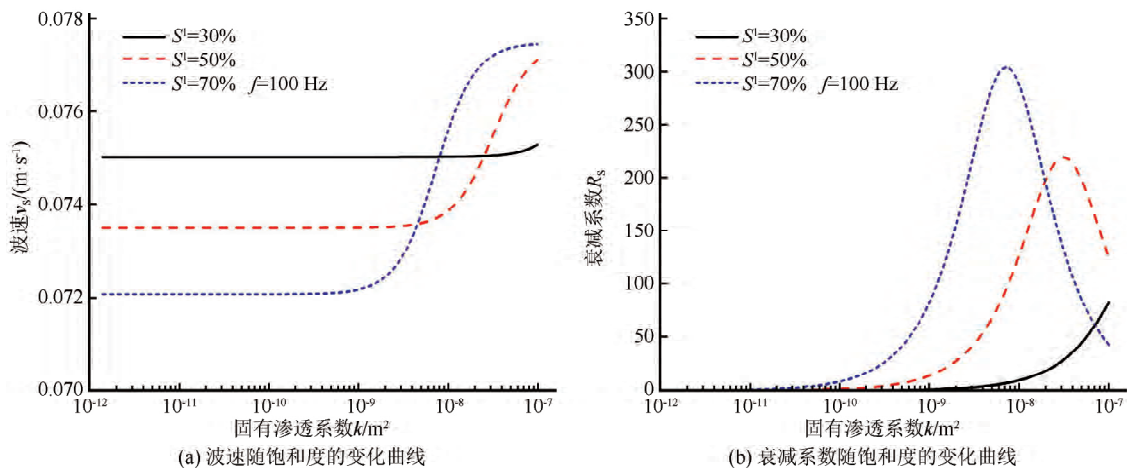


图 4 不同饱和度下 S 波的波速和衰减系数随固有渗透系数的变化

Fig.4 Variation of wave velocity and attenuation coefficient with intrinsic permeability coefficient for different saturations

移,向低渗透区靠近。

4 结论

本文基于非饱和多孔介质的基本方程,研究了剪切 S 波的传播特性,主要结论有:

(1) 饱和度对 S 波的波速的影响很小;S 波的

衰减系数随着饱和度的增大近似呈线性增大趋势。

(2) S 波的波速随着频率的增大而减小,其衰减系数随着频率的增大而增大,但其波速的减小速率和衰减系数的增大速率均越来越慢,最后波速和衰减系数都趋于稳定,

(3) 不同饱和度下,S 波的波速随固有渗透系

数的增大表现为先不变后增大,最后趋于稳定;而S波的衰减系数随着固有渗透系数的增加表现为先不变再增大最后减小。且饱和度不同,其衰减特性的强弱程度也不同。

参考文献(References)

- [1] ISHIHARA K..Propagation of Compressional Waves in a Saturated Soil[J].Proc Int. Symp. Wave Propagation & Dynamic Properties of Earth Materials,1968.
- [2] STOLL R D, BRYAN G M, Wave Attenuation in Saturated Sediments[J].The Journal of the Acoustical Society of America,1970,47(5B):1440-1447.
- [3] 杨峻,吴世明,蔡袁强.饱和土中弹性波的传播特性[J].振动工程学报,1996(2):128-137.
YANG Jun, WU Shiming, CAI Yuanqiang. Characteristics of Propagation of Elastic Waves in Saturated Soils[J].Journal of Vibration Engineering,1996,9(2):128-137.
- [4] 周凤玺,赖远明.饱和冻土中弹性波的传播特性[J].岩土力学,2011,32(9):2669-2674.
ZHOU Fengxi, LAI Yuanming. Propagation Characteristics of Elastic Wave in Saturated Frozen Soil[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(9):2669-2674.
- [5] LI Peng, SONG Erxiang. Compressional Wave Velocity and Its Physical Nature in Saturated Soils with Extreme Permeability Values[J].Rock and Soil Mechanics,2012,33(7):1979-1985.
- [6] ZHOU F X, LAI Y M, SONG R X. Propagation of Plane Wave in Non-Homogeneously Saturated Soils [J]. Science China Technological Sciences,2013,56(2):430-440.
- [7] HAN B, ZDRAVKOVIC L, KONTOE S. Numerical and Analytical Investigation of Compressional Wave Propagation in Saturated Soils[J].Computers and Geotechnics,2016,75:93-102.
- [8] SINGH J, TOMAR S K. Reflection and Transmission of Transverse Waves at a Plane Interface between Two Different Porous Elastic Solid Half-Spaces [J]. Applied Mathematics and Computation,2006,176(1):364-378.
- [9] 徐明江,魏德敏.非饱和多孔介质中弹性波的传播特性[J].科学技术与工程,2009,9(18):5403-5409.
XU Mingjiang, WEI Demin, XU Mingjiang, et al. Characteristics of Wave Propagation in Partially Saturated Poroelastic Media[J].Science Technology and Engineering,2009,9(18):5403-5409.
- [10] 陈炜昀,夏唐代,王宁,等.不同饱和度土层分界面上剪切波的反射与透射[J].岩土力学,2013,34(3):894-900.
CHEN Weiyun, XIA Tangdai, WANG Ning, et al. Reflection and Transmission of Shear Wave at Interface between Soil Layers with Different Saturation Degrees [J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(3):894-900.
- [11] TOMAR S K, GOYAL S. Elastic Waves in Swelling Porous Media[J].Transport in Porous Media,2013,100(1):39-68.
- [12] ABED A A, SOŁOWSKI W T. A Study on how to Couple Thermo-Hydro-Mechanical Behaviour of Unsaturated Soils: Physical Equations, Numerical Implementation and Examples [J].Computers and Geotechnics,2017,92:132-155.
- [13] LEWIS R W, SCHREFLER B A. The Finite Element Method in Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media[M].John Wiley,1998.
- [14] RUTQVIST J, BÖRGESSON L, CHIJIMATSU M, et al. Thermohydromechanics of Partially Saturated Geological Media: Governing Equations and Formulation of Four Finite Element Models[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2001,38(1):105-127.
- [15] VAN GENUCHTEN M T. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils I [J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44(5):892-898.
- [16] MUALEM Y. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media [J]. Water Resources Research,1976,12(3):513-522.
- [17] LI P, SCHANZ M. Wave Propagation in a 1-D Partially Saturated Poroelastic Column [J]. Geophysical Journal International,2011,184(3):1341-1353.