

DOI: 10.11779/CJGE201509013

冻结重塑黄土单轴加载过程中声波传播特性试验研究

黄 星^{1, 2, 3}, 李东庆¹, 明 锋¹, 张 宇^{1, 2}, 邰 慧¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 四川农业大学建筑与城乡规划学院, 四川 都江堰 611830)

摘要: 利用 RSM-SY5(T)型非金属声波检测仪对冻结重塑黄土进行单轴加载条件下的超声波纵波透射试验, 研究声波在冻结重塑黄土受压过程中传播的速度特征, 同时利用短时傅里叶变换及小波分析研究声波在冻结重塑黄土中传播的波形、频谱等特征。结果表明: 冻结重塑黄土的纵波波速受温度和外荷载的影响, 波速随温度升高而降低, 在加载过程中随应变的增大大致呈现先增加后减小的趋势; 冻结重塑黄土的单轴抗压强度与初始纵波波速值之间满足指数关系, 相关性很好; 随着加载的进行频谱形状发生变化, 谱面积和主频减小; 加载初期尾波不发育, 随着应力的增大、裂纹的产生尾波逐渐发育; 声波的特征参数能在一定程度上反映冻结重塑黄土加载过程中内部裂纹的发展情况。

关键词: 冻结重塑黄土; 单轴加载; 温度; 纵波波速; 短时傅里叶变换; 小波变换

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)09-1660-08

作者简介: 黄 星(1988-), 女, 汉族, 四川雅安人, 博士研究生, 主要从事冻土超声波参数与冻土物理力学性质试验研究。E-mail: hxcas7@163.com。

Experimental study on acoustic wave propagation properties of frozen remolded loess during uniaxial loading process

HUANG Xing^{1,2,3}, LI Dong-qing¹, MING Feng¹, ZHANG Yu^{1,2}, BING Hui¹

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Architecture and Urban-Rural Planning, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, China)

Abstract: The ultrasonic P-wave tests on frozen remolded loess under uniaxial loading are conducted by using RSM-SY5(T) nonmetal ultrasonic test meter to study the velocity characters of P-wave. The characteristics of acoustic waveforms and wave frequency spectra of frozen remolded loess are investigated by using the short-time Fourier transform and wavelet transform. The experimental results indicate that the P-wave velocity is affected by the temperature and external loads, and the velocity decreases with the increase of temperature and generally increases at first and then decreases with strain during the loading process. There is an exponential relationship between the uniaxial compressive strength and the initial P-wave velocity, and the correlation between them is very good. With the increase of external loading, the shape of spectral curve will change and the spectral area and main frequency will decrease. The coda waves are not developed at the initiation of loading and gradually develop with the increase of stress and the emergence of cracks. The characteristic parameters of acoustic waves can reflect the development of internal cracks of frozen remolded loess during loading to some extent.

Key words: frozen remolded loess; uniaxial loading; temperature; P-wave velocity; short-time Fourier transform; wavelet transform

0 引言

随着复杂地质条件下掘进各类井巷等地下工程中广泛应用到人工冻结法, 对人工冻结法的研究日益增多。在冻结法施工中, 人工冻结壁一旦不稳定和发生破坏将给掘进工作带来巨大的隐患, 不及时发现和处理将造成严重的后果。由于人工冻结壁的变形破坏在发生前不易被发现, 所以现场快速检测成为关键技术

之一。冻土声学特性与冻土温度、含水率、密度、冻土中裂隙情况以及应力状态密切相关, 通过对冻土受

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271080, 41371090); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-19); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB026102); 冻土工程国家重点实验室课题(SKLFSE-ZQ-35)

收稿日期: 2014-11-17

压过程中声学参数的变化规律进行研究, 探索冻结壁在变形和破坏时的声波特征有重要的现实意义^[1]。利用声波变化特征来检测人工冻结壁的变形, 及时预测冻结壁的稳定性, 确保在复杂地质条件下掘进工作的安全进行。

超声波检测技术因其无损性、快速性以及准确反映被测物体物理力学性质等特点在岩体工程领域得到广泛应用, 从20世纪60年代起就开始了对岩石声学的研究, 并采用多种分析手段对声波信号进行处理。刘向君等研究了低孔低渗砂岩在三轴和单轴加载过程中声波波速、振幅的变化特征, 同时采用FFT法对声波信号进行时频域的转换, 对频谱特性的变化进行了分析^[2]。Yu等通过小波变换对锚杆的灌浆情况进行了评价^[3]。陈旭等研究了穿过不同岩性及含水率的岩石声波波速的大小, 同时利用傅里叶变换和小波变换研究声波信号的频谱特征和时频域特征^[4]。

从20世纪70年代起, 一些学者开始尝试将超声波检测技术应用于冻土工程中, 进行了大量的研究。主要集中在两个方面: ①理论推导: Leclaire等推导了固体、冰和水三相介质中的波动方程, 预测这三相介质中存在3种纵波、两种横波, 并通过试验测量到波速较高的两种纵波和两种横波^[5]。周凤玺等给出了饱和冻土中弹性波的传播速度及衰减的解析表达式, 并分析了波速与含冰量、孔隙率以及密度的关系^[6]。②试验研究: Nakano等用超声波检测技术对人工冻土特性的研究表明: 冻结砂土的超声波波速随温度变化不大, 而冻结粉土的波速随温度的升高而降低^[7]。杨平等利用SYC-2型非金属声波探测仪研究了人工冻结黏土和冻结砂土的抗拉、抗压强度与纵、横波波速以及振幅衰减系数之间的关系^[8]。盛煜等^[9]、王大雁等^[10]通过试验分析了未冻水含量对超声波波速的影响。

以往对冻土超声波测试人们只注意应用波速这一特征, 而对波形、频率及振幅等未充分加以应用。单纯分析波速的变化规律是不够的, 为了更好地利用通过冻土试样的声波信号所携带的丰富信息, 可以利用信号处理技术中的短时傅里叶变换和小波变换对声波信号的频谱特征等进行分析。冻土的无侧限抗压特性是冻结法设计和施工的重要力学指标, 所以本文以重塑黄土在不同负温条件下无侧限单轴加载过程中的纵波传播时间和波形等信号的试验采集为基础。分析温度和外荷载对波速的影响, 建立强度与纵波波速间的试验关系, 同时对加载过程中通过信号处理得到的声波波形和频谱等变化特征进行分析。冻土单轴加载过程中表现出来的声波传播特性, 可以作为冻土损伤的判别指标, 对其稳定性评价具有重要的指导意义。

1 试验样品的基本物理性质

1.1 试验土质

试验土质为黄土, 取自兰州某建筑场地。土样经过烘干、机械碾碎, 过2 mm筛并除去杂质。黄土的液限为24%, 塑限为15.6%, 塑性指数为8.4。通过击实实验得到黄土的最优含水率为16%, 最大干密度为1.76 g/cm³。其颗粒级配曲线如图1所示。

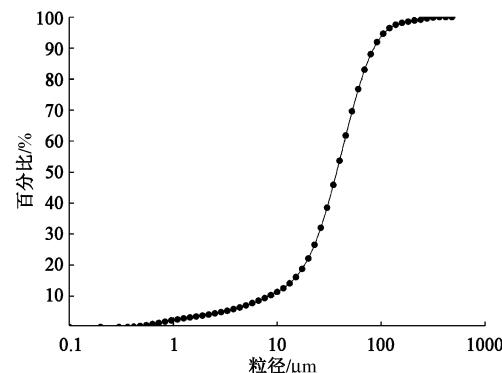


图1 试验所用土样粒径分配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution of test soils

1.2 试样制备

将试验用土加蒸馏水调配成最优含水率, 并封闭放置至少12 h使土样中的水分充分均匀。待土样中水分均匀后, 在冻土工程国家重点实验室的自动制样机上制成具有最大压实度的试样。按规范的规定制成的试样直径为61.8 mm、长度为125 mm^[11]。将制作好的试样装入特制的模具中, 然后放入温度低于-30℃的恒温箱中快速冻结, 特制的钢质模具有能够起到防止试样冻胀变形和水分散失等作用。待24 h后试样被冻透, 取出试样将模具脱掉, 重新测定脱模后试样的尺寸和重量。再将脱模后的试样置于测试系统中, 调节使测试系统温度达到试验温度。待测试样的基本物理参数如表1所示。

表1 试样的基本物理参数

Table 1 Basic physical properties of specimens

土质 编号	含水率 <i>w</i> /%	干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)	试样初始 长度 <i>L</i> /mm	温度 <i>T</i> /℃
黄土	HT-1	15.95	1.77	-15
	HT-2	15.95	1.77	-10
	HT-3	15.95	1.76	-5
	HT-4	15.95	1.77	-1

2 试验原理和方法

2.1 试验仪器

(1) 加压装置为万能材料试验机。

(2) 声波测试采用中科院武汉岩土所研发生产的RSM-SY5(T)型非金属声波检测仪,由声波检测仪、导线、承压发射和接收换能器组成,纵波换能器频率为50 kHz。为了使测试结果具有可比性,整个测试过程声波检测仪的参数(如发射脉宽、增益等)设置一致。

(3) 试验采用风冷式降温的控温恒温箱,可满足-40℃~20℃的试验要求,其控温精度为±0.02℃。

2.2 试验方法

冻结重塑黄土轴压下波速测试系统如图2所示,将测试系统控制为试验温度且至少恒温24 h使试样温度达到恒定。单轴加载速率为1 mm/s,加压过程中同步采集纵波波速、应力和应变大小等数值。单轴加压装置的数据采集仪记录试样在加载过程中应力的大小、试样下降的位移以及加载直至破坏的时间等数据。通过超声波检测仪采集得到加载过程中超声波在试样中的总走时t,则可通过公式

$$V_p = (L - \Delta L) / (t - t_0) \quad (1)$$

计算得到不同时刻试样的波速值,式中,V_p为纵波波速(km·s⁻¹),L为试样的初始长度(mm),ΔL为试样在加压过程中下降的位移(mm),t为超声波通过试样的总走时(μs),t₀为超声波检测仪本身以及承压换能器的总延迟时间(μs)。

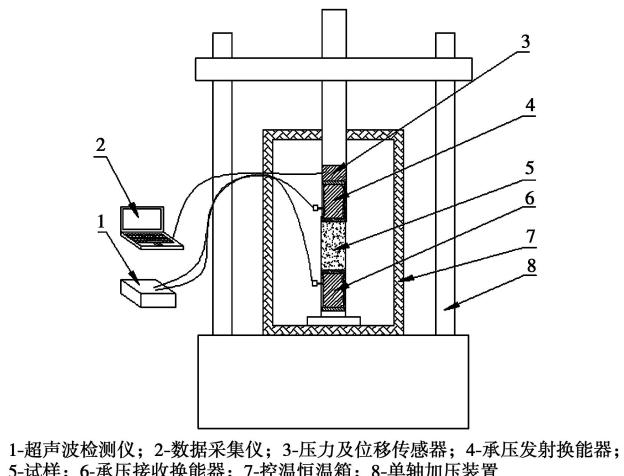


图2 测试系统示意图

Fig. 2 Schematic of test system

3 试验结果分析

3.1 单轴加载条件下的纵波波速研究

试验得到了-1℃,-5℃,-10℃和-15℃温度条件下重塑黄土无侧限单轴加载全过程纵波波速和应力随应变的变化关系曲线。得到的应力-应变曲线都有明显的峰值,呈应变软化特性,即表现为脆性破坏的形式^[12]。加载初期,应力随应变的增加而增加,达到极限抗压强度后,应力随应变的增大而减小。

从图3和表2可以看出,穿过冻结重塑黄土的纵波

波速受到温度和外荷载的影响。波速随温度的升高而降低,这是因为随着温度的上升冻土中的未冻水含量增多,含冰量相对减少。土颗粒之间的黏结力变弱,从而导致冻土弹性性能减弱。同时由于声波在水中的传播速度小于在冰中的传播速度^[13]。

从图3(a)、3(b)和3(c)可以看出在温度为-15℃,-10℃和-5℃条件下,冻结重塑黄土的纵波波速在加载过程中随应变的增大而增大,当达到波速峰值后,随应变的增加波速减小。纵波波速在初始加载阶段随荷载增大而增大,主要是由于人工制备的重塑黄土试样内部有空洞、小裂隙等缺陷。加载初期试样被压密,试样相对体积减小,密度增大,孔隙率减小。通过试样的声波衰减减小,波速增加,在压密过程结束后波速增加缓慢。如表2所示,对重塑黄土试样的结果进行分析得出,在温度为-15℃,-10℃和-5℃时,纵波波速分别在试样极限抗压强度的75.71%,92.10%和79.99%处达到峰值,波速变化率分别为1.10%,4.60%和2.63%(波速的峰值与初始波速值的差值与初始波速值的比值)。在试样达到峰值波速之后,随着荷载的增加,开始出现初始裂纹并逐渐扩展。在裂纹扩展阶段,超声波经绕射穿透试样,路径变长相应声波走时增大,此阶段波速随荷载的增大而减小。当达到极限强度时,波速下降幅度急剧增加。

如图3(d)所示,在温度为-1℃时冻结重塑黄土的纵波波速随着应变的增加呈减小的趋势,变化趋势与温度为-15℃,-10℃和-5℃时的不同。这是因为温度为-1℃的冻结重塑黄土属于高温冻土,此温度处于剧烈相变区,土体中的冰和未冻水的比例对外界的影响极其敏感,特别是外荷载的作用,外荷载对冻土具有压融作用。高温冻土本身的未冻水含量较高,在外荷载作用下含量增加,大量未冻水的存在使得高温冻土的物理力学性质不稳定^[14]。所以,高温冻土的声学性质不同于常规低温冻土。

表2 单轴加载过程中冻结重塑黄土纵波波速变化

Table 2 Changes of P-wave velocity of frozen remolded loess during uniaxial compression process

编号	初始波速值/(km·s ⁻¹)	波速最大值/(km·s ⁻¹)	峰值点应力比/%	波速变化率/%	抗压强度/MPa
HT-1	3.62	3.66	75.71	1.10	7.41
HT-2	3.48	3.64	92.10	4.60	5.72
HT-3	3.04	3.12	79.99	2.63	2.91
HT-4	1.48	1.48	0	0	0.36

注:由于声波走时提取和波速计算由人工进行,因此,试验中得到的波速为一些离散的数据点,表中的波速值取自拟合曲线。峰值点应力比为纵波波速达到最大值时的应力与抗压强度的比值。

从上面的分析发现,在单轴荷载作用下,冻土纵

波速度能够反映出冻土中裂隙变化规律及其力学性质。

从图3还可以看出,冻结重塑黄土的轴向应力-应变曲线与纵波波速-应变曲线交点位置集中在峰值波速点以及极限强度值点之间,穿过试样的超声波在试样达到极值抗压强度之前波速已经达到最大值。我们可以通过波速的测试来判断冻结壁的应力是否超过许用应力,从纵波波速和应力随应变的变化关系曲线我们可以取交点对应的应力或者波速峰值点对应的应力为许用应力,为了安全起见取波速峰值点对应的应力为许用应力(高温冻土除外)。超声波检测时当波速达到许用应力对应的波速值时,认为外荷载继续增大将会导致冻结壁的破坏。

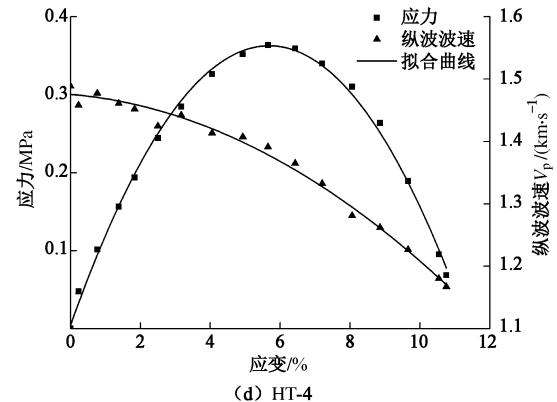
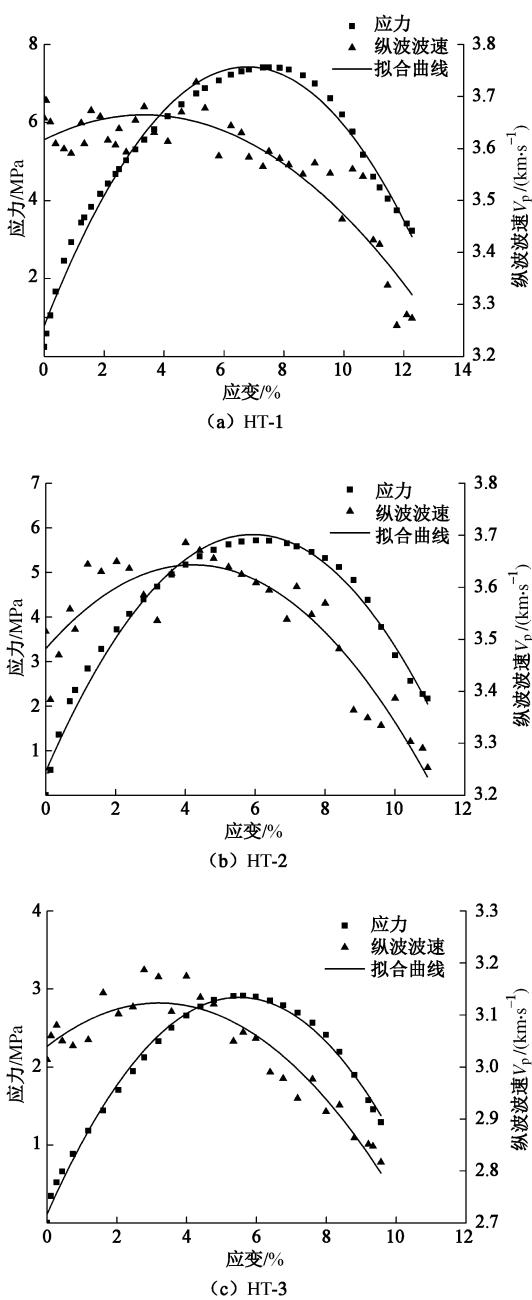


图3 不同负温下重塑黄土纵波波速和应力与应变的关系曲线

Fig. 3 Relationship among P-wave velocity, stress and strain of remolded loess under different negative temperatures

3.2 纵波波速与抗压强度关系特征

在试验中冻结重塑黄土初始纵波波速(外荷载为零时的波速值)随温度升高呈降低的趋势,初始纵波波速是土体密度、内部结构、未冻水含量等因素变化的综合反映。初始纵波波速和单轴抗压强度都是冻土的固有属性。图4为不同负温下的单轴抗压强度与初始纵波波速关系曲线,从图4中可以看出,在不同负温下冻结重塑黄土单轴抗压强度与初始纵波波速呈指数关系。经过数据拟合得到以下表达式:

$$\sigma_c = 0.02676e^{1.54995V_p} \quad (2)$$

式中 σ_c 为单轴抗压强度 (MPa); V_p 为纵波波速 ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$); 相关系数 $R^2=0.9973$, 相关系数高说明波速与强度之间存在良好的相关性,为利用超声波技术推定冻土强度的进一步研究奠定了基础。

单轴抗压强度是冻土力学性质中最基本的参数之一,通常获取冻土单轴抗压强度采用的是破坏性的试验,相比利用波速法来估算单轴抗压强度值是无损的^[8]。

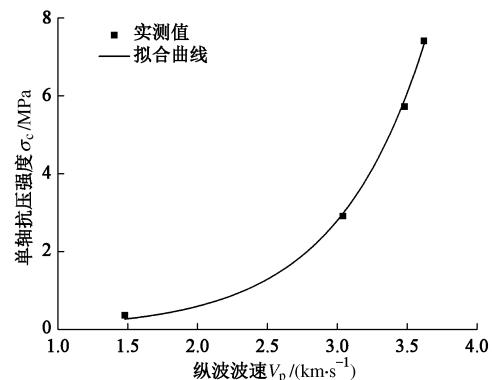


图4 不同负温下重塑黄土初始纵波波速与单轴抗压强度关系曲线

Fig. 4 Relationship between initial P-wave velocity and uniaxial compressive strength of remolded loess under different negative temperatures

4 傅里叶变换和小波变换

纵波波速仅是声波检测中的一种指标，单从波速的变化去分析冻结重塑黄土在单轴加载过程中的物理力学性质是远远不够的。采用傅里叶变换和小波变换对接收的声波信号进行分析，将信号转换为频域信号和时-频域信号，对加载过程中冻结重塑黄土的频谱特征变化和尾波等进行比较分析，得到了更多有用的信息。频谱为冻土声波测试中的重要动力学参数之一，在评价冻结壁的结构完整性和强度等方面具有重要的实际意义。

4.1 STFT 方法

傅里叶变换能识别信号在时域 $f(t)$ 内的频率特征，信号的傅里叶变换为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (3)$$

式中 $F(\omega)$ 为 $f(t)$ 的傅里叶变换； i 为 $\sqrt{-1}$ ， ω 为角频率。那么 $f(t)$ 可以通过傅里叶逆变换求出，即

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (4)$$

方程 (3)、(4) 为傅里叶变换对。

傅里叶变换 $F(\omega)$ 是信号 $f(t)$ 在不同频率下随着周期正弦曲线变化的内积，将信号分解为不同频率的频谱，所以傅里叶变换可以用来找到信号的频率部分。但是傅里叶变换没有包括频率在时域内位置的信息，无法得到信号在时域内的局部变化特征，不适用于非平稳信号。

短时傅里叶变换 STFT (short-time or windowed Fourier transform) 是以傅里叶变换为基础的一种常用的时频分析方法，为使变换具有时域局部性，STFT 先将时间信号加时间窗，然后滑动时间窗做傅里叶变换，得到信号的短时谱^[15]。从而使时间、频域同时得到反映，STFT 表示式为

$$\text{STFT} = F(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) h(t - \tau) e^{-i\omega t} dt, \quad (5)$$

式中， h 为窗函数。由于 STFT 的频率分解取决于时间窗的宽度，因此 STFT 是一种固定的频率分解。对于非周期瞬态信号 STFT 在宽波谱范围内不能提供足够的分解频率。

4.2 小波变换

超声检测信号通常是一种时域和频域均有限的非平稳信号，为了解决傅里叶变换所不能解决的信号问题，小波变换应运而生。小波分析是傅立叶分析的发展和延拓，具有良好的时频局部化能力^[16]，能够同时获得时域和频域的信息。小波变换是原始信号与基本小波函数之间的互相关关系。信号 $f(t)$ 的小波变换为^[17-18]

$$WT(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt = \frac{1}{\sqrt{|b|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-a}{b}\right)} dt, \quad (6)$$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|b|}} \psi\left(\frac{t-a}{b}\right), \quad (7)$$

式中， $\psi(t)$ 为基本小波函数， $\overline{\psi(t)}$ 为 $\psi(t)$ 的共轭函数， a 为平移参数， b 为尺度参数。

函数 $\psi(t)$ 应该满足两个条件。第一，基本小波函数的积分为零，即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0, \quad (8)$$

式 (8) 表明基本小波函数是震荡函数。

需要满足的第二个条件为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (9)$$

式中， $\Psi(\omega)$ 是 $\psi(t)$ 的傅里叶变换，表示为

$$\Psi(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (10)$$

4.3 频谱分析及小波分析

试验获得了-1℃，-5℃，-10℃和-15℃温度条件下重塑黄土无侧限单轴加载全过程的超声波纵波信号，本文选取了-15℃温度下的声波信号进行分析。利用 Matlab 软件编程，得到无侧限单轴加载过程几个阶段声波信号的频域和时-频域信号。其中，对采集的声波信号进行频谱变换，将通过冻结重塑黄土试样的时域波形转化为频域的波谱，如图 5 (b)、6 (b) 和 7 (b) 所示。得到的超声频谱特性包含了试样内部的裂纹、孔隙度等丰富的信息。

陈达力等通过对岩石的频谱特征分析，认为岩心的接收频谱与岩石力学指标有一定关系，主频高、幅值大、带宽大的岩石其岩石的动、静弹性模量、抗压强度及声速也较高^[19]。冻土内部裂纹发展控制它的力学性质，同时也影响了波在其中的穿透性。

冻土是由土颗粒、未冻水、孔隙冰和气体组成的非均质、各向异性的四相复合体，声波在冻土中传播时，幅值、频率衰减大，因而主频低，幅值、带宽小。加载过程中出现频谱特征差异主要原因为：超声波束扩散引起的衰减，试样内部不同矿物、不同粒径颗粒导致声阻抗不均引起的散射以及介质吸收引起的衰减。裂纹的产生使得声波通过时产生波的反射、绕射、折射使波形改变，同时频谱发生变化。随着裂纹的扩展波的穿透能力大为减弱，在接收谱中的表现就是高频成分迅速衰减。

图 5 (b)、6 (b) 和 7 (b) 为冻结重塑黄土加载初期、波速峰值点以及强度极值点的频谱曲线，从图中可以看出，冻结重塑黄土加压过程中频谱特性的变

化为: 加载初期冻结重塑黄土的谱面积最大, 随着加载的进行, 试样内部产生裂纹, 谱面积逐渐减小。加载初期声波波形较完整、规则、频谱单一, 随着裂纹的产生, 频谱形状发生变化, 变得不易分辨主频值。冻结重塑黄土试样的主频值较探头的主频值(50 kHz)低, 在无侧限单轴加载过程中的声波信号只在低频段(<50 kHz)有响应, 接收谱中只剩不易衰减的低频信号, 频率成分单一。加载初期主频约为10 kHz, 随着轴压的增大, 主频向低频端移动。以上这些变化与试样内部裂纹产生、形成乃至破坏的变化过程相对应。

本文采用的是50 kHz的纵波传感器, 发射换能器发射的超声波经耦合进入被测试样, 在试样中传播后被接收换能器接收并转换为电信号。接收换能器除了会接收到纵波还会接收到横波, 由于横波的传播速度小于纵波, 所以首先接收到纵波信号。本文引入地震学中尾波的概念, 通常认为尾波从横波两倍的走时处出现, 尾波被认为是声波通过介质的非均匀结构引起的不连续散射波的叠加。尾波的形成机制, 使得它反

映的是沿很多不同性质路径射线的叠加, 因此, 可以表现通过介质的平均性质。由于尾波在介质中多次被散射, 波传播路径很长, 对介质的微小变化很敏感。通过尾波变化来研究介质在荷载作用下的变形情况是一种有效的手段^[20]。

分析图5(a)、6(a)、7(a)和5(c)、6(c)、7(c)得出, 随着应力的增大尾波逐渐发育。加载初期尾波不发育, 在强度极值点时尾波较发育。这主要是因为加载初期冻结重塑黄土试样内部原始的空洞、小裂隙被压密, 冻结重塑黄土试样相对体积减小, 密度增大, 孔隙率减小。此阶段的冻结重塑黄土试样密实度大, 试样相对均匀, 声波信号通过不发生折射、散射等现象。所以加载初期尾波不发育。随着加载的进行, 冻结重塑黄土试样内部开始出现裂纹。随着试样内部裂纹的产生声波信号将发生折射、散射、反射等现象, 使其能量在时间域上的分布较广, 尾波逐渐发育。

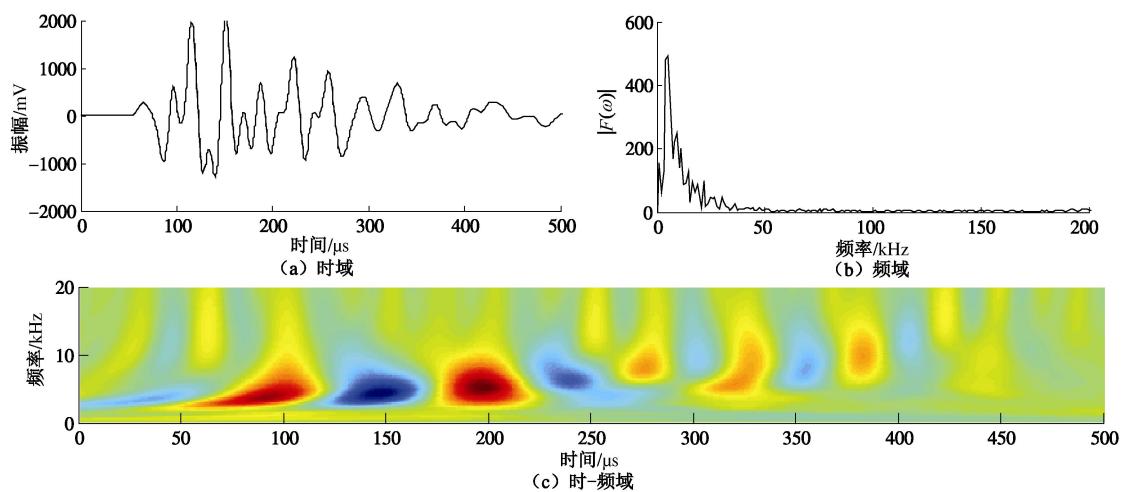


图5 冻结重塑黄土HT-1加载初期声波信号频谱分析及小波变换图

Fig. 5 Acoustic spectral characteristics and wavelet transform of frozen remolded loess HT-1 at beginning of loading

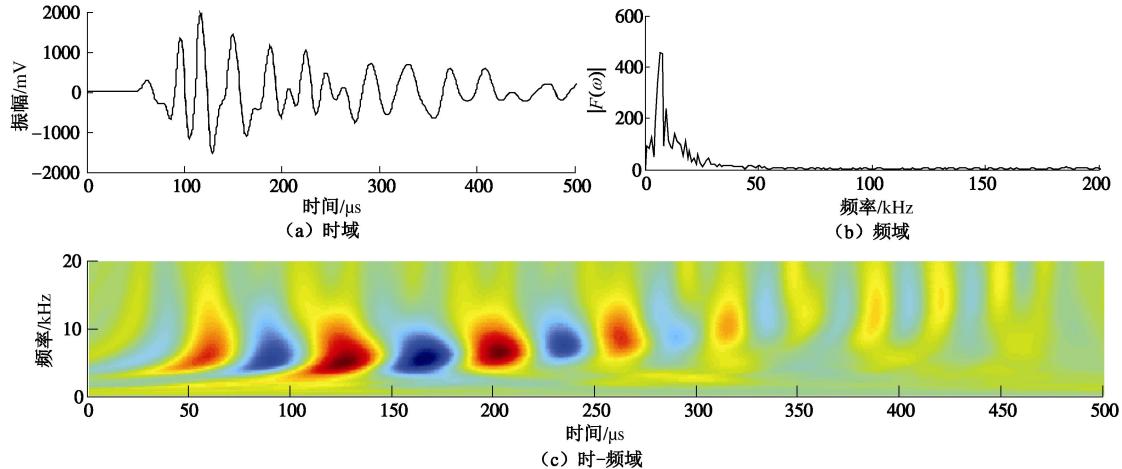


图6 冻结重塑黄土HT-1波速峰值点声波信号频谱分析及小波变换图

Fig. 6 Acoustic spectral characteristics and wavelet transform of frozen remolded loess HT-1 at its P-wave velocity extreme point

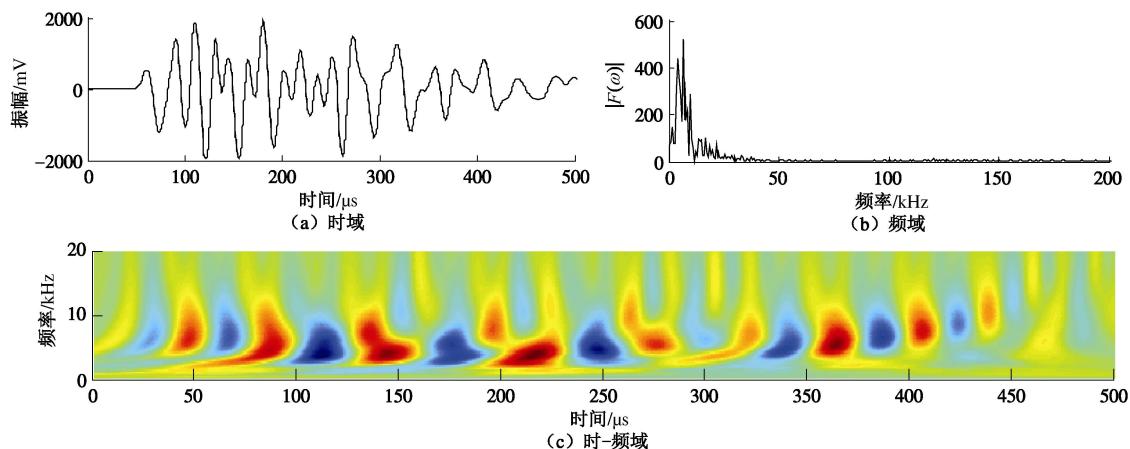


图 7 冻结重塑黄土 HT-1 强度极值点声波信号频谱分析及小波变换图

Fig. 7 Acoustic spectral characteristics and wavelet transform of frozen remolded loess HT-1 at its compressive strength extreme point

对加载过程中采集得到的声波信号进行小波变换同时得到声波信号在时域和频域上的特征, 从图 5 (c)、6 (c) 和 7 (c) 可以找到主频值(图中颜色最深的那点), 以及对应在时域上的值。

本文对无侧限单轴加载过程中获得的冻结重塑黄土的声波信号, 进行了时间域、频率域和时间-频率域的综合分析, 揭示了一些声学特征与冻结重塑黄土试样内部结构(密度、未冻水含量、裂纹等)的内在联系。可以利用这些丰富的信息来对试样的裂纹发展进行预测, 对于冻结法施工稳定性评价具有重要的指导意义。

5 结 论

通过对试验和信号处理结果的分析得到如下结论:

(1) 冻结重塑黄土的纵波波速受温度和外荷载的影响, 波速随温度升高而降低, 在加载过程中随应变的增大大致呈现先增加后减小的趋势。

(2) 冻结重塑黄土的单轴抗压强度与初始纵波波速值之间满足 $\sigma_c = 0.02676e^{1.54995V_p}$ 的拟合关系, 相关系数为 0.9973, 可以利用该式简单的测定纵波波速值来推算冻结重塑黄土的抗压强度值。

(3) 随着加载的进行冻结重塑黄土的频谱形状发生变化, 谱面积和主频减小。

(4) 加载初期尾波不发育, 随着应力的增大、裂纹的产生尾波逐渐发育。

(5) 穿过冻结重塑黄土试样声波信号的波速、波形的时域特征、频域特征及时-频域特征能在一定程度上反映出冻结重塑黄土在受压过程中内部裂纹的发展情况。

参 考 文 献:

[1] 杨 平, 李 强. 冻土力学性能与声波参数相关性试验研

究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 78 - 82. (YANG Ping, LI Qiang. Experimental study on mechanical property and the relativity of acoustic parameter of frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(4): 78 - 82. (in Chinese))

- [2] 刘向君, 刘 洪, 徐晓雷, 等. 低孔低渗砂岩加载条件下的声波传播特性实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 560 - 567. (LIU Xiang-jun, LIU Hong, XU Xiao-lei, et al. Experimental research on acoustic wave propagation characteristic of low porosity and permeability sandstone under loading conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 560 - 567. (in Chinese))
- [3] YU Jung-doung, BAE Myeong-ho, LEE In-mo, et al. Nongrouted ratio evaluation of rock bolts by reflection of guided ultrasonic waves[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139: 298 - 307.
- [4] 陈 旭, 俞 缙, 李 宏, 等. 不同岩性和含水率的岩石声波传播规律试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2527 - 2533. (CHEN Xu, YU Jin, LI Hong, et al. Experimental study of propagation characteristics of acoustic wave in rocks with different lithologies and water contents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2527 - 2533. (in Chinese))
- [5] LECLAIRE P, COHNE-TENOUDJI F, AGUIRRE-PUENTE J. Observation of two longitudinal and two transverse waves in a frozen porous medium[J]. Acoustical Society of America, 1995, 97(4): 2052 - 2055.
- [6] 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 Feng-xi, LAI Yuan-ming. Propagation characteristics of elastic wave in saturated frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2669 - 2674. (in Chinese))

- [7] NAKANO Y, MARTIN A J, SMITH M. Ultrasonic velocities of the dilatational and shear waves in frozen soils[J]. Water Resources Research, 1972, **8**(4): 1024 – 1030.
- [8] 杨 平, 李 强, 郁楚侯. 人工冻土声波参数试验研究[J]. 冰川冻土, 1997, **19**(2): 149 – 153. (YANG Ping, LI Qiang, YU Chu-hou. A experimental study on the acoustic wave parameters of artificial frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, **19**(2): 149 – 153. (in Chinese))
- [9] 盛 煜, 福田正己, 金学三, 等. 未冻水含量对含废弃轮胎碎屑冻土超声波速度的影响[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(6): 716 – 719. (SHENG Yu, FUKUDA Masami, KIM Hak-sam, et al. Effect of unfrozen water content on the ultrasonic velocities in tire-mixed frozen soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(6): 716 – 719. (in Chinese))
- [10] 王大雁, 朱元林, 马 巍, 等. 冻土超声波波速与冻土物理力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(11): 1837 – 1840. (WANG Da-yan, ZHU Yuan-lin, MA Wei, et al. Testing study on relationship between ultrasonic wave velocities and physico-mechanical property of frozen soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(11): 1837 – 1840. (in Chinese))
- [11] GB50324—2001 冻土工程地质勘查规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001. (GB50324—2001 Code for engineering geological investigation of frozen ground[S]. Beijing: China Planning Press, 2001. (in Chinese))
- [12] 郭麒麟, 孙云志. 南方短时冻土的热物理性质及抗压强度特征[J]. 人民长江, 2012, **43**(9): 51 – 54. (GUO Qi-lin, SUN Yun-zhi. Thermal physical performance and compressive strength characteristics of short-term frozen soil in southern area of China[J]. Yangtze River, 2012, **43**(9): 51 – 54. (in Chinese))
- [13] HUANG Xing, LI Dong-qing, MING Feng, et al. An experimental study on the relationship between acoustic parameters and mechanical properties of frozen silty clay[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2013, **5**(5): 569 – 602.
- [14] 刘世伟, 张建明. 高温冻土物理力学特性研究现状[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(1): 120 – 129. (LIU Shi-wei, ZHANG Jian-ming. Review on physic-mechanical properties of warm frozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(1): 120 – 129. (in Chinese))
- [15] 李 晟. 小波与频谱分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (LI Sheng. Wavelet and spectrum analysis[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese))
- [16] MALLAT S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, **11**(7): 674 – 693.
- [17] GROSSMANN A, MORLET J. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape[J]. SIAM Journal of Mathematical Analysis, 1984, **15**(4): 723 – 736.
- [18] DAUBECHIES I. Orthonormal bases of compactly supported wavelet[J]. Commun Pure Appl Math, 1988, **41**(7): 909 – 996.
- [19] 陈达力. 岩石超声波测试技术[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, **13**(1): 59 – 68. (CHEN Da-li. Rock ultrasonic spectrum measurement technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, **13**(1): 59 – 68. (in Chinese))
- [20] HERRAIZ M, ESPINOSA A F. Coda wave: a review[J]. Pure Appl Geophys, 1987, **125**(4): 499 – 577.