

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0071

WANG Songmei, LI Haipeng, DOU Shuai, et al. Development and preliminary application of a side-mounted bending element high pressure freeze-thaw test apparatus[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2):717-725. [王崧美, 李海鹏, 窦帅, 等. 侧装式弯曲元高压冻融试验装置研制与初步应用[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2):717-725.]

侧装式弯曲元高压冻融试验装置研制与初步应用

王崧美¹, 李海鹏^{1,2}, 窦帅³, 康庆平¹, 杨念¹, 张骏¹

(1. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 3. 徐州市交科轨道交通产业研究院有限公司, 江苏 徐州 221000)

摘 要: 研究深土冻融过程的声波响应特性, 对于声波技术应用于深厚表土层人工冻结工程有重要意义。深土原位冻融始终处于高地应力环境下, 但目前声波测试装置尚不具备高压冻融条件下的测试功能。为此本文结合弯曲元测试技术, 研制了侧装式弯曲元高压冻融试验装置, 以了解高应力条件下深土冻融过程的剪切波速。该试验装置主要由试样承压舱、加载系统、控温系统、数据采集系统和弯曲元测试系统构成。系统核心单元——试样承压舱采用双层筒结构, 内筒为聚四氟乙烯筒, 外筒为钢筒, 弯曲元探头设置于内层筒侧壁。通过数值计算确定内筒壁厚 8 mm, 外筒壁厚 15 mm, 该结构可满足高应力下承压舱的抗变形、隔热和隔振要求。利用弯曲元测试系统研究了声波走时确定方法, 以及激励波形和频率等测试参数。根据测试结果, 本试验条件下声波走时采用初达波法确定, 激励波形采用方波, 高密度冻土和未冻土的激励频率分别选择 4 kHz 和 5 kHz。最后, 利用该装置测试了有载条件下深部黏土不同负温下的剪切波速, 初步验证了装置的适用性。

关键词: 高地应力; 弯曲元; 冻融装置; 深土; 剪切波速

中图分类号: P631.8³; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)02-0717-09

0 引言

人工地层冻结技术具有对地层加固效果好、隔绝地下水可靠的优点, 广泛应用于复杂条件下的地下工程建设^[1]。冻结壁关系到地下工程掘砌施工安全, 了解其发展状况和稳定状态是地层冻结工程的重要内容, 除常规采用水文观测孔和测温孔进行测试外, 无损检测技术的应用也受到较多关注^[2-5]。

声波测试技术是一种检测速度快、成本低、对人体无害的无损检测技术, 成功利用声波检测冻结壁厚度将为冻结施工带来很大方便。为了使这项技术得以发展, 首先需要建立声学参数与冻土物理力学性质之间的联系。傅蓉等^[6]利用国产 SYC-2 型声波岩石参数测定仪得到了不同条件下人工冻结砂土及黏土中的超声波波速, 试验表明, 声速是影

响冻土性质各项因素的综合反映。李强等^[7]研究了不同负温、含水量、重度的冻砂土和冻黏土抗压、抗拉强度、弹模与冻土纵横波速、振幅衰减及动弹模的关系, 并分析了冻砂土和冻黏土的差异以及冻砂土蠕变与声波波速的关系。盛煜等^[8]用液浸式超声波循环法测定了含有不同比例废弃轮胎碎屑的 Tomakomai 粉土的纵、横波速度。张建明等^[9]通过兰州季节冻土现场声波波速测试分析了波速与土的胶结状态、温度和含水量的关系。王大雁等^[10-11]运用 UVM-2 型声速测定仪, 测定了不同密度、不同含水率的冻结砂土、冻结黄土和冻结黏土在不同温度下的超声波波速。黄星等^[12-13]利用 RSM-SY5(T) 型非金属声波检测仪, 分析温度、含水率和干密度等对冻结黏土波速的影响以及波速与强度的关系, 同时利用短时傅里叶变换及小波分析研究声波在

收稿日期: 2022-02-14; 修订日期: 2022-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771072); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2021GJZPY15); 江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(202110290298H; 202110290299H)资助

作者简介: 王崧美, 硕士研究生, 主要从事人工冻结工程研究. E-mail: songmeiw001@163.com

通信作者: 李海鹏, 副教授, 主要从事冻土力学和人工冻结工程研究. E-mail: lihaipeng1991@163.com

冻结重塑黄土中传播的波形、频谱等特征。由此可见,利用声波检测技术评估冻结壁发育情况切实可行^[14]。而掌握深部冻土声学参数与物理力学性质之间的联系是至关重要的一环。

压电弯曲元因原理简单、操作方便、成本低、无损检测和易于移植等特点,近年来在声波试验中得到广泛应用^[15]。弯曲元技术应用于冻土研究已见报道,但未大量开展。Park等^[16]利用三对弯曲元件沿着深度安装在三个不同的位置,连续测量无压力条件下土壤冻结期间的压缩波和剪切波。Zhang等^[17]以多年冻土为研究对象,分别用弯曲圆盘和弯曲元测量压缩波和剪切波速度,用于评估在解冻期间的弹性特性。秦辉等^[18]通过开展无侧限压缩试验、弯曲元波速测试,研究建立了冻融循环黄土的波速与单轴抗压强度的经验关系式。

目前冻土声波特性研究多针对浅部土体,相应的声波测试装置尚不具备高压冻融条件下的测试功能。对于深土冻融过程存在较高地应力作用的特殊情况,需要研制一种能够模拟深部冻土真实环境的高压冻融声波测试装置,以认识深土高压冻融条件下的声波特性。为此,本文在总结前人工作的基础上,基于弯曲元测试技术,研制新型高压冻融试验装置,并研究了深土弯曲元声波测试方法。

1 深土高压冻融弯曲元测试系统构建

深部冻土是在经历长时间固结后,并在有载状态下冻结形成的,因此,其合理的试验方式应该是先固结,并在荷载状态下冻结后,再进行试验^[19]。为符合高压环境下土的冻融特征及冻融后物理力学性质的研究,本文设计的测试系统最大承载力达到10 MPa,可自主选择单向或者双向冻结模式,并搭载了侧装式弯曲元测试系统,能够在试验过程中实时获取土体的剪切波速。

本文研制的高压冻融侧装式弯曲元试验装置由试样承压舱、加载系统、控温系统、数据采集系统和侧装式弯曲元测试系统组成,整体结构如图1所示。加载系统由计算机控制伺服加压稳压系统、液压千斤顶与反力架组成,试验中可实时记录加载压力和变形数据,加、卸压过程中压力控制精度为 $\pm 0.5\%$,稳压阶段为 $\pm 0.25\%$,位移控制精度1%;控温系统主要由高低温恒温循环装置、保温材料组成,试验控温范围 $-30\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$,控温精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;数据采集系统主要包括对土体的温度、竖向位移、轴

向荷载以及剪切波速的采集,各组数据集成于计算机中,方便存储及读取。侧装式弯曲元测试系统组成的主要设备有函数发生器、压电线性放大器、电荷放大器和数字示波器。

函数发生器用于产生激励信号,一般可输出波形类型有正弦波、方波、三角波、任意周期脉冲波等,但输出电压幅值相对较低,驱动弯曲元振动效果不明显。因此前端连接压电线性放大器,用于放大函数发生器产生的激励信号,从而更有效地驱动压电传感器。压电线性放大器需具有低电噪音、低畸变、防外部电磁干扰等特点,并具有输入输出过压保护、手动偏压控制等功能。剪切波信号经土体传播后输出电信号较微弱,需采用电荷放大器将接收端的电信号放大后传输至数字示波器。本系统选用具备滤波功能的电荷放大器,通过滤波功能可有效地提高信噪比,使接收信号清晰可辨。数字示波器的作用是接收、显示、存储来自激励端和接收端信号,并确定剪切波在土样中走时。系统中各设备之间通过具有屏蔽功能的信号线连接,具体连接方式见图1。

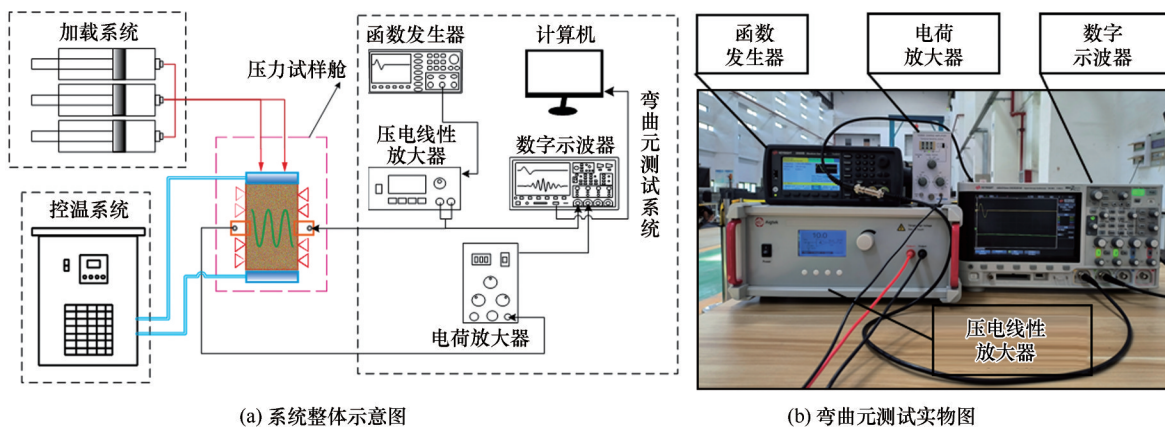
2 试样承压舱设计

2.1 试样承压舱

室内试验研究是获取深部冻土物理力学性质的重要手段之一,试验需模拟深土原位冻融环境。关辉等^[20]采用厚有机玻璃筒作为试样舱,研制了高压土体冻融试验装置,并利用此装置开展了2 MPa荷载下兰州黄土单向冻结试验。对于深400 m以上的土体,初始水平地压近5 MPa,对试验装置的强度及刚度变形要求更高。因此试样承压舱为满足高压冻融试验要求,不仅需要具有承载功能,还需要有足够刚度,以约束试样侧向变形,保证试验精度。与此同时还要有较好的隔热性能,以减少周围环境温度的影响。此外,应避免剪切波经试样承压舱传播到达接收端对测试信号造成干扰,即应具备“隔振”能力。考虑以上条件,本文对试样承压舱从材料选择和结构设计上进行了分析研究。

2.2 双层筒结构设计

一般情况下,金属材料的强度刚度性能好,但是其保温隔热性能不足;而有些非金属材料保温隔热性能好,但是其强度刚度性能相对较差,找到一种同时满足各项功能要求的材料较为困难。因此,我们考虑将试样承压舱设置为双层筒结构,采用两



(a) 系统整体示意图

(b) 弯曲元测试实物图

图1 高压冻融弯曲元试验装置

Fig. 1 High pressure freeze-thaw bending element test apparatus

种不同材料以兼具以上功能。作为与土体直接接触的内层试样筒(以下简称内筒),需要防止声波信号可能会绕过测试土样经内筒传播,对剪切波速的测量带来干扰。

如图2所示,弯曲元发射探头产生激励信号时,土体内部(路径1)和筒-土界面(路径2)会有声波信号传播。本文通过对钢、聚四氟乙烯和土样进行剪切波速测试,测得钢的剪切波速约为 $3\,050\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、聚四氟乙烯的剪切波速大约为 $200\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、土体最小剪切波速约为 $300\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。则剪切波在钢材中沿路径2声波走时为 $32\text{ }\mu\text{s}$,在聚四氟乙烯的声波走时为 $485\text{ }\mu\text{s}$,在土中沿路径1的声波走时为 $206\text{ }\mu\text{s}$ 。据此内筒采用聚四氟乙烯,其不仅保温隔热性能好,而且能够保证剪切波经由土体传播最先到达弯曲元接收探头。

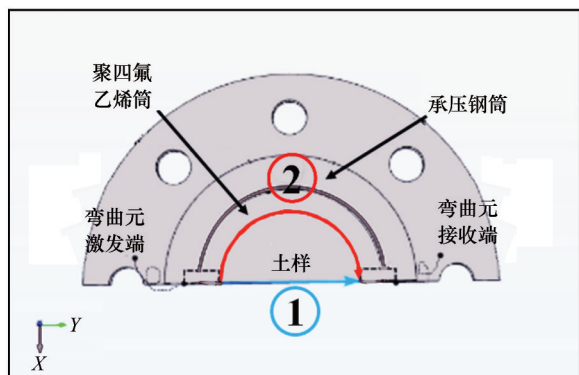


图2 剪切波传播路径

Fig. 2 Paths of the shear wave propagation

但是,聚四氟乙烯材料强度和刚度不能满足高压试验要求,为此,在聚四氟乙烯内筒外设置一强度高刚度大的外层试样筒。外层试样筒(以下简称

外筒)主要是为了增大承压舱的刚度和强度,本文选用的材料是Q235钢。同时,在外筒上预留与内筒相对应的孔洞。为了保证双层试样筒在高压环境下工作时仍具有良好的密封性,在弯曲元底座上安有两层橡胶圈;除此之外,在双层筒与底层承压板之间也增设密封圈,双层筒两端设置定位法兰和螺栓,把二者紧密连接到了一起,起到整体固定和压紧密封圈的作用。图3为双层筒的内部结构,以及双层筒与装置中其他结构之间的关系。

为了测定高压土体在冻融中温度的变化以及波速的变化,在内层聚四氟乙烯筒侧面不同位置处开孔,将温度传感器和弯曲元探头安装于开孔处。两种预留孔沿环向呈 90° ,侧装式弯曲元探头通过筒壁固定,可削弱加卸载过程干扰,有利于探头与土体的耦合^[21]。位于试样承压舱上端的是传热传压活塞杆,本文在传统活塞杆的基础上进行一定改进,将端部放大在内部空间循环冷媒剂,使其传递轴向荷载对土体进行加载的同时,能够实现对土体上端部的冻结和解冻。在试样承压舱下端的是刚性承压板,承压板的上端面开有沟槽便于安放密封圈,下端面紧贴铜盘管循环冷媒剂,对土体下端进行冻结和解冻。开启或关闭上下循环冷媒剂,可实现对土体的单向、双向冻结。试验中土体处于高压环境,常规透水石很容易被压坏,为此本文设计了一种透水钢板代替常规透水石,即在钢板上打有足够多的小孔使其渗透性高于土体渗透性,经实验证明该透水钢板能够满足试验一般要求。

2.3 结构受力计算

本文使用COMSOL软件中结构力学模块,对双层试样筒体进行了应力变形分析,通过分析结果,确定满足试验要求的各部件尺寸。计算中假设钢

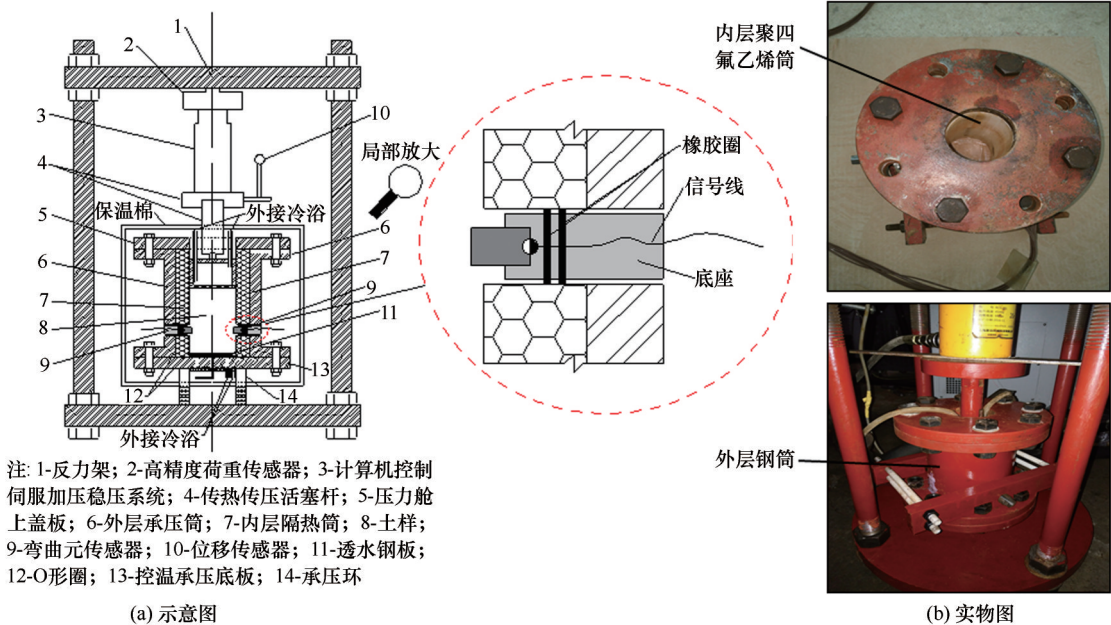


图3 装置主体结构
Fig. 3 The main structure of the device

材料为理想材料,忽略内筒与外筒之间的摩擦。装置中使用材料性能如表 1 所示。试验过程中,土样承受最大压力 10 MPa,土样加载过程对内筒施加径向压力,其值小于轴向压力,计算中取值为轴向压力的 0.8 倍,即取值为 8 MPa;装置受力过程中,对于摩擦力本文主要考虑内筒与土体之间的接触摩擦,土体与内筒之间的摩擦系数设为 0.1;承压板上表面及传热传压活塞杆下表面设为固定约束。在表 2 中给出试样筒体各部件的尺寸预选值,经全部组合验算,在其中选择出最合理的部件尺寸组合。

表 1 材料性能参数(试样筒体)

Table 1 Material performance parameters (sample cylinder)				
材料	本构	杨氏模量/GPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
Q235 钢	弹性	200	0.3	7.85
聚四氟乙烯	弹性	1.42	0.4	2.20

表 2 试样筒体各部件尺寸的预设值

Table 2 Preselected value of each part size of the sample cylinder			
部件名称	需确定尺寸名称	符号	尺寸/mm
承压钢筒	外筒壁厚	<i>c</i>	10、15、20
聚四氟乙烯筒	内筒壁厚	<i>d</i>	6、8、10
传热传压活塞杆	端部壁厚	<i>e</i>	4、6、8

从整体上分析试样筒体受力情况,图 4 给出试样筒体整体表面应力云图以及沿 YZ 平面的内部切

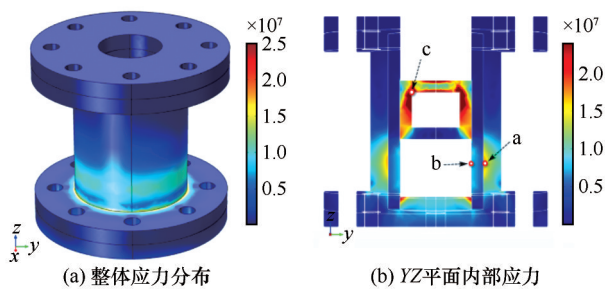


图4 试样筒体应力云图
Fig. 4 Stress cloud map of the sample cylinder

片应力云图(此时,外筒壁厚 15 mm,内筒壁厚 10 mm),从图中可以看出,外筒的最大应力出现在内侧表面中下部(图中标注 a 处),内筒的最大应力出现在内侧表面中下部(图中标注 b 处),传热传压活塞杆的最大应力出现在装置内腔表面(图中标注 c 处)。计算时,需要保证各部分最大应力在安全范围内。利用数值模拟软件计算得到,当传热传压活塞杆壁厚为 4 mm 时,不满足强度要求(装置的应力均小于材质的屈服强度),其余尺寸组合均满足强度要求,因此需要进一步对变形条件进行验算以确定合适尺寸。

图 5 给出试样筒体内部切片 Y、Z 分量位移云图,从图 5(a)中可以看出,内筒、外筒最大径向位移均发生在内侧表面中下部,在此两点处设置 Y 分量位移探针。从图 5(b)中可以看出,传热传压活塞杆最大轴向位移发生在传热传压装置上表面中心处。

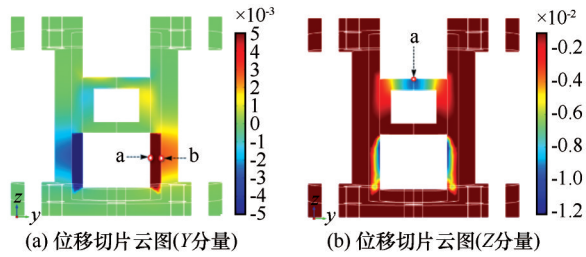


图5 试样筒体位移云图

Fig. 5 Displacement cloud map of the sample cylinder

因此,只需要将以上最大变形危险点控制在安全范围内即可保证装置整体的变形稳定。

图6给出不同组合方式下试样承压舱关键部件最大轴向和径向变形占比,图中红色虚线是变形占比为1%分界线。变形占比是指部件某方向变形量

与该部件在这一方向上尺寸的比例。从图6中可以看出,当外筒壁厚为15 mm,内筒壁厚选为6 mm或8 mm,传热传压活塞杆壁厚选为6 mm或8 mm时,各部分变形占比均小于1%,装置满足变形要求;当外筒壁厚为10 mm,内筒壁厚6 mm,传热传压活塞杆壁厚为6 mm或8 mm时,各部分变形占比均小于1%,装置满足变形要求。出于安全考虑,对于双层试样筒壁厚尽量选择较大的厚度,即聚四氟乙烯筒壁厚选择8 mm,承压钢筒壁厚选择15 mm。同时考虑传热传压活塞杆壁厚较大时,传热传压活塞杆空腔容积将会缩小,上部制冷效果将会降低,因此传热传压活塞杆在满足强度和变形的条件下,壁厚应该尽量小,因此将传热传压活塞杆壁厚选择为6 mm。

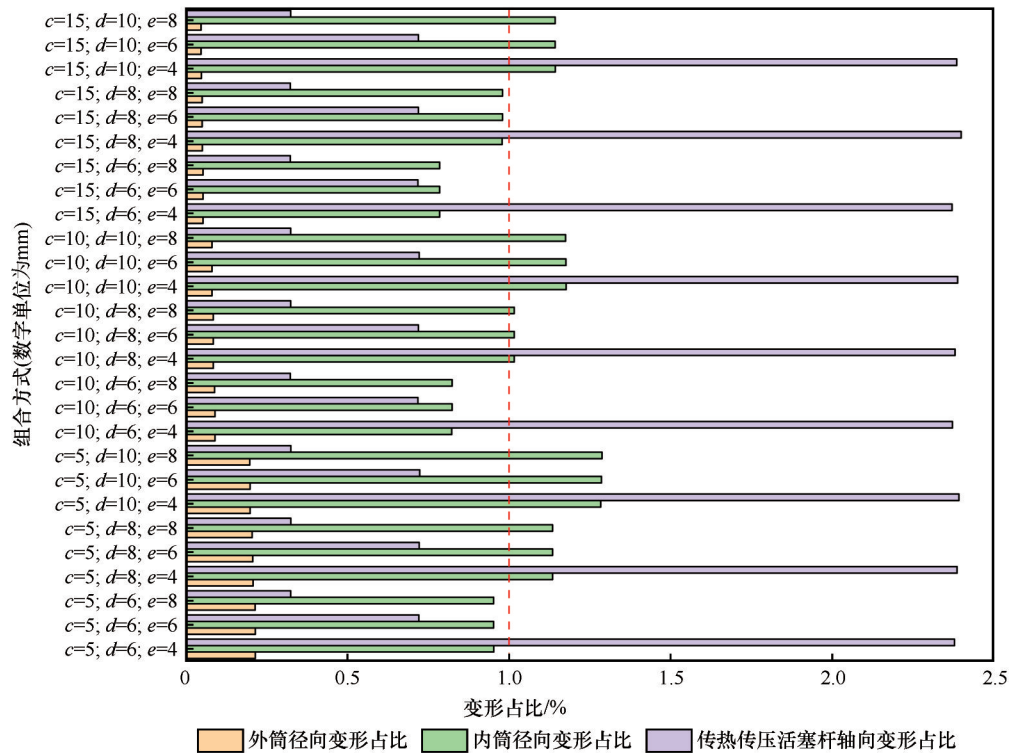


图6 不同组合方式下极限变形占比

Fig. 6 The proportion of ultimate deformation under different combinations

3 弯曲元测试方法

弯曲元是一种可以实现机械信号与电信号互相转换的压电传感器,通常由三层结构贴合而成,上下两层为压电陶瓷片(PZT),中间层为金属加劲层。为保证弯曲元探头信号质量,制作探头时需采用环氧树脂作为弯曲元的防水涂层,并用银胶凝固形成的金属层,屏蔽外界电磁干扰信号。弯曲元工

作时,一端由底座固定,另一端自由,发射探头在交流电压激励下产生横向变形,在介质中产生剪切波;弯曲元接收探头的自由端受迫振动,弯曲元产生电信号能够被数字示波器接收,接收信号与系统的激励波形、激励频率有关。此外关于声波走时的确定方法尚未得到统一的认识,不同确定方法得到的声波走时存在差异^[22]。为减小弯曲元法测试误差,本文利用弯曲元测试系统分析了声波走时确定

方法、激励信号和频率。

3.1 声波走时确定方法

目前判定剪切波传播时间的方法主要有:初达波法、峰值法、互相关法。本文以标准校验试件(材质为有机玻璃)为测试对象确定适合本测试系统的确定方法。试验过程中环境温度为20℃,标准校验试件的剪切波速约为 $1\,354\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。考虑测试装置所造成的系统延时,本文将实测波的传播时间减去系统延时作为最终的剪切波传播时间,经测定系统延时为 $4.8\text{ }\mu\text{s}$ 。图7给出了声波走时不同确定方法测试结果,括号内表示的是激励波形。从图中可以看出,不同确定方法得到的剪切波速都随着频率的增大而增大,即产生了频散现象,从而导致一定误差。频率范围在0~10 kHz时,不同确定方法产生的平均误差分别为初达波法(正弦波) $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、峰值法(正弦波) $9.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、互相关法(正弦波) $8.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、初达波法(方波) $4.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,采用初达波法(方波)测得的剪切波速与实际数值更为接近,相较而言误差最小,因此本文决定选用初达波法(方波)作为剪切波传播时间的确定方法。

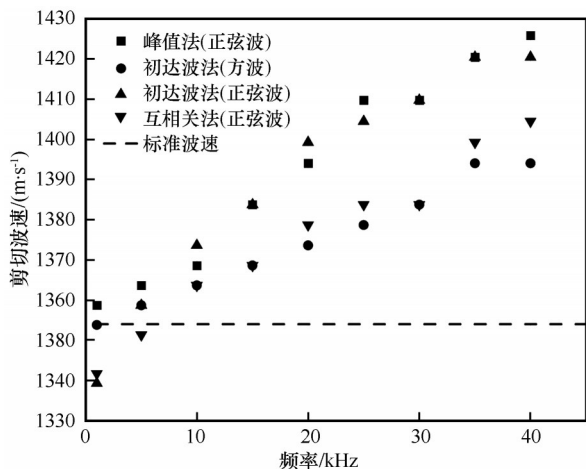


图7 声波走时不同确定方法测试结果

Fig. 7 Test results for different methods of determining the acoustic travel time

3.2 激励信号波形和频率

激励波形的选择在不同试验条件下对弯曲元测试系统稳定性的影响程度不同。我们选择高密度黏土作为测试对象,利用弯曲元测试系统对其进行剪切波速测试,测试中分别用正弦波和方波作为激励波形,两种不同激励波形得到的剪切波速与频率的关系如图8所示。从图8中可以看出,同时采用初达波法作为声波走时确定方法,激励波形为

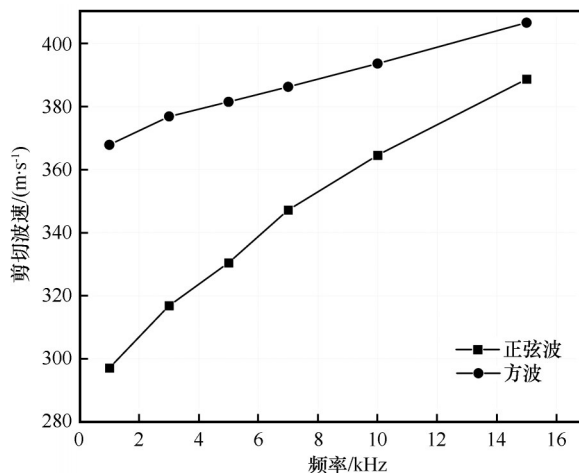


图8 不同激励波形剪切波速与频率的关系

Fig. 8 Shear wave speed versus frequency for different excitation waveforms

方波时,曲线斜率较小,意味着频率变化对波速的影响程度较小,也就意味着此时测试系统更加稳定。因此本文选择方波作为激励信号波形。

另外,激励频率会影响接收信号波形从而影响剪切波速的测量值^[23-24]。通常情况下,当激励频率越接近物体的固有频率,信号越清晰,易于进行信号分析。利用弯曲元测试系统对深部黏土的剪切波速进行了测试,未冻土测试温度为20℃,冻土测试温度-20℃,激励波形为方波,频率为1~100 kHz。将得到的接收信号幅值与激励频率的关系示于图9,由图9可见未冻土在激励频率为5 kHz时幅值最大,而冻土在4 kHz时幅值最大。据此对于本系统,当测试土体处于常温状态下时,激励频率选择5 kHz左右;当测试土体处于低温状态下时,激励频率选

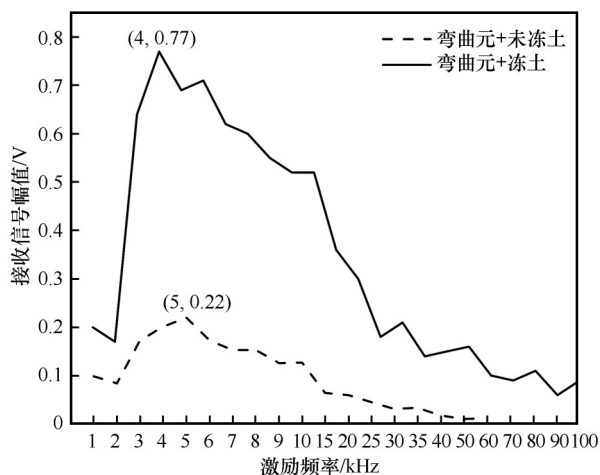


图9 接收信号幅值与激励频率关系曲线

Fig. 9 Received signal amplitude versus excitation frequency curve

择 4 kHz 左右。

4 弯曲元冻融装置初步应用

4.1 试验概况

本文利用该冻融弯曲元试验装置,测试了有载条件下深部冻结黏土的剪切波速。土样取自河南某矿深部黏土,液限为 42.3%,塑限为 20.5%,比重 2.75。制备的重塑试样直径为 61.8 mm,高 125 mm,含水率为 12.1%,干密度分别为 1.72 g·cm⁻³ 和 1.96 g·cm⁻³,荷载等级为 4 MPa、8 MPa。试验采用分级降温方式,温度等级分别为 -5℃、-10℃、-15℃、-20℃、-25℃,利用弯曲元测试系统测取各级温度下试样的剪切波速。

4.2 试验结果

图 10 为不同干密度以及荷载条件下深部黏土剪切波速随温度的变化情况。由图 10 可见,剪切波速随着温度的降低而增大,干密度对波速有明显影响,干密度越大,剪切波速越大。在温度 -5~-25℃

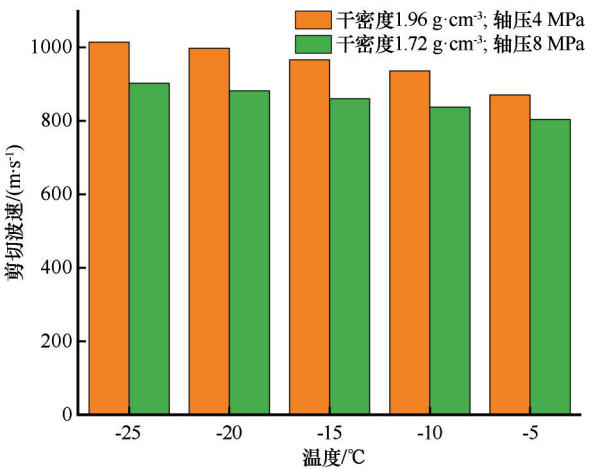


图 10 不同温度下深部冻结黏土剪切波速
Fig. 10 Shear wave velocity in deep frozen clay at different temperatures

范围内,深部冻结黏土的剪切波速为 804~1 014 m·s⁻¹。表 3 为以往报道关于深部冻结黏土剪切波速测试结果,剪切波速范围为 712~1 070 m·s⁻¹,本试验结果在此区间内。

表 3 试验结果对比分析
Table 3 Comparative analysis of test results

土质	试验条件	测试方法	剪切波速/(m·s ⁻¹)		文献来源
			T=-10℃	T=-5℃	
黏土	干密度 1.72 g·cm ⁻³ ,含水量 12.1%,轴压 8 MPa	弯曲元法(频率<20 kHz)	837	804	本文
	干密度 1.96 g·cm ⁻³ ,含水量 12.1%,轴压 4 MPa		936	870	本文
黏土	干密度 1.96 g·cm ⁻³ ,含水量 20.22%,无压力	弯曲元法(频率<20 kHz)	712	795(T=-6℃)	Zhang 等 ^[17]
黏土	干密度 1.71 g·cm ⁻³ ,含水量 21.42%,无压力	超声波仪(频率>20 kHz)	1 170	1 001	马芹永等 ^[25]

由于试验性质和测试条件差异,相同温度条件下本试验结果与文献报道结果有一定差异。分析其原因,Zhang 等^[17]同样采用弯曲元法测试,激励频率低于 20 kHz,但是其是在无压力条件下进行试验,而本文试验是在有压条件下进行的,压力作用使剪切波速增大,所以本文得到剪切波速值会略高一些。由前述测试结果可知,弯曲元测试中存在频散现象。马芹永等^[25]采用超声波测试,激励信号频率大于 20 kHz,本试验的激励频率为 4 kHz,因此本测值要低于超声波法所测的剪切波速值。总体上看,本试验所获得的剪切波速较为可靠,冻融弯曲元试验装置可满足高应力条件下,20~-25℃范围内深土冻融过程实时剪切波速测试要求。

5 结论

针对深土高地应力冻融条件,本文研制了一种

结合弯曲元测试技术的新型高压冻融试验装置,该装置主要由试样承压舱、加载系统、控温系统、数据采集系统和侧装式弯曲元测试系统组成。为保证高压条件下承压舱有足够刚度,通过数值计算承压舱采用双层结构,内筒为聚四氟乙烯筒,壁厚 8 mm,外筒为 Q235 承压钢筒,壁厚 15 mm。弯曲元探头设置于内层筒侧壁,内层采用聚四氟乙烯筒具有隔热和隔振优点。

根据本条件下弯曲元系统测试结果,声波走时宜采用初达波法确定,激励波形采用方波,高密度冻土和未冻土的激励频率分别选择 4 kHz 和 5 kHz。利用该装置测试了有载条件下深部黏土不同负温下的剪切波速,可发现深部黏土剪切波速随着温度降低而增大。对于高致密深部黏土在温度为 -5~-25℃范围,轴压在 4~8 MPa 范围,剪切波速值为 804~1 014 m·s⁻¹。

该装置可进行有载冻融过程深土剪切波速的实时测量,能实现单向和双向冻结,最大固结压力可达 10 MPa。

致谢: 阿拉斯加大学安克雷奇分校杨朝晖教授和哈尔滨工业大学张锋博士为本研究提供了有益建议和帮助,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] Ma Qinyong. Theory and construction technology of artificial freezing method [M]. Beijing: China Communications Press, 2007. [马芹永. 人工冻结法的理论与施工技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.]
- [2] Zhang J W, Murton J, Liu S J, et al. Detection of the freezing state and frozen section thickness of fine sand by ultrasonic testing [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2020, 32(1): 76-91.
- [3] Yang Shulin. Acoustic detection of frozen shaft wall thickness [J]. Hebei Coal, 1985(4): 53-54. [杨书林. 冻结井壁厚度的声波检测[J]. 河北煤炭, 1985(4): 53-54.]
- [4] Zhang Jiwei, Li Fangzheng, Cui Hao, et al. A method for ultrasonic detection of freezing wall expansion velocity, CN109781843A [P/OL]. 2018-12-12 [2019-5-21]. <https://patyee.com/search/detail?exp=exp1648469609030&type=result&an=CN201811517532.7&pn=CN109781843A&index=1>. [张基伟, 李方政, 崔灏, 等. 一种冻结壁扩展速度超声波检测方法, CN109781843A [P/OL]. 2018-12-12 [2019-5-21]. <https://patyee.com/search/detail?exp=exp1648469609030&type=result&an=CN201811517532.7&pn=CN109781843A&index=1>.]
- [5] Wang Jianzhou, Jiu Fengyuan, Xu Jinghao, et al. Research progress and the prospect of rapid non-destructive testing methods for urban artificial frozen walls [C]//China Coal Society. 2018 National Mine Construction Academic Conference Collection of papers. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2018: 51-58. [王建州, 酒逢源, 徐敬豪, 等. 城市人工冻结壁快速无损检测方法研究进展与展望[C]//中国煤炭学会. 2018 年全国矿山建设学术年会论文集. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2018: 51-58.]
- [6] Fu Rong, Zhang Jinsheng, Hou Zhongjie. Influence of moisture in frozen soils on ultrasonic velocity [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 4(2): 65-74. [傅蓉, 张津生, 侯仲杰. 水分对冻土中超声波速度的影响[J]. 冰川冻土, 1983, 4(2): 65-74.]
- [7] Yang Ping, Li Qing. 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. [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.]
- [8] Sheng Yu, Fukuda M, Kim H S, 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. [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.]
- [9] Zhang Jianming, Liu Xu, Zhu Yuanlin, et al. A test study on wave velocity determined by using soniscope in seasonally frozen ground in Lanzhou [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2001, 23(2): 82-85. [张建明, 刘旭, 朱元林, 等. 兰州地区季节冻土声波现场测试研究[J]. 西北地震学报, 2001, 23(2): 82-85.]
- [10] Wang Dayan, Zhu Yuanlin, Zhao Shuping, et al. The ultrasonic method dynamic elastic mechanics parameter test of permafrost research [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 612-615. [王大雁, 朱元林, 赵淑萍, 等. 超声波法测定冻土动弹性力学参数试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 612-615.]
- [11] Wang Dayan, Zhu Yuanlin, Ma Wei, et al. Testing study on relationship between ultrasonic wave velocity and physico-mechanical property of frozen soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1837-1840. [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.]
- [12] Huang Xing, Li Dongqing, Ming Feng, et al. Experimental study on acoustic wave propagation properties of frozen remolded loess during uniaxial loading process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1660-1667. [黄星, 李东庆, 明锋, 等. 冻结重塑黄土单轴加载过程中声波传播特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1660-1667.]
- [13] Huang Xing, Li Dongqing, Ming Feng, et al. Experimental study on acoustic characteristics and physico-mechanical property of frozen silty clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1489-1496. [黄星, 李东庆, 明锋, 等. 冻结粉质黏土声学特性与物理力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1489-1496.]
- [14] Zheng Xinyun. Research of ultrasonic propagation characteristics in sandy silty clay under different temperatures [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2019. [郑新贇. 不同冻结温度下含砂粉质黏土超声波传播特性研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.]
- [15] Dyvik R, Madshus C. Lab measurements of G_{max} using bender elements [C]//Advances in the art of testing soils under cyclic conditions. ASCE, 1985: 186-196.
- [16] Park J H, Lee J S. Characteristics of elastic waves in sand - silt mixtures due to freezing [J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 99: 1-11.
- [17] Zhang F, Yang Z, Still B, et al. Elastic properties of saline permafrost during thawing by bender elements and bending disks [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 146: 60-71.
- [18] Qin Hui, Liu Xin, Lan Hengxing. Experimental study on evaluating the strength properties of compacted loess under the action of freeze-thaw cycles by wave velocity [J/OL]. Journal of Engineering Geology, 2021. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2021-0176>. [[秦辉, 刘鑫, 兰恒星. 用波速评价冻融循环作用下压实黄土强度特性的试验研究[J/OL]. 工程地质学报, 2021. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2021-0176>.]
- [19] Ma Wei, Wu Ziwan, Chang Xiaoxiao. Effects of consolidation process on stress-strain characters of tjaeles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(3): 198-200. [马巍, 吴紫汪, 常小晓. 固结过程对冻土应力-应变特性的影响[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 198-200.]
- [20] Guan Hui, Wang Dayan, Gu Tongxin, et al. Development and application of a new soil freezing-thawing test apparatus for high loading conditions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(6): 1496-1501. [关辉, 王大雁, 顾同欣, 等. 高压条件下土的冻融试验装置研制及应用[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1496-1501.]
- [21] Li Qing. Determination of shear wave velocities of soft clay samples using side-mounted bender elements [J]. Rock and

- Soil Mechanics, 2015, 36(Supp 1): 413-416. [李青. 侧装式弯曲元测量软黏土剪切波速的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 413-416.]
- [22] Chen Yunmin, Zhou Yanguo, Huang Bo. International parallel test on the measurement of shear modulus of sand using bender elements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 874-880. [陈云敏, 周燕国, 黄博. 利用弯曲元测试砂土剪切模量的国际平行试验[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 874-880.]
- [23] Ji Meixiu, Chen Yunmin, Huang Bo. Method for precisely determining shear wave velocity of soil from bender element tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 732-736. [姬美秀, 陈云敏, 黄博. 弯曲元试验高精度测试土样剪切波速方法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 732-736.]
- [24] Wang F T, Li D Q, Du W Q, et al. Bender element measurement for small-strain shear modulus of compacted loess[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(5): 04021063.
- [25] Ma Qinyong, Peng Wanwei, Zhu Yuanlin. Research on relationship among longitudinal and transverse wave velocities and temperature of artificially frozen clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 290-293. [马芹永, 彭万巍, 朱元林. 冻结黏土纵、横波速与温度的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 290-293.]

Development and preliminary application of a side-mounted bending element high pressure freeze-thaw test apparatus

WANG Songmei¹, LI Haipeng^{1,2}, DOU Shuai³, KANG Qingping¹,
YANG Nian¹, ZHANG Jun¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology,

Xuzhou 221008, Jiangsu, China; 3. Xuzhou Jiaoke Rail Transit Industry Research Institute Co.,

Xuzhou 221000, Jiangsu, China)

Abstract: The acoustic velocity of deep soils subjected to freeze-thaw is the basis of application of acoustic technology in deep artificial ground freezing engineering. For the deep soils, the in-situ freeze-thaw process is under high earth stress. However, acoustic test devices are not currently available for testing under high pressure freeze-thaw conditions. To investigate the shear wave velocity of deep soils under the conditions, a freeze-thaw test device with side-mounted bending element was developed. The test device is mainly composed of a specimen bearing chamber, loading system, temperature control system, data acquisition system and bending element test system. The specimen bearing chamber is a double-layer cylinder, the inner cylinder is a Teflon cylinder with the wall thickness of 8 mm, and the outer cylinder is a steel cylinder with the wall thickness of 15 mm. The bending element probe is mounted on the side wall of the inner cylinder. This structure can meet the requirements of deformation resistance, thermal insulation and vibration isolation under high stress. The bending element test system was used to investigate the method of determining the acoustic travel time and the test parameters. According to the test results, the acoustic travel time is determined by the initial waveform method, and the transmitting probe is excited by square wave. The excitation frequencies of 4 kHz and 5 kHz were chosen for high-density frozen clay and unfrozen clay, respectively. Finally, the shear wave velocities of deep clay at different negative temperatures under high stress were tested using the device, and the applicability of the device was verified.

Key words: high ground stress; bending element; freeze-thaw devices; deep clay; shear wave velocity

(责任编辑: 张泽)