

超声波法测定冻土动弹性力学参数试验研究

Study on experimental determination of the dynamic elastic mechanical parameters of frozen soil by ultrasonic technique

王大雁, 朱元林, 赵淑萍, 李海鹏

(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)

摘要: 运用 UVM-2 型声速测定仪, 测定了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(纵波波速和横波波速); 根据弹性理论, 利用所测得的超声波波速, 计算了被测冻土试样的动弹性力学参数(动弹性模量 E 、动剪切模量 G 和泊松比 μ)。计算结果表明: 冻土的动弹性模量和动剪切模量随着温度的降低而增加, 它们之间的规律可用一个统一的方程来描述; 冻土的动泊松比随着温度的降低而减小; 在低含水率范围内的冻结黄土, 其动弹性模量和动剪切模量随含水率的增加而增加, 在高含水率范围内的冻结黏土, 它们则随含水率的增加而减少; 冻土的动泊松比随含水率的增加而增加。

关键词: 超声波; 冻土; 动弹性力学参数

中图分类号: TU 445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)05-0612-04

作者简介: 王大雁(1971-), 女, 甘肃临洮人, 硕士研究生, 主要从事冻土工程与冻土力学等的研究工作。

WANG Da-yan, ZHU Yuan-lin, ZHAO Shu-ping, LI Hai-peng

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Velocities of the ultrasonic (dilatational and shear) waves in frozen fine sand, silt (loess) and clay with different water contents were measured at different temperatures by UVM-2 Ultrasonic Measuring System. Then, the dynamic elastic mechanical parameters (dynamic elastic modulus E , dynamic shear modulus G and Poisson's ratio μ) of the frozen soils tested were calculated in terms of elastic theory based on the measured ultrasonic wave velocities. The calculated results show that both of dynamic elastic modulus and shear modulus of the three types of frozen soils increase with decreasing temperature, and their relations can be described by same formula. The Poisson's ratios of the frozen soils tested increase with increasing temperature. Both of the dynamic elastic modulus and shear modulus of frozen silt and clay with low water content increase with increase of water content; whereas the moduli of those with high water contents decrease with increasing water content. The Poisson's ratios of the frozen silt and clay increase with increasing water content in the wide range of water contents tested.

Key words: ultrasonic wave; frozen soil; dynamic elastic mechanical parameters

1 引言*

冻土动弹性模量 E 、动剪切模量 G 和动泊松比 μ 是冻土动力学性质的 3 个基本参数, 也是冻土地基及其他冻土工程设计必不可少的力学指标, 可是由于测试技术问题, 国内外在这方面的研究较少。何平等对不同温度、不同频率和不同荷载等因素作用下的饱和和冻结粉土进行了单轴抗压振动试验, 讨论了最大应力、应变及温度对动弹模的影响^[1]。徐学燕等通过在 MTS 振动系统上施加循环荷载, 测定在循环动应力作用下的动应力-动应变关系曲线, 间接得到冻土的动弹性模量表达式^[2]。何平等用径向应变规在 MTS 系统上测试了 3 种土质(黏土、黄土和砂土)在不同负温下泊松比及体变随轴向应变的变化规律^[3]。

近年来, 由于超声检测技术具有快速、简单、对被测物无损等优点, 在岩土特性检测及混凝土探测中得到了广泛应用。可是, 使用超声波法测试冻土特性, 研究很少, 测试冻土的力学参数, 研究则更少。盛煜等用

液浸式超声波循环法测定了不同比例废弃轮胎碎屑的 Tomakonai 粉土在不同负温下的纵、横波速度, 探讨了冻土中的未冻水含量对冻土超声波波速的影响^[4]。Nakano 等采用脉冲首次到达法(the pulse first-arrival)和临界角法(the critical angle method)测定了饱和冻土中, 超声波纵波速度和横波速度与温度变化的关系, 讨论了未冻水含量对超声波波速的影响, 计算得出冻结砂土的泊松比几乎不随温度的变化而变化, 而冻结粉土与冻结黏土的泊松比随温度的升高而降低的结论^[5]。Nakano 等又应用临界角法测定了 Ottawa 砂的超声波纵、横波速以及纵波阻尼随含水率的变化关系^[6]。杨平等研究了不同负温、含水率及容重的冻砂土和冻黏土抗压强度、抗拉强度及弹模与冻土纵、横波波速、振幅衰减及动弹模的关系, 并分析了冻结砂土和冻结黏土的差异以及冻土蠕变与声波波速的关系^[7]。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40171021); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新项目(210053)

收稿日期: 2001-11-20

为深入研究冻土的动力学性质, 笔者运用 UVM-2 型声速测定仪, 测定了冻结黏土、冻结黄土和冻结砂土中的声波波速, 根据波速计算了这 3 种土的动弹性模量、动剪切模量和动泊松比, 并讨论了它们随冻土负温和含水率的变化规律。

2 试验原理

试验采用经过改进的 UVM-2 型声波测定系统, 利用脉冲循环法测定声速, 它以测量某一固定距离 l 之间声传播所需的时间为基础。试验中, 使用 2 个换能器, 一个作发射器, 另一个作接收器。当从发射器发射的脉冲信号, 垂直透射到接收器, 然后反射回来, 让反射回来的脉冲信号再去触发发射电路, 再发射下一个脉冲, 这样不断地循环。只要测出它的循环周期, 就等于测到声波的传播时间^[8]。如果已知声程 $2l$, 便可由下式求得声速 c :

$$c = 2l/T \quad (1)$$

由于电子线路有一定的延迟时间 T_0 , 测得的 T 并非声波在 $2l$ 声程中所传播的时间, 而是多了 T_0 , 因此, 上式应变为

$$c = 2l/(T - T_0) \quad (2)$$

通过式(2), 就可得到声波在冻结试块中传播的纵波波速与横波波速, 从而依据弹性理论, 利用所测定的纵波波速 V_p 、横波波速 V_s 与该试块的密度 ρ , 便可计算出冻土的动弹性模量 E 、动剪切模量 G 和动泊松比 μ , 计算式如下^[9]:

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \\ G &= \rho V_s^2 \\ \mu &= \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3 试样制备与试验方法

试验土质为哈尔滨黏土、兰州黄土(粉土)及北京细砂, 其中哈尔滨黏土的 $w_L = 35.5\%$, $w_p = 22.0\%$; 兰州黄土的 $w_L = 24.6\%$, $w_p = 17.2\%$ 。

3.1 试样制备方法

首先, 按所要求的密度和含水率将试验土均匀拌和, 装入试样模中击实成为标准圆柱状样品; 然后, 将样品移至低温室使试样迅速冻结, 24 h 后脱模; 最后, 在低温室将其车削成试验所需试样, 并精确测量其尺寸、重量。

3.2 试验方法

首先调试超声波测试系统, 待系统调试完毕后, 将

试样置于特制的冻土恒温装置及轴向加压耦合测试架上进行恒温, 当温度达到预期恒定值时测定冻土试样中的超声波纵和横波延时, 然后根据式(2)计算冻土纵、横波波速。由于冻土纵、横波波速测定不仅与试块含水率、冻土的颗粒均匀程度有关, 还与负温控制精度、显示跟随性程度、换能器两端加压恒定程度以及换能器两端面与冻土试样端面之间声耦合状况有关。所以, 试验采取以下措施保证测试的精确性: ①对各类土的含水率进行严格测定, 并在测试过程中, 为防止水分散失, 用橡胶套裹住所测试样, 以保证含水率的稳定; ②精确控温, 使试验温度波动不超过 $\pm 0.1^\circ\text{C}$; ③换能器端面与冻土试样端面之间保证较良好的耦合。

4 试验结果与讨论

3 种试验土样在不同负温与不同含水率条件下的纵波波速和横波波速测试结果分别列于表 1 和表 2。根据式(3), 便可计算出相应的动弹性力学参数。

表 1 不同负温下冻土试样纵、横波波速测定值

Table 1 The measured values of dilatational and shear waves velocities in frozen soils under different temperatures

冻土类型	w /%	ρ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	温度 / $^\circ\text{C}$	V_p /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	V_s /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
冻结黏土*	31.00	1.94	-2	2124	905
	31.00	1.94	-5	2497	1103
	31.00	1.94	-7	2673	1207
冻结黄土	31.00	1.94	-10	2737	1274
	18.86	1.90	-4	3310	1844
	18.86	1.90	-6	3439	1950
冻结砂土	18.86	1.90	-8	3539	2014
	18.86	1.90	-10	3606	2059
	17.60	1.92	-4	3679	2375
冻结砂土	17.60	1.92	-8	3773	2504
	17.60	1.92	-12	3827	2583
	17.60	1.92	-18	3892	2680

* 数据由凌长贤博士提供。

表 2 不同含水率下冻土试样纵、横波波速测定值

Table 2 The measured values of dilatational and shear waves velocities in frozen soils with different water contents

冻土类型	w /%	ρ /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	温度 / $^\circ\text{C}$	V_p /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	V_s /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
冻结黏土*	18.06	2.08	-5	2411	1286
	21.50	1.98	-5	2427	1227
	26.09	1.89	-5	2433	1109
冻结黄土	31.00	1.94	-5	2497	1103
	7.78	1.76	-10	2586	1558
	10.41	1.79	-10	2616	1572
冻结砂土	16.69	1.87	-10	3597	2041
	22.50	1.91	-10	4027	2156

* 数据由凌长贤博士提供。

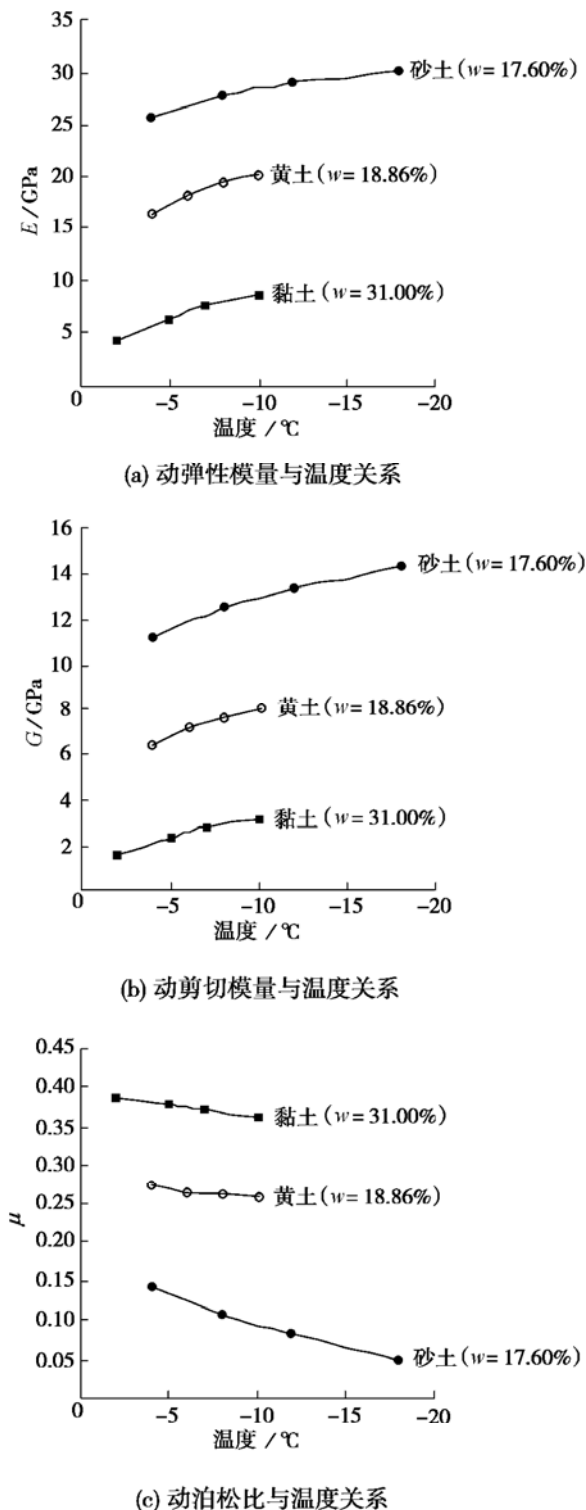


图1 动弹性模量、动剪切模量、动泊松比与温度关系曲线

Fig. 1 Relationship between dynamic elastic modulus, dynamic shear modulus, dynamic Poisson's ratio and temperature

4.1 动弹性力学参数与温度的关系

3种试验冻土在一定含水率下动弹性模量、动剪切模量及动泊松比随温度的变化见图1所示。

从图1(a)可以看出,冻土的动弹性模量随着温度的降低而增加,这是因为温度降低,冻土内的含冰率提高,使土颗粒间的胶结能力增强,从而导致冻土本身强

度提高。对试验结果进行回归分析,可得到冻土的动弹性模量随温度变化关系式:

$$E = A \ln \theta + B \quad (4)$$

式中 E 为动弹性模量(GPa); θ 为负温绝对值($^{\circ}\text{C}$); A 和 B 是与土质和含水率有关的参数。3种类型的冻土在试验含水率条件下的 A , B 值列于表3中。从图1(a)还可以看出,土颗粒愈粗,其动弹性模量亦愈大,即 $E_{\text{细砂}} > E_{\text{粉土}} > E_{\text{黏土}}$ 。

表3 式(4)中参数 A , B 值

Table 3 Values of the parameters A and B in Eq. (4)

冻土类型	$w/\%$	A	B	相关系数
冻结黏土	31.00	2.6128	2.5341	0.9781
冻结黄土	18.86	4.1581	10.7640	0.9862
冻结砂土	17.60	2.8787	21.7610	0.9787

从图1(b)可以看出,冻土的动剪切模量随温度的变化趋势与动弹性模量随温度的变化趋势相似,都随温度的降低而增加。而且,它与土质的关系也是颗粒愈粗,动剪切模量愈大,即 $G_{\text{黏土}} < G_{\text{黄土}} < G_{\text{砂土}}$ 。对图1(b)所示资料用回归分析得出冻土的动剪切模量与温度的关系式为

$$G = A \ln \theta + B \quad (5)$$

式中 G 为动剪切模量(GPa); θ 为负温绝对值($^{\circ}\text{C}$); 系数 A , B 是与土质和含水率有关的参数。在本试验条件下, A , B 的取值列于表4中。

表4 式(5)中参数 A , B 值

Table 4 Values of the parameters A and B in Eq. (5)

冻土类型	$w/\%$	A	B	相关系数
冻结黏土	31.00	0.9765	0.8817	0.9805
冻结黄土	18.86	1.7455	4.0695	0.9844
冻结砂土	17.60	2.0243	8.4031	0.9886

图1(c)为3种试验土质在试验含水率范围内动泊松比随温度的变化关系。由图1(c)可见,动泊松比随温度的降低而减小,这种变化趋势与文献[3]研究静泊松比的趋势相似。但 Nakano 等用声波法测得^[5]:冻结黏土和冻结粉土的泊松比随温度的升高单调减小,而冻结砂土的泊松比却不随温度的变化而变化。动泊松比随土质的变化规律与文献[3]研究的有关静泊松比的结果恰好相反。笔者的研究结果是土颗粒越粗,动泊松比越小,即 $\mu_{\text{黏土}} > \mu_{\text{黄土}} > \mu_{\text{砂土}}$ 。而通过MTS径向应变规所测得的结果是土颗粒愈粗,静泊松比愈大,即 $\mu_{\text{砂土}} > \mu_{\text{黄土}} > \mu_{\text{黏土}}$ ^[3]。可见,动、静泊松比随温度变化的趋势是一致的,而随土质变化的规律却是不同的。

4.2 冻土的动弹性力学参数与含水率关系

一定温度下,冻结黏土和冻结黄土的动弹性力学参数随含水率的变化见图2所示。

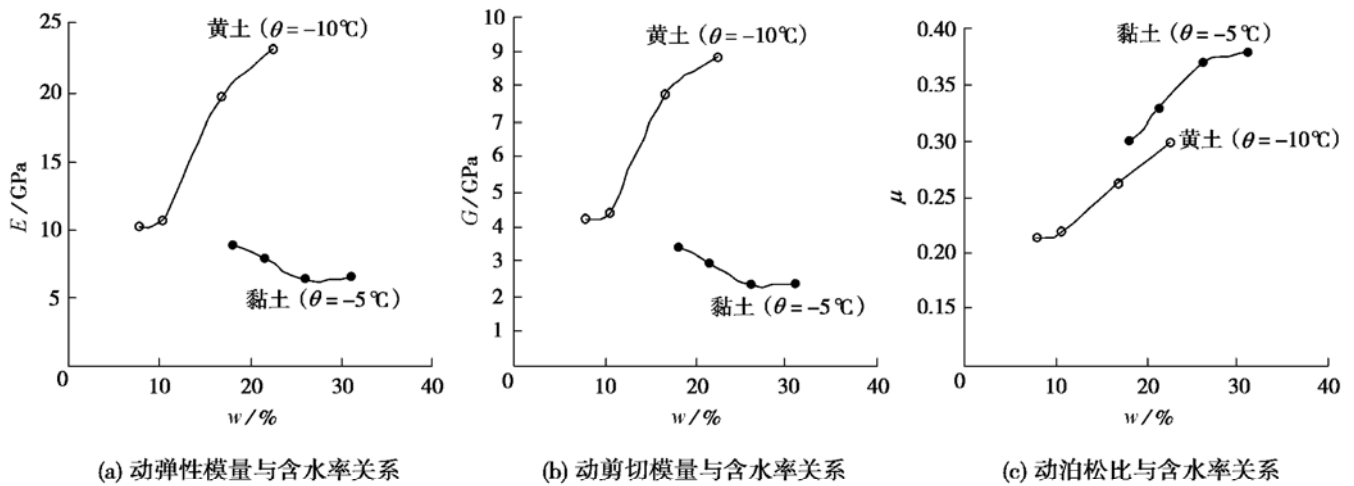


图 2 动弹性模量、动剪切模量、动泊松比与含水率关系曲线

Fig. 2 Relationship between dynamic elastic modulus, dynamic shear modulus, dynamic Poisson's ratio and initial water content of frozen soil

由图 2(a) (b) 可见, 处在含水率较低范围内的冻结黄土, 其动弹性模量及动剪切模量随含水率增加而增大; 而处在含水率较大范围内的冻结黏土, 其动弹性模量及动剪切模量随含水率增加而减小。研究结果与同一种土质冻土的破坏应变、极限抗压强度及冻结强度随含水率的变化规律相一致^[10]。因为当含水率较小时, 随着含水率的增加, 土颗粒间的冰胶结面积明显增加, 因此冻土强度及模量亦随之增大。而当含水率增加到一定程度后, 随着含水率的增加, 土颗粒逐渐被冰挤开, 土颗粒间的胶结力逐渐减小, 因此冻土强度及模量将随之减小。

由图 2(c) 可见, 在一定温度下, 冻结黏土及冻结黄土的动泊松比在试验含水率范围内随含水率增加而增加, 没有出现像动弹性模量和动剪切模量那样在较大含水率范围内随含水率增加而减小的现象。

5 结 论

(1) 测试结果表明, 超声波法能较快速、简便、准确地室内和野外测定冻土的动弹性力学参数, 冻土的动弹性力学参数可用多种方法测定, 超声波法是首选的方法之一。

(2) 冻土的动弹性模量和动剪切模量随温度降低而增加的规律可以用统一的方程来描述, 即 $E, G = A \ln \theta + B$, 式中的系数与土质及含水率有关。

(3) 在含水率较小范围内, 冻土的动弹性模量和动剪切模量随含水率增加而增加; 当含水率增大到一定值后, 它们则随含水率增加而减小。

(4) 冻土的动泊松比随温度升高和含水率增加而增大。

(5) 冻结砂土的动弹性模量和动剪切模量最大, 冻结粉土次之, 冻结黏土则最小。冻土的动泊松比随土质的变化规律则相反, 即冻结黏土最大, 冻结粉土次之, 冻结砂土最小。

本文在试验过程中, 得到了彭万巍高工和杨曙光老师的帮助, 特此感谢。

参考文献:

- [1] 何平, 朱元林, 张家懿, 等. 饱和冻结粉土的动弹模与冻强度[J]. 冰川冻土, 1993, 15(1): 170-174.
- [2] 徐学燕, 仲丛利, 朱元林, 等. 循环荷载下冻土的动弹模及临界动应力[A]. 第五届全国冰川冻土学大会论文集(上册)[C]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 707-711.
- [3] 何平, 朱元林, 等. 冻土的变形性能与泊松比[J]. 地下空间, 1999, 19(5): 504-507.
- [4] 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): 716-720.
- [5] 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.
- [6] Nakano Y, Arnold R. Acoustic properties of frozen Ottawa sand[J]. Water Resources Research, 1973, 9(1): 178-184.
- [7] 杨平, 李强. 冻土力学参数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] 袁易全. 近代超声原理与应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 1996. 226-236.
- [9] 丁伯阳. 土层波速与地表脉动[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1996. 264-340.
- [10] 吴紫汪, 马巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994. 36-85.