

冻结哈尔滨粉质黏土超声波速测定试验研究

Study on frozen Harbin silty clay through its measuring tests of ultrasonic velocity

凌贤长^{1,2}, 徐学燕¹, 徐春华¹, 李小稚¹

(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 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: 采用超声波技术测定冻土动弹性力学指标正是目前冻土学术界及工程领域致力研究的一个热点。本文将基于日产 UVM-2 型声速仪对冻结哈尔滨粉质黏土超声波速测定结果, 主要考察负温和含水率对超声波在冻土中传播速度及冻土动弹性力学指标的影响。

关键词: 冻结粉质黏土; 超声波速测定; 动弹性力学指标; 负温; 含水率

中图分类号: TU 432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2002)04-0456-04

作者简介: 凌贤长(1963-), 男, 安徽庐江县人, 理学博士, 哈尔滨工业大学岩土工程专业副教授, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所高级访问学者, 主要从事岩土地震工程、地下岩土工程及冻土工程等方面研究工作。

LING Xian-zhang^{1,2}, XU Xue-yan¹, XU Chun-hua¹, LI Xiao-zhi¹

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, LCAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Nowadays, it is just a hotspot in the field of frozen soil how to measure the dynamic elastic mechanical indexes of the frozen soil using ultrasonic technology. This paper will mainly discuss the influence of temperature below centigrade zero and water content upon the spreading velocity of ultrasonic in the frozen soil and the dynamic elastic mechanical indexes of the frozen soil based on the measured results of ultrasonic velocity in frozen Harbin silty clay by Japanese UVM-2 ultrasonoscope.

Key words: frozen silty clay; measuring of ultrasonic velocity; dynamic elastic mechanical index; temperature below centigrade zero; water content

1 引言*

超声波技术是一种科技含量极高且广泛应用于多种行业的未来高新技术^[1], 近年来在冻土力学及冻土工程中的应用日益受到重视^[2,3]。如何有效测定冻土的动弹性力学指标长期以来一直是冻土力学界致力研究的热点课题之一^[4~15]。本文将基于现代先进的日产 UVM-2 型声速仪对冻结哈尔滨粉质黏土超声波速测定结果, 主要考察负温和含水率对超声波在冻土中传播速度及冻土动弹性力学指标的影响。

UVM-2 型声速仪为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于 1990 年从日本超音波株式会社引进的高精度超声波测试仪^[3]。该声速仪具有自动化与数字化程度高、操作简便易行、测量迅速高效且适用范围广等诸多优点^[4], 工作频率范围为 1~10 MHz 且在 0.5~0.05 μs 范围可调, 在声循环次数为 10⁴ 时的最小显示位数可达 0.01 ns, 基于声循环提高延时测定精度且又通过固定延时防止试件内部多重反射波的影响, 能够无损准确地测定材料超声波速, 并据此计算其动弹性力学指标^[2,3]。

组成及物理性质指标见表 1。为使试件具有良好的含水及结构均匀性, 以确保试验结果的可比性, 特采用重塑土人工冻结法制备试件。具体的试件制备程序: ①原状土风干、碾碎、过筛后, 测定初始含水率; ②按试验设计要求, 将土加水湿润 24 h, 再测定含水率; ③在标准制样模具(φ61.8 mm × 150 mm)中, 分三层击土(每层击 30 次)制备试件; ④在 -20℃ 温度条件下, 快速冻结试件 24 h; ⑤试件脱模进一步加工成 φ61.8 mm × 30 mm 标准试件; ⑥标准试件在测试温度下恒温 12 h。为考察负温影响, 在冻土密度及含水率一定条件下, 对同一试件采用分级变温方式连续测试。又在负温一定条件下, 采用不同含水率的试件依次测试, 以研究含水率的影响。试验条件见表 2。在位于特制的恒温装置中的轴向加压耦合架上进行试验, 温控精度为 ±0.1℃, 测试频率为 1 MHz。

表 1 冻结哈尔滨粉质黏土粒组组成及主要物理性质指标测定结果

Table 1 Measured results of grain size distribution and main physical parameters of frozen Harbin silty clay

粒组组成 / %				w_L	w_p	I_p
$d < 0.005 \text{ mm}$	$0.005 \text{ mm} < d < 0.05 \text{ mm}$	$d > 0.05 \text{ mm}$		/ %	/ %	/ %
45.7	40.9	7.4		35.5	22.0	13.5

2 试件制备及试验条件

本试验土样取自哈尔滨, 土性为粉质黏土, 其粒组

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40071021)

收稿日期: 2001-10-15

表 2 冻结哈尔滨粉质黏土和冻结兰州黄土超声波速测定结果

Table 2 Measured results of ultrasonic velocity in frozen Harbin silty clay and frozen Lanzhou loess

土样	试件 编号	ρ $/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	w $/\%$	$\theta/^\circ\text{C}$	V_p $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	V_s $/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	E_d $/\text{GPa}$	G_d $/\text{GPa}$	μ_d
冻结 哈尔 滨粉 质黏 土	W31- 10	1.940	31.0	- 10	2737	1274	8.58	3.15	0.362
	W31- 7	1.940	31.0	- 7	2673	1207	7.76	2.83	0.372
	W31- 5	1.940	31.0	- 5	2497	1103	6.51	2.36	0.379
	W31- 2	1.940	31.0	- 2	2124	905	4.42	1.59	0.389
	W31- 5	1.940	31.0	- 5	2497	1103	6.51	2.36	0.379
	W26- 5	1.992	26.09	- 5	2433	1109	6.37	2.33	0.369
	W21- 5	1.982	21.5	- 5	2427	1227	7.93	2.99	0.328
	W17- 5	2.080	18.1	- 5	2411	1286	8.95	3.44	0.301
冻结 兰州 黄土		1.57	22.80	- 10		1947			
		1.57	22.80	- 8		1905			
		1.57	22.80	- 6		1847			
		1.57	22.80	- 4		1760			
		1.57	22.80	- 2		1584			
		1.60	18.86	- 10	3606				
		1.60	18.86	- 8	3539				
		1.60	18.86	- 6	3439				
		1.60	18.86	- 4	3310				
		1.60	18.86	- 2	3065				

注: 冻结兰州黄土超声波速测定结果据文献[2]。 ρ 为土的密度(冻结哈尔滨粉质黏土为湿密度, 冻结兰州黄土为干密度); w 为土的含水率; θ 为试验温度; V_p 为纵波波速; V_s 为横波波速; E_d 为动弹性模量; G_d 为动剪切模量; μ_d 为动泊松比。

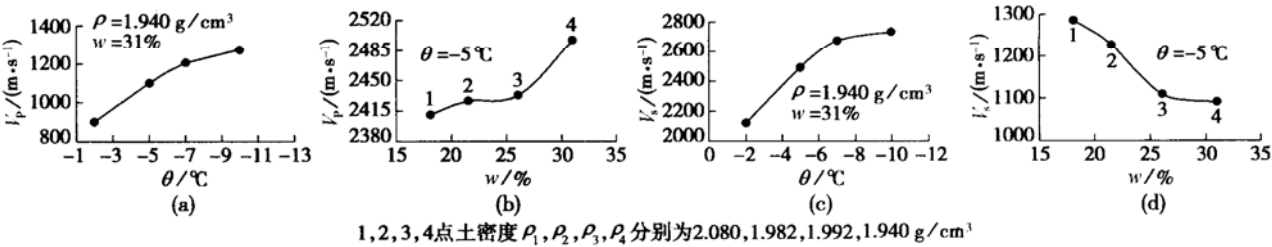


图 1 冻结哈尔滨粉质黏土超声波速与负温及含水率之间关系

Fig. 1 Relation between ultrasonic velocity and temperature, water content of frozen Harbin silty clay

3 试验结果分析

3.1 超声波特性

冻结哈尔滨粉质黏土超声波速测定结果如表 2 所示。由图 1(a), (c) 可知, 在土的密度 ρ ($= 1.940 \text{ g/cm}^3$) 和含水率 w ($= 31.0\%$) 一定条件下, 纵波波速 V_p 和横波波速 V_s 与负温 θ 之间呈基本一致的非线性增函数变化关系。经过多次数值拟合表明, 它们与负温 θ 之间关系采用式(1), (2) 二次拟合式描述最适宜, 相关系数 R 反映这两个二次式子均具有极高的拟合精度。

$$V_p = - 10.3\theta^2 - 200.89\theta + 1760.7$$
$$R = 0.9994$$

(1)

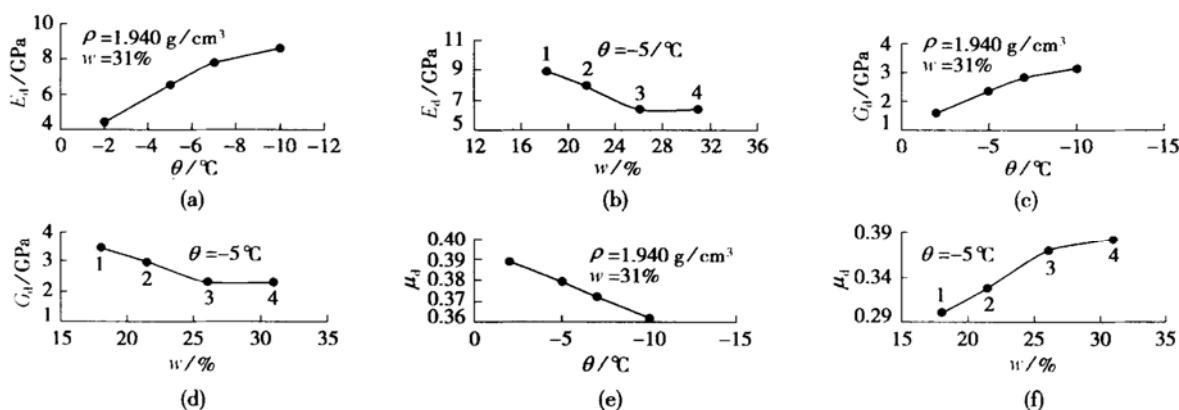
$$V_s = - 4.3667\theta^2 - 98.871\theta + 723.34$$
$$R = 0.9996$$

(2)

由图 1(b), (d) 可以看出, 在负温 θ ($= - 5^\circ\text{C}$) 一定条件下, 波速 V_p 与含水率 w 之间呈非线性增函数变化关系, 波速 V_s 与含水率 w 之间呈非线性减函数变化关系。二者与含水率 w 之间表现出一种反消长变化规律。当含水率 $w \leq 26.09\%$ 时, 随含水率 w 升高, 波速 V_p 缓慢增大、而波速 V_s 则快速减小; 当含水率 $w > 26.09\%$ 时, 随含水率 w 升高, 波速 V_p 转为快速增大、而波速 V_s 则转为缓慢减小。故此, 可以初步认为 26.09% 是在上述试验条件下的波速 V_p 和波速 V_s 随含水率 w 变化的“限界”含水率。由于图 1(b), (d) 中曲线均有一个非常明显的拐点, 而二者均仅有 4 个试验点, 所以对其不宜再做拟合分析。

3.2 动弹性力学指标

基于以上冻结哈尔滨粉质黏土超声波速测定结果, 根据文献[1]建议的如下式(3)~(5), 可计算其动



1, 2, 3, 4点土密度 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ 分别为 2.080, 1.982, 1.992, 1.940 g/cm³

图2 冻结哈尔滨粉质黏土动弹性力学指标与负温及含水率之间关系

Fig. 2 Relation between the dynamic mechanical indexes and temperature, water content of frozen Harbin silty clay

弹性模量 E_d 、动剪切模量 G_d 及动泊松比 μ_d , 见表 2。

$$E_d = \frac{3\rho V_s^2(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (3)$$

$$G_d = \rho V_s^2 \quad (4)$$

$$\mu_d = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left| \frac{V_p}{V_s} \right|^2 - 1 \quad (5)$$

由图 2(a), (c) 可知, 在土的密度 $\rho (= 1.940 \text{ g/cm}^3)$ 和含水率 $w (= 31.0\%)$ 一定条件下, 动弹性模量 E_d 和动剪切模量 G_d 与负温 θ 之间表现为比较一致的非线性增函数变化关系。当负温 $\theta < -7^\circ\text{C}$ 时, 二者随负温 θ 降低而增大的幅度稍有减小。经过多次数值拟合表明, 它们与负温 θ 之间关系采用式(6), (7) 二次拟合式描述很合适, 相关系数 R 反映这两个二次式子均具有极高的拟合精度。

$$E_d = -0.0423\theta^2 - 1.0342\theta + 2.4963 \quad (6)$$

$$R = 0.9989$$

$$G_d = -0.015\theta^2 - 0.3774\theta + 0.8859 \quad (7)$$

$$R = 0.9978$$

由图 2(b), (d) 可以看出, 在负温 $\theta (= -5^\circ\text{C})$ 一定条件下, 动弹性模量 E_d 和动剪切模量 G_d 与含水率 w 之间表现为基本一致的非线性减函数变化关系。当含水率 $w \leq 26.09\%$ 时, 二者随含水率 w 升高而降低较快; 当含水率 $w > 26.09\%$ 时, 它们随含水率 w 升高而降低的幅度很快减小且趋向稳定于某一值。因此, $w = 26.09\%$ 应该是在上述试验条件下的动弹性模量 E_d 和动剪切模量 G_d 随含水率 w 变化的“限界”含水率。由于图 2(b), (d) 中曲线均有一个非常明显的拐点, 又因为这两条曲线均仅有 4 个试验点, 所以不宜对其再做拟合分析。

由图 2(e) 可知, 在土的密度 $\rho (= 1.940 \text{ g/cm}^3)$ 和含水率 $w (= 31.0\%)$ 一定条件下, 动泊松比 μ_d 与负温

θ 之间呈良好的线性减函数变化关系, 可以采用式(8) 一次线性拟合式描述之, 相关系数 R 反映这种一次式子具有极高的拟合精度。

$$\mu_d = 0.0034\theta + 0.3958 \quad (8)$$

$$R = 0.9999$$

由图 2(f) 可以看出, 在负温 $\theta (= -5^\circ\text{C})$ 一定条件下, 动泊松比 μ_d 与含水率 w 之间表现为非线性增函数变化关系。当含水率 $w \leq 26.09\%$ 时, 动泊松比 μ_d 随含水率 w 升高快速增大; 当含水率 $w > 26.09\%$ 时, 动泊松比 μ_d 随含水率 w 升高而增大的幅度明显趋于减小。所以, 与动弹性模量 E_d 和动剪切模量 G_d 一样, $w = 26.09\%$ 也应该是在上述试验条件下的动泊松比 μ_d 随含水率 w 变化的“限界”含水率。由于图 2(f) 中曲线有一个极明显的拐点, 又因为该曲线均仅有 4 个试验点, 所以对其不宜再做拟合分析。

最后特别值得提出的是, 由于本次试验的试件非一批制成, 所以不同批次试件的土密度误差也就在所难免, 因而以上在考察含水率 w 对超声波速及动弹性力学指标的影响时, 所用 4 个试件相互之间的土密度存在一定差异, 这显然影响结果的可比性。不过, 上述总的变化规律应该存在。

4 若干认识

(1) 本次试验获得的重要启示是, 测定冻土超声波速时, 合理选取测试频率及试件高度十分重要, 一般需要经过若干次预测试方可以确定, 其中应该认真考虑的首要问题是确保接收端有较强的信号, 这主要取决于土的耗能特性。

(2) 在同一台声速仪上几乎相同的试验条件下测定冻土超声波速, 冻结哈尔滨粉质黏土的波速较其它地区类似冻土(如冻结兰州黄土^[3]) 的波速小很多, 如

表2所示。因此,有两个问题值得认真考虑:其一,不同冻土的土骨架粒度组成及矿物成分的差异也许对超声波速测定结果产生较大影响,不同地区的类似冻土采用本文所述方法测定波速在数值上的非一致性也就不可避免;其二,尽管本次测得的超声波速偏低,但据此计算出的冻土动弹性力学指标值与用其它方法(如低温动三轴试验,本文第二作者将有另文发表)获得的基本一致,说明无论采用何种方法确定冻土动弹性力学指标,同一地区同种土在数值上的极大相关性也是无疑的。

(3) 由图3可以看出,本次试验的采集时程波形比较简单且需要经过3.5~5.5个周期的主震后余震才很小(其它地区冻土同类测试的采集时程波形一般仅经过2.5~3.5个周期的主震后余震就很小),这对于提高测试精度显然很有意义。

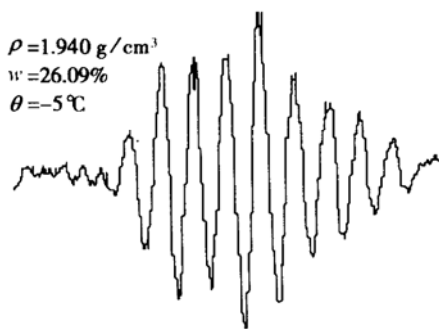


图3 冻结哈尔滨粉质黏土超声横波采集时程波形

Fig. 3 Collecting time curve of ultrasonic transverse in frozen Harbin silty clay

(4) 采用日产UVM-2型声速仪测定冻土超声波速虽然受很多因素影响^[2,3],但是由于本次测得的波速 V_p 大于波速 V_s (前者为后者的2.35~1.87倍),因而可以据此准确计算冻土动弹性力学指标^[3]。

5 结 论

负温 θ 和含水率 w 是影响冻结哈尔滨粉质黏土超声波速及动弹性力学指标的重要因素。含水率 w 对超声波速及动弹性力学指标的影响均是非线性的且存在一界限值,即当含水率 $w \leq 26.09\%$ 时,随含水率 w 升高,波速 V_s 、动弹性模量 E_d 及动剪切模量 G_d 均快速减小,而动泊松比 μ_d 快速增大;波速 V_p 缓慢增大;当含水率 $w > 26.09\%$ 时,随含水率 w 升高,波速 V_p 和波速 V_s 分别转为快速增大、缓慢减小,动弹性模量 E_d 、动剪切模量 G_d 及动泊松比 μ_d 变化的幅度均很快减小且趋向稳定于某一值。负温 θ 对超声波速、动弹性模量 E_d 及动剪切模量 G_d 的影响也是非线性的;但是,动泊松比 μ_d 与负温 θ 之间则呈良好的线性减函数变化关系。

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为本次试验提供了优先支持,尤其是彭万巍高级工程师为确保试验高质量如期完成而不厌其烦地精心设计、加班工作。在此,谨表由衷的感谢!

参考文献:

- [1] 袁易全. 近代超声原理与应用[M]. 南京: 南京大学出版社, 1996. 195- 321.
- [2] 彭万巍, 朱元林, 袁易全. 用UVM-2型声速仪测定冻土弹性波速[J]. 分析测试技术与仪器, 2000, 6(3): 143- 147.
- [3] 彭万巍, 袁易全. 冻土纵、横波宽带超声换能器的研制[J]. 冰川冻土, 2000, 22(1): 85- 89.
- [4] 朱元林, 赵淑苹, 何平, 等. 冻土的动弹性参数试验研究[A]. 冻土工程国家重点实验室年报: 第8卷[C]. 兰州: 中国科学院冰川冻土研究所, 1998. 27- 32.
- [5] 吴紫汪, 马巍. 冻土强度与蠕变[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1993. 36- 120.
- [6] 朱元林, 何平, 等. 冻土的动力学特性研究新进展[A]. 冻土工程国家重点实验室年报: 第6卷[C]. 兰州: 中国科学院冰川冻土研究所, 1996. 65.
- [7] 何平, 朱元林. 振动频率对冻土弹模之影响[A]. 冻土工程国家重点实验室年报: 第3卷[C]. 兰州: 中国科学院冰川冻土研究所, 1993. 173- 175.
- [8] 徐学燕, 朱元林, 丁靖康, 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论文集(上)[C]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 707- 711.
- [9] 盛煜, 吴紫汪, 吴丽娜. 变应力蠕变过程中冻土长期强度探讨[A]. 第五届全国冰川冻土学论文集(上)[C]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 724- 728.
- [10] 沈忠言, 张家懿. 振动荷载下冻土破坏要素的特点及单轴动强度模型[A]. 第五届全国冰川冻土学论文集(上)[C]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996. 741- 746.
- [11] Chaichanavong T. Dynamic properties of ice and frozen clay under cyclic triaxial loading conditions[D]. Lansing: Dept of Civil and Sanitary Engineering, Michigan State Univ, 1976. 460.
- [12] Finn W D L, Yong R N. Seismic response of frozen ground[J]. J of the Geotechnical Engineering Division. ASCE. 1978. 104: 1225 - 1241.
- [13] Vinson T S, Li J C. Dynamic properties of frozen sand under simulated earthquake loading conditions[A]. Proceedings of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering: Vol 3 [C]. Istanbul: Turkish National Committee on Earthquake Engineering, 1980. 65- 72.
- [14] Singh S, Donovan N C. Seismic response of frozen/thawed soil systems[A]. Proceedings of the Sixth World Conference on Earthquake Engineering: III [C]. Sarita Prakashan: World Conference on Earthquake Engineering, 1977. 2262- 2267.
- [15] 傅容, 张津生, 侯仲杰. 水分对冻土中超声波速的影响[J]. 冰川冻土, 1983, 5(2): 65- 73.