

未冻水含量对含废弃轮胎碎屑冻土超声波速度的影响*

Effect of unfrozen water content on the ultrasonic velocities in tire-mixed frozen soils

盛煜¹, 福田正己², 金学三², 今村 轍³

(1. 中科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. 日本北海道大学 低温科学研究所, 日本 札幌; 3. 日本通商省计量研究所, 日本 筑波)

摘要: 本文介绍了用液浸式超声波循环法测定冻土中超声波速度的原理和过程, 并在 $-0.2^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 温度范围内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。结果表明超声波在冻土中的纵、横波传播速度在冻土温度接近 0°C 时随温度的升高而急剧降低。结合冻土的未冻水含量随温度的变化规律分析表明, 冻土中超声波的传播速度与冻土未冻水含量呈良好的线形关系, 且未冻水含量每增加1%, 纵波速度约降低62 m/s; 横波速度降低约35 m/s。

关键词: 冻土; 超声波速度; 未冻水含量; 废弃轮胎碎屑

中图分类号: P 642. 14

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2000) 06- 0716- 04

作者简介: 盛煜, 男, 1964年生。1996年于中国科学院兰州冰川冻土研究所获博士学位。现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副研究员, 主要从事冻土工程及冻土环境研究工作。

SHENG Yu¹, FUKUDA Masami², KIM Haksam², IMAMURA Tohru³

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo Japan; 3. National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba, Japan)

Abstract: The principle and process for measuring ultrasonic velocities in frozen soil using immersion ultrasonic Sing-Around method were introduced. Ultrasonic velocities of both dilatational and shear waves in tire-mixed Tomakomai silt were measured within a temperature range of $-0.2^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$. Experimental results indicated that ultrasonic velocities of both dilatational and shear waves decreased with the increase in temperature of frozen soil, especially when the temperature of frozen soil was near 0°C . Comparing the results with the relationship between unfrozen water content and temperature of the soil, linear relationships between ultrasonic velocities and unfrozen water content were induced. And for a 1% increase in unfrozen water content, the dilatational wave velocity would decrease by about 60 m/s, and the shear wave velocity would decrease by about 40 m/s.

Key words: frozen soil; ultrasonic velocity; unfrozen water content; discarded tire powder

1 前言*

声波在材料中的传播实质上是材料机械波的传播过程, 因此材料的声学性质可以反映材料的力学性质。由于材料的力学性质由其物理性质所决定, 因此利用材料的声学性质既可用于直接测定材料的力学性质参数如动弹性模量、泊松比等, 也可用于分析材料的物理性质。超声波方法以其无损性、快速性等优点而在材料力学性质测定中独树一帜。冻土的动力学性质是寒区地球物理勘探、爆破开挖工程、抗地震及有振动机械的建筑设计中的必需参数, 准确把握冻土的动力学特性及其影响因素无疑对工程建设具有重要意义。冻土是一种含有土颗粒、冰、未冻水及孔隙气体的复合材料, 其力学性质也必然受制于各组成单元的量及其结构组成。对于大多数单晶固体材料(如金属、冰等)而言, 穿过它们的声波速度随温度的变化很小, 且通常呈直线关系, 这种关系体现了材料的弹性性质被温度所影响的程度, 而材料的内部结构形式并没有因温度的变化而改变; 对于冻土材料而言, 温度的变化将意味着冻土中冰与未冻水之间平衡的变化, 其结果导致了冰、未冻水含量的变化,

从而影响到冻土材料结构的变化。因此, 穿过冻土材料的超声波速度随冻土温度的变化实际上反映了温度本身的变化和冻土中未冻水含量的变化的综合影响, 这种综合影响使得穿过冻土的超声波速度随温度的变化与单晶材料相比要明显得多, 其中未冻水含量的影响也许更具有决定性意义。一些定性的判断根据是: 冻结砂土的超声波速度随温度的变化不大(Nakano, 1973; Virson, 1978)^[1, 2], 因为冻结砂土的未冻水含量随温度的变化很小; 冻结粉土和粘土的超声波速度随着温度接近于 0°C 而急剧下降(井上正则, 1975; Nakano, 1972; Thmus, 1991; Deschates, 1988, Fukuda, 1989)^[3~7], 因为冻结粉土和粘土的未冻水含量在 0°C 附近变化也很剧烈。为了定量掌握冻土未冻水含量对其超声波速度的制约程度, 我们通过浸液式超声波循环法对含有不同比例废弃轮胎碎屑的冻结Tomakomai粉土进行了初步实验研究。

2 浸液式超声波循环法测定原理

浸液式超声波循环法是将被测物浸入液体介质,

通过测定发射器发出的声波穿过液体介质、被测物到达接受器所经历的时间来计算被测物超声波速度的一种方法。其测试示意图如图1所示。

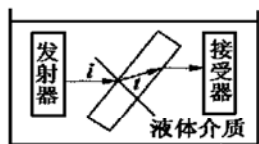


图1 浸液式超声波循环法示意图

Fig. 1 Immersion Sing-Around method

由发射器发出的声波从液体介质进入被测物时, 如果入射角不等于零, 则在被测物中会同时激发出纵波和横波。由于固体中的波速通常大于液体中的波速, 因此在固体中激发出的纵、横波会依照 Snell 定律发生折射:

$$\sin(i)/\sin(t) = V_0/V \quad (1)$$

式中 i 为入射角; t 为折射角; V_0 为液体中的波速; V 为被测物的波速(纵波或横波)。激发的纵横波在穿过被测物后在其另一边依照相同的折射原理均以纵波形式(液体中不存在横波)在液体介质中传播, 并最终到达接受器。当旋转被测物改变进入它的入射角时, 必然存在对应于纵、横波的两个临界入射角, 当入射角等于此临界角时, 折射角等于 90° , 亦即纵波或横波发生全反射而不会到达接受器。由于纵波速度大于横波速度, 因此对应纵波的临界角也大于对应横波的临界角。在入射角小于纵波临界角时, 尽管在被测物中同时激发有纵、横波, 但是接受器所接受到的信号只反映速度较快的纵波。当入射角大于纵波临界角而小于横波临界角时, 纵波发生全反射, 只有横波穿过被测物在液体介质中激发纵波并传播至接受器, 即此时接受器所接受的信号对应于穿过被测物的横波。显然, 当入射角大于横波临界角时, 纵横波均被完全反射而不穿过被测物, 接受器也将没有信号接受。根据图1所示的几何关系, 不难得到被测物中的超声波速度

$$V = 1/\left| \frac{(\tau - \tau_0)\cos(t)}{d} + \frac{\cos(t-i)}{V_0} \right| \quad (2)$$

式中 V 代表被测物中的超声波(纵波或横波)速度; d 为被测物厚度; V_0 为超声波在液体介质中的传播速度; τ_0 为没有被测物浸入时超声波从发射器至接受器在液体介质中的传播时间; τ 为浸入被测物时超声波从发射器经液体介质及被测物至接受器的传播时间。在已知发射器至接受器间的距离 L 时, 超声波在液体介质中的传播速度可简单由式(3)得到:

$$V_0 = L/\tau_0 \quad (3)$$

结合式(1)~(3), 超声波在被测物中的传播速度可通过连续近似的数值方法求解得出。图2给出了在不同入射角下对 -10°C 冻结 Tomakomai 粉土的超声波速度

的测定结果。此条件下纵波的临界角约为 16° 左右, 小于此临界角时, 所测结果为冻土中的纵波速度, 大于该临界角时, 所测结果代表横波速度。这个预备测试实验实际上证实了我们的测量结果正确地反映了波的传播规律。从图中可以看出, 无论在纵波测试区还是在横波测试区, 所得超声波速度在各自区域内变化很小, 这一方面说明我们的试样基本作到了各向同性, 另一方面也使我们认识到在实际测定中没有必要在不同入射角下测定超声波纵、横波速度。为此, 我们在实际测定中, 在垂直入射(入射角为 0°)时测定纵波速度; 在某一大于纵波临界角的入射角下测定横波速度。

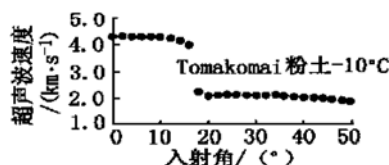


图2 冻土超声波速度随入射角的变化

Fig. 2 Change in ultrasonic velocity with incident angle

3 冻土超声波速度测定

实验是在日本北海道大学低温科学研究所进行的。实验所用粉土取自设于北海道 Tomakomai 市郊的北海道大学冻土野外研究观测站。

3.1 实验装置及条件

实验所用的超声波测定仪是日本 Sonics 工业公司的 UVM-2 型声波循环测定系统。声波仪置于一低温控制室中, 室内温度控制精度为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, 采用煤油作为液体介质。在液体介质中插入一支高精度($\pm 0.01^\circ\text{C}$)热敏电阻式温度探头, 并将其连接于置于常温工作室的计算机中以监测液体中的温度。预备实验表明, 在控制低温室恒温使煤油温度达到稳定时, 煤油的温度变化不超过 0.02°C 。实际实验中, 当煤油温度变化幅度小于 0.02°C/h , 认为温度已达到稳定并可开始测定。

3.2 试样制备及测定过程

本实验属于废弃轮胎碎屑对冻胀敏感性土的改良实验研究的一部分。这是本文的试验试样之所以选用含有废弃轮胎碎屑 Tomakomai 粉土的原因。Tomakomai 粉土的基本物性见表1。实验选用的废弃轮胎碎屑混合率(碎屑重:干粉土重)为 0%, 5%, 10%, 20% 和 30%。

表1 Tomakomai 粉土基本物性

Table 1 Physical properties of Tomakomai silt

颗粒组成/%			塑限	液限	比重
> 0.074 mm	0.005~ 0.074 mm	< 0.005 mm	/ %	/ %	
81	10	9	38.1	46.1	2.66

先将 30 g 混合土中加入蒸馏水配成糊状物(此时含水率约为 50%)然后在真空皿中抽气 12 小时后, 在

表面出现一薄水层;小心排除该水层后开始制样。制样土被装入一直径 3.5 cm 厚 0.5 cm 的圆盘形样模中后移至 -20°C 的低温室使试样迅速冻结;24 小时后脱样模,精确测量试样尺寸、重量即得到实验试样。装模后剩余部分土样用于测试含水率。超声波测定系统调试完毕后将试样置入载样夹并插进煤油中进行恒温。温度达到预期恒定值时开始测定煤油中超声波速度、冻土试样中超声波纵、横波速度。实验温度范围为 $-0.2^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 。通过含水率、试样密度等进行计算得知,试样均达到了 95% 以上的饱和度。这样在测试结果中可不必考虑土壤空隙对超声波速度的影响。

4 实验结果及讨论

图 3、4 给出了含有废弃轮胎碎屑的冻结 Tomakomai 粉土中超声波纵、横波速度在不同温度下的测定结果。与前人的结果类似,冻土的超声波速度随温度的升高而降低,且当温度由负温向 0°C 趋近时,超声波速度的降低显得尤为剧烈。这种规律似乎在纵、横波中的表现是相同的。而轮胎碎屑的掺入起着降低波速的作用。

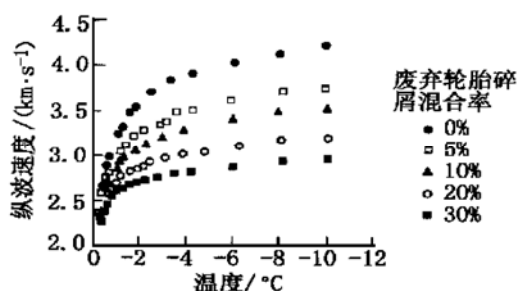


图 3 超声波纵波速度与温度关系

Fig. 3 Dilatational wave velocities in frozen tire-mixed Tomakomai silt

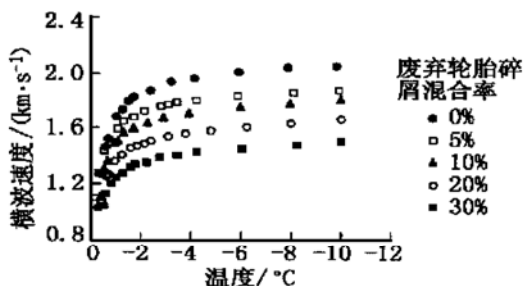


图 4 超声波横波速度与温度关系

Fig. 4 Shear wave velocities in frozen tire-mixed Tomakomai silt

冻土超声波速度随温度的变化规律与冻土未冻水含量随温度的变化的一般规律具有极为相似的特点,只不过未冻水含量随温度的增加而增大而已。由此,我们有理由相信冻土未冻水含量随温度的变化对冻土超声波速度的变化规律有很大的影响。事实上,未冻水含量的增加意味着在冻土中起胶结作用的冰的含量的降低,其结果理应导致冻土弹性性能减弱、弹性波速度降低。另一方面,由于超声波速度在冰中的传播速

度远大于在水中的传播速度,因此单从未冻水、冰的量的变化来看,未冻水含量的增加(冰含量的减少)也应导致冻土整体超声波速度的降低。

Tomakomai 粉土的未冻水含量与温度的关系可由以下幂函数表示(Ishizaki, 1979)^[8]:

$$\theta_u = 19.48 |T|^{-0.318} \quad (4)$$

式中 θ_u 代表重量未冻水含量(未冻水重量与干土重之比); T 是温度。冻土未冻水一般被认为主要以薄膜形式存在于土颗粒表面,对于饱和土而言更是如此。轮胎橡胶是一种憎水性材料,这种性质决定了当它掺入土中冻结后其表面不可能存在未冻水。因此,对于含有废弃轮胎碎屑的冻土来说,未冻水含量实际上仍然只存在于土颗粒周围,换言之,可以认为在相同温度下未冻水重量与土颗粒重量之比保持不变,即式(4)所描述的关系对于含有轮胎碎屑的冻土仍然是成立的。但是由于轮胎碎屑的掺入,土颗粒的含量实际上降低了,因此冻土中未冻水也相应比不含有轮胎碎屑的冻土要少。对于超声波速度而言,有意义的应该是冻土中未冻水含量所占整个冻土体积的比例,即冻土的体积未冻水含量。在已知轮胎碎屑混合比、冻土容重及总含水量的前提下,根据式(4)即可推算出含有轮胎碎屑的 Tomakomai 粉土的体积未冻水含量

$$W_u = [\gamma_d / (1 + \beta) \rho_w] \cdot \theta_u \quad (5)$$

式中 W_u 为冻土体积未冻水含量; γ_d 为冻土干容重; ρ_w 为水的密度; β 为轮胎碎屑混合比; θ_u 由式(4)给出。

Willie (1956) 曾提出计算两相介质中弹性波的传播速度的时间分配法,即弹性波穿过两相介质所需的时间等于波分别穿过组成该介质的各相物质的时间之和^[9]。这样,在已知各相物质的含量和传播速度时,两相介质中的传播速度即可被推算得出。对一些固-固、固-气介质的实验结果表明,Willie 的计算方法在一种介质被另一种介质完全分离的情况下效果较好(Timur, 1968)^[10],这实际上暗示着当介质间没有明显的耦合作用时,该计算方法可行。Pandit (1979) 将该方法用于扩展到孔隙水中含有盐分的冻结岩石的三相介质中所作的计算似乎是有效的^[11],但是 Deschates (1988) 对冻结高岭土的实验却未能验证这种计算的可行性^[6]。我们对 Tomakomai 粉土也作了类似的计算,结果发现在未冻水变化剧烈的高温区计算值明显与实测值不符。因此,Willie 的计算模式用于未冻水含量较高的冻土中恐怕是不可行的。另外,由于液体中不存在横波,该模式显然不能用于横波的计算。

在实际工程应用中,更需要了解的是未冻水含量的变化究竟在何种程度上影响着冻土超声波速度的变化。图 5、6 绘出了所测定的超声波纵、横波速度与对

应的体积未冻水含量的关系。结果表明, 冻土的超声波速度与体积未冻水含量基本可用线形关系来描述:

$$V = A \cdot W_u + B \quad (6)$$

式中 V 代表冻土超声波速度(纵波或横波); A , B 为回归系数。

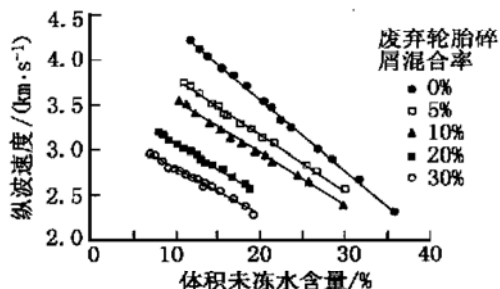


图5 纵波速度与体积未冻水含量关系

Fig. 5 Change in dilatational wave velocities with volumetric unfrozen water content

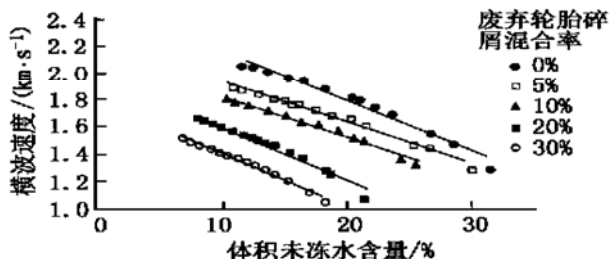


图6 横波速度与体积未冻水含量关系

Fig. 6 Change in shear wave velocities with volumetric unfrozen water content

表2 式(6)中的 A 、 B 值及相关系数

Table 2 Parameters and coefficients in formula (6)

轮胎碎屑 混合比 /%	纵波			横波		
	A	B	相关系数	A	B	相关系数
0	0.079	5.113	0.999	0.038	2.541	0.975
5	0.062	4.392	0.996	0.030	2.238	0.987
10	0.058	4.127	0.997	0.031	2.151	0.985
20	0.056	3.636	0.996	0.040	2.005	0.977
30	0.055	3.306	0.992	0.039	1.796	0.988

另一个值得注意的特点是这些直线的斜率变化不大, 即近似平行。从式(6)的物理意义来看, 系数 A 近似相等意味着对应于一定的体积未冻水含量的变化, 超声波速度的变化也是一定的, 即超声波速度随体积未冻水含量的变化程度可能与土质类型关系不大。表2列出了对应图5、图6各回归直线的式(6)中的 A 、 B 值及相关系数。对应纵、横波, A 值的平均值分别为0.062和0.035。即体积未冻水含量每变化1%, 冻土超声波纵波速度约变化62 m/s; 横波速度约变化35 m/s。未冻水含量对超声波纵、横波速度的影响程度的差异可能主要起因于水对超声波传播所起作用的不同, 因为水可以传播纵波, 但不能传播横波。

需要指出的是上述讨论仅限于实验现象和概念基础上, 上述实验还不能揭示超声波在冻土这一复相介质中的传播机制。更为深入的研究应当从弹性波传播原理入手去探索冻土中各相物质所起的作用, 这也正是我们下一步要研究的内容。

5 结 论

①冻土中的未冻水含量对冻土中超声波速度的传播具有很大的影响, 未冻水含量的增加将导致超声波纵、横波速度的降低。②超声波纵、横波速度随冻土体积未冻水含量的变化可近似描述为线形关系。对应1%的体积未冻水含量变化, 超声波纵波速度约变化62 m/s; 横波速度约变化35 m/s。

参考文献:

- [1] Nakano Y, Arnold R. Acoustic properties of frozen Ottawa sand [J]. Water Resources Research, 1973, 9(1): 178~184.
- [2] Vinson T. Response of frozen ground to dynamic loading[A]. Andersland O B, Anderson D M, eds. Geotechnical Engineering for Cold Regions[C]. New York: McGraw-Hill, 1978. 405~458.
- [3] 井上正则, 木下诚一. 冻土の压缩强度と动的性质[J]. 低温科学(A), 1975, (33): 243~253.
- [4] 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.
- [5] Thmus J Fr, Aguirre Puente J, Coherr Tenoudji F. Determination of unfrozen water content of an overconsolidated clay down to -160 °C by sonic approaches—Comparison with classical method [A]. Proceedings of the 6th International Symposium on Ground Freezing[C]. Beijing, 1991. 83~88.
- [6] Deschates M H, Coherr Tenoudji F, Aguirre Puente J, Khaslou B. Acoustics and unfrozen water content determination[A]. Proceedings of the 5th International Conference on Permafrost[C]. Fairbanks, 1988. 324~328.
- [7] Fukuda M. Measurement of ultrasonic velocity of frozen soil near 0 °C [J]. Low Temperature Science(A), 1989, (50): 83~86.
- [8] Ishizaki T, Kinoshita S. Frost heave under Overburden pressure [J]. Low Temperature Science(A), 1975, (38): 169~178.
- [9] Willie M R, Gregory A R, Gardner L W. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media[J]. Geophysics, 1956, 21(1): 41~70.
- [10] Timur A. Velocity of compressional waves in porous media at permafrost temperatures[J]. Geophysics, 1968, 33(4): 584~595.
- [11] Pandit B I, King M S. A study of the effects of porewater salinity on some physical properties of sedimentary rocks at permafrost temperature[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1979, 16: 1566~1580.