

高岭土容重、含水量、结构特性与声波速度及动力学参数相关性的实验研究

罗津辉 蔡忠理

提 要

本文叙述了高岭土的物理力学特性与声波速度及动力学参数相关关系的室内实验研究,着重探讨了高岭土容重、含水量与纵波速度、横波速度及动弹性模量,动剪切模量之间的关系,并给出了它们的关系式。此外还分析了高岭土结构特性对声波速度及动力学参数的影响。

一、前 言

固体动力学在很多领域中有广泛的应用,例如在岩土工程中对于建筑物的基础振动特性及抗震特性的研究均需要提供土的动力学特性。软土具有较强的声吸收性,以往的研究主要通过共振法和地震法测定现场土体的动力学特性,其频率一般在数赫兹至数百赫兹的量级。由于现场实验条件的限制,对土的动力学性能与其它物理力学特性和结构特性之间的关系不可能作统系的研究。国内外开展了一些这方面的工作,如泰勒(D.W. Taylor, 1954),哈定(R.U. Hardin)及小理查德(F.E. Richart, 1963),对渥太华砂在不同围压下剪切波速度与空隙比之间的关系进行了研究。

本实验主要利用超声脉冲法研究了高岭土的容重、含水量、结构特性等与纵、横波速度及动力学参数的相关关系。

二、实验设备及试样制备

(一) 实验装置简述

测试系统方框图如图1所示。声波参数的测量采用本实验室研制的82-01D型横波换能

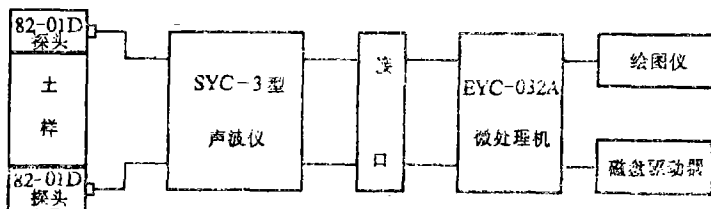


图1 测试系统框图

Fig. 1 Block diagram of measurement system

器(中心频率为 400kHz)与 SYC-3 型声波仪配套使用即可同时测定纵横波首波传播时间,并由 SYC-EYC 声波综合数据采集处理系统将离散的数字声波信号进行采集和进行 FFT 谱处理,输出并绘制相应的波形图和谱图,图 2 为实验中的实测波形图。

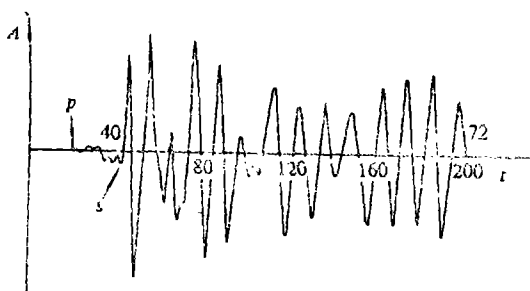


图 2 实测波形图

Fig. 2 Measured waveform in the test

(二) 土样制备

土样的制备按土工规范的要求,使土具有不同的含水量。按要求浸润后均压成形,制成各向均匀的高岭土试样,以不同的压力来控制相同含水量土样的容重。被

测土样按含水量分 5 级(14, 19, 24, 29, 34%) 每级分 5 种容重(11, 12, 13, 14.5, 16kN/m³)。共测土样 70 多个。采用单轴加压、纵向排水的方法制成土颗粒定向排列的横向各向异性的似层状土样,然后按不同倾角切割制成与固结力有不同夹角的试件。

三、实验结果

(一) 容重 γ 与波速 V_p 、 V_s 及动弹模 E_d 、 G_d 的关系

弹性波在高岭土中传播时,其波速与容重密切相关,图 3 给出了纵横波速度和容重的关系曲线。

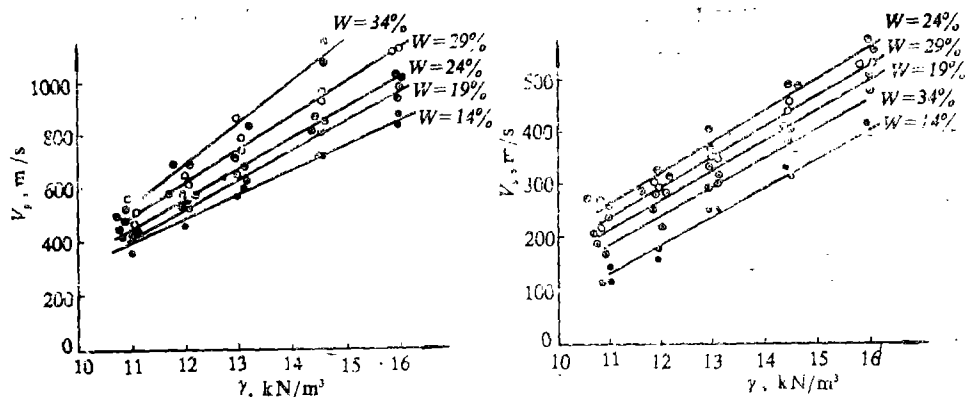


图 3 纵、横波速与容重的关系

Fig. 3 The relationship between V_p , V_s and γ

由图可以看到,在容重较小($\gamma < 12 \text{ kN/m}^3$)时,实验数据离散性稍大,而且不同含水量的高岭土纵波速度差别不大。主要原因系换能器与试件的偶合压力发生微小变化即可引起局部孔隙水压力及含水量、相对密度等参数的变化。在容重较小时尤为敏感。在容重较大($12 < \gamma < 16 \text{ kN/m}^3$)时,其影响相对来说要小得多,且纵、横波速度与容重有较好的线性关系,可表示为,

$$V = A\gamma + B \qquad 1.2 < \gamma < 1.6 \text{ kN/m}^3 \qquad (1)$$

式中 V 为波速； γ 为容重； A 、 B 为常数。

图 3 中各曲线与式(1)相关较好，相关系数均在 0.9 以上。纵波速度 V_p 与容重 γ 关系曲线的斜率 A 随含水量的增加而增大。变化范围为 $A = 920\text{--}1420$ ，而横波速度 V_s 与容重 γ 关系曲线的斜率 A 受含水量影响较小， $A = 540$ 。

由弹性理论得知容重 γ 与动弹性模量 E_d 及动剪切模量 G_{Td} 的关系为：

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

$$G_d = \gamma V_s^2 \qquad (3)$$

图 4 即为用图 3 中的纵横波速度 V_p 、 V_s 计算出的动弹性模量 E_d 和动剪切模量 G_d 。由图可见， E_d 及 G_d 皆随 γ 的增加以高次函数的形式增加， E_d 及 G_d 与 γ 的关系也可近似用线性关系表示，相关系数均在 0.9 左右。

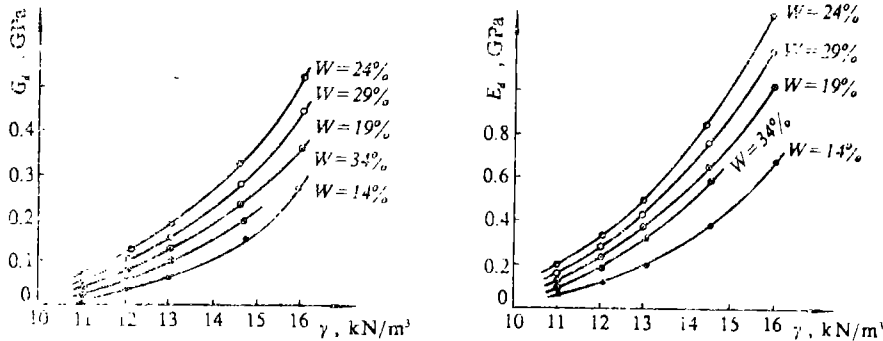


图 4 动弹模及动剪切模量与容重的关系
Fig. 4 The relationship between E_d 、 G_d and γ

(二) 含水量 W 与 V_p 、 V_s 及 E_d 、 G_d 的关系

图 5、图 6 分别为三种容重下含水量 W 与 V_p 、 V_s 及 E_d 、 G_d 的关系曲线。由图表明，纵波速度随含水量以线性关系增加，横波速度则对含水量很敏感，并具有二次函数的特征，在含水量为 24% 附近达最大值。动弹性模量及动剪切模量与含水量的关系和横波速度与含水量的关系相似，具有二次函数的特征。含水量较低时， E_d 和 G_d 随含水量增加而增大，在含水量为 24% 左右时达最大值，当含水量继续增加时， E_d 和 G_d 反而下降。由此可见，含水量对 V_s 、 E_d 及 G_d 的影响是不可忽略的，用跨孔法原位测试时应予充分的考虑，以正确评估地基的抗剪强度。

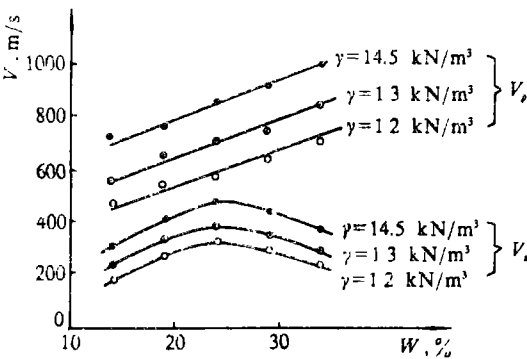


图 5 纵、横波波速与含水量的关系
Fig. 5 The relationship between V_p 、 V_s and W

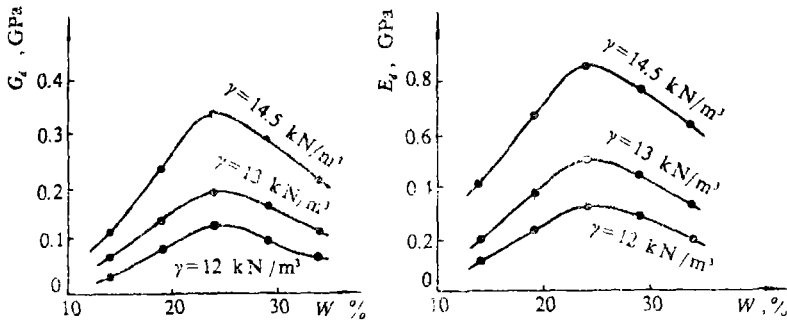


图6 动弹模、动剪切模量与含水量的关系

Fig. 6 The relationship between E_d , G_d and W

(三) 高岭土结构特性对 V_p , V_s 及 E_d , G_d 的影响

采用单轴压缩、纵向排水的方法,制成土颗粒定向排列的横向各向异性的似层状土样。为了了解土颗粒定向排列后的结构对动力学参数的影响,将土样按不同倾角切割,制成测试方向与固结压力方向有不同夹角的试件,在与固结压力方向呈不同夹角的方向上进行声波测试。

图7、8分别为在极坐标中表示的 V_p , V_s 及 E_d , G_d 与夹角 θ 的关系曲线。由图可见 V_p , V_s 及 E_d , G_d 在与固结压力平行即 $\theta = 0^\circ$ 的方向上最大,在与固结力垂直即 $\theta = 90^\circ$ 的方向上最小,并与 θ 呈线性关系,相关分析结果可用以下各式分别表示:

$$V_p = 1075 - 1.44\theta \quad R = 0.98$$

$$V_s = 460 - 1.56\theta \quad R = 0.97$$

$$G_d = 3470 - 20\theta \quad R = 0.94$$

$$E_d = 9660 - 53.7\theta \quad R = 0.94$$

这一结果与 A. G. Anagnostopoulos 等人对层状土抗剪强度和剪切模量的各向异性研究所获得的结果是一致的。

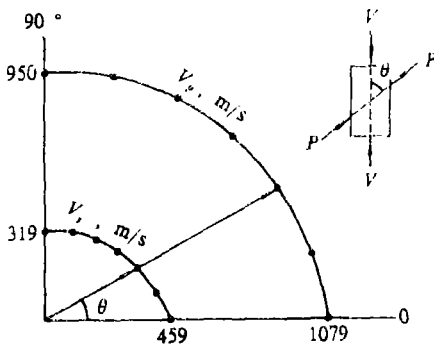


图7 波速与夹角的关系

Fig. 7 The relationship between

V_p , V_s and θ

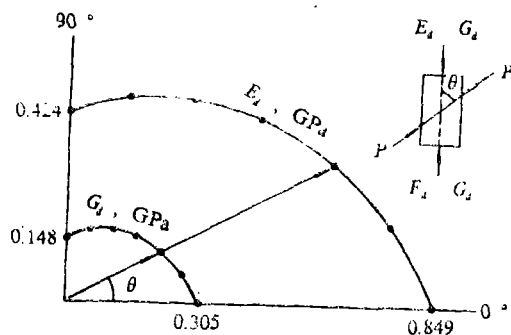


图8 动弹模及动剪切模量与夹角的关系

Fig. 8 The relationship between

E_d , G_d and θ

四、结 论

1. 通过实验证实超声脉冲法能准确测量土样的纵横波速度, 为土的动力学参数测定提供一种简单可靠的方法。

2. 高岭土的纵横波速度和动弹模、动剪切模量随容重的增加而单调增加, 纵横波速度与它们呈线性关系, 这与前人的结论是一致的, 而动弹模及动剪切模量则与其呈高次函数关系。

3. 含水量对纵横波速度和动力学参数的影响不可忽视, 特别是横波速度及动弹模、动剪切模量与含水量的关系有明显的二次函数的特征。用跨孔法原位测试时应予以充分的考虑, 以正确地估评地基的抗剪强度。

4. 与固结压力成不同夹角的方向上的声波速度和动力学参数的差异反映了高岭土因颗粒定向排列而形成的各向异性, 这与 A.G. Anagnostoulos 等人对层状土抗剪强度和剪切模量的各向异性研究所得的结果是相符的。

参加本实验工作的还有陈守义、刘克、李贤淑等同志。

参 考 文 献

- [1] Hardin, B.O. and Richart, Jr., Elastic Wave Velocities in Granular Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundation, DIV. Proceedings, ASCE, SMI, Feb. 1963, pp.33—65.
- [2] Paterson, N.R., Seismic Wave Propagation in Porous Granular Media, Geophysics, Vol.21, 1956, pp.691—714.
- [3] Matsukawa, E. and Hunter, A.N., The Variation of Sand Velocity with Stress in Sand, Proc. Physical Society, Section B, Vol. 69, Part 8, No. 440B, 1956, pp. 847—848.
- [4] Anagnostopoulos, A.G., Papadopoulos, B.P., 成层土抗剪强度的各向异性, 胡定译, 地基与基础译文集, 中国建筑工业出版社, 1984年, 第1—4页。
- [5] 袁建新、蔡忠理, 砂的物理力学性质与声速的关系, 岩土力学, 第8卷第2期, 1987年。

Experimental Study on the Correlativity between Physical-structural Characteristics and Wave Velocities in Kaolinite

Luo Jinhui Cai Zhongli

Abstract

This paper describes the correlativity between physical-structural characteristics and wave velocities in kaolinite. The relationships between density, water content and wave velocities, dynamic elastic modulus, dynamic shear modulus are mainly discussed, and their relational expressions are given. In addition, the influence of structural property of kaolinite to wave velocities and dynamic mechanical parameters are analysed.