

# 用波速法测定饱和土的孔隙率和容重\*

陈龙珠 吴世明

## 提 要

根据作者近几年来对饱和土中弹性波特性研究的结果,本文提出了测定饱和土孔隙率和容重的波速法,并且用室内外试验资料初步检验它的可靠性。本文对不易取样的饱和无粘土、较灵敏粘性土以及海底沉积土层的天然孔隙率和容重的测定似更具有实用价值。

**关键词:** 波速法 饱和土 孔隙率 容重

## 0 前 言

孔隙率和容重是天然土层重要的物理性质指标,每项工程设计之前均要进行测定。目前常用的测试方法基本上可分成两大类:对于不易扰动的土,在现场取样后由室内试验方法测定;对易扰动的土,如砂类土、灵敏粘性土以及海底沉积土等,用上述方法测定孔隙率和容重往往比较困难,工程实践中大多根据其它现场试验(如触探)资料由经验公式或曲线来估算。可见,探讨土层(尤其是易扰动土)孔隙率和容重的测定方法仍不失有一定的工程实用意义。

近几十年来,随着土动力学的迅速发展和学科的交叉,人们已提出了能方便迅速勘测地基物理学性质的波速法,测定土层的密度也是其中的内容之一。但是,由于过去对土中弹性波(尤其对压缩波)特性的认识还不够深入,波速法大多处于经验阶段。例如,日本井上启司等先在室内测定土的压缩波速度与含水量、密度之间的关系曲线,然后根据现场土的实测波速及含水量在这种曲线上查出现场土的密度<sup>[1]</sup>;在海洋沉积土勘测中,人们常利用由室内试验数据经相关分析而得到的压缩波速度与孔隙率的经验关系式,或试图用压缩波阻抗来测定海底土的孔隙率和容重<sup>[2]</sup>。

本文拟根据作者近几年来有关的研究成果,提出用波速法测定完全饱和土(下文简称饱和土)孔隙率和容重的理论公式,并且用实例初步考察它的可靠程度。

## 1 基本原理

近几年来,作者对饱和土中弹性波特性进行了理论研究<sup>[3]</sup>,并且用试验来检验和作理论修正,现已得出如下结论<sup>[4,5]</sup>:当 $2\pi f k / n g < 1$ 时,不论对渗透性好的饱和砂还是对渗

本文于1987年9月7日收到

\*国家教委博士点基金资助项目内容

透性差的饱和粘土, 其弹性波速度公式均可表示为

$$v_p = \sqrt{\frac{\frac{E_w}{n} + (\lambda' + 2\mu')}{\rho}} \quad (1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu'}{\rho}} \quad (2)$$

式中  $f$  是  $p$  波的主频率;  $k$  是饱和土的渗透系数;  $n$  是土的孔隙率;  $g$  是重力加速度,  $g \approx 10\text{m/s}^2$ ;  $v_p$ 、 $v_s$  分别代表压缩波和剪切波速度;  $E_w$  是孔隙水的体变弹模,  $E_w = \rho_w v_w^2$ ,  $\rho_w$  和  $v_w$  分别为水的质量密度和水中波速;  $\rho = \rho_w [(1-n)G_s + u]$ , 是饱和土的质量密度, 其中  $G_s$  是土颗粒比重;  $\lambda'$  和  $\mu'$  是土骨架的 Lamé 常数, 它们与有效(土骨架)泊松比  $\nu'$  的关系为

$$\lambda' + 2\mu' = \frac{2(1-\nu')}{1-2\nu'} \mu' \quad (3)$$

这里的  $\mu'$  通常又称土的剪切模量。

由于一般现场地震波速度试验(如, 跨孔法和下孔法)中压缩波主频率较低, 大多数饱和土层均满足条件  $2\pi f k / n g < 1$ 。故由式(1)~(3)导出饱和土孔隙率  $n$  与波速  $v_p$ 、 $v_s$  的理论关系式:

$$n = \frac{G_s - \sqrt{G_s^2 - \frac{4(G_s - 1)v_w^2}{v_p^2 - \alpha v_s^2}}}{2(G_s - 1)}, \quad (4)$$

式中  $\alpha = 2(1-\nu')/(1-2\nu')$ , 其余符号与上文一致。

由波速按式(4)求出  $n$  后, 饱和土的容重  $\gamma$  为

$$\gamma = \rho g = [(1-n)G_s + n]\rho_w g \quad (5)$$

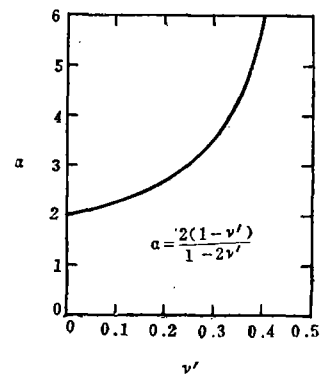
在式(4)中, 除波速  $v_p$  和  $v_s$  实测外, 还含有参数  $G_s$ 、 $v_w$  和  $\alpha$ 。这三个参数的取值方法说明如下:

1.  $G_s$ , 土颗粒比重, 可用扰动土样由室内试验较准确的测定。其值一般介于 2.65~2.75 之间。

2.  $v_w$ , 水中波速, 一般随温度增高而有所增大。在孔隙水温度为 10~25℃ 时,  $v_w$  约为 1450~1480 m/s, 含盐量和较大的深度会使海底水中波速值稍偏大于此值<sup>[6]</sup>。

应指出, 这里所说的温度是土层中的温度而不是通常所指的气温。

3.  $\alpha$ , 一个与有效泊松比  $\nu'$  有关的参数, 如图 1 所示。关于泊松比  $\nu'$ , 哈丁(Hardin)曾建议对各种土取 0.12<sup>[7]</sup>; 龚晓南对 0~20m 深度的上海饱和粘土进行  $K_0$  图 1 参数  $\alpha$  与有效泊松比  $\nu'$  的关系



固结排水三轴试验得出初始泊松比介于0.21~0.24之间<sup>[8]</sup>，李新测得干砂泊松比为0.27~0.30<sup>[9]</sup>。总之，土骨架泊松比 $\nu'$ 目前常见的取值范围为0.10~0.35。由图1知，相应的 $\alpha$ 值为2.25~4.33，取值变化范围不大。从式(4)可以看出，若所选 $\alpha$ 值偏小，则所求出的 $n$ 值偏小；反之，所求出的 $n$ 值偏大。这种偏差程度随土剪切波速度的增大而有所增大。

为了考察本方法的可靠程度以及参数对测试结果影响的大小，对室内外试验资料进行分析和对比是必要的。

## 2 几个应用实例

### 2.1 多佛尔(Dover)饱和砂

由于室内人工制备饱和砂样的孔隙率和容重数据比较可靠，这里先利用文献[10]的室内波速试验资料来考察式(4)的适用程度。

试验砂是多佛尔\*40~50砂，颗粒特征直径 $D_{60} = 0.35 \text{ mm}$ ， $D_{10} = 0.30 \text{ mm}$ ， $D_{60}/D_{10} = 1.2$ ，最小和最大干容重分别为 $13.26 \text{ kN/m}^3$ 和 $16.54 \text{ kN/m}^3$ ，颗粒比重为2.65。试验时水温为 $24 \text{ }^\circ\text{C}$ ， $v_w = 1480 \text{ m/s}$ ，饱和砂的弹性波速度见表1。试验中压缩波主频率为 $145 \text{ kHz}$ 。试样相对密度大于60%，取饱和和试样渗透系数 $k$ 为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 量级，故由实测的孔隙率(表1)得 $(2\pi f k / n g) = 2\pi \times 145 \times 10^3 \times (10^{-3} \sim 10^{-4}) / (0.42 \times 10) = 0.2 \sim 2$ ，与1比较接近。于是，可用式(4)和(5)由波速法求饱和砂的孔隙率和容重，计算结果与实测值均列于表1。若开始不知道饱和砂的孔隙率，则先用式(4)由波速法求出孔隙率的理论值，再将此值代入 $(2\pi f k / n g)$ ；若它显著大于1，则波速法失效，否则波速法有效。

由表1知，孔隙率的理论值与实测值之间最大相对误差约6%，而容重的理论值与实测值之间的最大相对误差只有2.5%，从理论计算值来看，当剪切波速度 $v_s$ 低于 $230 \text{ m/s}$ 时，参数 $\alpha$ 值由2.25增至4.33对波速法的结果没有较大的影响。

表1 用波速法求多佛尔饱和砂的孔隙率和容重

计算参数	实测波速(m/s)		孔隙率(n, %)		容重( $\gamma$ , kN/m <sup>3</sup> )	
	$v_p$	$v_s$	实测	计算	实测	计算
$G_s = 2.65$	1685	220	43.0	40.2—42.9	19.40	19.42—19.87
$v_w = 1480 \text{ m/s}$	1685	223	42.1	40.2—43.0	19.55	19.40—19.87
$\alpha = 2.25 \sim 4.33$	1694	226	41.4	39.7—42.4	19.67	19.50—19.95
$(\nu' = 0.10 \sim 0.35)$	1692	228	41.3	39.8—42.7	19.69	19.45—19.93

### 2.2 杭州体育场路东口饱和土层

试验场地的地质构造如图2a所示。在试验深度范围内，土层基本上属粉砂土，其中1号土是人工填土；2a号土为轻亚粘土，含大量粉粒，稍密；2b号土是轻亚粘土夹粉砂，含较多粉粒，中密；2c号土是粉砂，稍密，饱和；2d号土是粉砂，含大量细粉砂粒，中密，饱和；2e号土是粉砂，含大量细粉砂粒并见有少量贝壳，饱和；2f号土是轻亚粘土，稍密。室内试验测得各层土的颗粒比重为2.69。

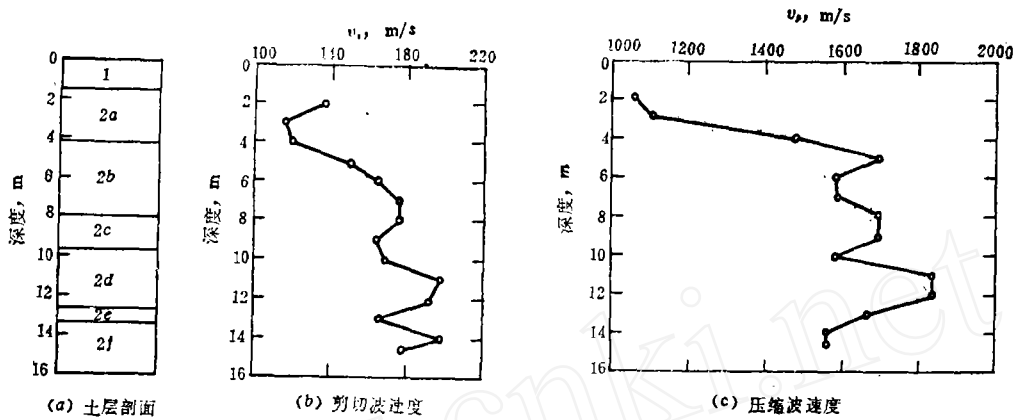


图2 杭州体育场路东口土层剖面与波速

土层弹性波速度由跨孔试验测定，试验方法文献[5, 11]已有介绍，此不赘述。本次试验震源孔至近、远接收孔的水平距离分别为2.09 m和4.59 m，套管深度为16 m，波速试验深度为14.5m。试验时地下水位深度约为1.6m。跨孔试验结果如图2b、c所示。由于少量含气会使土中压缩波速度显著减小，由图2c知深度约5 m以下土才处于完全饱和状态。比较图2a和b，若以土层剪切波速沿深度的变化规律来分层，则基本与钻探结果一致。

对于粉砂土，一般不易取得原状土样，故本文根据土层的标贯试验结果估算它们的孔隙率；对轻亚粘土则取样后由室内试验确定其孔隙率和容重。

由于地震波频率较低，式(4)可以应用。由图2b知，土的剪切波速度较低，计算表明 $\alpha$ 值由2.25增至4.33对式(4)的结果影响不大，故取 $\alpha = 3.3$ （平均值）。又 $G_s = 2.69$ （实测）、 $v_w = 1450\text{m/s}$ （估算），于是由图2b、c和式(4)、(5)可求出饱和土的孔隙率和容重，如图3所示。可见，三种方法得到的结果虽存在一定的离散，但反映出各土层的相对密实状态还

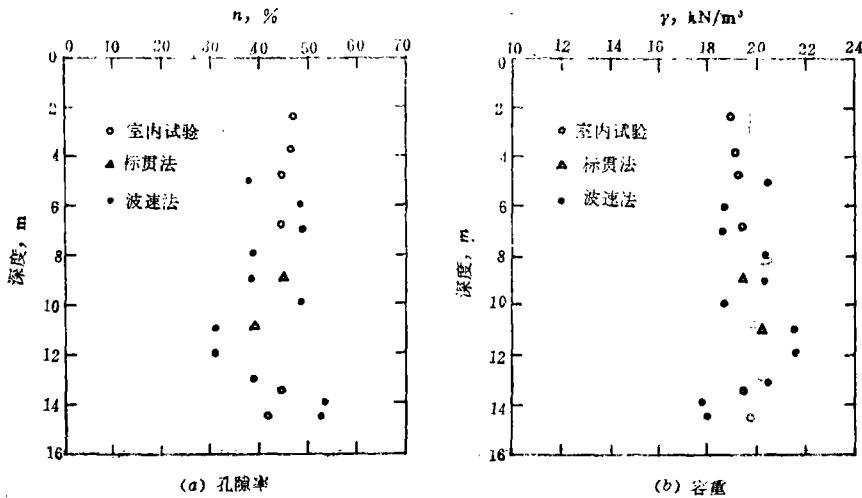


图3 杭州体育场路东口土层孔隙率和容重

是比较一致。由于其它两种方法的结果也可能有误差，本例中暂不定量分析波速法结果的精度。

### 2.3 镇海电厂堆煤场地基

试验场地位于宁波市镇海电厂堆煤场，它在镇海县城的西部和甬江出口段岸堤边。表层约2m深度内为硬壳层；2~13m深度内为淤泥质轻亚粘土；13m以下是淤泥质粘土。由于饱和粘土具有一定的结构强度，可以在现场取得扰动较小的试样进行有关室内试验。因此，对这种饱和土，由波速法测定孔隙率和容重的精度可作出定量评价。

现场饱和土的弹性波试验采用跨孔法。震源孔与近、远孔的水平距离分别为3.08m和5.60m；试验时地下水位大约深度为2.50m。跨孔试验的结果如图4所示。由压缩波速度知<sup>[6]</sup>，大约在4m深度处土才处于完全饱和状态。

由于饱和粘土渗透性极差和试验中p波主频率较低，式(4)在此可以应用。鉴于上文计

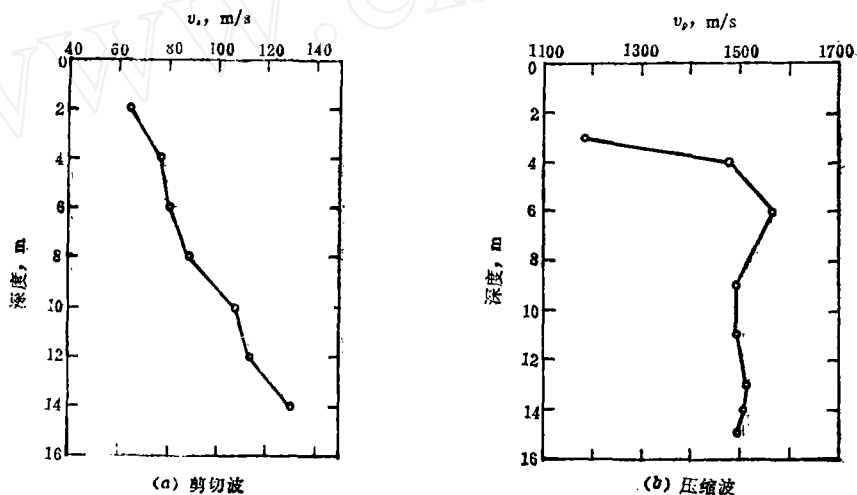


图4 镇海电厂堆煤厂地基的弹性波速度

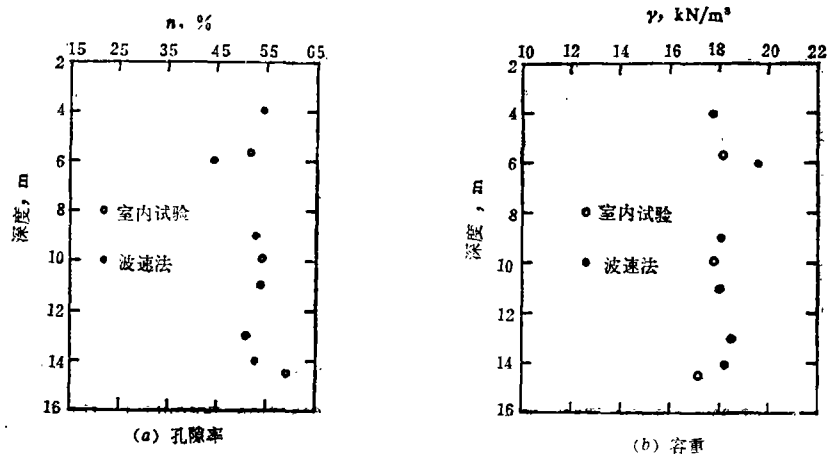


图5 镇海电厂堆煤场地基孔隙率和容重

算结果,取  $\alpha = 3.3$ ; 又  $G_s = 2.73$  (室内试验平均值),  $v_w = 1450\text{m/s}$  (估算)。于是,由图 4 和式(4)、(5)即可求出该饱和土层的孔隙率和容重,如图 5 所示。由图 5 可以看出,波速法的结果与室内试验的结果比较接近,孔隙率间的最大相对误差约 10%,容重之间的最大相对误差约 6.5%。应说明,在计算图 5 中 6m 深度以下几点土的孔隙率时,剪切波速度由图 4a 线性插值予以确定 ( $v_p$  和  $v_s$  是由两次试验分别测定的,在测点深度方面没有完全一致)。

### 3 讨 论

为了测定饱和土(尤其是对易扰动的饱和无粘土、灵敏粘性土以及海底沉积土)的天然孔隙率和容重,本文从理论上提出了波速法并且初步说明了其中参数的意义和取值范围。几个实例分析表明本文方法具有一定的可靠性。

在需要测定饱和土动剪模量的工程中,往往会进行现场波速测试。这时,由波速法确定饱和土的孔隙率和容重不但不会增加试验费用,反而可以由所求出的容重和式(2)估求出饱和土的动剪模量。

应用本文波速法时,不但要分析公式中参数的取值问题,还要重视饱和土弹性波速度的测试精度。近十几年来,工程界为提高土中剪切波速度的测试精度作了大量的研究工作,现基本上得到了较满意的结果。饱和土中压缩波速度一般较剪切波速度大得多,震源与接收器间的距离以及记录器的时间分辨力对压缩波速度试验值的影响均较对剪切波速度的影响为大。因此,如何利用现有以测试剪切波速度为主的仪器和方法较准确地测定饱和土压缩波速度,是推广应用波速法测定土孔隙率与容重中的一个重要问题。

最后,作者对帮助完成本文跨孔试验工作的华东电力设计院勘测处和浙江省物探大队的有关同志表示谢忱。

### 参 考 文 献

- 1 井上启司等. 弹性波の利用へち土層の密度探査法, 土と基礎, 1976; 24 (3)
- 2 吴家仁. 海洋沉积物声速特性的实验研究, 海洋学报, 1984; 6 (6)
- 3 Chen Longzhu et al. Propagation of elastic waves in water-saturated soils, Acta Mechanica Sinica, 1987; 3 (1); 中文版, 1987; 19 (3)
- 4 陈龙珠. 吴世明. 海底沉积物结构影响声速的理论探讨. 海洋学报, 1988; 10 (3)
- 5 陈龙珠. 饱和土中弹性波的传播速度及其应用. 浙江大学博士学位论文, 1987
- 6 Richart, F.E. Jr, et al; 徐依在等译, 土与基础的振动. 中国建筑工业出版社, 1976
- 7 Hardin, B.O. The nature of stress-strain behavior in soils, Proc. of Conf on E.E.S D., ASCE, 1978; 1
- 8 龚晓南. 油罐软粘土地基性状 浙江大学博士学位论文, 1984
- 9 李新. 用超声波法测定三轴仪内砂土试件动剪模量的探索. 北京水科院研究生毕业论文, 1984
- 10 De Alba, p., et al. Elastic wave velocities and liquefaction potential, Geotechnical Testing Journal, 1984; 7 (2)
- 11 陈龙珠等. 用机械阻抗法求成层地基的固有频率, 岩土工程学报, 1989; 11 (2)

## Wave Velocity Method for Porosity and Unit Weight of Fully-Saturated Soils

Chen Longzhu Wu Shiming

### ABSTRACT

Based on the authors' work on properties of elastic waves, wave velocity method for porosity and unit weight of fully-saturated soils is presented herein. Comparison of some measurements with theoretical calculations shows rather fair agreements. This method may be of more practical significance to saturated cohesionless soils, sensitive clays and marine sediments which are easily disturbed while sampling.

**Key words:** Wave velocity method Saturated soils Porosity Unit weight