

勘测完全饱和土层初见深度的弹性波速法

陈龙珠 吴世明

(浙江大学土木工程系, 杭州)

一、前 言

在许多工程问题中, 土层饱和状态的判别十分重要。例如, 在液化问题研究中人们发现, 尽管其孔隙压力和变形的发展规律非常相似, 完全饱和砂的抗液化强度却要比稍含气体的高饱和砂抗液化强度低得多^[1]; 在地下工程抗爆设计中, 对于完全饱和土层, 结构顶部荷载值将显著低于不完全饱和土层情况下的荷载值^[2]。由于诸如上述工程性质指标对土层中少量含气极为敏感, 人们对完全饱和土的初见深度就必须作相当精确的量测, 从而使工程设计更加合理和安全。

目前测定土层饱和度的一种常见方法是对从现场取出的“不扰动”土样测定其体积 V 和湿重 W , 烘干后再测定出干土重 W_s 和土比重 G_s , 由此计算土层的饱和度 S_r ,

$$S_r = \frac{(W - W_s) / \gamma_w}{V - W_s / \rho_w G_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中 γ_w 和 ρ_w 分别是水的容重和密度。

另一种较常见的方法是将不扰动土样安装在三轴仪中, 在不排水条件下增加围压值 $\Delta\sigma_3$, 同时测量土样中孔隙水压力增量 Δu , 如果孔压系数 $B = \Delta u / \Delta\sigma_3 \approx 1$ 则认为土处于完全饱和状态。实践告诉人们, 对于第一种方法, 测试误差欲低于 1% 是相当困难的, 故此不能断言土层是完全饱和还是少量含气; 第二种方法对于较“硬”的土将会失效, 因为此时即使土完全饱和, 其 B 值也是低于 1 的^[3]。以上两种方法的结果还不可避免地受土样扰动以及试验过程中含水量改变等方面的影响, 试验过程繁琐、周期较长; 它们不易判断出天然无粘性土层的饱和状态, 在诸如需观测浸润线以下堤坝土体饱和状态时程的工程中应用也不方便。总之, 目前工程中尚不能较可靠地确定完全饱和土的初见深度, 研究新的测试方法将显然不乏实用意义。

根据笔者及其他人近年来对土中波动特性的研究结果, 本文拟提出勘测天然土层完全饱和和初见深度的弹性波速法, 并且通过一现场试验和两个实例初步考察它的可靠程度。

到稿日期: 1988年5月20日。

本文为国家教委博士点基金资助项目内容。

二、理论依据

(一) 完全饱和土的弹性波速度

由于完全饱和土的 P 波速度实测值与水中波速 ($v_w \approx 1450 \text{ m/s}$) 相接近, 人们大多认为完全饱和土的 P 波速度不能反映土骨架的特性。其实, 这一观点是片面的。近几年来, 笔者对饱和土中弹性波特性的理论和试验研究, 得出的主要结论是^[4,5]: 当 $(2\pi fk/ng) < 1$ 时, 不论其渗透性优劣, 完全饱和土的 P 波和 S 波速度可由下列公式表达

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

$$v_s = \sqrt{\mu'/\rho} \quad (3)$$

式中 f 是 P 波频率; k 是土的渗透系数; n 是土的孔隙率; g 是重力加速度; v_p 和 v_s 分别代表 P 波和 S 波速度; $E_w = \rho_w v_w^2$ 是水的体变模量; $\rho = \rho_w[(1-n)G_s + n]$ 是饱和土的质量密度; λ' 和 μ' 是土骨架的Lame常数; 其余符号意义如上文相同。

分析表明, 在上述条件下, 不但 S 波速度受土骨架的影响, 而且 P 波速度也与土骨架有关; 随着孔隙率的减小, v_p 将逐渐增大并且当 $n < 60\%$ 时 $v_p > v_w$; v_p 还随土骨架刚度的增大而增大, 当 $(\lambda' + 2\mu')/E_w \geq 0.1$ 时总有 $v_p > v_w$ 。

(二) 高饱和土的弹性波速度

以往理论和试验研究结果表明^[6,7], 少量含气后土中弹性波速 v_p 将发生明显变化, 并且这种变化还因频率的不同而不同, 即存在一气泡共振频率 f_0 , 当 $f < f_0$ 时高饱和土中的 P 波速度 v_p^u 与含气量有关, 而当 $f > f_0$ 时高饱和土的 v_p^u 与完全饱和土的 v_p 一致。 f_0 随气泡半径 r 的减小和土剪切模量 μ' 的增大而增大, 可由下式估算^[6]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi r} \left(\frac{3P_0 + 4\mu'}{\rho^u} \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中 P_0 是气泡压力; $\rho^u = \rho_w[(1-n)G_s + S_r n]$

表1中的算例是由式(3)、(4)求出的, 可见 f_0 一般高于 1 kHz, 文献[7, 8]中的实验结果与此吻合。

由水与气泡混合物的体变模量 E_{wa} ^[7]:

$$\frac{1}{E_{wa}} = \frac{S_r}{E_w} + \frac{1-S_r}{E_a} \quad (5)$$

这里不难导出当 $2\pi fk/ng < 1$ 和 $f < f_0$ 时高饱和土 ($S_r > 85\%$) 的波速公式

$$v_p^u = \sqrt{\frac{E_{wa}/n + (\lambda' + 2\mu')}{\rho^u}} \quad (6)$$

表1 少量含气饱和土的共振频率 f_0

土类	r (cm)	v_s (m/s)	ρ (kg/m ³)	p_0 (kPa)	f_0 (Hz)
粘土	0.05	120	1850	(1个大气压) 104	76540
	0.50				7654
砂土	0.05	300	2030	104	191124
	0.50				19112

$$v_s^u = \sqrt{\mu' / \rho^u} \quad (7)$$

由于 $E_a/E_w = \rho_a v_a^2 / \rho_w v_w^2 = 1.29 \times 340^2 / (1000 \times 1450^2) \approx 0.71 \times 10^{-4}$, 故式(5)可写成

$$E_{wa} \approx E_w / [1.41 \times 10^4 (1 - S_r) + S_r] \quad (8)$$

由式(8)知, 当 $S_r = 99.5\%$ 时, $E_{wa} = 0.014 E_w$, 说明少量含气即可使孔隙流体体变模量急剧减小, 从而式(6)将显著偏小于式(2)的值。图1是利用式(6), (8)对表1中两种土的计

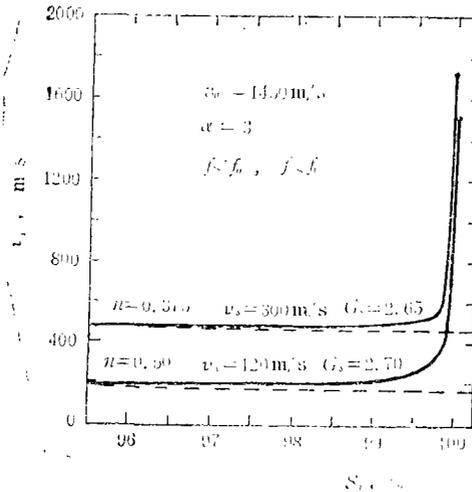


图1 高饱和土中低频条件下压缩波的速度

算结果, 其中虚线是令 $E_{wa} = 0$ 时的波速值(取决于土骨架侧限模量 $\lambda' + 2\mu' = \frac{2 - 2\nu'}{1 - 2\nu'} \mu'$ $= \alpha \mu'$; ν' 是土骨架泊松比, 一般取 0.10—0.35, 故 $\alpha = 2.25—4.33$)。可见, 当 $S_r \leq 99.5\%$ 时, 土中 P 波速度主要受土骨架侧限模量控制, 它显著低于完全饱和土的 P 波速度。

在不计物化效应的条件下, 少量含气土与完全饱和土的 S 波速度基本上相同。

(三) 用弹性地震波速勘测饱和土的初见深度

研究表明^[9], 目前工程中常采用的地震波测试方法(如跨孔法和检层法等)基本上使土处于弹性状态, P 波主频率量级为 1—10² Hz。因此, 这些试验一般可同时满足条件 $2\pi f k / n g < 1$ 和 $f < f_0$, 也就是说用上述理论解释波速资料是可行的。

对实测的 P 波速度与深度关系曲线, 利用 $S_r = 100\%$ 和 99.5% 时波速值的显著差异, 人们便可方便地确定完全饱和土的初见深度。

三、实验验证及应用实例

(一) 实验验证

试验场地位于杭州三堡钱塘江新老堤之间, 深度 17m 以内的土层比较均匀, 主要为第四系全新统 Q_4 的粉细砂沉积层。现场抽水试验知粉砂土的渗透系数约为 $1.45 \times 10^{-3} \text{cm/s}$, 土颗粒比重为 2.70 。

由于天然地下水位较浅(深度约 2m), 不易考察高饱和土层的波速特性, 故采用井点降水方法以获得较深的完全饱和土初见深度(如图 2 所示)。第一次试验只是对天然土层的弹性波速进行跨孔试验, 但由于仪器等原因, 土层 P 波速度与深度关系实测数据不全。连续抽水两天后, 第二次用跨孔法进行了高饱和土弹性波速度测定。两次跨孔试验结果如图 3 所示。

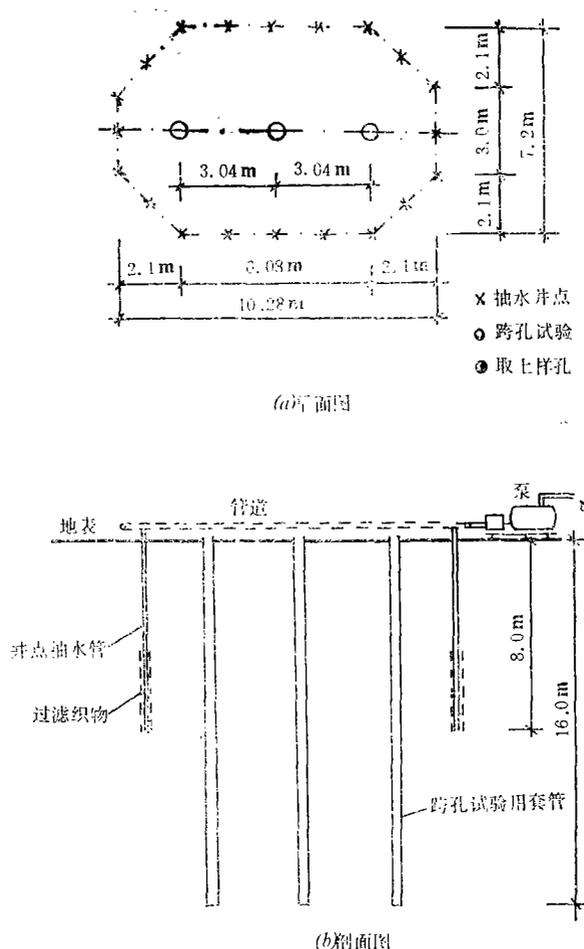


图 2 杭州三堡场地跨孔试验布置示意图

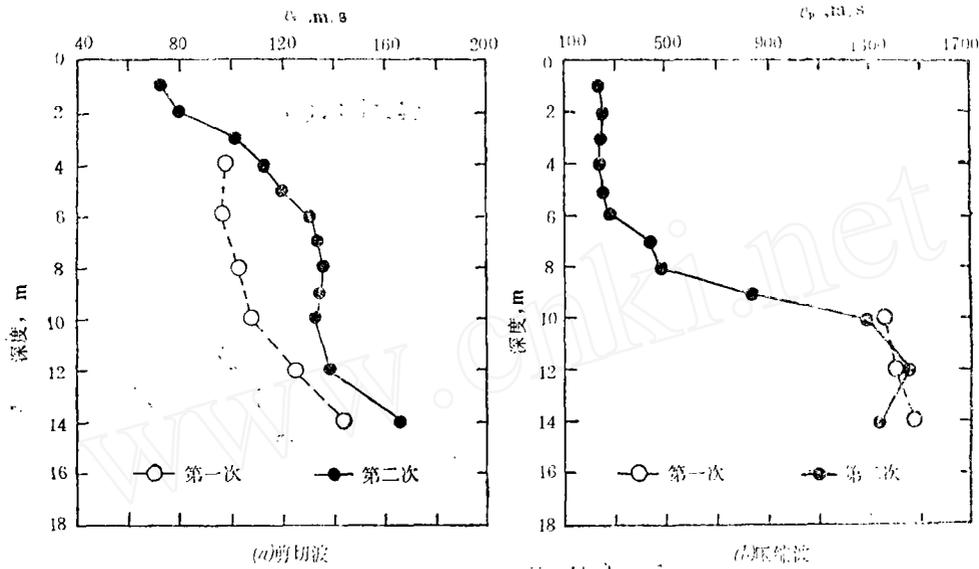


图3 杭州三堡跨孔试验场地波速

根据 S 波速度可以判断该粉砂土层是比较松散的, 由标贯数估算其孔隙比 $e \approx 0.9 - 1.0$ 。取 $\alpha = 3$, $v_w = 1450 \text{ m/s}$ 则由式 (2), (3) 和图 3 (a) 可求出土层处于完全饱和时的 P 波速度 $v_p = 1510 - 1540 \text{ m/s}$, 该值与 10 m 深度以下实测波速值仅相差 4% 左右, 应归属为试验误差。因此可认为 10 m 是第二次试验时完全饱和土的初见深度。在图 3 (b) 中, 8 m 以内深度土层的 P 波速度不到完全饱和土的 35%, 而在 8—10 m 内 P 波速急剧增加, 根据波速法判定, 10 m 以内深度的土层均处于非饱和状态, 其中 8—10 m 内的土层饱和度已相当接近于 100%。以上波速法的结论在按图 2 所示井点降水条件下显然是合理的。

(二) 应用实例

1. 镇海电厂堆煤场地基

宁波市镇海电厂堆煤场位于镇海镇的西部和甬江出口段北岸堤边。地基表面有约 2 m 深度的硬壳层, 2—13 m 深度内为淤泥质轻亚粘土, 接下去是一层淤泥质粘土。2—15 m 深度内土质比较均匀, 孔隙比 $e \approx 1.25$ 。土层弹性波速度由跨孔法测定, 震源孔与近、远孔的水平距离分别为 3.08 m 和 5.60 m。试验时地下水位深度约 2.50 m, 跨孔试验结果如图 4 所示。

由式 (2), (3) 和图 4 (a) 可求出土层处于完全饱和时的 P 波速度为 1500 m/s (取 $\alpha = 3$, $v_w = 1450 \text{ m/s}$)。该值与图 4 (b) 中 4 m 以下深度土层实测 P 波速度相当接近, 故可认为 4 m 是该土层完全饱和土的初见深度。3 m 处土层 P 波速度约为完全饱和土的 73%, 与图 1 对比可知其相当接近于完全饱和状态。上述波速法的结果说明完全饱和土的初见深度大于试验时的地下水位深度。

2. 河北黄壁庄水库地基^[10]

北京水科院抗震所曾对河北黄壁庄水库地基土的弹性波速度进行了较系统的测试, 本文引用的是桩 2 + 308 处地基的波速资料, 其剖面如图 5 (a) 所示。波速由跨孔法测定, 实测结

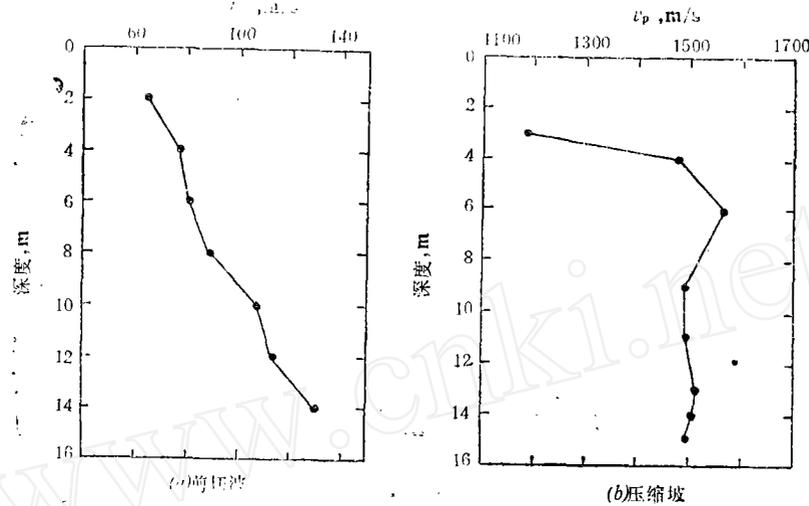


图4 镇海电厂堆煤场地基波速

果如图 5 (b) 所示。试验时地下水位高程为 105.5m (深度为 6.5m)。由图 5 (b) 知, 地下水位以上土层的 P 波速度随深度增大的梯度极小, 而地下水位以下土层的 P 波速度随深度增大的梯度较大, 至高程 101.0m 处 v_p 达到最大值。高程 101.0m (深度 11.0m) 以下 v_p 的起伏主要应归属试验离散和土层孔隙比不同所引起的。从实测 P 波速度与深度关系曲线看, 高程 101.0m (深度 11.0m) 以下土层已处于完全饱和状态; 完全饱和土的初见深度大于地下水位的深度, 两者之间的土层已相当接近于完全饱和。

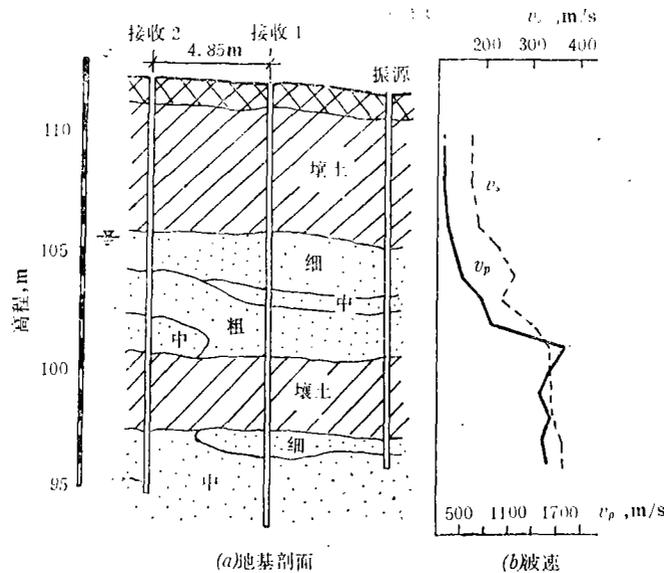


图5 黄壁庄水库地基剖面及波速(桩 2 + 308)

为了检验上述主要结论, 现对较深的壤土层的 P 波速度作一简要分析。试验测定土的孔隙率 $n \approx 43.6\%$, 密度为 1.96g/cm^3 。取 $\alpha = 3$, $v_w = 1450\text{m/s}$, 由式 (2), (3) 和实测 v_s 值可求出该壤土处于完全饱和时的 P 波速度为 1680m/s , 它与实测 P 波速度相差约 4% 。

可见较深的壤土层(高程97.5—100.8m)确是处于完全饱和状态。

四、小 结

根据笔者及其他人对土中波动特性的研究结果,本文提出了勘测天然土层饱和状态的弹性地震波法,其可靠性初步为现场试验结果所验证。

试验资料表明,完全饱和土的初见深度一般大于地下水位的深度,两者之差可能反映了地下水位的近期升降幅度。

在应用本文分析方法时,要重视土中 P 波速度的测试问题。完全饱和土初见深度可根据实测 P 波速度与深度关系曲线上波速的突变特征予以初步确定;而较精确的方法是由实测孔隙率和 S 波速度,按式(2),(3)求出土层完全饱和时的 P 波速度理论值,将此与实测 P 波速度对比而定出完全饱和土的初见深度。

如果土中 P 波速度是由地球物探中的超声波测井法测得的,因频率 f 较高可能会出现 $f > f_0$ 和 $2\pi fk/ng > 1$ 的情况,此时本文所述的波速法判断土饱和状态失效。

参 考 文 献

- [1] Chaney, R.C., Saturation Effects on the Cyclic Strength of Sands, E.E.S.D., ASCE, Vol.1, 1978.
- [2] 空军后勤部工程设计局等译,美国空军防护结构设计与分析手册(AFWL-TR-74102)。
- [3] Lee, K L., et al., A Note on the Pore Pressure Parameter B, Proc. 7th ICSM FE, Vol.1, 1969.
- [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, Vol.10, No.3, 1988.
- [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] Anderson, D.G., et al., Acoustics of Gas-Bearing Sediments, J. Acoust. Soc. Am., Vol.67, No.6, 1980.
- [7] Allen, N.F., et al., Fluid Wave Propagation in Saturated and Nearly Saturated Sand, ASCE, Vol.106, GT3, 1980.
- [8] Strachen, P., Alternative Test Method for Ensuring Full Saturation in Triaxial Samples, Geot. Testing Journal, Vol.8, No.1, 1985.
- [9] Wood, R.D., Measurements of Dynamic Soil Properties, Proc. of Conf. on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE, Vol.1, 1978.
- [10] 北京水科院抗震所,黄壁庄水库地基抗震液化分析报告, 1985.