

非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究

陈正汉

(后勤工程学院建筑工程系, 重庆, 630041)

谢定义

王永胜

(陕西机械学院水电学院, 西安, 710048) (西北水电勘测设计研究院, 西安, 710001)

文 摘 本文以压实黄土为对象, 以各种改进的仪器设备为手段, 在较大的湿度和密度范围内系统地研究了非饱和土的渗气性、渗水性、孔隙水压力和孔隙气压力在三轴不排水不排气剪切过程中的演化特性; 用多种方法研究了非饱和土的吸力-密度-饱和度间的关系; 在总结正反两方面经验的基础上, 摸索出一套相应的测试方法。

1. 前 言

近年来, 非饱和土工程性质的研究正日益受到重视^[1,2]。我们在近年对非饱和土的研究中, 引进和改进了多种仪器设备, 进行了一系列非饱和压实黄土的工程性质试验, 内容包括渗气性、渗水性、吸力特性、孔隙水压力和孔隙气压力在三轴条件下的演化特性。并在总结正反两方面经验的基础上, 摸索出一套测试方法^[3]。

试验用土取自西安市黑河大坝金盆土场, 土的物理性质见表1。

表1 试验用黄土的物理指标

比重G	含水量w (%)	塑限 w_p (%)	液限 w_L (%)	塑性指数 I_p (%)	颗粒组成(%)		
					>0.05mm	0.05~0.005mm	<0.005mm
2.73	21.5	17.6	30.9	13.3	12	58	30

2. 渗气性的试验研究

对非饱和土中气相运动的描述, 目前尚没有统一的认识^[1]。文献[3]根据理论分析指出: 在气相流速较小且不计液相运动对它的影响时, 可用达西定律描述气相运动。但渗气系数与土的饱和度及密度有关。本节将用大量试验初步验证这一理论, 并揭示渗气系数的有关规律。

根据建筑材料科学中使用的渗气仪原理^[4], 我们设计了一套非饱和土的渗气装置, 其构造如图1所示。主要部件包括: ①土筒, 兼作为试样成型模; ②带可控阀门的水箱; ③U型压力计(对小压差用水柱, 对大压差用水银柱); ④量筒和秒表。该装置用量测试验过程中的出水量代替流过试样的空气体积, 从而提高了量测精度。其最大的优点是构造简单、操作方便。

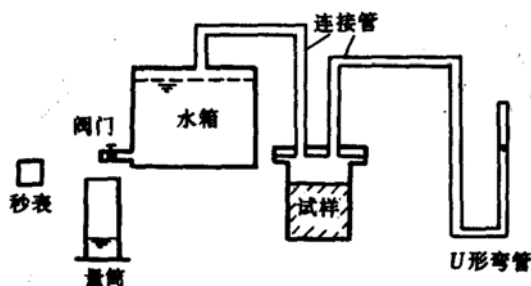


图1 渗气试验原理示意图

试样为高8.2cm、横断面积13.2cm²的圆柱,是用千斤顶把配好水的土按设计干容重分五层压实成型的。每层的高度用套在压力活塞上的钢环高度控制。试验的控制含水量为10%, 12.6%, 15.7%, 17.2%, 21.5%, 24.8%, 控制干容重为14.0, 15.0, 16.0, 17.0kN/m³。

试验开始,开阀放水,并控制到适当的流量。水的流出使水箱上部的空气体积增大,从而在水箱上部、管道及试样上端出现负压。而试样的下端与大气相通,于是在试样两端形成压差。该压差由U型管的液面反映。经过一段时间后,经过试样进入水箱上部空气的体积流量与从水箱下部放出的水的流量达到了动态平衡,U型管内的液面差就保持恒定。这时开始用量筒集水,同时开动秒表计时,经过若干时间便可收集到一定量的水。这样就完成了某个试样在一个压力梯度下的试验。通过改变阀门的开度,调节放水量,重复上面的量测过程,就可得出一组试验资料。在整理试验资料时,首先要将量测的水的体积按下式校正:

$$Q' = \frac{p_a - \Delta P}{p_a} Q \quad (1)$$

式中 Q 是量测的水的体积, cm³; ΔP 是U型压力计读数; Q' 是渗过试样的空气在大气压下的体积; p_a 是大气压。然后用 Q' 计算空气的体积流量 q 及压力梯度 i 。

$$q = \frac{Q'}{AT}, \quad i = \frac{\Delta P}{L} \quad (2)$$

式中 A , L 分别是试样的断面积与高度; T 是历时, s。试验成果绘成 $q-i$ 关系图(图2, 3)。由于同一含水量下不同干容重的试样的渗气性相差很大,难以在同一张图上画出,因而图2只绘出了同一干容重的试样在不同含水量下的情况,图3是含水量等于10%情况的试验结果。这些图清楚地表明:在试验的密度范围($\gamma_d = 14 \sim 17 \text{ kN/m}^3$)、湿度范围(饱和度 $S = 28\% \sim 83\%$)和压力梯度范围($i = 0 \sim 12.5$)内,非饱和压实土的渗气规律完全可用达西定律描述;土的密度对渗气性有显著影响,而湿度对渗气性的影响不大;同一干容重的试样在不同含水量下的渗气系数最大相差不超过5倍,在实用上可采用不同含水量下的平均值。这一点在图4上看得更清楚。图中的直线代表平均渗气系数 $\bar{k}_a$ 与孔隙率 n 的关系,其方程为

$$\lg \bar{k}_a = 3.2234 + 15.3755 \lg n \quad (3)$$

当把图2中每条直线的斜率画在图4中时,所有的点都落在式(3)表示的直线上。

3. 水份特征曲线的试验研究

非饱和土的孔压包括孔隙水压力 u_w 和孔隙气压力 u_a 。一般情况, $u_a > 0$ (高于大气压),

而 $u_w < 0$ (低于大气压)。越过水-气界面存在压力差 $P_c = u_a - u_w$, 称为毛细压力, 也称为吸水或张力。毛细压力取决于孔隙空间的几何形状、土的含泥量、密度及饱和度等。对某一

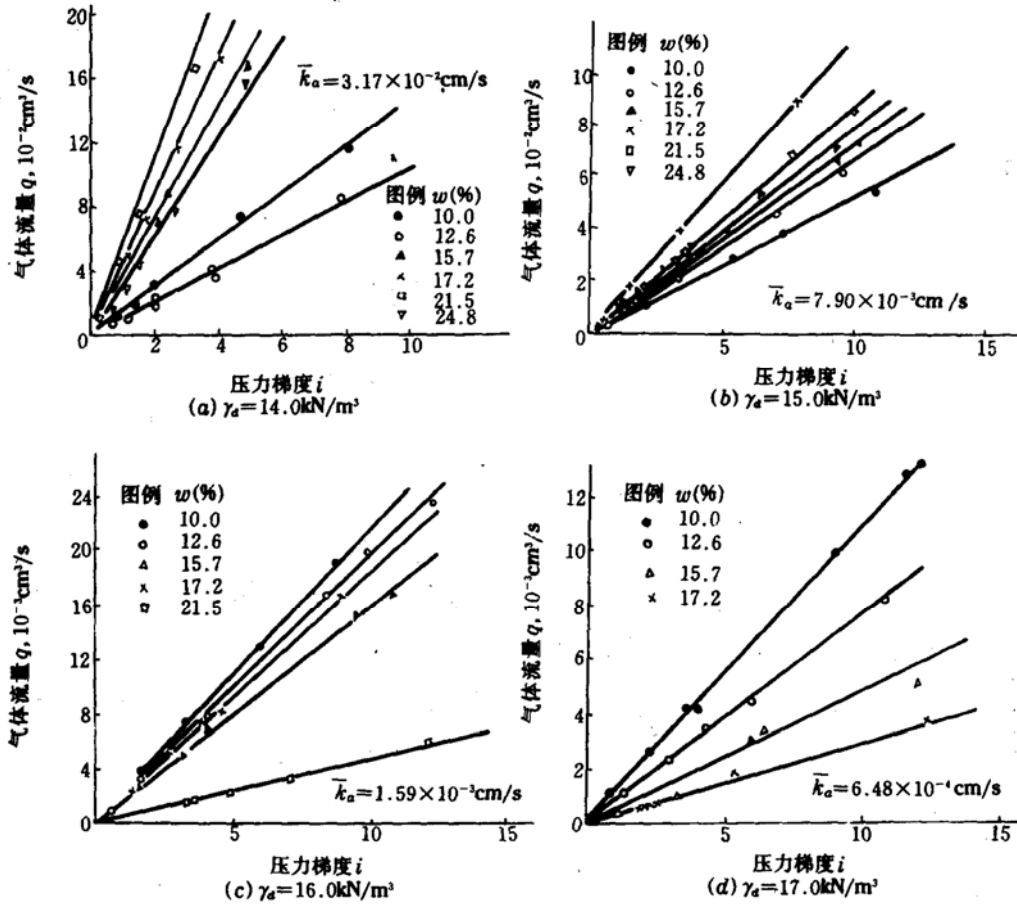


图2 含水量对渗气性的影响

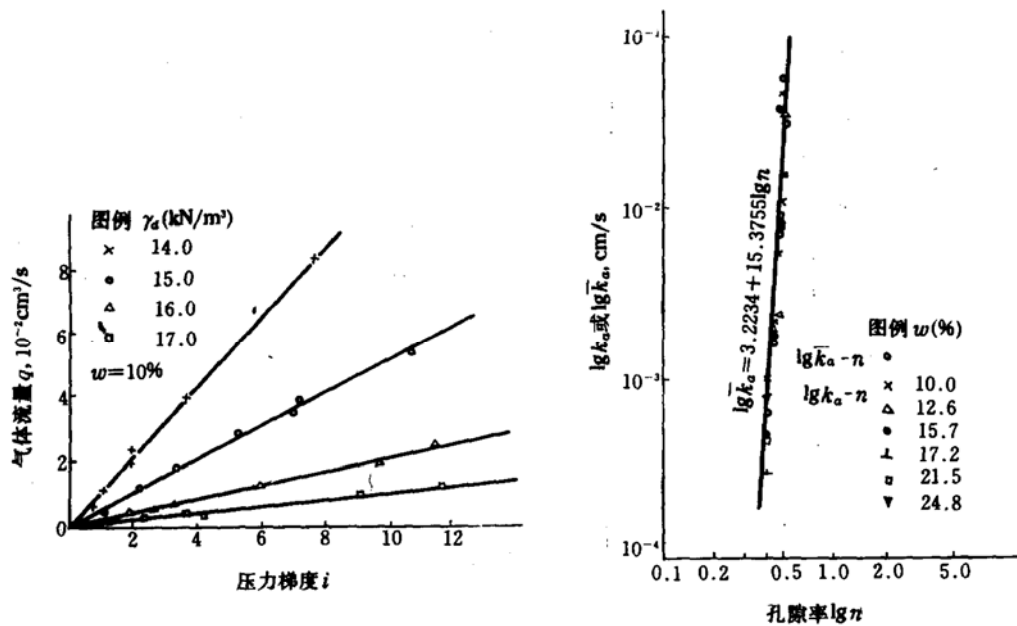


图3 干容重对渗气性的影响

图4 $\lg k_a - \lg n$ 关系

特定的土而言,通常只考虑饱和度 S 的影响,并把由试验测定的 P_c-S 曲线称为土的水份特征曲线,也称为毛细压力函数。毛细压力与土的湿润史有关。土从干到湿逐渐饱和称为吸吮过程,而土从饱和逐渐失水变干称为排泄过程,两种过程所得到的水份特征曲线是不同的。在应用时,应根据实际的湿润过程选用相应的水份特征曲线。

水份特征曲线有两个作用:一是把它和水平土柱渗透试验资料相结合,用以计算非饱和土的渗水系数;二是如文献[3]所述,它的数学模型是非饱和土的本构关系之一。因此,非饱和土的水份特征曲线的测定是本文研究的一项重要任务。文献[3]根据理论分析指出, P_c 与 S 及 n 有关,故应研究这三者之间的关系。

在这项研究中,我们走过很大弯路。起初,我们在中国科学院西北水土保持研究所用离心机测定,但发现离心机的高速旋转对试样扰动很大,改变了试样的起始密度,致使试验结果失真。后来,我们改用中国科学院南京土壤物理研究所研制的张力仪做试验(图5),该仪器只能量测低于80kPa的吸力。我们采用与渗气试验相同的制样方法,即用千斤顶把配好水的土在高15cm、内径10cm的钢筒中分5层压实到设计干容重,试样成型后的高度是10cm。用直径略小于张力仪陶瓷头直径的钻头在试样中心打孔,孔深8cm,把标定好的张力仪插入试样中。在钢筒上部的空余部分,用制样的土填满,然后把土筒装入塑料带中,塑

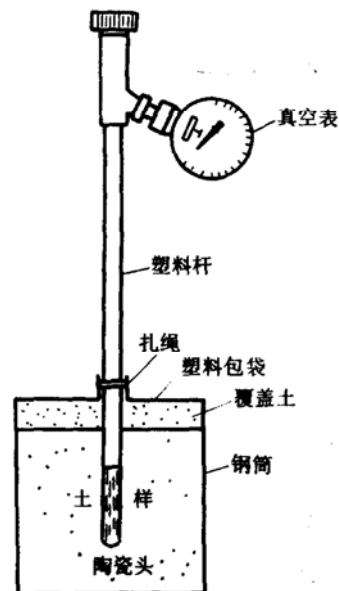


图5 张力仪测吸力示意图

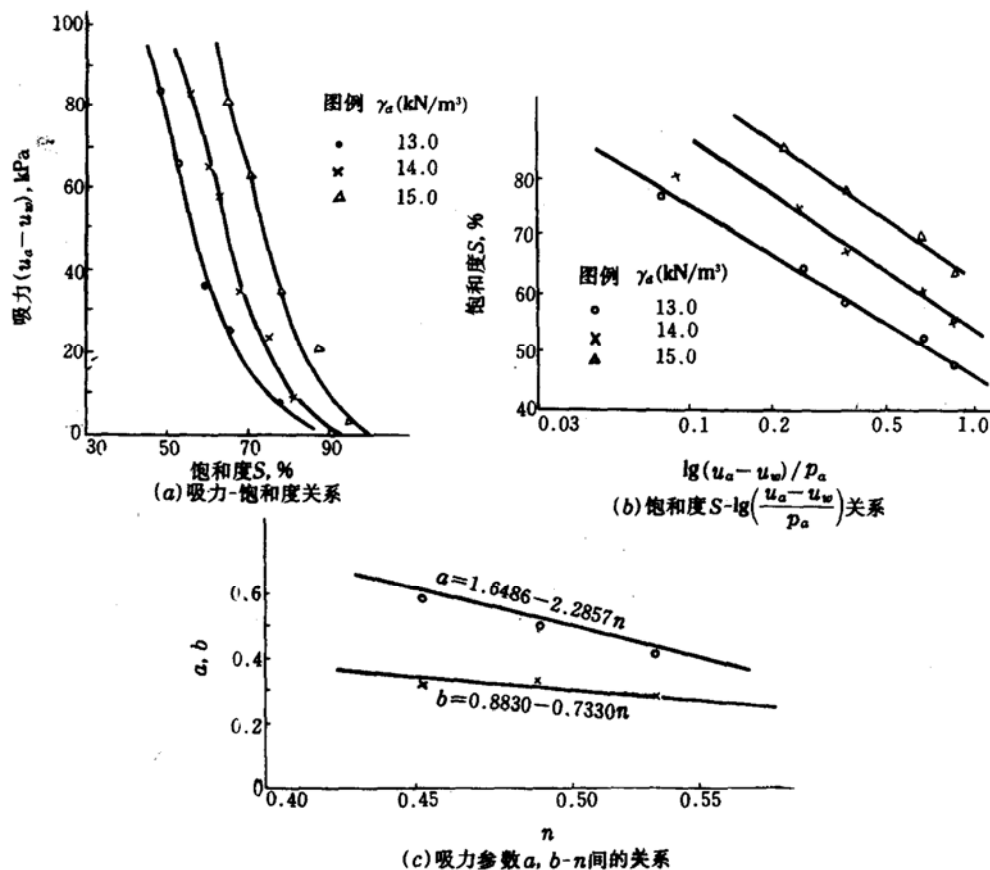


图6 非饱和土的水份特征曲线

料带的口在收紧后用绳子紧扎在张力仪的塑料杆上。根据我们的经验, 张力仪的读数在36h内就稳定了。因此, 上述措施完全可以保证试样的含水量不变。

试样的控制含水量为10%, 13.2%, 16.2%, 17.33%, 19.34%, 21.06%, 23.5%, 26.00%, 28.00%, 31.00%, 36.00%; 控制干容重为13.0, 14.0, 15.0, 16.0, 17.0kN/m³。对于干容重为16.0, 17.0kN/m³的试样, 把张力仪的陶瓷头插入小于其直径0.1mm的孔中非常困难, 我们只得放弃相应的试验。每一干容重在同一含水量下同时制5个试样平行测定, 整理资料时采用它们的平均值。当含水量低于17.33%时, 张力仪的读数超过了其有效量程, 因而对这一部分资料舍弃不用。

把试验结果绘成吸力-饱和度关系曲线(图6(a)), 可以看出, 饱和度和密度对吸力都有显著影响。在半对数坐标上, 当饱和度小于80%, 不同干容量的 $S-\lg\left(\frac{u_a-u_w}{p_a}\right)$ 都是直线(图6(b)), 它们的方程是

$$S = a - b \lg\left(\frac{u_a - u_w}{p_a}\right) \quad (S < 80\%) \quad (4)$$

其中 $a = 1.6486 - 2.2857n$, $b = 0.6830 - 0.7330n$ 。a, b两值可从图6(c)求得, 从该图可知, a随密度有较大的变化, 而b受其影响较小。

当负孔隙水压力超过80kPa时, 量测系统内的水要汽化, 汽压将抵消负压。由于负孔隙水压力是相对于大气压而言的, 故只要人为地提高试样的孔隙气压力, 就可以使孔隙水压力的绝对值减小, 而保持吸力不变。当气压超过吸力时, 孔隙水压力便上升为正值, 从而避免了汽化, 便于量测。这就是所谓的“轴平移技术”。在本文第5节中, 我们还将用传感器和“轴平移技术”测定吸力。

4. 渗水性的试验研究

根据土壤物理学的研究, 非饱和土的渗水系数 k_w 不能直接测定, 通常是在测出水份扩散度 D 和水份特征曲线的基础上换算求得的^[5]。

测定水份扩散度 D 的试验是直接利用文献[6]介绍的 γ 透射法测定非饱和土水份运动参数的成套设备。该设备的主要部件有土筒、供水系统和同位素测土的含水量的系统。考虑到有机玻璃土筒的强度较小, 土样的干容重控制为13.0, 14.0, 14.5, 15.0, 15.5kN/m³。在土筒周边刻有环形线, 土样按2.5cm一层的厚度分层击实。起始含水量均为10.5%。试验方法和步骤详见文献[3, 6]。

应当指出, 土壤物理学中习惯采用体积含水量 θ_v 表示单位土体中水所占的体积。体积含水量与土力学中惯用的重量含水量的关系是

$$\theta_v = \gamma_a w / \gamma_w \quad (5)$$

式中 w , γ_w 分别是土的含水量与水的容重。借助于式(5), 就可把土壤物理学的有关公式中的 θ_v 用 w 取代。

利用试验量测的数据, 可按下式计算不同入渗时刻测点的含水量增量

$$\Delta w_j = \frac{\gamma_w}{\mu_w d_0 \gamma_a} \ln\left(\frac{I_0^j - I_e}{I_t^j - I_e}\right) \quad (6)$$

式中 $d_0 = 9\text{cm}$, 是土筒的内直径; μ_w 是水对 γ 射线的质量吸收率(cm^2/g), 用土筒水室处的实测数据按式(6)算出, 5个土样的渗透试验测得的 μ_w 平均值是 $0.07541\text{cm}^2/\text{g}$; j 是测点编号,

I_0^j 和 I_t^j 分别是试验前与试验开始后 t 时刻 γ 射线在 j 点穿透土样的强度; I_e 为没有放射源时的自然放射强度,5次试验测得的 I_e 的平均值为1356。

利用式(6)算得的土样内不同时刻的含水量分布绘于图7。限于篇幅,本文仅给出试样干容重等于 14.0kN/m^3 的试验结果。据此,又可按下式算出扩散度。

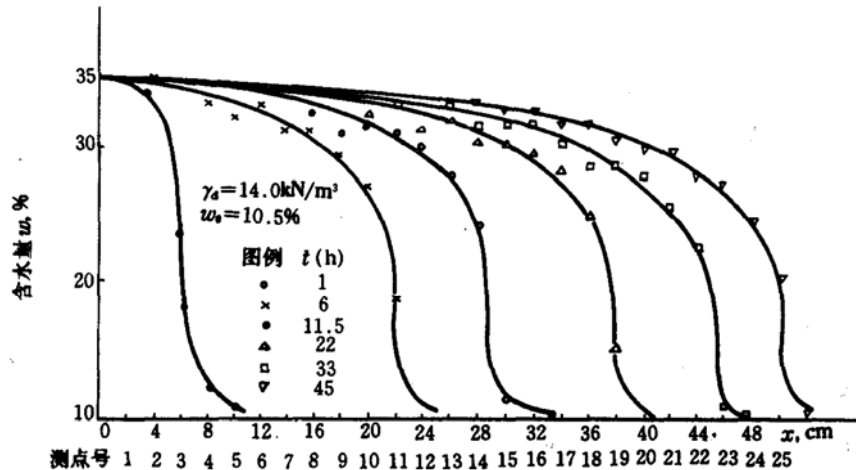


图7 土样在不同入渗时刻的含水量分布

$$D = -\frac{1}{2t} \left(\frac{\Delta x}{\Delta w} \right) \sum_{w_0}^w x \Delta w \quad (\text{cm}^2/\text{min}) \quad (7)$$

式中 t 是入渗时间, min; Δx , Δw 分别是两测点间的距离及含水量差; $\left(\frac{\Delta x}{\Delta w} \right)$ 是 $\frac{\Delta x}{\Delta w}$ 的平均值。

把同一土样在不同时刻的扩散度与饱和度相联系可得图8。图中的曲线相当于对同一土样做了若干次重复试验的平均结果,因而更具代表性。图8所示的试验资料的整理方法是对文献[6]中所介绍的方法的改进。文献[6]对每一量测时刻用一条曲线拟合,再取各拟合函数的参数的平均值作为代表试样的结果。这样做工作量大,且缺乏直观性。

把扩散度与饱和度的关系绘在半对数坐标上,5个试验结果都表现为两段折线(图9(a)),转折点大致都在饱和度等于60%处。显然,饱和度与密度对扩散度都有重大影响。图中的直线可统一表达为

$$\lg D = cS - d \quad (8)$$

其中,参数 c , d 与土的密度有关。从图9(b)中可知

$$\left. \begin{aligned} c &= 8.3000 - 15.2381n, \quad d = 8.5700 - 13.8333n & (S < 60\%) \\ c &= 6.4333 - 6.6667n, \quad d = 8.2737 - 10.5263n & (S > 60\%) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

有了以上关系,就可以计算渗水系数 k_w 。设 $\vec{v}_s$ 和 $\vec{v}_w$ 分别代表土的固相和液相的速度矢量,则 $nS(\vec{v}_w - \vec{v}_s)$ 就是水在土中渗透的相对速度的表观值。根据文献[3]理论分析,水在土中

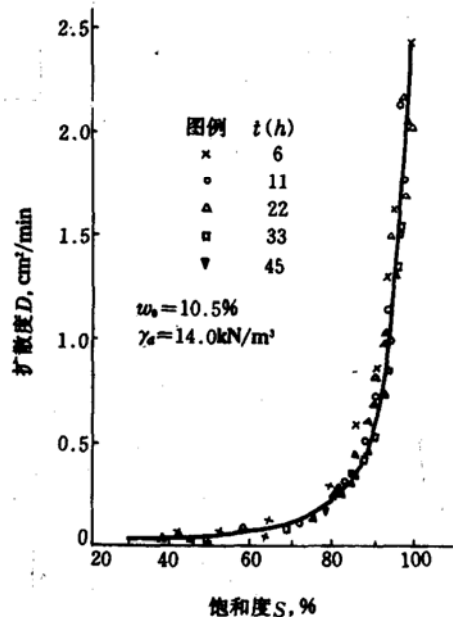


图8 扩散度 D 与饱和度 S 关系

渗流的规律可用如下的达西定律描述:

$$nS(\vec{v}_w - \vec{v}_s) = \frac{k_w}{\gamma_w} \nabla u_w \quad (10)$$

此处 ∇ 是梯度算子。上式可被改写为

$$nS(\vec{v}_w - \vec{v}_s) = \frac{k_w}{\gamma_w} (-\nabla P_c) = -\frac{k_w}{\gamma_w} \left(-\frac{dP_c}{d\theta_v} \right) \nabla \theta_v \quad (11)$$

土壤物理学中定义扩散度 $D(\theta_v)$ 为

$$D(\theta_v) = k_w \left(-\frac{dP_c}{d\theta_v} \right) \quad (12)$$

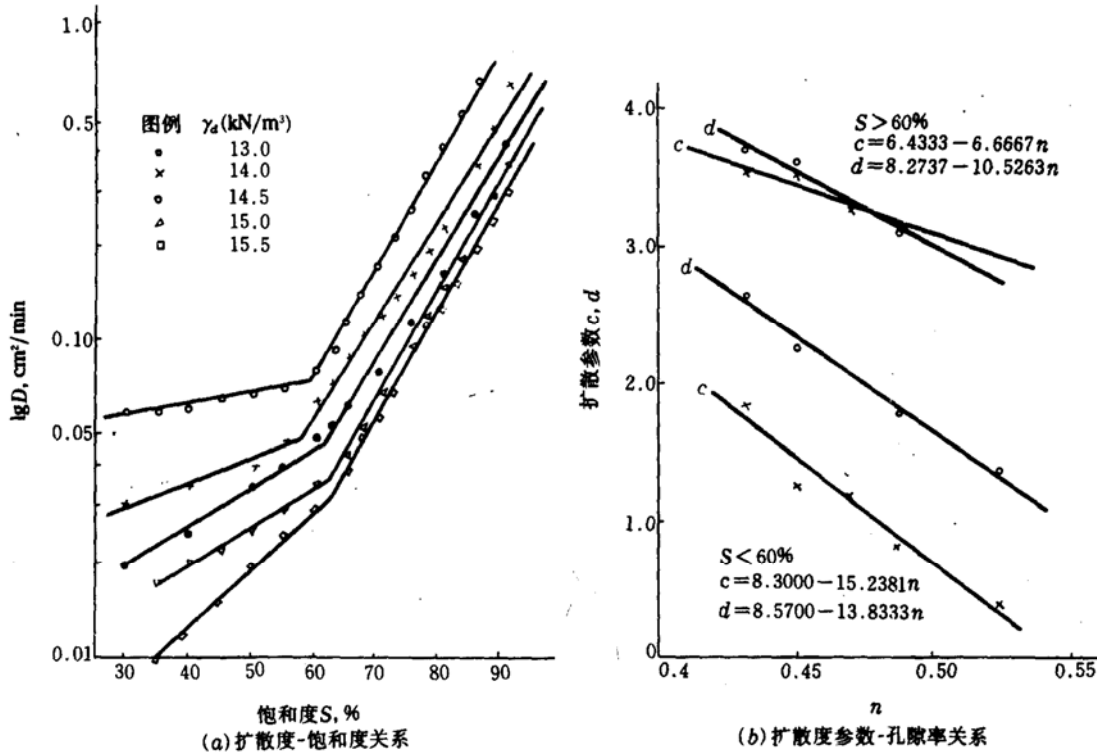


图9 扩散度及有关参数的确定

这里把扩散度和 P_c 看成是 θ_v 的函数。注意, $D(\theta_v)$ 应根据 θ_v 算出。土壤物理学中就是按照式(12)计算 k_w 的, 这样算出的 k_w 是 θ_v 的函数。为了能用第3节中的 P_c - S 关系及本节的 $D(w)$ - S 关系计算 k_w , 需要对达西定律做如下的变换:

$$nS(\vec{v}_w - \vec{v}_s) = -\frac{k_w}{\gamma_w} (-\nabla P_c) = \begin{cases} -\frac{k_w}{\gamma_w} \left(-\frac{dP_c}{dw} \right) \nabla w \\ -\frac{k_w}{\gamma_w} \left(-\frac{dP_c}{dS} \right) \nabla S \end{cases} \quad (13)$$

现分别定义

$$D(w) = k_w \left(-\frac{dP_c}{dw} \right), \quad D(S) = k_w \left(-\frac{dP_c}{dS} \right) \quad (14)$$

其中 $D(w)$ 和 $D(S)$ 应分别根据 w 和 S 求出。设 G 和 e 分别是土的比重和孔隙比, 利用式(5)及

$$S = \frac{Gw}{e} \quad (15)$$

$$\text{可得 } \nabla w = \frac{dw}{d\theta_v} \nabla \theta_v = \frac{\gamma_w}{\gamma_a} \nabla \theta_v, \quad \nabla S = \frac{dS}{dw} \nabla w = \frac{G}{e} \nabla w \quad (16)$$

把式(14)、(16)代入式(13), 并与式(11)比较可知

$$D(\theta_v) = D(w) \frac{\gamma_w}{\gamma_a}, \quad D(w) = D(S) \frac{G}{e} \quad (17)$$

利用式(14)中任意一式都可借助于式(17)计算 k_w 。如

$$k_w = D(S) / (-dP_c/dS) = D(S) / (-dS/dP_c) = \frac{e}{G} D(w) (-dS/dP_c) \quad (18)$$

从式(8)解出

$$D(w) = 10^{cS-d}$$

从式(4)有

$$-dS/dP_c = 0.4343b / (P_c/p_a) = 0.4343 \times 10^{-\frac{a-S}{b}}$$

把上两式代入式(18), 得

$$k_w = 0.4343 \frac{eb}{G} \times 10^{[\frac{1}{b} + c]S - [\frac{a}{b} + d]} \quad (\text{cm/min}) \quad (19)$$

从第3节知, 式(19)在 $S < 80\%$ 时才适用。用式(19)算出的渗水系数绘于图10, 该图中还给出了用式(19)推算的 $\gamma_s = 17 \text{ kN/m}^3$ 时的土样的渗水系数。

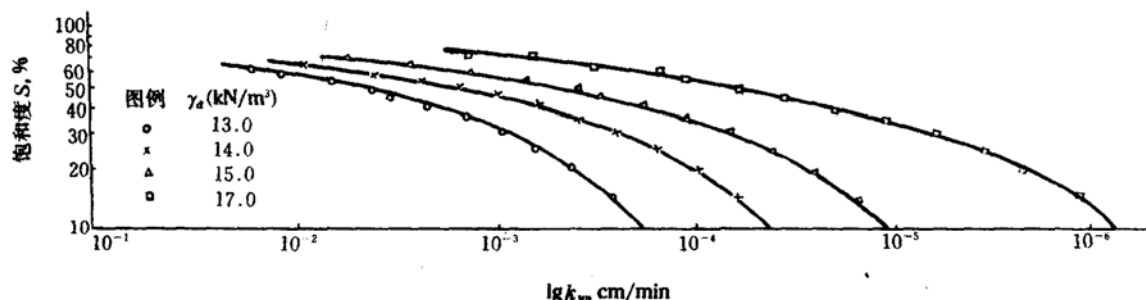


图10 不同土容重上的渗水系数与饱和度关系

5. 孔隙水压力和孔隙气压力的演化特性研究

5.1 试验设备及调试

(1) 试验设备

为了探讨非饱和土在三轴不排水不排气条件下孔压的演化特性, 我们改进了常规三轴仪(图11(a))。该三轴仪的主要特点是把量测气压的微型传感器装在试样帽上, 从而提高了量测气压的精度, 并实现了试样的小型化。把这台仪器稍加改装(图11(b)), 即可用轴平移技术量测含水量较低的试样的孔隙水压力, 并可做 $\sigma_3 - u_a$ 为常数的试验。此仪器的新部件有:

- ①嵌在底座上的陶土板。其进气值约300kPa。
- ②安装孔隙水压传感器的弯管。其作用是保证安装水压传感器时管道中始终充满水。
- ③试样顶端薄铜板, 厚3mm, 其上有一直径3mm的小孔。此板不会从试样中吸水, 能使试样上端在套橡皮膜时保持形状不变, 并通过其上的小孔把试样内的气压力传给传感器探头。
- ④气压传感器和水压传感器。探头直径都是3mm, 用粘结剂胶接在外直径8mm的空心螺母中。螺母下端预留约2mm长的一段, 用以保护传感器探头。气压传感器的引线从三轴

仪底座原来安装排水管出口的地方引出。

⑤分别与孔隙水压传感器、孔隙气压传感器连接的两台静态应变仪。它们的输出都标定为 $3000\mu\epsilon/100\text{kPa}$ 。

⑥较精密的体变量测装置(示于图11的中部)。孔压演变与试样体变密切相关,为了与传感器量测孔压的精度相适应,采用了陕西机械学院刘保健研制的三轴试验体变精密量测装置。其主要部件是一支装在有机玻璃筒中的注射器,气压进入玻璃筒推动注射器,从而给试样施加液压。注射器的位移用百分表量测,百分表每走一格,所对应的体变是 0.0098cm^3 。

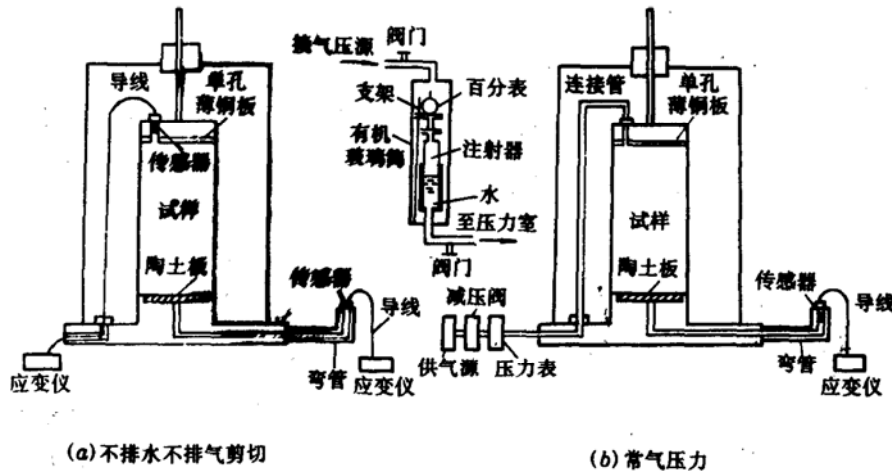


图11 非饱和土三轴试验装置

(2) 气压传感器的标定

两个传感器的额定工作压力都是 100kPa ,可以超载到 300kPa 。多次加载-卸载试验表明,线性度及重复性很好,灵敏度高、零飘甚小。传感器工作性能稳定,外界干扰对其几乎无影响。

在改装仪器时遇到了一个疑难问题:按厂方设计,传感器尾部有一根很细的不锈钢管与大气相通,把大气压力作为传感器工作和探头量测的参考压力。为了实现试样的小型化,气压传感器须装在试样帽上。这样一来,传感器的尾部就浸在压力室的水中,并受 σ_3 作用。传感器是否允许这样工作?能否把不同的 σ_3 作为参考压力?在传感器两头受压的情况下是否还能保持良好的线性性质?这些问题连厂家也感到茫然。为了模拟气压传感器的工作条件,我们把气压传感器装在三轴仪底座上(图12),使其尾部受液压作用,并在压力室外部对探头施加气压 u_a 。在不同的 σ_3 作用下($\sigma_3=0, 50, 100, 150, 200, 250\text{kPa}$),改变气压 u_a ($u_a=0, 50, 100, 150, 200, 250\text{kPa}$),进行加载-卸载试验。多次试验表明: $u_a-\sigma_3$ 之间仍具有良好的线性关系,且输出比率($3000\mu\epsilon/100\text{kPa}$)保持不变;非线性度小于 $1/80$,精度还是很高的。

孔隙水压力传感器的标定方法比较简单,可参考文献[3]

(3) 陶土板性能检验

对陶土板性能的检验包括三项内容:①检查陶土板与底座连接是否密封;②确定陶土板的进气压力值;③确定陶土板传压的滞后时间。前两项工作可同时进行。先把陶土板在压力室用压力水饱和,用吸饵球吸走弯管中的水并接上通气管,把陶土板连同三轴仪底座放入盛无气水的容器中,分级施加压力,观察是否有微气泡出现。最后一级压力是 300kPa ,持续 40min 未发现漏气现象。第三项工作直接在三轴仪上进行:给压力室充满水,施加液压,用水压传感器量测陶土板下面的水压。试验表明,水压传感器达到液压的滞后时间不超过 3min ,

但在卸除液压后弯管中的水压消散则要较长的时间。

5.2 试验方法与步骤

为了保证量测孔隙水压力和孔隙气压力的准确性, 必须注意试验的各个环节。对此, 我们总结了一套可行的试验方法。限于篇幅, 详细情况可参阅文献[3]。

5.3 试验结果的初步分析

图13(a), (b)和图14分别是三组压实黄土的三轴不排水不排气剪切试验结果。由于前两组试样的含水量较低, 其负孔隙水压力超过了可以量测的范围, 在均压过程和剪切过程中未能量测出负孔隙水压力的变化, 因而在图13(a)、(b)中只给出了孔隙气压力的变化曲线。由图13(a)、(b)可见: ①孔隙气压力与试样的体变密切相关, 剪缩时升高, 剪胀时降低; ②含水量较低时孔隙气压力的变化幅度较小。

图14给出了非饱和土三轴不排水不排气剪切试验过程中所有可量测量的变化曲线, 包括偏应力、轴应变 ε_1 、体应变、孔隙水压力和孔隙气压力。全面反映了非饱和土的三轴应力-应变性状。其中图14(a)的下半部是 $\sigma_3=100\text{kPa}$ 的试样的孔隙水压力和孔隙气压力的增量与轴应变的对应关系; 图14(b)、(c)则是 $\sigma_3=150\text{kPa}$ 和 $\sigma_3=200\text{kPa}$ 的试样的孔隙水压力和孔隙气压力的总量与轴应变的对应关系。对含水量较高的土样, 从图14中可以看出: ①孔隙水压力和孔隙气压力的增量和总量都比较大; ②在剪切过程中, 随着试样剪缩变密与饱和度增加, 孔隙水压力和孔隙气压力逐渐靠拢, 并最终向同一数值趋近; ③在试样从非饱和状态向饱和状态过渡的过程中, 孔隙水压力和孔隙气压力出现小幅度的振荡, 反映出土中气相从连通状态向封闭状态转变过程的复杂性。

对 $w=17.2\%$, $\gamma_d=17.0\text{kN/m}^3$ 的土样用图11(b)所示三轴仪做了两次重复试验, 同步施加围压和气压, 最后的数值是: $\sigma_3=205\text{kPa}$, $u_a=200\text{kPa}$ 。24h后应变仪读数稳定, 两次的平均读数是 -17.5kPa 。由此算出试样的初始负孔隙水压力是 217.5kPa , 远远超过了 80kPa 。

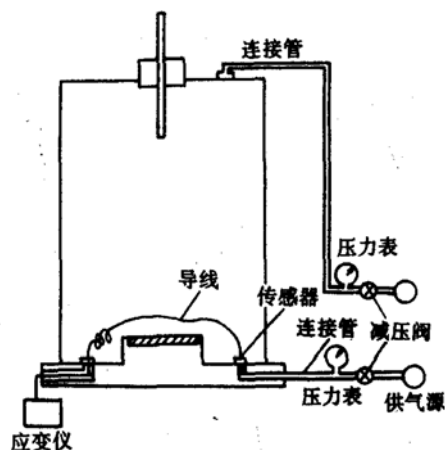


图12 气压传感器标定示意图

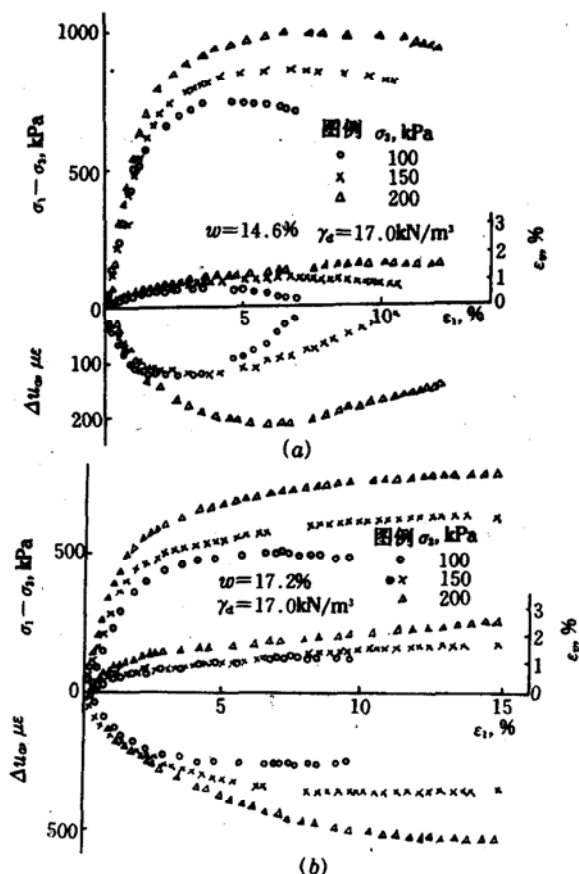


图13 非饱和土三轴不排水不排气剪切试验

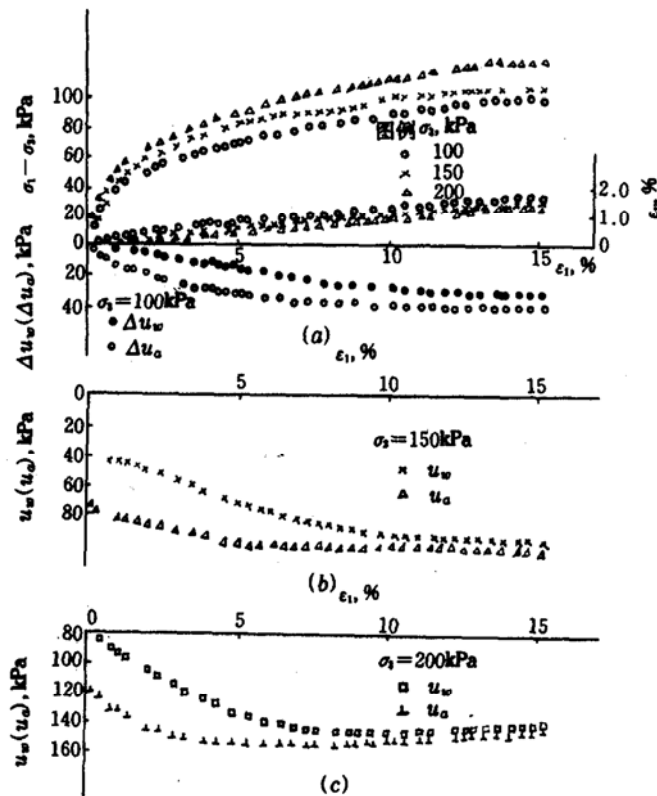


图14 三轴不排水不排气剪切试验曲线

(w=27%, $\gamma_d=15.0\text{kN/m}^3$)

6. 结 论

本文借助于多种改进的仪器设备,在较大的湿度和密度范围内,比较详细地、系统地研究了非饱和土的一系列工程性质及其测试技术,得到的主要结论如下:

(1)在土样的含水量低于最优含水量时,非饱和土中的气体流动可用达西定律描述,且密度是影响非饱和土的渗气性的主要因素,湿度的影响不大。

(2)本文改进了土壤物理学中用 γ 透射法测定非饱和土的扩散度的资料整理方法,从理论上导出了一套适合于土力学中计算非饱和土的水份扩散度和渗水系数的公式。试验结果具有良好的规律性。

(3)用四种方法测定土的吸力,并发现:密度与饱和度对吸力都有重要影响;离心机法对土样扰动大,结果失真,且只能模拟脱湿过程;张力仪法和传感器法既可模拟吸湿过程,也可模拟脱湿过程,还能模拟不存在明显的吸湿或脱湿过程的工程实际;张力仪法操作简便,而传感器法量测精度高,但这两种方法都只能正确量测绝对值小于80kPa、的吸力;轴平移技术是对用传感器法和高进气陶土板测吸力方法的改进,能够测出高于80kPa、但不大于陶土板进气值的吸力。

(4)非饱和土的孔隙水压力和孔隙气压力在三轴不排水不排气剪切过程中呈现规律性的变化:剪缩则升高,剪胀则降低;在土样饱和度较高时,孔隙气压力和孔隙水压力的变化都

比较大,且随着试样在剪切过程中饱和度的增加,二者的差值越来越小。

(5) 本文设计使用的渗气试验装置结构简单、操作方便,测定吸力的方法符合工程实际,测定水份扩散度的设备先进,改进的三轴仪提高了量测孔隙气压力、孔隙水压力和试样体变的精度,并实现了试样的小型化,便于普及。

(6) 本文总结了正反两方面的经验,总结出测试非饱和土的一系列工程性质的一整套切实可行的方法,可供其他研究者参考。

感谢陕西机械学院王文焰、丁朴荣、张建丰、郭耀堂、刘保健、陈存礼同志,西北水利科学研究所李章泌、刑义川同志,南京水利科学研究院李雷同志在试验研究方面给予的帮助。

参 考 文 献

1. 蒋彭年. 非饱和土工程性质简论, 岩土工程学报, 1989, 11(6): 39~59.
2. 包承纲. 非饱和土的应力-应变关系和强度特性. 岩土工程学报, 1986, 8(1): 26~31.
3. 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论——数学模型、试验研究、边值问题博士论文. 陕西机械学院, 1991.
4. 丁朴荣. ZC-5型渗气仪的研究与渗气测试方法的研究. 陕西机械学院学报, 1986, (4): 37~52.
5. 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988. 242.
6. 王文焰, 张建丰. 在一个水平土柱上同时测定非饱和土壤水各运动参数的试验研究. 水利学报, 1990, (7): 26~30.

Experimental Studies of Laws of Fluid Motion, Suction and Pore Pressures in Unsaturated Soil

Chen Zheng-han

(The PLA Logistic Institute of Engng. & Tech., Chongqing)

Xie Ding-yi

Wang Yong-sheng

(Shaanxi Institute of Mechanical Engineering, Xi'an) (The Northwest Hydraulic Power Institute, Xi'an)

Abstract

Air and water permeabilities, suction, evolution properties of pore water pressure and pore air pressure in unsaturated compacted soil are studied over wide ranges of soil moisture and soil density by various improved instruments, i.e., a special triaxial apparatus developed by the authors, a set of facility of air permeability and a set of equipment of water infiltration characterized by measuring water content with gamma rays. Relationship among suction, degree of saturation and density of the soil is established by several methods. Series of realistic methods for testing the engineering properties of unsaturated soils are summarized.