

一种新型非饱和土 γ 射线土工三轴仪

A new type of triaxial apparatus with γ rays for unsaturated soils test

刘奉银^{1,2}, 谢定义², 俞茂宏¹

(1. 西安交通大学 土木系, 陕西 西安 710049; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 分析了传统非饱和土三轴仪的特点及其存在问题, 提出了非饱和土三轴仪的研制目标, 研制出一种新型的与 γ 射线双源双能法同时测定土样密度和含水率技术相结合的非饱和土三轴仪。介绍了此仪器与一般非饱和土三轴仪的改进及功能实现, 并用试验验证了该仪器的适用性。

关键词: γ 射线; 非饱和土; 干密度; 含水率; 仪器; 三轴仪

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)05-0548-04

作者简介: 刘奉银(1968-), 男, 山东滕州人, 西安交通大学力学博士后流动站博士后, 主要从事岩土工程的教学和非饱和土力学、黄土力学特性及材料强度特性等的研究工作。

LIU Feng-yin^{1,2}, XIE Ding-yi², YU Mao-hong¹

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the analysis of characteristics and problems of the traditional triaxial apparatus, the aim for developing the apparatus is proposed. Further, a new apparatus is developed for unsaturated soil test with coincident measurements of dry density and water content of the specimen using γ -ray measuring system. The improvements and the corresponding implement are introduced. Then, some specific tests are carried out to demonstrate the applicability of the apparatus.

Key words: γ rays; unsaturated soil; dry density; water content; instrument; triaxial apparatus

0 前言*

非饱和土的复杂性及测试等工作的难度, 使得对非饱和土本质特性的揭示相对于理论发展严重滞后, 无法满足实际工程的需要。笔者从实验揭示作为非饱和土力学两大问题之一的固相骨架的变形(强度)问题的实际需要出发, 研制了非饱和土 γ 射线三轴仪。

当今非饱和土变形特性的测试设备种类繁多^[1-7], 具有代表性的为 Bishop(1960)的非饱和土三轴仪^[1], 它的根本特点是在普通土工三轴仪的试样的底部设置高进气压力的陶土板以控制或测定孔隙水压力, 在试样顶部设置金属网布以控制或测定孔隙气压力, 以适应非饱和土三相特性控制和测定吸力的测试要求, 但它仍然存在以下问题。

(1) 在吸力量测上, 现在的非饱和土吸力量测都是通过试样顶部和底部测定或控制孔隙气压力和孔隙水压力得到的吸力作为整个试样的吸力。但非饱和土在荷载条件下, 试样上不同部位的密度和含水率未必相同, 因此吸力也未必相等。也就是说, 将试样内的密度、含水率和吸力各当成均匀大小的值是很不合理的。美国垦务局及 Bishop 等也曾试图测量非饱和土试样中部的吸力^[1,2], 但因为传感器在试样内部极易损坏, 所以测试结果很少, 而且也很难考虑因为吸力传感器的

埋入而带来的试样不均匀性及对试样的影响问题。

(2) 在适用土类上, 黄土和膨胀土是非饱和土的典型土类, 都需要研究其在三轴应力和三轴浸水条件下的性状, 因为荷载的作用改变了作为影响吸力主要因素的密度, 密度的变化又引起另一个主要因素——饱和度的逐渐变化; 或者, 在荷载不变而有水浸湿的条件下, 土湿度的改变也使土的密度和吸力逐渐变化。现有的非饱和土三轴仪不能作出相应的研究。

(3) 现有三轴仪所测的吸力只能是稳定状态对应的量, 不能测得在荷载或浸水(是一种广义的荷载)单独或联合作用下非饱和土中湿度、密度以及对应吸力的连续变化过程, 而这种测定又为揭示非饱和土力学特性规律所必需。

1 非饱和土 γ 射线三轴仪研制的目标与基本思路

从非饱和土力学特性研究的需要出发, 新仪器研制应满足如下具体要求: ①能够在三轴应力条件下工作; ②能够同步地测定一定应力条件下试样沿高度各点上的湿度、密度和应变(轴向应变、侧向应变和体

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10172070); 陕西省自然科学基金资助项目(2001C52)

到稿日期: 2002-11-10

变);③能够在浸水条件下测定入渗过程中试样沿高度各点上的湿度、密度和应变(轴向应变、侧向应变和体变);④能够在荷载与浸水共同作用条件下测定试样沿高度各点上的湿度、密度和应变(轴向应变、侧向应变和体变);⑤能够测定在上述各条件下试样沿高度各点的孔隙水压力和孔隙气压力。

为达到上述仪器研制的目标,笔者提出将土工三轴仪和双源双能 γ 射线透射技术相结合,形成 γ 射线三轴仪的思路。这样就必须面对一系列新的问题和难题:如放射源的合理选取与屏蔽, γ 射线能谱仪的对比选用,放射性测试仪器的工作条件及其相对稳定性,计数时间的选取,测量公式的选取,净计数的取值,质量吸收系数的标定,以及一系列配套设备机构的改装等,尤其是双源双能条件下 γ 射线测量精度的问题,是一个影响因素很多的棘手问题,笔者另文讨论。下面拟从土工三轴仪系统的改进方面予以讨论。

2 土工三轴仪的改进

为了结合利用通常的土工三轴仪与 γ 射线技术,对土工三轴仪必须作如下改进,包括体变量测系统、增湿浸水系统、应力控制系统、射线扫描系统及吸力量测系统5个方面。

2.1 体变量测系统

从 γ 射线穿透土壤的衰减规律来看,其衰减与穿透土样的厚度有关,因此 γ 射线法需要考虑试样直径的变化。现有量测侧向变形的设备都不便于在有 γ 射线的三轴仪条件下进行多点连续量测,并捕捉到试样变形后的真实形态^[3,4]。为此研制开发了测定三轴试样侧向变形的设备,如图1所示。试样周围设一由有机玻璃做成的水位升降筒(筒与试样间的空间应当尽量减小,使筒径大于试样侧向变形后的试样直径5 mm,以提高量测精度),筒内壁上贴有一条与线路共用的铜片,铜片附近沿高度方向每2 cm设一个触点,并与控制箱形成回路。当在加荷及某时刻需要测定试样的侧向、体积应变时,即可打开控制箱电源。活塞向上运动时,系统会自动向玻璃筒内充水,水面在接触到最上面的一个触点时,即自动停止,此时读取数字游标尺的读数,几秒钟后电动机启动抽水,筒内水面开始下降,水面自上而下与某个触点断开的瞬间,电动机均会自动停止一段时间,游标尺显示对应的读数。每相邻两个读数之差即反映该两个对应触点间水的体积(筒的面积相等),此体积与初始时该段内水体积的差值,即为该段体积变形量,进而可求出该小段的平均径向变形量。为了使较小的体积变化都能测定出较大的数字游标卡尺读数(活塞的位移),以提高测量的精度,设计的活塞直径应尽可能

小。笔者在采用硬橡胶试样和在试样直径不发生变化的条件下,让体变控制系统自动进行充水及抽水,并记录在每个点位停顿时对应的数字游标卡尺的读数时,工作3 h内多次记录结果的对比可以看出,多次往复循环全过程游标卡尺读数相差在0.01 mm,相当于体变误差0.02 mL,说明该系统有满足要求的准确度和稳定性。其结构原理类似殷建华教授的双室三轴仪^[7]。

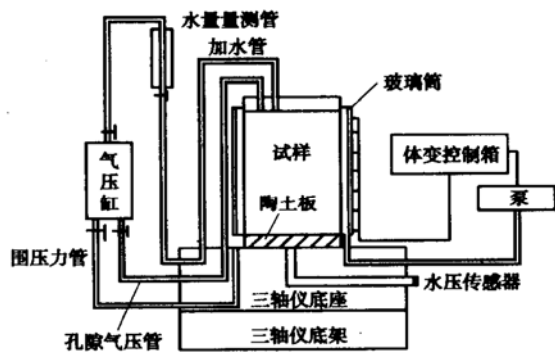


图1 体变及浸水系统

Fig. 1 Systems for water infiltration and volume change measurement

应该指出,试样直径的变化虽然不大,但用它和 γ 射线测定结果计算得到的干密度和含水率结果却会相差很大。如图2所示,实测试样直径采用图3所测的结果。因此准确测量试样沿高度上各点的直径,对双源双能法测量的干密度和含水率的准确性至关重要。

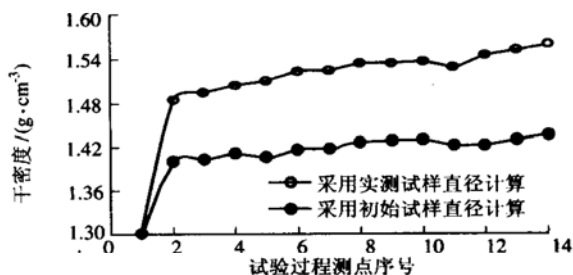


图2 考虑与不考虑试样直径变化所测得的干密度

Fig. 2 Measured dry density of the specimen with or without consideration of the change of diameter

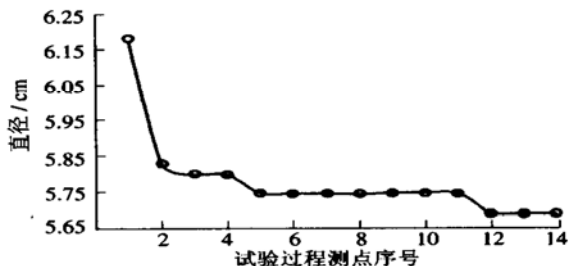


图3 实测试样直径

Fig. 3 Measured diameter of specimen

2.2 增湿浸水系统

为了研究三轴条件下非饱和土浸水后的力学行为,在原土工三轴仪的基础上增加了增湿浸水系统,见图1。浸水系统应该满足如下要求:①可以在三轴应力条件下工作;②加水的时间和水量可控;③浸水的压

力可控,浸水流速应不致破坏试样的内部和表面。

浸水系统要求①是一个基本要求。当采用轴平移技术,或欲测试非饱和土在不排水不排气情况下的力学性状时,由于孔隙气压力的存在,直接用一个刻度精细的导管与水箱连通给试样加水,根本加不进去或出现倒流。为解决这一问题,必须给加水系统施加一定的压力。本文使用的仪器是用气压法提供压力的,当调节减压阀加压时,由于气压的滞后,难以恰好加至适当的气压力,可能因为实际加至试样的气压力过大而造成水流破坏试样。为此,笔者将孔隙气压力同时加到浸水量测管中,图4为水量量测管结构图。这样可以保证水量量测管中的水压力与试样加水管出口处的压力一致,都等于孔隙气压力,水即不会外流。为了造成稳定、可控并且容易控制的压力差,可以采用提高水量量测管高度的办法。为防止在压力加至加水系统时的体积膨胀造成加水量读数的误差,采用了在水量量测管外筒加气压,使得水量量测管的内外压力平衡,并将加水管路采用硬纤维管等,保证了刻度的准确性。

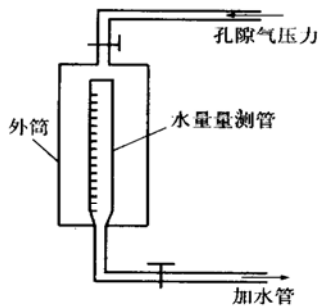


图4 水量量测管结构图

Fig. 4 Water volume measuring tube

2.3 应力控制系统

通常的应变控制式三轴系统不能满足研究应力条件下浸水及偏压固结等的要求,故改为应力控制。应力控制系统是在原三轴仪的横梁上加装了一个气密性活塞,代替了原有的量力环。笔者设计制作了固定支架,不仅可以为活塞提供反力,而且高度可调,保证了活塞杆与三轴仪压力室上的加压轴紧密接触,并保证了活塞杆足够的长度,满足试样变形后二者紧密接触,使压力始终可以传递至试样上去。活塞中的气压由一个连接气压源和减压阀的供压系统提供,同时,它的调整不影响仪器系统其他部分的压力及正常工作。

2.4 射线逐层扫描系统

为测量试样在加压和浸水情况下内部沿试样高度各点上的干密度和含水率,增加了 γ 射线扫描测量系统。

(1) 机械部分

γ 射线测量系统的准直要求较高,一旦放射源、准直器与探头屏蔽圆孔三者一线的关系受到破坏,会使计数率大幅下降,记录的计数中散射的比例会增高,影

响测量的精度。因为放射源的防护铅和防护体的质量相当大,所以移动台应满足这一强度要求,又要有足够的刚度,既不产生太大的挠度,又能自由地上下移动,准确定位。因此逐层扫描的机械系统应保证足够的刚度和较小的振动,以防止影响试样及 γ 射线测量系统的准直。在满足足够的刚度和强度及较小的振动条件下,建立了如图5所示的机械运动系统。放射源与探头在同一个平台上,不会产生相对移动。

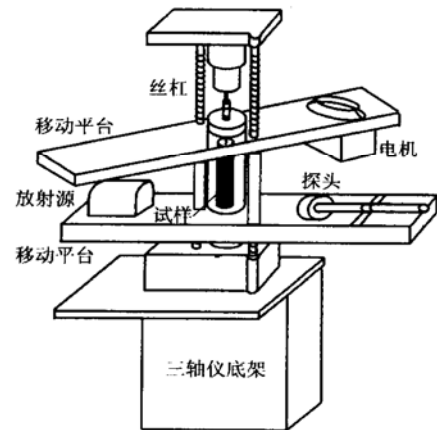


图5 γ 射线逐层扫描系统机械部分示意图

Fig. 5 Mechanical system for γ rays scanning

(2) 机电控制系统

为使放射源与探头能准确地在试样两侧以相同的速率升降,并按规定的点位停止,以便测定 γ 射线的强度,应研制机电控制系统。下列问题必须正确解决:

①移动台的控制、定位及其准确性问题,为了减少对人体损伤,在试验过程中需要远离放射源,因此移动台的动作必须实行远距离控制,远距离控制放射源移动台,需要解决放射源移动台的移动方向、定位及其准确性问题;②移动速度问题,放射源平台移动过程中应尽可能平稳,所以放射源移动平台的移动速度应满足其振动不影响试样,不影响仪器其他部分的正常工作。

自动控制箱可以控制放射源平台的运动及其运动方向,当移动2 cm时,控制箱自动使放射源平台停止,并在控制箱上显示出目前停止的点号,该点号对应于放射源正在照射的点的位置。

2.5 吸力量测系统

笔者研制的三轴仪可以测定试样底部的孔隙水压力,在试样顶部控制或测量孔隙气压力。试样的底座如图6。因在负孔隙水压力量测过程中,应确保陶土板管路内与传感器探头之间水体连续,故吸力量测系统改装时的重要内容就是解决管路的密封及管路中残留气泡的排出问题。一般封闭情况下,除了毛细管外,气体总位于水气交界面的上方,因此陶土板底面处的气泡很难排尽,多次测量都难以达到预想效果。原因是试样底座上的竖孔处一旦有水,水总是往下流,困陷

的气泡难以排尽。为此利用三根不锈钢针管,将针管插至陶土板底面,并将针管与底座下的孔黏合、密封。将陶土板用无气水饱和后^[1,5],从底座底部一根针管处往里缓慢加水,当水面逐渐升高,至与陶土板底面接触的针管口时开始溢出,然后多次用力注水,清除周围困陷的气泡。此时即将陶土板翻转,也不会引起内部水体漏失。完成上述工作后,通过饱水管路将试样底座与孔隙水压力量测传感器连结。

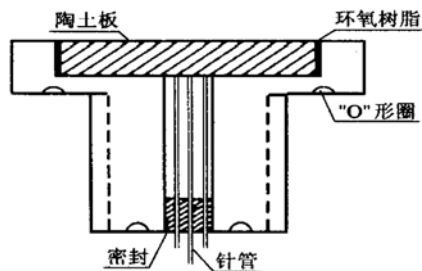


图6 试样底座
Fig. 6 The bottom plate for the specimen

3 新仪器的主要功能与实现

(1) 向试样控制施加不同的三轴应力状态(均压 $\sigma_1 = \sigma_3$, 偏压 $\sigma_1 \neq \sigma_3$)。可以通过向试样施加围压力,或控制施加孔隙气压力,来实现向试样施加均压的目的。如果需要施加偏压,则可以通过给轴向加压活塞加气压,实现施加 $\sigma_1 - \sigma_3$ 的目的。

(2) 向试样自上而下实现控制不同量的浸水。从仪器总装示意图7可以看出,可以通过浸水系统,从试样帽上的进水管向试样加一定量的水。

(3) 测量试样在受荷或浸水过程中轴向应变、侧向应变和体积应变的数值。通过加压活塞上的百分表,可以测量任何时刻试样的轴向变形。使用体变测量系统可以测量任何时刻试样的体积应变和侧向应变。

(4) 测量试样在起始状态及受荷和浸水过程中,沿高度上各点的干密度和含水率的变化。 γ 射线扫描机械系统与 γ 射线测量系统可以随时按控制台指令定位在试样高度上某一点处,测量该点衰减后的 γ 射线的强度,计算干密度和含水率及其变化。

(5) 控制试样的孔隙气压力,实测在受荷过程中试样底部的孔隙水压力。通过孔隙气压力施加管路,可以向试样顶部施加可控的任意气压力,并可随时调整大小。通过安装在试样底座上的高进气陶土板和饱水管路以及与其相连的孔压传感器,可以测定试样底部的孔隙水压力。

(6) 根据加荷和浸水情况下试样底部实测得到的孔隙水压力与相应的干密度和含水率的基本关系,利用试样上其他点测得的干密度和含水率,推求各对应

情况下的孔隙水压力。由于同一个初始均匀的试样,其土类、结构以及受荷条件在各点上没有区别,因此这样由该过程中底部的孔隙水压力与底部密度与含水率的变化过程,按其他各点密度及含水率查得的孔隙水压力或算得的吸力将更符合实际。

根据试样各点受荷与浸水条件下各类变形的变化,各层土干密度和含水率的变化,以及对应吸力的变化,综合分析研究非饱和土的变形强度特性。

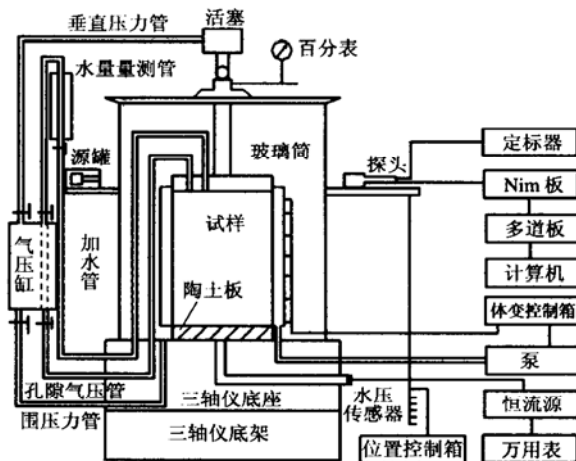


图7 仪器总装示意图
Fig. 7 Layout of the apparatus

4 结 语

新研制的非饱和土三轴仪克服了传统非饱和土三轴仪的缺点,可以用于非饱和土应力和变形的连续、准确测量;可研究非饱和土在荷载作用、水的作用以及二者的耦合作用条件下的力学性状,可追踪水在荷载作用下的传递规律;可以将试样分段测量其体变和侧向变形,从而可以更细致地描述变形后的试样形态。

参考文献:

- [1] Bishop A W, et al. 决定非饱和黏性土强度的因素[A]. 黏性土抗剪强度译文集[M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [2] 吉勃斯 H J. 黏性土的抗剪强度[A]. 黏性土抗剪强度译文集[M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [3] Rywayih E L, Design A A. Manufacture and performance of a lateral strain device[J]. Geotechnique, 1976, 26(1): 215- 216.
- [4] Kolymbas D, Wei Wu. A device for lateral strain measurement in triaxial tests with unsaturated specimen[J], Geotechnical Testing Journal, ASTM, 1989, 12(3): 227- 229.
- [5] 陈正汉. 非饱和土固结的混和物理论——数学模型、试验研究、边值问题[D]. 西安: 陕西机械学院, 1991.
- [6] 陈正汉, 卢再华, 蒲毅彬. 非饱和土三轴仪的CT机配套及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 387- 392.
- [7] 殷建华. 新双室三轴仪用于非饱和土体积变化的连续测量和三轴压缩试验[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 552- 555.