

文章编号:1001-1986(2004)03-0043-03

结构性黄土吸力的试验研究

胡再强¹, 沈珠江², 谢定义¹ (1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048;
2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要:利用轴平移法量测吸力技术,进行了等吸力三轴剪切试验,研究人工制备结构性黄土吸力与周围压力的关系;利用土吸力量测仪进行了原状结构性黄土吸力的量测,研究了结构性黄土吸力随含水量及饱和度的变化关系,随着三轴剪切试验的周围压力的增大,吸力逐渐减小;原状结构性黄土的含水量(饱和度)对吸力有显著的影响,随着土的含水量的增加吸力减小。

关键词:轴平移法;吸力量测仪;结构性黄土;吸力;含水量

中图分类号:TU411.91 文献标识码:A

1 引言

吸力量测是非饱和介质研究中的一个重要课题,而非饱和土测试技术上的困难是造成非饱和土力学发展迟缓的重要原因。非饱和土中的孔压包括孔隙水压力和孔隙气压力,它们同时发生和变化在同一个统一体中,要避免彼此之间的干扰,在技术上是比较复杂和困难的。许多文献^[1~3]指出,吸力与孔隙的几何形状、土的含粘量、密度及饱和度等很多因素有关,而且还受土湿润历史的影响。在土的吸湿过程(土由干到湿逐渐饱和)和脱湿过程(土由饱和逐渐排水变干)中,同一饱和度或含水量并不对应于同一吸力,反映出所谓“瓶颈效应”和接触角滞后效应。目前吸力测试方法也是非饱和土研究的一个问题。西安理工大学谢定义、陈正汉^[4]等在研究比照了张力计法、轴平移法、压力板吸力仪等方法后指出:张力计法能准确地量测出小于0.08 MPa的吸力;轴平移法对土体结构没有破坏,并且能准确量测各种情况下的吸力;压力板法对土体结构没有破坏,一般最大能量测出1.5 MPa的吸力,性能一般稳定可靠。据上述分析,本文在三轴仪上采用轴平移法测定

吸力值,利用土吸力量测仪量测原状黄土的吸力。

2 试验方法与步骤

2.1 试验方法

对于轴平移法测试三轴试样吸力的方法,笔者利用改装的三轴压力室进行试验。用一块进气值为500 kPa的高进气值陶土板胶封在直径40 mm的试样底座上,通过细管与孔隙水压力传感器相连,用来量测试样的孔隙水压力。在试样帽上镶嵌一块带细孔的有机玻璃片用来导气,用细管与三轴室外的气压传感器和调压阀连接,用来控制和量测作用在试样上的气压。试验前必须保证陶土板及量测空隙水压力的系统完全处于饱和状态。要达到上述要求,必须做到卸下带陶土板的试样底座,置入饱和器中抽真空并且饱和;用无空气水在一定的压力下通过孔隙水压力量测系统的管路排出气泡。对于吸力较大的试样,试样安装在底座后会通过陶土板吸水,量测系统中的水压力会急速下降,稍长时间就有可能使水压力下降致使管路中的水发生气化。因此一旦试样被放置在试样底座,就必须尽快地完成试验所需的各项步骤,并对三轴压力室和试样同时施加气压力,以提高试样土体内的孔隙水压力。

收稿日期:2003-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(19772019)和陕西高校省级重点实验室重点科研计划项目资助

作者简介:胡再强(1964—),男,陕西周至人,西安理工大学博士,副教授,主要从事黄土力学与工程的研究。

Application of method of additive mass to density measurement of rock-fill object in Shuibuya water control project

SONG Xian-hai¹, XIAO Bo-xun¹, GU Han-ming², ZHANG Xue-qiang², DENG Shi-kun², XU Shun-fang²

(1. Institute of Changjiang Engineering Geophysical Prospecting, Wuhan 430010, China;

2. Department of Applied Geophysics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Following an introduction on the testing principle, instrument and equipment, and field signal acquisition process for method of additive mass, this paper deals briefly with its availability on the density measurement of rock-fill object in the Shuibuya Dam One Issue Project. The testing results indicate that this method not only has rapid, portable and precision high but also suitable for density measurement of rock-fill object made up of different grains. It is proved that method of additive mass is obviously effective and hence shows fairly good application prospects in the density measurement of rock-fill object.

Key words: method of additive mass; panel rock-fill dam of concrete; density; Shuibuya water control project

原状黄土的吸力量测所用的传感器，其内部装有微型加热器和温感元件的多孔陶瓷探头。多孔陶瓷探头的热传导随陶瓷探头的含水量的变化而变化。多孔陶瓷探头的含水量取决于周围土体施加给探头的基质吸力的大小。因此，可以预先率定多孔陶瓷探头的热传导与施加的基质吸力的关系。这样，率定过的传感器便可以用来量测基质吸力。将传感器埋置于土体中，使其与土体中空隙水的应力状态（即：土体中的基质吸力）达到平衡。根据达到平衡时测得的热传导便可知道土体中的基质吸力。

吸力传感器的标定是吸力量测技术中十分重要的一个环节，目前较可靠的方法是利用压力板仪进行标定。先将配制好的超饱和土样放入压力罐内的压力板上，再将充分饱和的传感器（经无气水浸泡 2 d 以上）埋入作为介质的土样中，并将导线引出罐外。然后，向密封的压力罐内逐级施加压力，测读传感器在每级压力下达到稳定时的电压读数。这样，就可得到吸力与输出电压的关系曲线，即有了标定曲线，由标定曲线便可根据试验读数查出吸力值。

2.2 试验步骤

2.2.1 用轴平移法测试三轴试样吸力的步骤

a. 等吸力三轴剪切试验所用的人工制备结构性黄土试样，其周围压力根据西安黄土的基本性质和吸力大小，分别确定为 $\sigma_3 = 50, 100, 200, 300 \text{ kPa}$ ；

b. 试样安装在三轴压力室之后，孔隙水压力传感器的读数变为负值。这时尽快对三轴压力室和试样同时施加气压力，并且要使周围气压力略大于施加于试样上的气压（5~10 kPa），直到孔隙水压力传感器的读数指示为零。事实上，要使施加的气压力恰等于土的初始吸力是难以做到的，只要所加气压能使量测的孔隙水压力大于零或负压不超过 70 kPa 就行（但应注意施加的气压力不得超过陶土板的进气值）。在等到孔隙水压力传感器的读数基本稳定后。土样的吸力等于 $u_a - u_w$ ，（ u_a 为孔隙气压力； u_w 为孔隙水压力传感器量测到的孔隙水压力），并使其稳定。

c. 在等吸力条件下 ($u_a - u_w = \text{const}$) 进行剪切，轴向荷载通过砝码分级施加，当加一级荷载时，在孔隙水压力发生变化时，通过控制试样内部气压的调压阀相应调整作用于试样内部的气压，始终保持作用在试样上的吸力 ($u_a - u_w$) 为常数，并等于初始的吸力值。最后，直到试样剪切破坏。

2.2.2 原状黄土的吸力量测步骤

a. 将原状黄土先制成高度是 10 cm，直径 10

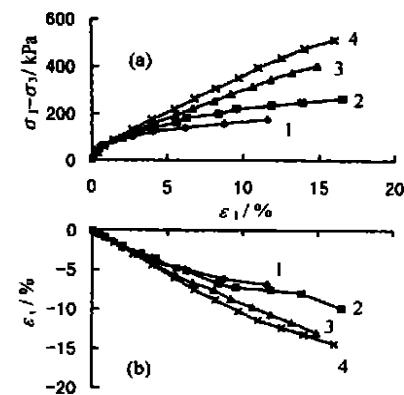


图 1 人工制备结构性黄土等吸力三轴试验关系

1— $\sigma_3 = 50 \text{ kPa} (S_u = 150 \text{ kPa})$ ；2— $\sigma_3 = 100 \text{ kPa} (S_u = 132 \text{ kPa})$ ；
3— $\sigma_3 = 200 \text{ kPa} (S_u = 110 \text{ kPa})$ ；4— $\sigma_3 = 300 \text{ kPa} (S_u = 100 \text{ kPa})$ ；

cm 的圆柱形试样。用直径略小于土吸力量测仪传感器探头直径的钻头在试样中心打孔，孔深为 3 cm 左右；将土吸力量测仪传感器的探头预先埋入和吸力量测试样同等含水量的土试样中，历时 3~5 d，使探头湿度和试样土体的湿度接近。

b. 然后把传感器探头插入预先钻成的孔中，在传感器探头上部的空余地方用和试样含水量相同的土样填实。再把试样装入塑料袋中，扎紧口，再放入饱湿器中。根据研究，土吸力量测仪的读数在静置 3~5 d 内就可稳定了，读数稳定后，可进行吸力量测。得到初始含水量条件下试样的吸力值。

c. 测定试样的初始吸力后，按照预先计算好的含水量，分级给试样加水，改变试样的含水量。加水的方法是水膜转移法，用滴定管把所需的水量均匀地滴在试样上。然后，再装入塑料袋密封，放入饱湿器中，静置 5 d 左右，试样内的水份就可均匀，同时土吸力量测仪的读数也可稳定了。这时，可进行这一级含水量条件下的吸力量测。

d. 如此可分级测量试样在不同含水量条件下的吸力。一直到试样加水饱和，土样的吸力值为零。就可结束试验。

e. 试样在吸力量测中控制含水量为 10.83%、13.11%、17.4%、21.7%、25.99%、30.29%、31.72%、40.8%，干容重是天然干容重，为 1.29 g/cm^3 。

3 试验结果与分析

3.1 等吸力剪切试验的结果

当等吸力剪切试验的周围固结压力分别取为 $\sigma_3 = 50, 100, 200, 300 \text{ kPa}$ 时，测得作用在试样上的吸力值 S_u 分别为 150 132 110 100 kPa。图 1a 和图 1b 表示了人工制备结构性黄土等吸力条件下的偏应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 及体应变 ϵ_2 与轴向应变 ϵ_1 之间的关系，

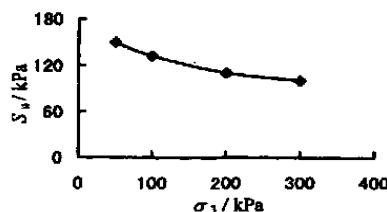


图2 人工制备结构性黄土等吸力三轴剪切
试验吸力与固结压力的关系曲线

在等吸力条件下的偏应力与轴向应变的关系随着固结压力的增大而增大,体积应变同样随着固结压力的增大而增大,和常规三轴剪切试验的规律相近似,但等吸力三轴剪切试验的抗剪强度指标要比常规三轴剪切试验的结果有所增大(ϕ 值由 38° 增大到 43° , c 值没有发生改变)。并且,随着固结压力的增大,作用在试样上的吸力逐渐减小,作用在试样上的吸力由初始固结压力 50 kPa 所对应的吸力 150 kPa 下降到固结压 300 kPa 所对应的吸力 100 kPa 。说明在等吸力三轴剪切条件下,作用在试样上的吸力随着周围固结压力的增大而减小(图2)。

3.2 土吸力仪测试结果

本次原状黄土的吸力量测试共进行了3次平行试验,试验结果是3次试验的平均结果值。吸力与土的湿度的关系在非饱和土的研究中称为土—水特征曲线,试验结果绘成吸力—含水量曲线。可以看出,原状结构性黄土的含水量(饱和度)对吸力都有显著的影响。测试结果见表1和图3所示。

由结构性黄土的吸力—含水量关系曲线得到其归一化方程式是:

$$S_u = a \left(\frac{1 - S_r}{1 - b} \right)^n$$

式中 $a=160\text{ kPa}$; $b=0.1083$; $n=8.5$; S_r 为饱和度。

由等吸力三轴剪切试验的吸力与三轴固结压力的关系曲线可以发现,吸力随着围压的增大逐渐减小,曲线比较平缓,说明土体的应力状态对土体中的吸力有影响;而原状黄土的吸力与饱和度(含水量)的曲线所反映的特点为上陡下缓,说明土体含水量越低时,较小的含水量的增大,可引起土体中较大的吸力降低,土体的含水量越大时,含水量的较大增

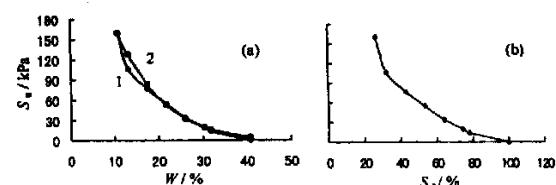


图3 原状黄土吸力与含水性关系曲线

1,2——同图1
a——吸力与含水量的关系;b——吸力与饱和度的关系

表1 原状结构性黄土吸力与其湿度

含水量/%	饱和度/%	吸力/kPa
10.83	26.7	160.0
13.11	32.30	106.0
17.4	42.87	77.0
21.7	53.46	55.0
25.99	64.3	34.0
30.29	74.46	20.0
31.72	78.15	14.0
40.8	100	0.0

加,引起土体中较小的吸力变化,即土体中含水量小,吸力对湿度的变化反应敏感,而土体中的含水量大时,吸力对湿度的变化反映不敏感。

4 结论

a. 通过轴平移法在三轴剪切仪进行等吸力剪切试验是可行的,可控制在试样剪切过程中,保持恒定不变,并且随着三轴剪切试验的周围压力的增大,吸力是逐渐地减小。

b. 由土吸力仪测定非饱和黄土中的吸力是可行的,这为室内试验和现场量测非饱和土中的吸力提供了快速、准确、可靠的方法,同时通过试验可以得知原状结构性黄土的含水量(饱和度)对吸力有显著的影响,随着土的含水量的增加吸力在减小。

参考文献

- [1] 卢肇钧等. 非饱和土的抗剪强度与膨胀压力[A]. 中国土木工程学会土力学及基础工程学会. 非饱和土理论与实践学术研讨会文集[C]. 1992. 72—79.
- [2] 陈愈炯. 非饱和土孔隙水压力和气压力的量测[A]. 中国土木工程学会土力学及基础工程学会. 非饱和土理论与实践学术研讨会文集[C]. 1992. 72—79.
- [3] 吴肖茗,刘国楠. 土的吸力量测技术[A]. 中国土木工程学会土力学及基础工程学会. 非饱和土理论与实践学术研讨会文集[C]. 1992. 80—89.
- [4] 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论[D]. 西安:陕西机械学院, 1991.

The test study on suction of structural loess

HU Zai-qiang¹, SHEN Zhu-jiang², XIE Ding-yi¹ (1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)
Abstract: The triaxial shear test in a constant suction is conducted using whole translation method. The relation between mad-made structural loess suction and confining pressure is studied. The undisturbed loess suction is measured using a soil suction measuring apparatus. The structural loess suction is studied when the moisture content and saturation degree change. The test shows the suction decreases gradually when the confining pressure of the triaxial shear increases and, the moisture content of undisturbed loess apparently influences the suction, the suction is decreased along with the increasing of loess moisture content.
Key words: whole translation method, soil suction measuring apparatus, structural loess, suction, moisture content