

# 非饱和原状黄土湿陷变形及孔隙压力特性\*

郭敏霞 张少宏 邢义川

(西北农林科技大学水利所 杨凌 712100)

**摘要** 通过用改装的应力-应变控制式三轴仪, 对等应力比条件下的非饱和原状黄土进行了“分级浸水”, 同时测试了试样在初始、加压固结和浸水湿陷几个状态下孔隙气压力和孔隙水压力的变化过程。初步分析了非饱和原状黄土湿陷变形特性以及湿陷过程中的孔隙水压力、孔隙气压力以及基质吸力的演化规律。

**关键词** 原状黄土, 湿陷, 基质吸力

**分类号** TU 444

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2000)06-0785-04

## 1 前言

多年来, 人们对黄土的湿陷机理从微观到宏观进行了大量的探索, 但无不受到量测技术的制约。近几年随着电测技术不断完善, 对干旱和半干旱地区非饱和黄土各项应力状态变量的量测逐渐变成可能。本文对非饱和原状黄土的湿陷特性以及湿陷过程中其孔隙水压力和孔隙气压力的变化进行了分析探讨。

## 2 仪器设备及性能简介

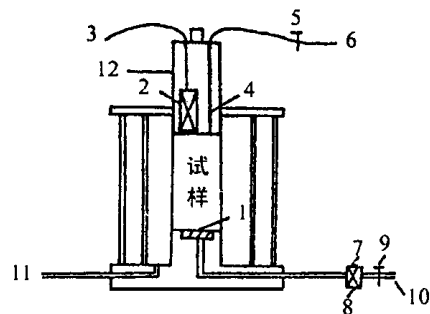
试验仪器主要由三轴仪压力室、孔压传感器、镶嵌于底座上的陶土板和进水系统组成, 见图1。

压力室为双层, 其主要特点是压力室活塞与试样面积相等, 由于活塞与压力室之间采用橡皮膜止水, 从而使活塞无摩擦力存在, 使得外体变和轴向位移的量测均较为可靠, 且有利于安装气压传感器, 使试验中测定土样孔隙气压力方便可靠。

陶土板镶嵌在压力室底座上, 进气值大于250 kPa。仪器调试中对陶土板的进气值和陶土板嵌入三轴压力室底座是否粘结良好均进行了检验。同时另配一压力室和加压系统, 在每一组试验进行之前用它来对底座上的陶土板进行反压饱和, 以排除陶土板内及孔隙水压力测试系统的气泡。

水压传感器和气压传感器的量程为0~600 kPa, 试验前对传感器的零漂、温漂和精度、线性以及重复性进行检验。试验中量测气压的传感器装在试样帽

内, 见图1, 以提高量测气压的精度。



1. 陶土板 2. 气压传感器 3, 10. 压力显示器  
4. 进水口 5, 9. 开关 6. 进水装置 7. 密封螺丝  
8. 水压传感器 11. 体变量测量装置 12. 试样帽

图1 仪器剖面图

Fig. 1 Diagram of instrument cutaway

## 3 试验方法、成果及分析

土样为渭北张桥地面下约6m左右深处的原状黄土, 土性指标见表1。试样由原状土样削制而成, 高8cm, 直径3.91cm, 采用水膜转移法制成所需含水量的试样。

试验方法类似于黄土压缩试验单线法, 称为分级浸水法。该法是先把试样按应力比 $K = \sigma_3 / \sigma_1 = 0.5$ 加载到一定的偏应力, 待变形稳定, 维持应力状态不变, 然后分级浸水使试样含水率分别达到15.0%, 17.5%, 20.0%, 22.5%, 25.0%, 27.5%等, 在其各个阶段均测其孔隙水压力和孔隙气压力,

2000年7月6日收到初稿, 2000年7月21日收到修改稿。

\* 西北水利科学研究所基金项目(S0003)。

作者 郭敏霞 简介: 女, 36岁, 1986年毕业于西安理工大学农田水利工程专业, 现任高级工程师, 主要从事岩土工程力学方面的科研工作。

表 1 渭北张桥原状黄土的物理指标

Table 1 Physical parameters of unsaturated intact loess							
比重	天然		颗粒组成/%			液限 /%	塑限 /%
	含水率	干密度	2~	0.05~	< 0.005mm		
	/%	/g · cm <sup>-3</sup>	0.05mm	0.005mm			
2.70	11.1	1.29	11.1	72.1	16.8	27.6	16.8

每级浸水需待变形及孔压稳定后再浸下一级。浸水过程中，使进水速度尽可能小，以避免出现局部破坏情况，并要求稳定时间足够的长。稳定标准按位移量表读数 60min 不超过 0.005mm 和孔隙压力显示器读数 60min 不超过 0.5kPa 来控制。

### 3.1 初始孔隙气压力和孔隙水压力

初始状态下孔隙气压力和孔隙水压力随时间的变化关系见图 2 和 3。从图可见孔隙气压力变幅很小，在 0~2kPa 之间，而孔隙水压力变幅较大，在 0~70kPa 之间。

### 3.2 试样在加压固结时的孔隙压力

#### 3.2.1 加压固结时的孔隙压力

试样在测定初始吸力后施加围压时孔隙气压力和孔隙水压力变化过程见图 2、3。由图 2 可见孔隙气压力的变化与初始状态下的变化趋势一致，加压初期孔隙气压力上升，随着时间的变化又趋于一稳定值，这一过程约需 6h。从图 3 可见，孔隙水压力在施加压力后，与所测的初始孔隙水压力相比变化较小，最大差值为 3kPa。固结前后的吸力值见表 2。

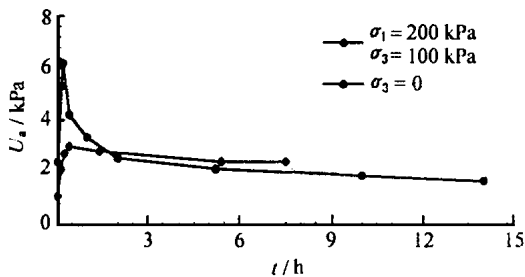


图 2 t-u<sub>a</sub> 关系

Fig. 2 Relations of t and u<sub>a</sub>

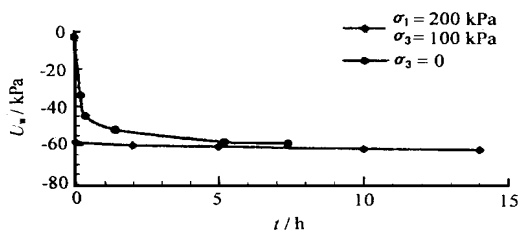


图 3 t-u<sub>w</sub> 关系

Fig. 3 Relations of t and u<sub>w</sub>

表 2 加压固结前后的吸力和饱和度

Table 2 Suction and saturation degree before and after consolidation

$(\sigma_1 - \sigma_3)$ /kPa	$(u_a - u_w)$ /kPa		$S_r$ /%	
	初始	加压	初始	加压
50	64.9	68.7	29.2	30.0
100	63.8	66.0	27.3	27.8
150	62.3	64.9	26.1	27.7
200	67.9	66.9	29.2	31.4

试验中进行了施加围压前测初始吸力和不测初始吸力试验，其结果见表 2，该成果与文[1]结果一致。这可以认为是含水率未变化而初始状态的饱和度与加压后的饱和度相差不大，这一变化还不足以引起吸力有大的变化，也可以认为含水率的大小对初始吸力起着决定性的影响。

#### 3.2.2 不同偏应力下的吸力值

初始状态及加不同压力后的初始吸力值和饱和度见表 2。在含水率相同的情况下，对试样施加等应力比的不同围压值，由于所引起的饱和度为 26.1%~31.4%，变化不大，从而导致吸力值变化不大。这也说明含水率较低时，干密度对吸力影响很小。

### 3.3 试样浸水

#### 3.3.1 孔隙气压力和孔隙水压力的变化

浸水过程中的孔隙气压力和孔隙水压力随时间的变化曲线见图 4 和 5。由图 4 可见，进水初始和进水过程中孔隙气压力会产生小的波动，浸水完成后，孔隙气压力又趋于一稳定值。由图 5 可见随着浸湿含水的逐渐增大，孔隙水压力逐渐变大，进水结束后孔隙水压力随时间变化又趋于一稳定值。

某一偏应力下整个浸水湿陷过程中试样的孔隙水压力随时间和含水率的变化见图 6。由图可见一级浸水过程中随着含水率的增大孔隙水压力逐渐变大，这一进水过程及稳定需要一较长的时间。随着分级浸水含水率的变大，孔隙水压力也变大。当含水率接近饱和时，孔隙水压力接近于零。

浸水湿陷过程中孔隙气压力随含水率的变化很小，见图 7。孔隙水压力随含水率变大而逐渐增大，含水率接近饱和和含水率时，孔隙气压力与孔隙水压力趋于相等，其关系见图 7 和 8。

#### 3.3.2 吸力与含水量的关系

不同应力状态下吸力随含水率的变化关系较明确，为了排除密度对吸力所产生的影响，引进湿密比(含水率与干密度的比值)这一量值，见图 9。

由图可见，吸力与湿密比的变化关系呈直线，方程为

$$u_a - u_w = 111.07 - 4.7589w / \rho_d$$

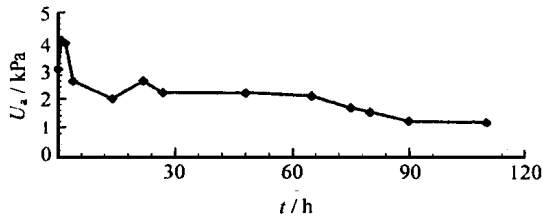


图 4 12% ~ 15% 浸水过程中  $t-u_a$  关系

Fig 4 Relations of  $t$  and  $u_a$  in the process of slake

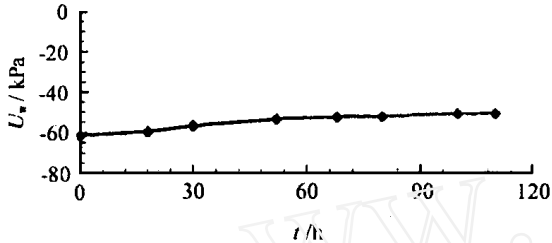


图 5 12% ~ 15% 浸水过程中  $t-u_w$  关系

Fig 5 Relations of  $t$  and  $u_w$  in the process of slake

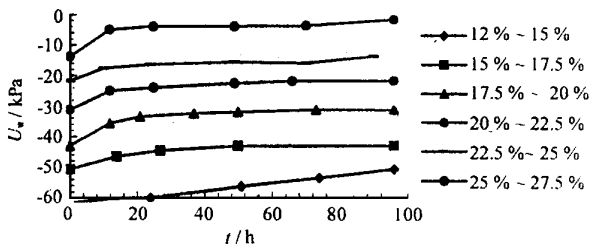


图 6  $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$  和  $\sigma_1 = 200 \text{ kPa}$  湿陷  $u_w$  变化线

Fig 6 Variations of  $u_w$  in the process of slake

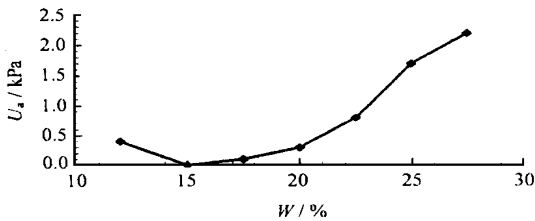


图 7  $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$  和  $\sigma_1 = 200 \text{ kPa}$  时  $w \sim u_a$  关系

Fig 7 Relations of  $w$  and  $u_a$

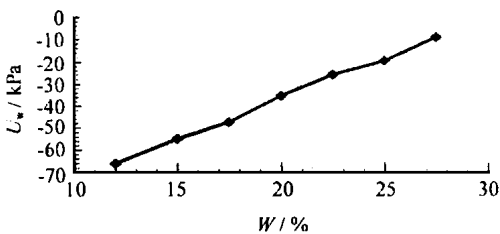


图 8  $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$  和  $\sigma_1 = 200 \text{ kPa}$  时  $w \sim u_w$  关系

Fig 8 Relations of  $w$  and  $u_w$

相关系数  $R = 0.979$ 。试样接近饱和后吸力趋于零, 这一变化关系对进一步进行这方面的理论研究

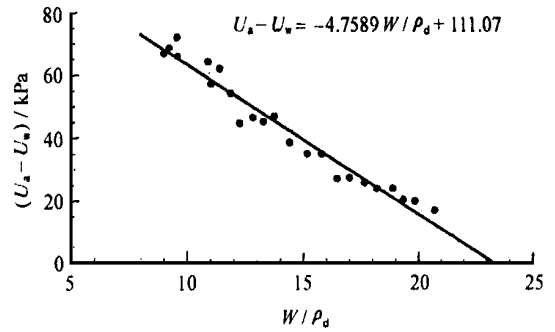


图 9  $(w/\rho_d) - (u_a - u_w)$  关系

Fig 9 Relations of  $(w/\rho_d)$  and  $(u_a - u_w)$

具有参考价值。整个浸水湿陷过程中, 孔隙气压力变化很小, 所以吸力值主要受孔隙水压力大小控制。

### 3.4 浸水湿陷变形特性

浸水前试样的压缩变形稳定值 ( $\epsilon_0$ ) 与每级浸水稳定的变形值 ( $\epsilon_i$ ) 之差, 即为某一应力状态下的湿陷变形, 如图 10 所示, 用下式表示为

$$w_1: \epsilon_1^{\text{sh}} = \epsilon_1 - \epsilon_0$$

$$w_2: \epsilon_2^{\text{sh}} = \epsilon_2 - \epsilon_0$$

$$\vdots$$

$$w_i: \epsilon_i^{\text{sh}} = \epsilon_i - \epsilon_0$$

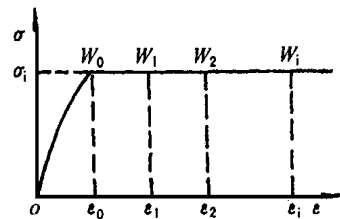


图 10 试验过程示意图

Fig 10 Diagram of testing process

湿陷变形与应力状态和含水率之间有比较明确的对应关系。试验得到了同一应力比不同偏应力下的浸湿含水率对应的湿陷体积变形  $\epsilon^{\text{sh}}$ , 变形与应力状态以及浸湿含水率的关系曲线见图 11。可以看出, 曲线上有一转折点, 关于转折点前后曲线形状文[2]认为, 它反映了浸水后土结构破坏程度与残余强度对湿陷变形的影响。认为在转折点前, 主要反映土的原

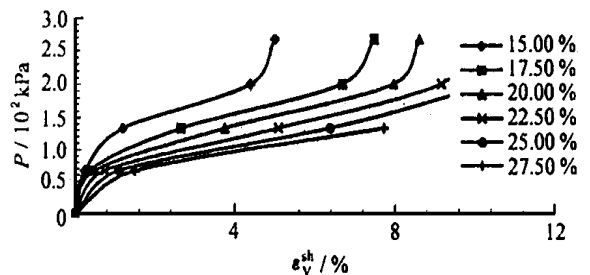


图 11 体积湿陷系数与球应力

Fig 11 Relations of  $\epsilon^{\text{sh}}$  and  $P$

有结构破坏程度和残余强度的丧失; 在转点后, 则既反映原有结构的破坏强度的丧失, 又反映新的结构和强度的形成。由图亦可见, 当湿陷达到一定程度之后, 湿陷变形较为缓慢, 这一方面是含水率逐渐变大过程中, 孔隙中的水缓慢排出, 降低了黄土的湿陷速度; 另一方面, 在湿陷过程中, 外荷还要克服颗粒重新排列的摩擦力, 在湿陷进行到一定程度后, 外荷还须克服孔隙水压力。

### 3.5 湿陷变形量与吸力的关系

随着湿陷变形量的逐渐变大, 吸力逐渐变小, 这是由于湿陷变形量与含水率关系密切, 含水率的大小又直接关系着吸力值, 可见这一结果是合理的, 其关系见图 12。

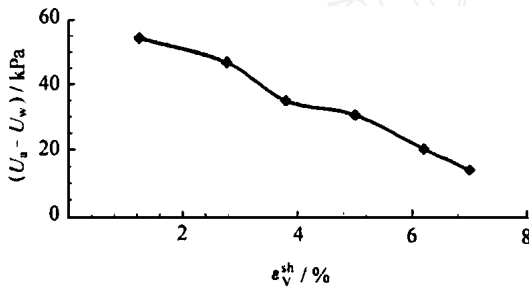


图 12  $\sigma_1 = 200 \text{ kPa}$  和  $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$  时  $\epsilon_v^{sh} - (u_a - u_w)$  关系  
Fig 12 Relations of  $\epsilon_v^{sh}$  and  $(u_a - u_w)$

### 3.6 应力状态与吸力的关系

偏应力状态与吸力关系见图 13, 由图可见偏应力状态对吸力的大小影响很小。

## 4 结 论

(1) 张桥黄土在湿陷过程中无论是初始状态、加压固结状态还是浸水湿陷状态, 孔隙气压力变化幅度均很小; 孔隙水压力随着含水率的逐渐变大而

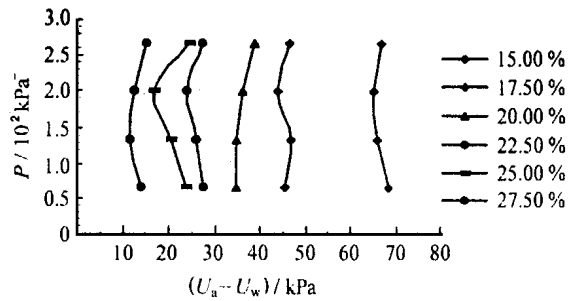


图 13  $(u_a - u_w) - P$  关系

Fig 13 Relations of  $(u_a - u_w)$  and  $P$

变大, 但这一稳定过程一般均在浸水结束 6 h 之后才能完成。试样接近饱和含水率时, 孔隙水压力与孔隙气压力趋于相等。

(2) 湿陷过程中, 吸力值的大小主要取决于孔隙水压力的大小, 湿密比与吸力的变化关系呈现良好的直线关系, 且这一关系基本不受偏应力状态的影响, 即该试验条件下吸力的大小受应力因素控制影响很小。

(3) 湿陷变形与应力状态和含水率之间有明显的对应关系, 它是黄土湿陷性、结构性、应力状态、残余强度等因素影响的反映。

## 参 考 文 献

- 1 邢义川, 吴培安, 骆亚生 非饱和和原状黄土三轴试验方法研究 [J]. 水利学报, 1996, 1: 47~ 52
- 2 陈正汉, 许镇鸿, 刘祖典 关于黄土湿陷的若干问题 [J]. 土木工程学报 1986, 19(3): 86~ 94
- 3 骆亚生, 邢义川 非饱和黄土的孔隙压力特性 [J]. 见: 中国土木工程学会土力学及岩土工程学会编 土木工程学会第八届学术会议论文集 [C]. 北京: 万国学术出版社, 1999, 97~ 100
- 4 刘祖典 黄土力学与工程 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997

## COLLAPSE DEFORMATION AND PORE PRESSURE CHARACTERISTICS OF UNSATURATED INTACT LOESS

Guo Minxia, Zhang Shaohong, Xing Yichuan

(Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100 China)

**Abstract** The stage slaking test for unsaturated intact loess are performed under the condition of constant stress ratio by means of refitted triaxial apparatus controlled by stress and strain. The variation process of pore air pressure and pore water pressure of samples at several states, such as primitive consolidation, as well as collapse state, are tested, respectively. The collapse deformation characteristics of unsaturated intact loess, the variation regularity of pore air pressure and pore water pressure, as well as matrix suction during its collapse process are analyzed primarily.

**Key words** intact loess, collapse, matrix suction