

文章编号: 1007-2993(2022)05-0417-04

# 非饱和绢云母片岩残积土三轴压缩变形规律

支太强 刘欢 王云 白明媛

(云南省建筑工程设计院有限公司, 云南昆明 650501)

**【摘要】** 为研究非饱和绢云母片岩残积土三轴压缩特性, 利用非饱和三轴蠕变仪, 进行了控制基质吸力和净平均应力的压缩试验。试验结果表明: 基质吸力相同时, 随着净平均应力的增大, 压缩变形逐渐变大; 在一定范围内, 随着基质吸力的增大, 绢云母片岩残积土的屈服应力也增大, 干密度较大时, 屈服应力较大; 净平均应力相同时, 随着基质吸力的增大, 变形逐渐减小。对比两种应力路径下的压缩试验, 可以发现到达屈服吸力后, 荷载的施加是产生变形的的主要原因。

**【关键词】** 非饱和土; 绢云母片岩残积土; 三轴压缩; 非饱和三轴蠕变仪

**【中图分类号】** TU 432

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.05.013

## Triaxial Compression Deformation of Unsaturated Sericite Schist Residual Soil

Zhi Taiqiang Liu Huan Wang Yun Bai Mingyuan

(Yunnan Architectural Engineering Design Company Limited, Kunming 650501, Yunnan, China)

**【Abstract】** To study the triaxial compression characteristics of unsaturated sericite schist residual soil, the compression tests of controlling matric suction and net mean stress were carried out by using unsaturated triaxial creep apparatus. The results show that: when the matric suction is the same, the compression deformation increases with the increase of net mean stress. In a certain range, with the increase of matrix suction, the yield stress of sericite schist residual soil also increases, and when the dry density is high, the yield stress is high. When the net mean stress is the same, the deformation decreases with the increase of matrix suction. Comparing the compression tests under the two kinds of stress change, it can be found that the main reason for deformation is the application of load after reaching the yield suction.

**【Key words】** unsaturated soil; sericite schist residual soil; triaxial compression; unsaturated triaxial creep apparatus

### 0 引言

实际工程建设中遇到的非饱和土问题日益增多, 如降雨或生活生产用水入渗及正常含水率情况下加载过程中出现的超孔隙水压力等情况, 均会引起土工建筑物不均匀沉降或高边坡失稳<sup>[1]</sup>。土体的压缩变形在实际工程中大量存在, 研究其压缩变形特性十分重要, 如地基的强度问题和稳定性问题、土体沉降与时间的关系等。在实际工程中, 土体的压缩变形条件并不单一, 在不同的条件下, 压缩变形有很大的区别。

近年来, 国内外学者对非饱和土的压缩变形及力学特性进行了大量研究。朱红亮等<sup>[2]</sup>对绢云母片粗粒料进行了干湿条件下的大型三轴压缩试验, 发现绢云母片岩粗粒料的湿化变形呈现两个阶段, 且密度增大时, 其湿化应变减小。庞维福等<sup>[3]</sup>利用电子压力表改善了压力板仪, 大幅提高了土水特征曲线的测定

精度。Yoshikawa等<sup>[4]</sup>对非饱和粉土进行三轴试验, 并进行了数值模拟研究, 发现将三轴试验视为一个初边值问题, 可以再现体积和吸水以及排水量之间的时间变化。Xiong等<sup>[5]</sup>对风化花岗岩进行了三轴压缩试验, 建立了考虑有限变形影响的饱和程度与吸力增量的关系。李春海等<sup>[6]</sup>通过非饱和三轴压缩试验, 研究了浸水湿化程度对 $Q_2$ 黄土力学特性的影响。试验表明: 不同浸水湿化程度的 $Q_2$ 黄土, 其应力应变曲线为弱软化型, 浸水湿化程度越高, 软化程度越小, 浸水湿化至饱和状态时可近似看作理想硬化型。Pasha等<sup>[7]</sup>研究了恒定吸力下, 体积收缩对非饱和土饱和程度的影响。

本文通过非饱和三轴蠕变仪, 对绢云母片岩残积土开展非饱和三轴压缩试验, 对其非饱和三轴压缩特性进行了研究, 为进一步研究绢云母片岩残积土的

**作者简介:** 支太强, 男, 1989年生, 汉族, 云南宣威人, 大学本科, 工学学士, 工程师, 主要从事土木工程结构方向研究。E-mail: 75297129@qq.com

非饱和特性提供一定的参考。

## 1 试验材料方案

### 1.1 试验土样

试验土样取自云南大临铁路的绢云母片岩残积土,呈灰色,受构造和风化的影响,岩石破碎严重,风化程度较高,形成大量残积土。根据土工试验结果可得土样比重 $G_s = 2.76$ ,天然含水率 $w = 9.87\%$ ,最大干密度 $\rho_d = 2.10 \text{ g/cm}^3$ ,液限 $w_L = 20.35\%$ ,塑限 $w_p = 8.15\%$ 。

### 1.2 试验仪器

利用非饱和三轴蠕变仪进行控制基质吸力和净法向压力的非饱和三轴压缩试验。该仪器由江苏永昌生产,主要由台件、加荷部件、试样压力室、压力室控制柜以及数据采集系统等组成。孔隙气压力 $U_a = 0 \sim 500 \text{ kPa}$ ,传感器测量精度误差为 $0.2\% \text{ FS}$ ;孔隙水压力 $u_w = 50 \sim 1000 \text{ kPa}$ ,测量精度误差为 $0.2\% \text{ FS}$ ;体积变化 $\Delta V = 0 \sim 50 \text{ cm}^3$ ,精度误差为 $0.2\% \text{ FS}$ ;轴向变形 $\Delta L = 0 \sim 16 \text{ mm}$ ,试验仪器图如图1所示。

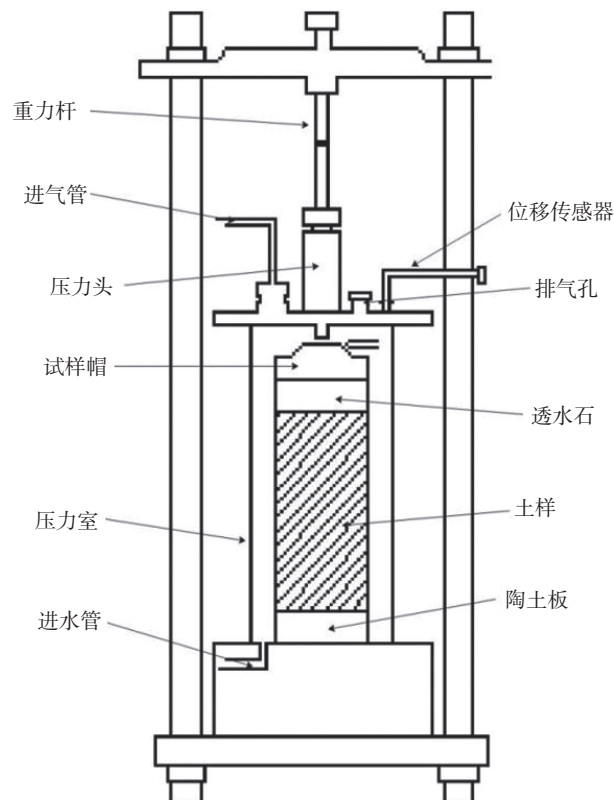


图1 非饱和三轴蠕变仪结构图

### 1.3 试验方案

为研究绢云母片岩残积土三轴状态下的非饱和变形性能,利用非饱和三轴蠕变仪,研究其在不同应力路径下的压缩变形规律,试验方案见表1。

表1 三轴压缩试验方案

试验方案	实验仪器	应力加载路径
控制基质吸力分别为0、50 kPa、100 kPa、200 kPa	非饱和三轴蠕变仪	逐级施加竖向荷载,每级荷载下净平均应力应为25 kPa、50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa、250 kPa、300 kPa、400 kPa
控制净平均应力分别为0、100 kPa、200 kPa、400 kPa		25 kPa、50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa、250 kPa、300 kPa、350 kPa逐级施加基质吸力

试验制备含水率为10%的土样,将土样密封保存24 h。控制干密度分别为 $1.95 \text{ g/cm}^3$ 和 $2.10 \text{ g/cm}^3$ ,称取相对应质量的土体,放入配套的制样模具内,利用击实法将土样压实成型,制成直径为 $6.18 \text{ cm}$ 、高为 $12.5 \text{ cm}$ 的土样。将土样装入非饱和三轴蠕变仪,见图2。根据试验方案设置的开展不同状态下的非饱和三轴压缩试验,待其变形稳定后记录数据。试验稳定标准为试验的体积变化量及排水量均小于 $0.012 \text{ cm}^3/(2 \text{ h})$ 。

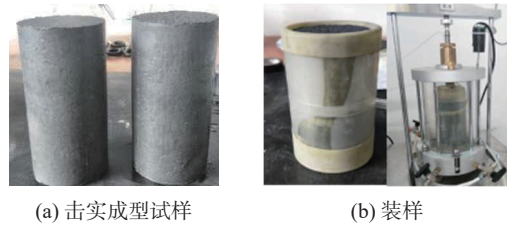


图2 试验过程图

试验前,要对仪器进行饱和。具体饱和步骤为:先施加一个水压力,让水通过排水管道及阀门,把仪器水管中的空气排完,此时施加的水压力不大于 $30 \text{ kPa}$ ;其次排出陶土板上的空气,施加一个不大于 $50 \text{ kPa}$ 的水压力,陶土板上充满水即可;最后,将压力室充满水,施加围压,打开孔隙排水阀门,对陶土板进行饱和。

## 2 试验结果及分析

土的体积-质量特性也可以用来表示非饱和土的本构方程。通常用孔隙比的变化作为饱和土的变形状态变量,其本构方程见式(1):

$$de = a_v d(\sigma - u_w) \quad (1)$$

对于非饱和土来说,在三维加荷条件下,其孔隙比变化 $de$ 可按式(2)计算:

$$de = a_t d(\sigma_{\text{mean}} - u_a) + a_m d(u_a - u_w) \quad (2)$$

$$a_t = \frac{\partial e}{\partial (\sigma_{\text{mean}} - u_a)}$$

$$a_m = \frac{\partial e}{\partial (\sigma_{\text{mean}} - u_w)}$$

式中:  $\sigma$  为总法向应力, kPa;  $u_w$  为孔隙水压力, kPa;  $u_a$  为孔隙气压力, kPa;  $\sigma_{\text{mean}}$  为平均总法向应力, kPa;  $a_v$  为压缩系数;  $a_t$  为受净法向应力影响的压缩系数;  $a_m$  为受基质吸力影响的压缩系数。

### 2.1 控制基质吸力的饱和三轴压缩试验

试样进行压缩前, 首先要进行吸力平衡, 试样基质吸力达到平衡后, 保持基质吸力值的大小不改变, 对土样分级施加竖向压力, 进行非饱和三轴压缩试验, 其中在 0 kPa 基质吸力条件下的压缩试验就是饱和土在各向等压条件下的固结试验。本文采用比容  $v=1+e$  来描述试样总体积变化, 试验结果见图 3。

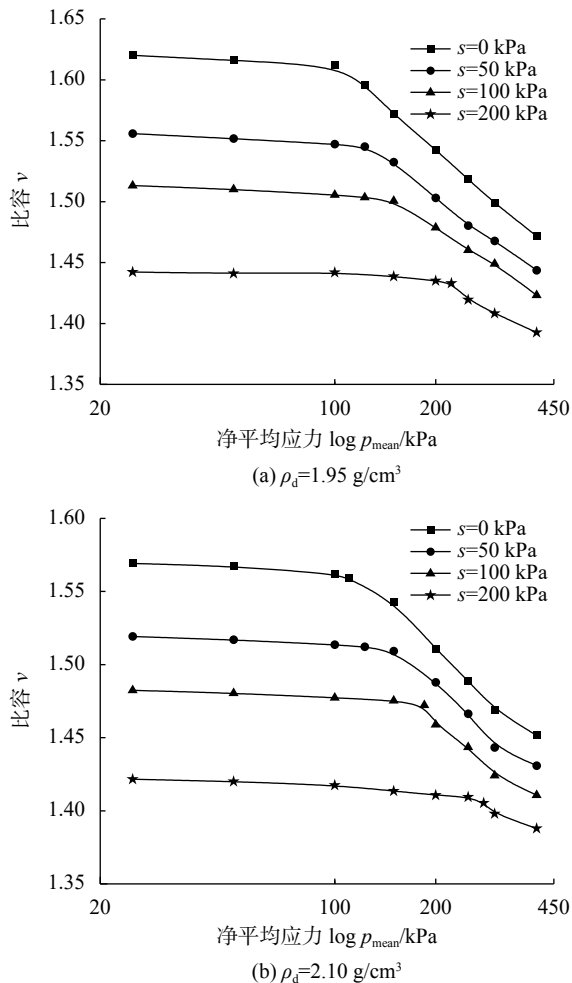


图 3  $s$  一定的三轴压缩曲线

图 3 中的  $v-\log p$  曲线表明, 试样的压缩性指数和屈服应力都与基质吸力密切相关, 吸力的增大使得试样的刚度提高。对比无侧限压缩曲线和各向等压压缩试验, 发现两种情况下曲线的变化规律及趋势是相似的, 在基质吸力相同时, 均呈现出明显的两阶段

变化, 第一阶段变化较为平缓, 当净平均应力达到一定值时, 变形量开始急剧增加。对比分析不同基质吸力下的压缩曲线, 发现净竖向压力相同时, 孔隙比的变化与基质吸力的变化呈现反比关系, 主要是基质吸力增大, 其土体内部的水分含量就变小, 土体密实度大, 抗压缩能力增强, 所以土体不容易发生压缩变形。由于土体本身结构强度的存在, 含水率较低时, 其结构性越强, 当一开始压缩时, 会出现一段时间的平缓变化阶段, 当随着净竖向压力的增加, 平缓段的变化时间逐渐减短。主要是当净竖向应力大于土的结构强度时, 土体结构发生损伤, 颗粒及骨架被破坏, 不仅土体内部颗粒发生错动, 土体结构也被破坏, 因此造成较大的压缩变形。含水率也会对其造成影响, 随着含水率的逐渐增大, 吸力降低, 土体容易发生压缩变形, 此阶段变形量陡增。

由图 3 可以看出, 绢云母片岩的压缩曲线可以分为两阶段, 平缓阶段和陡降阶段, 两阶段的交点为屈服点, 用  $k_s$  和  $\lambda_s$  斜率分别表示土体屈服前和屈服后的变形速率, 从表 2 可以看出土样屈服前的斜率  $k_s$  随着基质吸力的增大出现略微减低, 而  $\lambda_s$  随着基质吸力的增大而减小。当处于变形的平缓阶段时, 说明土样的屈服应力大于施加的净竖向应力, 土体结构性较强, 土体发生较小的变形, 此阶段吸力对其的影响非常小。当土体进入变形迅速增加的阶段时, 意味着此时的净竖向应力大于或者等于土体屈服应力, 土体结构开始破坏, 压缩变形增大, 这一阶段基质吸力对其影响较大。

表 2 不同基质吸力的各向等压压缩试验相关参数

基质吸力 $s/\text{kPa}$	屈服平均 应力 $\bar{p}/\text{kPa}$		$k_s$	$\lambda_s$	屈服平均 应力 $\bar{p}/\text{kPa}$	
	$\rho_d=1.95 \text{ g/cm}^3$				$\rho_d=2.10 \text{ g/cm}^3$	
0	100	0.111	0.467	110	0.118	0.370
50	123	0.110	0.366	150	0.081	0.313
100	150	0.101	0.310	185	0.064	0.286
200	220	0.071	0.228	278	0.064	0.143

### 2.2 控制净平均应力的三轴压缩试验

控制净平均应力的三轴压缩试验的  $v-\log s$  关系图如图 4 所示, 分别用  $k_p$  和  $\lambda_p$  代表了土体屈服前和屈服后的变形速率, 发现随着基质吸力的增加, 比容  $v$  逐渐减小, 试样发生收缩, 基质吸力达到 200 kPa 时,  $v$  变化趋于稳定, 收缩达到稳定, 且其密度越大, 变化越小。从图中可以看出, 不同净平均应力下的  $v-\log s$  曲线也可以看成由两条直线段组成, 两直线的

交点为屈服吸力,分别表示屈服前后的斜率,不同净平均应力下的参数如表3所示,发现随着平均应力的增大而略微增大,随着净荷载的增加而增加,说明达到屈服吸力之后,荷载的施加是其压缩变形的主要原因。

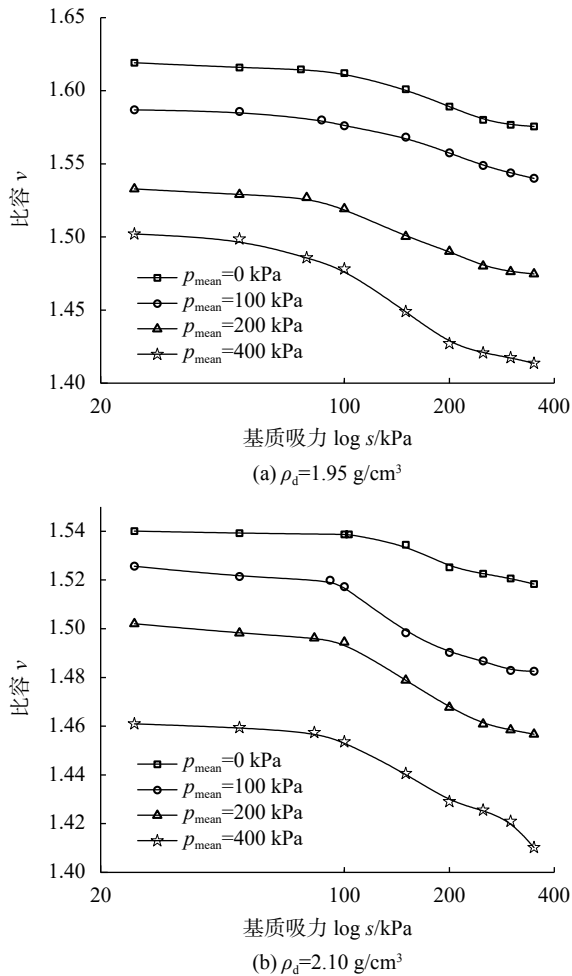


图4  $p$  一定的三轴压缩曲线

### 3 结论

对非饱和状态下的绢云母片岩残积土,利用非饱和三轴蠕变仪,进行了不同应力路径下的非饱和三轴压缩试验,主要结论如下:

(1)控制基质吸力的三轴压缩变形曲线大致可以分为两个阶段:净平均应力小于屈服应力阶段,压缩变形较小;净平均应力大于屈服应力阶段,变形急剧增加。且发现屈服应力随干密度增大而增大,说明提

表3 不同净平均应力的三轴压缩参数

基质吸力 $s/\text{kPa}$	屈服 吸力 $\bar{p}/\text{kPa}$		$k_p$	$\lambda_p$	屈服平均 应力 $\bar{p}/\text{kPa}$		$k_p$	$\lambda_p$
	$\rho_d=1.95 \text{ g/cm}^3$	$\rho_d=2.10 \text{ g/cm}^3$			$\rho_d=1.95 \text{ g/cm}^3$	$\rho_d=2.10 \text{ g/cm}^3$		
0	100	103	0.09	0.146	0.018	0.082		
50	86	91	0.114	0.151	0.087	0.144		
100	78	82	0.111	0.192	0.102	0.147		
200	50	63	0.134	0.283	0.114	0.172		

高绢云母片岩残积土压实度能够增强其抗压性。

(2)在控制净平均应力的三轴压缩试验中,土体变形随着基质吸力的增大而逐渐减小,但总体变化比逐级施加净竖向压力时的变形小,得到其在不同净平均应力下的屈服吸力,发现随着净平均应力的增大,其屈服吸力开始减小。

### 参考文献

- [1] 张登飞,陈存礼,李文文,等.  $Q_3$ 原状非饱和黄土的水量变化和临界状态特性[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S1): 197-201.
- [2] 朱红亮,许锡昌,肖衡林. 绢云母片岩粗粒料湿化变形规律研究[J]. 湖北工业大学学报, 2018, 33(5): 78-82.
- [3] 庞维福,林鸿州. 吸力精确控制型压力板仪的研制与应用[J]. 岩土工程技术, 2015, 29(5): 264-270.
- [4] YOSHIKAWA T, NODA T. Triaxial test on water absorption compression of unsaturated soil and its soil-water-air-coupled elastoplastic finite deformation analysis[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(5): 1151-1170.
- [5] XIONG X, XIONG Y, TSUNEMOTO T, et al. Tests on mechanical behavior of unsaturated decomposed granite and its modelling considering finite deformation[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(2): 253-270.
- [6] 李春海,方祥位,申春妮,等.  $Q_2$ 黄土调整吸力的非饱和三轴压缩试验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2015, 31(1): 7-10.
- [7] PASHA A Y, KHOSHGHALB A, KHALILI N, et al. Can degree of saturation decrease during constant suction compression of an unsaturated soil?[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 106(2): 199-204.

收稿日期: 2021-05-08