

不同干密度非饱和膨胀土的三轴试验研究

陈可君, 缪林昌, 崔 颖

(东南大学 岩土工程研究所, 南京 210096)

摘 要: 重塑非饱和膨胀土的结构特征是影响其强度和变形等性质的重要因素。在不同初始干密度下击实的试样具有不同的初始结构。吸力和净围压的作用使得试样结构产生变化, 从而呈现出不同的剪切特征。进行了一系列的控制吸力的三轴试验, 试验结果表明, 吸力和净围压的增加使得试样的抗剪强度提高, 膨胀性减小; 初始干密度大的试样也有更高的强度, 且呈现出明显的剪胀现象。

关 键 词: 非饱和土; 膨胀土; 干密度; 吸力; 三轴试验

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Triaxial tests on unsaturated expansive soils with different initial dry densities

CHEN Ke-jun, MIAO Lin-chang, CUI Ying

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The structural characteristics is of great importance to unsaturated soils; soils compacted with different initial dry densities have different structural characteristics. A series of triaxial tests were undertaken on a remolded unsaturated expansive soil. It appears that the strength of unsaturated soils increases with net confining pressure and suction, but the tendency to dilate diminishes with them. Soils with higher initial dry density have higher strength and more tendency to dilate when shearing.

Key words: unsaturated soil; expansive soil; dry density; suction; triaxial test

1 引 言

随着膨胀土地区工程建设项目的日益增加, 非饱和膨胀土对工程建设的安全性产生重要影响, 其强度和变形特性已成为近年来的研究热点^[1]。土的工程特性与其微结构特征有着本质的联系, 而在非饱和土的这种联系更为显著^[2]。对于非饱和膨胀土结构特性与其工程特性关系方面的研究目前尚不多见, 因此, 本文通过大量的非饱和土三轴试验了研究具有不同初始干密度的非饱和膨胀土的强度和变形特性。

2 试验设备

试验采用的仪器为 FLSY10-1 型非饱和土三轴仪。该仪器是根据非饱和土试验的实际需要, 对常规的三轴试验仪器改进而成。三轴压力室底座嵌有

高进气值陶土板, 进气值为 500 kPa, 从而可以利用轴平移技术对试样施加较高的吸力。从试样顶帽对试样施加控制气压力, 试样外包装两层橡皮膜以减少气体的渗漏。压力室为双层有机玻璃圆筒可以消除内压力室的变形对体变量测产生的误差。试验数据由微机自动采集。

3 试 样

试验所用的土样取自广西, 其基本物理力学性质、矿物成分和化学成分见表1。重塑制样, 根据设计的试样干密度和初始含水量计算出试样所需的湿土量, 分5层均匀击实。试样的直径和高度分别为 3.91 cm和8 cm。

4 试验方案

由于非饱和土内部水气运动的复杂性, 给测量工作带来了极大的困难。非饱和粘性土内部水压、

气压消散速率很慢, 因此土样的固结稳定所需时间较长, 而且剪切速率对强度的影响比较大^[3]。在试验过程中。采用控制吸力 s 的方法进行三轴剪切试验。固结过程的稳定标准是, 体变连续2 h不超过0.1 m, 并且, 排水量连续2 h不超过0.01 mL, 且历时不少于48 h。通过比较不同剪切速率的试样的试验结果, 最终选择剪切速率为0.006 4 mm/min, 共进行了3种干密度以及3级吸力下的27个试样的控制吸力三轴排水剪切试验。击实含水量为23.3 %。试验方案及强度指标数据见表2。

针对试样在剪切过程中不同的破坏形式, 采用不同的破坏标准: 对于应变软化的试样, 取峰值强度; 对于应变硬化的试样, 取轴向应变为15 % 时对应的强度为破坏值。

表 1 试验用土的基本土性、主要矿物和化学成分

Table 1 Properties of the soil studied

指标	量值	名称	量值
土粒比重	2.70	蒙脱石/%	10~15
塑限/%	30.3	水云母/%	15~25
液限/%	61.4	石英/%	20~30
塑性指数	31.1	长石	少量
自由膨胀率/%	35.0	绿泥石	
		高岭石/%	5~15
粘粒含量/% (< 0.002 mm)	29		

表2 试验方案及强度

Table 2 Testing program and strength parameters

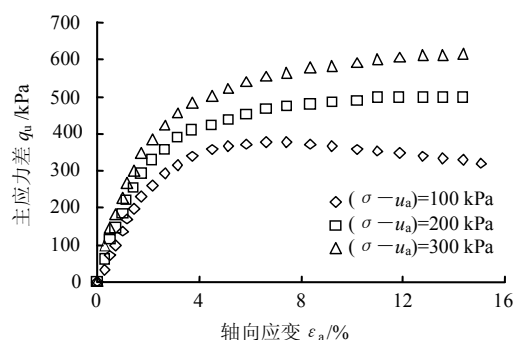
干密度	吸力 s	不同净围压(kPa)			c	φ
/g·cm ⁻³	/kPa	最大主应力差 q_u /kPa			/kPa	/ (°)
1.42	50	306.43	425.67	541.67	64.0	21.7
	120	375.24	497.34	613.09	86.6	21.9
	200	415.14	530.92	641.71	101.9	21.5
1.48	50	347.96	464.70	583.65	78.0	21.6
	120	405.95	523.04	641.83	97.5	21.7
	200	431.03	542.08	655.78	109.3	21.1
1.54	50	396.41	510.54	630.17	94.9	21.6
	120	441.87	562.09	678.08	109.6	21.6
	200	467.84	587.11	700.02	119.6	21.5

5 试验结果分析

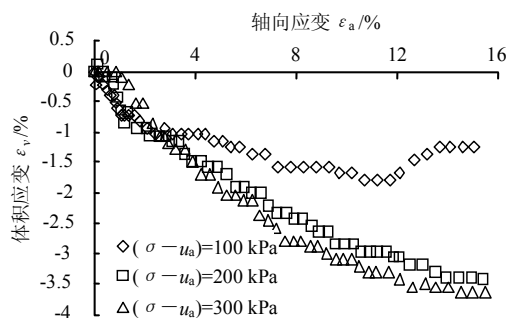
5.1 净围压对剪切特征的影响

图1给出了不同净围压 $(\sigma - u_a)$ 下试样剪切时的应力与应变和轴向应变体积应变曲线。由图1(a)中可以看出, 在吸力和初始干密度都相同的情况下高净围压下的曲线呈应变硬化型, 即使在应变达到15 %时应力-应变关系曲线也没有达到一个峰值; 而

低净围压下剪切的试样其应力-应变曲线随着轴向应变的增加呈现出微弱的软化趋势。而试样中的吸力相同时剪应力随着净围压的增加而明显增大, 这说明净围压的增加使土的强度得到提高, 这些现象同饱和粘土的三轴压缩特性是相同的。



(a)



(b)

图 1 不同净围压下试样的剪切特征

($\rho_d = 1.42$ g/cm³, $s = 120$ kPa)

Fig.1 Shearing characteristics of soils under different net confining pressures($\rho_d = 1.42$ g/cm³, $s = 120$ kPa)

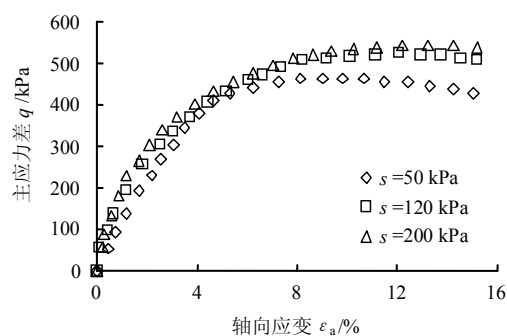
在不同净围压下试样剪切时的体积变化曲线如图1(b)所示。由图可见, 在吸力和初始干密度都相同的条件下, 高净围压下试样剪切时体积收缩更明显; 在低净围压下其值的变化(100~200 kPa)对剪切体变特征有较大地影响, 而当净围压继续增大到300 kPa 时, 曲线与200 kPa下的曲线之间没有显著的差距, 即净围压的变化对体变特征并无明显影响。

剪切时的体积变化特征可以通过考虑非饱和击实土的结构来解释。在低于最优含水量的情况下, 击实的粘土颗粒以饱和集聚体的形式存在, 饱和集聚体中包含微小的、充满水的粒中孔隙, 而集聚体被大孔隙分开。同样, 初始干密度低的土具有一种开放的结构, 这种结构以相对较大的粒间孔隙为主要特征。在低净平均压力下固结的非饱和土样, 其

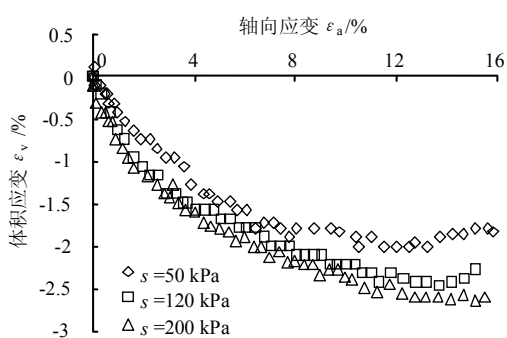
体积变化特征主要由大粒径孔隙这种结构特征所决定。另一方面,在高净平均应力下固结的非饱和土样固结后具有更紧密的集聚体结构。由于剪切过程中紧密集聚体之间的咬合力的作用,尽管总的体积是在减小,但随着净平均应力的增加,集聚体滑移后引起体积膨胀的那部分变形作用越来越大,总的体积收缩量随着净平均应力的增加而没有产生较大的变化。

5.2 吸力对剪切特征的影响

为了研究吸力的变化对非饱和土试样剪切特征的影响,将各干密度和净围压下不同吸力下试样剪切的应力-应变关系曲线绘于一个坐标中,如图2(a)所示。可以看出,在所考虑的吸力范围之内,吸力的增加使非饱和土的强度得到明显提高。这同前人的研究成果是一致的。另外,随着吸力的增加,应力-应变曲线的硬化趋势越来越显著。



(a)



(b)

图2 不同吸力下试样的剪切特征($\rho_d=1.48 \text{ g/cm}^3$, $(\sigma - u_a)=200 \text{ kPa}$)

Fig.2 Shearing characteristics of soils under different suctions ($\rho_d=1.48 \text{ g/cm}^3$, $(\sigma - u_a)=200 \text{ kPa}$)

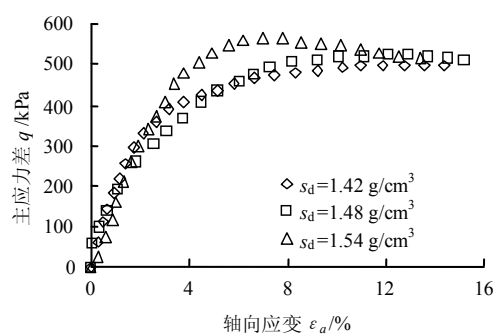
在较大的初始干密度下击实的试样形成了较紧密的集聚体结构,这使得剪切过程中试样在经历最初的收缩后开始产生膨胀。在较大吸力作用下,集聚体之间的相对位移变得不易改变,因此其剪胀的

趋势较低吸力作用下的试样要小。同样,初始干密度低的试样高吸力作用下剪胀的趋势比低吸力作用

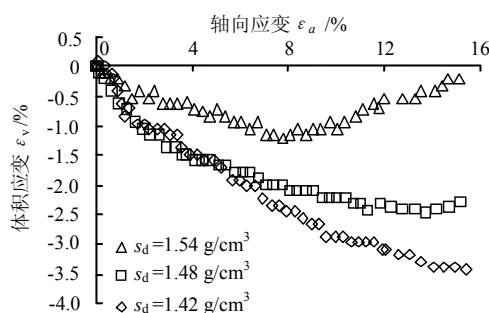
下要小。而且,表2 根据库仑强度方程得出各吸力下的强度指标及粘聚力 c 与内摩擦角 φ 值表明,粘聚力随着吸力的增加而明显增大,而摩擦角受吸力的影响并不明显。

5.3 初始干密度对剪切特征的影响

图3(a)为在其他条件不变的情况下不同干密度试样剪切时的应力与应变关系曲线及轴向应变与体积应变关系。由图可见,试样初始干密度的增加使得强度得到提高,与净围压和吸力对试样应力-应变曲线的影响不同的是,试样的初始干密度越低,硬化趋势越明显,即塑性变形越大。



(a)



(b)

图3 不同初始干密度试样的剪切特征($s=120 \text{ kPa}$, $(\sigma - u_a)=200 \text{ kPa}$)

Fig.3 Shearing characteristics of soils with different initial dry densities($s=120 \text{ kPa}$, $(\sigma - u_a)=200 \text{ kPa}$)

研究不同吸力下试样的粘聚力 c 随着干密度的变化情况,可以得到图4的结果。可以看出, c 值随着初始干密度的增加而增加。在所考虑的干密度的范围内,这种变化关系可以用直线很好的拟合,且

拟合直线的倾角几乎相同。这说明初始干密度对粘聚力值的影响不随吸力的改变而改变。

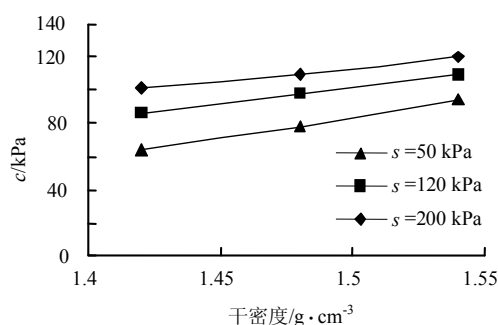


图 4 粘聚力随初始干密度的变化情况

Fig.4 Variation of cohesive strength with initial dry densities

另外,从图3(a)中可以发现,初始干密度从 1.42 g/cm^3 变化到 1.48 g/cm^3 时的强度增加没有从 1.48 g/cm^3 变化到 1.54 g/cm^3 时显著。重塑粘土的微观结构很大程度上依赖于曾经所受到的最大作用力。不同初始干密度的试样可看成是具有不同大小的最大作用力。在同样的净围压固结下,干密度为 1.42 g/cm^3 和 1.48 g/cm^3 具有了相同的最大作用力,即为当前的净围压,固结使得初始结构的差异消除很多;而干密度为 1.54 g/cm^3 的试样在击实时所受的压力要大于当前净围压,因此其结构未发生破坏。上面所述的现象也就是这种结构变化的反映。

相同净围压和吸力作用下,不同初始干密度试样剪切时的体积变化特征见图3(b)。可以看出,不同初始干密度的试样的体变特征有着显著的差异,总的来说,初始干密度越大,试样随着轴向应变的发

展,膨胀的趋势也越明显。初始干密度为 1.54 g/cm^3 的试样在低吸力和低净围压下显示出如同强超固结粘土的剪切特征。这显然同试样的不同疏密程度的集聚体结构紧密相关。

6 结 语

不同干密度下击实的非饱和膨胀土具有不同的初始结构,在吸力和净围压以及剪切时偏应力的作用下,初始结构发生变化,呈现出不同的剪切特征。本文研究了不同初始干密度非饱和试样在不同吸力和净围压下的剪切特征,并试图从微结构变化的角度加以分析。通过对试验结果的分析,深入了对非饱和膨胀土的工程性质的认识。

粘性土的结构性的研究已经越来越受到重视^[3]。然而,结构特征对土的工程性质的影响机理以及建立各种切实有效的微观物理模型进行数学处理,从而确定微观结构与强度、变形等工程性质之间的定量关系,以便应用于工程实践等方面,还有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Toll D G. A framework for unsaturated soil behaviour[J]. *Geotechnique*, 1990, 40(1): 31 - 44.
- [2] Fredlund D G, Rahardjo H. 非饱和土土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] 沈珠江. 土体结构性的数学模型——21 世纪土力学的核心问题[J]. *岩土工程学报*, 1996, 18(1): 95 - 97.