

非饱和和重塑膨胀土的强度试验研究

缪林昌, 崔颖, 陈可君, 经绯

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 通过不同干密度、不同吸力的非饱和和重塑膨胀土的三轴剪切试验, 研究分析了广西非饱和和重塑膨胀土的应力应变硬化与软化和体变剪缩膨胀特性与土样内部的孔隙孔径大小及孔隙间的连通性的相关性, 研究表明低密度试样内部孔隙孔径较大且连通性较好, 应力-应变曲线表现为硬化和体变呈剪缩性, 当土样密度增大后逐步由硬化-剪缩向软化剪胀转化, 同时研究发现非饱和和重塑膨胀土的吸力强度与吸力的双曲特性。

关键词: 非饱和和重塑膨胀土; 硬化软化; 剪缩剪胀; 吸力强度

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0274-03

作者简介: 缪林昌(1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非饱和土力学与环境岩土工程教学与科研工作。

Test on strength of unsaturated remolded expansive soils

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

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

Abstract: The tri-axial tests of unsaturated remolded Guangxi expansive soils were performed for different dry densities and controlled suction. The relation of the hardening, softening, dilation and compaction features of Guangxi remolded expansive soils with the pore structure was studied. The results showed that the stress-strain curves were those of hardening type and the volume strains were dilation for low dry density soil sample because the pore size was large with good connectivity for low density samples. The hardening type of stress-strain curves would transfer to the softening type when the dry density of soil samples increased. The relationship between suction strength and suction was a hyperbolic feature.

Key words: unsaturated remolded expansive soil; hardening-softening; dilation-shear compaction; suction strength

0 引言

膨胀土是种特殊土, 吸水膨胀软化, 失水收缩干裂, 同时具有超固结性和多裂隙性, 其矿物成份以强亲水的蒙脱石和伊利石为主。膨胀土的强度特性较之普通的粘性土要复杂得多。通常膨胀土的峰值抗剪强度是相当高的, 但从失稳的膨胀土坡反算出的抗剪强度却往往远低于其峰值。这一现象早就引起了土力学专家们的注意, 不少学者在各自研究的基础上提出了不同的理论和选取强度的方法。Bjerrun^[1], Skempton^[2]认为超固结膨胀土边坡的破坏是渐进的, 强度不一, 强度并不一定降低到残余强度。Bishop A W, Bjerrun^[3]的研究结果认为由于裂隙性引起的应力集中和吸力下降等原因造成土层软化。因此使凝聚力 c' 随时间减小, 引起滞后破坏。Skempton 认为滞后破坏的根本原因除了存在裂隙的关系, 使 c' 随时间降低外, 更主要的是因孔隙水压力达到平衡的速度非常缓慢所致。廖世文等^[4]认为膨胀土边坡的变形演化实际上是土体在内营力作用下, 经干湿循环其抗剪强度逐渐衰减的过程。潘君牧认为边坡土体在气候作用下, 作用层的强

度会随时间衰减引起边界的破坏。廖济川^[5]认为膨胀土的抗剪强度应考虑: ①强度分带的界限; ②强度使用期限; ③膨胀土的工程特性。这些研究大多基于现场观测分析得到的, 在实际工程中发现天然状态下的膨胀土多以非饱和状态存在, 目前国内外不少学者引用非饱和土的强度理论对膨胀土强度进行研究^[6]。本文主要就非饱和和重塑膨胀土的强度特性进行试验研究。

1 非饱和土的强度理论

关于非饱和土强度理论的研究, 主要有以下几种代表性的强度理论。

1.1 Bishop 理论^[7]

Bishop 将有效应力公式 $\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$ 代入 Mohr-Coulumb 准则:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi + \chi(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40374047)

收稿日期: 2005-04-30

式中, χ 是与饱和度有关的参数。

1.2 Fredlund 双变量理论^[8]

Fredlund 等利用双变量 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$, 强度表达式为

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b, \quad (2)$$

式中 c' 、 ϕ' 为饱和土抗剪强度有效应力指标, ϕ^b 为吸力内摩擦角。

1.3 卢肇钧的吸附强度理论^[9]

卢肇钧将膨胀力引起的强度称为吸附强度 τ_s , 且两者的关系为

$$\tau_s = m P_s \tan \phi', \quad (3)$$

式中, m 为膨胀力的有效系数, P_s 为膨胀压力。然而其适用性还有待验证。

1.4 吸力强度的双曲模型^[10]

非饱和土的强度由 3 部分组成, 即除了象饱和土与 c' , ϕ' 及法向应力构成的强度外, 还有一部分是由吸力引起的吸力强度记为 τ_{us} 。笔者在控制吸力的非饱和和三轴试验的基础上提出的吸力强度的双曲模型

$$\tau_{us} = \frac{a u_s}{1 + \frac{(1-a) u_s}{p_{at}}}, \quad (4)$$

式中, u_s 为吸力, a 为试验参数, p_{at} 为大气压力。式

(4) 曾对国内外多组非饱和土试验数据进行预测分析, 预测结果与实测结果基本一致, 且参数确定简便具有较好的实用价值。

2 非饱和和重塑膨胀土的强度试验

2.1 应力应变特性

试验膨胀土取自广西, 基本物理力学参数见表 1。重塑非饱和膨胀土试样的制备, 先用 2 mm 筛对土样进行过筛, 按 17%~18% 的初始含水率配置土样, 并在密封的塑料袋中养护 24 h, 再按 $\gamma_d = 1.42$ 、1.48、1.54 g/cm³ 3 种制备三轴试样。试验是控制吸力方式下进行非饱和土的剪切试验, 剪切前按设定的吸力大小和净围压下固结 3~4 d, 待非饱和土样固结稳定后, 再进行排水剪切试验, 剪切速率 0.0064 mm/min。

表 1 膨胀土的基本参数

Table 1 The basic physical parameters of the expansive soil

颜色	比重	塑限 /%	液限 /%	塑性指数	自由膨胀率 /%	粘粒含量 /% (<0.005 mm)
棕黄色	2.70	30.3	61.4	31.1	35.0%	49.9%

图 1~3 为应力-应变曲线和轴向应变-体应变曲线, 表 2 为剪切试验结束时土样的平均含水率值。从图 1~3 的试验结果可以看出, 相同吸力状态下, 非饱和和低密度重塑膨胀土样剪切表现应变硬化和剪缩特点, 随围压的增大剪缩现象更为明显; 非饱和和高

密度重塑膨胀土样剪切表现应变软化和剪胀的特点, 低围压时剪胀更为明显。产生这一现象的原因与土样的孔隙结构相关, 图 4 为干密度 γ_d 分别为 1.42 和 1.54 g/cm³ 两种土样的扫描电镜照片, 从图 4(a)可以看出低密度试样的单个孔隙直径较大, 孔隙与孔隙的连通性也好, 在压力作用下土样被压缩压密, 随着土样的密实增加, 主要表现出剪缩性, 而土的强度在不断增加, 又表现出硬化的特点。对应的图 4(b)的土样密度较高, 土样内部单个孔隙较小, 孔隙与孔隙之间的连通性也差一些, 在压力作用下土颗粒变密实, 呈剪缩性; 土颗粒紧密排列后再进一步施加压力, 由于土颗粒又不可压缩, 压力作用使得土颗粒重新排列, 表现一定剪胀性。土样电镜扫描的微结构特征证实了非饱和和重塑膨胀土的应力应变的特点。

表 2 剪切试验结束时土样的平均含水率值

Table 2 The average water content of soil samples after finishing shear

吸力 /kPa	平均含水率 /%		
	$\gamma_d = 1.42 \text{ g/cm}^3$	$\gamma_d = 1.48 \text{ g/cm}^3$	$\gamma_d = 1.54 \text{ g/cm}^3$
50	26.6	26.5	26.1
120	24.3	24.2	23.9

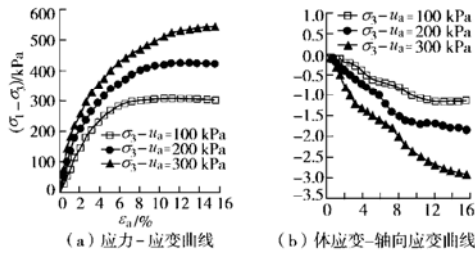


图 1 土样 $\gamma_d = 1.42 \text{ g/cm}^3$, $u_s = 50 \text{ kPa}$ 的试验结果

Fig. 1 The triaxial test results with $\gamma_d = 1.42 \text{ g/cm}^3$ and $u_s = 50 \text{ kPa}$

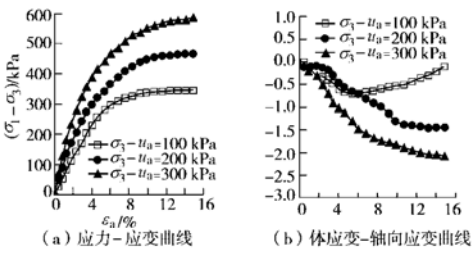


图 2 土样 $\gamma_d = 1.48 \text{ g/cm}^3$, $u_s = 50 \text{ kPa}$ 的试验结果

Fig. 2 The triaxial test results with $\gamma_d = 1.48 \text{ g/cm}^3$ and $u_s = 50 \text{ kPa}$

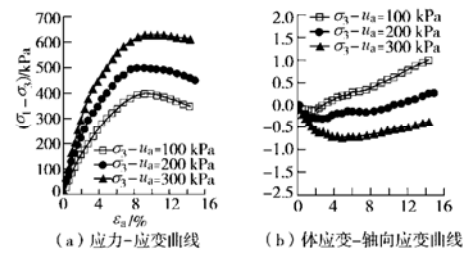


图 3 土样 $\gamma_d = 1.54 \text{ g/cm}^3$, $u_s = 50 \text{ kPa}$ 的试验结果

Fig. 3 The triaxial test results with $\gamma_d = 1.54 \text{ g/cm}^3$ and $u_s = 50 \text{ kPa}$

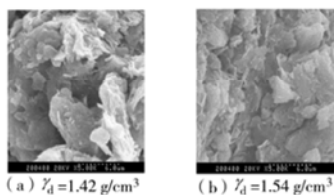


图4 非饱和和重塑膨胀土样电镜扫描照片

Fig. 4 Scanning electron microphotographs of the remold expansive soil

2.2 强度特性

1.42 g/cm³ 的非饱和和重塑膨胀土样分别进行吸力为 0、25、50、80、120 和 200 kPa 的剪切试验, 试验得到的强度结果列于表 3。

表3 非饱和和重塑膨胀土剪切试验结果

Table 3 The shear test results of unsaturated remold expansive soils

吸力/kPa	c/kPa	τ_{us}/kPa	$\varphi/(\circ)$
0	44.0	0	21.7
25	53.9	9.9	21.4
50	64.0	20	21.7
80	76.6	32.6	21.7
120	86.6	42.6	21.9
200	101.9	57.9	21.5

三轴试验结果表明非饱和和重塑膨胀土样的内摩擦角接近常数, 与吸力无关, 吸力强度随吸力的增大而增加。将表 3 中的 τ_{us} 和 u_s 进行分析整理, 以便找出两者的关系。从图 5 可看到两者存在有双曲关系。 a 、 b 的物理意义见图 6, a 为斜率, 是无量纲量, b 为截距。对广西膨胀土, $a = 0.563$, $b = 0.00448 \text{ kPa}^{-1}$ 。

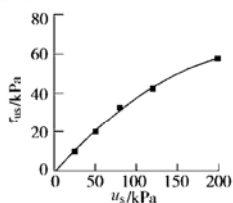
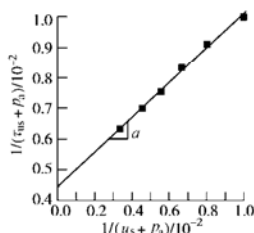


图5 吸力强度与吸力的关系曲线

Fig. 5 The relationship between suction strength and matric suction

图6 吸力强度双曲模型参数 a 、 b 的物理意义Fig. 6 Determination of parameters a and b of suction strength hyperbola model

3 结 论

(1) 非饱和和重塑膨胀土的应力 - 应变曲线的硬化与软化及体变的剪缩剪胀特性与土样内部的单个孔

隙孔径大小及孔隙间的连通性密切相关, 低密度试样内部单个孔隙孔径较大且连通性较好, 应力 - 应变曲线表现为硬化和体变呈剪缩性, 当土样密度增大后逐步由硬化 - 剪缩向软化剪胀转化。

(2) 广西非饱和和重塑膨胀土的吸力强度随着吸力增加而增大, 吸力强度与吸力呈双曲关系。

参考文献:

- [1] BJENUM L. Progressive failure in slopes of over consolidated Plastic clay soil[J]. J Mechanics and Found Div ASCE, 1967, **93**(SM5):3 - 50.
- [2] SKEMPTON A W. Fourth rankine lecture long term stability of clay slopes[J]. Geotechnique, 1964, **14**(2): 1 - 35.
- [3] BISHOP A W, BJERRUN L. The relevance of the triaxial test to the solution of stability problems[J]. Research Cconf on Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, 1960, 437 - 501.
- [4] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984. (LIAO Shi-wen. Expansive soils and rail-road engineering [M]. Beijing: The Railway Pvblisher, 1984.)
- [5] 廖济川. 膨胀土抗剪强度的研究概况[C]// 全国首届膨胀土科学研讨会论文集. 成都: 西南交通大学出版社, 1990. (LIAO Ji-chuan. Research review of shear strength of the expansive soil[C]// Proceeding of 1st Expansive Soils Dymposium of China. Chengdu: Publisher of Southwewst Transportation University, 1990.)
- [6] 包承纲. 非饱和和压实土的气相形态及孔隙压力消除问题 [C]// 第三届全国土力学和基础工程会议论文集. 北京, 1979. (BAO Cheng-gang. Issue of the air phase and pore pressure dissipation of unsaturated compaction soils[C]// Proceeding of 3rd Soil Mechanics and Fovndation Engineering Conference, Beijing, 1979.)
- [7] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils[J]. Geotechnique, 1963, **13**(3): 177 - 196.
- [8] FREDLUND D G, MORGENSTEM N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, **15**: 313 - 321.
- [9] 卢肇钧, 吴肖茗, 等. 膨胀力在非饱和土强度理论中的作用[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(5): 20 - 27. (LU Zhao-jun, WU Xiao-ming, et al. Swelling stress application in the strength theorv of unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(5): 20 - 27.)
- [10] MIAO Lin-chang, LIU Song-yu, LAI Yuan-ming. Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil [J]. Engineering Geology, 2002, **65**(4): 261 - 267.