

重塑非饱和黏性土 UU 抗剪强度参数与饱和度的关系

熊承仁^{1,2}, 刘宝琛¹, 张家生¹, 刘多文³

(1. 中南大学, 湖南长沙 410075; 2. 湖南科技大学, 湖南湘潭 411201;

3. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南长沙 410011)

摘要: 土的饱和度是基于水分状态和密度状态的一个衍生变量, 存在因应水分状态变化和因应密度状态变化的两类饱和度变化过程。根据 23 组不同水分状态和密度状态的 UU 三轴压缩试验结果, 讨论了重塑非饱和黏性土抗剪强度参数与饱和度的关系。数据分析表明, 黏聚力和与水分状态相关的饱和度的关系是强非线性的, 和与密度状态相关的饱和度的关系是准线性的。内摩擦角和与水分状态相关的饱和度的关系是强非线性的, 和与密度状态相关的饱和度的关系是弱非线性的。

关键词: 重塑非饱和黏性土; 三轴压缩试验; 抗剪强度参数; 水分状态; 密度状态; 特征饱和度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2003)06-0019-04

中图分类号: S152

Relation of Shear Strength Parameters with Saturation of Remolded Unsaturated Cohesive Soil

XIONG Cheng-ren^{1,2}, LIU Bao-chen¹, ZHANG Jia-sheng¹, LIU Duo-wen³

(1. Central South University, Changsha 410075, Hunan Province, China;

2. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan Province, China;

3. Planning Survey & Design Institute of Communication of Hunan Province, Changsha 410011, Hunan Province, China)

Abstract Saturation is derived from water content and dry density of soil. There are two patterns of varying process of saturation, one is related with variation of moisture state, other is related with density state. There are 23 groups UU triaxial compression tested with experimental specimens in six different moisture states and four density states were conducted according to five classes of surround pressure as 100, 200, 300, 450 and 600 kPa. Experimental results show that shear strength parameters of remolded unsaturated cohesive soil vary regularly in certain extent with saturation, but not available to be presented by one or two simple functions. Cohesion has a strong nonlinear relation with moisture state related saturation and a quasi-linear relation with density state related saturation respectively. Internal friction angle has a strong nonlinear relation with moisture state related saturation and a weak nonlinear relation with density state related saturation respectively.

Keywords remolded unsaturated cohesive soil; triaxial compression test; shear strength parameters; moisture state; density state; characteristic saturation

土的饱和度 S_r 是基于水分状态和密度状态的一个衍生变量。当土的水分状态一定时, 其饱和度因密度状态不同而不同; 当土的密度状态一定时, 其饱和度因水分状态不同而不同。水分状态与密度状态的不同组合塑造出不同饱和度的非饱和土。本文取含水量 w 作为水分状态变量, 取干密度 d_s 作为密度状态变量。非饱和土的力学习性尤其是土的抗剪强度参数直接取决于其物理状态变量的大小及其组合。含水量一定时, 因干密度变化引起的饱和度变化称为密度状态

相关的饱和度变化, 相应的饱和度变量本文记为 S_r^d ; 干密度一定时, 因含水量变化引起的饱和度变化称为与水分状态相关的饱和度变化, 相应的饱和度变量本文记为 S_r^w 。

关于非饱和土的研究方法和研究内容, 至今学术界的讨论还相当活跃^[1-6], 无论是理论分析, 还是实验验证以及工程应用等方面都还存在较大的探索空间。作者近期针对重塑非饱和黏性土开展了一系列实验研究, 包括基质吸力测试、显微结构观测和三轴强

收稿日期: 2003-05-15 修回日期: 2003-08-20

作者简介: 熊承仁 (1965-), 男 (汉族), 湖北潜江人, 1987 年于中国地质大学获工学硕士学位, 现为中南大学博士生, 主要从事岩土力学及工程地质的教学与研究。E-mail: xiongc@xtpu.org.cn

度实验,积累了一定的试验数据。在文献 [8] 中讨论了重塑非饱和黏性土 UU 抗剪强度参数与土水分及密度状态变量的关系,本文着重讨论饱和度的变化对重塑非饱和黏性土 UU 抗剪强度参数的影响。

本试验的原土采自湖北省荆门市,土样呈土黄色,略具膨胀性。将原土晾干、碾碎,并过 0.5 mm 筛,然后取其中细粒部分(粉质黏土)用作为本次试验用土,其基本土性参数见表 1。

表 1 试验用土的基本物性参数

土样定名	比重 G_s	17 mm 液限 w_L /%	塑限 w_p /%	自然膨胀率 W_{ef} /%	沙粒含量 /%	粉粒含量 /%	黏粒含量 /%	胶粒含量 /%
粉质黏土	2.76	46.3	25.1	47.0	3.5	47.4	14.6	34.5

1 试验方法与试样制备

1.1 KTG 三轴压缩仪与三轴试验参数设置

本次试验采用 KTG 三轴压缩仪进行 UU 剪切试验,该三轴仪以压缩空气为围压介质,最大围压 800 kPa,轴向压力由步进电机施加。整个实验过程由计算机控制。试样用乳胶膜包裹并在上下端口密封,以防止压力室高压空气进入土样。传统上密封方法采用橡皮筋箍紧,这种方法在中高围压(围压大于 450 kPa)时,常常密封失败。本次试验首次采用金属卡式弹簧环片代替传统的橡皮筋,效果很好。剪切应变速率设为 0.8 mm/min,围压设置为 5 个等级: 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 450 kPa, 和 600 kPa。

1.2 三轴试验试样制备

本试验设计制备 6 个水分状态和 4 个密度状态的三轴试样 24 组。设计含水量分别为: $w = 12\%$, 16% , 18% , 20% , 24% , 30% 。设计干密度分别为: $d_s = 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 \text{ g/cm}^3$ 。实际成型 23 组,共 115 个圆柱状试样。

试验过程中先后依设计含水量配制了不同水分状态的散状土样。土样配制后用 2 层塑料袋封装,置于恒温保湿箱内,不少于 4 d,以便袋内水分充分运移、混合均匀。各不同水分状态的土样均静置了 6~10 d 不等。散状土样的含水量以打样前实测含水量为准。实测含水量分别为: $w = 12.12\%$, 16.34% , 18.16% , 20.13% , 23.45% , 30.16% , 与原设计含水量基本接近。

采用自制分层打样器,分五层打土,按设计密度状态制备三轴试样。三轴试验试样尺寸: 体积 96 cm^3 , 横截面积 12 cm^2 , 高 8 cm。

同一水分状态、密度状态 (w, d_s), 打制 5 个平行试样(对应三轴试验中 5 级围压)。每制成一个试样,即将其装入贴有标识的塑料杯中密封,静置两天,以便水分在试样中迁移平衡。之后,开始不固结不排水三轴试验。

1.3 三轴试验结果

本文按库伦强度方程,对三轴试验数据进行整理,整理结果详见表 2。

表 2 不同水分状态和密度状态下的饱和度与 UU 抗剪强度参数

w /%	1.2 d_s / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)			1.3 d_s / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)			1.4 d_s / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)			1.5 d_s / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)		
	S_r	C	φ	S_r	C	φ	S_r	C	φ	S_r	C	φ
12.16	—	—	—	29.9	8	4.3	34.5	41	8.7	40.0	160	4.3
16.34	34.7	16	6.9	40.2	77	3.6	46.4	162	0.6	53.7	256	0.7
18.16	38.6	76	15.2	44.6	107	21.4	51.6	167	15.5	59.7	248	15.5
20.13	42.7	29	8.4	49.5	72	5.4	57.2	133	2.6	66.1	200	0.8
23.45	49.8	19	5.8	57.6	49	4.0	66.6	83	2.8	77.1	145	0.5
30.16	64.0	10	2.0	74.1	25	0.7	85.7	32	1.0	99.1	36	1.6

注: S_r — 土的饱和度 (%); C— 黏聚力 (kPa); φ — 内摩擦角 ($^\circ$); d_s — 干密度。

2 UU 抗剪强度参数与饱和度的关系

2.1 黏聚力与饱和度的关系

2.1.1 与水分状态相关的饱和度变化对黏聚力的影响。黏聚力 c 和与水分状态相关的饱和度 S_r^w 的关系是强非线性的(见图 1), 每一条 $c - S_r^w$ 曲线都具有特

征饱和度,在特征饱和度处 c 取极大值。在特征饱和度之前(饱和度小于特征饱和度时),随着饱和度的增大,黏聚力增大,而特征饱和度之后(饱和度大于特征饱和度时),随着饱和度的增大,黏聚力减小。

整个曲线簇呈迭瓦状右移分布。干密度较大时,曲线较宽缓,干密度较小时,曲线较紧闭。当干密度由

1.2 g/cm³ 增大到 1.5 g/cm³ 时, 特征饱和度从约 38% 增大到约 58%。这表明当干密度较小时, 特征饱和度和小, 而且饱和度变化对黏聚力影响较大。

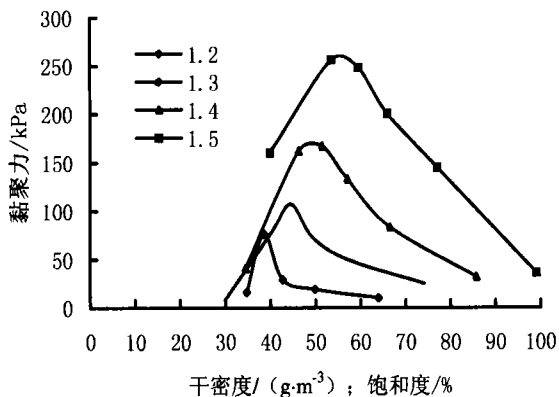


图 1 不同密度状态下黏聚力和与水分状态相关的饱和度的关系

特征饱和度之后, 黏聚力随饱和度的增大而下降, 当干密度由 1.2 g/cm³ 增大到 1.5 g/cm³ 时, 下降的形式从指数下降向线性下降过度。从这个意义上说, 高密度的土抗水性好, 而低密度的土抗水性很差。

如将 $c - S_r^d$ 曲线转换成 $c - w$ 曲线, 则曲线呈现出规则的重叠状^[8], $c - S_r^d$ 曲线中各不相同的特征饱和度在 $c - w$ 曲线中对应着大致相同的一个特征含水量 $w_1 = 18.16\%$, 规律性更加明显。

2.1.2 与密度状态相关的饱和度变化对黏聚力的影响 黏聚力 c 随密度状态相关的饱和度 S_r^d 增大而增大, 呈准线性关系 (见图 2)。曲线簇呈扇形散开, 向左下方呈收敛之势。含水量越小, $c - S_r^d$ 曲线越陡。含水量越大, $c - S_r^d$ 曲线越平缓。

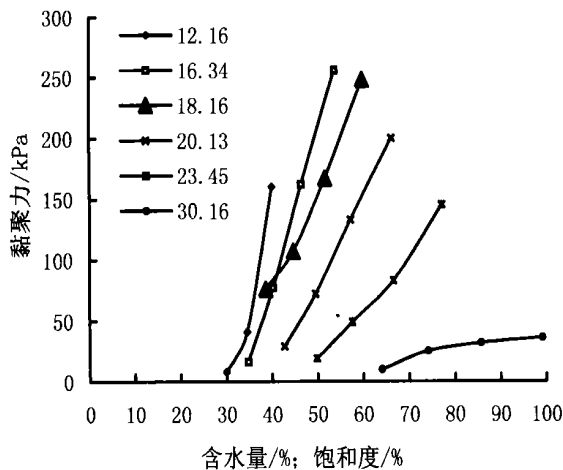


图 2 不同水分状态下黏聚力和与密度状态相关的饱和度的关系

图 2 表明在低含水量时, 饱和度的变化对黏聚力的影响比较大, 而在高含水量时, 饱和度的影响不显

著。即在低水分状态, 压密作用 (此时干密度增大, 饱和度增大) 导致的黏聚力的增加较显著, 而在高水分状态, 压密导致的黏聚力的增加效果不明显, 在中等水分状态, 压密导致的黏聚力的增加效果较好。

2.2 内摩擦角与饱和度的关系

2.2.1 与水分状态相关的饱和度变化对内摩擦角的影响 内摩擦角 h 和与水分状态相关的饱和度 S_r^d 呈强非线性关系, 每一条 $h - S_r^d$ 曲线表现为一种变形的“w”形状 (见图 3)。当干密度由 1.2 g/cm³ 增大到 1.5 g/cm³ 时, 曲线簇呈右移迭加。每条曲线峰值对应的即为前述特征饱和度值。如果把 $h - S_r^d$ 曲线转换为 $h - w$ 关系曲线, 则曲线簇的规律性更为明显, 好似数个重叠在一起的墨西哥尖顶帽^[8]。

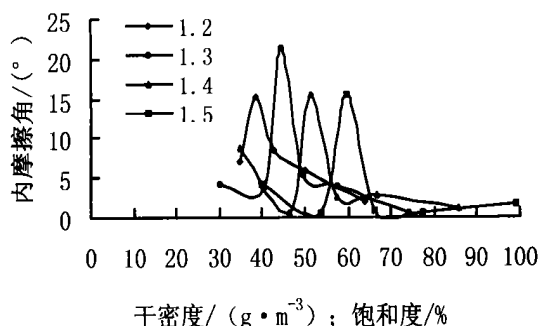


图 3 不同密度状态下内摩擦角和与水分状态相关的饱和度的关系

2.2.2 与密度状态相关的饱和度变化对内摩擦角的影响 从试验结果看, 内摩擦角和与密度状态相关的饱和度关系比较复杂, 其曲线形态与水分状态有关, 但总体而言, 二者呈弱非线性关系 (见图 4)。

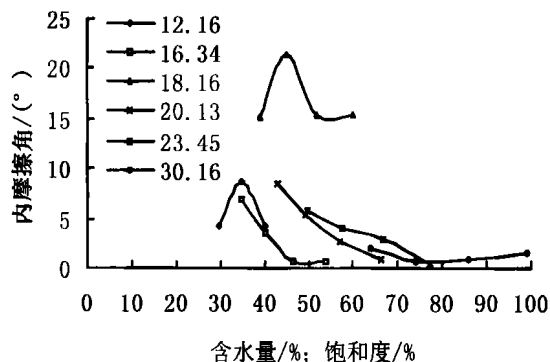


图 4 不同水分状态下内摩擦角和与密度状态相关的饱和度的关系

在特征含水量 $w_1 = 18.16\%$ 和本次试验最小含水量 12.16% 状态, h 与 S_r^d 呈非线性关系。在其他水分状态下, h 与 S_r^d 呈弱非线性关系, 即在含水量一定时, 内摩擦角随饱和度增大而近似线性地减小。

3 讨 论

在不考虑湿胀、湿陷和干缩等现象的情况下,一般而言,饱和度的变化与两类过程有关:其一是在保持体积不变的情况下,土体与外界进行水分交流,发生水分变化,即所谓干燥与湿润过程,简称干湿过程;其二是在隔绝水分的情况下,土体受到外力作用,发生体积变化,即所谓松散与压(紧)密过程,简称松散过程。干湿过程本质上是含水量的变化过程,松散过程本质上是干密度的变化过程。

从变量的定义和性质来看,饱和度是一个刻画土中三相介质体积关系的变量,表征孔隙水的体积占孔隙总体积的百分比,是一个无量纲的几何变量,严格地说,饱和度并不是土的物理性质变量。而含水量和干密度由于与质量因素有关,其物理涵义则相当明显。正因为如此,当我们把 $c-S^w$ 曲线、 $h-S^w$ 曲线转换成 $c-w$ 、 $h-w$ 关系曲线时,曲线簇的规律性更加明显。

因此含水量、干密度与土的力学参量的关系更有助于我们洞悉土的内在力学机制,而饱和度与土的力学参量的关系则可能会掩盖土的内在力学机制,过于从现象的层次来接近问题。然而,由于饱和度这一概念在描述土的充水状态时具有显著的几何清晰性和直观特性,人们偏爱于将它与土的力学性质参数联系起来。这种倾向在其它多孔介质的研究中更为突出。如何在理论分析、实验研究和工程应用上合理使用饱和度这一概念或变量,值得进一步探讨。

4 结 语

(1) 饱和度是基于土的水分、密度状态变量的一个衍生变量,存在因应水分状态变化和因应密度状态变化的 2 类饱和度变化过程。在相应的过程中,重塑非饱和黏性土的 UU 抗剪强度参数随饱和度的变化具有一定的规律性,但两类曲线的变化特性不同。

(2) 黏聚力和与水分状态相关的饱和度的关系为强非线性,与密度状态相关的饱和度的关系为准线

性;内摩擦角与水分状态相关的饱和度的关系为强非线性,与密度状态相关的饱和度的关系为弱非线性。

(3) 对于与环境有水分交流或受力发生体积变化的土体,在未来进一步研究的基础上,可以应用抗剪强度参数随饱和度变化的曲线对其抗剪强度特性实施动态监控,从而可能在工程应用的层次上做到“精确”评价和控制土体的稳定性。

(4) 与含水量相比,饱和度作为一个含水性变量,其几何特性甚于物理特性。利用饱和度的变化对应描述土的力学参量的变化特性时可能会掩盖土的内在力学机制,从现象的层次来接近问题。这一点在非饱和土力学研究中应引起注意。

本次试验是在湖南省交通规划勘察设计院土工试验室完成的,得到了许桂林主任和试验室全体人员的热情关怀与支持,中南大学的徐林荣博士提供了试验原土,在此一并致谢。

[参 考 文 献]

- [1] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论 [J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 1-9.
- [2] Fredlund D. G., Rahardjo H. 非饱和土土力学 (陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 蒋国澄, 等. 石振华合译) [M]. 北京: 建筑工业出版社, 1997. 278-290.
- [3] 卢肇钧, 张惠明, 陈建华, 等. 非饱和土的抗剪强度与膨胀压力 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14(3): 1-8.
- [4] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 82-90.
- [5] 黄文熙. 土的工程性质 [M]. (由卞富宗编写之第四章土的强度). 北京: 水利电力出版社, 1983. 294.
- [6] 吴世明, 杨挺, 周健, 等. 岩土工程新技术 [M]. (由徐永福编写之第 8 章非饱和土力学理论的研究进展). 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 248-298.
- [7] GB/T 50123-1999, 土工试验方法标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. 22-24, 28-37, 41-43, 96-98, 118-119.
- [8] 熊承仁, 刘宝琛, 张家生, 等. 重塑非饱和黏性土的抗剪强度参数与物理状态变量的关系研究 [J]. 中国铁道科学, 2003, 24(3): 17-20.