

非饱和和重塑土的干燥收缩试验研究

栾茂田, 汪东林, 杨庆, 李培勇

(1. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基质吸力和净平均应力的增大均可引起土体的压缩变形。针对砂土、粉土、黏土和软土 4 种不同类型土体, 结合试样收缩曲线和土水特征曲线分析了土体干燥过程中基质吸力和孔隙比的关系。试验结果表明: 土体干燥收缩过程中随着基质吸力的增大试样不断发生收缩, 当基质吸力增大到某特定值时, 基质吸力的增大对试样收缩变形无明显影响, 称此基质吸力为缩限吸力。屈服吸力 s_0 和缩限吸力 s_s 将试样收缩过程分为弹性阶段、弹塑性阶段和缩限阶段 3 个阶段。并且不同类型土体的缩限吸力不相同, 缩限吸力值与土体的塑性指数密切相关。在干燥收缩过程中, 当试样的饱和度减小到 90% 时试样完成了绝大部分收缩, 当试验饱和度达到 70% 时土样的孔隙比基本保持不变。

关键词: 非饱和土; 基质吸力; 收缩曲线; 土水特征曲线; 饱和度

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)01-0118-05

作者简介: 栾茂田(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋土力学理论与试验技术、岩土力学基本理论与数值分析、非线性动力学与岩土地震工程等方面的科研和教学工作。E-mail: mtluan@dlut.edu.cn。

Experimental study on drying shrinkage of unsaturated compacted soils

LUAN Mao-tian, WANG Dong-lin, YANG Qing, LI Pei-Yong

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Compression of soils could be caused by the increase of both matric suction and net mean stress. The empirical relationship between the matric suction and the void ratio on drying path was established for four types of soils including sand, silt, clay and soft clay by utilizing the shrinkage curves and the soil-water characteristic curves determined through experimental tests. It was indicated that during the process of drying, the soil samples continuously shrunk with the increase of matric suction. That is, Once the matric suction increased to a given value when the increase of suction would display no obvious effect on the shrinkage deformation of the soil samples and it was defined as the shrinkage limit suction s_s . The values of s_s were dependent on the plasticity index of soil. The process of shrinkage of soil was divided by the yielding suction s_0 and the shrinkage limit suction s_s into three stages, i.e., elastic stage, elasto-plastic stage and stage of shrinkage limit. Moreover, in the process of drying-shrinkage of soil samples, the shrinkage of the soil samples was almost fulfilled when the degree of the saturation of soil samples decreased to 90% and the void ratio of the soil samples almost kept unchanged while the degree saturation of soil was reduced to 70%.

Key words: unsaturated soil; matric suction; shrinkage curve; soil-water characteristic curve; degree of saturation

0 引言

通常情况下土体处于非饱和状态, 具有较大的负孔隙水压力。土体的负孔隙水压力使它具有不同于饱和土的性状。在大气影响和地下水位线变动下, 土体经常受到干燥收缩效应, 导致基质吸力和土体结构也随着发生变化。

一个单值的有效应力就可以描述饱和土的力学性状^[1]。非饱和状态时, Fredlund 等^[2]采用了两个独立的应力状态变量基质吸力 ($u_a - u_w$) 和净平均应力 ($\sigma_m - u_a$) 来描述非饱和土的力学性状。与净平均应力

相同, 基质吸力的增加也能使土样屈服和变形。近来, 很多学者对非饱和土基质吸力变化引起土体总体积变化和含水率变化做了大量工作^[3-6]。Fredlund^[7]对非饱和土提出了半经验的本构关系; Lloret 等^[8]提出了若干线性和非线性函数来描述非饱和土在 K_0 和各向等压加载条件下的本构面; 根据临界状态概念, Alonso^[9]针对非膨胀土和弱膨胀土提出了一个统一的弹塑性本

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50679015)

收稿日期: 2006-12-18

构模型 Barcelona Basic 模型。

针对非饱和和重塑砂土、粉土、黏土和软土，结合土体收缩曲线和土水特征曲线，本文考察了土体干燥收缩过程中在净平均应力 $\sigma_m - u_a = 0$ 下基质吸力和孔隙比的关系，采用常规固结试验考察了试样在基质吸力 $u_a - u_w = 0$ 下经受不同净平均应力时的压缩性。

1 试验设备和试样制作

土水特征曲线用压力板仪来量测。压力板仪的构造见图 1。其工作原理：土样与只透水不透气的进气值陶土板密切接触，排水管与大气相通，因此孔隙水压力与大气压力相等。在压力室内施加不同的气压值可以得到不同的基质吸力，这种方法称为轴平移技术。当试样吸力达到平衡后拆开压力室，量测每个试样的质量来测得其含水率的变化。在施加至最高一级基质吸力达到稳定后，取出试样来测定土样在最高基质吸力下的质量，然后将试样烘干称重，便可计算出试样在最高基质吸力下的含水率。利用此含水率和前已测得含水率变化值，反算出相应于其它吸力值的含水率，便可以绘制出基质吸力和含水率的关系曲线，即土水特征曲线。

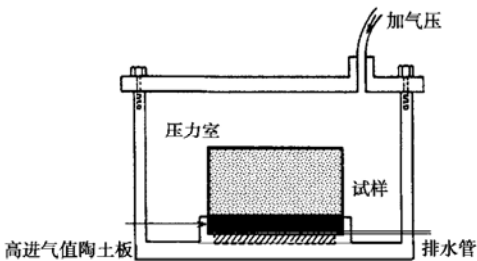


图 1 压力板工作原理示意图

Fig. 1 Operation principle of pressure-plate

本试验采用砂土、粉土、黏土和软土来考察不同类型土体的干燥收缩特性。土体的物理参数如表 1 所示。首先粉碎试验用土，然后在烘干箱中烘干 24 h 后过 2 mm 筛。对于这 4 种土样均要求在其最优含水率下压实到最大干密度，试样直径为 61.8 mm，高度为 20 mm，体积 60 cm³。

对于同种类型进行收缩试验和压力板试验的土样需具有相同的初始含水率和密实度，则可以视为初始状态相同的土样。把制备好的试样装入饱和器放入真空缸内，将抽气机与真空缸接通，对试样进行抽气饱和后，进行收缩试验和压力板试验。

2 试验结果与分析

2.1 干燥收缩试验

土水特征曲线反映了土体含水率与基质吸力之间

的关系。试样的土水特征曲线用 Fredlund^[10]的模型进行拟合。

表 1 不同类型土的物理参数

Table 1 Properties of the soils

土样 种类	w_L /%	w_p /%	I_p	G_s	w_{opt} /%	ρ_{dmax} /(g · cm ⁻³)
砂土	28.1	16.2	11.9	2.61	13.7	1.83
粉土	29.9	15.7	14.2	2.66	14.2	1.72
黏土	33.7	20.1	13.6	2.68	18.4	1.74
软土	32.1	15.7	16.4	2.68	14.6	1.81

$$\theta_w = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln[e + (\psi/a)^n] \right\}^m}, \tag{1}$$

$$C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln[1 + (1000000/\psi_r)]}, \tag{2}$$

式中， $C(\psi)$ 是为了保证试样基质吸力在 1.0×10^5 kPa 时土体的含水率为零， ψ_r 是指土样含水率为残余含水率时所对应的基质吸力，模型中的 a 、 m 和 n 是拟合参数。其中，参数 a 反映了空气进气值的大小， a 值要略大于空气进气值，参数 n 反映了在曲线斜率大小，参数 m 与残余含水率的值相关。

通过最小二乘法对所测的不同类型土体的土水特征曲线进行了拟合，如图 2 所示。

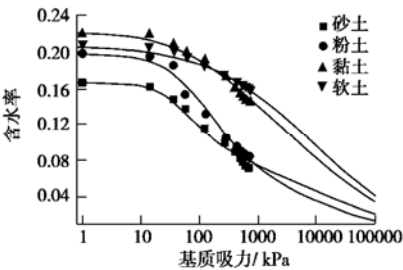


图 2 土水特征曲线

Fig. 2 The soil-water characteristic curve

收缩曲线反映了土体含水率与孔隙比之间的关系。在干燥失水过程中，试样发生收缩而导致孔隙比不断减小，当试样体积达到恒定而不继续缩小时的界限含水率称为缩限。试样在干燥过程中含水率与孔隙比之间的关系如图 3 所示。各种土样的缩限含水率 w_s 及所对应的孔隙比如表 2 所示。

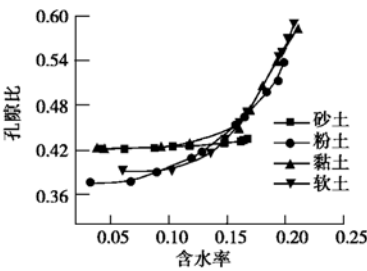


图 3 收缩曲线

Fig. 3 The shrinkage curves

在土样干燥收缩过程中,各个阶段含水率对应的基质吸力可以由土水特征曲线得到。结合收缩曲线和土水特征曲线,可以得到试样在净平均应力为 0 的条件下,失水收缩过程中基质吸力与孔隙比之间的关系,如图 4 所示。

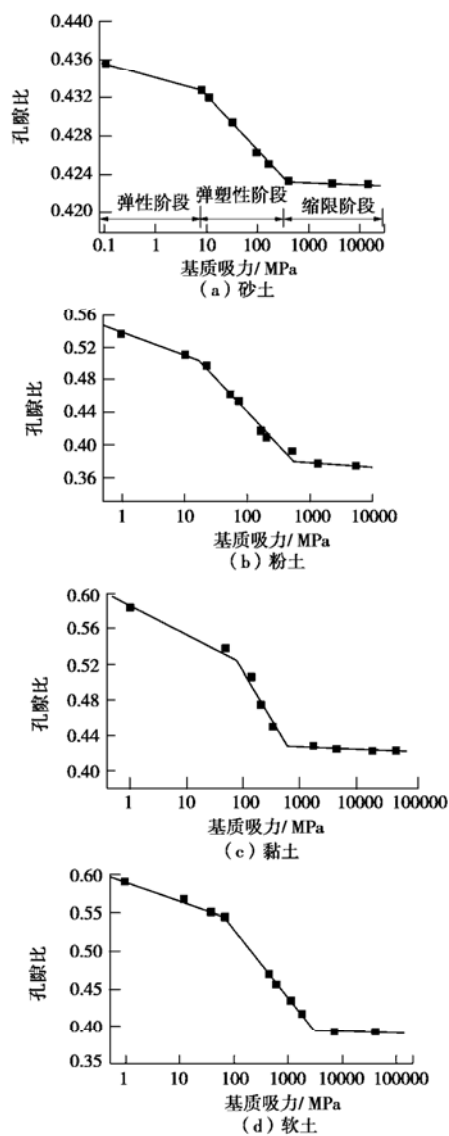


图 4 干燥过程中试样基质吸力与孔隙比之间的关系

Fig. 4 Relationship between matric suction and void ratio during drying stage

表 2 土体干燥收缩阶段特征参数

Table 2 Characteristic parameters for the drying-shrinking soils

土样 种类	收缩曲线		吸力—孔隙比曲线		土水特 征曲线
	$w_s/\%$	e	s_s/kPa	e	s'_s/kPa
砂土	9.14	0.423	368	0.423	319
粉土	9.28	0.380	528	0.379	458
黏土	15.38	0.430	633	0.431	583
软土	13.27	0.394	2882	0.392	2367

从图 4 中可以看到,随着基质吸力的增加试样的

孔隙比不断减小,试样发生收缩。与增加净平均应力相同,增加基质吸力也能使土样屈服。Alonso^[9]等提出的吸力增加屈服条件为

$$s = s_0 = \text{const} \quad (3)$$

式(3)代表的 SI 屈服曲线将土体的变形划分为 2 个区域,当 $s < s_0$ 时,土体处于弹性区域,反之,土体处于弹塑性区域。一般情况下认为 s_0 为土体在历史上曾经受过的最大基质吸力。

从图 4 中可以看到,当基质吸力增大到某一特定值时,试样的孔隙比基本保持不变,即基质吸力继续增大不会引起试样的收缩,笔者称此基质吸力为缩限吸力 s_s 。由于试样在失水收缩过程中,当试样的含水率达到缩限含水率 w_s 后,试样含水率的降低基本上不会引起试样的进一步收缩,而基质吸力却不断增大,所以在失水收缩过程中当基质吸力达到缩限吸力以后,基质吸力的增大不会引起试样的进一步变形。根据以上分析可知,试样的缩限吸力和缩限含水率 w_s 是相互对应的,即可假定试样收缩界限吸力 s_s 等于缩限含水率 w_s 在土水特征曲线中对应的基质吸力 s'_s 。

从表 2 中可以看到,收缩曲线中缩限含水率 w_s 所对应的孔隙比与吸力—孔隙比曲线中缩限吸力 s_s 所对应的孔隙比基本相等;并且试样缩限吸力 s_s 和吸力 s'_s 相差不大。试验结果也验证了上述假设的合理性。

从图 4 中可知,由于试样吸力达到缩限吸力 s_s 后,吸力的增大不再引起试样的进一步变形。因此,屈服吸力 s_0 和缩限吸力 s_s 将试样收缩过程分为弹性阶段、弹塑性阶段和缩限阶段。在各个阶段定义直线的斜率为体积收缩指数 $C_m = \frac{\Delta e}{\Delta \log u_s}$ 。4 种类型土体在各阶段的收缩指数如表 3 所示。结果表明:砂土收缩指数很小,可认为砂土基本上不具有收缩性,而软土的收缩指数虽然比黏土稍低,但是软土的收缩区域要远大于黏土,所以软土的收缩性要大于黏土。对于这 4 种土样,在缩限区域的收缩指数都仅仅是弹塑性区域收缩指数的 4% 左右。由此可见,在缩限阶段试样的孔隙比基本保持不变的假设是正确的。

从表 2 中可以看到,不同类型土体的缩限吸力大小并不相等。土体的塑性指数越大,试样的缩限吸力也越大,如图 5 所示。

试样在干燥收缩过程中,饱和度与孔隙比之间的关系如图 6 所示。从图中可以看到,对于这 4 种土体,当饱和度在减小至 0.90 过程中试样孔隙比迅速减小;试样饱和度处于 0.90~0.70 时,试样孔隙比缓慢减小;当试样饱和度减小到 0.70 时,试样的孔隙比基本保持不变。由此可见,试样干燥过程中当饱和度减小到 0.9 时,试样的收缩变形基本在此阶段完成。

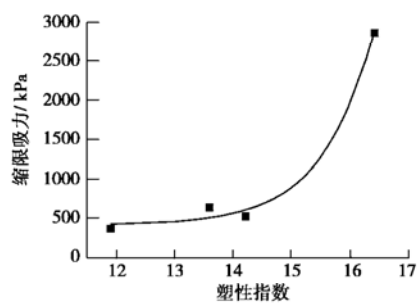


图 5 塑性指数与缩限吸力之间的关系

Fig.5 The relationship between plasticity index and shrinkage limit suction

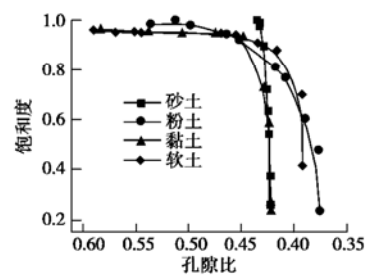


图 6 干燥过程中试样饱和度与孔隙比之间的关系

Fig. 6 Relationship between degree of saturation and void ratio during drying stage

2.2 固结试验

固结试验时研究土体一维变形特性的测试方法。它是测定土体在压力作用下的压缩特性，土体的压缩性实际上表示孔隙体积随压力的增加而减小。本文所测 4 种土体的固结试验成果整理乘 $e - \lg p$ 曲线，如图 7 所示。对于压缩曲线，先期固结压力 p_c 可将压缩曲线分为两个阶段，即弹性阶段和弹塑性阶段。对于这 4 种土体的回弹指数和在弹塑性阶段的压缩指数

$$C_s(C_c) = \frac{\Delta e}{\Delta \lg p}$$
，如表 3 所示。

表 3 压缩性试验的收缩、压缩指数

Table 3 Shrinkage (compression) index for compressibility tests					
土样 种类	收缩试验			固结试验	
	弹性 区域	弹塑性 区域	缩限 区域	压缩 指数	回弹 指数
砂土	0.0015	0.0057	1.9×10^{-4}	0.0213	0.0033
粉土	0.0275	0.0822	0.005	0.0322	0.0111
黏土	0.0334	0.1072	0.0039	0.0625	0.0124
软土	0.0246	0.0897	7.7×10^{-4}	0.0711	0.0145

对比图 4 和图 7 可以看到，随着基质吸力或净平均应力的增大，都可以使土体压缩变形。但是，屈服吸力和缩限吸力将干燥收缩过程（即基质吸力不断增大过程）分为弹性阶段、弹塑性阶段和缩限阶段 3 个阶段。当吸力增大到缩限吸力后，基质吸力的增大对

于土样的压缩并无明显影响。而对于固结压缩曲线，压缩曲线只分为弹性阶段和弹塑性阶段，即随着净平均应力的增大试样不断地被压缩。

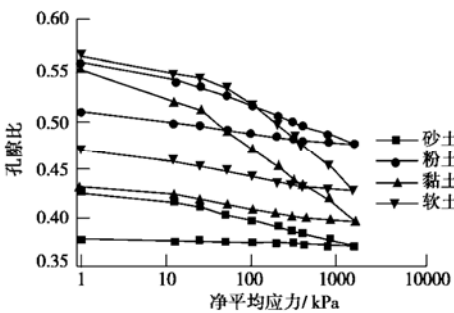


图 7 $e - \lg p$ 关系曲线

Fig. 7 The relationship between void ratio and net mean stress

3 结 论

试样在干燥过程中，随着土体饱和度的降低，基质吸力增大使得试样发生收缩变形。一般认为，屈服吸力 s_0 将试样收缩过程分为弹性和弹塑性两个阶段。但试验结果表明，当基质吸力达到一定值后，基质吸力的增大不引起土体的进一步收缩，笔者称此吸力为缩限吸力 s_s 。屈服吸力和缩限吸力将整个收缩过程分为弹性阶段、弹塑性阶段和缩限阶段。根据试验结果分析可知，缩限吸力 s_s 可假定为试样的缩限含水率在土水特征曲线中所对应的基质吸力。并且不同类型土体的缩限吸力大小并不相等，土体的塑性指数越大，缩限吸力也越大。

虽然净平均应力和基质吸力的增大，均可使土体压缩变形。对于固结压缩曲线，压缩曲线只分为弹性阶段和弹塑性阶段；而试样在干燥收缩过程中，屈服吸力和缩限吸力将收缩过程分为弹性阶段、弹塑性阶段和缩限阶段。并且在干燥收缩过程中，当饱和度在减小至 0.90 过程中试样孔隙比迅速减小，试样的收缩变形基本在此阶段完成；当试样饱和度减小到 0.70 时，试样的孔隙比基本保持不变。

参考文献:

[1] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: Wiley and Sons Ltd, 1943.

[2] FREDLUND D G. 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. (FREDLUND D G, ALONSOEE. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. CHEN Zhong-yi, ZHANG Zai-ming, CHEN Yu-jing, et al. translator. Beijing: China Architecture \$ Building Prell, 1997. (in Chinese))

[3] WHEELER S J, SIVAKUMAR V. An elasto-plastic critical

- state framework for unsaturated soil[J]. *Geotechnique*, 1995, **45**(1): 35 - 53.
- [4] JOSE H F PEREIRA, FREDLUND D G. Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, **126**(10): 907 - 916.
- [5] Fredlund D G, MORGENSTERN N R. Constitutive relations for volume change in unsaturated soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1976, **13**(3): 261 - 276.
- [6] SIVAKUMAR V, DORAN I G. Yielding characteristics of unsaturated compacted soils[J]. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 2000(5): 291 - 303.
- [7] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1977, **103**(5): 447 - 466.
- [8] LLORET A, ALONSO E E. State surface for partially saturated soils[C]// *Proceedings of the 11st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, 1985, **2**: 557 - 562.
- [9] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. *Geotechnique*, 1990, **40**(3): 405 - 430.
- [10] FREDLUND D G, XING A Q. Equations for soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**: 521 - 532.

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续 4 版确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中排列首位; 本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊), 并被评为“百种中国杰出学术期刊”; 本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”

等多个国内重要的数据库收录, 并可在《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、万方网和重庆维普网全文检索; 本刊被美国工程索引 Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, 大 16 开, 双栏排版, 160 页, 每月中旬出版, 每期定价 15 元, 全年 180 元。

本刊国际标准刊号 ISSN1000 - 4548, 国内统一刊号 CN32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 BM520。

欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: (210024) 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 联系电话: (025) 85829534, 85829553; 传真: (025) 85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)