DOI: 10.11779/CJGE2022S1007

原状膨胀土脱湿过程中多层次微细观结构演化特征与 概化模型

李甜果^{1,2}, 孔令伟*^{1,2}, 周振华^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所,湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要:采用多种测试手段,对脱湿至不同含水率膨胀土的微细观结构进行了研究,探究多层次下膨胀土微细观结构 的演化特征。试验结果表明:①膨胀土孔隙结构呈双峰分布,随着含水率的降低,孔隙体积逐渐减少。含水率较高时, 土体中含有较多的微裂隙和架空孔隙,形成疏松的结构,而随着含水率的降低,片状颗粒单元以面一面接触的方式形 成堆叠体,孔隙结构由以团聚体间孔隙为主转变为以团聚体内孔隙为主;②在脱湿初期,试样表面最先出现脱湿裂隙, 随着含水率的降低,试样内部的原始裂隙开始衍生出脱湿裂隙,并逐步向外扩展,最终相互贯通,贯通裂隙率与裂隙 率呈正相关关系;③随着含水率的降低,膨胀土孔隙和裂隙同步发展,孔隙体积的减小主要发生在脱湿的前期,裂隙 的发育在脱湿后期更为明显。

关键词: 含水率; 膨胀土; 孔隙结构; 裂隙; 微细观结构

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S1-0035-05 作者简介: 李甜果(1993-), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事膨胀土工程特性与微观结构方面研究。E-mail: litianguo16@mails.ucas.edu.cn。

Evolution characteristics and generalized model of multi-level microstructure of undisturbed expansive soils during dehumidification

LI Tian-guo^{1, 2}, KONG Ling-wei^{1, 2}, ZHOU Zhen-hua^{1, 2}

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100049 China)

Abstract: Using a variety of testing methods, the microstructure of the expansive soils dehumidified to different water contents is studied. The evolution characteristics of the multi-level microstructure of the expansive soils are discussed. The test results show that: (1) The pore structure of the expansive soils presents a bimodal distribution. As the water content decreases, the pore volume gradually decreases. At high water contents levels, the soils contain more micro-cracks and overhead pores, forming a loose structure, and as the water content decreases, the flaky particle units form a stack in a surface-surface contact, and the dominant pore structure changes from inter-aggregate pores to intra-aggregate ones. (2) At the initial stage of dehumidification, the dehumidification cracks appear first on the surface of the samples. As the water content decreases, the original cracks inside the samples begin to develop dehumidified ones, and gradually expand outward, and finally penetrate each other. The connective crack rate is proportional to the crack rate. (3) With the decrease of the water content, the pores and cracks of the expansive soils develop synchronously. The decrease of pore volume mainly occurs in the early stage of dehumidification, however, the development of cracks is more obvious in the later stage of dehumidification.

Key words: water content; expansive soil; pore structure; crack; microstructure

0 引 言

土的结构性是决定各类土力学特性的一个最为根本的内在因素^[1]。因此,要了解土体的工程性状,必须对土体的微细观结构进行研究。目前,研究土体结构性常采用的手段有压汞(MIP)试验、扫描电镜(SEM)试验、核磁共振(NMR)试验和计算机断层

扫描(CT)试验。其中, MIP 和 NMR 试验可以直接 或间接获得土体的微观孔隙分布特征, 但 NMR 试验 只能获得饱和土体的孔隙结构信息, SEM 试验可以获

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1509901) 收稿日期: 2022 - 09 - 25 *通信作者(E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn)

得土体的微观结构形态。根据仪器精度的大小,CT 试验获得的土体结构信息一般认为是细观尺度的。 Griffiths等^[2]、Jiang等^[3]和 Wang等^[4]研究了不同状态 下土体的微观结构特征。为了更加全面地反映土体的 孔隙结构特征,学者们还常常将两种试验结合来表征 土体的孔隙结构特征^[5-6]。与其他土体不同,裂隙性是 是影响膨胀土渗透、强度和变形特性的重要影响因素, 对揭示膨胀土灾变机制具有重要意义^[7-9]。已有学者开 展了对膨胀土裂隙发育规律的研究^[10]。裂隙性膨胀土 的结构包括微观尺度的孔隙结构与细观的裂隙结构, 意味着单一的测试手段难以全面反映膨胀土的结构特 征,对于评价膨胀土的工程特性存在局限性。为此, 刘宽等^[11]采用 NMR 和 SEM 试验,并结合数码相机拍 照,从多尺度方面分析了干湿环境下膨胀土力学性能 劣化机制,为膨胀土微细观结构的研究提供了新思路。

膨胀土富含亲水性黏土矿物,土体从高含水率脱 湿至低含水率的过程中,常常会产生很多裂隙,因此, 定量表征膨胀土的微细观结构特征及其随含水率的变 化规律,对认识其工程特性行为至关重要。本文以膨 胀土为研究对象,对不同含水率膨胀土进行了 MIP 试 验,探究含水率对膨胀土孔隙分布的影响;借助 SEM 图像,更直观地解释含水率对膨胀土微观结构的影响。 同时,采用 CT 扫描技术,对脱湿过程中裂隙的演化 规律进行了研究。

1 试验土样与方法

1.1 试验土样

土样为取自新疆的原状样,呈灰白色,裂隙发育。 土的液限和塑限分别为72.5%和32.6%,自由膨胀率 为97.3%,土体所含蒙脱土含量为46%,为强膨胀土。

1.2 试验方案

(1) 微观孔隙结构试验

将原状样从饱和的状态脱湿至不同含水率进行 MIP试验。首先,对环刀样进行饱和,再将其从环刀 中推出,用钢丝锯小心将土样切割为1 cm³的方块, 然后在温度为20°C的恒温室内脱湿,通过称重法得到 不同含水率试样,冷冻干燥后开展 MIP 试验。本研究 中所有试样含水率控制均为26.5%(饱和状态),20%, 15%和10%。

(2) 微观结构形态分析试验

SEM 试验试样制备过程与 MIP 试验相似,当土体达到设计含水率并冷冻干燥后,用手小心掰出新鲜的断面进行观察。

(3) 细观裂隙结构试验

采用 CT 扫描试验对土样的裂隙结构进行研究,

仪器的最小分辨率 51 um,大于一般的土体孔隙尺寸。 因此,本研究中,将 CT 试验获得孔隙和裂隙,统称 为裂隙。试验土样为Φ50×100 mm 的圆柱体。将饱 和试样放在温度为 20℃的恒温室内进行脱湿,当试样 脱湿至设定含水率后使用保鲜膜将其包裹,使水分均 匀分布。最后,依次对不同含水率下的试样进行 CT 试验。

2 膨胀土微细观结构演化特征

2.1 脱湿过程中膨胀土孔隙结构演化特征

原状膨胀土 MIP 试验结果如图 1 所示。一定的压 力下,退汞曲线对应的体积值比进汞曲线对应的体积 值要大,说明退汞存在滞留现象。含水率越小,累积 孔隙体积越小。含水率为 10%的膨胀土最终累积孔隙 体积比饱和样减少了 53.2%。MIP 试验测得的不同含 水率试样的孔隙率随含水率的变化曲线如图 2 所示, 随着含水率的降低,孔隙率先线性快速减小后逐渐变 缓,表明当土体含水率减小到一定程度时,含水率的 减小所引起的孔隙体积的改变逐渐减小。





图 2 孔隙率随含水率的变化曲线

Fig. 2 Relationship between porosity and water content

不同含水率试样的孔隙密度分布曲线如图 3 所 示,可以看出,新疆膨胀土具有明显的双峰孔隙特征。 随着含水率的降低,团聚体间孔隙优势孔径和团聚体 内孔隙的优势孔径减小。总体而言,在较高含水率下, 团聚体间孔隙占主导地位,随着孔隙水的散失,团聚 体间孔隙逐渐减小甚至消失,一部分较大孔隙转化为 较小孔隙,孔隙组成以团聚体内孔隙为主。





2.2 脱湿过程中膨胀土微观结构形态分析

脱湿至不同含水率膨胀土的 SEM 图像见图 4~6。 由于 SEM 试验和 CT 试验观察到的裂隙尺度不同,将 SEM 试验观察到的裂隙称为"微裂隙"。随着含水率 的降低,"微裂隙"减少且宽度变窄,甚至逐渐闭合。 当含水率为 26.5%时, 土体表面附着有大量的土碎片 结构,这些碎片以架空的形式构成了架空孔隙(图 5 (f)),这是饱和样具有疏松结构的主要原因。随着含 水率的降低,土体表面少见碎片,说明土体的结构性 较强。更大倍数下的 SEM 图像(图 6)显示,含水率 较低时,片状颗粒呈卷曲状。当含水率较高时,以片 状颗粒单元构成的团聚体间形成了较多的孔隙(图 5 (e)),以及片状颗粒以点一面和边一面接触的形式形 成了架空孔隙,随着含水率的降低,片状颗粒多以面 一面接触的形式层层叠加,进而形成了较大的集聚体, 土体中的孔隙以团聚体内的孔隙为主,这与压汞试验 结果一致。







注: a-d放大1000倍, e-f放大1000倍 图 5 不同含水率试样的 SEM 图像 Fig. 5 SEM images of soils with different water contents



图 6 不同含水率试样的 SEM 图像(放大 17000 倍) Fig. 6 SEM images of soils at different water contents

2.3 脱湿过程中膨胀土细观裂隙演化特征

随着脱湿的进行,膨胀土的表面形态变化如图 7 所示。饱和状态下,试样表面存在一些微小的原始裂 隙,这些裂隙多为闭合或微开状态。随着水分的散失, 一些裂隙从已有的裂隙处开始向四周扩散。在脱湿的 初期,肉眼可见的裂隙较少,分布较为分散,裂隙的 扩展方向较为单一,如图 7 (b)所示。随着水分的进 一步散失,土体中裂隙快速发育,但裂隙的扩展方向 没有明显的规律性,并产生了一些新的裂隙,裂隙之 间的连通性也逐渐增加。当含水率为 10%时,土样表 面的裂隙宽度变宽,裂隙之间逐渐贯穿为联通的裂隙, 如图 7 (d) 所示,土样表面的裂隙基本可以看作由两 条贯通的裂隙组成。



(a)w=26.5%(b)w=20%(c)w=15%(d)w=10% 图 7 不同含水率下膨胀土表面的裂隙的发育形态 Fig. 7 Development patterns of cracks on surface of expansive

soils with different water contents

本研究中将土样中原本存在的裂隙称为原始裂隙,由于脱湿产生的裂隙称为脱湿裂隙。脱湿过程中试样的二维切片如图 8 所示,当含水率为 26.5%时,试样中存在一定原始裂隙,裂隙形态主要为线状,较为集中的分布在一个区域。当含水率降低为 20%时,从试样的边缘萌生出一些短而小的脱湿裂隙,内部裂隙没有发生明显变化。此时,试样中的裂隙以原始裂隙的主,随着含水率减小为 15%时,边缘的脱湿裂隙向试样内部扩展,其内部的原始裂隙也逐渐发展并与其他裂隙贯通,同时,在试样的边缘依然不断产生新的脱湿裂隙,脱湿裂隙的增加速率明显增加。当含水率为 10%时,裂隙分布于试样的各个区域。试样内部裂隙以原始裂隙为主干,并逐渐延长变宽,裂隙的主

方向没有明显改变,而脱湿裂隙则表现为数量多、长 度短、没有明显的方向性的特征。

对膨胀土裂隙重建其三维模型,如图9所示。随着含水率的降低,裂隙的分布位置由集中在局部逐渐 发展为分布于整个试样。使用 Avizo 软件对联通裂隙 进行分析,结果如图 10 所示。可以看出,当 w=26.5%, 联通的裂隙主要被分为上下两个主要的裂隙,上面的 联通裂隙较大,下面的联通裂隙较小。当 w=20%时, 1、2 部位的裂隙增密增长,3 部位的裂隙也明显向上 扩展。当 w=15%时,1、2 和3 部位的裂隙有了更明 显的发展。当含水率减小至 10%时,联通裂隙几乎分 布于整个土体中。总的来说,随着含水率的降低,裂 隙更容易在己有裂隙的基础上向外发展。



图 9 不同含水率下裂隙的三维模型

(c) w=15%

(d) w=10%

(b) *w*=20%

(a) w=26.5%

Fig. 9 3D model for cracks under different water contents



图 10 联通裂隙的三维模型

Fig. 10 3D models for connective cracks

得到的联通裂隙率、裂隙率变化,如图 11 所示。 与 w>15%相比,当 w<15%时,裂隙率随含水率的减 小增加幅度明显更大。同时,联通裂隙率随着含水率 的减小明显增加,这些数据与 2.2 节中观察到的二维 图片和三维模型中裂隙的发展规律一致。进一步分析 可知,裂隙率与联通裂隙率之间存在良好的正相关关 系,如图 11 (b)所示,表明膨胀土中的裂隙越多, 裂隙之间的联通性增强,对土体结构的整体性损伤越 来越大。



Fig. 11 Variation of cracks and connective cracks

3 膨胀土微细观结构演化机制与概化 模型

从宏观角度来看,膨胀土由裂隙和土颗粒的团聚体组成,土颗粒的团聚体之间形成团聚体间孔隙和团聚体内孔隙,如图 12 所示。事实上,裂隙也是团聚体间孔隙,但为了更清楚地表达裂隙与孔隙之间的区别,这里以裂隙、团聚体内孔隙和团聚体间孔隙来描述土中的孔隙。



Fig. 12 Generalized model for microstructure of expansive soils

团聚体的收缩累积到一定程度,表现为团聚体组 内的团聚体颗粒之间的距离被拉的"更近",从而团聚 体间孔隙变小,团聚体组的收缩,宏观上表现为土体 体积的收缩。事实上,自然界中土体的收缩是不均匀 的,当团聚体组之间的张拉应力大于团聚体组之间的 抗拉强度时,原本存在的裂隙会被"拉长"和"拉宽", 使得裂隙扩展发育为更大的裂隙,或者在"薄弱"的 地方产生新的裂隙。相反,当张拉应力小于团聚体组 之间的抗拉强度时,这些团聚体组则会凝聚成更为密 实的结构,因此,膨胀土的结构表现为微观上团聚体 间孔隙的减少和细观上裂隙增多的现象。值得注意的 是,在 SEM 试验中,随着含水率的降低,观察到的 "微裂隙"数量减少且宽度变窄,而在 CT 试验中, 裂隙是逐渐增多的趋势,这是因为 SEM 观察到的裂 隙是微观尺度的"微裂隙"(约 30 um),这部分裂隙 附近土体之间还存在较强的粘聚力,在脱湿的过程中, 有可能在吸力的作用下被"拉近",产生闭合的现象。 而 CT 试验观察到的裂隙为细观尺度的裂隙,裂隙附 近的土体之间粘聚力较弱,在脱湿的过程中,往往容 易成为薄弱部位,从而发展为更大的裂隙。

事实上, 孔隙体积的减小和裂隙体积的增加是同步产生的。当含水率从 26.5% 脱湿至 15% 时, 微观上 孔隙率的减小速率为单位含水率减小 1.14%, 而细观 上裂隙率的减小速率为单位含水率减小 0.125%; 当含 水率小于 15%时, 孔隙率的减小速率为单位含水率减小 0.158%, 裂隙率的增加速率为单位含水率减小 0.35%。可以看出, 孔隙体积的减小主要发生在脱湿 的前期, 裂隙的发育在脱湿后期更为明显。



图 13 脱湿过程中土体微细观结构变化示意图

Fig. 13 Schematic diagram of microstructural evolution of soils during dehumidification process

4 结 论

(1)随着含水率的减小,膨胀土的孔隙率先快速 减小后逐渐变缓。孔隙分布以团聚体间孔隙为主逐渐 转变为以团聚体内孔隙占优势。

(2)膨胀土的颗粒单元以片状颗粒为主,当含水 率较高时,土体中含有纵横交错的"微裂隙"和大量 的架空孔隙,土体结构松散;随着含水率的降低,"微 裂隙"数量减小且宽度变窄,土体结构渐趋紧密,SEM 结果与 MIP 试验结果具有较好的一致性。

(3)随着水分的蒸发,原始裂隙在发育扩展过程 中主方向基本不变,脱湿裂隙自试样外侧向内发展, 数量多且杂乱无章。土体裂隙率随着含水率的降低而 增加,当含水率小于15%时,裂隙率增加明显。联通 裂隙率的增速随含水率的减小逐渐增加且与裂隙率之 间具有正相关关系。

参考文献

- 谢定义,齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6):651 - 656. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6):651 - 656. (in Chinese))
- [2] GRIFFITHS F J, JOSHI J C. Change in pore size distribution owing to secondary consolidation of clays[J]. International

Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991, **28**(6): A352.

- [3] JIANG M J, ZHANG F G, HU H J, et al. Structural characterization of natural loess and remolded loess under triaxial tests[J]. Engineering Geology, 2014, 181: 249 – 260.
- [4] WANG Y, YANG H, JING X. Structural characteristics of natural loess in northwest China and its effect on shear behavior[J].Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(1): 65 - 78.
- [5] DELAGE P, MARCIAL D, CUI Y J, et al. Ageing effects in a compacted bentonite: a microstructure approach[J]. Géotechnique, 2006, 56(5): 291 - 304.
- [6] LI T G, KONG L W, GUO A G. The deformation and microstructure characteristics of expansive soil under freeze-thaw cycles with loads[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 192: 103393.
- [7] 殷宗泽,徐 彬. 反映裂隙影响的膨胀土边坡稳定性分析
 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 454 459. (YIN Zong-ze, XU Bin. Slope stability of expansive soil under fissure influence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 454 459. (in Chinese))
- [8] LI J H, ZHANG L M. Study of desiccation crack initiation and development at ground surface[J]. Engineering Geology, 2011, 123(4): 347 - 358.
- [9] 孔令伟,陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工 程学报, 2012, 45(5): 141 - 161. (KONG Ling-wei, CHEN Zheng-han. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 141 - 161. (in Chinese))
- [10] 蔡正银,朱 洵,黄英豪,等. 湿干冻融耦合循环作用下 膨胀土裂隙演化规律[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8):
 1381 - 1389. (CAI Zheng-yin, ZHU Xun, HUANG Ying-hao, et al. Evolution rules of fissures in expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8):
 1381 - 1389. (in Chinese))
- [11] 刘 宽,叶万军,高海军,等. 干湿环境下膨胀土力学性能劣化的多尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报,2020, 39(10): 2148 - 2159. (LIU Kuan, YE Wan-jun, GAO Hai-jun, et al. Multi-scale effects of mechanical property degradation of expansive soils under drying-wetting environments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2148 - 2159. (in Chinese))