

DOI: 10.11779/CJGE201709012

表面张力与接触角对膨胀土干缩开裂影响的试验研究

杨 松¹, 吴珺华², 黄剑峰¹

(1. 云南农业大学水利学院, 云南 昆明 650201; 2. 南昌航空大学土木建筑学院, 江西 南昌 330063)

摘要: 用悬滴法对纯水、酒精溶液和肥皂水(表面活性剂)3种液体的表面张力进行测量, 比较3种液体表面张力的大小; 用躺滴法测量混有十八胺的两种土样的接触角。在此基础上, 针对不同表面张力和接触角的膨胀土试样进行收缩开裂试验。试验结果表明: 孔隙水表面张力和接触角对膨胀土的收缩开裂有重要影响。表面张力越小的试样, 其最终收缩开裂裂隙度越小, 但在裂隙发展阶段, 脱湿时间相同时, 孔隙水表面张力小的土样其收缩开裂裂隙度有可能大于表面张力较大的土样。增大土颗粒与孔隙水间的接触角可以很好的抑制膨胀土的收缩开裂, 接触角越大, 相同的脱湿时间下土体的收缩开裂裂隙度越小。减小孔隙水表面张力或增大接触角都会使土体中的弯液面曲率半径增大, 从而减小土体中的基质吸力。接触角的增大还有可能使弯液面由凹变凸, 基质吸力会因此消失, 从而很好的抑制膨胀土开裂。

关键词: 悬滴法; 躺滴法; 表面张力; 接触角; 干缩开裂

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)09-1645-08

作者简介: 杨 松(1982-), 男, 博士, 讲师, 主要从事非饱和土力学等方面的教学和科研。E-mail: yscliff007@126.com。

Effects of pore water surface tension and contact angle on dry-shrinkage cracking of expansive soils

YANG Song¹, WU Jun-hua², HUANG Jian-feng¹

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The surface tensions of water, alcoholic solution and suds (surfactant) are measured by using the pendent drop method, and then their values are compared. The contact angle of soil samples is measured by means of the sessile drop method, and the samples are mixed with octadecylamine. Based on the results, the tests on dry-shrinkage cracking are conducted on expansive soil samples with different pore water surface tensions and contact angles. The results indicate that the surface tension and contact angle have a major impact on the dry-shrinkage cracking of expansive soils. The soil samples with a less surface tension have a less final crack ratio. In the phase of cracking development, the samples with a lower surface tension have a higher crack ratio during the same amount of drying time. Increasing the contact angle of soil particles and pore water can hold back the dry-shrinkage cracking in expansive soils. For the soil samples during the same drying time, a larger contact angle will cause a smaller crack ratio. Both decreasing the surface tension and increasing the contact angle lead to the increase of the radius of curvature in pore fluid, and the matric suction thus decreases. Meniscus may become convex because of the larger contact angle, and the matric suction will disappear in this situation.

Key words: pendent drop method; sessile drop method; surface tension; contact angle; dry-shrinkage cracking

0 引言

黏土干燥收缩后其表面会产生裂隙, 这种现象在具有膨胀性的黏土中尤为突出。这些裂隙不仅会对边坡稳定性和土体的工程性质产生影响^[1-3], 还会引起优先流, 增加地下水污染的风险等^[4-5]。影响黏土开裂的因素很多, 许锡昌等^[6]对南阳膨胀土开裂特征及影响因素进行研究后发现: 环境温度对膨胀土脱湿有一定影响, 试样初始含水率与收缩开裂裂隙度正相关, 初

始干密度与收缩开裂裂隙度负相关。唐朝生等^[7]研究了初始饱和的糊状试样和不同压实状态的压实试样的体积收缩变形特征, 提出了压实试样收缩应变与初始干密度和含水率之间的函数关系。刘平等^[8]认为土体干缩裂隙的形成和发展是一个非常复杂的过程, 除了温度还受到包括黏粒含量、黏土矿物类型、土层厚度、

基金项目: 国家自然科学基金项目(41662021, 51209182, 51408291)

收稿日期: 2016-06-17

水分蒸发速率、盐分等因素的影响。

很显然,黏土干缩裂隙发展主要发生在非饱和状态,非饱和土和饱和土的主要区别是土中存在吸力,因此可以从非饱和土力学的角度对黏土开裂进行研究。李锦辉等^[9]通过试验发现裂隙土的土水特征曲线呈双峰特征,并且提出了一种预测裂隙土土水特征曲线的方法。李培勇等^[10]的研究成果表明,非饱和膨胀土裂隙开展深度与地表基质吸力有关。基质吸力是由非饱和土中水-气界面引起的,水-气交界面也被认为是非饱和土中的独立第四相^[11],描述界面张力和接触角关系的Young方程奠定了毛细理论的基础^[12]。然而,土力学中计算和测试基质吸力时却习惯把水-气界面张力设为常数同时认为接触角很小或趋近于0^[13-14],实际上,自然界中的非饱和土可能由于各种因素而使孔隙水表面张力或接触角发生明显的变化,例如:利用表面活性剂对膨胀土进行改性^[15-16],少量的表面活性剂就会大幅降低水的表面张力,而表面活性剂还被广泛用于治理斥水性土壤^[17];土体受到酸碱污染时,酸碱溶液会改变土体的力学性能,而酸、碱或一些有机化合物加入到水中也会改变水的表面张力^[18-19]。当土颗粒表面被有机物所覆盖,森林火灾,PH值变化等,土体可能表现出斥水性,即:土颗粒与孔隙水间的接触角变大^[20-21],接触角变化会对非饱和土中的基质吸力产生重要影响^[22]。

本文通过在水中加入少量乙醇或肥皂粉(阴离子型表面活性剂)来改变水的表面张力,在烘干土中加入斥水剂(十八烷基伯胺)来改变土颗粒的表现接触角,展开表面张力与接触角对膨胀土干缩开裂的影响研究,对比分析了不同表面张力和接触角下膨胀土裂隙的发展演化过程,希望能为进一步认识黏土开裂本质提供一个新思路。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自云南省境内昆曲高速公路严家山段,为浅灰色弱膨胀土,其自由膨胀率为55.7%,液限为41%,塑限为20.3%。取回的土样经过风干、碾碎后过2 mm的筛备用。为研究气-液界面张力对膨胀土干缩开裂的影响,采用3种不同表面张力的液体作为土中的液相,分别为:纯水、体积百分数为20%的酒精溶液和含量为2 g/L的肥皂水;通过在土体中混合斥水剂的方法配制不同接触角的土样,斥水剂十八烷基伯胺(C₁₈H₃₉N),简称:十八胺,为碱性白色蜡状粉末,纯度为99%,配制两种斥水土样,十八胺含量分别为:0.2%和0.4%。各土样的成分和编号如表

1所示。

表1 土样组成与编号

Table 1 Parameters of soil samples

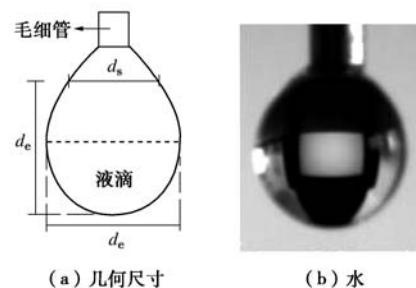
试样 编号	S1	SZ1	SZ2	SJ1	SJ2
试样 组成	纯水+ 纯土	20%酒 精+纯土	2g/L 肥皂 水溶液+ 纯土	纯水 +0.2% 纯土	纯水 +0.4% 十八胺 十八胺

1.2 表面张力测量试验

为比较3种液体表面张力的大小,采用悬滴法对液体的表面张力进行测量,悬滴法的基本原理是:处于毛细管端液体悬滴的形状与液体的表面张力有关,在重力作用下,毛细管端形成的球形液滴的形变,随着液滴有效密度的增加而增加并随着液滴界面张力的增加而减小。通过Young-Laplace方程可以推导得到悬滴法计算表面张力的基本方程^[23]:

$$\gamma = \frac{\Delta \rho g R_0^2}{\beta} \quad , \quad (1)$$

式中, γ 为表面张力, $\Delta \rho$ 为两相流体的密度差(液体的密度-空气的密度), g 为重力加速度, R_0 为实际液滴的最大直径, $1/\beta = f(S)$, S 反映了液滴的外形(图1(a)), $S = d_s/d_e$, d_e 为悬滴的最大直径, d_s 为悬滴在选择平面的直径。 S 和 $1/\beta$ 的关系可以通过查表求得^[23]。试验在JC2000型接触角测量仪上进行(图2),为保持液体表面张力测试的温度和干缩开裂试验温度一致,仪器放置在恒温箱中,温度控制为50℃,待测液体需要加热到50℃后再进行表面张力测量试验。试验具体步骤如下:先把待测液体抽入微量进样器中(针尖直径为0.7 mm),把进样器固定在仪器自动注液仪上,自动注样3 μL 后液体在注样器针尖产生悬滴,通过光学放大系统和图像采集系统获取悬滴的外形图片(图1(b)~(d)),由式(1)计算待测液体的表面张力。计算得到水、酒精溶液和肥皂水的表面张力分别为: $6.8 (10^{-2} \text{ N/m})$, $4.0 (10^{-2} \text{ N/m})$, $2.2 (10^{-2} \text{ N/m})$ 。因此可以得到结论:水的表面张力 $>$ 20%酒精溶液的表面张力 $>$ 2 g/L肥皂水的表面张力。



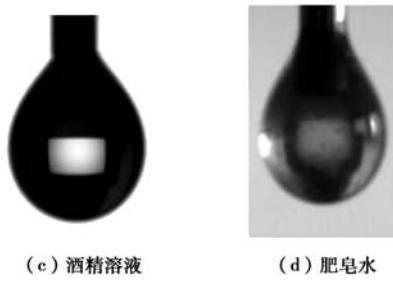


图 1 悬滴的几何形状

Fig. 1 Geometric shapes of pendent drop

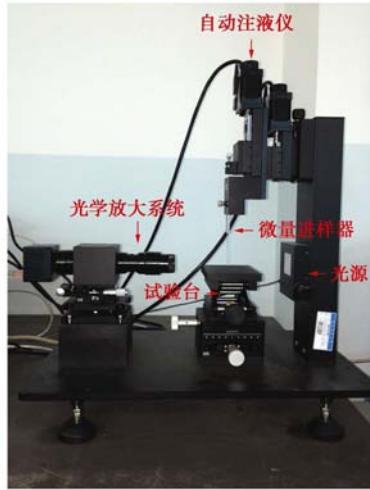


图 2 JC2000型接触角测量仪

Fig. 2 JC2000 contact angle measuring devices

1.3 接触角测量试验

目前测量粉体接触角(包括土颗粒)的方法主要有3种^[24]: 躺滴法、毛细管上升法和Wilhelmy平板法, 其中, 躺滴法测出的接触角为介于前进接触角和后退接触角之间的表观接触角, 毛细管上升法测出的接触角为前进接触角, Wilhelmy平板法测出的接触角为前进接触角或后退接触角。土体开裂是一个相对较慢的过程, 因此土颗粒与孔隙水的接触角大部分时间应该处于前进接触和后退接触角之间的某一表观接触角。所以, 本文采用躺滴法对土颗粒接触角进行测量。土样烘干后过0.075 mm的筛, 取长度为4 cm左右的双面胶带贴到载玻片上, 将筛好的土颗粒均匀覆盖载玻片, 并用重量为200 g的砝码压住载玻片, 持续时间为2 min, 移开砝码后反复轻轻磕碰载玻片以去除多余的土颗粒, 直到胶带表面覆盖有一层薄薄的土颗粒, 且土颗粒分布均匀无明显凸起。

如图3所示, 当水滴滴到被纯土覆盖的胶带上时, 液滴迅速扩散开, 此时土颗粒的亲水性很好, 接触角趋近于0。水滴滴到另外两个覆盖着混有十八胺土样的载玻片时, 形成了小液滴, 此时固-液界面和气-液界面之间的夹角不为0, 把这2块载玻片分别放到试验台上进行液滴在土颗粒表面的表观接触角测量,

液滴初始体积为5 μL , 测量仪器为JC2000型接触角测量仪, 如图4所示, 每个土样的接触角反复测量5次后取平均值。十八胺含量为0.2%土样的接触角为30.5°, 十八胺含量为0.4%土样的接触角为60.2°。



图 3 躺滴法测量接触角的试样

Fig. 3 Contact angles of soil measured by sessile drop method



图 4 不同十八胺含量膨胀土的接触角测量试验

Fig. 4 Contact angles of soil samples with different proportions of octadecylamine

1.4 试验过程

把筛好的土放入105℃烘箱内烘至恒重备用。设计土样的干密度为1.5 g/cm³, 含水率计算不考虑酒精溶液和肥皂水引起的液体密度变化, 制样含水率为16%~18%。采用轻型击实仪制圆柱试样, 试样直径为102 mm, 高40 mm, 试样制好后用真空饱和法进行饱和, 其中, SZ1样用20%酒精溶液饱和, SZ2样用浓度为2 g/L的肥皂水饱和, 其余试样均为纯水饱和, 抽气时间为6 h, 试样在真空下的浸泡时间为12 h。

为缩短试样的脱湿时间以减小酒精挥发造成的浓度降低, 饱和试样脱湿采用低温烘干法, 烘箱的温度控制在50℃(小于酒精的沸点和十八胺的熔点), 当2 h内试样的质量变化量不超过2 g时停止试验。试验开始后, 前8 h每隔30 min把试样从烘箱中取出后先称重, 随后进行拍照记录, 称重和拍照的时间控制在30 s内, 拍照结束后把试样放入烘箱继续脱湿, 6 h以后拍照间隔时间增加为1 h。

2 试验结果

2.1 水分蒸发与临界含水率

图5给出了不同表面张力的3种试样含水率随时间变化的关系曲线。从图5中可以看出, 随着试样干燥时间的增加, 试样的含水率是不断减小的。图中3

条曲线均存在两个明显的变化阶段, 即: 常速率阶段和减速率阶段, 这表明土体中孔隙液体表面张力改变并没有改变土体蒸发失水过程中含水率的变化规律。图中每条曲线都给出了一个对应的试样图像, 该图像是试样干燥过程中刚出现裂隙时所对应的图像, 此时试样所对应的含水率为干缩开裂的临界含水率, S1 样干燥 3.4 h 出现裂隙, 此时对应的含水率为: 34.9%; SZ1 样在试样干燥 1.5 h 后就出现了初始裂隙, 此时的含水率为 37%; SZ2 样出现裂隙的时间明显晚于 S1 和 SZ1 样, 为 5 h, 对应的含水率为 21.2%。图 6 则是不同接触角的 3 种试样含水率随时间变化的关系曲线, 试样干燥过程中也出现了常速率阶段和变速率阶段, 但土颗粒接触角为 30.5° 的 SJ1 样出现裂隙的时间为 5.5 h, 要晚于纯土试样 S1。接触角为 60.2° 的 SJ2 样出现裂隙的时间在所有试样中是最晚的, 为 9.5 h, 对应的临界含水率也最小。很显然, 土颗粒与孔隙水接触角的增大可以延长土体出现初始裂隙的时间。

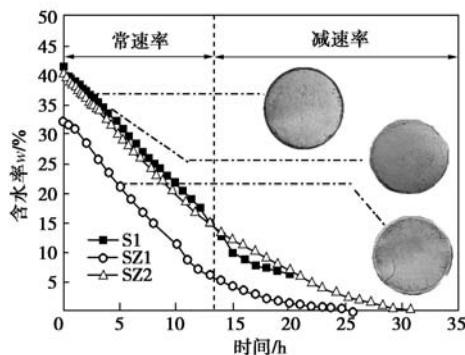


图 5 不同表面张力试样含水率随时间变化曲线

Fig. 5 Variation of water content with time in soil samples with different surface tensions

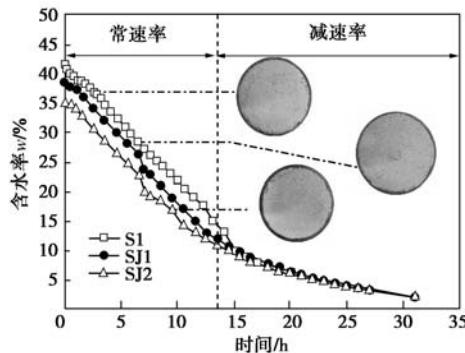


图 6 不同接触角试样含水率随时间变化曲线

Fig. 6 Variation of water content with time in soil samples with different contact angles

2.2 裂隙演化过程分析

图 7 给出了 5 个试样在脱湿结束后对应的收缩开裂图像。从图中可以看出, 每个试样均出现了不同程度的收缩裂隙, 各试样表面裂隙最终形态具有大致相似的规律: 3 条裂隙相交于一点, 把圆形表面分成了 3

个部分, S1 样和 SZ2 样的裂隙较宽, 试样开裂明显, 其余试样裂隙发育不明显, 裂隙在形成过程中先形成一条主裂隙, 主裂隙发育过程中支裂隙开始发育, 最终支裂隙和主裂隙相交形成 3 条裂隙。S1 样和 SZ1 样不仅出现了裂隙, 在试样和钢环接触的地方还出现了明显的分离, 试样出现了体缩, 其余试样也出现了不同程度的体缩, 但并不明显。

为得到试样的裂隙度, 先要对采集到的试验开裂图片进行图像处理, 如图 8 所示, 先对采集到的膨胀土干缩过程图像进行二值化, 去除一些非裂隙杂点, 再把二值化图像进行矢量化, 矢量化后的图像通过 AUTOCAD 提取试样收缩面积和裂隙面积, 最后计算出试样的收缩开裂裂隙度^[6]:

$$\delta = \frac{(S_0 - S_t) + S_f}{S_0} \quad (2)$$

式中 δ 为收缩开裂裂隙度 (%); S_0 为试样初始面积; S_t 为脱湿时间为 t 的试样面积, S_f 为试样表面的裂隙总面积。

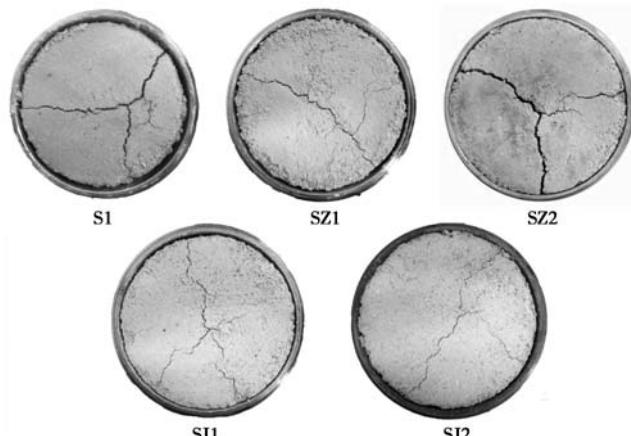


图 7 试样最终收缩开裂图像

Fig. 7 Photos of final shrinkage-cracking of soil samples

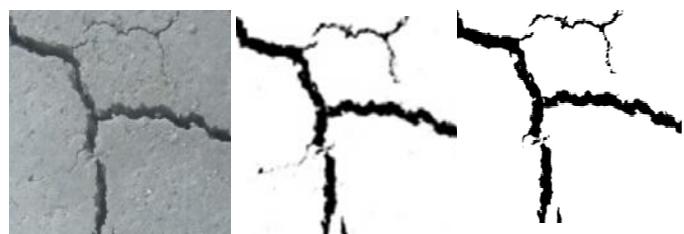


图 8 裂隙图像处理过程

Fig. 8 Image processing of cracks

图 9 为不同表面张力下试样收缩开裂裂隙度随时间的变化关系曲线, 从图中可以看出, 土样收缩裂隙发展基本分为 3 个阶段, 第一阶段为土体收缩开裂酝酿阶段, 此时试样刚开始蒸发失水, 失去的水分主要为土体表面的孔隙水, 此阶段中土体表面没有产生收

缩开裂。第二阶段为收缩开裂迅速发展阶段, 此阶段土体表面收缩开裂迅速发展直到进入第三阶段: 收缩开裂稳定阶段, 此时随着试样脱湿时间的增加, 收缩开裂裂隙度基本不再发生变化。SZ2 样最先进入收缩开裂稳定阶段, 稳定时的收缩开裂裂隙度为 6.7%, SZ1 样最后进入收缩开裂稳定阶段, 其最终收缩开裂裂隙度为 7.9%, S1 样进入收缩开裂稳定阶段的时间则介于二者之间, 试样的最终收缩开裂裂隙度为 10.3%。很显然, 孔隙液体表面张力越小的试样, 试样最终收缩开裂裂隙度越小, 但在土体表面裂隙发展阶段, 相同的脱湿时间, 孔隙水表面张力小的试样其收缩开裂裂隙度有可能大于表面张力较大的土样。

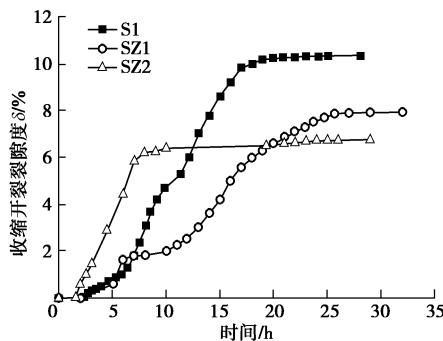


图 9 不同表面张力试样收缩开裂裂隙度随时间变化曲线

Fig. 9 Variation of crack ratio with time in soil samples with different surface tensions

图 10 为不同接触角试样收缩开裂裂隙度随时间的变化关系曲线, 接触角变化后, 土体收缩开裂的 3 个阶段并不会发生改变, 但土颗粒的接触角越大, 试样经历第一阶段, 即收缩开裂酝酿阶段的时间越长, 相同的脱湿时间, 接触角越大的土样所对应的收缩开裂裂隙度越小。试验结束后, SJ1 样和 SJ2 样的最终收缩开裂裂隙度分别为 5.2% 和 4.3%, 是所有试样中收缩开裂裂隙度最小的两个, 其中接触角最大的 SJ2 样的试样最终收缩开裂裂隙度又比 SJ1 样小。由此可见, 增大土颗粒与孔隙水间的接触角可以很好的抑制土体的收缩开裂。

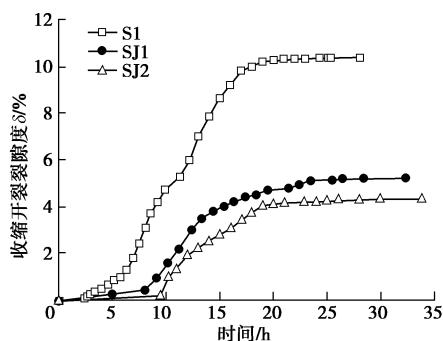


图 10 不同接触角试样收缩开裂裂隙度随时间变化曲线

Fig. 10 Variation of crack ratio with time in soil samples with different contact angles

3 讨 论

3.1 接触角和表面张力抑制膨胀土裂隙发育的机理分析

从前面的试验可知, 减小孔隙水表面张力或增大土颗粒与孔隙水间的接触角都可以抑制膨胀土的干缩开裂, 然而, 增大接触角对膨胀土收缩开裂的抑制效果明显好于减小孔隙水表面张力。结合图 11 的颗粒模型和毛细管模型对其机理进行分析。

当土颗粒间由液桥连接时(对应于非饱和土中的水封闭状态), 其基质吸力 φ 为

$$\varphi = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (3)$$

式中 γ 为液体的表面张力, r_1 和 r_2 是任意一对相互垂直的平面在液面上所截取曲线的曲率半径, 当曲率中心在液体侧时其值为“负”, 反之为“正”。设 φ 为“正”时表示吸引, φ 为“负”时表示排斥。传统的非饱和土力学中, 基质吸力都大于零, 不会是负值。这是因为: 在岩土工程领域中, 通常把岩土体都视为完全亲水性材料, 即孔隙水与土颗粒的接触角为 0, 即使在模型计算时所涉及的接触角也是比较小的, 这种情况下基质吸力只可能为正, 即: 非饱和土中只存在负的孔隙水压力。然而, 接触角增大后, 基质吸力就可能由“正”变为“负”, 接触角较大的土体具有斥水性, 即土中不存在基质吸力。含水率越小的土体其斥水性越大, 随着含水率的增大, 土体的斥水性有可能随之消失^[21]。

当 $r_1=r_2=r$ 时, 用毛细管模型来反映土体中的孔隙(对应于非饱和土中的双开敞状态), 由于此时弯液面的曲率中心只有一个, 因此, r_1 和 r_2 只能同号, 即要么一直亲水要么一直斥水, 则式 (3) 变为

$$\varphi = \gamma \frac{2}{r} \quad , \quad (4)$$

自然界中大部分土颗粒的亲水性都比较好, 其接触角也比较小甚至为 0^[25], 脱湿开始后饱和土样中的孔隙水开始蒸发, 有些孔隙中出现弯液面, 基质吸力因此产生, 在基质吸力作用下裂隙开始发育。随着产生弯液面的孔隙越来越多, 土体中的基质吸力不断增大, 土颗粒间产生了相对移动, 有些土颗粒间的距离相对增大, 在宏观上表现为土体开裂; 有些土颗粒间的距离相对减小, 在宏观上就表现为土体收缩, 此过程一直持续到土体中的孔隙水由双开敞变为水封闭, 由式 (3) 可知, 此时由于弯液面出现曲率中心在液体侧的曲线, 使基质吸力降低, 但相应的张力吸力增加^[26], 土体中毛细力基本不变, 收缩开裂也趋于稳定。

减小土体中孔隙水的表面张力(如图11(c)所示)会使弯液面曲率半径增大,由式(3)和式(4)可知, γ 减小, r 增大, 基质吸力 ϕ 也会随之减小, 且 γ 越小, ϕ 也越小, 因此土样的最终收缩开裂裂隙度 $SZ2$ 最小, $SZ1$ 次之, $S1$ 最大。增大土颗粒与孔隙水间的接触角可以增大弯液面的曲率半径, 甚至使弯液面由凹变凸, 此时土体中的基质吸力将消失(图11(a))。通常情况下, 当接触角大于 90° 为斥水, 小于 90° 为亲水, 然而土颗粒出现斥水时的接触角却可以小于 90° , 且含水率越小土体的斥水性越明显, 当含水率增加到一定值时, 斥水性会消失^[27-28]。另一方面, 土颗粒的斥水性还和颗粒形状、干密度等诸多因素有关^[29]。斥水性土体在干燥收缩过程中, 弯液面曲率半径增大, 一部分土颗粒间甚至由于凸液面的出现导致基质吸力消失(式(3)和式(4)), 接触角越大, 凹液面的曲率半径越大, 土体中出现的凸液面越多, 基质吸力很小或消失必然导致土体的收缩开裂减少, 这与试验结果是一致的。

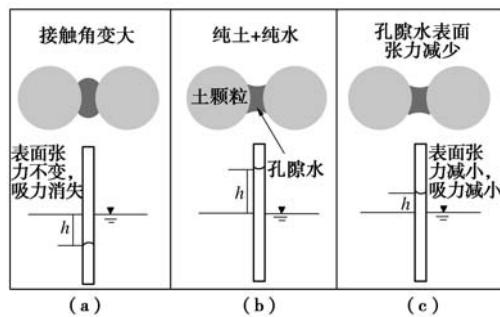


图11 不同表面张力与接触角的毛细作用示意图

Fig. 11 Diagrammatic drawing of capillary effect with different surface tensions and contact angles

3.2 试验结果与膨胀土改性

实际工程中可以通过不同方式对膨胀土进行改性, 在膨胀土中加入砂、矿渣等低比表面积颗粒物质, 改变了膨胀土中的孔隙结构, 增大了孔隙水弯液面曲率半径, 减小了基质吸力, 自然能使膨胀土的收缩开裂程度降低, 这类方法原理简单, 但掺合物用量较大, 张鑫等^[30]通过掺绿砂对膨胀土进行改良, 并用试验确定绿砂改性膨胀土的最佳掺合比为20%。孙树林等^[31]则通过在膨胀土中掺入高炉水渣对其进行改良, 试验确定的最佳掺合比为15%。另外一种常用的改良膨胀土的方法是在膨胀土中加入各种改性剂^[15, 32], 这类改性剂主要以阳离子表面活性剂为主, 表面活性剂能以较低的浓度而显著改变界面性质。一般情况下黏土表面是带负电的, 当阳离子型表面活性剂吸附到土颗粒表面时, 以其带正电荷的头基朝向土颗粒表面, 而疏水基则脱离表面呈定向排列, 使土颗粒表面变得疏水,

即: 增大了土颗粒与孔隙水间的接触角, 膨胀土收缩开裂的性质自然得到了改善。本文试验中采用膨胀土混合少量斥水剂也同样达到了增大土颗粒接触角的效果, 这也为改良膨胀土提供了一个新思路。

4 结 论

(1) 土体蒸发失水存在两个明显的变化阶段: 常速率阶段和减速率阶段, 这两个阶段并不会因为孔隙水表面张力或接触角的改变而发生变化。减小孔隙水表面张力并不能使土体出现初始裂隙的时间增长, 而增大孔隙水与土颗粒间的接触角则可以延长土体出现初始裂隙的时间。

(2) 孔隙水表面张力对膨胀土的干缩开裂有重要影响。表面张力越小的试样, 其最终收缩开裂裂隙度越小, 但在土体表面裂隙发展阶段, 相同的脱湿时间, 孔隙水表面张力小的试样其收缩开裂裂隙度有可能大于表面张力较大的土样。

(3) 增大土颗粒与孔隙水间的接触角可以很好的抑制膨胀土的收缩开裂, 接触角越大, 相同的脱湿时间下土体的收缩开裂裂隙度越小。

(4) 土体的干缩开裂是一个物理过程, 是受到基质吸力和孔隙水表面张力共同作用产生的。基质吸力和表面张力会使土颗粒间发生相互移动, 表面张力和接触角的改变直接导致弯液面曲率半径发生变化, 从而对土体的干缩开裂产生影响, 其原理为改良膨胀土提供了一个新思路。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 陈铁林, 邓刚, 陈生水, 等. 裂隙对非饱和土边坡稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 210-215. (CHEN Tie-lin, DENG Gang, CHEN Sheng-shui, et al. Effects of fissures on stability of unsaturated soil slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 210-215. (in Chinese))
- [3] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727-732. (KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water stability of Xiangjing expansive soils and their mechanical effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 727-732. (in Chinese))

- [4] ZHANG Z B, PENG X, ZHOU H, et al. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, **146**: 53 – 65.
- [5] JARVIS N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, **58**(3): 523 – 546.
- [6] 许锡昌, 周 伟, 陈善雄. 南阳重塑中膨胀土脱湿全过程裂隙开裂特征及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(9): 2569 – 2575. (XU Xi-chang, ZHOU Wei, CHEN Shan-xiong. Study of cracking characteristics and influencing factors for remolded Nanyang expansive soil in dehydration process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(9): 2569 – 2575. (in Chinese))
- [7] 唐朝生, 崔玉军, TANG Anh-minh, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(8): 1271 – 1279. (TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG Anh-Minh, et al. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(8): 1271 – 1279. (in Chinese))
- [8] 刘 平, 张虎元, 陈 毅, 等. 土的干缩开裂研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2015, **11**(增刊 1): 352 – 358. (LIU Ping, ZHANG Hu-yuan, CHEN Yi, et al. Review on desiccation cracking of clay soils[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, **11**(S1): 352 – 358. (in Chinese))
- [9] 李锦辉, 郭凌波, 张利民. 考虑裂隙动态变化时裂隙土土水特征曲线的预测方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(6): 1288 – 1296. (LI Jin-hui, GUO Ling-bo, ZHANG Li-min. Prediction of SWCC for unsaturated cracked soil considering development process of cracks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, **32**(6): 1288 – 1296. (in Chinese))
- [10] 李培勇, 杨 庆, 莱茂田, 等. 非饱和膨胀土裂隙开展深度影响因素研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 1): 2967 – 2972. (LI Pei-yong, YANG Qing, LUAN Mao-tian, et al. Research on influential factors of crack propagation depth of unsaturated expansive soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(S1): 2967 – 2972. (in Chinese))
- [11] FREDLUND D G, MORGENSEN N R. Stress state variables for unsaturated soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 1977, **103**: 447 – 466.
- [12] 赵亚溥. 表面与界面物理力学[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (ZHAO Ya-pu. *Surface and interface physical mechanics*[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [13] 张 昭, 刘奉银, 张国平, 等. 不等径湿颗粒与液桥相互作用的微观水力特性[J]. 水利学报, 2013, **44**(7): 810 – 817. (ZHANG Zhao, LIU Feng-yan, ZHANG Guo-ping, et al. Microscopic hydraulic behavior from the interactions between uneven-sized wet particles and liquid bridge[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(7): 810 – 817. (in Chinese))
- [14] 贾其军, 赵成刚, 韩子东. 低饱和度非饱和土的抗剪强度理论及其应用[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 580 – 585. (JIA Qi-jun, ZHAO Cheng-gang, HAN Zi-dong. Study on shear strength of the unsaturated soils in pendular state and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(4): 580 – 585. (in Chinese))
- [15] 王保田, 任 鹰, 张福海, 等. 使用 CTMAB 改良剂改良天然膨胀土的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(增刊 2): 39 – 42. (WANG Bao-tian, REN Ao, ZHANG Fu-hai, et al. Experimental research on stabilizing expansive soil by CTMAB[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(S2): 39 – 42. (in Chinese))
- [16] LEHRSCH G A, SOJKA R E, KOEHN A C. Surfactant effects on soil aggregate tensile strength[J]. *Geoderma*, 2012, **6**(189/190): 199 – 206.
- [17] MÜLLER K, DEURER M. Review of the remediation strategies for soil water repellency[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, **144**(1): 208 – 221.
- [18] 成 娟, 李 玲, 刘 科. 液体表面张力系数与浓度的关系实验研究[J]. 中国测试, 2014, **40**(3): 32 – 34. (CHENG Juan, LI Ling, LIU Ke. Study on the relationship between liquid surface tension and concentration[J]. *China Measurement & Test*, 2014, **40**(3): 32 – 34. (in Chinese))
- [19] 葛 勇, 常传利, 杨文萃, 等. 常用无机盐对溶液表面张力及混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2007(6): 7 – 9. (GE Yong, CHANG Chuan-li, YANG Wen-cui, et al. Effect of organic salts on surface tension of solutions and properties of concrete[J]. *Concrete*, 2007(6): 7 – 9. (in Chinese))
- [20] 商艳玲, 李 毅, 朱德兰. 再生水灌溉对土壤斥水性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(21): 89 – 97. (SHANG Yan-ling, LI Yi, ZHU De-lan. Effects of reclaimed water irrigation on soil water repellency[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, **28**(21): 89 – 97. (in Chinese))
- [21] DIEHL D. Soil water repellency: dynamics of heterogeneous

- surfaces[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, **432**: 8 - 18.
- [22] 杨松, 龚爱民, 吴珺华, 等. 接触角对非饱和土中基质吸力的影响[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(3): 674 - 678. (YANG Song, GONG Ai-min, WU Jun-hua, et al. Effect of contact angle on matric suction of unsaturated soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(3): 674 - 678. (in Chinese))
- [23] 高树棠, 张启桓. 应用微悬滴法测定低界面张力[J]. *化学通报*, 1983(6): 27 - 33. (GAO Shu-tang, ZHANG Qi-huan. Measurement of low surface tension using pendant drop method[J]. *Chemistry*, 1983(6): 27 - 33. (in Chinese))
- [24] RAMIREZ-FLORES J C, BACHMANN J, MARMUR A. Direct determination of contact angles of model soils in comparison with wettability characterization by capillary rise[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **382**(1): 10 - 19.
- [25] HAJNOS M, CALKA A, JOZEFACIU G. Wettability of mineral soils[J]. *Geoderma*, 2013, **206**(9): 63 - 69.
- [26] 栾茂田, 李顺群, 杨庆. 非饱和土的基质吸力和张力吸力[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(7): 863 - 868. (LUAN Mao-tian, LI Shun-qun, YANG Qing. Matric suction and tension suction of unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(7): 863 - 868. (in Chinese))
- [27] SHIRTCLIFFE N J, MCHALE G, NEWTON M I, et al. Critical conditions for the wetting of soils[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(9): 094101.
- [28] CHAU H W, BISWAS A, VUJANOVIC V, et al. Relationship between the severity, persistence of soil water repellency and the critical soil water content in water repellent soils[J]. *Geoderma*, 2014, **2(221/222)**: 113 - 120.
- [29] 杨松, 吴珺华, 董红艳, 等. 砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(2): 145 - 150. (YANG Song, WU Jun-hua, DONG Hong-yan, et al. Soil water repellency of sands and clay as affected by particle size[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(2): 145 - 150. (in Chinese))
- [30] 张鑫, 孙树林, 魏永耀, 等. 掺绿砂改良膨胀土室内试验研究[J]. *岩土力学*, 2012(增刊 2): 209 - 212. (ZHANG Xin, SUN Shu-lin, WEI Yong-yao, et al. Laboratory test study of properties of expansive soil improved by waste foundry sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012(S2): 209 - 212. (in Chinese))
- [31] 孙树林, 唐俊, 郑青海, 等. 掺高炉水渣膨胀土的室内改良试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(7): 1940 - 1944. (SUN Shu-lin, TANG Jun, ZHENG Qing-hai, et al. Experimental study of expansive soil improved with granulated blast furnace slay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(7): 1940 - 1944. (in Chinese))
- [32] 刘清秉, 项伟, 张伟峰, 等. 离子土壤固化剂改性膨胀土的试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(8): 2286 - 2290. (LIU Qing-bing, XIANG Wei, ZHANG Wei-feng, et al. Experimental study of ionic soil stabilizer-improves expansive soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(8): 2286 - 2290. (in Chinese))