

文章编号:1673-9469(2026)02-0020-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.02.003

含砂黏土蒸发开裂特性试验研究

林志龙¹,李磊^{1*},王轶康²,陈俊豪³

(1.河海大学地球科学与工程学院,江苏南京210000;2.中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司,北京100024;3.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江杭州310014)

摘要:为明确含砂条件对黏土蒸发开裂的影响规律,通过室内试验模拟干旱环境,使黏土试样发育干缩裂隙;通过数字图像处理技术对形成的裂隙进行定量分析,基于裂隙发育的阶段性形态特征,建立土体干缩裂隙分级命名体系,探究不同温度(40~60℃)、不同掺砂率(0%~30%)以及不同掺砂粒径(0.0~2.0mm)对黏土干缩开裂的影响规律。试验结果表明:(1)含砂黏土干缩裂隙的发育可以分为三个阶段:形成阶段、发育阶段和稳定阶段。砂粒通过降低黏土的水分蒸发速率,减小了黏土表面应力场的变化幅度,延缓黏土裂隙的形成和发育;由于砂粒持水能力弱于黏土,裂隙容易在砂粒和黏土之间形成。(2)黏土基质中掺入砂粒可显著抑制裂隙发育,且随着含砂率的提高,其抑制效果逐渐增强;随着砂粒粒径的增大,砂粒对黏土发育裂隙的抑制作用呈现先增强后减弱的趋势,在试验条件下存在最优粒径范围(0.5~1.0mm);砂粒的阻裂效应随温度升高而增强。

关键词:含砂黏土;含砂率;砂粒径;图像处理;蒸发开裂

中图分类号:TU431

文献标识码:A

Experimental Study on the Evaporation Cracking Characteristics of Sandy Clay

LIN Zhilong¹, LI Lei^{1*}, WANG Yikang², CHEN Junhao³

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210000, China;

2. PowerChina Beijing Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China;

3. PowerChina Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

Abstract: To clarify the influence of sand incorporation on the evaporation cracking behavior of clayey soils, indoor experiments were conducted to simulate arid environments to induce the development of desiccation cracks in clay samples. Quantitative analysis of the formed cracks was performed using digital image processing techniques. Based on the staged morphological characteristics of crack evolution, a classification nomenclature system for soil desiccation cracks was established. The present study investigated the effects of temperature (40 to 60 °C), sand content (0% to 30%), and sand particle size (0 to 2.0 mm) on clay desiccation cracks. The experimental results demonstrate that: (1) Desiccation crack development in sandy clay progresses through three distinct stages: formation, development, and stabilization. Sand particles reduce the rate of moisture evaporation in clay, thereby diminishing fluctuations in the surface stress field and decelerating the crack initiation and development. Sand particles exhibit inferior water-holding capacity compared to clay particles, leading to the preferential formation of cracks at the interfaces between sand particles and clay particles. (2) Incorporating sand into the clay matrix significantly suppresses crack development, with this effect strengthening as the sand content in-

收稿日期:2025-06-17 修回日期:2025-07-08

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3202704);江苏省水利厅科技项目(2024046)

第一作者:林志龙(2000—),男,江西上饶人,硕士,研究方向为环境岩土工程。

*通信作者:李磊(1976—),男,河南信阳人,博士,教授,研究方向为环境岩土工程。

creases. The crack-suppressing efficacy of sand particles exhibits a first increasing then decreasing trend as the particle size increases, with an optimal particle size range (0.5 to 1.0 mm) determined under the experimental conditions. Furthermore, the crack-suppressing effect of sand particles amplifies with rising temperatures.

Key words: sandy clay; sand content; sand particle size; image processing; evaporation cracking

自工业化进程开启以来,二氧化碳大量排放引发温室效应,导致全球气候变暖,区域极端高温干旱频发^[1]。高温会加快土体水分蒸发,导致土体失水收缩并形成干缩裂缝^[2-3]。而黏土因高亲水性及细颗粒特性,此类现象尤为显著^[4]。蒸发失水会改变黏土的物理力学性质和水理特性,从而引发一系列的工程问题^[5-10]。在工程领域,黏土因其良好防渗性能被广泛应用于防渗心墙^[6]、衬砌及铺盖护坡与边坡加固^[7]等工程中。然而,黏土发育裂隙会使其渗透系数呈数量级增长,力学性能显著劣化^[8],导致边坡抗滑稳定性下降^[9],甚至可能引发坝体渗漏、渠道溃决等重大工程事故^[10]。当前研究对黏土蒸发开裂机理的认知尚不完善,亟需通过系统性研究揭示其内在机制,为工程防裂设计提供更多的理论支撑。

黏土蒸发开裂受多重因素影响,包括干湿循环作用^[11-12]、极端气候条件^[13]以及矿物组分特征^[14-15]等。黎桢君等^[16]分析了三峡库区紫色土在不同厚度(10~30 mm)和不同直径(100~300 mm)条件下的干缩裂隙形态,发现厚度是裂隙面积和形态不规则性的主控因素,而直径对裂隙长度和宽度的影响更显著;曹雪山等^[17]通过对比膨胀土压实样与环刀试样的干缩试验,发现干湿循环过程中裂隙演化分为三个阶段,即初期形成细小裂隙、中期次级裂隙扩展、后期收缩合并,裂隙参数与土体强度指标呈线性负相关关系;刘瑞琪等^[18]模拟填埋场压实黏土层在含水率梯度作用下的开裂过程,揭示了含水率梯度驱动水分重分布是裂隙萌生的主要原因,裂隙主要沿土体弱面扩展,且初始含水率越高,裂隙网络的连通性越强;唐朝生等^[19]对南京地区的黏性土进行室内干缩开裂试验,发现温度是影响南京地区黏性土干缩裂缝的主要因素之一。

现有研究主要聚焦于土体外在环境对开裂的影响,而对土体材料的自身属性关注较少。自然界中的黏土是包含土颗粒、水和空气的三相体,且含有一定量的砂粒。在干燥条件下,黏土水分流失速率与干缩裂隙的形成、发育之间的关系有待进一步研究。为揭示砂粒对黏土干缩裂隙的影响

机理,本文通过控制温度(40~60 ℃)、掺砂率(0%~30%)及砂粒粒径(0.0~2.0 mm)这三个因素开展试验,并通过图像处理技术,构建了基于裂隙演化特征的定量评价体系。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

膨润土是一种以蒙脱石为主要成分的黏土矿物,在工程领域应用广泛^[10];其具有高膨胀性和强收缩性,在干燥过程中易形成裂隙。试验选用膨润土作为黏土基质。试验所用的膨润土购自四川省安新县皖东膨润土化工有限公司,呈黄褐色粉末状,其粒径分布情况见图1。

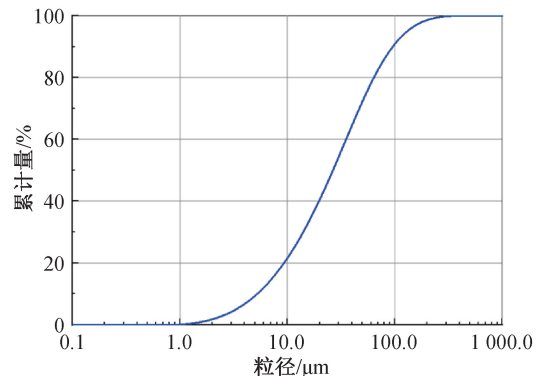
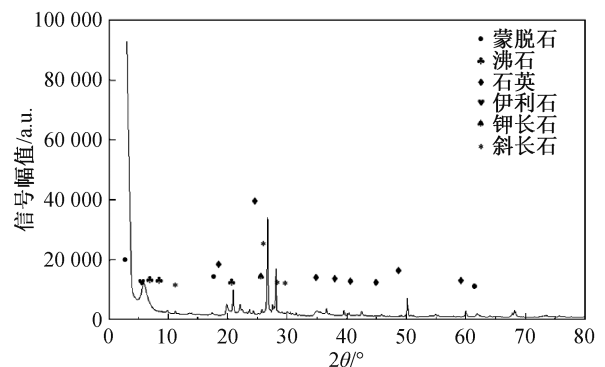


图1 膨润土粒径级配曲线

Fig. 1 Bentonite particle size distribution curve

X射线衍射分析(X-ray Diffraction, XRD)(图2)显示,膨润土主要成分为蒙脱石(质量分数59.6%),



注: θ 为入射 X 射线与晶体晶面之间的夹角

图2 膨润土 XRD 图谱

Fig. 2 Bentonite XRD pattern

次要成分为石英(质量分数 19.6%)、斜长石(质量分数 13.7%)、沸石(质量分数 4.7%)及钾长石(质量分数 2.4%),其基本性质见表 1。石英砂购自河南省郑州市铭海科技有限公司,为乳白色颗粒状,石英纯度 $\geq 99\%$ 。根据试验需求,采用标准筛分法将石英砂按粒径分为 0.1~0.5 mm(细砂)、0.5~1.0 mm(中砂)及 1.0~2.0 mm(粗砂)三个连续粒径组。

表 1 膨润土基本性质

Tab. 1 Basic properties of bentonite

比重	含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
2.53	8.73	152.67	29.77	122.90

1.2 试验方案

试验模具选用底面边长为 120 mm 的正方形、高度为 30 mm 的石英玻璃皿。根据表 2 中的砂土质量配比方案,参考相关文献和试验规范^[20-22],设计试验方法。按表 2 试验方案制备膨润土-石英砂饱和泥浆试样,将干燥膨润土与石英砂干混均匀,加入去离子水,以 200 r/min 的转速搅拌 30 min,配制成含水率为 150% 的饱和泥浆试样;经振动台(频率 50 Hz,时长 5 min)消泡处理后,将试样密封静置 72 h,转移至模具中,并用玻璃刮刀刮平表面,制样结果见图 3。

表 2 试验方案

Tab. 2 Test plan

试样编号	含砂率/%	砂粒粒径/mm
1	0	0
2	10	0.1~0.5
3	10	0.5~1.0
4	10	1.0~2.0
5	20	0.1~0.5
6	20	0.5~1.0
7	20	1.0~2.0
8	30	0.1~0.5
9	30	0.5~1.0
10	30	1.0~2.0



图 3 制备泥浆试样

Fig. 3 Slurry sample preparation

将电热恒温干燥箱预热至试验所需温度(40、50、60 $^{\circ}\text{C}$),待温度稳定后,将试样按照 10 cm 间距置于干燥箱托盘。干燥过程中,每隔 30 min 使用电子天平(精度 0.01 g)测量试样质量,并记录表面裂隙发育情况。当试样连续 3 次质量变化率小于 0.5%,且裂隙长度趋于稳定时,试验终止。

1.3 裂隙图像处理

为准确获取试样的裂隙形态参数,避免主观误差的影响,试验采用数码摄像的方式获取土体裂隙图像。随后,通过计算机识别并高效提取图中各种参数,从而准确测量和统计试样的裂隙参数。试验先使用图像处理软件对裂隙图像进行预处理,再利用图像识别软件提取试样表面裂隙网络的几何信息,其处理过程见图 4。

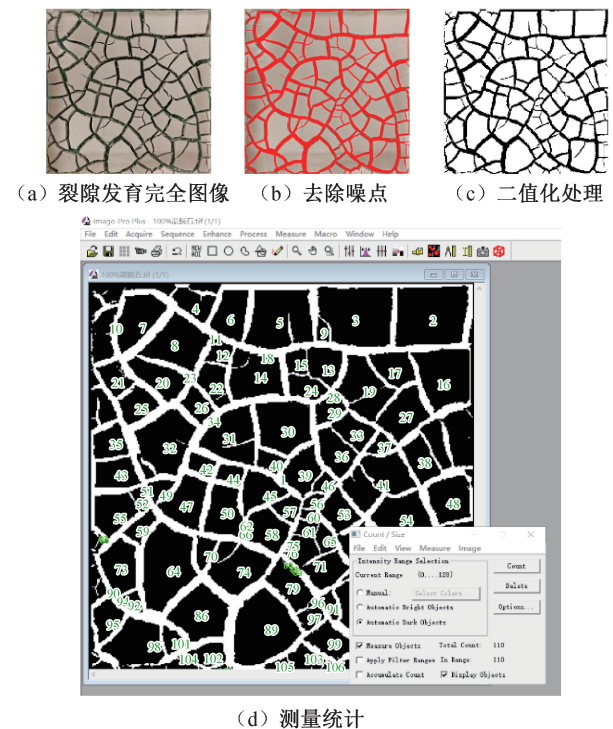


图 4 裂隙图像处理过程

Fig. 4 Fissure image processing procedure

2 试验结果

为定量评价试样裂隙开裂和发育情况,研究基于裂隙发育阶段性形态特征^[13,20],本文对裂隙图像处理结果进行归纳整理,建立土体干缩裂隙分级命名体系:主裂隙,最早形成的贯穿性裂隙(长度 \geq 试样边长 60%);主区块,由主裂隙分割形成的多边形区域(面积 $\geq 100 \text{ mm}^2$);次裂隙,发育于主区块内部且与主裂隙呈 $75^{\circ} \sim 105^{\circ}$ 夹角的浅层

裂隙;次区块,次裂隙二次分割主区块形成的子区域(面积 $\leq 50 \text{ mm}^2$);新增区块,主区块发育完成到裂隙发育完成过程中新增的区块。

通过图像处理技术提取试样表面裂隙网络的几何信息,得到含砂黏土干燥过程中裂隙网络演化特征。结合唐朝生团队^[23]的研究成果,即土体水分蒸发过程可以划分为三个阶段:常速阶段、减速阶段和残余阶段,对试验结果进行分析,得到含砂率(0%~30%)与砂粒径(0.0~2.0 mm)对裂隙数、裂隙网格区块的定量影响规律。

2.1 含砂率对裂隙网格的影响

含砂黏土裂隙网格参数与含砂率的关系如图 5 所示。从图 5 可知,在不同干燥温度下,随着含砂率的增大,裂隙条数和区块个数均呈现不同程度的下降。当含砂率由 0% 增至 30% 时,在较低干燥温度条件下(40 °C),试样主裂隙条数与主区块个数变化幅度,明显小于 50 °C 和 60 °C 时。以中砂

组(主裂隙条数和主区块数变化最大)为例,40 °C 时主裂隙减少 7 条,50 °C 时主裂隙减少 9 条,60 °C 时主裂隙减少 11 条;40 °C 时主区块个数维持在 6 个左右,而 60 °C 组主区块个数呈现明显下降趋势。从整体趋势来看,随着含砂率的增加,试样主裂隙条数明显下降,主区块个数略微下降。主区块与主裂隙形成于试样水分蒸发的常速阶段,在此阶段内,蒸发温度的上升可显著提高蒸发速率,进而加速试样水分流失。而随着温度提高,主裂隙条数明显增多,这说明水分流失越快越有利于主裂隙的形成。随着干燥温度和试样含砂率的升高,主裂隙条数减少得更多,这表明黏土中的砂粒可以抑制主裂隙的形成,且蒸发温度越高,抑制效果越明显。

次裂隙与次区块的形成主要发生在试样水分蒸发的减速阶段,此时试样主裂隙已经发育完成,试样也被分割成若干块互不相连的主区块,虽然此阶段试样水分蒸发速率不断下降,但部分主区块仍然

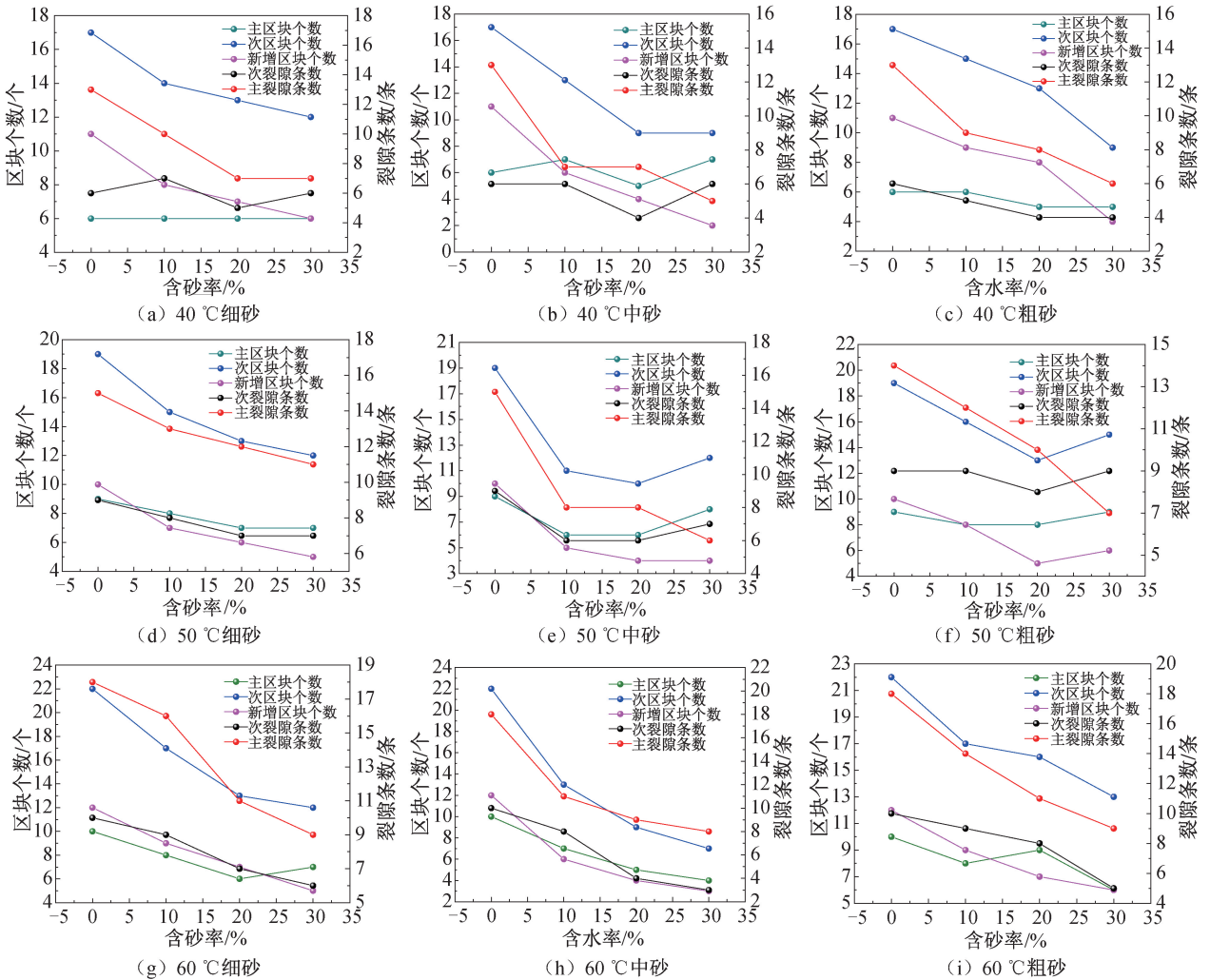


图 5 含砂黏土裂隙网格参数与含砂率的关系图

Fig. 5 Relationship between crack network parameters and sand content in sandy clay

具备开裂条件,而次裂隙的条数则反映出试样再次发育干缩裂隙的能力,次区块与新增区块个数则反映出次裂隙对主区块的切割能力。从图 5 不难发现,在不同干燥温度条件下,纯黏土次裂隙条数基本都多于含砂黏土,且随着含砂率的增加,次裂隙条数会进一步减少,并且次区块数与新增区块数具有相同的规律。这表明,在不同外界环境条件下,黏土中的砂粒均能有效抑制黏土次裂隙的形成。并且,在高含砂率情况下,次裂隙大多为表面裂隙,其对主区块的切割能力有限,无法将主区块分割成更多的次区块,因此干缩裂隙所形成的网络也相对简单。

2.2 掺砂粒径对裂隙网络的影响

为方便对比,取粒径组算术组中值指代对应粒径组,得到含砂黏土裂隙网络参数与砂粒径的关系如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,在相同干燥温度与含砂率

条件下,随着含砂粒径的增大,次裂隙条数、次区块个数和新增区块个数均呈现先减小后增加的趋势,并且当含砂粒径在 0.5~1.0 mm 时,其数量均达到最低值。这表明增大含砂黏土中砂粒粒径可有效抑制干缩裂隙再次发育,但随着砂粒粒径的进一步增大,该抑制效果会有所减弱。同时试验发现,含砂黏土的蒸发速率与含砂粒径也具有相同的变化规律,这侧面反映出黏土的水分蒸发速率与干缩裂隙的形成存在较强的联系,较快的蒸发速率会导致黏土更容易产生干缩裂隙,反之则不易形成。

在较低干燥温度条件下(40 °C),随着含砂粒径的增加,主裂隙与主区块的数量变化并不明显。当蒸发温度升高至 60 °C 时,试样主裂隙与主区块数量随含砂粒径的增加同样表现出先减小后增加的趋势,并且当含砂粒径为 0.5~1.0 mm 时数量降至最低,这说明砂粒对黏土干缩裂隙发育的抑制作用在高温环境下更加显著。同时,从整体趋

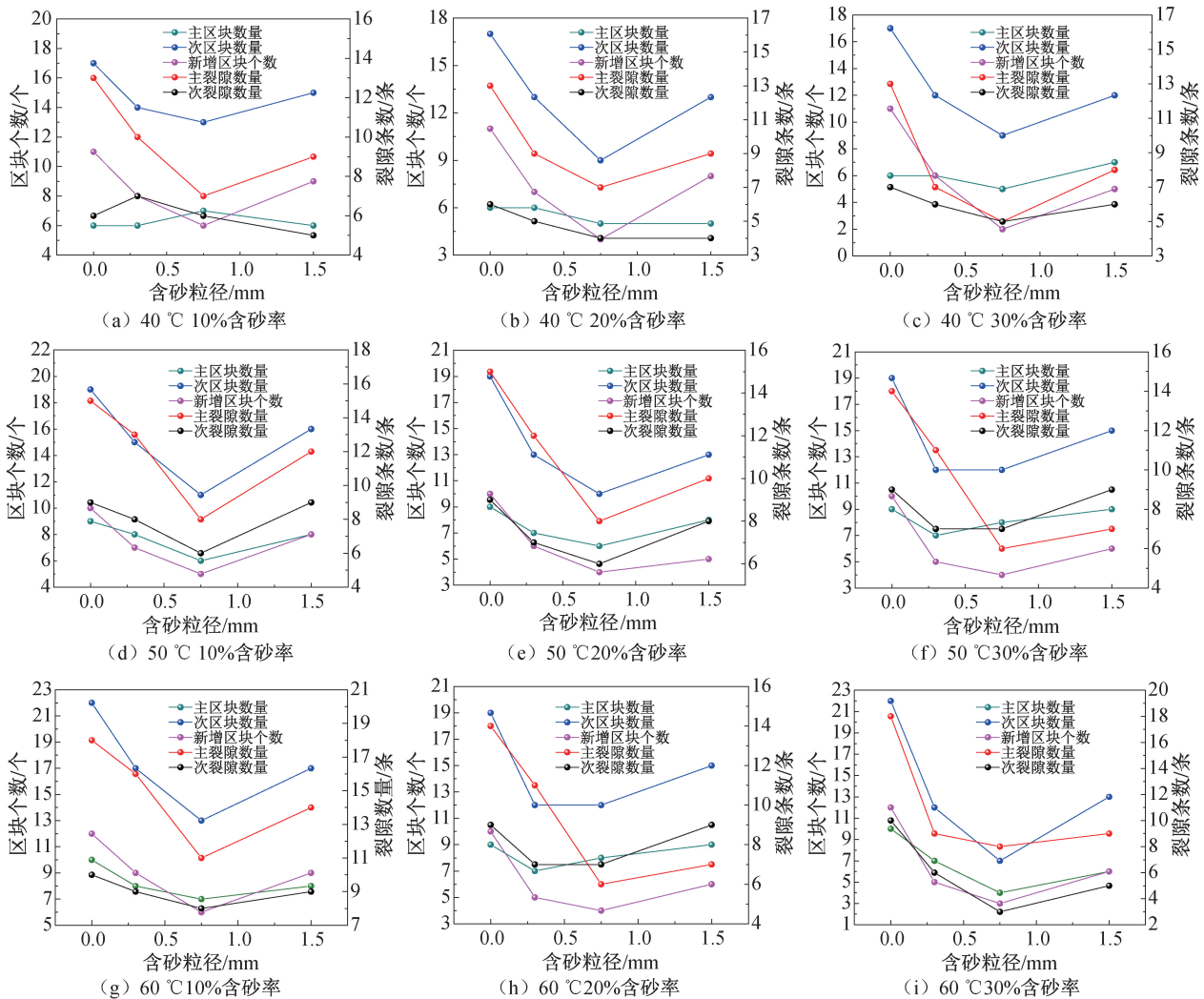


图 6 含砂黏土裂隙网络参数与砂粒径的关系图

Fig. 6 Relationship between crack network parameters and sand particle size in sandy clay

势看,不同含砂率和蒸发温度下,当含砂粒径为0.5~1.0 mm时,裂隙条数和区块个数降至最低,说明中等粒径(0.5~1.0 mm)是试验条件下的最优阻裂粒径。

试样完全干燥后,观察裂隙侧面发现,绝大多数裂隙的侧面分布有一定量的砂粒,且随着砂粒径的增加这种现象愈发显著,这些砂粒均嵌入裂隙侧面中,分布较为均匀,裂隙侧面各处均有砂粒存在。这说明,含砂黏土的干缩裂隙发展路径与内部砂粒的分布有关。

3 机理分析

含砂黏土干缩裂隙发育可以分为三个阶段:形成阶段、发育阶段和稳定阶段。形成阶段处于土体水分蒸发常速阶段前中期,土体表面最初并不会发育裂隙,但随着土体含水率的降低,土体边缘会出现细小的裂隙,标志着土体干缩裂隙的形成并进入发育阶段;发育阶段处于土体水分蒸发常速阶段末期以及减速阶段前中期,此阶段分为主裂隙形成阶段以及次裂隙形成阶段。主裂隙的形成与发育在常速阶段末期,土体会被分割成若干块互不相连的主区块,次裂隙的形成与发育发生在减速阶段前中期,土体会被再次分割成更小的区块;稳定阶段处于土体水分蒸发减速阶段末期以及残余阶段,此阶段土体不再发育干缩裂隙,裂隙网络已经形成且不再变化。

土体表面发育干缩裂隙的本质原因是水分流失引起的土体不均匀收缩,裂隙的发育受到蒸发环境和土体材料性质的共同影响。当土体含水率较高时,土体颗粒间因水化膜的存在距离较远。在干燥过程中,水分不断流失,土体颗粒表面的水化膜厚度逐渐减小,颗粒间距离逐渐减小,土体孔隙也随之缩小,宏观上表现为土体体积收缩,但并不会产生裂隙。当土体含水率持续减少,弯液面弯曲程度变大,曲率半径减小。根据非饱和土力学理论,基质吸力与弯液面表面张力存在以下关系:

$$S = u_a - u_w = \frac{2T_s \cos\theta_1}{r} = \frac{2T_s}{R_s} \quad (1)$$

式中: S 为基质吸力,Pa; u_a 为孔隙气压力,Pa; u_w 为孔隙水压力,Pa; T_s 为水的表面张力,N/m; r 为毛细孔的半径,m; θ_1 为毛细水的接触角,(°); R_s 为弯液面的曲率半径,m。

根据式(1),随着曲率半径的减小,土体颗粒

之间的基质吸力不断增加,土体颗粒之间的距离会再次缩小,试样进一步收缩,土体表面因此产生收缩应力,并累积收缩势能。当收缩应力超过土体表面的抗拉强度时,土体表面薄弱处便会产生裂隙,表面局部势能得以释放,土体颗粒在基质吸力的作用下重新排列,并在新的位置上达到应力平衡。只要水分蒸发持续进行,裂隙两边的土体颗粒便会在基质吸力的作用下受到相反方向的拉应力,宏观上表现为裂隙发育的过程。同时,当蒸发温度升高时(40~50℃),水分蒸发速率加快(相同含水率下蒸发速率加快85%),收缩应变速率显著提高,使应力重分布频率增加,进而诱发更密集的裂隙网络。

当土体中存在砂粒时,由于土体颗粒和砂粒对液体的吸附能力不同,砂粒与土体颗粒之间并不会形成完整的弯液面。土体颗粒较小,比表面积大,具有较高的吸附能力,能够吸附更多的水分,而砂粒的吸附能力较弱,对水分的保持能力更差,水分更容易被土体颗粒吸引,导致砂粒与土体颗粒之间的基质吸力较弱,裂隙很容易在它们之间形成,并朝着砂粒的方向不断发育。

4 结论

1) 砂粒对黏土干缩裂隙的发育起到抑制作用。蒸发温度升高,会促进裂隙的发展,砂粒对黏土裂隙发育的抑制作用随着含砂率的提高而增强,随粒径的增大先增强后减弱,中等粒径(0.5~1.0 mm)是试验条件下的最优阻裂粒径范围,合理控制砂粒粒径可以更好地抑制土体干缩裂隙的发育,高温环境下,砂粒对黏土开裂的抑制效果更加显著。黏土干缩裂隙发育受蒸发环境与土体材料特性的共同作用。

2) 纯黏土与含砂黏土形成干缩裂隙的方式不同,其中纯黏土通过不断地累积并释放收缩势能的方式产生干缩裂隙,裂隙在拉应力场的作用下不断发育,土体表面应力场变化十分频繁。而含砂黏土中砂粒持水性弱,黏土颗粒易吸附砂粒附近的水分,裂隙很容易在砂粒附近产生并沿着砂粒排列的方向发育,这导致含砂黏土形成的干缩裂隙网络较为简单,土体表面应力场变化程度也大幅降低。

3) 砂粒对黏土干缩裂隙的发育起到抑制作用,主要体现在两方面:一方面,砂粒的存在降低了黏土的水分蒸发速率,水分可以在黏土中停留

更长时间;另一方面,砂粒改变了黏土形成干缩裂隙的方式,有效降低了黏土表面应力场的变化幅度,黏土颗粒无需频繁调整位置以达到应力平衡。

参考文献:

- [1] 唐朝生. 极端气候工程地质: 干旱灾害及对策研究进展[J]. 科学通报, 2020, 65(27): 3008-3027.
TANG C S. Extrem climate engineering geology: soil engineering properties response to drought climate and measures for disaster mitigation[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(27): 3008-3027.
- [2] 龚壁卫, 程展林, 胡波, 等. 膨胀土裂隙的工程特性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1825-1830+1836.
GONG B W, CHENG Z L, HU B, et al. Research on engineering properties of fissures in expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1825-1830+1836.
- [3] 何戏龙, 宋京雷, 理继红, 等. 干湿循环条件下有机聚合物复合黏土保水与开裂特性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(2): 31-37.
HE X L, SONG J L, LI J H, et al. Study on water-retention and cracking characteristics of organic polymer composite clay under dry-wet cycling[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2021, 38(2): 31-37.
- [4] 欧阳斌强, 唐朝生, 王德银, 等. 土体水分蒸发研究进展[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 625-636+654.
OUYANG B Q, TANG C S, WANG D Y, et al. Advances on soil moisture evaporation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 625-636+654.
- [5] 王良玉, 刘宝臣, 杨柏, 等. 不同黏粒含量红黏土失水开裂试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43(7): 61-68.
WANG L Y, LIU B C, YANG B, et al. Experimental study on water-loss cracking of red clay with different clay content[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2021, 43(7): 61-68.
- [6] 刘东海, 常周梅, 杨家琦, 等. 相变黏土心墙堆石坝结构性态与水力劈裂分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 62-70.
LIU D H, CHANG Z M, YANG J Q, et al. Analysis on structural behaviors and hydraulic fracturing of phase change material-mixed clay core wall rockfill dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 62-70.
- [7] 陈开圣. 干湿循环下红黏土边坡裂隙演变规律[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(5): 52-61.
CHEN K S. Evolution law of fissures of red clay slope under wet-dry cycles[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(5): 52-61.
- [8] 黄少平, 晏鄂川, 陈前, 等. 干湿循环与持续浸泡下老黏土强度与变形特性变化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 649-654.
HUANG S P, YAN E C, CHEN Q, et al. Variation of strength and deformation characteristics of paleo-clay under dry-wet cycle and continuous soaking[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(5): 649-654.
- [9] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1415-1423.
TANG C S, SHI B, CUI Y J. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1415-1423.
- [10] 高长胜, 胡江. 气候变化对我国水利基础设施安全影响及应对建议[J]. 中国水利, 2024(24): 60-67.
GAO C S, HU J. Impact of climate change on safety of water infrastructures and response measures[J]. China Water Resources, 2024(24): 60-67.
- [11] 叶伟, 马福恒, 胡江, 等. 旱涝急转下斜墙坝险情孕育及灾变过程离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(10): 2100-2109.
YE W, MA F H, HU J, et al. Centrifugal model tests on danger incubation and catastrophic process of inclined wall dams under drought-flood abrupt alternation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(10): 2100-2109.
- [12] 胡梦园, 张晨阳, 薛建, 等. 不同类型生物胶复合黏土蒸发开裂规律研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2024, 41(4): 36-43.
HU M Y, ZHANG C Y, XUE J, et al. Experimental study on cracking by evaporation of clay modified by different types of biological glue[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2024, 41(4): 36-43.
- [13] 刘红广, 叶伟, 杜玉娟, 等. 极端干旱中压实粘土干缩裂缝演变分析与模拟[J]. 水电能源科学, 2022, 40(5): 151-155.
LIU H G, YE W, DU Y J, et al. Evolution and calculation analysis of shrinkage cracks in compacted clay under extreme drought conditions[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(5): 151-155.
- [14] LI J F, CHEN H E, GAO X, et al. Cracks evolution and micro mechanism of compacted clay under wet-dry cycles and wet-dry-freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 214: 103944.
- [15] ZHENG J W, WANG J, LU Y, et al. Modelling the frost cracking behavior in clayey soils: a peridynamic approach[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 176: 106765.

- [16] 黎桢君,汪时机,李贤,等. 三峡库区紫色土干缩裂隙形态几何尺寸效应[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24):117-126.
- LI A J, WANG S J, LI X, et al. Geometrical size effect of desiccation cracks in purple soil in the Three Gorges Reservoir areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(24):117-126.
- [17] 曹雪山,章纬,李国维,等. 膨胀土裂隙发育特征定量方法的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(12):2556-2564.
- CAO X S, ZHANG W, LI G W, et al. Experimental study on quantitative method for crack development characteristics of expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(12):2556-2564.
- [18] 刘瑞琪,雷学文,万勇,等. 含水率梯度作用下填埋场压实黏土层开裂特性试验与机理分析[J]. 力学与实践, 2022, 44(1):12-21.
- LIU R Q, LEI X W, WAN Y, et al. Experiments on cracking characteristics and mechanism analysis of compacted clay layers in landfills under the action of water content gradient[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(1):12-21.
- [19] 唐朝生,施斌,刘春,等. 黏性土在不同温度下干缩裂缝的发展规律及形态学定量分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5):743-749.
- TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Developing law and morphological analysis of shrinkage cracks of clayey soil under different temperatures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5):743-749.
- [20] 国家能源局. 水电工程土工试验规程:第4章 土样和试样制备,第35章 膨胀试验:DL/T 5356—2024[S]. 北京:中国电力出版社, 2024.
- National Energy Administration. Code for geotechnical tests of hydropower engineering: chapter 4 soil sample and test sample preparation, chapter 35 swelling test: DL/T 5356—2024 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2024.
- [21] 陈志国,唐朝生,叶为民,等. 水-力耦合条件下膨润土-砂混合物的体变特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4):1041-1051+1059.
- CHEN Z G, TANG C S, YE W M, et al. Volume change characteristics of bentonite-sand mixture under hydro-mechanical coupling condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4):1041-1051+1059.
- [22] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会. 膨润土试验方法:第6章 试验方法:GB/T 20973—2020[S]. 北京:中国标准出版社, 2020.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for bentonite: chapter 6 test methods: GB/T 20973—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [23] 唐朝生,施斌,顾凯. 土中水分的蒸发过程试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6):875-881.
- TANG C S, SHI B, GU K. Experimental investigation on evaporation process of water in soil during drying[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(6):875-881.

(责任编辑 周雪梅)