

# 土体干缩裂缝发育演化规律试验研究

刘涛<sup>1,2\*</sup>, 单以春<sup>1,2#</sup>, 顾春生<sup>1,2</sup>, 张丽<sup>1,2</sup>, 李伟<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>江苏省地质调查研究院, 江苏 南京

<sup>2</sup>自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏 南京

收稿日期: 2025年7月31日; 录用日期: 2025年9月15日; 发布日期: 2025年9月23日

## 摘要

土体失水干缩是地裂缝形成演化的重要因素。通过室内试验方法, 本文开展了不同成分土体的干缩开裂试验, 对土体的开裂形态、干缩裂缝的形成演化阶段进行了划分, 总结了土体成分、含水量变化对其干缩裂缝的发育演化规律, 对土体成分、含水率与土体断裂韧度关系进行了探究。试验表明: 1) 根据裂缝的开裂形态与速率, 可将干缩裂缝的发育阶段划分为失水收缩、快速开裂、干缩停滞三个阶段。2) 干缩试样中, 主裂缝宽度随黏土含量递增; 次生裂缝的长度和数量则随黏土含量的增加表现出先升后降的变化, 且干缩造成的主次裂缝呈现垂直关系。3) 失水干缩过程中, 土体断裂韧度受含水率及黏土成分的影响显著。试样基质吸力随含水率的降低而增加, 含水率低于12%左右时, 断裂韧度随含水率的降低而减小。结论: 土体失水导致基质吸力增大, 引发体积收缩和能量积累, 最终通过开裂形式释放能量, 基质吸力随含水率的降低而增加是干缩开裂的诱发因素; 非饱和试样的断裂韧度随含水率的降低而降低, 导致土体抵抗断裂能力减弱, 断裂韧度的降低是干缩裂缝的重要影响因素。

## 关键词

地裂缝, 失水干缩, 成因机制, 断裂韧度, 基质吸力

# Experimental Study on the Development and Evolution Patterns of Shrinkage Fissure in Soil

Tao Liu<sup>1,2\*</sup>, Yichun Shan<sup>1,2#</sup>, Chunsheng Gu<sup>1,2</sup>, Li Zhang<sup>1,2</sup>, Wei Li<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster MNR, Nanjing Jiangsu

Received: Jul. 31<sup>st</sup>, 2025; accepted: Sep. 15<sup>th</sup>, 2025; published: Sep. 23<sup>rd</sup>, 2025

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 刘涛, 单以春, 顾春生, 张丽, 李伟. 土体干缩裂缝发育演化规律试验研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(9): 1317-1327. DOI: 10.12677/ag.2025.159122

## Abstract

The water loss and shrinkage of soil play a great important part in the evolution of the ground fissures. In this paper, through laboratory test method, the dry shrinkage cracking test of soil with different components is carried out; then the cracking morphology of soil mass and the formation and evolution stages of dry shrinkage cracks are divided. The development and evolution patterns of dry shrinkage cracks influenced by soil composition and moisture content changes are summarized. Furthermore, the relationship between soil composition, moisture content and soil fracture toughness is discussed. The results show that: 1) According to the shape and rate of cracking, the development stage of dry shrinkage cracking can be divided into three stages: dehydration shrinkage, rapid cracking and dry shrinkage stagnation. 2) The width of the main crack formed by the dry shrinkage of the sample increases with the increase of clay content; the length and number of secondary cracks increase first and then decrease with the increase of clay content, and the primary and secondary cracks caused by dry shrinkage show a vertical relationship. 3) In the process of water loss and shrinkage, the fracture toughness of soil is significantly affected by water content and clay composition. The matrix suction of the sample increases with the decrease of water content; in addition, when the water content is less than 12%, the fracture toughness decreases with the decrease of water content. Conclusion: The essence of water loss and shrinkage crack is the process of volume shrinkage and energy accumulation caused by the decrease of soil moisture content and the increase of matrix suction, and it is also a process of releasing energy in the form of cracking. The increase of matrix suction with the decrease of water content is the inducing factor of dry shrinkage cracking. The fracture toughness of unsaturated samples decreases with the decrease in water content, resulting in the weakening of the fracture resistance of soil. The reduction of fracture toughness is an important factor affecting dry shrinkage cracking.

## Keywords

Ground Fissure, Water Loss and Shrinkage, Formation Mechanism, Fracture Toughness, Matrix Suction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,地裂缝灾害频率及危害程度逐渐加剧,逐渐引起国际地质界的关注[1][2]。地裂缝变形扩展对交通运输、矿区建筑、水利工程等安全影响尤为突出[3]-[5],可造成路基、土石坝、民房破坏,威胁人身安全。地裂缝成因机理复杂多样,常见有矿山开采沉陷、构造成因、地下水开采类型;此外,表层土体失水干缩也是不可忽视的重要因素[6]-[10],相关研究对地裂缝灾害防治具有重要意义。目前,土体干缩开裂研究主要集中在其形态结构的发育演化、影响因素及力学机制研究等方面[11]。在发育演化过程及影响因素研究方面:施斌等[6]通过计算机图像处理技术,分析了干缩裂缝几何结构与形态演化规律。Velde [11]运用分形手段,分析了表土随失水断裂过程的结构变化。Colina 等[12][13]以高岭土为研究对象,分析了土体干缩开裂的尺度效应。唐朝生等[14]-[16]分析研究了温度、厚度等因素对土体开裂过程的影响。而对不同成分土体对干缩裂缝发育形态、演化速率及裂缝的研究还相对较少。在土体干缩裂缝扩展机制研究方面:有学者将断裂韧度引入到土体裂缝扩张的研究中[17]-[19];指出断裂韧度是土体抵抗开裂能力

大小的度量[11]。Vallejo [20]的研究指出,拉应力是导致土坝黏土裂缝扩展的关键因素。因此,在一定程度上,裂缝发育演化实质是土体发生损伤断裂的过程,而研究土体的断裂韧度的影响因素及其变化规律,对建立裂纹扩展机制及断裂准则具有重要意义。

通过观察成分不同的土体,在失水干缩过程中所产生裂缝的发育演化规律,对土体干缩开裂过程进行了阶段划分、影响因素及其演化过程研究。系统研究不同含水率和土砂比条件下土体的损伤断裂过程及规律,并从断裂力学角度阐释土体干缩裂缝的发育机制。

## 2. 试验准备

为探究土体失水干缩时宏观裂缝的形态发育规律。本次试验制备直径 60 cm、厚 5 cm 试验土样。土体黏土占比例为: 0.2、0.5、0.75、0.8 的黏土砂土混合物试样各 2 组共 8 个; 试验所用砂土、黏土、水含量配比见表 1。试验过程中需密切关注土体含水量变化,同时,通过水分蒸发的重量来获取容器中当前含水量、失水量。试验环境为室内自然条件下。

$$\omega_i = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\omega = \frac{mw}{ms} \times 100\% \quad (2)$$

上述公式中:  $\omega_i$ : 失水率(%);  $\omega$ : 当前含水率(%);  $mw$ : 水质量(kg);  $m_i$ : 测量土体质量(kg);  $m_0$ : 土体初始质量(kg);  $ms$ : 土体颗粒质量(kg)。

**Table 1.** Component Content of test soil

**表 1.** 试验土体组分含量

类别	水		砂土		黏土		m/kg
	m/kg	%	m/kg	%	m/kg	%	
A	2.6	21	7	63	2.4	20	12
B	2	20	2	30	6	50	10
C	2	20	0.5	5	7.5	75	10
D	2	20	0	0	8	80	10

为了研究土体断裂韧度与含水率及土体性质之间的关系,按表 1 成分制备 200 mm × 40 mm × 20 mm 标准样; 并在标准样中央按图 1 设置 20 mm 预制裂缝( $a = 20$  mm)。为消除土体自重的影响,试验采用改进型三点弯曲试验法测定土体的断裂韧度。试验装置示意图如图 1 所示。

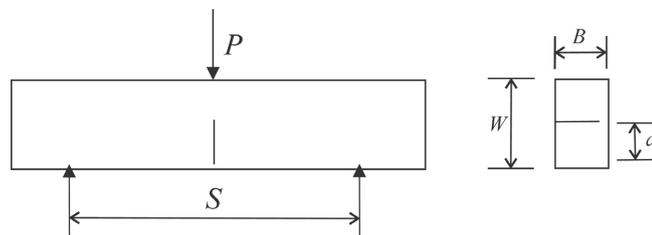
土体自重产生弯矩,会产生较大影响,弯矩  $M$  和修正后应力强度因子  $K_{IC}$  计算见公式(3)~(5):

$$K_{IC} = (PS/BW^{3/2})f(a/W) \quad (3)$$

$$M = 2 \int_0^{s/2} dM = \int_0^{s/2} \rho g W B l dl = GS/4 \quad (4)$$

$$K_{IC} = ((PS - GS/4)/BW^{3/2})f(a/W) \quad (5)$$

式中:  $P$  为附加应力,  $S$  为仪器支点距离,  $S = 160$  mm;  $G$  为重力加速度,土样尺寸  $W = 40$  mm、 $B = 20$  mm、 $a = 20$  mm。



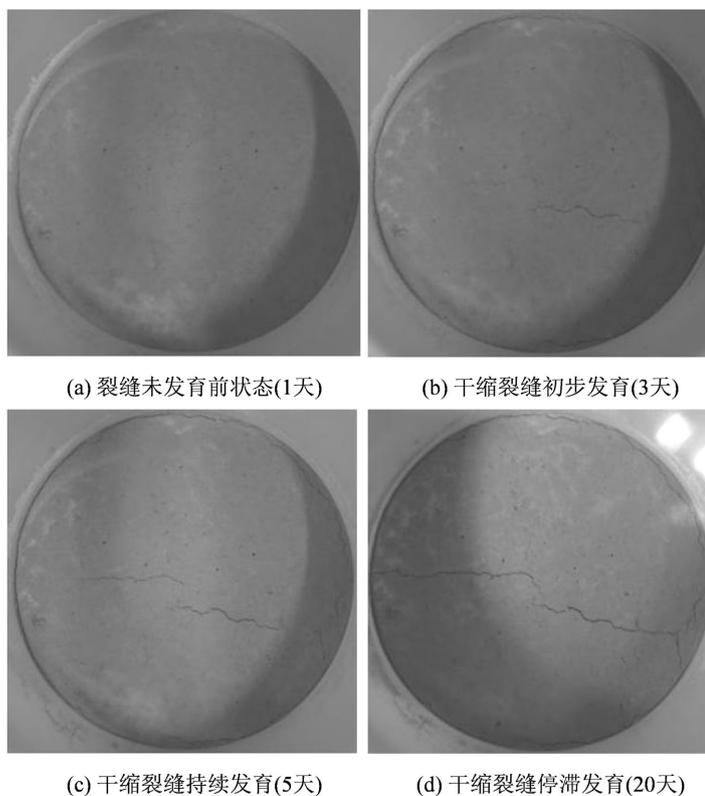
**Figure 1.** Schematic diagram of “three-point inflected samples testing apparatus”  
**图 1.** “三点弯曲试样试验”示意图

### 3. 土体失水裂缝演化规律

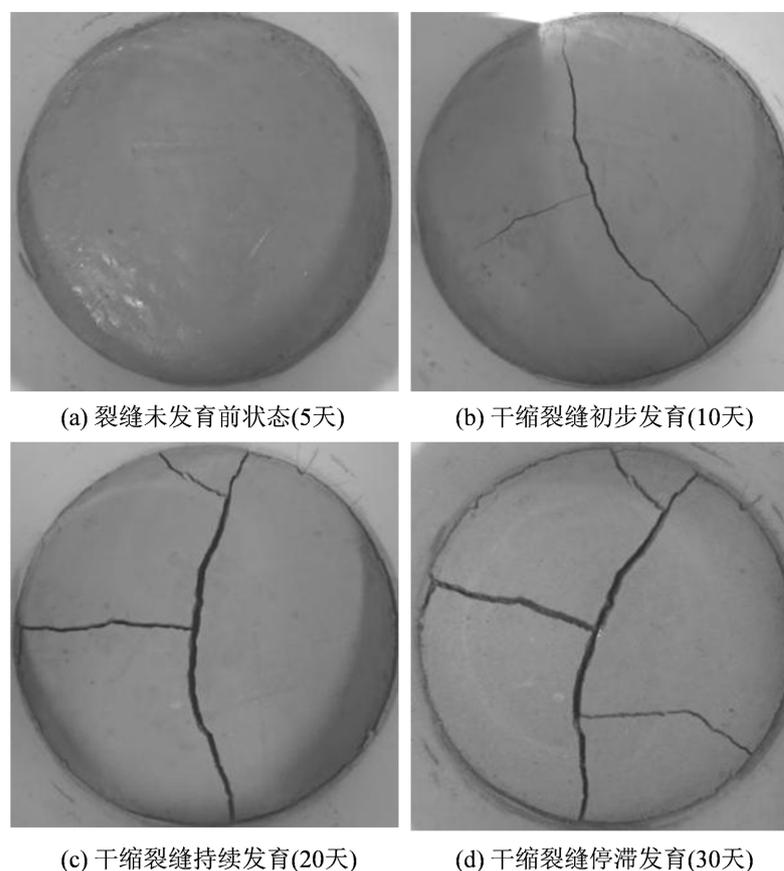
#### 3.1. 土体干缩开裂阶段划分

对试验中土体失水干缩过程裂缝的发育演化进行观测,其中 A 组(黏性土含量 20%)和 B 组(黏性土含量 50%)的试验组现象较为典型:图 2(a)为 A 组试样原始状态情况, A 组试样在试验第 3 天即观察到细微裂缝(图 2(b)),随后土体失水导致质量减小,裂缝不断发育扩展(图 2(c)),当含水量稳定于较低水平时,裂缝宽度亦无明显增长(图 2(d)).B 组土样试验初期表层长时间无明显变化,但土体质量持续下降(失水),此阶段无裂缝生成(图 3(a)),随着失水加剧至临界值,表层开始出现裂纹(图 3(b)),之后裂纹继续扩展发育(图 3(c)),当含水量稳定于较低水平时,裂缝宽度亦不再显著增加(图 3(d)).

同时,对裂缝演化过程试验土体的体积含水率进行观测发现,土体失水干缩过程,失水率达到 8%左右,出现裂缝(图 4),此后,裂缝随着失水继续进一步扩大,直至后期裂缝发育停滞。

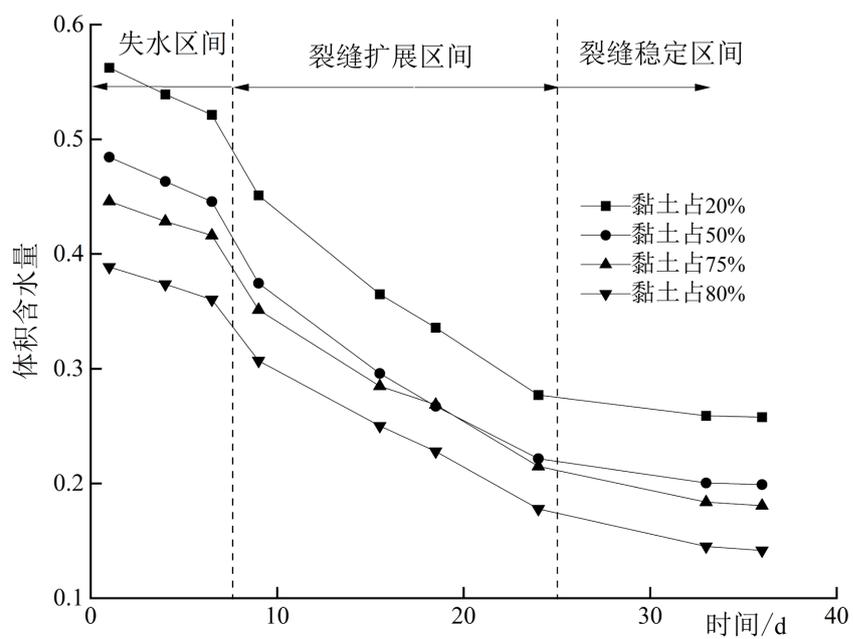


**Figure 2.** Evolution of shrinkage fissure in soils with 20% clay content  
**图 2.** 黏性土含量为 20%土体干缩裂缝演化过程



**Figure 3.** Evolution of shrinkage fissure in soils with 50% clay content

**图 3.** 黏性土含量为 50% 土体干缩裂缝演化过程



**Figure 4.** Changes in water content during the dehydration process of different soils

**图 4.** 不同土体失水过程体积含水量变化

以 B 组试验为例, 观测结果显示: 失水率变化趋势与裂缝宽度演化存在较强的相关性(图 5); 并根据不同阶段土体开裂特性裂缝发育划分为以下几个阶段(图 5、图 6), 分别得出各阶段对应规律。

1) 失水收缩阶段: 土体从过饱和状态开始失水, 含水量逐渐降低, 但尚未出现裂缝。此阶段实质上是土体失水达到非饱和状态, 并持续失水接近其抗剪强度临界值, 即将发生开裂。

2) 快速开裂阶段: 土壤含水率持续下降, 裂缝进入快速发展期: 裂缝尺寸随含水量降低持续扩张: 其扩张速率经历先上升后下降的过程。

3) 干缩停滞阶段: 在土体裂缝演化的后期, 含水率不断降低且失水速率减缓, 裂缝扩展速率下降直至停滞, 裂缝宽度不再扩展。

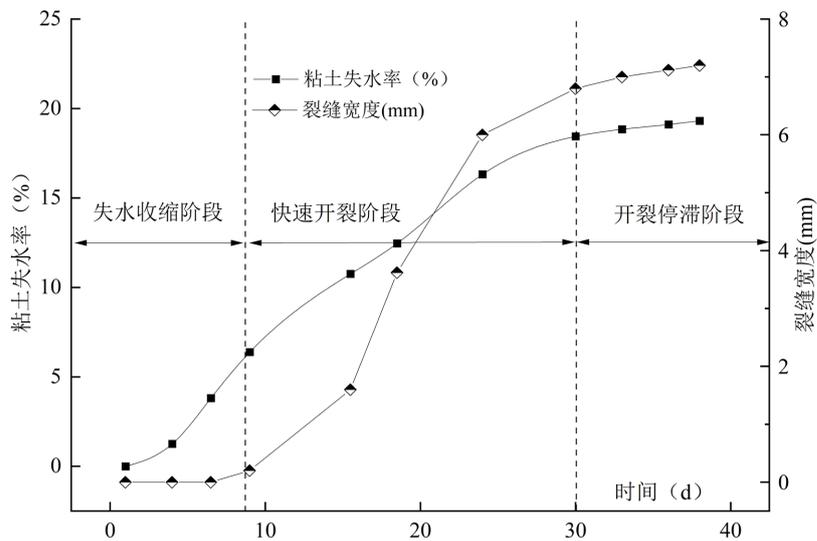


Figure 5. Relationship between soil water loss shrinkage and fissure evolution  
图 5. 土体失水干缩与裂缝演化关系

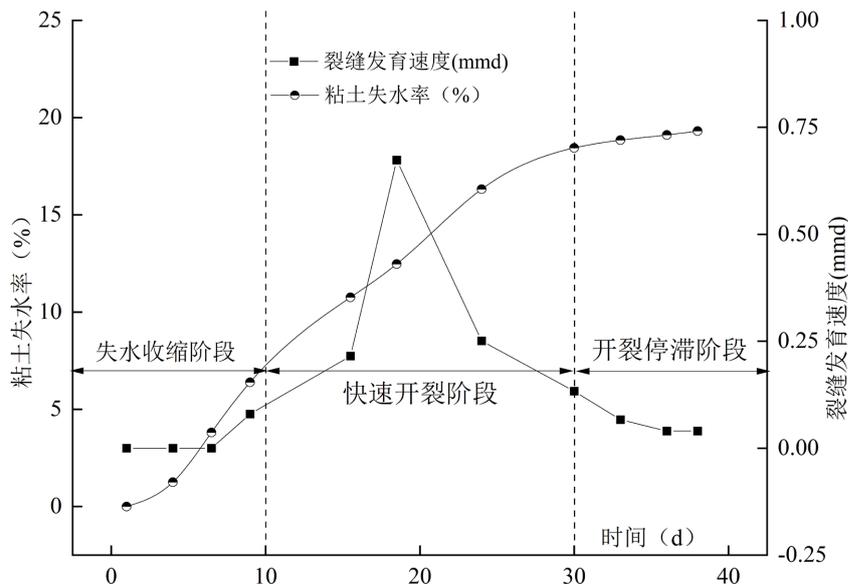


Figure 6. Relationship between soil water loss shrinkage and fissure evolution rate  
图 6. 土体失水干缩与裂缝演化速率关系

### 3.2. 干缩裂缝扩展形态特征

不同黏土含量土体在失水干缩过程中的裂缝演化呈现相似规律：初期，主裂缝在长度、深度、宽度及面积上持续扩展，此时尚无次生裂缝产生。随着含水率下降及干缩持续进行，主裂缝首先沿其尖端方向延伸并增宽。当干缩发展到一定阶段，单一方向的裂缝宽度已无法完全容纳土体的整体收缩量，此时便会产生与初始主裂缝近似垂直的次生裂缝(图 7)。

土体干缩形成近正交的主裂缝后，新裂缝较少出现。其原因是正交裂缝的扩展释放了收缩应力。随着含水率的降低，主裂缝主要沿其发育方向增宽和延伸，进一步释放了垂向应力。未开裂区域积累的干缩应变未能有效释放，最终促成次生裂纹垂直于主裂缝方向产生。

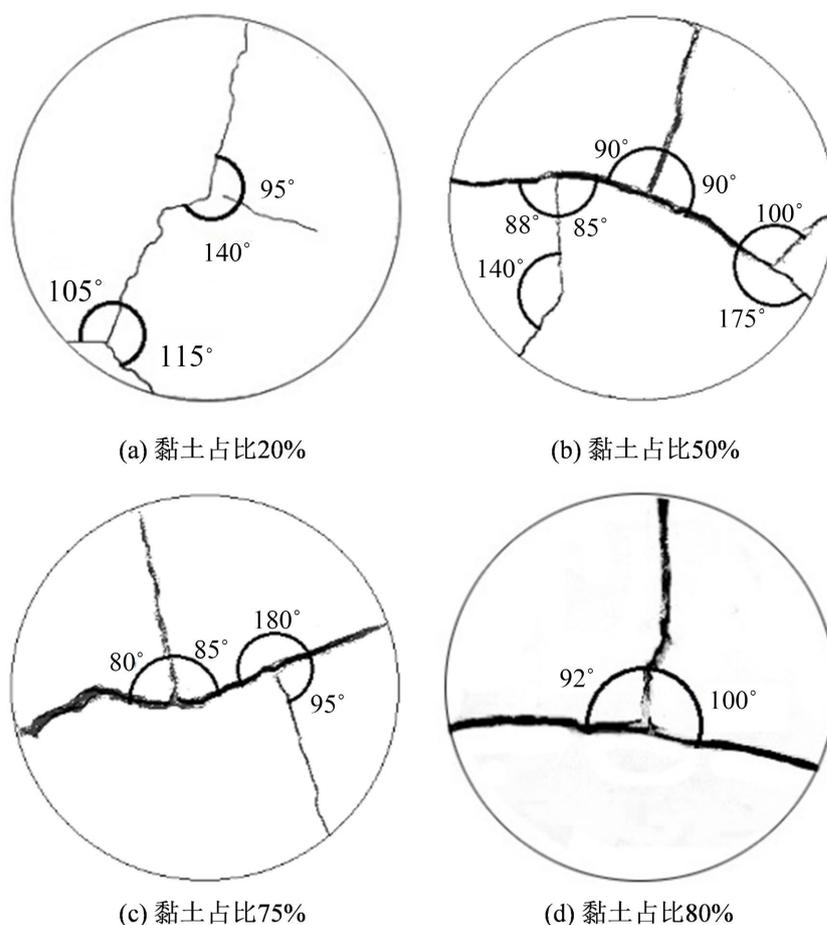


Figure 7. Evolution results of shrinkage fissure in soils with different clay contents  
图 7. 不同含黏土占比土体干缩裂缝演化结果

### 3.3. 黏土含量对裂缝演化的影响

试验中四组黏土含量不同的土体体积收缩演化过程存在一定差异，且黏性土含量与裂缝最终宽度呈正相关趋势。如图 8 所示，次生裂纹的长度和数量随黏土含量的增加呈现先增后减的趋势。当黏土含量低于 50% 时，由于黏土含量的增加黏土失水造成的收缩特征对土体产生显著影响。

对黏土含量与试样最终裂缝状态研究发现：黏土含量对土体失水干缩裂缝的宽度、面积影响显著；如图 9 所示，黏土含量与最终裂缝面积呈正相关；且黏土含量越大，对土体干缩响应的速率程度越大。

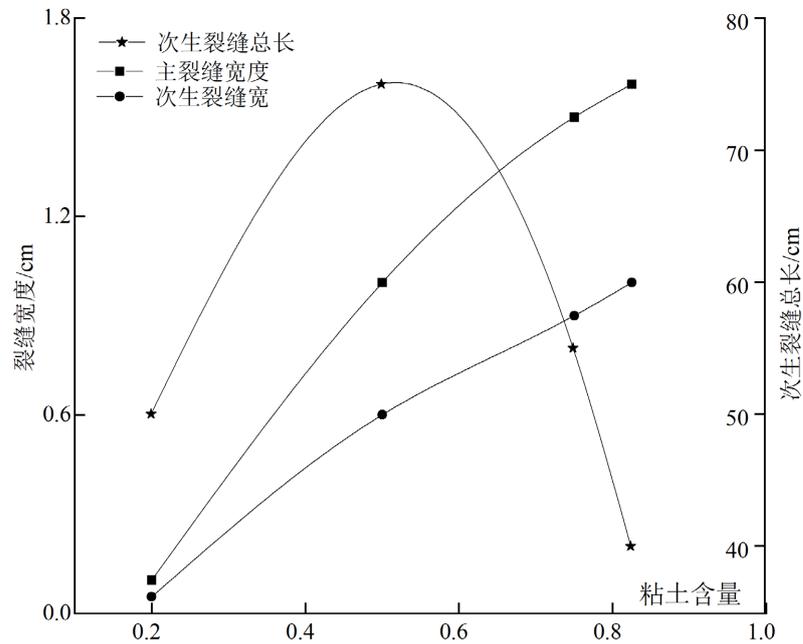


Figure 8. Patterns of fissure development under different clay contents  
图 8. 不同黏土含量裂缝变化规律形态

### 3.4. 土体干缩裂缝成因机理分析

#### 3.4.1. 土体干缩裂缝成因分析

判断干缩裂缝的形成以及是否继续扩展的临界状态，需要对土体所处应力状态进行研究。而土体干缩裂缝内部应力状态主要受含水率变化影响；所以可尝试通过测定不同状态下土体基质吸力及断裂韧度演化分析干缩裂缝成因机制。

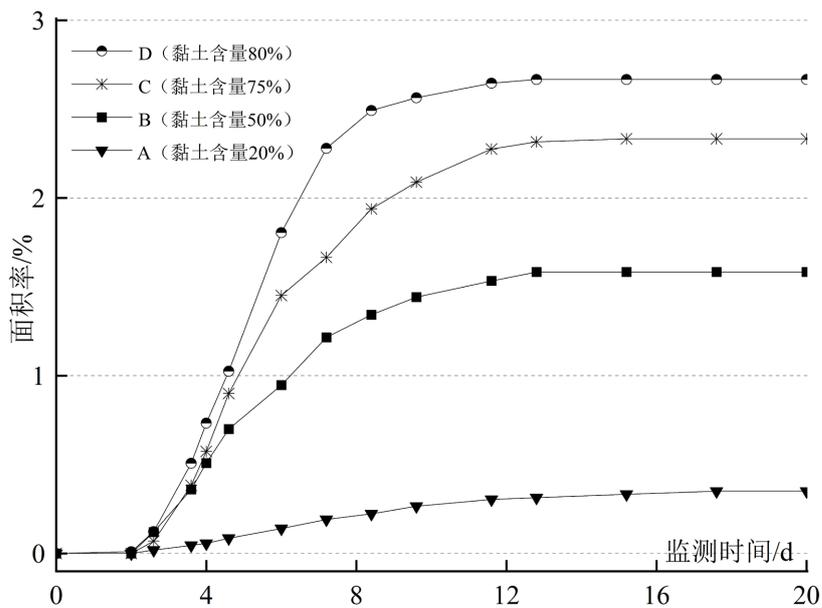


Figure 9. Evolution patterns of fissure in soils under different clay contents  
图 9. 不同黏土含量土体裂缝演化规律

根据表 1 中配比制备  $\phi 61.8 \times 20$  mm 重塑样, 采用 GFG-1 型非饱和土三轴仪, 获取不同试样在不同平衡进气值下的含水率曲线, 即土水特征曲线; 特定试样在不同干燥收缩状态下的基质吸力变化(图 10) 结果显示, 随着含水量的降低, 基质吸力逐渐增大, 且在低含水率区间增幅尤为显著; 此外, 黏土含量越高, 内部基质吸力增加越显著。

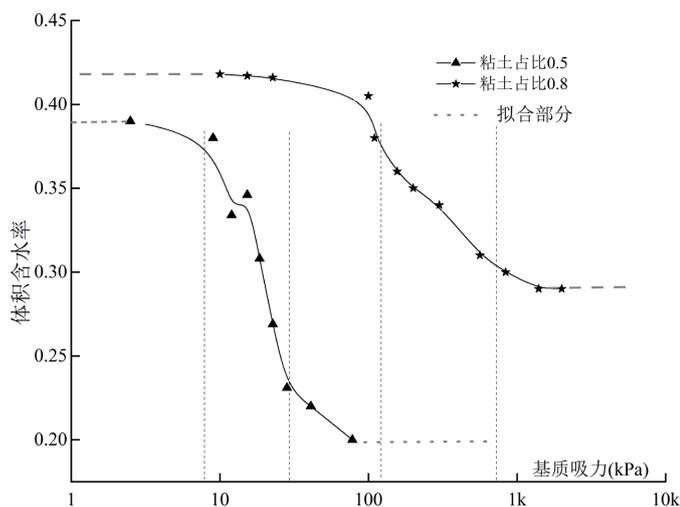


Figure 10. Soil-water characteristic curve of the test soil  
图 10. 试验土体土水特征曲线

因此, 土体失水干缩开裂的本质是土颗粒间黏聚力随水分蒸发而减弱的过程: 当收缩应变超过土颗粒间黏聚力时, 土体便通过开裂释放积累的收缩能, 形成干缩裂缝。土体失水过程伴随内部不断增加的孔隙负压(基质吸力), 是干缩裂缝形成的内部动力来源。

### 3.4.2. 土体干缩开裂过程断裂韧度演化

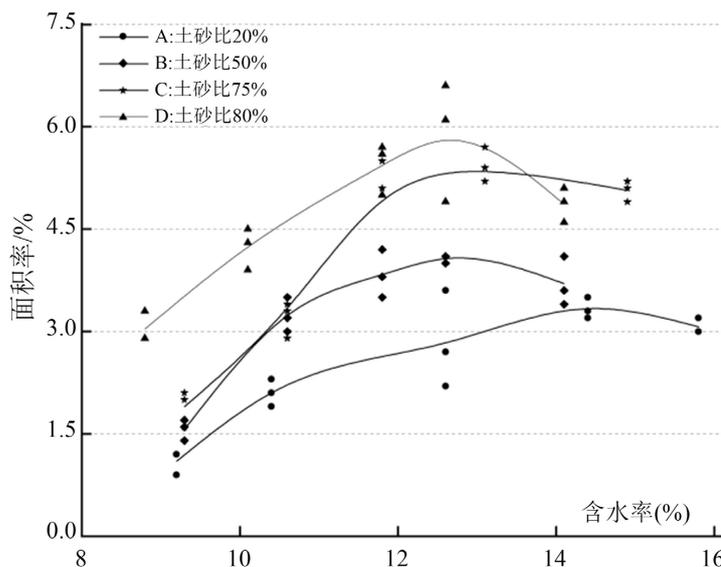


Figure 11. Relationship between  $K_{IC}$  and moisture content for different soils  
图 11. 不同土体  $K_{IC}$  与含水率关系

裂缝发育演化是土体发生损伤断裂的过程。而断裂韧度是一种材料自身抵抗断裂能力的度量；严格意义上，含水率变化后，土性与断裂韧度参数也发生了改变。因此，探索土体断裂韧度的影响因素及其变化规律，对建立裂纹扩展机制及断裂准则具有重要意义。通过测定不同土砂比和含水率下土体断裂韧度(图 11)，试验结果表明，土体断裂韧度基本随黏土含量的增加而呈现增大的趋势。不难得出：低含水率范围，黏土含量越高，同等含水率试样的断裂韧度参数越高。

图 11 还显示，在土体失水干缩过程中，存在断裂韧度达到最值的含水率；且在较低含水率范围，土体断裂韧度受含水率及黏土成分的影响显著；随含水率减小而呈现下降趋势。试验土体断裂韧度取最值的含水率范围在 12%~13% (失水率为 7%~8%)。表明此时土体的抗断裂性能会随着含水率的降低而逐渐减弱。结合图 5、图 6 可知，在含水率降低至 13% (失水率达 7%) 时，试样处于失水干缩阶段末期，此时试样断裂韧度呈现逐渐降低趋势，土体裂缝开始发育，后期裂缝逐渐扩大。

综上所述，土体失水干缩过程中，土体含水量降低导致土体内部颗粒间基质吸力不断增大，能量不断积聚，在土体内部形成的应力集中。同时，随着土体失水，低含水率阶段，土体断裂韧度降低，土体抵抗断裂能力降低，从而进一步加剧裂纹扩展。即干缩开裂过程的基质吸力是土体开裂的诱发因素；低含水率干缩阶段，在基质吸力增大与断裂韧度降低的共同作用下，裂缝加剧扩展。

### 3.4.3. 土体干缩开裂判别

由于土体干缩裂缝形成过程，断裂韧度与基质吸力均与土体含水率密切相关；当含水率降至一个特定值(临界起裂含水率  $\omega_{cr}$ ) 时，土体开始出现裂缝，此时对应的基质吸力称为临界基质吸力( $S_{cr}$ )。当含水率高于临界值(或基质吸力低于临界值)时，土体不会产生裂缝；当含水率降至临界值(或基质吸力升至临界值)时，裂缝开始出现；其后，含水量降低，基质吸力增大，裂缝不断发展直至最终稳定。土体体积含水量( $\omega$ )、基质吸力( $S$ )与裂缝出现的判别关系如下式(6)所示：

$$\omega = \begin{cases} \text{裂缝不发育, } \omega > \omega_{cr} (S < S_{cr}) \\ \text{开始出现裂缝, } \omega = \omega_{cr} S = S_{cr} \\ \text{持续发育裂缝, } \omega < \omega_{cr} S > S_{cr} \end{cases} \quad (6)$$

不同土体基质吸力随体积含水量变化的响应程度各异，导致失水后基质吸力增加引发的干缩程度也不同。失水过程中，基质吸力上升一方面增强土体抗拉强度，另一方面又导致失水干缩体积减小。在土体干缩动态过程中，抗拉强度与干缩产生的拉应变均在持续变化。将裂缝的动态演化过程与临界含水量以及动态的基质吸力联系起来，这为揭示土体干缩裂缝发育演化机理提供了新的研究视角。

## 4. 结论

通过土体干缩实验，划分了裂缝宏观发育演化阶段，揭示了土体成分与裂缝形态的关系，探讨了微观状态下裂缝发育演化与基质吸力的内在联系，最终得出以下规律：

1) 土体失水干缩裂缝的宏观演化分为土体失水、裂缝加速扩展和裂缝发育停滞三个阶段。主裂缝与后产生的次生裂缝形成较为明显的正交关系。

2) 土体失水干缩裂缝发育演化过程与土体的黏土含量有密切关系：随着黏土含量的增大，裂缝宽度呈现增加的趋势；而随着黏土含量的增加，次生裂纹的长度、数量呈现出明显的先增加后减小的趋势。

3) 失水干缩过程中土体断裂韧度受含水率及黏土含量的影响显著；失水干缩过程中，土体含水量降低，基质吸力不断增加；且黏土含量越高，基质吸力增加越显著；同时，断裂韧度随含水量逐渐降低。土体干缩裂缝的形成本质上是基质吸力增大导致收缩能蓄积并通过开裂释放的过程；其产生和发展是由于裂缝顶端应力达到临界值。基质吸力不断增加是土体开裂的诱发因素；土体断裂韧度降低进一步加剧裂

缝扩展。

4) 黏土裂缝的发育过程与基质吸力密切相关。提出土体体积含水量( $\omega$ )、基质吸力( $S$ )与裂缝出现的判别关系, 为揭示土体干缩裂缝的演化机理提供了新的研究思路。

## 基金项目

苏南典型岩溶塌陷地裂缝成因机理研究(江苏省国土厅科技项目); 常州城市地质调查(苏财建[2017] 160号)。

## 参考文献

- [1] 王景明. 地裂缝及其灾害术的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000.
- [2] 陈立伟. 地裂缝扩展机理研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2007.
- [3] 武强, 陈佩佩. 地裂缝灾害研究现状与展望[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 22-27.
- [4] 王光亚, 施斌, 王晓梅, 等. 江阴南部地面沉降及地裂缝研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 117-122.
- [5] 张峰. 采动地表裂缝发育范围异常扩大成因分析[J]. 金属矿山, 2015(4): 154-156.
- [6] 施斌, 唐朝生, 王宝军, 等. 黏性土在不同温度下龟裂的发展及机理讨论[J]. 高校地质学报, 2009, 15(2): 192-198.
- [7] 唐朝生, 施斌, 顾凯, 等. 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.
- [8] 唐朝生, 崔玉军, Anh-Minh Tang, 等. 土体干燥过程的体积收缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1271-1279.
- [9] 王哲成. 抽水条件下拉张型地裂缝开展过程的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2012.
- [10] Zhang, Y., Xue, Y.Q. and Wu, J.C. (2008) Land Subsidence and Earth Fissures Due to Groundwater Withdrawal in the Southern Yangtze Delta, China. *Environmental Geology*, No. 55, 751-762. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-1028-8>
- [11] Velde, B. (1999) Structure of Surface Cracks in Soils and Muds. *Georama*, **93**, 101-124. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00047-6)
- [12] Colina, H. and Acker, P. (2000) Drying Cracks: Kinematics and Scale Laws. *Materials and Structures*, **33**, 101-107. <https://doi.org/10.1007/BF02484164>
- [13] Colina, H. and Roux, S. (2000) Experimental Model of Cracking Induced by Drying Shrinkage. *The European Physical Journal E*, **1**, 189-194. <https://doi.org/10.1007/s101890050021>
- [14] 徐其良, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 土体干缩裂隙发育过程及断裂力学机制研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(2): 223-236.
- [15] 唐朝生, 施斌, 崔玉军, 等. 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.
- [16] 唐朝生, 施斌, 刘春, 等. 影响黏性土表面干缩裂缝结构形态的因素及定量分析[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1186-1193.
- [17] 廖培伟, 唐红梅. 土体断裂韧度  $K_{Ic}$  试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(4): 788-791.
- [18] 王俊杰, 朱俊高. 击实黏性土断裂韧度  $K_{Ic}$  的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 174-179.
- [19] 张振国, 丁金粟. 黏性土体断裂韧度  $K_{Ic}$  研究[J]. 岩土力学, 1993(3): 47-52.
- [20] Vallejo, L.E. (1987) The Influence of Fissures in a Stiff Clay Subjected to Direct Shear. *Geotechnique*, **37**, 69-82. <https://doi.org/10.1680/geot.1987.37.1.69>