

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.

XU Qi-liang, TANG Chao-sheng, LIU Chang-li, et al. Review on Soil Desiccation Cracking Behavior and the Mechanism Related to Fracture Mechanics[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(2): 223-236.

## 土体干缩裂隙发育过程及断裂力学 机制研究进展

徐其良<sup>1</sup>, 唐朝生<sup>1\*</sup>, 刘昌黎<sup>1</sup>, 曾 浩<sup>1</sup>, 林 銮<sup>1</sup>, 胡增辉<sup>2</sup>

(1. 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315010)

**摘 要:** 土体干缩开裂是一种常见的自然现象, 能极大弱化土体的工程性质, 是许多岩土、水利和地质工程问题的直接诱因。然而, 目前学界关于干缩裂隙的发育机理尤其是裂隙现象中蕴含的力学机制尚缺乏深入认识, 重视程度严重不够。基于国内外近些年来围绕土体干缩开裂所开展的研究, 着重对裂隙发育机理和断裂力学理论的应用进行了系统的归纳和总结, 并基于当前的研究不足, 提出了今后的研究重点和方向。结果表明: ①蒸发为土体干缩开裂的前提, 对于初始饱和的土体而言, 土体开裂发生时仍处于饱和状态, 水分蒸发处于常速率阶段, 此时对应的含水率为临界含水率; ②土体发育干缩裂隙是内部应力作用的结果, 在干燥过程中, 基质吸力引起的张拉应力达到或超过抗拉强度时, 土体发生开裂, 因此, 基质吸力和抗拉强度是影响土体开裂的两个关键力学参数; ③土体开裂与体积收缩密切相关, 收缩是土颗粒在张拉作用下发生移动的宏观表现, 可以分为正常收缩、残余收缩和零收缩阶段, 且大多数裂隙发生在正常收缩阶段, 少部分发生在残余收缩阶段, 体积收缩为开裂提供了空间, 因此, 收缩是裂隙形成和发育的必要条件; ④断裂力学是研究土体开裂破坏的主要工具之一, 运用断裂力学对土体裂隙发育过程进行解释一般有两种途径, 即从应力的角度和从能量的角度, 涉及的土体断裂力学参数包括应力强度因子、断裂韧度和能量释放率, 是用来判断土体是否开裂以及什么时候开裂的有力依据; ⑤用于测定土体断裂参数的方法主要有三点弯曲断裂试验和直接拉伸试验, 以及基于这两种方法改进的试验方法。

**关键词:** 土体干缩; 开裂; 发育过程; 力学机理; 断裂力学; 断裂韧度; 应力强度因子

**中图分类号:** P642.11<sup>+</sup>6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-6561(2018)02-0223-14

### Review on Soil Desiccation Cracking Behavior and the Mechanism Related to Fracture Mechanics

XU Qi-liang<sup>1</sup>, TANG Chao-sheng<sup>1\*</sup>, LIU Chang-li<sup>1</sup>, ZENG Hao<sup>1</sup>, LIN Luan<sup>1</sup>, HU Zeng-hui<sup>2</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

2. Ningbo Rail Transit Group Company Limited, Ningbo 315010, Zhejiang, China)

**Abstract:** Soil shrinkage cracking, which is a common natural phenomenon, can greatly weaken the engineering properties of soil and is a direct inducement for many geotechnical, water conservancy and geological engineering problems. However, at present, there is a lack of in-

收稿日期: 2018-01-09; 修回日期: 2018-03-09 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572246, 41772280, 41230636); 国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(41322019); 江苏省自然科学基金项目(BK20171228, BK20170394)

作者简介: 徐其良(1989-), 男, 河南项城人, 工学硕士研究生, E-mail: 907450073@qq.com.

\* 通讯作者: 唐朝生(1980-), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn.

depth understanding of the mechanism of shrinkage crack development, especially the mechanism of cracking. Based on the research carried out around soil shrinkage cracking in recent years at home and abroad, the application of cracking development mechanism and fracture mechanics theory in this subject were systematically summarized; the research focus and direction of this subject based on the shortcomings of the current research were put forward. The results show that ① evaporation is the premise of soil shrinkage cracking; for the initially saturated soil, the soil is still at saturation stage when the soil cracking occurs, and the water evaporation is at a constant velocity stage; at this moment, the corresponding water content is the critical; ② the soil shrinkage cracking is the result of internal stress; during the drying process, the soil cracks when the tensile stress caused by the matrix suction reaches or exceeds the tensile strength; therefore, the matrix suction and tensile strength are the two key mechanical parameters affecting soil cracking; ③ the soil cracking is closely related to the volume shrinkage; shrinkage is the macroscopic manifestation of the movement of soil particles under tension; shrinkage can be divided into three stages (normal, residual and zero shrinkages), and most fractures occur in the normal shrinkage stage, and a small part occurs in the residual shrinkage stage; volume shrinkage provides the space for cracking, so shrinkage is a necessary condition for fracture formation and development; ④ fracture mechanics is one of the main tools to study the destruction of soil cracking; there are two ways (stress and energy) to explain the process of fracture development by using fracture mechanics; the involved fracture mechanics parameters are stress intensity factor, fracture toughness and energy release rate; there are all strong evidences for judging whether the soil cracks and when cracks; ⑤ the main methods to measure soil fracture parameters are three-point bend fracture test and direct tensile test, as well as the two improved tests.

**Key words:** soil shrinkage; cracking; development process; mechanical mechanism; fracture mechanics; fracture toughness; stress intensity factor

## 0 引言

土体干缩开裂现象在自然界中十分常见,主要是地表土体在干旱气候作用下失水收缩所致。干旱时表层土体失水多,表层土体所受的张拉应力大于底层较湿土层的张力,因此,开裂一般从土体表层开始。受全球气候变化影响,极端干旱气候发生的频率和强度呈递增趋势,土体干缩开裂问题越来越突出<sup>[1]</sup>。

农业和土壤科学领域较早就关注了土体干缩开裂问题,因为裂隙的形成会加快土壤中水分的蒸发,极大改变土壤中水分、微生物和营养物质的分布和迁移特征,从而影响农作物的生长和产量<sup>[2]</sup>。Yoshida 等研究发现,农作物蒸腾作用会导致土体裂隙沿农作物行间方向发展<sup>[3]</sup>。在工程地质领域,土体中发育的干缩裂隙网络会极大改变土体的工程性质,诱发各种工程地质问题。研究表明,土体开裂是影响土质边坡稳定性的关键因素,裂隙会破坏土体的完整性。在降雨条件下,裂隙为雨水入渗提供了便利

条件,雨水入渗后会迅速软化裂隙周围的土体,从而大大降低土体的抗剪强度,诱发滑坡<sup>[4-5]</sup>。在基础工程领域,土体开裂会降低地基承载力,从而引发地基不均匀沉降。2010 年,受百年一遇的干旱天气影响,中国昆明巫家坝国际机场跑道地下水位显著降低,下层土体收缩开裂,导致机场跑道板块出现了沉降、断板、脱皮等现象,严重影响了飞机的起降安全。在水利工程领域,由于水位周期性变化,水库大坝和江河的防洪堤非常容易产生干缩裂隙,成倍增加土体的渗透性,造成坝体渗漏甚至失稳。2007 年,中国重庆地区遭遇的特大旱情使 1 200 座水库大坝严重开裂,直接面临暴雨威胁和蓄水考验;美国 Stockton 和 Wister 大坝因开裂诱发管涌而最终垮塌<sup>[6]</sup>;1989~1993 年,匈牙利境内数百千米防洪大堤的整体稳定性因干缩裂隙而降低,并出现险情<sup>[7]</sup>。在环境岩土工程领域,城市垃圾填埋场的黏土褥垫层在气候作用下极易发生干缩开裂,引发渗漏从而导致褥垫层失效<sup>[8]</sup>。比如,中国西安某垃圾填埋场衬垫层开裂,导致渗滤液泄露,对垃圾填埋场下游水体和

周围土体造成严重污染。此外,在核废料处置库中,常用膨润土作为缓冲回填材料。核废料在衰变过程中会产生高温,使得缓冲回填材料因干燥失水发生收缩开裂,为地下水下渗和核素向外迁移提供快捷通道,不仅会显著增加核泄漏的风险,也会极大缩短缓冲回填材料的使用寿命<sup>[9]</sup>。由此可见,土体干缩裂隙问题影响广泛,涉及农业、地质、岩土、水利水电和环境等多个领域,吸引了越来越多研究人员的关注。

目前,与土体干缩裂隙问题相关的研究方法有室内试验、现场试验和数值模拟等。

(1)在室内试验方面,主要是通过控制一些试验参数来研究土体干缩裂隙发育的影响因素,如边界效应、环境温度、干湿循环等参数。Corte等通过使用大尺寸的模型箱对黏土进行开裂试验来避免边界效应的影响<sup>[10]</sup>;Lakshmikantha等在试验中使用不同形状的模具分析了边界条件对裂隙发育过程的影响<sup>[11]</sup>;唐朝生等配制了不同厚度的黏土试样,在不同温度下进行干燥试验,分析了土层厚度和温度对裂隙条数、裂隙长度、裂隙宽度、土块面积等参数的影响<sup>[12-13]</sup>;周东等以中国南宁地区河流冲积相黏土为研究对象,观察并分析了土样开裂的结构特征和变化规律<sup>[14]</sup>;施斌等研究了黏土在不同温度下开裂的发生和发展规律,并运用计算机图像处理和编程技术,对不同温度下获得的土样裂隙网络几何结构和形态特征进行了定量分析<sup>[15]</sup>;杨和平等通过室内模拟试验,初步获得了压实膨胀土中裂隙的发育过程及随干湿循环作用次数的变化规律<sup>[16]</sup>;Yesiller等以美国密歇根州东南部某垃圾填埋场的衬垫黏土为研究对象进行干湿循环试验,并分析了干燥过程中试样内部吸力的变化规律及其与裂隙发育过程的相关性<sup>[17]</sup>;叶万军等对某高速公路边坡膨胀土进行了室内干湿循环试验,研究了不同干湿循环次数下脱湿过程中膨胀土的开裂、收缩特性,探讨了脱湿后裂隙的扩展特性<sup>[18]</sup>;Wang等通过改进的三点弯曲加载组件来确定黏土裂隙发育的力学机制<sup>[19]</sup>。

(2)由于室内试验所选用的试样及试验条件与自然环境存在较大差异,取得研究结果的可靠性和代表性一直备受争议,所以开展现场试验就显得尤为重要。Konrad等对3个不同层位的土体进行了开挖,使其暴露于空气中,持续蒸发了35 d,观察并记录了原位黏土中干缩裂隙的形成过程<sup>[20]</sup>;易顺民等以中国安康地区张岭膨胀土试验坑为研究场地,分析了膨胀土裂隙结构的分形特征,进一步探讨了膨胀土裂隙网络分维和裂隙面分维的力学效应<sup>[21]</sup>;

Li等对某道路边坡残积土和回填土进行了干湿循环试验,详细分析了裂隙表面形态和裂隙的发展路径<sup>[22]</sup>;龚壁卫等在中国南阳地区建设了一条长为2.05 km的南水北调中线工程试验渠道,通过渠道开挖期间的地质勘察、现场观测和取样试验,以及对现场滑坡体的取样分析,研究了膨胀土裂隙发育状态与土体矿物成分、密度、含水率(质量比,下同)等参数之间的相关性,并结合现场观测资料分析了裂隙与渠道滑坡的关联性<sup>[23]</sup>;Kodikara等以黏土为研究对象进行了现场试验,基于线弹性断裂力学(LEFM),预测了土体开裂的间距,并与现场观测结果进行了比较<sup>[24]</sup>。

(3)在数值模拟方面,与土体干缩裂隙相关的研究相对较少。沈珠江等利用数值模拟方法,分析了非饱和黏土裂隙在整个干湿循环过程中的发生和发展过程<sup>[25]</sup>;Sanchez等利用有限元软件建立了土体裂隙发育过程的三维数值模型,并进行了试验验证<sup>[26]</sup>;Lee等基于断裂力学理论开发了用于土体张拉裂隙模拟的有限元程序,为从断裂力学角度分析裂隙发育过程提供了可行途径<sup>[27]</sup>;Peron等基于离散元方法模拟了黏土干缩裂隙的形成过程,并与试验结果进行了对比<sup>[28]</sup>。

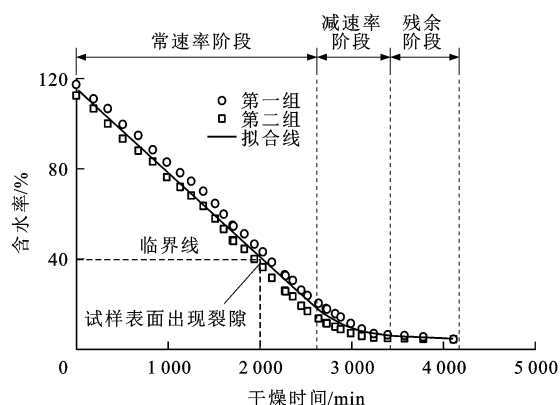
尽管前人围绕土体干缩开裂问题从不同角度进行了研究,取得了许多重要成果,但由于土体自身的复杂性和影响因素的多样性,目前学界关于干缩裂隙发育机理尤其是裂隙现象中蕴含的力学机制尚没有统一认识。本文基于国内外大量文献资料,首先阐述了蒸发、应力作用、体积收缩与干缩裂隙形成过程之间的关系,探讨了裂隙发育机理;在此基础上,重点归纳总结了断裂力学理论在土体裂隙力学机制研究中的应用情况和相关进展。

## 1 土体干缩裂隙发育过程及机理

### 1.1 蒸发与干缩裂隙形成过程

蒸发是土体干缩开裂的重要前提。随着土体中水分的蒸发,土体会由饱和向非饱和转变,在干燥到一定程度后便会发生开裂,因此,确定开裂时对应的临界含水率( $w_c$ )对研究土体开裂的机理有重要意义。唐朝生等通过对初始饱和的Romainville膨胀土开展了一系列干燥试验,发现土体中水分蒸发过程可以分为3个阶段,即常速率阶段、减速率阶段和残余阶段(图1)<sup>[29-31]</sup>。常速率阶段土体始终都处于饱和状态,随着水分蒸发,土体含水率逐渐下降,当含水率下降至40%(临界含水率)时,试样表面开始





图件引自文献[30]

图1 Romainville 膨胀土在干燥过程中含水率  
随时间变化关系

Fig. 1 Changes of Water Content of Romainville  
Expansive Soil with Time During Drying

出现裂隙,此时试样仍处于饱和状态。需要说明的是,试样表面是否出现裂隙主要通过肉眼观察进行确定,即当试样表面第一条裂隙发育到约 1 mm 时对应的时间定义为开裂时间,对应的含水率即为临界含水率。随着干燥持续,常速率阶段逐渐过渡至减速率阶段,再过渡至残余阶段,在残余阶段水分蒸发速率逐渐减至 0<sup>[32]</sup>。Rodriguez 等在试验中也得到了相似的结论<sup>[33-34]</sup>;Hu 等也认为土体初始开裂时仍处于饱和状态<sup>[32,35]</sup>。

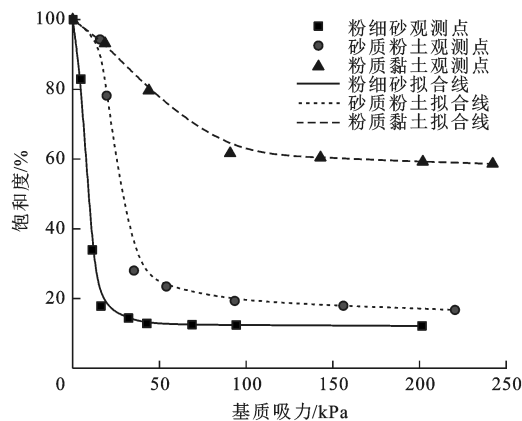
为了确定含水率和土体开裂之间的关系,前人对临界含水率开展了大量研究。Corte 等研究发现临界含水率与土体的密度成反比关系<sup>[10]</sup>;Nahlawi 等认为临界含水率随土层的厚度增加而增加<sup>[36]</sup>;Tang 等发现临界含水率随着温度的升高而增加<sup>[37]</sup>。由此可知,对于不同状态的土体,临界含水率不是一个恒定值。其根本原因是土体是由固、液、气相构成的复杂多孔材料,开裂过程与一般固体材料有本质区别<sup>[38]</sup>。土体在干燥失水过程中,孔隙结构、颗粒排列和接触状态都会发生显著变化,土体的物理力学性质也会随水分的蒸发而不断变化。因此,土体开裂过程是一个动态变化的过程,仅仅依靠临界含水率这一参数很难描述土体开裂过程,从动态的角度探索含水率与裂隙的形成过程就显得尤为必要<sup>[30]</sup>。影响土体中含水率的关键因素是蒸发速率( $R_e$ ),即单位时间内的蒸发量。Tang 等通过试验证实了蒸发速率对临界含水率的制约作用<sup>[37]</sup>;Hu 等认为相对湿度越低,土体的蒸发速率越快<sup>[39]</sup>。与临界含水率相比,蒸发速率作为一个动态变化参数,不仅能反映土体中水分蒸发的快慢,还能与土体内

部的应力场和土体内部结构的变化联系起来,对研究土体开裂的机理具有重要意义。

## 1.2 应力作用与干缩裂隙形成过程

土体开裂是一种典型的张拉破坏形式,是应力作用的结果。土体干燥过程中会产生基质吸力,当基质吸力引起的张拉应力场超过土体自身的抗拉强度时,裂隙便会形成,因此,基质吸力和土体的抗拉强度是制约裂隙发育的两个关键力学指标。

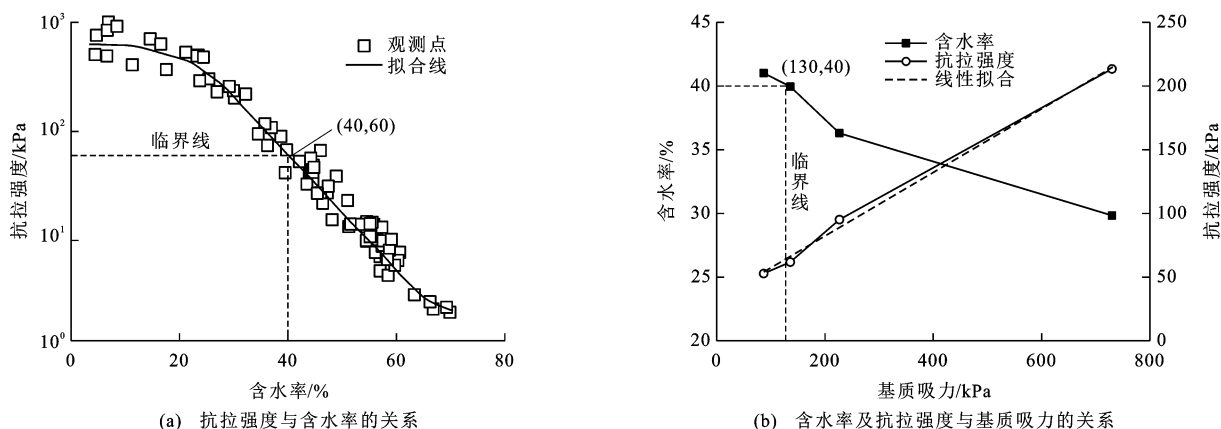
在基质吸力方面,Peron 等在试验中利用张力计测得土体初始开裂时的临界基质吸力为 90~100 kPa<sup>[34]</sup>;林鸿州等采用 SoilMoisture 公司出品的 5 bar 压力板仪来测量 3 种试样基质吸力与饱和度的变化关系(图 2)<sup>[40]</sup>。从图 2 可以看出,土样的饱和度越低,对应的基质吸力越大。



图件引自文献[40]

图2 粉细砂、砂质粉土与粉质黏土的土-水特征曲线  
Fig. 2 Soil-water Characteristic Curves of Fine Sand,  
Sandy Silt and Silty Clay

在土体的抗拉强度方面,Snyder 等系统分析了非饱和土抗拉强度的影响因素<sup>[41-42]</sup>;李昊达等总结了土体抗拉强度的测试方法,并对比分析了各种方法的优缺点<sup>[43]</sup>。仅仅对抗拉强度进行研究是不够的,其与基质吸力之间的关系也至关重要。为了研究临界抗拉强度和基质吸力的关系,唐朝生等采用单轴拉伸法,对从相同初始状态干燥到不同含水率的 Romainville 膨胀土开展了一系列抗拉试验,获得了试样在干燥过程中抗拉强度与含水率的关系[图 3(a)]<sup>[30]</sup>。从图 3(a)可以看出,当含水率为 40% 时,试样表面开始发育裂隙,对应的临界抗拉强度为 60 kPa。图 3(b)为采用渗析法测得的含水率和基质吸力之间的关系,并根据图 3(a)中的数据获得了抗拉强度与基质吸力之间的关系。由图 3(b)可知,临界含水率对应的临界基质吸力约为 130 kPa,土体在蒸发干燥过程中抗拉强度与基质吸力



图件引自文献[30]

图3 Romainville 膨胀土在干燥过程中抗拉强度、含水率和基质吸力三者之间的变化关系

Fig. 3 Relationships Among Tensile Strength, Water Content and Matric Suction of Romainville Expansive Soil During Drying

成正相关关系。

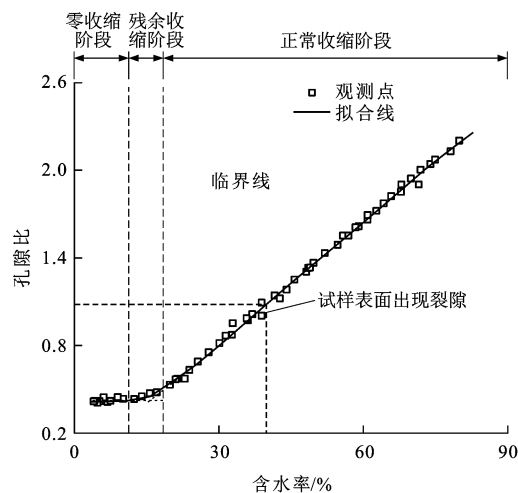
以上研究成果从力学角度进一步阐述了土体干缩开裂过程,对研究裂隙发育机理具有一定的启发,但研究深度不足。前人将断裂力学理论引入了土体开裂研究中。郑少河应用线弹性断裂力学就地表蒸发条件下的土体开裂现象进行了研究<sup>[44]</sup>。当土体出现开裂后,随着含水率的持续下降,基质吸力会逐渐增高,当基质吸力增大到一定程度时,裂隙尖端的应力强度因子将等于土体本身的断裂韧度,裂隙将在原来的基础上进一步发育,深度越来越深。因此,含水率的变化对土体裂隙的影响,可以作为断裂力学的重点。

### 1.3 体积收缩与干缩裂隙形成过程

在自然界中,并不是所有土体都会在干燥条件下产生开裂,如含砂量较高的土体,从饱和状态经干燥过渡到非饱和状态时也会产生基质吸力,但含水率无论如何减小,土体表面都不会出现裂隙。这说明土体开裂的形成过程与土质条件密切相关,因此,仅仅从干燥和力学作用的角度入手还不能很好地分析土体干缩开裂的机理。

土体裂隙发育过程与体积收缩密切相关。干燥过程中土体之所以发生收缩变形,主要是其含有亲水性黏土矿物。在含水率较高时,黏土颗粒被一层水化膜包裹,颗粒间距较大。在干燥过程中,随着水分的蒸发,水化膜逐渐变薄,在土颗粒之间形成弯液面,并将土颗粒逐渐拉近。上述现象在微观上表现为土体颗粒的重新排列和靠近,孔隙变小;在宏观上则表现为土体的收缩开裂<sup>[45]</sup>。Tang 等认为正是由于土体的这种失水收缩的特性,裂隙的形成才具备了空间条件<sup>[37, 46-52]</sup>。

土体的收缩特性可以用孔隙比-含水率曲线来描述。唐朝生等通过试验绘制了 Romainville 膨胀土的收缩曲线(图 4)<sup>[30]</sup>。土体的干燥收缩过程可分为 3 个阶段,分别是正常收缩、残余收缩和零收缩阶段。在正常收缩阶段时,土体处于饱和状态,孔隙比与含水率成线性变化关系,此时有土体收缩的体积等于水分蒸发的体积,在含水率约为 40% 时土体开始出现开裂;随着蒸发的持续进行,含水率逐渐降低,当含水率达到进气点时,空气开始进入土体中,进入残余收缩阶段,水分蒸发的体积等于进入土体中空气的体积和土体收缩的体积之和,收缩速率明显减慢;当达到缩限时,进入零收缩阶段,此时土体颗粒之间达到最密实阶段,土体体积不再随含水率的减小而发生变化,收缩终止。贺行良对中国桂林地区红黏土的失水收缩变形特征进行了研究,得到



图件引自文献[30]

图4 Romainville 膨胀土的收缩曲线

Fig. 4 Shrinkage Curve of Romainville Expansive Soil

了相同的结论<sup>[53]</sup>。唐朝生等还发现约 80% 的裂隙在正常收缩阶段完成发育,其余的裂隙主要在残余收缩阶段完成发育<sup>[30]</sup>。从以上研究成果可以看出,土体裂隙的发育程度与收缩特性有本质联系。

综上所述,土体裂隙发育过程与水分蒸发过程、体积收缩过程具有很强的耦合作用特征,受制于许多因素,仅仅借助于传统的土力学理论很难解释所有现象背后蕴藏的机理,有必要借助其他学科或领域的理论知识。

## 2 基于断裂力学的土体开裂研究

断裂力学又称为裂纹体力学,通常包含裂纹体断裂原理和裂纹体应力分析两个方面。断裂力学是研究裂纹体强度和破坏的主要工具,又可将它的研究成果和工程实践应用相结合<sup>[54]</sup>。

### 2.1 土体断裂力学研究现状

从广义上讲,在材料和结构的众多破坏形式中,塑性流动和断裂是两种较为重要的方式。断裂是新裂纹的产生或者已存在裂纹的扩展引起破坏过程<sup>[55]</sup>。过去的几十年中,断裂力学在脆性和准脆性材料上的发展主要集中在混凝土的研究中,并在岩土工程中得到了广泛认可。许多复杂的岩土工程实例表明,断裂力学已成为解决岩土力学和岩土工程问题强有力的工具。Skempton 研究了英国伦敦黏土边坡的开裂,并在此基础上提出了黏土“软化”速率和时间的关系<sup>[56]</sup>,这是对黏土中裂隙的最早研究。Petley 等最早建议将断裂力学应用到黏土边坡的失稳过程当中<sup>[57]</sup>。

在断裂力学中,裂隙被分为单型裂隙和复合型裂隙。单型裂隙可以细分为 I 型断裂(张开型断裂)、II 型断裂(滑移型断裂)和 III 型断裂(撕开型断裂)3 种(图 5)。复合型裂隙则是由上述 3 种断裂组合而成。在实际工程中的裂隙大多数都是复合型裂隙。

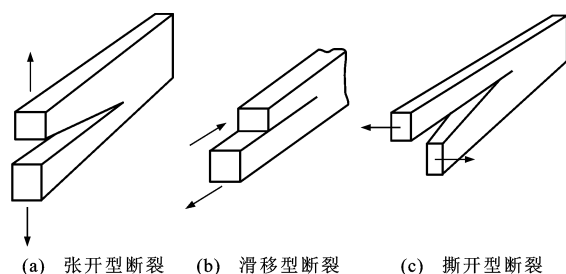


图 5 3 种断裂类型

Fig. 5 Three Modes of Crack

#### 2.1.1 土体开裂的断裂力学研究

运用断裂力学对土体裂隙发育过程进行解释

一般有两种途径,即从应力的角度和从能量的角度。从应力的角度来看,多数研究人员认为,裂隙的产生和发展是裂隙顶端处的应力达到临界状态所引起的,该应力可以是平行于裂隙面的剪应力,也可以是垂直于裂隙面的拉应力<sup>[58]</sup>。Chudnovsky 等认为常用的破坏准则对脆性材料的破坏已不再适用<sup>[59]</sup>。在断裂力学的 3 种基本断裂类型中,II 型断裂与实际工程联系比较紧密。Harison 等认为在土坝、堤坝、边坡和垃圾填埋场顶部和底部的黏土层中,土体开裂是拉应力引起的,而这些拉应力可能是土体的不均匀沉降或者环境因素(如干旱、高温)引起的<sup>[60-61]</sup>。Vallejo 认为在直剪试验条件下,只有裂隙尖端附近土体中的最大拉应力大于或等于土体抗拉强度时,土体开裂才发生扩展,因此,可以用线弹性断裂力学中的最大周向应力理论判定土体开裂的扩展<sup>[62]</sup>。从能量的角度来看,许多研究人员认为土体开裂的产生是土体内部能量不平衡引起的。Fang 认为土体的开裂是一种自然现象,在许多天然土体和人工土建结构中都可以见到<sup>[63]</sup>。常见的不平衡能量有分布不均匀的温度、水和压实能等。此外,冻胀、融陷、干化和湿化等周围环境的变化也会引起土体裂隙的发生和发展。Talbot 研究指出,几乎所有的大型土建结构(如边坡、垃圾填埋场、堤坝等)都存在不同程度的开裂,产生这种开裂的机理是多种多样的,但大多数机理中都包含土体能量的释放或减小<sup>[64]</sup>。

#### 2.1.2 土体断裂力学参数与断裂判据

要从断裂力学的角度来研究土体的开裂行为,首先要掌握土体的断裂力学参数。土体的断裂力学参数主要包括:应力强度因子( $K$ )、断裂韧性( $K_{IC}$ )和能量释放率( $G$ )。断裂力学参数是用来判断土体是否开裂以及什么时候开裂的有力依据。常用来测定断裂力学参数的方法主要有三点弯曲断裂试验和紧凑拉伸试验,以及基于这两种方法改进的试验方法<sup>[65]</sup>。

Irwin 认为裂纹扩展与裂纹尖端附近的应力场有关,并提出了应力强度因子作为断裂判据<sup>[66]</sup>,该判据一经提出就被广泛运用到工程实践中。 $K_I$ 、 $K_{II}$  和  $K_{III}$  分别为 I 型、II 型和 III 型断裂的应力强度因子。应力强度因子控制着裂隙尖端的应力和应力场。以 I 型断裂为例,其应力强度因子为

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为裂隙位置上按无裂隙计算的应力,即名义应力; $a$  为裂隙的尺寸; $\alpha$  为形系数,与裂隙大小、位置有关。



从式(1)不难看出,  $K_I$  与应力大小、裂隙长度有关,并且随着应力的增大而增大,当达到临界状态时,土体裂隙就会在原有的基础上扩展。常用来确定应力强度因子的方法有解析法、数值计算法和试验法<sup>[65]</sup>。I型断裂的判据可以表示为

$$K_I \leq K_{Ic} \quad (2)$$

式中:  $K_{Ic}$  为I型断裂韧度,是材料本身特有的性能,表征了土体抵抗开裂的能力。

II型和III型断裂的判据可以表示为

$$K_{II} \leq K_{IIc} \quad (3)$$

$$K_{III} \leq K_{IIIc} \quad (4)$$

式中:  $K_{IIc}$  为II型断裂韧度;  $K_{IIIc}$  为III型断裂韧度。

能量释放率是从能量角度分析土体开裂的一个重要参数,指裂隙扩展单位面积时所释放的能量。从能量角度分析裂隙尖端应力场可以得到能量释放率和应力强度因子之间的关系,其表达式为

$$\begin{cases} G_I = \frac{K_I^2}{E} & \text{平面应力状态} \\ G_I = \frac{(1-\nu^2)K_I^2}{E} & \text{平面应变状态} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $G_I$  为I型断裂能量释放率;  $E$  为弹性模量;  $\nu$  为泊松比。

在实际工程中,由于土体所受荷载不一定均匀以及土体所处环境的复杂多变等,土体中裂隙的实际受力状态很复杂,裂隙类型常为几种单型裂隙的组合。因此,复合型裂隙的应力强度因子也是复合型的,这种裂隙在实际工程中非常常见。其中,I-II复合型断裂是最常见的,其断裂判据类型分为理论判据和经验判据两种。

(1)理论判据。代表性的理论判据有 Erdogan 等提出的最大周向应力断裂判据<sup>[67]</sup>、Hussain 等提出的能量释放率断裂判据<sup>[68]</sup>及 Sih 提出的应变能密度因子断裂判据<sup>[69]</sup>。

最大周向应力断裂判据的基本假设为:①裂隙初始开裂沿最大周向应力的方向;②当该方向上的最大周向应力( $\sigma_{\theta\max}$ )达到临界值时,裂隙发生开裂。运用线弹性断裂力学可解得土体裂隙附近的应力场。其表达式为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} [K_I (3 - \cos \theta) \cos \frac{\theta}{2} + K_{II} (3 \cos \theta - 1) \sin \frac{\theta}{2}] \\ \sigma_\theta = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I \cos \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta] \\ \tau_\theta = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)] \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\tau_\theta$  分别为裂隙附近的径向应力、周向应力、切应力;  $\theta$  为极角;  $r$  为极径。

根据上述假设和裂隙附近的应力场可得

$$\sigma_{\theta\max} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r_0}} \cos \frac{\theta_0}{2} [K_I \cos \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0] \quad (7)$$

式中:  $\theta_0$ 、 $r_0$  分别为极角和极径的临界值。

对应的断裂判据为

$$\sigma_{\theta\max} \leq \sigma_c \quad (8)$$

式中:  $\sigma_c$  为裂隙附近周向应力的临界值。

能量释放率断裂判据的基本假设为:①最大能量释放率达到临界值;②裂隙初始开裂沿最大能量释放率方向。

在平面应变情形中,能量释放率表达式为

$$\begin{cases} G_I = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2 \\ G_{II} = \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^2 \\ G_{III} = \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $G_{II}$ 、 $G_{III}$  分别为II型、III型断裂能量释放率。

对纯张开型裂隙,  $G_I = G_{Ic}$ ,  $G_{Ic}$  与土体自身的性质有关。

对复合型裂隙,能量释放率表达式为

$$G = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2 + \frac{1-\nu^2}{E} K_{II}^2 + \frac{1+\nu}{E} K_{III}^2 \quad (10)$$

对应的断裂判据为

$$G \leq G_c \quad (11)$$

式中:  $G_c$  为能量释放率的临界值。

应变能密度因子断裂判据的基本假设为:①最小应变能密度因子达到临界值;②裂隙初始开裂沿应变能密度因子最小的方向。

应变能密度因子( $S$ )表达式为

$$S = a_{11} K_I^2 + 2a_{12} K_I K_{II} + a_{22} K_{II}^2 \quad (12)$$

其中,  $a_{11}$ 、 $a_{12}$ 、 $a_{22}$  为中间参数,计算公式分别为

$$a_{11} = \frac{1}{16\mu} [(3-4\nu - \cos \theta)(1 + \cos \theta)] \quad (13)$$

$$a_{12} = \frac{1}{16\mu} 2 \sin \theta [\cos \theta - (1-2\nu)] \quad (14)$$

$$a_{22} = \frac{1}{16\mu} [4(1-\nu)(1 - \cos \theta) + (1 + \cos \theta) \cdot (3 \cos \theta - 1)] \quad (15)$$

Sih 认为裂隙沿应变能密度因子最小值( $S_{\min}$ )方向开裂,由  $\partial S / \partial \theta = 0$  可得  $\theta = \theta_0$ ,  $\theta_0$  即为开裂角<sup>[69]</sup>。对应的断裂判据为

$$S_{\min} \leq S_c \quad (16)$$

式中:  $S_c$  为应变能密度因子的临界值。

(2)经验判据。徐道远等以混凝土为试验材料,总结出了一套经验判据<sup>[70-71]</sup>。

文献[70]给出的断裂判据为

$$\left(\frac{K_{II}}{K_{IC}}\right)^2 + 0.9(K_I/K_{IC}) = 0.9 \quad (17)$$

文献[71]给出的断裂判据为

$$K_{II}^2 + 0.46K_I K_{IC} = 0.46K_{IC}^2 \quad (18)$$

根据数学分析和试验数据,还可以得到 I-II 复合型断裂判据为

$$\frac{K_I^2}{K_{IC}^2} + \frac{K_{II}^2}{K_{IC}^2} = 1 \quad (19)$$

式(19)中  $K_{IC}$  和  $K_{IIC}$  由试验测得,一般取  $K_{IIC} \cong 0.9K_{IC}$ 。

需要指出的是,经验判据是根据现有试验结果总结出来的,与试验条件有关,一般作为参考,不适用于大多数情况。

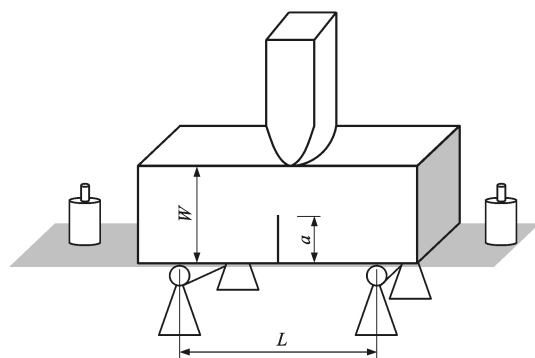
## 2.2 土体断裂力学试验

以断裂力学理论为基础的试验多用来测试土体断裂参数,同时也研究干密度、含水率和温度等变量对断裂韧度和应力强度因子的影响。最具代表性的试验方法为三点弯曲断裂试验。比如,Chandler 以黏土和含有适量砂的黏土为试验材料,开展了三点弯曲断裂试验,并用弹塑性断裂力学理论对试验的 J 积分临界值进行了分析<sup>[72]</sup>。

断裂韧度是土体抵抗开裂能力大小的体现,可通过试验确定。丁金粟等认为土体的抗拉强度较小,对断裂试验影响较大,因此,设计了单侧开缝和水平中心荷载拉伸试验方法来测定 I 型断裂韧度;同时也研究了干密度和含水率对 I 型断裂韧度的影响,认为干密度在一定范围内变化时,断裂韧度相差一倍,高含水率对应的断裂韧度仅为低含水率对应断裂韧度的 40%<sup>[73]</sup>。Chudnovsky 等将高岭土制成中空圆柱试样,开展了一系列试验,认为在 I 型断裂中的破坏带在裂纹前方传播<sup>[59]</sup>。张振国等通过测定中国黄河小浪底水利枢纽工程黏土的断裂韧度,分析了干密度和含水率变化对断裂韧度的影响<sup>[74]</sup>。为了研究温度、含水率和加载速率等对断裂韧度的影响,李洪升等以冻土为研究对象,制作三点弯曲断裂试样,认为三者都是影响断裂韧度的主要因素<sup>[75]</sup>。

Nichols 等对盐水制备的粉质黏土试样进行了室内三点弯曲断裂试验,认为断裂韧度、弹性模量与含水率成反比,与密度成正比<sup>[76]</sup>;Lima 等概述了适用于土体的断裂力学方程,将理论分析的结果与用溶解性总固体(TDS)约为 400、4 500 和 9 000 mg · L<sup>-1</sup> 的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液冲洗的美国图莱里(Tulare)盆地土

体裂隙形态进行比较,发现高盐度处理的土体中裂隙宽度和深度的变化所需能量是低盐度土体的两倍<sup>[77]</sup>。此外,Lima 等还发现引起裂纹生长所必需的含水率随着土体干燥而增加,并且在任何给定的含水率条件下,高盐度土体中与裂纹生长相关的应力相对较小<sup>[77]</sup>。因此,将断裂力学理论与土体物理性质相结合,可定量评价土体开裂的倾向和裂隙发育程度。Hanson 等对比分析了三点弯曲断裂试验测得的断裂韧度与环试验结果,发现黏土的断裂韧度受物质成分和含水率的影响比较显著,而受试样放置条件和初始压实度的影响相对较小<sup>[78]</sup>。Hallett 等对细硅砂和高岭土 3 种混合物开展了断裂试验,认为线弹性断裂力学难以解释这种人工复合材料的断裂特征<sup>[79]</sup>。Hallett 等对标准的三点弯曲断裂试验进行了改进(图 6),在试样两端增加砝码以便平衡试样自重的影响,并应用裂隙张开位移(COD)准则、裂隙尖端张开角(CTOA)准则分析了黏土试样的断裂特征<sup>[80]</sup>。



$L$  为受力点的有效长度; $W$  为试样的宽度;图件引自文献[80]

图 6 改进的三点弯曲断裂试验装置

Fig. 6 Improved Three-point Bend Fracture Test Apparatus

土体中产生龟裂后,通常可以把土体看作含有初始裂隙的物体,并在初始裂隙的基础上进一步发生开裂。从断裂力学角度出发,通过研究裂隙尖端附近的应力变化,可以掌握裂隙在荷载作用下的扩展规律。基质吸力在土体中产生张拉应力后,在断裂力学中定义了应力强度因子与之对应;当应力强度因子大于断裂韧度时,裂隙就会进一步扩展。在采用三点弯曲断裂试验测试断裂韧度时,为了保证试样的线弹性行为以及忽略试样尺寸效应,对试样尺寸裂缝深度要求为

$$\begin{cases} (W-a) \geq 2.5\left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}}\right)^2 \\ a \geq 2.5\left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}}\right)^2 \\ B \geq 2.5\left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}}\right)^2 \end{cases} \quad (20)$$



式中:  $\sigma_{ys}$  为材料的屈服应力;  $B$  为试样的厚度。

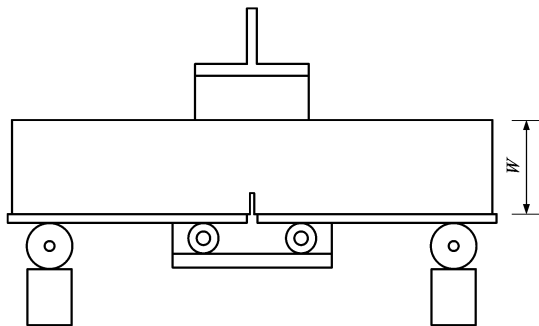
当  $L=4W$ ,  $a/W=0.45\sim 0.55$  时, 应力强度因子  $K_I$  为

$$K_I = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^2}{2\left(1+\frac{2a}{W}\right)\left(1-\frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[ 1.99 - \left(\frac{a}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{W}\right)(2.15 - 3.93 \frac{a}{W}) + 2.7 \frac{a^2}{W^2} \right] \quad (21)$$

式中:  $K_i$  为断裂  $i$  的应力强度因子, 断裂  $i$  分别为 I 型、II 型、III 型断裂。

当  $K_I > K_{IC}$  时, 裂纹扩展, 土体进一步开裂。当开裂稳定后, 应力场重新分布。

尽管过去许多断裂力学模型已被用于描述土体的开裂行为, 但大多数模型都不适用于高含水率和具有明显塑性的黏土。为此, Hallett 等提出了一种新的基于弹塑性断裂力学理论的方法来研究软黏土中裂纹的形成和扩展机制, 并设计了四点弯曲断裂试验装置(图 7)用于测试试样的断裂力学参数<sup>[81]</sup>。除此之外, 为了消除试样自重对试验结果的影响, Suits 等设计了一种水平加载的三点弯曲断裂试验装置(图 8)和改进的四点不对称弯曲断裂试验装置(图 9), 并研究了压实粉质黏土断裂破坏时的  $K_{IC}$ 、 $K_{IIC}$  和混合模式 I-II 复合型断裂应力强度因子  $K_I$  和  $K_{II}$ , 认为混合模式 I-II 复合型断裂失效理论(如应变能密度因子理论、最大周向应力理论和能量释放率理论)不能充分预测试样的断裂失效行为<sup>[82-83]</sup>。

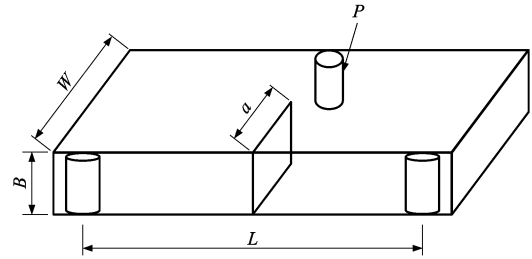


图件引自文献[81]

图 7 四点弯曲断裂试验装置

Fig. 7 Four-point Bend Fracture Test Apparatus

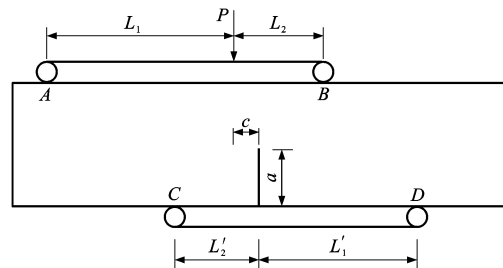
Prat 等设计了一款用于测试土体断裂韧度的直接拉伸试验装置(图 10), 并测试了土体在不同含水率条件下的断裂韧度, 认为断裂韧度随含水率的增加而降低<sup>[84]</sup>。Lakshmikantha 等以西班牙巴塞罗那粉砂黏土为试验材料, 并通过一系列断裂力学试验研究了土体抗拉强度和断裂韧度之间的定量关



P 为荷载; 图件引自文献[82]

图 8 水平加载的三点弯曲断裂试验装置

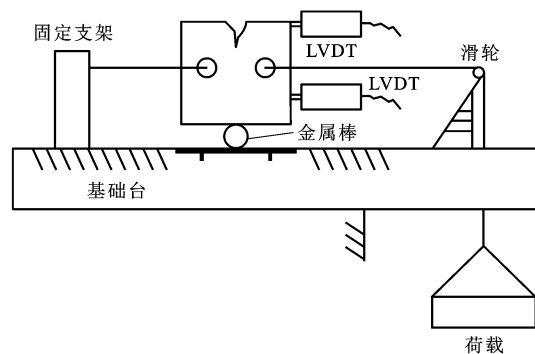
Fig. 8 Three-point Bend Fracture Test Apparatus with Horizontal Loading



$L_1$ 、 $L_2$  分别为 A、B 点到加载点 P 的距离;  $L'_2$ 、 $L'_1$  分别为 C、D 点到预裂缝的距离; c 为加载点与预裂缝的水平距离; 图件引自文献[83]

图 9 改进的四点不对称弯曲断裂试验装置

Fig. 9 Improved Four-point Unsymmetrical Bend Fracture Test Apparatus



LVDT 为线性可变差动变压器; 图件引自文献[84]

图 10 直接拉伸试验装置

Fig. 10 Direct Tensile Test Apparatus

系, 以及开裂过程中的尺寸效应<sup>[85]</sup>。

### 2.3 基于断裂力学的数值模拟

除了试验, 数值模拟方法也是研究土体开裂破坏过程的重要手段之一。但由于土体是一种复杂的多孔多相非均质材料, 目前学术界对土体中裂隙的形成和发育机理没有统一认识, 理论研究相对薄弱, 严重制约了土体开裂数值模拟研究的发展, 系统性研究报道尚比较鲜见。Juarez-Luna 等基于线弹性断裂力学理论, 采用二维断裂力学有限元程序模拟

了土体断裂过程和裂纹扩展现象,并验证了临界应力强度因子对裂隙发育的控制作用<sup>[86]</sup>。Konrad等提出了一种基于线弹性断裂力学的高度理想化的本构模型,用于预测黏土干缩裂隙之间的间距和描述裂隙扩展现象<sup>[87]</sup>。该模型可用于模拟泥浆、天然固结土体和压实黏土的干缩开裂特征。Lee等基于线弹性断裂力学理论和断裂韧度参数,提出了脆性土体中裂纹扩展的有限元模型,有效预测裂隙的发育长度,并得到试验验证<sup>[27]</sup>。

### 3 结 语

(1)蒸发和开裂互为因果关系。对于初始饱和的土体而言,土体开裂发生时仍处于饱和状态,水分蒸发处于常速率阶段。

(2)土体干缩开裂是一种典型的破坏形式,是力学作用的结果。在干燥过程中,基质吸力引起的张拉应力超过土体自身的抗拉强度时,裂隙便会形成,因此,基质吸力和抗拉强度是制约土体干缩裂隙发育的两个关键参数。

(3)土体干缩开裂过程与体积收缩密切相关。收缩是微观孔隙变形的宏观表现,也是裂隙形成和发展的必要条件。

(4)断裂力学是研究土体开裂破坏的主要工具之一。运用断裂力学对土体裂隙发育过程进行解释一般有两种途径,即从应力的角度和从能量的角度。土体的断裂力学参数主要包括应力强度因子、断裂韧度和能量释放率,是用来判断土体是否开裂以及什么时候开裂的有力依据。常用来测定断裂参数的方法主要有三点弯曲断裂试验和直接拉伸试验,以及基于这两种方法改进的试验方法。

(5)现阶段线弹性断裂力学理论被广泛用于描述土体裂隙的发育过程,取得了较好的效果。

(6)尽管国内外学者围绕土体断裂力学开展了不少研究,尤其是在断裂韧度测试方面取得良好结果,但是仍然存在诸多不足,今后应从以下几个方面展开重点研究,以期有新的突破:①经典的断裂力学理论主要适用于刚性材料,而土体具有很强的塑性,目前断裂力学虽然在解释土体裂隙扩展方面取得了一些进展,但在准确判断土体裂隙发育时间和发育位置方面尚存在不足之处,今后应针对土体的特殊性加强土体断裂力学的理论研究;②现阶段与土体开裂相关的断裂力学研究主要局限于试验方面,数值模拟方面的研究成果存在明显不足,需要引起关注;③对土体中除I-II复合型断裂之外的其他复合

型裂隙开展针对性研究,开发新型的便于操作的土体断裂参数试验装置和设备;④开展原位试验研究,尽管原位试验存在耗时、费力和成本高等问题,但这类试验对研究自然界土体开裂现象的本质规律具有不可替代的作用。

### 参 考 文 献 :

#### References :

- [1] 熊东红,周红艺,杜长江,等.土壤裂缝研究进展[J].土壤,2006,38(3):249-255.  
XIONG Dong-hong,ZHOU Hong-yi,DU Chang-jiang,et al. A Review on the Study of Soil Cracking[J]. Soils, 2006,38(3):249-255.
- [2] BRONSWIJK J J B,HAMMINGA W,OOSTINDIE K. Field-scale Solute Transport in a Heavy Clay Soil[J]. Water Resources Research,1995,31(3):517-526.
- [3] YOSHIDA S,ADACHI K. Effects of Cropping and Puddling Practices on the Cracking Patterns in Paddy Fields[J]. Soil Science and Plant Nutrition,2001,47(3):519-532.
- [4] 袁俊平,殷宗泽. 膨胀土裂隙的量化指标与强度性质研究[J]. 水利学报,2004(6):108-113.  
YUAN Jun-ping,YIN Zong-ze. Quantitative Index of Fissure and Strength Characteristics of Fissured Expansive Soils[J]. Shuili Xuebao,2004(6):108-113.
- [5] 孔令伟,陈建斌,郭爱国,等. 大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(7):1065-1073.  
KONG Ling-wei,CHEN Jian-bin,GUO Ai-guo,et al. Field Response Tests on Expansive Soil Slopes Under Atmosphere[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(7):1065-1073.
- [6] SHERARD J L. Embankment Dam Cracking[M]. New York:John Wiley and Sons,1973.
- [7] LAZANYE L,HORVATH G,FARKAS J. Volume Change Induced Cracking of Flood Protection Dikes Built of Clay[C]//UNSAT. Proceeding of the 2nd International Conference on Unsaturated Soils. Beijing: International Academic Publishers,1998:213-218.
- [8] 蔡光华. 垃圾填埋场压实黏土封场系统开裂规律研究[D]. 武汉:武汉工业学院,2012.  
CAI Guang-hua. Cracking Law of Landfill Compacted Clay Cover System[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology,2012.
- [9] 唐朝生,施 斌,崔玉军. 高放废物地质处置库中缓冲回填材料的收缩特征[J]. 岩土工程学报,2012,34(7):1192-1200.  
TANG Chao-sheng,SHI Bin,CUI Yu-jun. Shrinkage

- Characteristics of Buffer-backfilling Materials in High-level Radioactive Waste Geological Disposal[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1192-1200.
- [10] CORTE A, HIGASHI A. Experimental Research on Desiccation Cracks in Soil[R]. Wilmette: U. S. Army Snow Ice and Permafrost Research Establishment, 1960.
- [11] LAKSHMIKANTHA M R, PRAT P C, LEDESMA A. An Experimental Study of Cracking Mechanisms in Drying Soils[C]// THOMAS H R. The 5th ICEG Environmental Geotechnics: Opportunities, Challenges and Responsibilities for Environmental Geotechnics. London: Thomas Telford, 2006: 533-540.
- [12] 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.
- TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun, et al. Factors Affecting the Surface Cracking in Clay Due to Drying Shrinkage[J]. Shuili Xuebao, 2007, 38(10): 1186-1193.
- [13] 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 Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun, 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.
- [14] 周 东, 王利明, 欧孝夺, 等. 环境温湿度对黏土干缩裂缝结构形态影响[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2012, 37(2): 204-209.
- ZHOU Dong, WANG Li-ming, OU Xiao-duo, et al. Influence of Environment Temperature and Humidity on Structural Morphology of Desiccation Fissures in Clay[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2012, 37(2): 204-209.
- [15] 施 斌, 唐朝生, 王宝军, 等. 黏性土在不同温度下龟裂的发展及其机理讨论[J]. 高校地质学报, 2009, 15(2): 192-198.
- SHI Bin, TANG Chao-sheng, WANG Bao-jun, et al. Development and Mechanism of Desiccation Cracking of Clayey Soil Under Different Temperatures[J]. Geological Journal of China Universities, 2009, 15(2): 192-198.
- [16] 杨和平, 刘艳强, 李哈峰. 干湿循环条件下碾压膨胀土的裂隙发展规律[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(1): 1-5.
- YANG He-ping, LIU Yan-qiang, LI Han-feng. The Development of Cracks of Compacted Expansive Soil Under Dry-wet Cycling[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2012, 28(1): 1-5.
- [17] YESILLER N, MILLER C J, INCI G, et al. Desiccation and Cracking Behavior of Three Compacted Landfill Liner Soils[J]. Engineering Geology, 2000, 57(1/2): 105-121.
- [18] 叶万军, 万 强, 申艳军, 等. 干湿循环作用下膨胀土开裂和收缩特性试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2016, 36(4): 541-547.
- YE Wan-jun, WAN Qiang, SHEN Yan-jun, et al. Cracking and Shrinking Properties of Expansive Soil Under Wetting-drying Cycles [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2016, 36(4): 541-547.
- [19] WANG J J, ZHU J G, CHIU C F, et al. Experimental Study on Fracture Toughness and Tensile Strength of a Clay[J]. Engineering Geology, 2007, 94(1/2): 65-75.
- [20] KONRAD J M, AYAD R. Desiccation of a Sensitive Clay: Field Experimental Observations[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 34(6): 929-942.
- [21] 易顺民, 黎志恒, 张延中. 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 294-298.
- YI Shun-min, LI Zhi-heng, ZHANG Yan-zhong. The Fractal Characteristics of Fractures in Expansion Soil and Its Significance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(3): 294-298.
- [22] LI J H, ZHANG L M. Study of Desiccation Crack Initiation and Development at Ground Surface[J]. Engineering Geology, 2011, 123(4): 347-358.
- [23] 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.
- GONG Bi-wei, CHENG Zhan-lin, HU Bo, et al. Research on Engineering Properties of Fissures in Expansive Soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1825-1830.
- [24] KODIKARA J, BARBOUR S L, FREDLUND D G. An Idealized Framework for the Analysis of Cohesive Soils Undergoing Desiccation: Discussion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 34(6): 1112-1114.
- [25] 沈珠江, 邓 刚. 黏土干湿循环中裂缝演变过程的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增2): 1-6.
- SHEN Zhu-jiang, DENG Gang. Numerical Simulation of Crack Evolution in Clay During Drying and Wetting Cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S2): 1-6.
- [26] SANCHEZ M, MANZOIL O L, GUIMARAES L J N.



- Modeling 3D Desiccation Soil Crack Networks Using a Mesh Fragmentation Technique[J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 62: 27-39.
- [27] LEE F H, LO K W, LEE S L. Tension Crack Development in Soils[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1988, 114(8): 915-929.
- [28] PERON H, DELENNE J Y, LALLOUI L, et al. Discrete Element Modelling of Drying Shrinkage and Cracking of Soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(1/2): 61-69.
- [29] 唐朝生, 施 斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(9): 1376-1384.
- TANG Chao-sheng, SHI Bin. Swelling and Shrinkage Behaviour of Expansive Soil During Wetting-drying Cycles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(9): 1376-1384.
- [30] 唐朝生, 施 斌, 刘 春. 膨胀土收缩开裂特性研究[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(5): 663-673.
- TANG Chao-sheng, SHI Bin, LIU Chun. Study on Desiccation Cracking Behaviour of Expansive Soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(5): 663-673.
- [31] 孙凯强, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 土体龟裂研究方法[J]. *岩土力学*, 2017, 38(增1): 11-26.
- SUN Kai-qiang, TANG Chao-sheng, LIU Chang-li, et al. Research Methods of Soil Desiccation Cracking Behavior[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(S1): 11-26.
- [32] PERON H, LALLOUI L, HUECKEL T, et al. Experimental Study of Desiccation of Soil[C]// MILLER G A, ZAPATA C E, HOUSTON S L, et al. *Unsaturated Soils*. Reston: ASCE, 2006: 1073-1084.
- [33] RODRIGUEZ R, SANCHEZ M, LEDESMA A, et al. Experimental and Numerical Analysis of Desiccation of a Mining Waste[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(6): 644-658.
- [34] PERON H, HUECKEL T, LALLOUI L, et al. Fundamentals of Desiccation Cracking of Fine-grained Soils: Experimental Characterisation and Mechanisms Identification[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2009, 46(10): 1177-1201.
- [35] HU L B, PERON H, HUECKEL T, et al. Numerical and Phenomenological Study of Desiccation of Soil[C]// LU N, HOYOS L R, REDDI L. *Advances in Unsaturated Soil, Seepage, and Environmental Geotechnics*. Reston: ASCE, 2006: 166-173.
- [36] NAHLAWI H, KODIKARA J K. Laboratory Experiments on Desiccation Cracking of Thin Soil Layers[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 24(6): 1641-1664.
- [37] TANG C S, CUI Y J, TANG A M, et al. Experiment Evidence on the Temperature Dependence of Desiccation Cracking Behavior of Clayey Soils[J]. *Engineering Geology*, 2010, 114(3/4): 261-266.
- [38] TANG C S, SHI B, LIU C, et al. Influencing Factors of Geometrical Structure of Surface Shrinkage Cracks in Clayey Soils[J]. *Engineering Geology*, 2008, 101(3/4): 204-217.
- [39] HU L B, PERON H, HUECKEL T, et al. Drying Shrinkage of Deformable Porous Media: Mechanisms Induced by the Fluid Removal[C]// SIEGEL T C, LUNA R, HUECKEL T, et al. *Computer Applications in Geotechnical Engineering*. Reston: ASCE, 2007: 1-10.
- [40] 林鸿州, 李广信, 于玉贞, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1931-1936.
- LIN Hong-zhou, LI Guang-xin, YU Yu-zhen, et al. Influence of Matric Suction on Shear Strength Behavior of Unsaturated Soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1931-1936.
- [41] SNYDER V A, MILLER R D. A Pneumatic Fracture Method for Measuring the Tensile Strength of Unsaturated Soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(6): 1369-1374.
- [42] SNYDER V A, MILLER R D. Tensile Strength of Unsaturated Soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(1): 58-65.
- [43] 李昊达, 唐朝生, 徐其良, 等. 土体抗拉强度试验研究方法的进展[J]. *岩土力学*, 2016, 37(增2): 175-186.
- LI Hao-da, TANG Chao-sheng, XU Qi-liang, et al. Advances in Experimental Testing Methods of Soil Tensile Strength[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S2): 175-186.
- [44] 郑少河. 膨胀土的开裂机理及雨水入渗条件下的边坡稳定性分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- ZHENG Shao-he. Cracking Mechanism of Expansive Soil and Slope Stability Analysis Under Rainwater Infiltration[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2003.
- [45] PERON H, LALLOUI L, HUECKEL T, et al. Desiccation Cracking of Soils[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2009, 13(7/8): 869-888.
- [46] 唐朝生, 崔玉军, TANG A M, 等. 膨胀土收缩开裂过程及其温度效应[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(12):

- 2181-2187.
- TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG A M, et al. Shrinkage and Desiccation Cracking Process of Expansive Soil and Its Temperature-dependent Behaviour[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2181-2187.
- [47] 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.
- OUYANG Bin-qiang, TANG Chao-sheng, WANG De-yin, et al. Advances on Soil Moisture Evaporation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 625-636.
- [48] 冷挺,唐朝生,徐丹,等. 膨胀土工程地质特性研究进展[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 112-128.
- LENG Ting, TANG Chao-sheng, XU Dan, et al. Advance on the Engineering Geology Characteristics of Expansive Soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 112-128.
- [49] 徐士康,唐朝生,李昊达,等. 土体水分蒸发模型研究进展[J]. 高校地质学报, 2017, 23(4): 640-649.
- XU Shi-kang, TANG Chao-sheng, LI Hao-da, et al. Review on Soil Moisture Evaporation Model[J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(4): 640-649.
- [50] 刘昌黎,唐朝生,李昊达,等. 界面粗糙度对土体龟裂影响的试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1314-1321.
- LIU Chang-li, TANG Chao-sheng, LI Hao-da, et al. Experimental Study on Effect of Interfacial Roughness on Desiccation Cracking Behavior of Soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1314-1321.
- [51] 徐丹,唐朝生,冷挺,等. 干湿循环对非饱和膨胀土抗剪强度影响的试验研究[J]. 地学前缘, 2018, 25(1): 286-296.
- XU Dan, TANG Chao-sheng, LENG Ting, et al. Shear Strength of Unsaturated Expansive Soil During Wet-drying Cycles[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(1): 286-296.
- [52] 王德银,唐朝生,李建,等. 干湿循环作用下膨胀土的贯入特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 57-65, 75.
- WANG De-yin, TANG Chao-sheng, LI Jian, et al. An Experimental Study of Penetration Characteristics of Expansive Soil Under Wet-drying Cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 57-65, 75.
- [53] 贺行良. 桂林红黏土的失水收缩变形特征研究[J]. 路基工程, 2016(4): 111-114.
- HE Xing-liang. On Shrinkage Deformation Characteristics of Guilin Lateritic Clay Due to Water Loss[J]. Subgrade Engineering, 2016(4): 111-114.
- [54] 张晓敏,严波,万玲. 断裂力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2012.
- ZHANG Xiao-min, YAN Bo, WAN Ling. Fracture Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [55] ANDREEV G E. Brittle Failure of Rock Materials: Test Results and Constitutive Models[M]. Rotterdam: Brockfield, 1995.
- [56] SKEMPTON A W. The Rate of Softening in Stiff Fissured Clays with Special Reference to London Clay [C] // ISSMFE. Proceeding of 2nd ISSMFE. Rotterdam: ISSMFE, 1948: 50-53.
- [57] PETLEY D J, SCHUSTER R L, SKEMPTON A W. Joints and Fissures in the London Clay at Wraysbury and Edgware[J]. Geotechnique, 1969, 19(2): 205-217.
- [58] 王俊杰. 基于断裂力学的土石坝心墙水力劈裂研究[D]. 南京:河海大学, 2005.
- WANG Jun-jie. Study on Hydraulic Fracturing of Core Wall of Earth-rock Dam Based on Fracture Mechanics [D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [59] CHUDNOVSKY A, SAADA A, LESSER A J. Micro-mechanisms of Deformation in Fracture of Overconsolidated Clays [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(2): 213-221.
- [60] HARISON J A. Fracture Toughness and Tensile Crocking of Soils[D]. Lexington: University of Kentucky, 1993.
- [61] HANSON J A, HARDIN B O, MAHBOUB K. Fracture Toughness of Compacted Cohesive Soils Using Ring Test[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(5): 872-891.
- [62] VALLEJO L E. The Influence of Fissures in a Stiff Clay Subjected to Direct Shear[J]. Geotechnique, 1987, 37(1): 69-82.
- [63] FANG H Y. Cracking and Fracture Behavior of Soil [J]. Archives of Cardiovascular Diseases, 2014, 105(4): 193-195.
- [64] TALBOT J R. The Mechanics of Cracking in Embankment Dams[C] // ASCE. Fracture Mechanics Applied to Geotechnical Engineering. Reston: ASCE, 2011: 118-131.
- [65] 华国斌. 基于断裂力学的黏土边坡稳定性分析[D]. 南京:河海大学, 2007.
- HUA Guo-bin. Study on Stability of Clay Slope Based on Fracture Mechanics[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [66] IRWIN G R. Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Traversing a Plate[J]. Journal of Applied Mechanics, 1957, 24: 361-364.

- [67] ERDOGAN F, SIH G C. On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear [J]. *Journal of Basic Engineering*, 1963, 85(4): 519-525.
- [68] HUSSAIN M, PU S, UNDERWOOD J. Strain Energy Release Rate for a Crack Under Combined Mode I and Mode II [J]. *American Society for Testing and Materials*, 1974, 560: 2-28.
- [69] SIH G C. Strain-energy-density Factor Applied to Mixed Mode Crack Problems [J]. *International Journal of Fracture*, 1974, 10(3): 305-321.
- [70] 徐道远, 梁正平, 王德峻, 等. 混凝土 I、II 型复合裂纹断裂判据的探讨 [J]. *水利学报*, 1982(6): 57-61.  
XU Dao-yuan, LIANG Zheng-ping, WANG De-jun, et al. Discussion on Fracture Criterion of Concrete I and II Type Composite Crack [J]. *Shuili Xuebao*, 1982(6): 57-61.
- [71] 徐道远, 符晓陵. 用四点剪切试样确定混凝土 I、II 复合型裂纹断裂判据的测试研究 [J]. *水利学报*, 1984(9): 63-69, 73.  
XU Dao-yuan, FU Xiao-ling. Study on Determining the Fracture Criterion of Concrete I and II Cracks with Four Point Shear Specimens [J]. *Shuili Xuebao*, 1984(9): 63-69, 73.
- [72] CHANDLER H W. The Use of Non-linear Fracture Mechanics to Study the Fracture Properties of Soils [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1984, 29(4): 321-327.
- [73] 丁金粟, 刁玉椿, 孙亚平. 击实黏性土断裂韧性性质研究 [J]. *水利学报*, 1990(7): 55-60.  
DING Jin-su, DIAO Yu-chun, SUN Ya-ping. Study on Fracture Toughness Properties of Compacted Cohesive Soil [J]. *Shuili Xuebao*, 1990(7): 55-60.
- [74] 张振国, 丁金粟. 黏性土体断裂韧性  $K_{IC}$  研究 [J]. *岩土力学*, 1993, 14(3): 47-52.  
ZHANG Zhen-guo, DING Jin-su. Study on Fracture Toughness  $K_{IC}$  of Cohesive Soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1993, 14(3): 47-52.
- [75] 李洪升, 张小鹏, 朱元林, 等. 冻土断裂韧性  $K_{IC}$  的测试研究 [J]. *冰川冻土*, 1995, 17(4): 328-333.  
LI Hong-sheng, ZHANG Xiao-peng, ZHU Yuan-lin, et al. Experimental Studies of Fracture Toughness  $K_{IC}$  for Frozen Soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(4): 328-333.
- [76] NICHOLS J R, GRISMER E M, et al. Measurement of Fracture Mechanics Parameters in Silty-clay Soils [J]. *Soil Science*, 1997, 162(5): 309-322.
- [77] LIMA L A, GRISMER E M. Application of Fracture Mechanics to Cracking of Saline Soils [J]. *Soil Science*, 1994, 158(3): 109.
- [78] HANSON J A, HARDIN B O, MAHBOUB K. Fracture Toughness of Compacted Cohesive Soils Using Ring Test [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(5): 872-891.
- [79] HALLETT P D, DEXTER A R, SEVILLEX J P K. The Application of Fracture Mechanics to Crack Propagation in Dry Soil [J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 46(4): 591-599.
- [80] HALLETT P D, NEWSON T A. A Simple Fracture Mechanics Approach for Assessing Ductile Crack Growth in Soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(4): 1083-1088.
- [81] HALLETT P D, NEWSON T A. Describing Soil Crack Formation Using Elastic-plastic Fracture Mechanisms [J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(1): 31-38.
- [82] SUITS L D, SHEAHAN T C, WANG J J, et al. Experimental Study on Fracture Behavior of a Silty Clay [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2007, 30(4): 1-9.
- [83] WANG J J, ZHU J G, CHIU C F, et al. Experimental Study on Fracture Toughness and Tensile Strength of a Clay [J]. *Engineering Geology*, 2007, 94(1/2): 65-75.
- [84] PRAT P C, LEDESMA A, LAKSHMIKANTHA M R, et al. Fracture Mechanics for Crack Propagation in Drying Soils [C]// IACMAG. International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics. Goa; IACMAG, 2008: 1060-1067.
- [85] LAKSHMIKANTHA M R, PRAT P C, LEDESMA A. Experimental Evidence of Size Effect in Soil Cracking [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 49(3): 264-284.
- [86] JUAREZ-LUNA G, AYALA G. Application of Fracture Mechanics to Cracking Problems in Soils [J]. *Open Construction and Building Technology Journal*, 2014, 8(1): 1-8.
- [87] KONRAD J M, AYAD R. An Idealized Framework for the Analysis of Cohesive Soils Undergoing Desiccation [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 34(4): 477-488.