

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.02.07

重塑压实黏土 I 型断裂试验研究

李泽华¹, 张云¹, 马维俊¹, 于军², 龚绪龙²

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023;

2. 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室(江苏省地质调查研究院), 江苏南京 210018)

摘要: 为探究重塑黏土 I 型断裂韧度, 本文在前人研究基础上, 通过对应变控制式直剪仪进行改造, 消除了传统三点弯曲试验对土体断裂韧度测试所带来的影响, 研制了土体 I 型断裂韧度测试仪, 并对重塑黏土进行了一系列试验。试验结果表明: 新研制出的土体 I 型断裂韧度测试仪具有较好的可靠性; 对具有相同物理状态的试样, U 形裂纹试样的断裂韧度最大, 三角形裂纹试样的断裂韧度最小; 试样的含水率和干密度其断裂韧度 K_{IC} 具有显著影响, 随含水率增加, 断裂韧度呈现先增后减的变化规律, 而随干密度增加, 断裂韧度几乎线性增加; 在试验采用的加载速率范围内, 加载速率对断裂韧度的影响较小。

关键词: 三点弯曲试验; 断裂韧度 K_{IC} ; 裂纹形状; 含水率; 干密度; 加载速率

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)02-0044-07

An experimental study of the fracture toughness of a remoulded compacted clay

LI Zehua¹, ZHANG Yun¹, MA Weijun¹, YU Jun², GONG Xulong²

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

2. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and Resources,

Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210018, China)

Abstract: In order to study the fracture toughness K_{IC} of a remoulded clay, a new apparatus was developed on the basis of the strain-controlling direct shear apparatus, which eliminates the influence of self-gravity of the samples in the traditional three point bending test. A series of experiments are conducted on the remoulded clay samples. The experimental results show that the newly developed apparatus is reliable for the measurement of the fracture toughness of soil. For the soil samples with identical moisture content and dry density, the fracture toughness for the samples with U-shaped initial cracks is the greatest and that with triangle initial cracks is the smallest. The moisture content and dry density of soil samples have great effects on their fracture toughness. For the samples with identical dry density, the fracture toughness first increases and then decreases with the increasing moisture content, meaning that there is an optimal moisture content at which the fracture toughness is the greatest. For the samples with identical moisture content, the fracture toughness increases with the increasing dry density. The various loading rates used in this paper have little effect on the fracture toughness.

Keywords: three-point bending test; fracture toughness K_{IC} ; crack pattern; moisture content; dry density; loading rate

收稿日期: 2017-10-03; 修订日期: 2017-11-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(41572250); 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室开放课题

第一作者: 李泽华(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事工程地质专业研究。E-mail: 864274287@qq.com

通讯作者: 张云(1965-), 女, 教授, 博导, 主要从事工程地质专业教学与科研工作。E-mail: zhangyun@nju.edu.cn

土体是岩石经过风化、剥蚀、搬运及沉积作用所形成的松散堆积物,其特殊的形成过程导致其具有独特的物理力学性质。它不像岩石具有刚性的联结,其物理状态多变,力学强度低,这些特点的存在给人们研究土体在各种状态下所表现出的力学性质带来一定的困难。目前土体强度方面的研究主要集中在抗压、抗剪两方面,对抗压和抗剪强度的也已经形成了一套较为完善、便于实际工程应用的测试方法和测试设备。

然而随着人类对自然改造程度的不断加深,仅仅依靠抗压和抗剪等强度理论已难以很好地解决工程中出现的新问题,例如地下水开采引起的地裂缝、土坡滑动时坡顶产生的拉裂缝、土石坝水力劈裂等^[1-3]。这些问题的出现使得土体断裂方面的研究逐步得到重视,成为土木工程和地质工程领域的重要研究课题。

在弹塑性条件下,当应力场强度因子增大到某一临界值时,裂纹便失稳扩展,导致材料断裂,这个临界或失稳扩展的应力场强度因子即为断裂韧度。它表征材料在带裂纹工作时抵抗断裂的能力,是材料固有的一种力学性质。目前国内对岩石、混凝土等材料断裂韧度的研究较多^[4-5],但对于土体断裂韧度的研究较少。目前关于水工混凝土、金属材料的断裂韧度测试已经有了正式的规范,如《水工混凝土断裂试验规程》(DLT5332—2005)、《金属材料平面应变断裂韧度 K_{IC} 试验方法》(GBT4161—2007),然而关于土体断裂韧度的测试方法,迄今为止并没有一个统一的规范^[6-11],关于土的断裂韧度实验、仪器都还无标准可依。

按裂纹受力情况,可将裂纹分为三种基本类型(图1):张开型(I型)、划开型(II型)和撕开型(III型)裂纹。I型裂纹上下两表面沿 y 轴相对张开;II型裂纹上下两表面沿 x 轴相对滑开;III型裂纹上下两表面沿 z 轴(垂直于纸面方向)相对滑开^[12]。混凝土、岩石等材料的I型断裂韧度常采用三点弯曲试验测试,但由于土体抗拉强度一般较小,在三点弯曲试验中土梁在自重作用下就可能产生弯曲而破坏,因此传统的三点弯曲试验难以应用于土体断裂韧度的测试。本文将在传统三点弯曲试验的基础上,通过对直剪仪进行改造,研制可测定土体I型断裂韧度的仪器,研究土样干密度、含水率、裂纹形状、加载速率对土体I型断裂韧度的影响。

1 试验方法

1.1 试验原理

试验所采用方法的原理与传统三点弯曲试验相

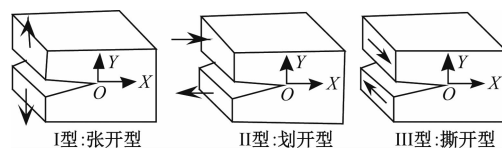


图1 裂纹类型

Fig. 1 Crack types

似。但传统三点弯曲试验是将试样放在有一定距离的两个支撑点上,在两个支撑点间的中点处从试样上方施加向下的荷载,试样的三个接触点形成相等的两个力矩时即发生三点弯曲,试样随着荷载的增加将于中点处发生断裂。由于土体强度较低,故需要考虑到土体自重的影响,如按照规范进行传统三点弯曲实验,试样加荷方向与土体自重方向一致,都是垂直向下,当干密度较小时,试样会直接在土体自重的影响下发生断裂,故土体自重会对断裂韧度试验的结果产生较大的影响。为避免土体自重产生的影响,本试验参考前人的研究方法^[13-16],选择将试样沿宽度方向旋转 90° ,使得加荷方向变为水平,与土体的自重方向垂直,从而克服了土体自重对实验的影响。

1.2 仪器改造

为了简化操作和降低成本,本次试验选用 ZJ 应变控制式直剪仪进行改造,如图2所示。

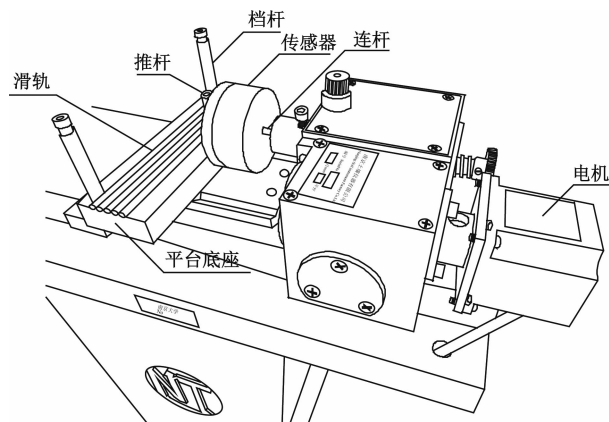


图2 土体I型断裂韧度 K_{IC} 测试仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the soil tester of the fracture toughness K_{IC}

1.3 试验设计

1.3.1 土料及试样尺寸

试验选用两种不同土料,一种为灰色黏土,其塑限为 W_p 为 22%,液限 W_L 为 42%;另一种为黄色粉质黏土,其塑限 W_p 为 17%,液限 W_L 为 33%,两种土料均是用圆盘粉碎机将大块土料粉碎后,用筛子筛选出符合试验要求粒径的土料,试验所用土料颗粒粒径均小

于 0.25 mm。

根据弹性理论的圣维南原理,为了避免加载点和支承点附近的应力集中对裂纹附近区域的干扰,对试样尺寸有一定要求^[17]。标准的三点弯曲试样,跨距(S)等于宽度(W)的 4 倍,宽度(W)通常是厚度(B)的 2 倍,即 $S:W:B=8:2:1$,裂纹长度在 $0.45W \sim 0.55W$ 之间。试样的比例尺如图 3 所示。同时,试验要求试样厚度(B)和裂纹长度(a)及韧带尺寸($W-a$)满足公式(1)~(3),实验结果才被认为是有效的。由于不能提前保证满足这种要求,因此,最初试验采用的试样尺寸应该是保守的。

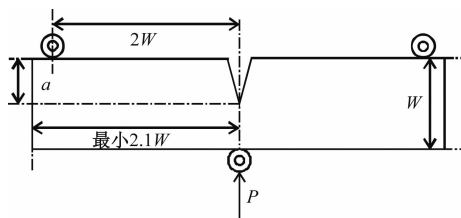


图 3 三点弯曲试验试样示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the three-point bending test sample

$$B \geq 2.5 \times \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (1)$$

$$a \geq 2.5 \times \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2)$$

$$W - a \geq 2.5 \times \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (3)$$

式中: B ——试样厚度/cm;

a ——初始裂纹长度/cm;

W ——试样宽度/cm;

K_{IC} ——断裂韧度/($\text{kPa} \cdot \text{m}^{0.5}$);

σ_{ys} ——材料的屈服应力/kPa。

试验所采用试样的规格为长 18 cm,宽 4 cm,高 2 cm,初始裂纹长度选择 1.8 cm。

1.3.2 试验步骤

首先,根据不同干密度、含水率,称取不同质量的土料、水进行拌合。在土料的拌制过程中,应保证土与水充分均匀拌合,若拌合不充分,会导致所拌制的土料中存在较多粘聚在一起的大小不一的土块(含水率越高的土料此现象越明显)。在后续试样制作过程中,若存在过多的粘聚土块,可能会导致试样在压制过程中土颗粒分布不均匀,从而影响试样的强度。故在土料拌合时,可以采用“少量多喷”的方式加水,并将拌合好的土样装入保鲜袋置于保湿缸中放置 24 h,以保

证土与水充分混合。

试验土样通过模具制作而成,模具材质采用不锈钢,模具挡板皆可活动拆卸以便取样(图 4)。

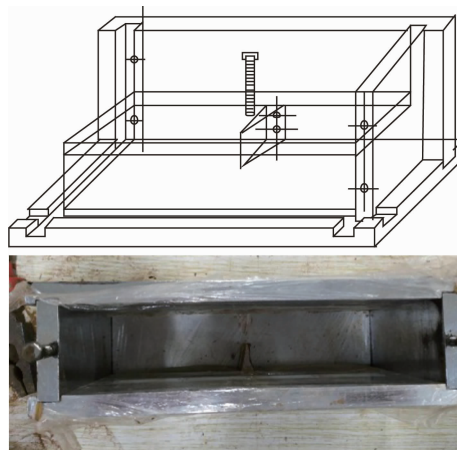


图 4 制样模具示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the sample mould

最后,将制好的试样平稳放置于仪器平台上,土样长边一侧紧靠档杆,并使其预制裂纹与加荷方向在同一直线上。打开直剪仪,调节剪切速率,启动仪器使推杆前进到与试样即将接触的位置,暂停仪器并记录传感器的初始数值,一切准备就绪后开始试验,记录传感器上显示的荷载数值与直剪仪上所对应显示的位移数值,观察裂纹扩展情况,直至试样彻底断裂(图 5)。

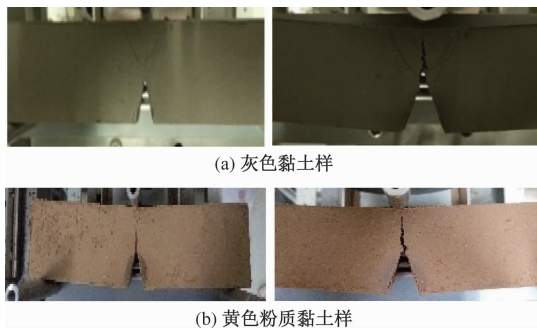


图 5 裂缝及裂缝扩展图

Fig. 5 Diagram of crack and crack propagation

2 试验结果及分析

2.1 试验方案

为研究影响土体断裂韧度的因素,根据不同干密度、含水率配制不同的试样,配制灰色黏土试样 18 组(C1~C18)、黄色粉质黏土试样 24 组(SC1~SC24),每组 3 个试样,具体试验方案见表 1。

2.2 断裂韧度计算

本试验采用的计算公式为中华人民共和国金属

材料平面应变断裂韧度 K_{IC} 试验方法 (GB/T4161—2007)。

表 1 试验方案
Table 1 Test scheme

试样组号	干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	含水率/%	裂纹 形状	剪切速率/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
C1 ~ C5	1.35	16\18\20\22\24	三角形	2.4
C6 ~ C8	1.42	16\18\20	三角形	2.4
C9 ~ C12	1.5	14\16\18\20	三角形	2.4
C13 ~ C15	1.6	16\18\20	三角形	2.4
C15 ~ C18	1.7	18\20\22	三角形	2.4
SC1 ~ SC3	1.29	8\10\12	三角形	2.4
SC4 ~ SC7	1.38	8\10\12\14	三角形	2.4
SC8 ~ SC13	1.47	6\8\10\12\14\16	三角形	2.4
SC14 ~ SC18	1.56	8\10\12\14\16	三角形	2.4
SC19 ~ SC22	1.47	10	三角形	0.8\1.2\3.6\4.8
SC23 ~ SC24	1.56	14	U 形\矩形	2.4

$$K_{IC} = \frac{F_Q S}{BW^{3/2}} \times f\left(\frac{a}{W}\right)$$
$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \times$$
$$\frac{1.99 - \left(\frac{a}{W}\right) \times \left(1 - \frac{a}{W}\right) \times \left[2.15 - 3.93\left(\frac{a}{W}\right) + 2.7\left(\frac{a}{W}\right)^2\right]}{2 \times \left(1 + \frac{2a}{W}\right) \times \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}$$

式中: F_Q ——裂缝开展时的荷载/N;

S ——跨距/cm。

为验证仪器的可靠性,对每组 3 个试样断裂韧度 K_{IC} 测试结果进行相对误差计算。试验结果表明,每组 3 个试样的断裂韧度 K_{IC} 值的相对误差较小,说明所研制的仪器具有较好的可靠性。试验选用 1 组试验中 3 个试样断裂韧度的平均值作为该组试样的断裂韧度 K_{IC} 真实值。

2.3 裂纹形状对于断裂韧度的影响

为了探究裂纹形状对于断裂韧度的影响,选用 SC10(三角形)、SC23(U 形)、SC24(矩形)3 组试样进行试验,并绘制出其荷载-位移关系曲线图(图 6)。由图 6 可见不同的裂缝形状会对荷载-位移关系曲线产生很大的影响,其中 U 形试样的峰值荷载值最大,矩形试样的峰值荷载值略微下降,三角形的峰值荷载值最小,其原因可能是由于裂缝形状越尖锐,该区域应力集中程度越大,试样越容易破坏^[18]。三角形试样由于具有一个锐角,因此试样在受荷时最易产生应力集中,故其峰值荷载最小,断裂韧度值最小;

矩形试样具有两个直角,从其裂纹开展的部位均在两个直角处可以发现,直角处也易于产生应力集中,降低其试样的断裂韧度;U 形试样由于没有尖锐地方,有效地降低了应力集中,故其峰值荷载最大,断裂韧度值最大(表 2)。但是从三者的荷载-位移关系曲线可以发现,三角形裂纹的试样组较另外两组试样来说,其曲线重合程度最大,且其裂纹基本沿直线扩展(图 7),故下文其它试验均选用三角形裂纹的试样。

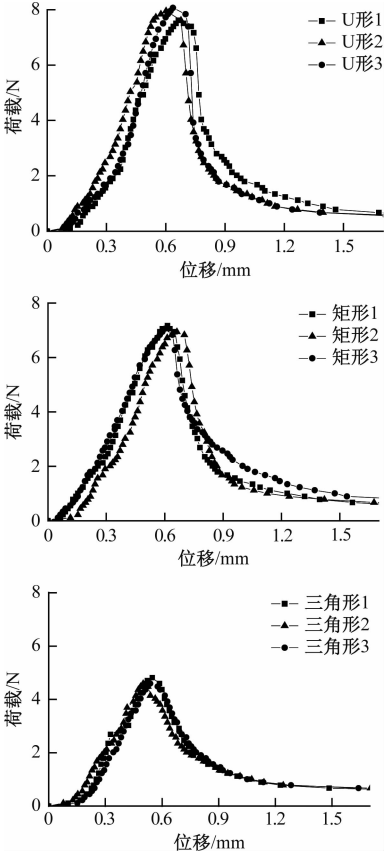


图 6 不同断裂形态荷载-位移曲线关系图

Fig. 6 Relationship of load vs displacement of different fracture types

表 2 断裂韧度计算结果

Table 2 Fracture toughness calculation results

裂纹形状	U 形	矩形	三角形
断裂韧度/($\text{kPa}\cdot\text{m}^{0.5}$)	17.41	16.38	11.01
	18.43	16.12	10.49
	18.17	15.87	10.49

2.4 含水率对断裂韧度的影响

为研究含水率对土体断裂韧度的影响,控制干密度不变,改变含水率。选用 C1 ~ C5 (1.35 g/cm^3)、C9 ~ C12 (1.5 g/cm^3)、SC4 ~ SC7 (1.38 g/cm^3)、SC8 ~

SC13 (1.47 g/cm^3)、S14 ~ SC18 (1.56 g/cm^3) 绘制出灰色黏土和黄色粉质黏土含水率与断裂韧度关系曲线图(图 8)。



图 7 裂纹扩展对比图

Fig. 7 Contrast diagram of crack propagation

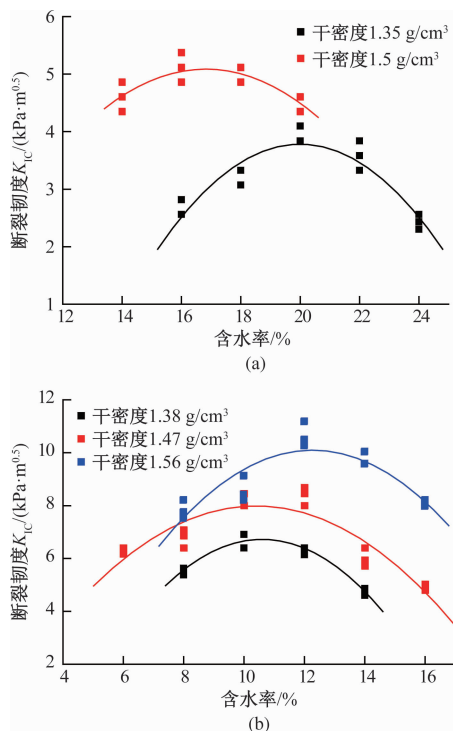


图 8 灰色黏土 (a) 和黄色粉质黏土 (b) 断裂韧度 K_{IC} 与含水率关系

Fig. 8 Relationship of fracture toughness vs water content of gray clay (a) and yellow silty clay (b)

由图 8 可知,两种不同的土料在保持干密度不变时,在一定含水率范围内断裂韧度 K_{IC} 随着试样含水率的增大而增大。当试样含水率增大到一定值后,断裂韧度 K_{IC} 随着含水率的增大而减小,这与前人在进行土体断裂韧度试验时所得到的规律相似,该曲线所呈现出来的规律与击实试验所得到的最优含水率试验曲线相类似。对一定干密度的重塑土来说,在较低含水率的情况下,随着含水率的增加,土颗粒之间的水膜联结

增加,土中越来越多的弱结合水吸附于强结合水外围,土颗粒间的水膜联结加强,导致断裂韧度增加。当含水率继续增加,结合水膜的厚度持续加大,土颗粒间的接触面积不断减小,颗粒间的吸引力越来越弱,且弱结合水由于吸引力的降低逐渐过渡为自由水,对土颗粒的联结产生不利影响,故断裂韧度又随含水率的增加而减小。另一方面,毛细联结作用也对土体断裂韧度产生一定的影响,当土体含水率较低时,毛细压力会迫使相邻土颗粒相互靠近,而随着含水率的逐渐增加这种毛细压力会逐渐减弱并最终消失,从而影响土体强度,故土体断裂韧度会呈现出一种先增后减的规律^[19]。

2.5 干密度对断裂韧度的影响

为研究干密度对土体断裂韧度的影响,控制含水率不变,改变干密度。选用 C1\C6\C10\C13 (含水率 16%)、C2\C7\C11\C14 (含水率 18%)、C3\C8\C12\C15 (含水率 20%)、SC1\SC4\SC9\SC14 (含水率 8%)、SC2\SC5\SC10\SC15 (含水率 10%)、SC3\SC6\SC11\SC16 (含水率 12%) 绘制出灰色黏土和黄色粉质黏土干密度与断裂韧度关系曲线图(图 9)。

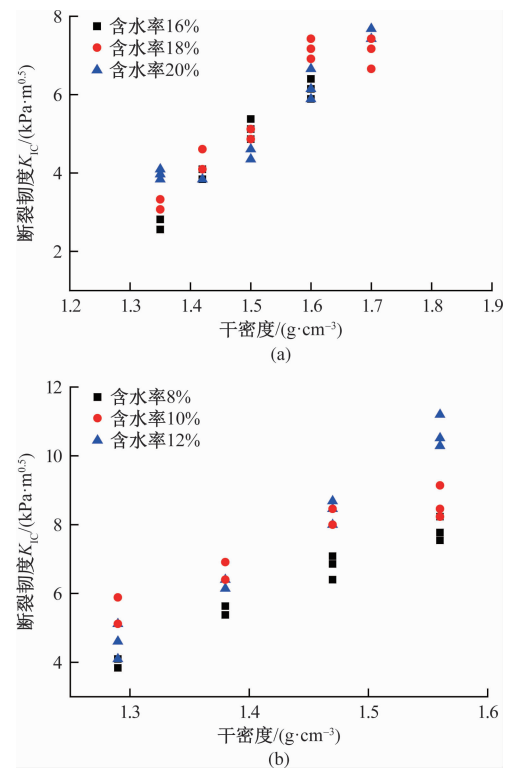


图 9 灰色黏土 (a) 和黄色黏土 (b) 断裂韧度 K_{IC} 与干密度关系

Fig. 9 Relationship of fracture toughness vs dry density of the gray clay (a) and yellow silty clay (b)

由图 9 可知,2 种土料在保持含水率不变时,随着试样干密度的增大,其断裂韧度 K_{IC} 也随之增大,且干密度与断裂韧度 K_{IC} 之间呈现出比较明显的线性关系,直线拟合的决定系数均在 0.96 以上。分析其是由于试样干密度越大,在压实的时候其颗粒与颗粒间的密实性也就越好,土颗粒间的咬合作用越好,土体的强度也随之增加,从而其断裂韧度 K_{IC} 也就随着干密度的增大而逐渐增大。

2.6 加载速率对于断裂韧度的影响

为研究加载速率对土体断裂韧度的影响,控制干密度、含水率不变,改变加载速率。选用 SC10、SC19 ~ SC22 绘制出加载速率与断裂韧度关系曲线图(表 3, 图 10)。

表 3 断裂韧度计算结果

Table 3 Fracture toughness calculation results

加载速率/(mm·min ⁻¹)	0.8	1.2	2.4	3.6	4.8
断裂韧度/(kPa·m ^{0.5})	9.22	8.96	8.96	9.47	9.47
	8.70	9.22	9.47	9.47	8.70
	8.96	8.70	9.47	8.96	8.96

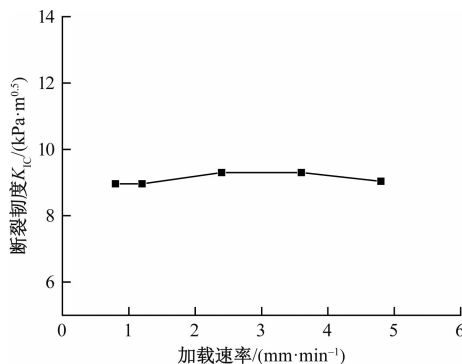


图 10 断裂韧度 K_{IC} 与加载速率关系

Fig. 10 Relationship of fracture toughness vs loading speed

由图 10 可知,加载速率对于断裂韧度 K_{IC} 有一定的影响,但相较于干密度、含水率等对断裂韧度 K_{IC} 的影响来看,当加载速率在 0.8 ~ 4.8 mm/min 之间变化时对其的影响很小,可以忽略不计。

3 结论

(1) 新研制出的土体 I 型断裂韧度测试仪具有较好的可靠性,且结果表明,密实黏土中的裂缝扩展可采用线弹性断裂理论对其进行研究。

(2) 裂纹形状的不同导致试样出现不同程度的应力集中现象,土体断裂韧度 K_{IC} 随试样应力集中程度的增大而逐渐减小。U 形裂纹试样的断裂韧度最大,矩形裂纹试样的断裂韧度其次,三角形裂纹试样的断裂

韧度最小。

(3) 试验所用的 2 种不同土料其含水率和干密度对土体的断裂韧度 K_{IC} 均有较大影响,且均呈现出了相同的变化趋势。对于相同干密度的试样,断裂韧度 K_{IC} 随含水率的增加呈现出一种先增后减的趋势,即存在一个使断裂韧度达到最大值的最优含水率;对于相同含水率的试样,断裂韧度 K_{IC} 随试样干密度的增加而增大。

(4) 在一定加载速率范围内,加载速率对于断裂韧度 K_{IC} 的影响很小,可以忽略不计。

参考文献:

- [1] 王哲成,张云. 地下水超采引起的地裂缝灾害的研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2012,39(2):88-93. [WANG Z C, ZHANG Y. Research progress of ground fissures caused by over exploitation of groundwater [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012,39(2):88-93. (in Chinese)]
- [2] 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 J J. Study on hydraulic fracturing in core of earth-rock fill dam based on fracture mechanics [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)]
- [3] 刘锋,芮勇勤,张春. 坡顶张拉裂缝对边坡稳定性影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(9):951-954. [LIU F, BING Y Q, ZHANG C. Influence of tension cracks of slope crest on the stability of slope [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2016,35(9):951-954. (in Chinese)]
- [4] 张廷毅,高丹盈,郑光和,等. 三点弯曲下混凝土断裂韧度及影响因素[J]. 水利学报,2013,44(5):601-607. [ZHANG T Y, GAO D Y, ZHENG G H, et al. Fracture toughness of concrete under three-point bending and its influencing factors [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(5):601-607. (in Chinese)]
- [5] 管辉,黄炳香,冯峰. 灰岩试样三点弯曲断裂特性试验研究[J]. 煤炭科学技术,2012,40(7):5-9. [GUAN H, HUANG B X, FENG F. Experimental study on three point bending fracture characteristics of limestone samples [J]. Coal Science and Technology, 2012,40(7):5-9. (in Chinese)]
- [6] 张振国,丁金粟. 粘性土体断裂韧度 K_{IC} 研究[J]. 岩土力学,1993,14(3):47-51. [ZHANG Z G, DING J S. Study on fracture toughness K_{IC} of cohesive

- soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14(3): 47 - 51. (in Chinese)]
- [7] 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.
- [8] Saada A S, Chudnovsky A, Kennedy M R. A fracture mechanics study of stiff clay [C]//Proceedings of 11th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering: San Francisco the United States committee of International society for soil mechanics and foundation engineering, 1985: 637 - 640.
- [9] Hanson J A, Hardin B O, Mahboub K. Fracture toughness of compacted cohesive soils using ring test [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, 120(5): 872 - 891.
- [10] 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.
- [11] Chudnovsky A, Saada A, Lesser A J. Micromechanisms of deformation in fracture of over consolidated clays[J]. Canada Geotechnical Journal, 1988, 25(2): 213 - 221.
- [12] 程靳, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. [CHENG J, ZHAO S S. Fracture Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)]
- [13] 邱珍锋, 王俊杰, 胡骏峰. 击实黏土 I 型断裂韧度测试新方法研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 23(15): 193 - 196. [QIU Z F, WANG J J, HU J F. A new method for testing I fracture toughness of compacted clay [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 23(15): 193 - 196. (in Chinese)]
- [14] 邱珍锋, 王俊杰, 胡骏峰. 黏土 I 型断裂韧度影响因素试验[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(6): 86 - 89. [QIU Z F, WANG J J, HU J F. Experiment on Influencing Factors of clay type I fracture toughness [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6): 86 - 89. (in Chinese)]
- [15] 王俊杰, 朱俊高. 击实粘性土断裂韧度 K_{IC} 的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3972 - 3977. [WANG J J, ZHU J G. Experimental study on fracture toughness K_{IC} of compacted clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3972 - 3977. (in Chinese)]
- [16] 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. [LIAO P W, TANG M H. Experimental study on fracture toughness K_{IC} of soil [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2012, 31(4): 788 - 791. (in Chinese)]
- [17] 酆正能. 应用断裂力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012. [LI Z N. Application of fracture mechanics [M]. Beijing: Beijing Aerospace University Press, 2012. (in Chinese)]
- [18] 胡骏峰. 压实粘性土断裂破坏性状及其判定准则研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016. [HU J F. Fracture properties and criteria of compacted clay [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)]
- [19] 张克恭, 刘松玉. 土力学[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. [ZHANG K G, LIU S Y. Soil Mechanics [M]. 3rd ed. Beijing: China Construction Industry Press, 2010. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞