

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.04.009

胡骏峰. 击实黏土剪切断裂韧度的试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(4): 56-60. (HU Jun-feng. Experimental studies on shear fracture toughness of compacted clay[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(4): 56-60.)

击实黏土剪切断裂韧度的试验研究

胡骏峰

(重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 为研究黏性土剪切断裂韧度, 研制了土体剪切断裂韧度测试仪, 对黏性土进行了断裂韧度测试, 验证了使用线弹性断裂力学来简化土体断裂韧度研究的合理性, 并进行相关试验探讨了试样干密度、含水率和剪切速率对断裂韧度值的影响。结果表明: 断裂韧度与试样干密度呈正相关, 即随试样干密度的增大, 土体断裂韧度值也增大, 并拟合了两者之间的经验计算式; 含水率对断裂韧度有很大影响, 当含水率为 13%~17% 时, 断裂韧度随含水率的增加先增后减, 即存在一个断裂韧度值最大的最优含水率; 当剪切速率在 0.5~6.0 mm/min 时, 相对于干密度和含水率而言, 剪切速率对断裂韧度值影响较小, 同时土体含水率、裂缝深度、试样尺寸等因素均对土体断裂韧度有较大影响, 需要对其进行深入研究。

关键词: 击实黏性土; 剪切速率; 断裂韧度; 裂缝深度; 干密度; 含水率

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)04-0056-05

在工程建设中, 存在许多围绕土体裂缝的问题, 由于传统方法不能考虑裂缝的不连续性及裂缝端部的应力奇异性, 因此很难准确描述土体性能, 引入断裂力学, 应用断裂韧度作为判据可以提供强有力的解决工具。在很多土工结构物中, 裂缝问题关系到整个工程的安全^[1-3]。研究人员^[4-6]经过大量研究发现, 借鉴断裂力学的方法来研究裂缝对土工建筑物的稳定性影响是恰当的。在断裂力学中, 基本的断裂类型^[7]为: 张开型(I型)、滑开型(II型)和撕开型(III型)。对于土体裂缝而言, 主要考虑 I 型和 II 型两种断裂类型^[8]。其中, 研究土体 I 型断裂破坏的试验方法较多, 也较为成熟。对于土体 II 型断裂破坏, 前人仅用了非对称四点弯曲试验一种方法研究其剪切断裂破坏问题。Li Hong-sheng 等^[9]对兰州冻土进行了非对称四点弯曲试验, 研究了试样含水率和温度等对 II 型断裂韧度的影响。王俊杰等^[10-11]采用改进的非对称四点弯曲试验方法, 将土梁试样绕其长边方向旋转 90°, 并从水平方向施加荷载, 使施加荷载方向垂直于试样的自重方向, 并用此方法研究了云南糯扎渡心墙堆石坝砾质黏土心墙料的剪切断裂破坏特性。

在非对称四点弯曲试验中, 为使试样裂缝的受力状态为 II 型, 要求作用于土梁试样预制裂缝所在位置横断面上的应力状态为纯剪切状态, 即作用于裂缝位置横断面的弯矩为零, 但这在非对称四点弯曲试验中很难完全做到。因此, 有必要采用新方法来准确测试土体 II 型断裂韧度。

1 试验研究

1.1 试验原理和仪器

根据 II 型裂缝的定义, 针对非对称四点弯曲试验的局限性, 采用类似于直剪实验的方法, 从裂缝两边施加推力, 使得裂缝尖端处于剪切状态, 试验原理见图 1。该方法受力简单, 在试验中能确保试样发生剪切断

收稿日期: 2014-12-26

基金项目: 重庆市研究生科研创新项目(CYS14166)

作者简介: 胡骏峰(1991—), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程相关研究。E-mail: 531157315@qq.com

裂破坏,并消除了自重应力对试验结果的影响。其断裂韧度^[12]可表示为:

$$K_{II} = \frac{Q}{BW^{\frac{1}{2}}} F\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

$$F\left(\frac{a}{W}\right) = \begin{cases} [2.318 - 5.200(a/W) + 6.764(a/W)^2 - 3.331(a/W)^3] / \sqrt{1 - a/W}, (H/W = 1) \\ [1.945 - 3.547(a/W) + 3.864(a/W)^2 - 1.733(a/W)^3] / \sqrt{1 - a/W}, (H/W = 2) \\ [1.758 - 2.986(a/W) + 3.255(a/W)^2 - 1.503(a/W)^3] / \sqrt{1 - a/W}, (H/W = 3) \\ [1.632 - 2.419(a/W) + 2.431(a/W)^2 - 1.163(a/W)^3] / \sqrt{1 - a/W}, (H/W = 4) \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_{II} 为断裂韧度; Q 为临界剪切荷载; B 为试样厚度; W 为试样长度; a 为初始裂缝深度; H 为试样宽度, 试验采用正方体试样, 其 $H = W = B = 0.1 \text{ m}$ 。

整个仪器由底座、前挡板、推力提供装置、荷重传感器、位移传感器和数据采集器等组成。装置采用水平加载的方式, 在试样裂缝的两侧施加推力和支挡力, 并在试样下方和侧面铺设滑轨来减小下部摩擦力。试验过程中试样受力可通过荷重传感器读取, 形变位移可通过位移传感器读取。此外, 仪器中加入了电导率测试系统, 用以确定裂缝起裂点位置和对应的临界荷载准确性。试样尺寸为: $L \times W \times B = 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$, 整个试样采用分层击实, 并将分层界面打磨粗糙。

1.2 试验方法和土料

试验土料以重庆地区黏土岩风化形成的黏性土为研究对象, 其基本物理性质为: 塑限 w_p 为 21.1%, 液限 w_l 为 39.5%, 塑性指数 I_p 为 18, 其颗粒级配曲线见图 2。

由于土体成分复杂, 影响其力学性质的因素众多, 所以在探究某一变量对断裂韧度的影响时, 须保证土体试样的其他影响因素(如成分、干密度、含水率、裂缝深度等)一致。进行试样制备时, 先按照预定的含水率将所需水量均匀喷洒在土体上并搅拌均匀, 然后放入塑料袋密封静置 24 h; 静置完成后, 将土体分 3 层放入制样装置, 进行分层击实; 并按预定的深度切出裂缝, 然后取出试样; 将试样放置于土体断裂仪上, 使得推力板与前挡板分别位于试样裂缝的左右两侧, 试样以裂缝为界, 左右两侧受方向相反的两个力作用, 施加水平推力直至试样沿裂缝破坏。

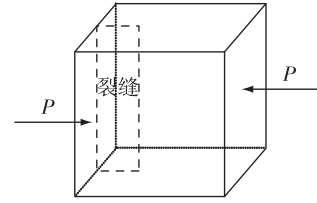


图1 土体II型断裂破坏试验

Fig. 1 Mode II fracture test method of soil

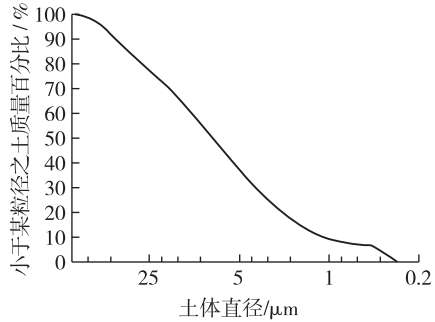


图2 土料颗粒级配分布曲线

Fig. 2 Sieve analysis curves of tested soils

2 试验结果及分析

2.1 静态荷载下的应力-位移曲线和电导-位移曲线

将压制完成后的试样放在土体断裂仪上静态加载, 观察试验过程中试样变化及应力位移关系, 其整个试验应力-位移曲线和电导-位移曲线见图 3, 试样的断裂破坏形态见图 4。

由图 3(a) 可知, 在荷载达到最大值之前, 变形基本呈线性, 达到最大值后, 应力迅速减小, 试样发生破坏, 在其应力-位移曲线的下降段也基本呈线性变化, 因此可以用线弹性断裂力学理论来简化土体断裂韧度特性的研究。由图 3(b) 电导-位移曲线可知, 在裂缝发生扩展前, 电导率保持恒定, 当土体开裂产生裂缝时, 试样有效接触面积变小, 电导率骤减, 此时也观察到试样的初始裂缝开始扩展, 并逐渐贯穿试样, 失稳破坏。在电导-位移曲线的末端出现了一定的上扬, 是由于在试验进行中随着试样被破坏, 部分已开裂分离的土体再接触, 使得有效接触面增大, 导致电导率上升。

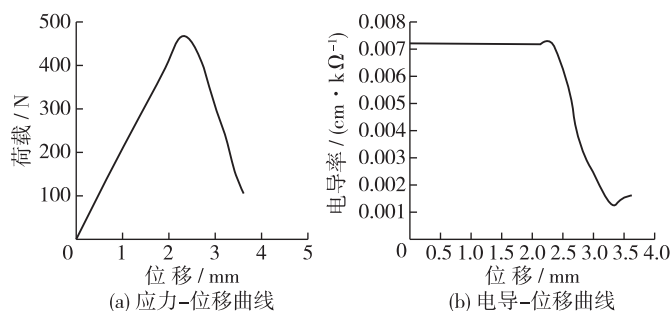


图 3 静态荷载试验结果

Fig. 3 Experiment results under static load

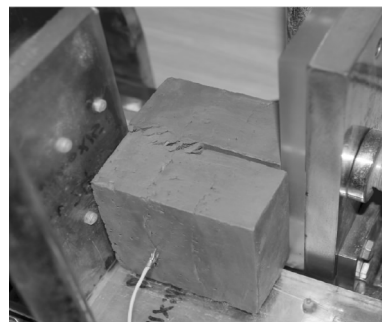


图 4 试样破坏形态

Fig. 4 Crack shape after rupture

由图 4 可知,试样在剪切力作用下,裂缝沿初始方向开始扩展,在主要扩展裂缝四周出现了其他细微裂缝。试验中可以大致将试样破坏过程分为应力集中区出现、破坏面形成以及试样破坏失稳 3 个阶段。其中应力集中区的出现阶段指试样的应力-位移曲线快速上升阶段;破坏面的形成阶段指试样的应力-位移曲线达到峰值,试样出现细微裂缝并开始扩展阶段;试样破坏失稳阶段指裂缝贯穿试样阶段。

2.2 干密度对断裂韧度的影响

分别制作干密度为 1.51, 1.58, 1.65 和 1.71 g/cm³ 的试样若干,并使其含水率为 12%,初始预制裂缝深度为 5 cm,在剪切速率为 3 mm/min 的情况下进行试验,并计算其断裂韧度。由图 5 可知,随试样干密度增加,其剪切断裂韧度值逐渐增大,两者间线性关系较为明显,经线性回归有:

$$Y = 50.862x - 66.724 \quad (r^2 = 0.9892) \quad (3)$$

剪切断裂韧度表征材料抵抗剪切断裂性能,试样断裂韧度越大,越能抵抗剪切应力对试样的破坏作用,初始裂缝越不容易扩展。试样干密度越大,其压实度也会随之变大,颗粒间密实性就越好,其黏结强度也越高,初始裂缝不易继续开裂,试样也越不容易被破坏,所以试样的断裂韧度值随其干密度的增加而增加。

2.3 含水率对断裂韧度的影响

分别制作含水率为 13%, 15% 和 17% 的试样若干,控制干密度为 1.65 g/cm³,初始预制裂缝深度为 5 cm,在剪切速率为 3 mm/min 的情况下测试其断裂韧度值。

由图 6 可知,断裂韧度随试验含水率变化,呈现出先增后降的趋势,在含水率为 15% 时,断裂韧度值最大,说明土体存在一个剪切断裂韧度值最大的最优含水率。根据试验数据拟合其相关关系,其经验拟合公式为:

$$Y = -1.5208X^2 + 44.888X - 306.96 \quad (r^2 = 0.969)$$

土中含水率变化对断裂韧度的影响,可以认为是含水率的变化影响了土颗粒间结合水膜厚度,从而将直接影响土颗粒间相互作用力的变化。在红黏土中,存在结晶态的游离氧化铁和胶结态的游离氧化铁,处于胶结态的游离氧化铁能形成团粒结构,而处于结晶态的则能在团粒表面形成稳定的“包膜”结构。当试样含水率

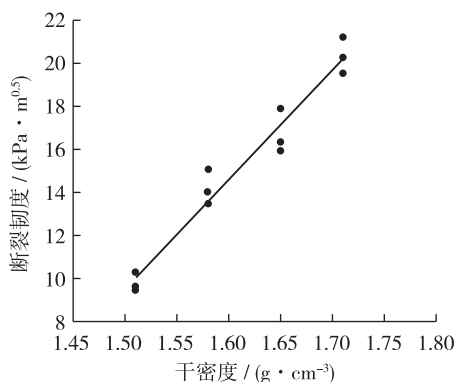


图 5 断裂韧度随试样干密度的变化

Fig. 5 Change curve of fracture toughness with dry density

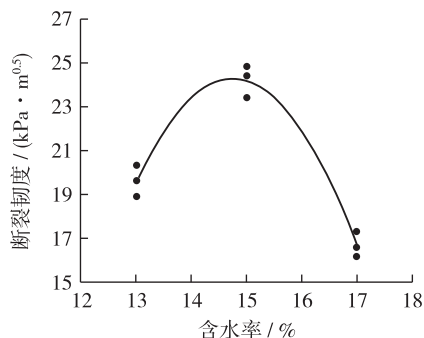


图 6 断裂韧度随含水率的变化

Fig. 6 Change in fracture toughness with moisture content

低于15%时,此时含水率偏低,扩散层不能充分发展,水化膜较薄,整个土体中主要存在胶结态的团粒结构,而“包膜”结构则较少,其颗粒间咬合作用力和表面粗糙度均较小,此时整个土体呈现松散的集粒结构。当含水率为15%时,扩散层加厚,粒间水化膜厚度增大,“包膜”结构的含量增加,使得土颗粒间咬合作用增强以及颗粒表面粗糙度增加,土体由松散的集粒结构变为紧密的集粒结构,此时土颗粒间的作用力增强,土体中的裂缝不易开裂扩展。当含水率大于15%时,扩散层得到充分发展,土粒周围的结合水膜加厚,使得土粒疏远,导致脱离分子相互吸引的范围,因此土体中的裂缝容易扩展。另一方面,水含量的增加还具有润滑作用,使颗粒之间的内摩阻力降低,并且含水率的增大还会使部分氧化铁溶解、胶结作用弱化。

2.4 加载速率对试样断裂韧度的影响

制作干密度、含水率、初始裂缝都相同的试样,在不同剪切速率下进行加载。试验结果表明:当剪切速率在0.5~6.0 mm/min时,随着剪切速率的增加,断裂韧度值有略微的增大趋势,其中断裂韧度值的最小值与最大值仅相差4.36%。相比于含水率和干密度对其断裂韧度的影响程度,剪切速率对试验结果的影响很小,几乎可以忽略。但图7仅反映了在无围压情况下剪切速率对断裂韧度的影响,并未真实反映影响程度,实际影响可能更大。因此可近似认为剪切速率在0.5~6.0 mm/min的无围压情况下,对断裂韧度值的影响较低或几乎没有影响。同时,剪切速率对土体断裂韧度的影响,主要通过改变土体的排水条件和固结作用形成。而本试验在不同剪切速率下,土体排水条件并未发生改变,并且试验所用时间相差不大,故对试样的固结作用影响不大。

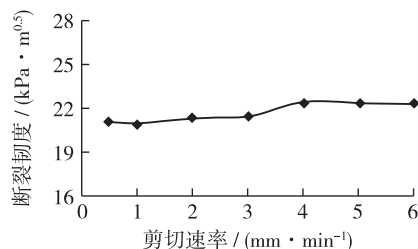


图7 不同加载速率下试样的断裂韧度
Fig. 7 Variation of fracture toughness with different loading rates

3 结 语

根据Ⅱ型断裂的定义,针对非对称四点弯曲的缺陷,研制了Ⅱ型土体断裂韧度测试仪,对击实黏性土体进行了试验,证明了试验方法的合理性,并研究了土体断裂韧度与剪切速率和试样干密度之间的关系,由此得出如下结论:

- (1) 可采用线弹性断裂理论研究击实黏性土中的裂缝扩展。
- (2) 断裂韧度随着干密度的增加而增加,其经验拟合式为: $Y = 50.862x - 66.724$ ($r^2 = 0.9892$); 断裂韧度随试验含水率的变化,呈现出先增后降的趋势,当含水率为14%时,断裂韧度值最大,其经验拟合式为: $Y = -1.5208X^2 + 44.888X - 306.96$ ($r^2 = 0.969$)。
- (3) 剪切速率对断裂韧度没有明显影响,但土体自身的其他性质对断裂韧度均有影响,如裂缝深度、试样尺寸等,因此需要对其进行更加深入的分析探究。

参 考 文 献:

- [1] MENZIES W T, FENTON G A, LAKE C B, et al. A method to assess risk reduction when utilizing geosynthetic clay liners (GCLs) with compacted soil liners[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(1): 146-161.
- [2] LI J H, ZHANG L M. Geometric parameters and REV of a crack network in soil [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37(4): 466-475.
- [3] LI J H, ZHANG L M, WANG Y, et al. Permeability tensor and representative elementary volume of saturated cracked soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(8): 928-942.
- [4] 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.
- [5] LAKSHMIKANTHA M R, LEDESMA P C P A. Discussion on “experimental study on fracture toughness and tensile strength of a

- clay" [Engineering Geology 94 (2007) 64-75][J]. Engineering Geology, 2008, 101: 295-296.
- [6] CHUDNOVSKY A, SAADA A, LESSER A J. Micromechanisms of deformation in fracture of overconsolidated clays[J]. Canada Geotechnical Journal, 1988, 25: 213-221.
- [7] 丁遂栋,孙利民. 断裂力学[M]. 北京:机械工业出版社, 1997. (DING Sui-dong, SUN Li-ming. Fracture mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 1997. (in Chinese))
- [8] 李洪升,朱元林. 冻土断裂力学及其应用[M]. 北京:海洋出版社, 2002. (LI Hong-sheng, ZHU Yuan-lin. Application of fracture mechanics of frozen soil[M]. Beijing: China Ocean Press, 2002. (in Chinese))
- [9] LI Hong-sheng, YANG Hai-tian, LIU Zeng-li. Experimental investigation of fracture toughness KIIC of frozen soil[J]. Canadian Geotechnical Engineering, 2000, 37(1): 253-258.
- [10] 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 in core of earth-rock fill dam based on fracture mechanics[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [11] WANG Jun-Jie. Hydraulic fracturing in earth-rock fill dams[M]. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., Beijing: China Water & Power Press, 2014.
- [12] 于晓中,谯常忻,周群力. 岩石和混凝土断裂力学[M]. 湖南:中南工业大学出版社, 1991. (YU Xiao-zhong, QIAO Chang-xin, ZHOU Qun-li. Fracture mechanics of rock and concrete[M]. Hunan: Central South University of Technology Press, 1991. (in Chinese))

Experimental studies on shear fracture toughness of compacted clay

HU Jun-feng

(National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to carry out studies of the fracture toughness of the compacted clay, based on a newly developed apparatus, the fracture toughness of the clay is tested in the laboratory. While the rationality of the test methods is verified, researches on the relationships of fracture toughness between dry density, moisture content and shear rates are made. The experiment results show that as the empirical formula, the fracture toughness and the specimen dry density have a positive correlation, and that the fracture toughness will increase with the increase in the dry density of the specimen. The changes in the moisture content are closely related to the test results. When the moisture content of the specimen is between 13% and 17%, with increase in the moisture content, the fracture toughness increases at first and then decreases. There is an optimum moisture content for soil which let the fracture toughness reach a top. When the shear rate is between 0.5 mm/min and 6 mm/min, the shear rate has a lower influence on the fracture toughness in comparison with the dry density and moisture content. Meanwhile, because the factors such as the soil moisture content, crack depth and the specimen sizes could also have remarkable impacts on the fracture toughness, it is necessary to make studies of the influence factors mentioned above in the future.

Key words: compacted clay; shearing rates; fracture toughness; crack depth; dry density; moisture content