

# 黏土 I 型断裂韧度影响因素试验

邱珍锋<sup>1,2</sup>, 王俊杰<sup>1,2</sup>, 胡骏峰<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:**为研究击实黏土干密度、含水率对其断裂韧度的影响,把标准三点弯曲试验试样绕底部长边向前旋转 90°,加载方向随之变为水平方向,使荷载的方向与重力方向垂直,从而消除自重对裂隙向土梁厚度、长度方向扩展的影响。对重庆地区罗系地层中的黏土岩风化形成的高塑限黏土进行了室内黏土 I 型断裂韧度试验,总结了干密度、含水率对黏土断裂韧度的影响规律,结果表明,黏土 I 型断裂韧度随其干密度的增大而增大,随其含水率的增大先增大后减小;存在一个最优含水率,此时断裂韧度取得最大值。

**关键词:**黏土;断裂韧度;三点弯曲试验;干密度;含水率

**中图分类号:**TU47      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2015)06-0086-04

**Experimental study on factors of I-type fracture toughness of compacted clay**//QIU Zhenfeng<sup>1,2</sup>, WANG Junjie<sup>1,2</sup>, HU Junfeng<sup>1,2</sup>(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of the dry bulk density and moisture content on the fracture toughness of compacted clay, a new method for the three-point bending test was used, in which the testing sample was rotated 90° in forward around its long side at the bottom, and the loading direction was thus turned to the horizontal direction, perpendicular to the direction of the gravity of the testing sample, so as to avoid the influence of its self-gravity on the fracture extending along the thickness and length of the soil beam. Laboratory tests on the I-type fracture toughness of high-plasticity compacted clay formed by rock weathering in the Jurassic formation in Chongqing City show that the fracture toughness of compacted clay increases with the dry bulk density, and that it increases first and then decreases with the increase of the moisture content, with an optimum moisture content existing, corresponding to the greatest fracture toughness.

**Key words:** clay; fracture toughness; three-point bending test; dry bulk density; moisture content

高土石坝蓄水过程可能发生心墙水力劈裂现象,水力劈裂是水库初次蓄水过程中导致大坝渗漏、内部侵蚀、坝体破坏的重要原因<sup>[1-2]</sup>。由于水力劈裂过程本质是裂隙扩展的过程,研究者发现借鉴断裂力学的分析方法来研究心墙水力劈裂问题是合适的。从断裂力学的角度,水力劈裂的问题首先要对土体的断裂特性进行研究。水库初次蓄水使心墙裂隙充水,同时,水也渗入到心墙料中,心墙裂隙应力强度因子与裂隙所受的正应力、切应力、渗流力、水压力以及裂隙距坝顶高度等有关。以 I 型断裂为例,当心墙裂隙应力强度因子  $K_I$  大于试验测得的断裂韧度  $K_{IC}$  时,即认为裂隙扩展。

黏土断裂韧度  $K_{IC}$  的测试方法主要是三点弯曲试验。在标准的三点弯曲试验中,土梁自重对试验结果和计算结果存在不可忽视的影响。Chandler 等<sup>[3-7]</sup> 为了降低土梁自重对测试结果的影响,对试验仪器进行了改进。王俊杰等<sup>[8-10]</sup> 把标准三点弯曲试验试样绕底部长边向前旋转 90°,加载方向随之变为水平方向,荷载方向与土梁重力方向垂直,从而巧妙地消除土梁自重对裂隙向土梁厚度、长度方向扩展的影响,改进后的三点弯曲试验可以比较好的消除土梁自重的影响,且试验操作方便。

$K_{IC}$  是评价土体抗断裂能力的指标,当然也是影响黏土抗滑能力的重要指标。影响黏土  $K_{IC}$  的因

素众多,其中,试样的干密度、含水率、物质组成、几何尺寸、裂缝深度等是主要的影响因素。当应力强度因子  $K_I$  达到断裂韧度  $K_{IC}$  时,认为土体即将开裂。本为采用王俊杰等<sup>[8-10]</sup>提出的方法对重庆地区侏罗系地层中的黏土岩风化形成的高塑限红黏土料进行了室内 I 型断裂韧度试验,研究了黏土试样的干密度、含水率对 I 型断裂韧度  $K_{IC}$  的影响规律。

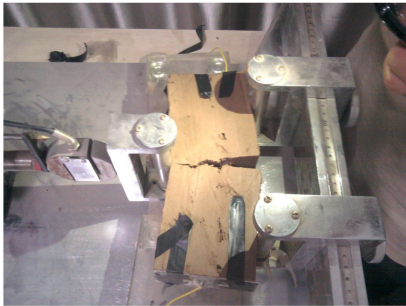
## 1 断裂韧度测试改进方法

### 1.1 试验方法与步骤

裂隙在土梁中的真实扩展方向是三维的,试验中发现裂隙扩展面沿土梁宽度方向凹凸形状基本一致(图 1(a)),认为向宽度方向的扩展可假定为是平行于重力方向,验证了王俊杰等<sup>[8-10]</sup>提出的方法的合理性,该方法适用于黏土 I 型断裂韧度测试。但受限于经费,当时的仪器精度并不是非常高,试验中采用手动加载,并采用百分表进行位移监测,人工读数,荷载精度为  $0.01\text{ N}$ <sup>[8-10]</sup>。根据三点弯曲试验原理,采用新技术对试验仪器进行改进,改进后的仪器由 2 个距离可调节的底边支座、1 个加载杆、加载系统、数据采集系统组成。改进后的加载系统由高精度的应变加载系统和应力加载控制系统组成,荷载精度提高到  $0.001\text{ N}$ ;改进后的数据采集系统可对试验过程中的荷载和位移等进行实时采集;试样座底部改用万向滚轮支撑,可随试样的变形在水平面内自由移动,基本消除了试样底部的摩擦力。试验加载方法如图 1(b)所示。



(a) 裂隙扩展形态



(b) 试验加载方法

图 1 试验加载

试验仪器改进后需对试验步骤作相应的调整,调整后的试验步骤可分为 5 步:①将土样三等分装入制样仪中,分层击实;②用切土锯切出所需深度的裂缝;③将试样取出,横放在 2 个有多个万向轮的垫板上,并让加荷杆与试样完全接触;④在试样两端贴上电极片,启动 I 型土体断裂加载测试程序;⑤启动推力装置,直至试样破坏,同时,记录从开始施力到试样破坏过程中荷重传感器和位移传感器采集到的荷载和位移数据。

### 1.2 试样制备

试验土料为重庆地区侏罗系地层中的黏土岩风化形成的高塑限红黏土料。所用土料颗粒相对体积质量  $G_s = 2.74$ ,塑性指数 18.4,液限 39.5%,塑限 21.1%,最大干密度为  $1.75\text{ g/cm}^3$ ,最优含水率为 20.0%。试验前,采用了粒度分析仪对黏土料进行了级配分析,颗粒级配曲线如图 2 所示。将土样装入制样仪中分层击实,用切土锯切出一定深度的裂缝备用。

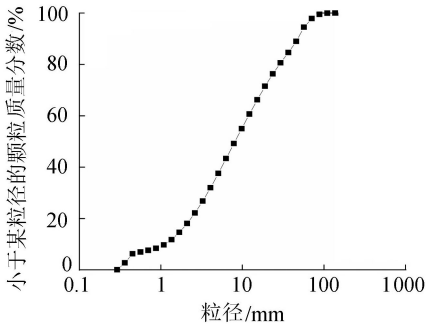


图 2 试验土料级配

## 2 试验结果分析

### 2.1 试验方案

为了探究干密度和含水率对黏土断裂韧度影响,分别设计了不同干密度与含水率的 8 组试验,每组试验均进行 3 个平行试验。试验方案如表 1 和表 2 所示。表中含水率为制样含水率,即制样时所控制的含水率,在试验过程中含水率可能会有所变化。

表 1 干密度试验方案

| 方案编号 | 密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$ | 含水率 $w/\%$ | 试样个数 |
|------|-------------------------------|------------|------|
| 1    | 1.5                           | 20.00      | 3    |
| 2    | 1.58                          | 20.00      | 3    |
| 3    | 1.67                          | 20.00      | 3    |
| 4    | 1.75                          | 20.00      | 3    |

表 2 含水率试验方案

| 方案编号 | 密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$ | 含水率 $w/\%$ | 试样个数 |
|------|-------------------------------|------------|------|
| 5    | 1.75                          | 16.00      | 3    |
| 6    | 1.75                          | 18.00      | 3    |
| 7    | 1.75                          | 22.00      | 3    |
| 8    | 1.75                          | 24.00      | 3    |

2.2 断裂韧度的计算

据标准三点弯曲试验的原理,试样土体的断裂韧度可按下式进行计算:

K\_IC = \frac{PS}{BW^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \tag{1}

其中

f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2}}{2\left(1 + \frac{2a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \cdot

\left[1.99 - \left(\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)\left(2.15 - 3.93 \frac{a}{W}\right) + 2.7 \frac{a^2}{W^2}\right]

式中:P 为裂缝扩展临界荷载;a 为预制裂隙深度;B 为试样厚度;W 为试样宽度;S 为两支座间距。

本试验中试样长 L=24 cm,W=10 cm,B=5 cm,S=18 cm,a=2 cm。

2.3 土体干密度对其 K\_IC 的影响

为研究土体干密度对其 K\_IC 的影响,进行了相同含水率(20.0 % )、不同干密度的试样断裂试验。试验中所监测到的典型试样荷载-位移关系曲线如图 3 所示。

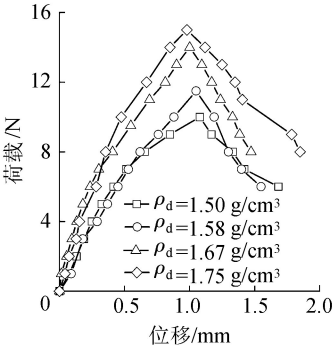


图 3 不同土体干密度的荷载-位移关系

由图 3 可知,在荷载峰值点之前,每个试样荷载均随着位移的增长而增大,基本为线性增长趋势;达到峰值荷载之后,荷载随位移的增大迅速减小,大致呈线性递减趋势。可认为该黏土的断裂特性表现出线弹性特性,峰值点即是裂隙扩展所需的最大荷载,可用该峰值荷载计算该试样的 K\_IC。

采用式(1)对不同干密度试样的断裂韧度进行计算,结果如图 4 所示。由图 4 可知,K\_IC 随着土体干密度的增大而增大。制备不同干密度的试样所需要的击实功不同,干密度大的试样所需的击实次数也更多。土石坝中的黏土心墙的抗水力劈裂性能可运用该规律,增加碾压次数或采用重型碾压设备对黏土心墙进行碾压,提高黏土心墙的密度可增大其 K\_IC,从而提高其抗水力劈裂的能力。黏土边坡的治理也可运用该规律,黏土边坡一般的破坏模式是拉

裂型<sup>[11-13]</sup>,可以适当夯实边坡上边缘的可能拉裂区来增强其抗拉裂性能,以防黏土边坡拉裂破坏。

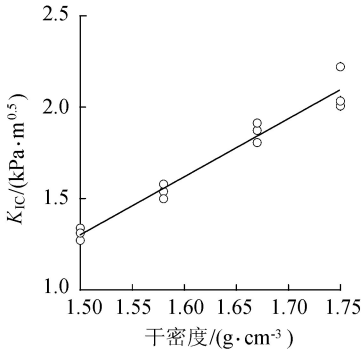


图 4 试样干密度对其 K\_IC 的影响

2.4 土体含水率对其 K\_IC 的影响

土石坝黏土心墙的施工过程中,每层虚铺黏土层的含水率可能不同,而相同碾压强度下不同含水率黏土的碾压密实度不同,因此黏土含水率会影响碾压后黏土心墙的断裂韧度,即抗水力劈裂的能力,有必要研究含水率对黏土的断裂韧度的影响。结合三点弯曲试验,对相同干密度下的 5 种不同含水率试样进行了断裂韧度测试,试验中所监测到的典型试样荷载-位移曲线图 5 所示。

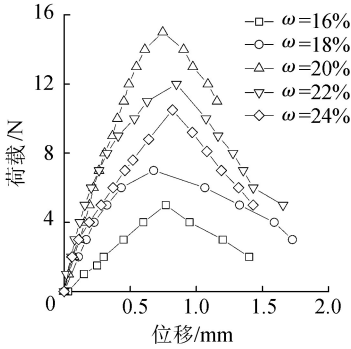


图 5 不同土体含水率的荷载-位移关系

由图 5 可知,每个试验的荷载-位移曲线均存在明显的峰值点,取该峰值点作为断裂韧度的计算荷载,可计算出每个试样的断裂韧度 K\_IC,结果如图 6 所示。由图 6 可知,前段试样的 K\_IC 随着试样含水率的增大而增大,当试样中的含水率增大到一定值后,

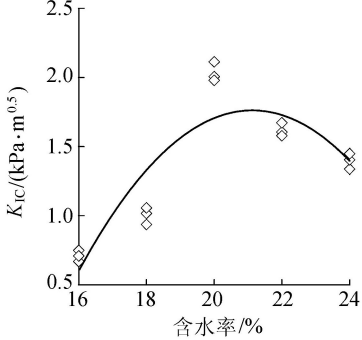


图 6 土体含水率对其 K\_IC 的影响

$K_{IC}$ 随着含水率的增大而减小,说明存在一个使黏土 $K_{IC}$ 值最大的含水率且与最优含水率相同。土石坝黏土心墙施工时,保证黏土在最优含水率进行碾压,可使黏土心墙具有较好的抗水力劈裂性能。

3 结 论

a. 黏土的 $K_{IC}$ 值随着土体干密度的增大而增大,土石坝中的黏土心墙施工时,可增加碾压次数或采用重型碾压设备碾压,以增大心墙密度及其 $K_{IC}$ ,从而提高其抗水力劈裂的能力;黏土 $K_{IC}$ 随着其含水率的增大先增大后减小,存在一个使其 $K_{IC}$ 值最大的含水率。

b. 在黏土含水率相同的情况下,土体 $K_{IC}$ 值随击实功的增大而增大;在相同击实功、不同含水率情况下, $K_{IC}$ 值随含水率的增大先增大后减小;存在一个最优含水率,此时黏土的 $K_{IC}$ 值最大。水利工程施工时,可按照最优含水率进行填筑,以提高其抗水力劈裂能力。

参考文献:

[ 1 ] 张丙印,于玉贞,张建民. 高土石坝的若干关键技术问题[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议编委会. 中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京:清华大学出版社, 2003:163-186.

[ 2 ] SHI Zihai,SUZUKI M,NAKANO M. Numerical analysis of multiple discrete cracks in concrete dams using extended fictitious crack model [ J ]. Journal of Structural Engineering, ASCE,129(3) :324-336.

[ 3 ] 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: 321-327.

[ 4 ] 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.

[ 5 ] 丁金栗,刁玉椿,孙亚平. 击实黏性土断裂韧度性质研究[J]. 水利学报,1990,21 (7) :55-60. ( DING Jinsu, DIAO yuchun, SUN yaping. Studies on the fracture toughness  $K_{IC}$  of cohesive soil [ J ]. Journal of Hydraulic Engineering. 1990,21(7) :55-60 ( in Chinese ) )

[ 6 ] 张振国,丁金栗. 黏性土体断裂韧度 $K_{IC}$ 研究[J]. 岩土力学, 1993, 14 (3) : 47-52. ( ZHANG Zhenguo, DING Jinsu. Studies on the fracture toughness  $K_{IC}$  of cohesive soil [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 1993, 14 (3) : 47-52. ( in

Chinese ) )

[ 7 ] 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 Peiwei, TANG Hongmei. Experimental study on the fracture toughness  $K_{IC}$  of soil [ J ]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Nautre Science, 2012, 31 (4) : 788-791. ( in Chinese ) )

[ 8 ] 王俊杰. 基于断裂力学的土石坝水力劈裂研究[ D ]. 南京:河海大学,2005.

[ 9 ] WANG Junjie. Hydraulic fracturing in earth-rock fill dams [ M ]. Wiley: New Jersey, 2014:4-6.

[ 10 ] 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) :3972-3977. ( WANG Junjie, ZHU Jungao. Laboratory study on fracture toughness  $K_{IC}$  of compacted clay [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2005, 24 (21) : 3972-3977. ( in Chinese ) )

[ 11 ] 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.

[ 12 ] 张涟英,黄宏辉,郑甲佳. 贵州高速公路红黏土边坡稳定分析[ J ]. 贵州大学学报:自然科学版,2014,31(3) : 105-110. ( ZHANG Lianying, HUANG Honghui, ZHENG Jiajia. Slope stability analysis of red clay in Guizhou expressway [ J ]. Journal of Guizhou University: Natural Sciences, 2014, 31(3) : 105-110. ( in Chinese ) )

[ 13 ] 王培清,付强. 降雨入渗对裂隙性红黏土边坡的稳定性影响分析[ J ]. 公路工程,2013,38(5) :165-170,192. ( WANG Peiqing, FU Qiang. Analysis on stability of red clay with cracks based on rainfall infiltration[ J ]. Highway Engineering, 2013, 38(5) : 165-170, 192. ( in Chinese ) )

( 收稿日期:2014 -08 -25 编辑:郑孝宇)

+++++  
( 上接第 51 页 )

[ 13 ] TABARI H, TALAEI P H. Local calibration of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model[ J ]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 16(10) :837-845.

[ 14 ] 王声锋,段爱旺,张展羽. 半干旱地区不同水文年 Hargreaves 和 PM 公式的对比分析[ J ]. 农业工程学报, 2008, 24(7) :29-33. ( WANG Shengfeng, DUAN Aiwang, ZHANG Zhanyu. Comparison and analysis of Hargreaves equation and Penman-Montieth equation during the different hydrological years in the semi-arid region [ J ]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(7) :29-33. ( in Chinese ) )

( 收稿日期:2014 -05 -20 编辑:熊水斌)