

文章编号:1673-9469(2015)03-0001-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.03.001

透明类岩石材料内置裂隙试验研究

孙亚霖^{1,2},朱珍德^{1,2},林恒星^{1,2}

(1. 河海大学 岩土工程科学研究所,南京 210098;2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,南京 210098)

摘要:为了探究岩体内部裂隙的扩展破坏过程,本文研制出一种新型透明类岩石材料,在内部预制裂隙进行单轴压缩试验。试验详细观察了预制裂隙试件完全破坏总过程,分析总结了裂纹扩展的每个阶段所呈现出来的特点和规律,研究了不同长度裂隙对试件基本物理力学参数的影响,得出了裂隙长度越大,试件的单轴抗压强度和弹性模量都越低的结论。

关键词:预制裂隙;单轴压缩;裂纹扩展;抗压强度

中图分类号:TU458.3

文献标识码:A

Study on transparent rock-like materials within fissure

SUN Ya-lin^{1,2}, ZHU Zhen-de^{1,2}, LIN Heng-xing^{1,2}

(1. Geotechnical Engineering Research Institute, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China;2. Key laboratory for Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

Abstract: A new kind of transparent rock-like materials was developed for studying crack propagation inside instated of rail rock. It that have artificially induced internal cracks was tested under uniaxial compression. This experiment observed the overall process of the pre-test specimens fractured completely destroyed, analyzed each stage of the presentation of the crack propagation characteristics carefully and summarized the law of pre-crack damage the specimen. The experiment studied the effect of different lengths of fissure on basic physical and mechanical parameters; obtained the greater the crack length, uniaxial compressive strength and elastic modulus of the specimen are lower conclusions. These studies have important guidance for the early warning of geotechnical engineering works.

Key words: prefabricated fissures; uniaxial compression; crack expand; compressive strength

现如今随着我国经济越来越快的发展,对能源的需求就越来越强烈,煤、石油、天然气等石化能源的开发与利用无疑是我国经济发展中的重中之重,在其开采施工过程中,岩体的开挖、支护、防止失稳破坏等问题都是需要技术人员首先处理的问题,因此人们对裂隙岩体的扩展和破坏机理的认识也提出了更高的要求。Griffith^[1-2]通过对陶瓷等材料的试验,指出岩体内部存在的微小裂隙的不断扩展是造成岩石破坏的原因,并且归纳出了裂隙长度与固体强度之间的数学关系;Bobet等^[3]利用石膏材料来模拟岩石,并对单轴荷载压缩下,重叠和错开的预制裂隙的扩展、延伸过程进行了研究;Dyskin A V^[4]研究了透明低温树脂表面预制三维裂纹扩展情况,研究表明单轴压缩条件

下翼裂纹的扩展为裂隙周围产生的包裹状翼裂纹所限;滕春凯、尹祥础等^[5-6]在玻璃等材料中预制表面裂纹进行试验,发现在单轴压缩条件下会产生II-III复合破裂;郭彦双、朱维申等^[7]通过在不同材料中预制裂隙进行试验,发现在单轴压缩条件下,不同材料的预制裂隙初始破坏形态相同但翼裂纹的起裂位置不同。本实验采用一种新型透明类岩石材料,制作成标准长方体试件,并在试件内部预制裂隙,然后展开单轴压缩试验。在试验中可以清楚的观察到在应力由低到高过程中裂纹的起裂、扩展、贯通的全过程,从直观上对裂纹的延伸贯通进行观察,并定量分析了不同应力下裂纹的生长程度,得到试件破裂失稳同应力之间的关系,对工程实践具有重要的参考价值。

收稿日期:2015-03-27

基金项目:国家自然科学基金项目(41272329,51379065);国家重点基础发展计划(973)项目(2011CB013504);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014B33614)

作者简介:孙亚霖(1990-),男,河南南阳人,硕士,主要从事岩石力学工程与数值模拟方面研究工作。

表1 树脂材料基本参数

Tab.1 Basic parameters of the resin material

参数	密度 /g·cm ⁻³	弹性模量 /GPa	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	脆性度	粘聚力 /MPa	摩擦角 /°
数值	1.8	5.8	116.5	14.8	6.1	20.8	46.8

1 本实验的特点

试验所用材料为透明不饱和树脂,此种树脂具有良好的透明度,可以在试验过程中清楚地观察并拍摄下预制裂隙的扩展、贯通全过程。

Dyskin 最早使用的透明材料属于增韧型材料,即使在 -17℃ 的环境下,拉压强度比也只有 1/3;此前山东大学的郭彦双博士研制了一种在 -50℃ 下拉压强度比可达 1/5 的透明环氧聚酯树脂,该树脂较前人使用的透明树脂在脆性程度上有了一定提高,但是距真实的岩石材料仍然有一定差距。本文通过改变固化剂和促进剂的比例,同时控制固化温度等养护条件,研制出一种新型不饱和树脂材料,该材料在常温下拉压强度比就能达到 1/5,在 -60℃ 环境下冷藏 48 h 后,其拉压强度比可以达到 1/7,甚至 1/8,材料的基本参数见表 1。

2 试验材料的制备

2.1 脆性透明树脂材料的调配

为了使试验所采用材料的力学特性能够与天然岩石材料的主要力学特性尽量一致,必须要有特别调配的树脂材料。一般情况下,树脂材料是由液态树脂、促进剂、固化剂等按照一定配合比混合固化而成,目前树脂界学者公认,不同的材料配合比和固化环境温度在树脂材料固化成型过程中对树脂的力学性能会产生重要影响。本试验通过大量研究,确定了不同配合比和温度下树脂材料的力学特性,成功研制出一种透明性良好的脆性不饱和树脂。该树脂是由无色透明的液态树脂、固化剂和促进剂按照一定比例搅拌混和而成。此种树脂性质与真实岩石较为接近,但是要想使模拟的多裂隙岩体与真实岩体的特性完全一致也是不可能的,现在国际上认可的是,如果仅从研究岩体的破裂机理和变形强度特性的角度来说,脆性类岩石材料试件的试验研究还是有借鉴意义的。

2.2 预制裂隙与模具设计

本文采用 0.3 mm 厚的云母片来模拟预制裂

隙,跟前人所用的薄铜片相比,云母片刚度更小,更能模拟岩石中的裂隙。裂隙形状采用椭圆形,短轴长 $2a$,长轴长 $2b$,裂隙模型用细线固定于模具中,可以做成不同的角度以便试验研究。本试验研制的模具由 5 块有机玻璃组成,模具侧面可以钻孔,再通过细棉线将云母片固定在模具内。模具侧面钻孔位置的不同使细棉线具有不同的角度,从而形成不同角度不同类型的三维预制裂隙。定义预制裂隙面与水平面的夹角为三维裂隙的倾角。使用该模具可以预制倾角为 0°、30°、45°、60° 等多种角度的三维预制裂隙试件。

3 试验流程

本试验所用的仪器有:电子称、玻璃棒、烧杯、恒温鼓风烘干箱、DW-60W60 超低温冷冻储藏箱、RMT-150B 三轴压力机,主要试验仪器,用来进行单轴压缩试验。

在有机玻璃模具内均匀涂抹脱模剂,所使用的脱模剂应具有良好的热稳定性和化学稳定性;然后将云母片按所需的位置用细棉线固定于模具内部,并将模具两侧的小孔封堵起来,避免液态树脂从小孔流出;接着按照一定的比例称取固定质量的树脂、促进剂、固化剂,将固化剂和树脂倒入烧杯内搅拌均匀,再加入促进剂,继续搅拌,使三者混合均匀,搅拌过程中要沿着一个方向匀速搅拌,避免出现气泡;将固定好云母片的有机玻璃模具置于平整的台面上,把搅拌均匀的树脂倒入模具,倒的时候要注意用玻璃棒引流,以合适的速度匀速倒入,以防倒入过程中树脂流冲歪预制裂隙或者树脂内出现大量气泡;将倒好树脂的模具放入 10℃ 的恒温箱中养护 24 h,待树脂固化后,拆去模具并将成型的试件放入 80℃ 的恒温箱进行养护,养护时间为 24 h;养护结束后再将试件放入 -60℃ 的冰箱中冷藏 48 h,进行试验时再取出。

4 完整透明不饱和树脂材料试件试验

4.1 完整树脂材料试件应力应变曲线分析

试验测得完整透明不饱和树脂材料试件应力

应变曲线如图1所示,曲线一共可分为四个阶段。

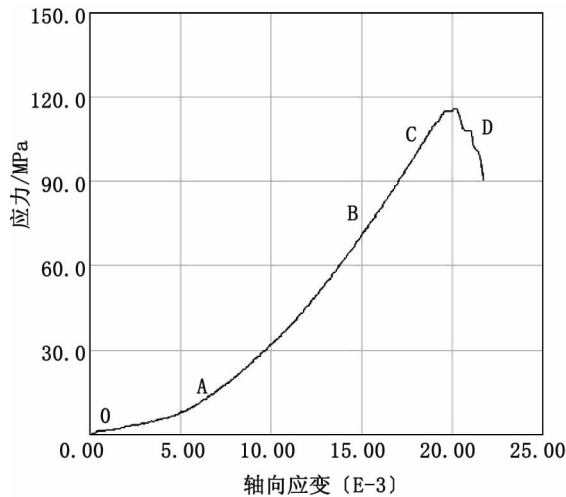


图1 完整试件应力应变曲线

Fig.1 Complete specimen stress-strain curve

裂隙初始压密阶段(OA段):加载初期可以观察到试件破裂的现象,该阶段试件的应力应变曲线为非线性上升过程,与完整致密的岩石试样相比这一过程很短,甚至没有。含裂隙的岩体试验S曲线出现这一阶段主要是由于岩体内的原生微小孔隙、裂隙等初始损伤压密或者是试件与伺服压力机的工作台接触性不好。

弹性变形阶段(AB段):该阶段内应力应变曲线为一条直线,变形与荷载几乎呈线性关系,符合胡克定律,曲线斜率是一个常数。该阶段可以观察到试件表面有一些微小的裂隙产生,并可以听到试件发出轻微的噼啪声,同时可看到试件表面少量的碎屑状树脂飞出。试件在该阶段发生脆性劈裂破坏,弹性模量等力学参数也是在这个阶段测出。

继生裂纹的扩展与汇合阶段(BC段):此阶段即临近破坏阶段。该阶段曲线不再保持线性发展,斜率逐渐减小。这一阶段树脂试样的裂纹的长度和宽度逐渐增加,微小裂纹持续扩展,裂纹形态也发生变化,开始偏离最初的起裂方向,裂纹之间相互融会贯通,形成较大裂纹。

裂纹的加速扩展阶段(CD段):该阶段内试件整体失稳,应力迅速下降,试件形成宏观破裂面。随着荷载的逐渐增大,试件发出密集的噼啪声,翼型裂纹迅速增长,并且逐渐偏向最大拉应力方向,最终呈垂直方向,直达试件端面,形成贯通裂纹。此时有一些较大的条状块体迸裂,试件应力迅速下降,认为试件发生脆性劈裂破坏。

4.2 完整岩石试件单轴压缩过程与树脂材料对比

根据前文得到的透明类岩石材料的密度、抗压强度等物理力学参数,我们发现该材料与砂岩的物理力学参数相似。砂岩密度 $1.9 \sim 2.6 \text{ g/cm}^3$,抗压强度 $20 \sim 170 \text{ MPa}$ 。砂岩单轴压缩过程应力应变曲线如图2所示。

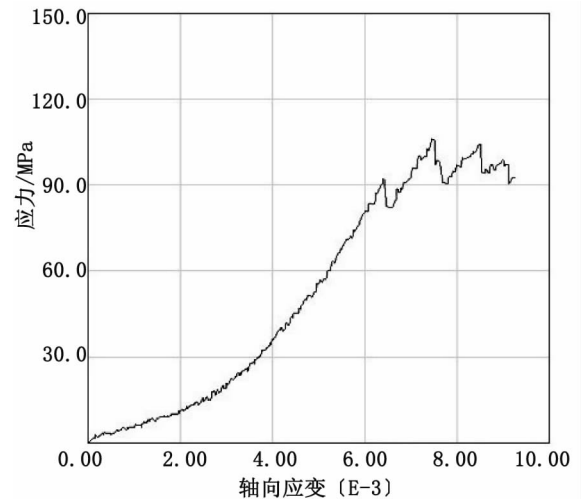


图2 砂岩试样应力应变曲线

Fig.2 Sandstone samples stress-strain curve

从图2中可以看出,树脂材料与砂岩材料应力应变曲线具有较高相似度,都可以分为四个阶段,前三个阶段基本一致,区别只在于第四阶段,即破坏阶段。砂岩材料破坏阶段持续时间较长,材料呈现出屈服的特性,残余应力波动下降,下降速度比较慢,残余应力较大,而树脂材料劈裂破坏之后应力迅速降低,残余应力迅速降到较低水平,这说明树脂材料整体上性质跟砂岩材料较为接近,裂纹起裂阶段及扩展阶段表现一致,只是破坏阶段有所不同,所以用树脂材料来代替岩石材料来观察裂纹的起裂、扩展过程还是可靠的。

5 含裂隙树脂材料试件试验

5.1 预制裂隙试件破坏变化全过程

本文以预制裂隙倾角为 45° 的试件为例来说明含预制裂隙树脂试件破坏变化全过程,裂纹扩展全过程如图3。

在 0.01 mm/s 的加载速率下,当应力达到试件峰值应力的35%时,预制裂隙两长轴端分别开始出现一条月牙形包裹翼裂纹,初始裂纹非常细小,长度约 4 mm ,宽度约 1 mm 。随着应力不断增加,翼裂纹逐渐扩展,当应力达到峰值应力的50%

时,翼裂纹长度增长到预制裂隙长轴长度的约 $1/2$,且在预制裂隙中部出现一片一片的花瓣状裂纹,沿预制裂隙边缘包裹着预制裂隙,如图3(a)所示。当应力增长到峰值应力的65%时,翼裂纹长度有了较大增长,基本与预制裂隙长轴相当,且花瓣状裂纹相互贯通起来,形成一个扭曲面,如图3(b)所示。随着应力的继续增长,翼裂纹长度不断增加,逐渐延伸到试件上下两个端面,最终在应力达到峰值强度时贯通整个试件,形成一条张拉裂隙,使试件丧失强度,如图3(c)所示。

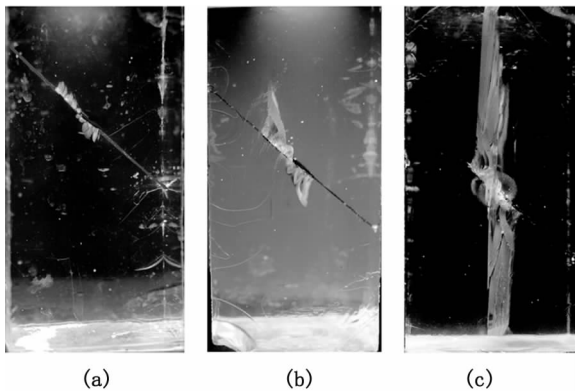


图3 裂纹扩展过程

Fig.3 Process of crack propagation

5.2 不同裂隙长度对强度和弹性模量的影响

试验分别对完整试件和裂隙长度分别为14、20、26 mm的试件进行单轴压缩试验,测得试验数据如表2。

表2 不同裂隙长度试件参数

Tab.2 Parameters of specimens with different fissure length

裂隙长度/mm	峰值强度/MPa	峰值应变	弹性模量/GPa
0	103.13	17	7.8
14	81.57	14	7.3
20	73.34	13	6.7
26	61.49	11	6.4

由表2可知,裂隙长度为14、20、26 mm的试件的峰值强度相对于完整试件其峰值强度分别降低了21.30%、27.35%、38.92%,可见预制裂隙的存在极大地降低了试件的抗压强度和稳定性。尤其当预制裂隙达到26 mm(超过试件宽度的一半)时,其试件峰值强度仅为无裂隙试件峰值强度的61.08%。这说明岩体内的原生裂隙是影响岩体抗压强度和稳定性的重要因素,对工程危害性较大。试件的预制裂隙长度对试件的峰值轴向应变也有影响,预制裂隙分别为14、20、26 mm的试件相对于完整试件的峰值轴向应变分别降低了

11.96%、12.84%、15.08%。这说明裂隙的存在会使岩体在较小的变形条件下就发生破坏,即岩体从受压到破坏过程会变的更短。对比不同的裂隙长度试件的弹性模量可发现,随着裂隙长度的增加,裂隙的弹性模量逐渐降低,即裂隙的抵抗变形能力逐渐降低,在相同的应力条件下,裂隙长度较长的岩体变形较大,对工程来说则是会产生较大位移,造成结构的破坏,需要特别注意加强防范。

6 结论

1) 预制裂隙试件裂纹起裂是从预制裂隙长轴端开始,并逐渐包裹整个预制裂隙的。预制裂隙长轴两端的翼裂纹关于预制裂隙椭圆圆心成中心对称关系,两条翼裂纹随着压力的增大不断扩展,并逐渐偏向垂直方向,最终形成一条上下贯通的张拉裂纹,导致试件破坏失稳。

2) 预制裂隙长度对试件基本力学参数产生很大的影响,随着预制裂隙长度的增加,试件峰值强度不断减小,时间的弹性模量也呈现出减小的趋势,这说明裂隙长度的增加大大降低了岩石的抗压强度,这在工程中要引起重视。

参考文献:

- [1] GRIFFITH A A. The phenomena of ruptures and flow in solids [J]. Phil. Trans. ,1920;163-198.
- [2] GRIFFITH A A. The phenomena of ruptures and flow in solids [J]. Phil. Trans. Royal Soc. London, 1921; 221-263.
- [3] BOBET A, EINSTEIN H H. Fracture coalescence in rock - type material under uniaxial and biaxial compression [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(7): 863-888.
- [4] DYSKIN A V, JEWELL R J, JOER H, et al. Experiments on 3-D crack growth in uniaxial compression [J]. Int. J. Frac. , 1994, 65(4): 77-83.
- [5] 滕春凯, 尹祥础, 李世恩, 等. 非穿透裂纹平板试件三维破裂的试验研究[J]. 地球物理学报, 1987, 30(4): 371-378.
- [6] 尹祥础, 李世恩, 李红, 等. 闭合裂纹面间相互作用的试验研究[J]. 地球物理学报, 1988, 31(3): 307-314.
- [7] 郭彦双, 林春金, 朱维申, 等. 压剪条件下预埋椭圆裂纹三维扩展实验研究[J]. 固体力学学报, 2011, 32(1): 64-73.

(责任编辑 王利君)