

裂隙对含孔洞岩体力学特性的影响的试验和数值模拟研究

丁尧¹, 林国进¹, 张程²

(1. 四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 成都 610041; 2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059)

摘要: 为研究单轴压缩状态下裂隙对含孔洞岩体的力学特性的影响, 对含孔洞及预制单一裂隙的水泥砂浆试件进行单轴压缩试验及数值模拟, 研究预制裂隙倾角 i 、预制裂隙与孔洞距离 m 、预制裂隙长度 l 对试件的力学特性的影响。研究表明: (1) 当固定其它参数不变时, 抗压强度的试验值和数值模拟值随 l 的增加基本呈逐渐减小的趋势; 当固定其它参数不变时, 抗压强度的试验值和数值模拟值随裂隙倾角 i 的变化规律并不固定; 固定其它参数不变时, 抗压强度的试验值和数值模拟值随距离 m 的变化规律并不固定。 (2) 预制裂隙倾角的大小、预制裂隙至圆孔的距离 m 、预制裂隙长度 l 的大小对试件的主裂隙发展方向、破坏模式有影响。

关键词: 类岩体; 预制裂隙; 力学特性

中图分类号: TU 45 **文献标识码:** A

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON THE EFFECT OF FRACTURES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ROCK MASS CONTAINING CAVITIES

DING Yao¹, LIN Guo-jing¹, ZHANG Cheng²

(1. Sichuan Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Ltd, Sichuan, Chengdu 610041, China;
2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: In order to study the effect of cracks on the mechanical properties of rock mass containing hole under uniaxial compression, uniaxial compression test and numerical simulation were performed on cement mortar specimens containing hole and prefabricated single crack, and the effects of the dip angle i of prefabricated crack, the distance m between the prefabricated crack and hole, the length l of prefabricated crack on the mechanical properties of the specimen was studied. The research results show that when other parameters are constant, the experimental value and numerical simulation value of compressive strength basically show a gradually decreasing trend with the increase of l . When other parameters are constant, the variation law of the experimental value and numerical simulation value of uniaxial compressive strength with the dip angle i of prefabricated crack is not fixed. When other parameters are constant, the variation law of the experimental value and numerical simulation value of uniaxial compressive strength with the distance m is not fixed. The dip angle i of prefabricated crack, the distance m between

the prefabricated crack and hole, and length l of the prefabricated crack have an influence on the development direction of the main crack and failure mode of the specimen.

Key words: artificial rock mass; prefabricated crack; mechanical properties

1 引言

岩石材料内部常含有孔洞和裂隙等缺陷。岩石的力学特性与其内部缺陷的形状、大小、几何分布等均有密切的联系^[1]。因此,地下采矿与隧道开挖等地下工程也会在岩体中形成孔洞,外荷载作用下,裂纹沿孔洞周边起裂、扩展、贯通进而导致岩石整体破坏。因此,开展含孔洞岩石破坏特性的研究对岩土工程的安全稳定具有重要的工程意义^[2]。

目前有很多研究者对含有孔洞的岩石进行了试验和数值模拟研究,如文献[2~7]。也有少量学者针对同时含有裂隙和孔洞的岩石试样进行了力学试验和数值模拟,如文献[8~12]。但目前有关同时含裂隙和孔洞的岩石试样的力学特性研究成果偏少,已有的研究成果中还有很多因素未考虑,比如裂隙是在孔洞的上方还是下方、裂隙的长度等对试样的力学特性的影响。因此,本研究将对同时含有孔洞和裂隙的水泥砂浆试样进行单轴压缩试验和 PFC 数值模拟,研究预制裂隙倾角 i 、预制裂隙与孔洞距离 m 、预制裂隙长度 l 对试件的单轴抗压强度及裂纹演化规律的影响。

2 试验原理

2.1 试件制作

水泥砂浆试件尺寸为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 。孔洞由木圆柱体制作而成,预制节理面由木板制作形成。木圆柱体的直径为 2 cm ,长度为 12 cm 。木板的厚度为 1 mm ,宽度与节理面的长度相同,木板的长度为 12 cm 。试件的水灰比为 0.65 。试验中所用 $325^\#$ 水泥,砂采用中级标准砂,粒径范围为 $0.5 \sim 1.0\text{ mm}$ 。待水泥砂浆初凝 2 h 后,依照图 1 中的圆孔的位置、预制裂隙的位置分别插入木圆柱体、木板,再等 12 h 后,将木圆柱体和木板拔出,从而在试件中形成圆孔和预制裂隙。

图 1 以及后文中,定义预制裂隙的长度为 l ;预制裂隙端点 B 与圆孔中心 O 点的连线与圆孔的交点为 C 点, B 点与 C 点的距离为 m ; BO 连线与竖向荷载方向间的夹角为 β ,顺时针方向为正, β 的范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$; AB 连线与竖向方向间的夹角为 i ,顺

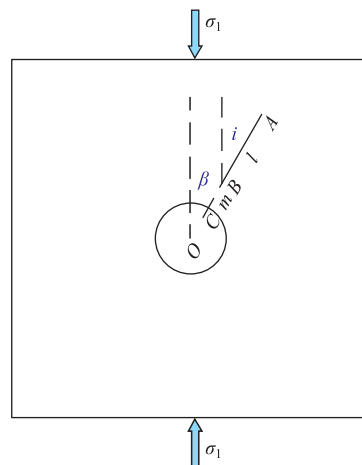


图 1 试件的荷载方向与预制裂隙间的几何关系

时针方向为正, i 的范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

2.2 试验顺序

试件经标准养护 28 d 后,并放置 7 d 后,然后进行单轴压缩变形试验。在进行单轴压缩变形试验时,加载速率为 1 kN/s 。

2.3 试验分组

2.3.1 完整试件的单轴压缩试验

采用 3 个完整试件进行单轴压缩试验,通过该试验获得完整试件的单轴抗压强度。 3 个试件的编号为 $A1$ 、 $A4$ 、 $A5$ 。

2.3.2 含预制裂隙和孔洞时试件的单轴压缩试验

试验主要根据 l 、 m 、 β 、 i 进行分组。当 β 、 l 和 m 保持不变,改变 i ,试验分组见表 1。当 β 、 i 和 l 保持不变,改变 m ,试验分组见表 2。当 β 、 i 和 m 保持不变,改变 l ,试验分组见表 3。

表 1 β 、 l 和 m 保持不变,改变 i 时的试验分组

l/cm	m/cm	$\beta/^\circ$	$i/^\circ$
2	1	0	0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120
			0, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150, 270,
2	1	30	300, 315, 330
			0, 30, 60, 90, 105, 120, 150, 180, 315,
2	1	60	330
			0, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150, 180,
2	1	90	210
			0, 30, 60, 90, 120, 150, 165, 180, 210,
2	1	120	240
			30, 60, 90, 120, 150, 180, 195, 210,
2	1	150	240, 270
			30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240,
2	1	180	270, 300

表 2 β, i 和 l 保持不变, 改变 m 时的试验分组

$\beta/^\circ$	$i/^\circ$	l/mm	m/m
0	0	2	0, 0.5, 1.0, 1.5
30	30	2	0, 0.5, 1.0, 1.5
60	60	2	0, 0.5, 1.0, 1.5
90	90	2	0, 0.5, 1.0, 1.5
120	120	2	0, 0.5, 1.0, 1.5
150	150	2	0, 0.5, 1.0, 1.5
180	180	2	0, 0.5, 1.0, 1.5

表 3 β, i 和 m 保持不变, 改变 l 时的试验分组

$\beta/^\circ$	$i/^\circ$	m/mm	l/mm
0	0	1	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
30	30	1	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
60	60	1	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
90	90	1	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
120	120	1	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
150	150	1	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
180	180	1	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5

3 完整试件的单轴压缩试验结果及数值模拟

3 个完整试件 A1、A4、A5 试件的抗压强度分别为 15.34 MPa、15.29 MPa、14.79 MPa。本文采用颗粒流 PFC 来模拟含有裂隙和孔洞的试件的单轴压缩性能。采用的数值模拟参数见表 4。

表 4 数值模拟参数

平行粘接模量	平均法向粘接强度/MPa	平均切向粘接强度/MPa	有效模量/GPa	刚度比	摩擦系数
1.0	9.0	9.0	0.8	1.0	0.5

A4 试件的单轴压缩应力应变曲线的试验值和数值模拟值的对比结果如图 2 所示, A4 试件破坏形状的试验结果和数值模拟结果的对比如图 3 所示。

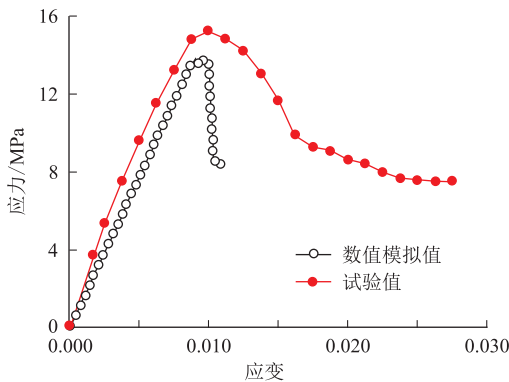


图 2 完整试件的应力应变曲线的试验值和数值模拟值对比

由试验得到的应力应变曲线和试件破坏形状, 均与由数值模拟得到的应力应变曲线和试件破坏形



图 3 完整试件的试验和数值模拟破坏图对比

状比较吻合。

4 含孔洞试件的强度的试验值与数值模拟值对比

4.1 倾角 i 的影响

当预制裂隙长度 $l = 20 \text{ mm}$ 、预制裂隙与圆孔的距离 $m = 10 \text{ mm}$ 、 β 保持不变时, 抗压强度随倾角 i 的变化规律如图 4 所示。

当 β 不同时, 由试验得到的强度值随裂隙倾角 i 的变化规律也不相同。

4.2 距离 m 的影响

在保持 $\beta = i$ 、预制裂隙长度 l 不变的情况下, 试件的抗压强度随 m 的变化规律如图 5 所示。

保持 $\beta = i$ 、预制裂隙长度 l 不变时, 由试验和数值模拟得到的抗压强度随 m 的变化规律并不固定, 而且两者得到的变化规律也不相同, 说明试样的抗压强度随裂隙至孔洞的距离 m 的变化规律并不固定。

4.3 距离 l 的影响

当 $\beta = i$ 、预制裂隙与圆孔距离 m 固定不变时, 抗压强度随裂隙长度 l 的变化规律如图 6 所示。

5 裂纹演化规律研究

5.1 倾角 i 的影响

当预制裂隙长度 $l = 20 \text{ mm}$ 、预制裂隙与圆孔距离 $m = 10 \text{ mm}$ 固定不变时, $\beta = 90^\circ$ 情况时的试验破坏图及 PFC^{2D} 数值模拟破坏图见图 7~8。在图 7~8 中, “1”代表预制裂隙, “2”代表次生裂隙, “3”代表拉伸裂隙, “4”代表剪切裂隙。

由试验结果可知, 多数情况下首先在孔洞周边及预制裂隙上产生次生裂隙, 随着继续加载, 试件上下边界处产生拉伸裂隙, 预制裂隙与孔洞周边的次生裂隙相互搭接形成脆弱区, 并且剥落体掉落; 再继续加载时, 拉伸裂隙的一部分沿着加载方向发展, 另

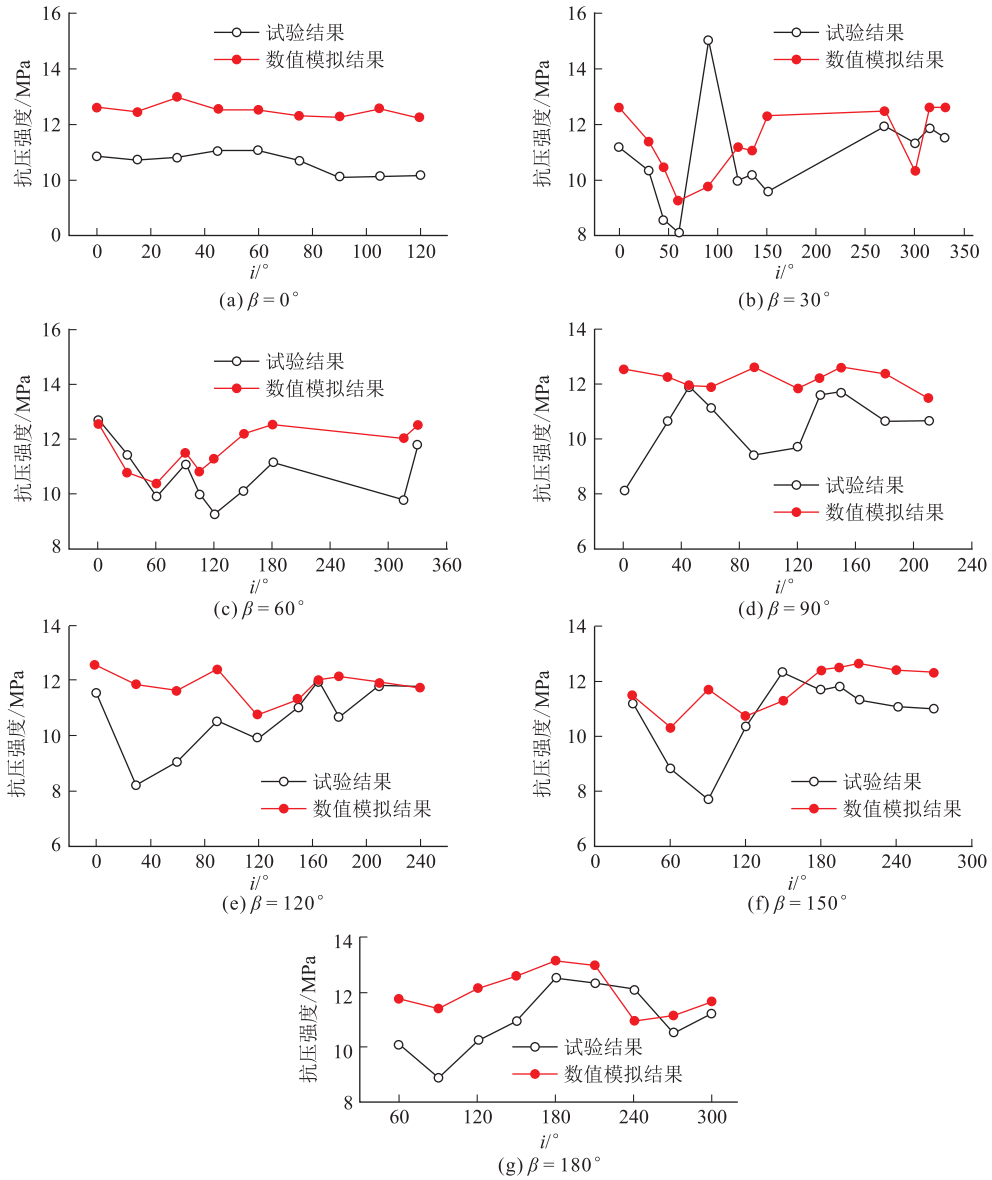


图4 单轴抗压强度随倾角 i 的变化规律

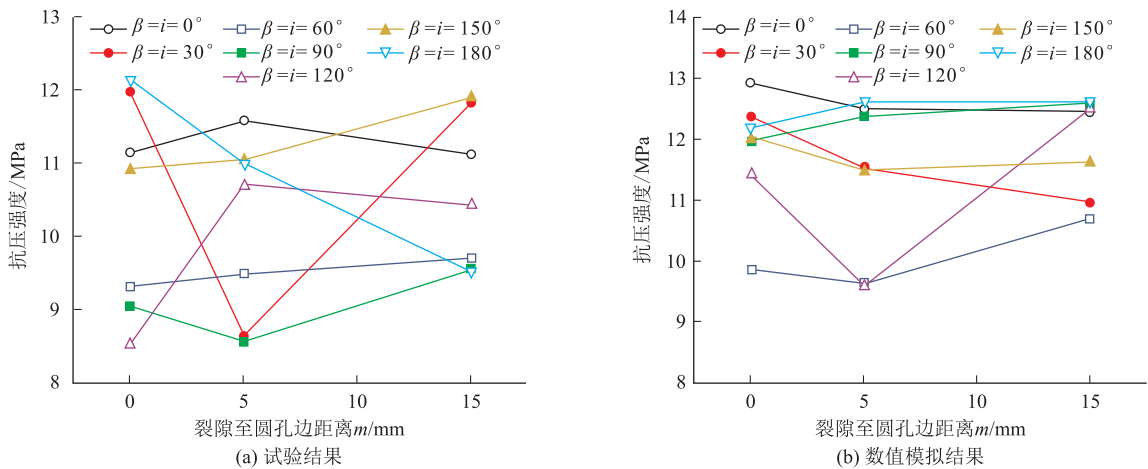


图5 单轴抗压强度随裂隙与孔洞距离 m 的变化规律

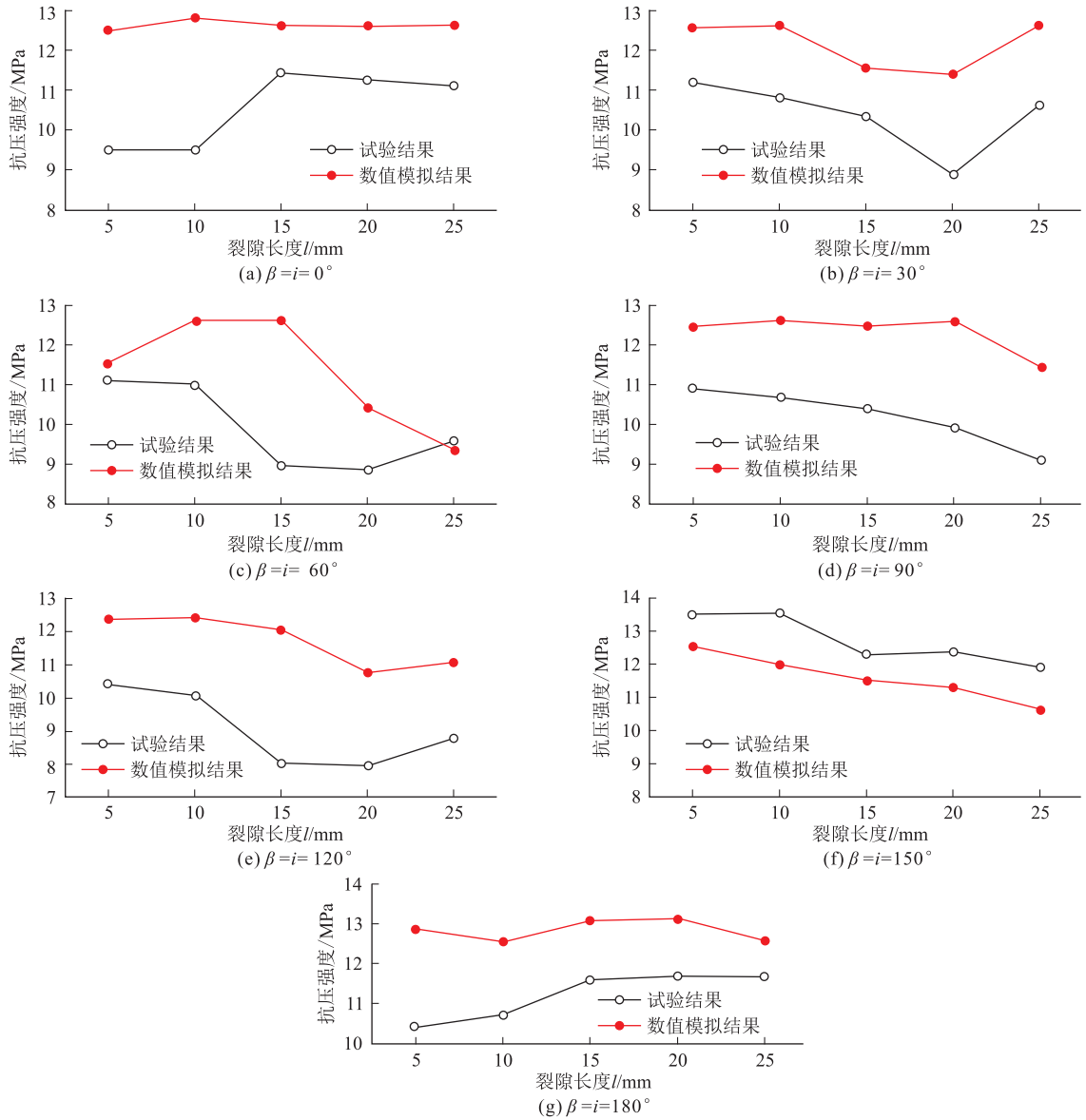


图 6 单轴抗压强度随裂隙长度的变化规律

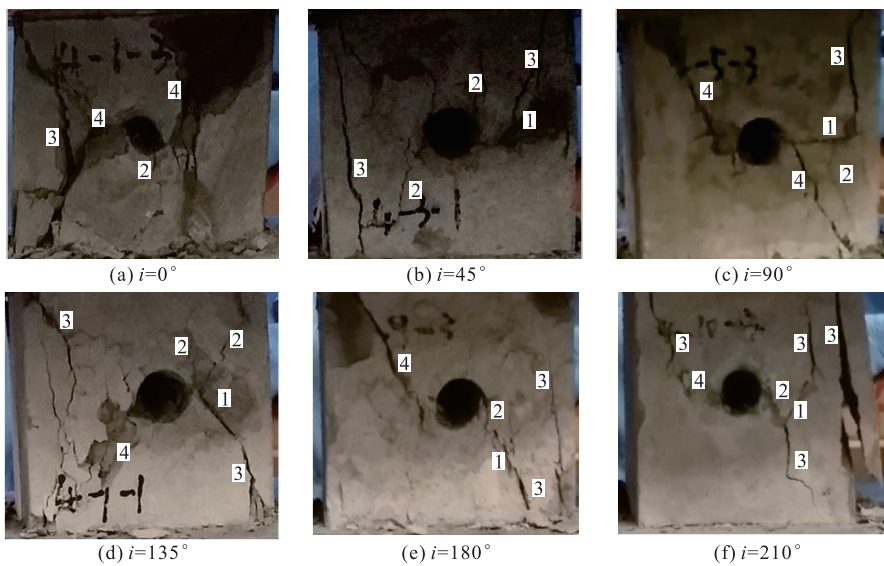


图 7 不同裂隙倾角 i 时试样的试验破坏图

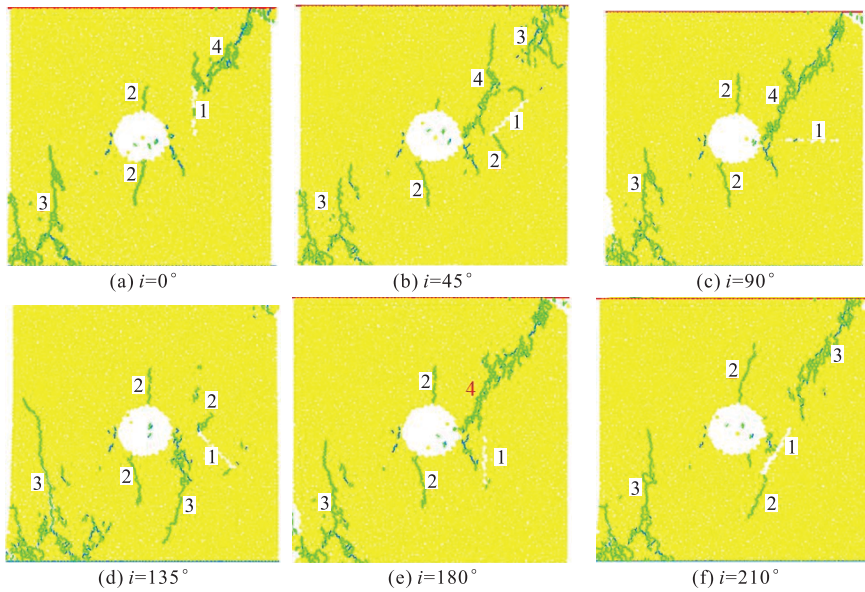


图 8 不同裂隙倾角 i 时试样的数值模拟破坏图

一部分沿试件的对角方向发展,通过孔洞及预制裂隙形成主裂隙,试件发生张拉和剪切的混合破坏,剪切破坏占主导地位。当预制裂隙倾角比较小时,拉伸裂隙并不沿着试件的对角方向发展,而是沿着近似加载方向发展,在孔洞两侧形成贯通裂隙,试件呈张拉破坏。

由数值模拟结果可知,孔洞周边及预制裂隙上首先产生次生裂隙,试件的左下角产生近似于加载方向的拉伸裂隙,右上角产生沿对角方向的拉伸裂隙;随着继续加载,裂隙不断发展形成贯通试样的主裂隙,最终试样破坏,试件的左右对角及孔洞处出

现剥落体掉落现象,数值模拟结果和试验结果基本相吻合。因此,预制裂隙倾角的改变对试件的主裂隙发展方向、破坏模式有影响。

5.2 距离 m 的影响

当 $\beta=i=90^\circ$ 、预制裂隙长度 $l=20\text{ mm}$ 时,预制裂隙与圆孔距离 m 为 0 mm 、 5 mm 和 15 mm 时的试验破坏图及 PFC^{2D} 数值模拟破坏图见图 9~10。在图 9~10 中,“1”代表预制裂隙,“2”代表次生裂隙,“3”代表拉伸裂隙,“4”代表剪切裂隙。

由试验结果可知,当 m 为 0 mm 时,孔洞的上下及预制裂隙的端部首先产生次生裂隙;随着加载

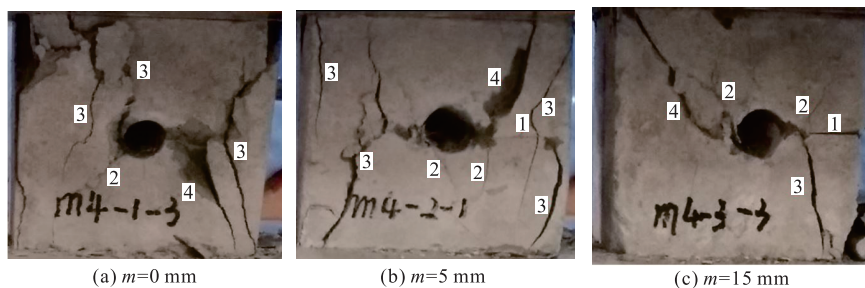


图 9 不同 m 时试样的试验破坏图

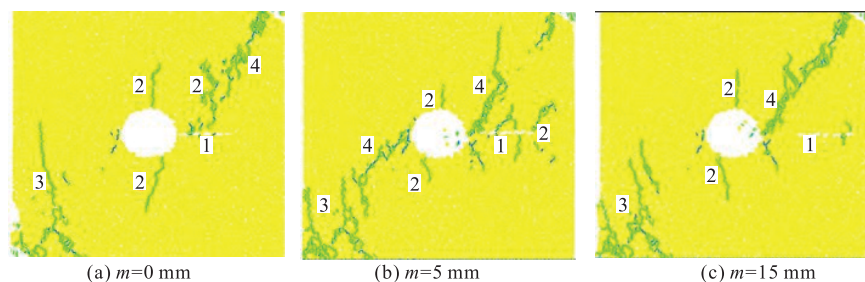


图 10 不同 m 时试样的数值模拟破坏图

的继续,孔洞的两侧产生剪切裂隙,次生裂隙沿着加载方向继续发展,试样的上下边界处产生沿加载方向的拉伸裂隙,在拉伸裂隙发展的过程中会与预制裂隙搭接形成脆弱区,并且剥落体掉落;最终,当主裂隙不贯通孔洞时自由面剥落,试样发生张拉和剪切的混合破坏,且以拉伸破坏为主;当 m 为 5 mm 时,试样发生张拉和剪切的混合破坏,但以剪切破坏为主;当 m 为 15 mm 时,试样主要发生剪切破坏。

由数值模拟结果可知,孔洞与预制裂隙上首先产生次生裂隙,随着加载的继续,孔洞的两侧产生剪切裂隙,次生裂隙沿着加载方向发展,次生裂隙沿近似加载方向发展并与预制裂隙搭接,最终主裂隙贯通试件。

因此, m 的大小对试件主裂隙的发展和试件的破坏模式有所影响。随着 m 不断增大,试件的破坏模式由张剪破坏向剪切破坏转变。

5.3 长度 l 的影响

当 $\beta = i = 90^\circ$ 、预制裂隙到圆孔距离 $m = 10$ mm 时,裂隙长度 l 不同的试验破坏图及 PFC^{2D} 数值模拟破坏图见图 11~12。在图 11~12 中,“1”代表预制裂隙,“2”代表次生裂隙,“3”代表拉伸裂隙,“4”代表剪切裂隙。

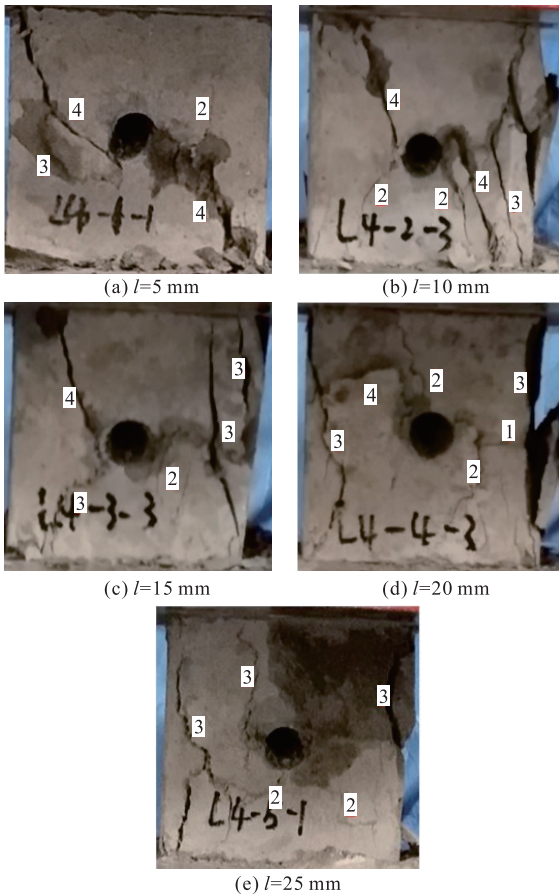


图 11 不同 l 时试样的试验破坏图

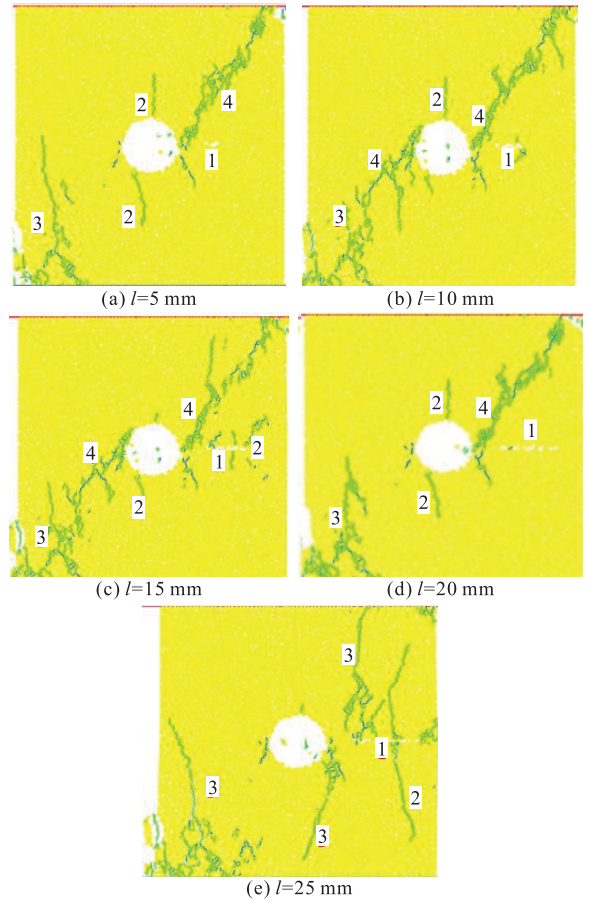


图 12 不同 l 时试样的数值模拟破坏图

由试验结果可知,当 l 较小时,孔洞的上方及预制裂隙端部首先产生次生裂隙,并沿着试件的对角方向发展;随着加载继续,孔洞的两侧产生剪切裂隙,试件的上下面处产生剪切裂隙,沿着近似于对角方向发展;最终裂隙贯通孔洞,形成贯穿裂隙,自由面剥落,试件的破坏模式以剪切破坏为主;当 l 较大时,试件的上下自由面处的拉伸裂隙沿近似加载方向发展,最终试件发生以张拉破坏为主的剪切和张拉混合破坏。

由数值模拟结果可知,孔洞的上下及预制裂隙端部首先产生次生裂隙;随着加载继续,次生裂隙沿着加载方向发展,试件的上下面处产生拉伸裂隙,孔洞的两侧产生剪切裂隙;当 l 较小时,试样主要发生剪切破坏,当 l 较大时,试样主要发生张剪破坏。

因此, l 的大小对试件主裂隙的发展和试件的破坏模式有所影响。

6 结论

(1) 当预制裂隙长度 $l = 20$ mm、预制裂隙与圆孔的距离 $m = 10$ mm,且 β 不同时,由试验得到的强

度值随裂隙倾角 i 的变化规律也不相同;保持 $\beta=i$ 、预制裂隙长度 l 不变时,由试验和数值模拟得到的抗压强度随 m 的变化规律并不固定;当 $\beta=i$ 、预制裂隙与圆孔距离 m 固定不变时,抗压强度的试验值和数值模拟值随 l 的增加基本呈逐渐减小的趋势。

(2) 预制裂隙倾角 i 的大小、预制裂隙至圆孔的距离 m 、预制裂隙 l 的大小对试件的主裂隙发展方向、破坏模式有影响;随着预制裂隙倾角的增加,试样由张拉破坏向由以剪切破坏为主的张剪破坏转变;随着 m 不断增大,试件的破坏模式由张剪破坏向剪切破坏转变。

本文的研究成果,可以为围岩含裂隙时的隧道支护提供指导,当裂隙的倾角、裂隙与隧道洞壁的距离、裂隙的长度不同时,隧道应该采取不同的支护方式。

参考文献

- [1] 周喻,刘冰,王莉,等.单轴压缩条件下含双圆孔类岩石试样力学特性的细观研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(11):2663-2671.
- [2] 黎崇金,李夕兵,李地元.含孔洞大理岩破坏特性的颗粒流分析[J].工程科学学报,2017,39(12):1791-1801.
- [3] 李地元,朱泉企,李夕兵.孔洞形状对大理岩渐进破坏力学特性影响研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(1):58-66.
- [4] 刘招伟,李元海.含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J].工程力学,2010,27(8):133-139.
- [5] 朱谭谭,靖洪文,苏海健,等.含双圆形孔洞砂岩单轴压缩力学特性试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(6):1047-1056.
- [6] 杜明瑞,靖洪文,苏海健,等.孔洞形状对砂岩强度及破坏特征的影响[J].工程力学,2016,33(7):190-196.
- [7] 朱泉企,李地元,李夕兵.含预制椭圆形孔洞大理岩变形破坏力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(S1):2724-2733.
- [8] 杨圣奇,刘相如,李玉寿.单轴压缩下含孔洞裂隙砂岩力学特性试验分析[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S2):3539-3546.
- [9] 杨圣奇,黄彦华.双孔洞裂隙砂岩裂纹扩展特征试验与颗粒流模拟[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(3):584-597.
- [10] 伍天华,周喻,王莉,等.单轴压缩条件下岩石孔-隙相互作用机制细观研究[J].岩土力学,2018,39(S2):463-472.
- [11] 朱谭谭,靖洪文,苏海健,等.孔洞-裂隙组合型缺陷砂岩力学特性试验研究[J].煤炭学报,2015,40(7):1518-1525.
- [12] 周军华,杨坤,房凯,等.裂隙对含孔洞砂岩力学及损伤演化特征的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(4):968-975.

作者简介: 丁尧(1986—),男,江苏东台人,硕士研究生,高级工程师,主要从事隧道工程、岩土工程设计与研究工作。

E-mail:mygod525@qq.com