

## 含预制单裂隙类砂岩的单轴压缩 PFC 数值模拟

薛茂林

成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610000

**[摘要]** 为了研究单裂隙类砂岩的压缩性能,文中使用 PFC2D 程序对含一定裂隙倾角  $\alpha$  和一定裂隙长度  $l$  的模型进行单轴压缩数值模拟,研究了  $\alpha$  和  $l$  对试样模型的抗压强度、弹性模量的影响。结果表明,裂隙的存在会使试样模型的力学性能降低。当  $l$  一定时, $\alpha$  从  $0^\circ$  增加到  $90^\circ$  时,试样模型的抗压强度和弹性模量呈现两端高(靠近  $90^\circ$  一端更高)、中间低的特征;当  $\alpha$  一定时,试样模型的抗压强度和弹性模量随裂隙长度  $l$  从  $0\text{cm}$  增加到  $6\text{cm}$  而减小。

**[关键词]** 颗粒流; 裂隙岩体; 裂隙倾角; 裂隙长度

DOI: 10.33142/aem.v3i9.4944

中图分类号: TU45

文献标识码: A

### PFC Numerical Simulation of Uniaxial Compression of Sandstone with Prefabricated Single Fracture

XUE Maolin

College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610000, China

**Abstract:** In order to study the compressibility of single fracture sandstone, PFC2D program is used to calculate the fracture dip angle  $\alpha$  And a model with a certain crack length  $L$  for uniaxial compression numerical simulation  $\alpha$  and  $L$  on the compressive strength and elastic modulus of the sample model. The results show that the existence of cracks will reduce the mechanical properties of the sample model. When  $L$  is certain, and  $\alpha$  is increasing from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ , the compressive strength and elastic modulus of the sample model show the characteristics of high at both ends (higher near the  $90^\circ$  end) and low in the middle; When  $\alpha$  is certain, the compressive strength and elastic modulus of the sample model decrease with the increase of crack length  $L$  from  $0\text{ cm}$  to  $6\text{ cm}$ .

**Keywords:** particle flow; fractured rock mass; fracture dip angle; crack length

### 引言

岩石在漫长的地质构造作用下会产生许多错综复杂的节理和裂隙等缺陷,这些节理裂隙的存在降低了岩体的力学性能,同时也给岩土工程实践带来许多困难。研究表明,裂隙岩体在外部荷载的作用下会经历新裂隙的起裂、裂隙的扩展以及裂隙的贯通等过程<sup>[1]</sup>。近年来随着工程建设规模的扩大,裂隙对岩体力学性能的影响成为了工程建设过程中不可避免的问题<sup>[2-5]</sup>。

研究裂隙岩体的变形破坏特征对工程岩体的设计十分重要,最直接的方法是将岩石加工成特定裂隙的标准岩石试样,并进行室内物理实验研究,比如郭奇峰等<sup>[6]</sup>、李银平等<sup>[7]</sup>对预制裂隙花岗岩试样进行单轴压缩试验,郭寿松等<sup>[8]</sup>、杨超等<sup>[9]</sup>对预制裂隙砂岩进行单轴压缩试验。但裂隙岩石试样的制作存在工艺复杂、耗费时间长、成岩率较低及成本高昂等特点。因此,也有许多研究者采用类岩石材料替代真实岩体开展裂隙岩石试样的单轴压缩试验<sup>[10-14]</sup>,其结果对裂隙岩体的力学性能和裂纹演化规律提供了一定的指导作用。

近年来,采用数值模拟来研究岩石的力学行为也成为一种研究岩石力学的重要方法,但数值模拟的准确性取决于数值模拟方法及模拟参数的选择。PFC 软件是基于离散元<sup>[15]</sup>进行开发的,在 PFC 模型中的颗粒通过接触黏结而紧紧聚集在一起,当这种颗粒间的黏结状态在外力作用下发生破坏并贯通整个模型,此时的外力即为模型的峰值应力值,贯通后的通道即为破坏时的裂纹扩展情况。如 ZHANG 等<sup>[16]</sup>、姜兆华等<sup>[17]</sup>基于 PFC2D,采用平行粘结模型对单裂纹类岩石材料进行单轴压缩试验。同时,我国许多优秀的岩土工作者,将 PFC 数值模拟应用在工程中,并在诸多工程领域取得了一定的成果<sup>[18-20]</sup>。

综上所述,在选择好合适的接触模型及标定好准确的参数情况下,采用二维颗粒流方法能更方便、更精确的对目标裂隙岩体进行单轴压缩数值模拟,从而得到目标裂隙岩体模型的单轴压缩力学性能,并最终为进一步探索工程岩体中裂隙岩体的失稳破坏规律提供一定参考价值。本文采用二维颗粒流软件(PFC2D)对不同裂隙倾角和裂隙长度的预制单裂隙类砂岩进行单轴压缩数值模拟,以研究不同裂隙倾角和裂隙长度对预制单裂隙类砂岩的抗压强度、弹性模量变化规律的影响。

## 1 含预制单裂隙试样模型的建立及参数的选择

### 1.1 含预制单裂隙试样模型的建立

本文采用在 Auto-CAD 中绘制与颗粒流程序中等比例大小的具有一定倾角的矩形区域，通过获取矩形区域的顶点坐标，然后将坐标输入至 PFC 数值模拟程序中，运行程序时会将矩形区域内的颗粒删除，以此建立含不同裂隙倾角和不同裂隙长度效果的单裂隙类砂岩试样数值模型，模型单轴压缩示意图，见图 1。在 PFC\_2D 中建立尺寸为 100mm×100mm 的正方形模型，在正方形内生成共 8202 个不同粒径的圆形颗粒。裂隙长度为 6mm 倾角为 40° 时的试样模型，见图 2。

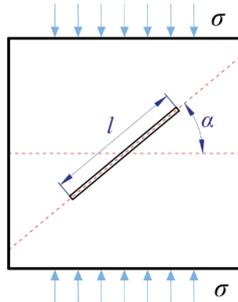


图 1 含预制单裂隙试样的单轴压缩示意图

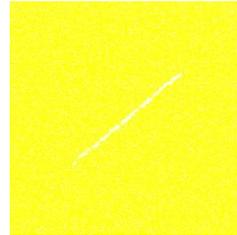


图 2  $l = 6\text{mm}$ ,  $\alpha = 40^\circ$  时的试样模型

在图 1 中， $\sigma$  表示轴向荷载， $\alpha$  表示裂隙倾角， $l$  表示裂隙长度，裂隙宽度设计为 1mm。 $\alpha$  从 0° 取到 90°，间距为 5°； $l$  从 0cm 取到 6cm，间距为 0.5cm。

数值模拟的具体过程为：

- (1) 通过 fish 语言生成四面墙，所围大小为 100mm×100mm 的正方形；
- (2) 在墙内生成粒径范围为 0.8mm~1.55mm 的不同大小的圆形颗粒；
- (3) 在 Auto-CAD 中绘制出宽度为 1mm 的不同倾角  $\alpha$  和不同长度  $l$  的矩形区域，并依次获取矩形区域的顶点的坐标；
- (4) 在 PFC\_2D 程序中导入矩形区域的顶点坐标，删除该区域内的颗粒，以此得到裂隙；
- (5) 运行程序，左右两侧墙体自动向外移开，同时轴向以 1mm/min 加载速率开始压缩，在应力为峰值强度的 80% 时自动结束程序，结束后保存试样破裂图和应力应变曲线。

### 1.2 含预制单裂隙试样模型参数的选择

PFC 程序（颗粒流方法）中颗粒是带有质量的圆饼状刚体，在模拟过程中不受形变量的限制，可有效的反映材料破坏的过程和结果，PFC 材料在接触处由相互接触的刚性球或簇组成，颗粒间相互作用的这种模型在本研究中定义为平行粘结模型（Parallel Bonded model），而试样模型的强度和破坏特征取决于模型的细观参数，即颗粒本身的大小、颗粒与颗粒之间的黏结情况等。本研究采用水泥：砂：水=1：2：0.6 的比例来制作完整的类砂岩试样，养护 28 天后进行室内单轴压缩试验。在对颗粒间的细观参数进行不断修改调试后，对完整类砂岩试样进行单轴压缩数值模拟，最终在应力应变曲线上得到了较为一致的结果。完整模型参数，见表 1；完整试样的试验和模拟应力应变对比，见图 3。

表 1 完整试样 PFC 模型的细观参数

最小粒径 /mm	最大粒径 /mm	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	法向黏结强度/MPa	切向黏结强度/MPa	弹性模量 E / GPa	刚度比 $(k_n/k_s)$	摩擦系数 $\mu$
0.8	1.55	2.06	21	21	1.4	1.0	1.2

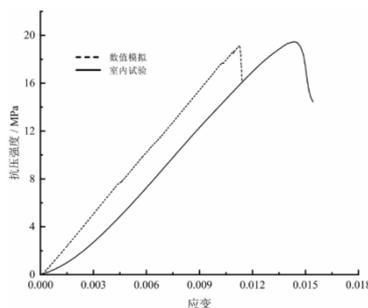


图 3 完整类砂岩试样的试验和数值模拟应力应变对比图

## 2 颗粒流数值模拟试验结果分析

### 2.1 应力-应变曲线结果分析

当  $l$  为 6cm, 不同裂隙倾角及完整类砂岩试样模型的单轴压缩应力-应变曲线, 见图 4。

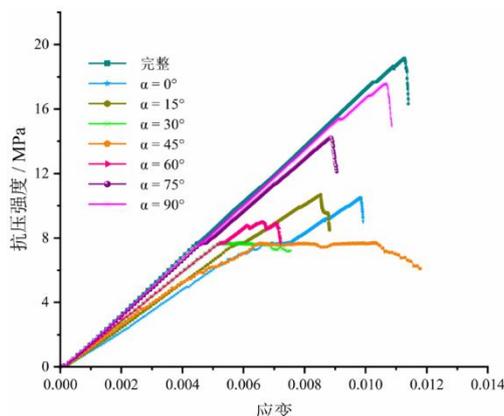


图 4 含不同裂隙倾角类砂岩试样模型的单轴压缩应力应变曲线图

从图 4 可以看出, 不同倾角预制裂隙单裂隙类砂岩模型的破坏模式基本相同, 即速度较快的弹性变形阶段、较缓慢的裂纹扩展阶段和快速的失稳破坏阶段。完整类砂岩试样模型的峰值应力水平最高, 裂隙倾角  $\alpha$  为  $75^\circ$ 、 $90^\circ$  时, 裂隙的存在对完整类砂岩试样模型应力的降低较少, 且在  $\alpha$  为  $90^\circ$  时, 单裂隙类砂岩试样模型的峰值应力最接近完整试样模型的峰值应力; 裂隙倾角  $\alpha$  为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$  时, 裂隙的存在对完整试样模型应力的降低较明显, 但其峰值应力相对高于裂隙倾角  $\alpha$  为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  时试样模型的峰值应力。

### 2.2 裂隙倾角和裂隙长度对试样模型强度和弹性模量的影响

当  $l$  取 6cm,  $\alpha$  从  $0^\circ$  增加到  $90^\circ$  时, 裂隙倾角对单裂隙类砂岩试样模型单轴抗压强度及弹性模量的影响见图 5, 其中弹性模量取应力为模型峰值应力的 50% 的点处应力与应变的比值。

从图 5 可以看出,  $\alpha$  从  $0^\circ$  增大到  $90^\circ$  时, 试样模型的抗压强度总体呈现两端高、中间低的特征, 裂隙模型倾角靠近  $0^\circ$  一侧的抗压强度整体小于倾角靠近  $90^\circ$  一侧的抗压强度, 并且弹性模量的变化规律与抗压强度的规律基本一致。

当  $\alpha$  取  $45^\circ$ ,  $l$  从 0cm 增加到 6cm 时, 裂隙长度对单裂隙类砂岩试样模型单轴抗压强度及弹性模量的影响, 见图 6。

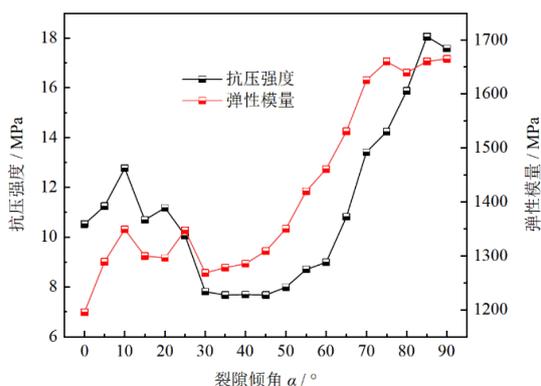


图 5 不同裂隙倾角试样模型的抗压强度图

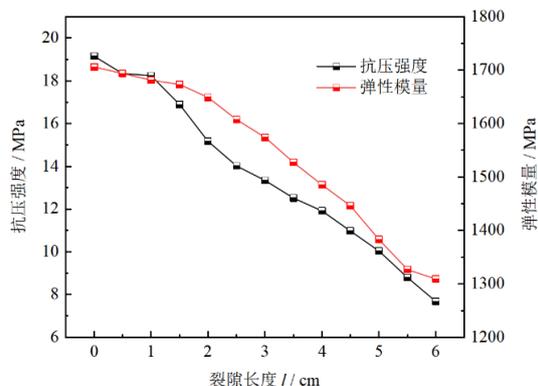


图 6 不同裂隙倾角试样模型的弹性模量图

从图 6 可以看出, 当  $\alpha$  取  $45^\circ$  时, 单裂隙类砂岩试样模型的抗压强度和弹性模量均随裂隙长度  $l$  从 0cm 增加到 6cm 而逐渐减小。

从图 6 可以很明显的看出: 试件为轴向受压, 当裂隙倾角一定时, 裂隙的水平投影随裂隙长度的增加而增加, 轴向受压长度相对也增加, 所以抗压强度和弹性模量会降低。对于图 5, 当裂隙长度一定, 裂隙倾角从  $0^\circ$  增加到  $90^\circ$ , 试样模型的抗压强度和弹性模量总体呈现一个增大的趋势这符合图 6 的机制分析, 但  $25^\circ$  到  $65^\circ$  区间的抗压强度和弹性模量却低于  $0^\circ$  到  $20^\circ$ , 出现这一现象的原因是: 完整类砂岩试样破坏时裂纹通常集中于右上与左下连线上, 因此裂隙岩体的室内试验和数值模拟中, 若一定倾角预制裂隙的位置接近完整类砂岩试样破坏时的裂纹形成的位置时, 裂

隙倾角比裂隙长度对抗压强度和弹性模量的影响更重要。

### 3 结论

单裂隙类砂岩试样模型的破坏过程基本相同,即速度较快的弹性变形阶段、较缓慢的裂纹扩展阶段和快速的失稳破坏阶段,完整类砂岩试样模型的抗压强度最高,裂隙的存在会使试模型的峰值应力降低。

当裂隙长度一定时,裂隙倾角从  $0^\circ$  增加到  $90^\circ$  时,单裂隙类砂岩试样模型的抗压强度和弹性模量总体呈现两端高、中间低的特征;当裂隙倾角一定时,单裂隙类砂岩试样模型的抗压强度和弹性模量随裂隙长度  $l$  从 0cm 增加到 6cm 而减小。

### [参考文献]

- [1] BRACE W F, BOMBOLAKIS E G. A note on brittle crack growth in compression[J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(12): 3709-3713.
- [2] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.
- [3] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1090-1113.
- [4] 余诗刚, 林鹏. 中国岩石工程若干进展与挑战[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 433-457.
- [5] 陈卫忠, 王鲁瑀, 谭贤君, 等. 裂隙岩体地下工程稳定性研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(10): 1945-1961.
- [6] 郭奇峰, 武旭, 蔡美峰, 等. 预制裂隙花岗岩的裂纹起裂机理试验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 476-483.
- [7] 李银平, 王元汉, 陈龙珠, 等. 含预制裂纹大理岩的压剪试验分析[J]. 岩土工程学报, 2004(1): 120-124.
- [8] 郭寿松. 单裂隙砂岩破坏特征和破裂演化规律试验[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 56-60.
- [9] 杨超, 陈燕华, 胡章新, 等. 张开穿透型单裂隙硬岩特征强度试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(1): 42-46.
- [10] 索永录, 屈慧升. 不同裂隙角度岩石相似试样力学特性及声发射特性研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(11): 54-57.
- [11] 唐建新, 孔令锐, 王艳磊, 代等. 裂隙倾角和长度对低强度岩体力学特性及破坏模式影响的试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(2): 85-92.
- [12] 易婷, 唐建新, 王艳磊. 裂隙倾角及数目对岩体强度和破坏模式的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 10-11.
- [13] 靳瑾, 曹平, 蒲成志. 预制裂隙几何参数对类岩材料破坏模式及强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(2): 529-535.
- [14] 汪子华, 熊良宵. 含单节理裂隙岩体的单轴压缩试验及数值模拟[J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(2): 81-85.
- [15] CUNDALL P A, STRACK O D L. A Discrete Numerical Mode For Granular Assemblies[J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [16] ZHANG X P, WONG L. Cracking Processes in Rock-Like Material Containing a Single Flaw Under Uniaxial Compression: A Numerical Study Based on Parallel Bonded-Particle Model Approach[J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, 45(5): 711-737.
- [17] 姜兆华, 林山泉. 单裂隙岩体单轴压缩颗粒流数值模拟[J]. 建筑结构, 2018, 48(2): 940-943.
- [18] 朱焕春. PFC 及其在矿山崩落开采研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(9): 1927-1931.
- [19] 周健, 王家全, 曾远, 等. 土坡稳定分析的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 86-90.
- [20] 汪成兵. 均质岩体中隧道围岩破坏过程的试验与数值模拟[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 103-108.
- 作者简介: 薛茂林 (1997-) 男, 硕士研究生, 主要从事裂隙岩体的力学性能研究等工作。