

## 含“T型”裂隙类岩石材料的单轴压缩试验与数值模拟

周涛

成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059

**[摘要]** 裂隙岩体是岩土工程领域研究的重点, 文中对含 T 型裂隙岩体进行一系列的单轴压缩试验及 PFC2D 数值模拟, 分析裂隙长度, 角度对岩体峰值强度的影响, 并对其在压缩过程的裂纹演化规律进行分析。本研究结果对裂隙岩体领域的研究具有重要的意义。

**[关键词]** 单轴压缩; 数值模拟; T 型裂隙

DOI: 10.33142/aem.v3i10.4981

中图分类号: TP31

文献标识码: A

## Uniaxial Compression Test and Numerical Simulation of Rock Material Containing "T-shaped" Fissures

ZHOU Tao

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059, China

**Abstract:** Fractured rock masses are the focus of research in the field of geotechnical engineering. This paper conducts a series of uniaxial compression tests and PFC2D numerical simulations on rock masses containing T-shaped fractures to analyze the effects of the length and angle of the fractures on the peak strength of the rock masses. The crack evolution law during the compression process is analyzed. The results of this study are of great significance to the research in the field of fractured rock masses.

**Keywords:** uniaxial compression; numerical simulation; T-shaped fracture

### 引言

随着我国基础建设的不断发展, 人为的工程地质活动对岩体稳定性的要求也越高。自然界的岩体大多存在裂隙, 裂隙的长度、倾角对岩体的力学特性有着很大影响。因此, 开展对含不同长度、倾角裂隙岩体的试验研究是具有重要意义。

目前, 学界对于裂隙岩体方面的研究已经有了诸多成果。在试验研究方面, 张亮等<sup>[1]</sup>对单裂隙岩体进行一系列单轴压缩试验, 探究其内在的能量演化机制。蒲诚等<sup>[2]</sup>对含非贯通裂隙岩体进行三轴压缩试验, 研究裂隙岩体的力学特性。刘新荣等<sup>[3]</sup>对 V 型相交裂隙岩体进行单轴压缩试验, 分析应力变化与裂纹演化规律。张国凯等<sup>[4]</sup>对含单裂隙的岩体进行了一系列单轴压缩试验, 并采取声发射测试, 探究岩体抗压强度变化与裂纹扩展规律。L. N. Y. W 等<sup>[5]</sup>利用单轴压缩试验, 研究了不同角度下单一裂隙的扩展试验, 得到了压缩过程中中拉裂隙及剪切裂隙的演化规律。Einstein 等<sup>[6]</sup>对含两条预制裂隙岩体试样进行单轴和双轴压缩试验, 研究了含预制锯齿状结构面岩体试样裂纹的扩展规律。在数值模拟方面, 吴钰等<sup>[7]</sup>对含单、双裂隙岩石进行一系列单轴压缩数值模拟试验, 分析裂隙岩体破坏特征及裂纹演化规律。张梅丽等<sup>[8]</sup>采用 RFPA2D 软件对含交叉裂隙岩体进行数值模拟, 以研究裂隙角度对岩体力学特性的影响。岳万又等<sup>[9]</sup>使用有限元分析软件对裂隙岩体进行双轴压缩数值模拟, 分析岩体在压缩过程中的应力变化。于辉等<sup>[10]</sup>基于对单裂隙岩体的 PFC2D 颗粒流数值模拟, 研究围压对岩体力学特征的影响。王国艳等<sup>[11]</sup>使用 RFPA 系统对相交裂隙岩体进行一系列单轴压缩数值模拟, 研究了岩体破坏后的裂纹走向。唐红梅等<sup>[12]</sup>采用 RFPA 数值模拟软件对裂隙岩体进行单轴压缩数值模拟, 并系统分析了不同倾角, 长度的初始裂隙对岩体力学性能及力学参数的影响。Zhu 等<sup>[13]</sup>使用 PFC 软件对岩石进行剪切数值模拟, 以研究地层对岩石剪切破坏机理的影响。Bahaaddini 等<sup>[14]</sup>采用 PFC2D 对节理岩石的剪切试验进行数值模拟, 研究节理长度对岩体剪切特性的影响。Zhao 等<sup>[15]</sup>使用 PFC 软件建立数值模型, 研究节理类型、数量对岩体机械特性的影响。

综上所述, 国内外学者在裂隙岩体领域已经有了诸多的研究成果, 但是目前对在实际岩土工程活动中经常出现的“T”型裂隙岩体的研究还少之又少, 本文通过对含不同长度, 不同角度的 T 型裂隙岩体进行单轴压缩试验, 并采用 PFC2D 软件进行数值模拟, 研究 T 型裂隙的长度和角度对岩体力学特性的影响。

## 1 试验准备

### 1.1 试验材料选取及试件制备

由于本文试验会使用大量试件，所以本文采用物理力学性能相近的类岩石材料来替代岩石材料，本文试件为尺寸  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$  的正方体。岩体中预制裂隙包含一条长度为  $2a$  的主裂隙和一条垂直于主裂隙且长度为  $a$  的次裂隙，其裂隙宽度  $d$  为  $1\text{mm}$ 。

### 1.2 试样制备及工况设计

试件采用标号为 325 的普通硅酸盐水泥，采用水灰比为 0.65 的水泥砂浆倒入固定尺寸模具浇筑而成。待水泥砂浆初凝后在按图 1 所示位置关系插入 PVC 塑料板，在模具中养护 24h 后拔出，形成 T 型裂隙，最后将试件放置于恒温环境中养护 28d 再取出使用。

本文试件如下图所示，主裂隙标号为 1，次裂隙标号为  $m$ 。T 型裂隙以 0 点为圆心顺时针方向旋转的角度为  $\beta$ 。

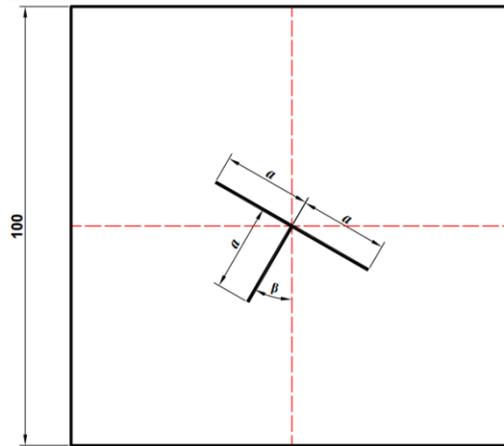


图 1 试件示意图

表 1 试验工况

| 工况 | $\beta / ^\circ$ | a/mm       |
|----|------------------|------------|
| 1  | 0                | 1, 2, 3, 4 |
| 2  | 30               | 1, 2, 3, 4 |
| 3  | 45               | 1, 2, 3, 4 |
| 4  | 60               | 1, 2, 3, 4 |
| 5  | 90               | 1, 2, 3, 4 |

## 2 室内试验结果分析

### 2.1 裂隙倾角对岩体峰值强度的影响

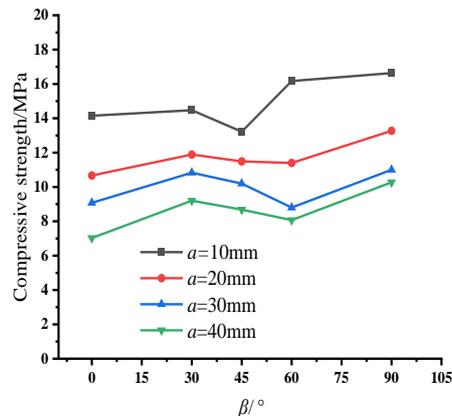


图 2 不同长度  $a$  随角度  $\beta$  变化的数值模拟

如图 2 所示, 图 2 中所有点都取自应力-应变曲线的峰值点, 可以看出, 随着倾角  $\beta$  从  $0^\circ$  增大到  $90^\circ$ , 含“T”裂隙岩体的抗压强度呈现先增大, 后减小再增大的变化趋势; 当倾角  $\beta = 90^\circ$  时, 裂隙岩体的峰值强度达到最大, 这是由于倾角  $\beta = 90^\circ$  时, 主裂隙与荷载方向重合, 次裂隙与荷载方向垂直, 裂隙岩体在受压破坏主要受拉伸应力,

### 2.2 裂隙长度对岩体峰值强度的影响

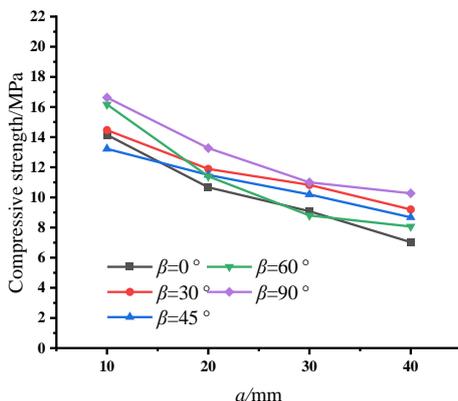
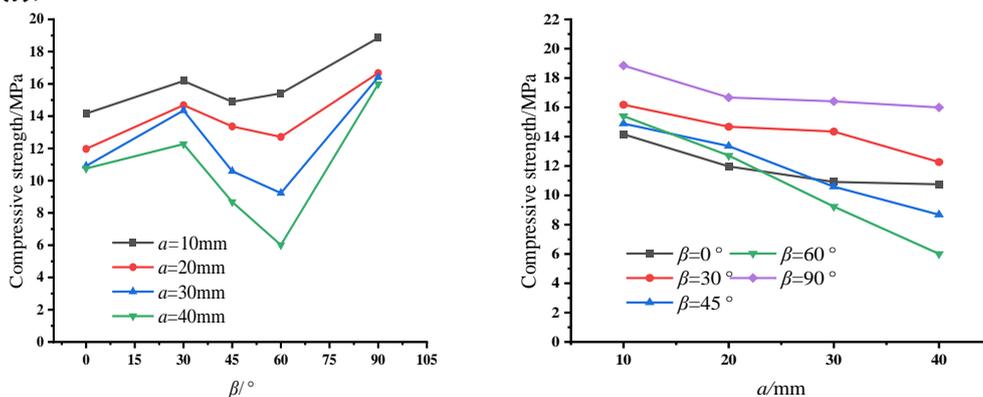


图 3 不同角度  $\beta$  随长度  $a$  变化的数值模拟

如图 3 所示, 随着倾角  $\beta$  从  $0^\circ$  增大到  $90^\circ$ , 裂隙岩体的峰值强度随裂隙长度  $a$  从 10mm 增大到 40mm 而呈现逐渐降低的变化趋势。由此可以看出, 裂隙长度的增加会使岩体的峰值强度降低。

### 3 数值模拟



(a) 不同长度  $a$  随角度  $\beta$  变化的数值模拟

(b) 不同角度  $\beta$  随长度  $a$  变化的数值模拟

图 4 数值模拟结果

如图 4, 图 5 所示, 裂隙岩体的峰值强度随着倾角  $\beta$  从  $0^\circ$  增大到  $90^\circ$  而呈现先增大后减小再增大的变化趋势, 随裂隙长度  $a$  从 10mm 增大到 40mm 而呈现逐渐降低的变化趋势。

可以看出, 数值模拟结果与室内试验结果变化趋势相同。

### 4 破坏特征分析

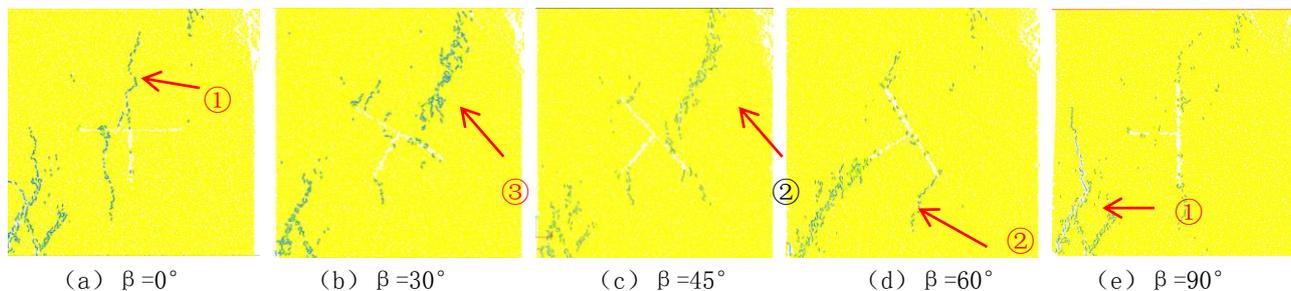


图 5 不同倾角裂隙岩体破坏图

图 5 为不同倾角裂隙岩体的单轴压缩破坏图, 如图所示, 裂隙岩体在单轴压缩过程中会产生破坏裂纹, 根据裂纹形成原因的不同将图中裂纹分为 3 类, 其中, 由张拉应力作用下产生的裂纹为张拉裂纹, 在图中标号为①; 由张拉应力与剪切应力共同作用下形成的裂纹为拉剪混合裂纹, 在图中标号为②; 由剪切应力作用下产生的裂纹为剪切裂纹, 在图中标号为③。可以看出, T 型裂隙岩体在压缩破坏后产生的裂纹主要为拉剪混合裂纹。

根据岩体中产生裂纹的类型, 可以把岩体压缩破坏模式分为以下三种

拉伸破坏: 这种破坏模式由拉伸裂纹扩展连接试样上下面形成拉伸贯通破裂面形成。破坏岩体中主要存在的裂纹是拉伸裂纹。拉剪破坏: 这种破坏模式是由拉剪混合裂纹扩展形成贯通破裂面形成, 破坏岩体中主要存在的裂纹的拉剪裂纹。剪切破坏: 这种破坏模式是由剪切裂纹扩展形成贯通破裂面形成, 一般由裂隙尖端产生剪切裂纹向下扩展贯通下边界形成贯通破裂面而发生破坏, 这种破坏模式为剪切破坏, 破坏岩体中主要存在的裂纹的剪切纹。

## 5 结束语

当裂隙长度一定时, T 型裂隙岩体的峰值强度随倾角  $\beta$  从  $0^\circ$  增大到  $90^\circ$  呈现先增大后减小再增大的变化特征; 当裂隙倾角一定时, T 型裂隙岩体的峰值强度随裂隙长度  $a$  从 10mm 增大到 40mm 而逐渐减小; T 型裂隙岩体在压缩破坏后产生的裂纹主要为拉剪混合裂纹, 主要破坏模式为拉剪破坏。

### [参考文献]

- [1] 张亮, 王桂林, 雷瑞德, 等. 单轴压缩下不同长度单裂隙岩体能量损伤演化机制[J]. 中国公路学报, 2021, 34(1): 24-34.
  - [2] 蒲诚, 刘奉银, 陈蕴生. 非贯通裂隙岩体试件峰后力学特性的研究[J]. 实验力学, 2020, 35(6): 1121-1128.
  - [3] 刘新荣, 尹志明, 王艳磊. 含 V 型相交裂隙岩体的力学特性及破坏模式试验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 651-659.
  - [4] 张国凯, 李海波, 王明洋, 等. 单裂隙花岗岩破坏强度及裂纹扩展特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(1): 2760-2771.
  - [5] WONG L N Y, EINSTEIN H H. Systematic evaluation of cracking behavior in specimens containing single flaws under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 239-249.
  - [6] ROBERT 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.
  - [7] 吴钰, 任旭华, 张继勋, 等. 含裂隙岩石单轴压缩数值试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(2): 35-41.
  - [8] 张梅丽, 梁正召, 高敏, 等. 含交叉裂隙岩体力学性质数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 758-769.
  - [9] 岳万友, 李建国, 柴修伟, 等. 地应力对含裂隙岩体爆破影响分析研究[J]. 爆破, 2021, 38(1): 51-57.
  - [10] 于辉, 刘少伟, 贾后省, 等. 不同围压下闭合单裂隙砂岩力学响应及能量耗散机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 385-393.
  - [11] 王国艳, 于广明, 袁长丰. 相交双裂隙岩石损伤断裂特征[J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 214-218.
  - [12] 唐红梅, 王平, 王林峰. 变化裂隙岩体的压缩破坏 RFA 数值模拟[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 103-110.
  - [13] Haeri H, Sarfarazi V, Zhu Z, et al. Numerical simulations of fracture shear test in anisotropy rocks with bedding layers[J]. Advances in Concrete Construction, 2019, 7(4): 241-247.
  - [14] Bahaaddini M, Hagan P C, Mitra R, et al. Scale effect on the shear behaviour of rock joints based on a numerical study[J]. Engineering Geology, 2014(181): 212-223.
  - [15] Zhao W, Huang R, Yan M. Mechanical and fracture behavior of rock mass with parallel concentrated joints with different dip angle and number based on PFC simulation[J]. Geomechanics & Engineering, 2015, 8(6): 757-767.
- 作者简介: 周涛 (1997. 12-) 男, 成都理工大学环境与土木工程学院土木工程专业。