doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202002011

基于 PFC 2D 的含节理岩体单轴压缩数值模拟

刘佳佳

(河南理工大学 土木工程学院,河南 焦作 454003)

摘要:基于颗粒流方法模拟含节理岩体的单轴压缩破坏过程,并对不同节理倾角的岩体进行单轴压缩数值模拟,研究不同节理倾角岩体的裂纹扩展路径、破坏形式以及强度变化规律。结果 表明:(1)在单轴压缩破坏过程中,岩体节理倾角不同,裂纹扩展与最终破坏形态不同,但破坏 过程基本一致;(2)当节理倾角从0°到90°的变化过程中,抗压强度随节理倾角的增大先减小后 增加,总体呈"U"型分布规律,并在倾角为60°时达最小值。

关键词:颗粒流;单轴压缩;节理;裂纹扩展

中图分类号:TU45 文献标志码:A 文章编号:1671-5322(2020)02-0053-05

岩体是一种广泛存在于自然界具有复杂地质 构造的地质体,常暴露于复杂多变的环境中[1], 因此,天然岩体常具有内部缺陷,导致岩石容易被 损坏。节理是岩体中没有或具有低抗拉强度的一 种不连续面,它的细微变化都可能导致工程岩体 失稳。因此,研究节理的变化对于探索岩体的强 度和稳定性具有重要意义。对于节理岩体的研 究,常用方法有物理试验法与数值模拟法。物理 试验虽能较为直观地反映出试验现象,但具有一 定的局限性与不确定性,因此,数值模拟逐渐成为 研究岩体力学的主流方法。王同旭^[2-3]等采用离 散单元法软件 UDEC 对含有节理岩体的巷道再生 顶板和地下洞室围岩进行稳定性分析与研究;王 辉^[4-5]等通过岩体破裂过程分析软件 RFPA 2D 对单裂隙不同分布的岩体进行单轴压缩数值模 拟:汪子华^[6-8]等通过 Flac 3D 软件对模型中的 裂隙节理采用空单元模拟,研究了不同节理倾角 对单轴抗压强度的影响。本文在现有研究基础 上,运用 PFC 2D 软件对不同节理面倾角的岩体 进行单轴压缩数值模拟。

1 颗粒流模拟方法及模型建立

1.1 颗粒流模拟方法

岩体工程领域中的诸多研究对象,如堆石坝、

堆积边坡、碎石垫层等,本质上都是由散体介质胶 结或者架空而成,通过颗粒介质材料承受并传递 上部荷载,这便使得近年来颗粒流方法在各类工 程中获得大量应用。

PFC(Particle Flow Code) 是一种基于离散单 元代码的软件,可以有效模拟介质开裂、分离等非 连续现象,用于模拟颗粒的运动和相互作用。模 型中的每个颗粒表示为一个实体,颗粒组合在一 起便可模拟变形多面体(多边形)颗粒。颗粒的 运动遵循牛顿运动定律,颗粒之间的接触是通过 软接触方法实现的^[9]。

1.2 节理岩体模型建立

节理岩体由岩石基质与节理组成,在所建的 PFC 模型中,分别采用黏结颗粒模型(Bonded Particle Model, BPM)与离散裂隙网络(Discrete Fracture Network, DFN)表征岩石基质与节理。由于 此时的"节理"不具有真实的节理性质,程序会识 别出模型中的节理,将其两侧一定范围内的颗粒 接触模型替换为光滑节理模型(Smooth Joint Model, SJM),从而形成准确表征节理岩体的颗粒 流模型^[10]。

在 PFC 2D 程序中,利用程序内置语言,建立 50 mm × 100 mm 的节理岩体模型,方法是:首先 生成4 道墙体,围成一个 50 mm × 100 mm 的矩

收稿日期:2019-12-06

作者简介:刘佳佳(1993一),女,河南太康人,硕士生,主要研究方向为岩土工程。

形,在该区域内随机生成服从均匀分布的10039 个颗粒,其半径范围为0.3~0.45 mm、密度为 2700 kg/m³、孔隙率为0.1;生成颗粒后,保留上下 两侧的墙体,删除左右两侧的墙体。

在建立的完整岩体模型基础上,利用上文提 到的 DFN 创建角度分别为 0°、15°、30°、45°、60°、 75°、90°的贯穿节理;在上部墙体和下部墙体施加 大小相等、方向相反的力,以实现岩体的单轴压缩 加载。图 1 为节理倾角为 0°的模型,图中上下两 粗的黑实线表示墙体,中间的浅细实线表示节理, 箭头表示施加力的方向。





2 节理岩体模型的细观参数标定

为了确定模型的参数,需要利用"插片法", 即事先将钢片放置在节理角度为0°的模具中,浇 入砂浆振荡后将钢片拔出,从而得到一条0°节 理、直径为50 mm、高度为100 mm的标准圆柱体 砂岩试样。试样经过标准养护后,再进行岩石单 轴压缩试验,得到物理试验的数据(表1试验部 分),并绘制应力应变曲线(图2虚线部分);将得 到的物理试验数据作为前面节理岩体模型参数标 定的基础,在 PFC 2D 中对岩体模型参数进行标 定,得到表1 的模拟部分数据;采用"试错法"在 PFC 2D 中确定模型的细观参数,如平行黏结模 量、颗粒刚度比、平行黏结法/切向强度、颗粒摩擦 系数等,以及光滑节理的细观力学参数,如法/切 向接触强度,摩擦系数与刚度比等,在"试错"的 过程中逐步得到与物理试验结果一致的模型细观 参数,并绘制应力应变曲线(图2实线部分),此时的模型细观参数如表2所示,节理相关参数如表3所示。

表 1 试验参数模拟对比表 Table 1 Simulation comparison table of test parameters

	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
试验	71.322	16.02	0.266
模拟	71.251	17.33	0.263



图 2 数值模拟与试验单轴压缩应力 – 应变图

Fig 2 Numerical simulation and test uniaxial compression stress-strain diagram

表 2 数值模拟细观参数

 Table 2
 Numerical simulation of meso parameters

细观参数	数值
平行黏结模量/GPa	9.0
颗粒法向切向刚度比	2.1
平行黏结法向强度/MPa	30.0
平行黏结切向强度/MPa	25.06
颗粒摩擦系数	0.5

表 3 光滑节理力学参数

Table 3 Mechanical parameters of smooth joints

力学参数	数值
法向接触强度/MPa	13.0
切向接触强度/MPa	53.0
摩擦系数	0.3
刚度比	1.0

3 数值模拟结果与分析

3.1 节理岩体破坏过程

节理倾角为60°的节理岩体模型破坏过程如 图3所示。由图3可知,加载初期未出现裂纹(图 3a);随着荷载的增加,节理两侧开始出现裂纹 (图3b);裂纹沿着垂直于节理的方向进一步扩展 (图 3c);当裂纹扩展到一定程度后,裂纹不仅继续沿着节理垂直方向扩展,而且在主应力方向出现裂纹并继续扩展(图 3d);随着加载的进行,裂纹不仅数量进一步增加,而且沿着主应力方向进一步扩展,直至破坏。裂纹最终破坏模式如图 3e 所示。



图 3 节理倾角为 60°的节理岩体模型破坏过程 Fig 3 Failure process of jointed rock mass model with joint dip angle of 60°

3.2 节理角度对裂纹扩展的影响

不同节理倾角的岩体最终破坏形态如图 4 所 示。由图 4 可知,所有裂纹都是最先沿节理萌生, 然后进一步地扩展与增加,直至破坏;不同的是, 在节理倾角为 0°与 90°时,岩体的最终破坏形态 与完整岩体的最终破坏形态十分接近(图 4a、图 4g 与图 4h),裂纹的整体发展趋势均为先垂直于 节理方向,然后向主应力方向扩展;节理倾角为 15°时,裂纹沿垂直节理方向向下部扩展直至贯 通,最终破坏;节理倾角为 30°与 45°时,裂纹向上 扩展明显,节理附近裂纹进一步增多,最后上部裂 纹贯通,岩体发生宏观破坏(图4c、图4d);节理 倾角为60°时,岩体裂纹扩展形态如3.1中描述; 节理倾角为75°时,岩体与完整岩体的最终破坏 形态在一定程度上接近,但在右上顶面和左下底 面出现不同程度的受压破坏,这是因为节理倾角 为75°时,裂纹最初产生在节理附近并开始扩展, 最后在上下两个面中贯穿,造成上下两面节理附 近出现大量裂纹。



图4 不同节理倾角的岩体最终破坏形态

Fig 4 The final failure form of rock mass with different joint inclination

在数值模拟试验过程中发现:(1)不同倾角 节理的岩体产生的裂纹主要为张拉型裂纹,而且 这张拉型裂纹在整个单轴压缩破坏过程中起重要 作用;(2)在应力达到峰值前产生的裂纹主要为 剪裂纹,峰值过后产生的裂纹主要为张拉裂纹; (3)切裂纹贯穿于张拉裂纹中。

3.3 节理倾角对岩体强度的影响

经过对不同节理倾角的岩体进行数值模拟, 得到图 5 所示的不同倾角岩体的应力 – 应变曲线 和图 6 所示的单轴抗压强度 – 节理倾角曲线。







由图 5 可知,不论节理角度有何不同,岩体的 破坏过程都基本一致。结合 PFC 2D 程序,可得 知该破坏过程规律如下:在裂纹产生之前,岩体经 历了弹性变形阶段,该阶段的岩体内部颗粒不断 压密,应力 - 应变曲线为线性;当裂纹开始出现并 稳定扩展时,应力 - 应变曲线出现轻度的非线性 式上升,此阶段的裂纹较少,发展缓慢;当裂纹迅 速扩展并逐渐贯通,直至岩体破坏时,与此对应的 应力 - 应变曲线将达到峰值并出现明显骤降。

由图 6 可知:岩体的抗压强度受节理影响,节 理的倾角不同岩体的抗压强度也不同,总体规律 是单轴抗压强度整体上随着倾角的增加呈先减小 后增加的趋势,即节理倾角从 0°到 45°增大过程 中,节理岩体强度变化不大,只是略有降低;当节 理倾角从 45°增大到 60°的过程中,节理岩体抗压 强度急剧降低至最小值;节理倾角继续增大至 90°时,抗压强度开始增大,整体呈"U"型分布规 律。与节理倾角为 0°、15°、30°、45°、60°、75°与 90°对应的节理岩体抗压强度分别为 71.3 MPa、 69.5 MPa、68.2 MPa、68.5 MPa、55.0 MPa、67.5 MPa 与 69.8 MPa。

4 结论

通过对含有不同倾角节理的岩体进行 PFC 2D 单轴压缩数值模拟,得到如下结论:

(1)节理的存在对岩体的力学性能有一定的 影响,含节理的岩体强度小于完整岩体的强度;

(2)含节理岩体单轴压缩过程中,裂纹在节 理处萌生,先沿垂直节理方向发展,最终沿垂直方 向扩展直至破坏;

(3)岩体节理倾角不同,但破坏的过程相似, 其应力-应变曲线趋势基本一致;

(3) 抗压强度与节理倾角有关,在节理倾角 从 0°到 90°的变化过程中,抗压强度呈先减小后 增加的趋势,整体呈"U"型分布规律。

参考文献:

- [1] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M].2 版. 北京:科学出版社,2013.
- [2] 王同旭,马文强,曲孔典.随机节理岩体巷道再生顶板失稳机理与控制研究[J].采矿与安全工程学报,2016,33(2): 265-270.
- [3] 任文明,崔炜,张安,等. 离散单元法在地下洞室围岩稳定性分析中的应用研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9 (S2):1916-1921.
- [4] 王辉,高召宁,孟祥瑞,等. 单裂隙岩石在单轴压缩下破坏的数值模拟[J]. 煤矿安全,2015,46(1):29-32.
- [5] 李硕. 预制裂纹类岩石材料的岩桥贯通特性研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2018.
- [6] 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.
- [7] 刘小刚,张艺山,于志方.基于 FLAC3D 的层状岩石强度特征研究[J].矿冶工程,2018,38(6):39-43.
- [8] 王小平,姜天洪. 基于 FLAC3D 的页岩单轴压缩数值模拟研究[J]. 山东交通科技,2018(6):99-101.
- [9] 石崇,张强,王盛年.颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [10] 王晓卿,康红普,高富强,等.大尺寸节理煤体单轴压缩力学行为的离散元模拟研究[J].煤炭学报,2018,43(11): 3088-3097.

Numerical Simulation of Uniaxial Compression of Jointed Rock Mass Based on PFC 2D

LIU Jiajia

(School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China)

Abstract: Based on the particle flow method, the uniaxial compression failure process of jointed rock mass is simulated, and the numerical simulation of uniaxial compression is carried out for rock mass with different joint obliquity to study the crack propagation path, failure mode and strength change rule of rock mass with different joint obliquity. The results show that: (1) in the process of uniaxial compression failure, the joint obliquity of rock mass is different, the crack growth and the final failure form are different, but the failure process is basically the same; (2) when the joint obliquity changes from 0° to 90° , the compressive strength decreases first and then increases with the increase of joint obliquity, which shows the "U" type distribution law, and reaches the minimum value when the obliquity is 60° .

Keywords: particle flow; uniaxial compression; joint; crack propagation

(责任编辑:张英健)