

引用格式:沈宝堂,张步初,张士川,等.FRACOD 模拟软件在岩石工程中的应用及案例分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(2):44-52.

SHEN Baotang,ZHANG Buchu,ZHANG Shichuan,et al.Application and verification of FRACOD in rock engineering[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2020,39(2):44-52.

FRACOD 模拟软件在岩石工程中的应用及案例分析

沈宝堂^{1,2},张步初¹,张士川¹,陈 兵¹

(1.山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地,山东 青岛 266590;

2.澳大利亚联邦科学院能源部 昆士兰先进技术中心,澳大利亚 昆士兰州 布里斯班 4069)

摘 要:岩土工程领域中岩石作为力传播媒介在地下工程中起着至关重要的作用,掌握工程扰动过程中岩石裂纹扩展规律及破坏特征有助于揭示相关灾害发生机理,为防治灾难发生提供研究基础。为此,基于岩石断裂力学理论和位移不连续数值模拟理论,提出能够同时预测拉伸和剪切裂纹传播的 F-准则,研发了能够模拟岩石混合裂纹扩展的 FRACOD 软件。首先从理论背景层面对 FRACOD 裂纹扩展模拟软件进行了详细的介绍,软件采用间接边界元-位移非连续法,并引入裂纹扩展 F-准则及 Mohr-Coulomb 裂纹起裂准则用以模拟岩石混合裂纹扩展规律及应力场、位移场等物理场的分布规律。为验证该软件在众多工程领域的适用性,进行了地热开发钻孔破裂、岩石力学双轴压缩试验、水压致裂等三个模拟案例的对比分析。通过对模拟试验结果与室内试验或现场观测结果的对比发现,FRACOD 不仅可以准确模拟岩石的裂纹扩展规律及岩体破坏特征,同时适用于涉及岩体断裂损伤的多个工程领域。因此,FRACOD 研发与应用为岩石工程设计和研究提供了重要的研究工具,对岩体断裂损伤学科的发展具有重要的指导意义和参考价值。

关键词:岩石断裂力学;FRACOD;F-准则;裂纹扩展;岩石工程

中图分类号:TU458

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2020)02-0044-09

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.02.005

Application and verification of FRACOD in rock engineering

SHEN Baotang^{1,2}, ZHANG Buchu¹, ZHANG Shichuan¹, CHEN Bing¹

(1.State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2.CSIRO Energy, Queensland Centre for Advanced Technologies, Brisbane, Queensland 4069, Australia)

Abstract: In the field of geotechnical engineering, rock as the propagation medium plays a crucial role in underground engineering. Understanding the propagation principle and failure characteristics of rock fracture in the process of engineering disturbance helps to reveal the initiation mechanisms of relevant disasters and provide the basis for disaster prevention research. In this paper, a F-criterion capable of predicating tensile and shear cracks simul-

收稿日期:2019-07-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51974173);山东省重点研发计划项目(GG201809120056);泰山学者优势特色学科人才团队支持计划项目

作者简介:沈宝堂(1964—),男,河北河间人,教授,博士生导师,主要从事岩石力学方面的教学与研究工作。

E-mail:Baotan_Shen@csiro.cn

张士川(1989—),男,山东济宁人,讲师,主要从事耦合断裂力学方面的研究工作,本文通信作者。

E-mail:zsc373260186@sdust.edu.cn

taneously proposed based on rock fracture mechanics and displacement discontinuity numerical simulation. In addition the modelling software FRACOD for predicting mixed mode rock fracture propagation was developed. The theoretical background of FRACOD was firstly described in detail. The indirect boundary element and displacement discontinuity method was adopted. F-criterion for fracture propagation and Mohr-Coulomb criterion for fracture initiation were introduced to simulate the mixed mode fracture initiation and propagation in rocks as well as the distribution of stress field, displacement field and physical field. In order to verify the applicability of the software in various engineering fields, the examples of borehole breakout, biaxial compressive test and hydraulic fracturing were carried out. The comparison between the simulation results with those of laboratory tests and field observations reveals that not only FRACOD can accurately simulate the complex fracture propagation and failure characteristics of rocks, but it also can be applied to many engineering fields involving the fracture and damage of rock mass. Therefore, by providing an important numerical tool in rock engineering design and research, the development and application of FRACOD has important guiding significance and reference value for the development of the discipline of rock mass fracture and damage.

Key words: rock fracture mechanics; FRACOD; F-criterion; fracture propagation; rock engineering

岩石断裂力学作为岩石力学及断裂力学的分支,近几年得到迅速发展,在基础研究及岩石工程设计等领域中得到了较为广泛的关注。随着岩石断裂力学涉及到更广、更具挑战性的领域(如深部开采、核废料地质储存、地热开发等),其扮演的角色显得更为重要。因此,岩石断裂力学的研究将是未来几年甚至几十年的热门课题。

目前阶段,室内岩石试验、数值模拟是岩石断裂力学的主要研究方法。室内岩石力学实验由于其可以直观展示裂纹的扩展及传播,因此得到广泛的应用。然而,受到岩石试样离散性的影响,室内试验结果往往存在较大偏差,数值模拟可以很好地解决该问题,同时,数值模拟可以有效展现裂纹扩展不同时刻内位移场、应力场和渗流场的分布特征,故数值模拟软件作为研究岩石断裂力学的手段逐步受到青睐。近年来,众多模拟固体断裂的数值软件应运而生。但大多数模拟软件是为土木工程和材料科学需求而开发的,并主要用于解决钢、陶瓷、玻璃等材料的裂纹扩展问题。显然这些材料在断裂性能上与岩石有着本质的差别。而且现有的模拟岩石裂纹扩展软件无法模拟剪切裂纹和混合裂纹的扩展。因此,急需开发一种可以模拟岩石混合裂纹(I型、II型、I+II型)扩展的软件。

为满足模拟岩石混合裂纹的需要,Shen等^[1-3]基于岩石断裂力学原理及F准则,开发了一种能够模拟岩石混合裂纹扩展的软件,为相关领域的研究提供了一种新的手段。Barton等^[4]基于FRACOD^{2D}软件,分别研究了完整岩石、含一组节理岩石、含两组节理岩石的裂纹扩展模式;Jung等^[5]借助FRACOD进行了花岗岩巴西劈裂试验,测定了亚临界状态裂纹增长指数,并借助声发射事件数定量描述了裂纹数量;Li等^[6]以FRACOD为手段,研究了脆性岩石的裂纹扩展过程及破坏特征;Shen等^[7]利用FRACOD^{2D}模拟了各向异性岩石的裂纹扩展规律,对岩石工程具有重要的指导意义;Zhang等^[8]通过FRACOD模拟结果与物理试验结果之间的对比,成功验证了FRACOD模拟钻孔泄压具有可行性;Siren等^[9]通过FRACOD对岩石破坏前的声发射特征进行预测,并将预测结果与实际观测的声发射特征进行了比较。

以上学者通过室内试验、理论分析等手段成功验证了FRACOD软件在相关领域的可行性。为进一步验证该模拟软件在岩石裂纹扩展领域的广泛适用性,本研究首先从理论基础方面对FRACOD模拟软件的工作原理进行了详细介绍,然后对三个应用案例进行模拟验证分析,相关结果对岩石工程设计领域发展具有重要的指导意义和参考价值。

1 FRACOD 理论背景

FRACOD本质上属于边界元方法,遵循边界元原则。具体而言,其采用了间接边界元的位移非连续法。FRACOD以岩石断裂力学理论和F准则为理论基础,对岩石混合裂纹扩展进行模拟。

1.1 基于位移不连续理论的岩石破裂模拟概况

假设无限弹性体X-Y平面中有一恒定的位移不连续直线单元,除该部分外,位移处处连续。直线段在

x 轴上 $|X| \leq a, y=0$, 假设其为线性裂纹, 定义其中一个面为 $y=0$ 的正面, 表示为 $y=0_+$, 另一个为负面, 表示为 $y=0_-$, 在从裂纹一个面移动到另一个面的过程中, 位移会产生恒定变化值 $D_i = (D_x, D_y)$ 。定义 D_i 作为两边位移差:

$$\begin{cases} D_x = u_x(x, 0_-) - u_x(x, 0_+), \\ D_y = u_y(x, 0_-) - u_y(x, 0_+). \end{cases} \quad (1)$$

u_x 和 u_y 沿 x 轴正方向, 则 D_x 和 D_y 为正, 如图 1 所示, 应力和位移可表示为

$$\begin{cases} u_x = D_x [2(1-\nu)f_{,y} - yf_{,xx}] + D_y [-(1-2\nu)f_{,y} - yf_{,xy}], \\ u_y = D_x [(1-2\nu)f_{,x} - yf_{,xy}] + D_y [2(1-\nu)f_{,y} - yf_{,yy}], \\ \sigma_{xx} = 2GD_x [2f_{,xy} + yf_{,xxy}] + 2GD_y [f_{,yy} + yf_{,yyy}], \\ \sigma_{yy} = 2GD_x [-yf_{,xy}] + 2GD_y [f_{,yy} - yf_{,yyy}], \\ \sigma_{xy} = 2GD_x [f_{,yy} + yf_{,yyy}] + 2GD_y [-yf_{,xy}]. \end{cases} \quad (2)$$

其中, $f_{,x}, f_{,y}, f_{,xy}, f_{,xxy}$ 表示函数 $f(x, y)$ 相关导数, 则:

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi(\nu-1)} \left[y \left(\arctan \frac{y}{x-a} - \arctan \frac{y}{x+a} \right) \right] + (a-x) \ln \sqrt{[(x-a)^2 + y^2]} + (x+a) \ln \sqrt{[(x+a)^2 + y^2]}. \quad (3)$$

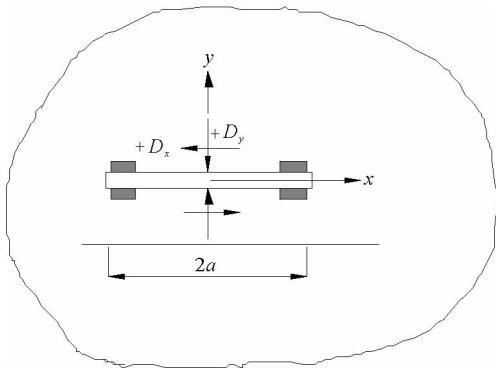


图 1 非连续位移分量^[10]

Fig. 1 Constant displacement discontinuity components^[10]

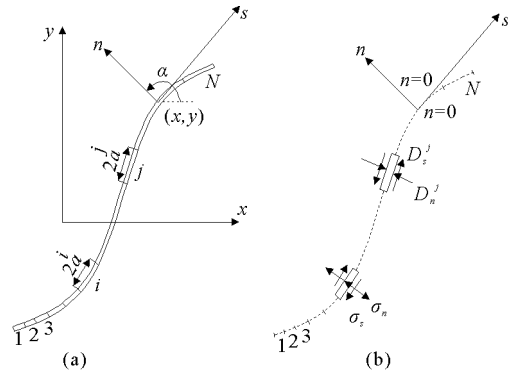


图 2 裂纹单元体形式^[10]

Fig. 2 Representation of a crack by elemental displacement discontinuities^[10]

对于任意形状的裂纹, 假定其可以通过 N 个首尾相连的直线段单元组成, X - Y 平面内单元分布如图 2 所示。如果裂纹表面受到应力作用, 相邻裂纹面之间将会产生相对位移。位移非连续边界元采用离散逼近方法来解决光滑分布相对位移问题, 裂纹被分为 N 个部分, 每个部分作为一个边界单元, 表示一个非连续单元位移, 如图 2 所示。 s, n 分别代表位移剪切方向与位移法线方向。图 2 中描述了裂纹第 j 个单元的不连续位移, 此单元 s, n 方向的位移分量分别用 D_s^j 和 D_n^j 表示, 则:

$$\begin{cases} D_s^j = u_s^{j-} - u_s^{j+}, \\ D_n^j = u_n^{j-} - u_n^{j+}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: u_s^j 为第 j 个单元剪切位移, u_n^j 为第 j 个单元法向位移, 上标 +、- 分别代表裂纹正面与负面。无论是考虑裂纹正面还是负面, u_s^j, u_n^j 在 s, n 正方向为正。由式(4)可知, 若两个裂纹面相向移动, 则 D_n^j 为正; 同样, 裂纹正面相对于负面向左移动, 则 D_s^j 为正。所有单元对图 2(b) 第 i 个单元的中点所造成的的累计剪切应力与法向应力为:

$$\begin{cases} \sigma_s^i = \sum_{j=1}^N A_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{sn}^{ij} D_n^j, \\ \sigma_n^i = \sum_{j=1}^N A_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{nn}^{ij} D_n^j, \\ u_s^i = \sum_{j=1}^N B_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N B_{sn}^{ij} D_n^j, \\ u_n^i = \sum_{j=1}^N B_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N B_{nn}^{ij} D_n^j, \end{cases} \quad i=1,2,3,\dots,N. \quad (5)$$

式中: A_{ss} —应力边界影响系数, B_{ss} —位移边界影响系数, σ_s^i —第 j 个单元剪切应力, σ_n^i —第 j 个单元法向应力。

岩体的非连续可分为三个阶段,根据裂纹剪切应力与法向应力不同,不同阶段可表示为:

1) 张开裂纹: $\sigma_s^i = \sigma_n^i = 0$, 控制方程为:

$$\begin{cases} \sigma_s^i = 0 = \sum_{j=1}^N A_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{sn}^{ij} D_n^j - (\sigma_s^i)_0, \\ \sigma_n^i = 0 = \sum_{j=1}^N A_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{nn}^{ij} D_n^j - (\sigma_n^i)_0, \end{cases} \quad i=1,2,3,\dots,N. \quad (6)$$

2) 弹性破裂: σ_s^i 和 σ_n^i 由节理刚度和非连续位移 (D_s^i 、 D_n^i) 决定。

$$\begin{cases} \sigma_s^i = K_s D_s^i, \\ \sigma_n^i = K_n D_n^i. \end{cases} \quad (7)$$

式中: K_s 和 K_n 为节理剪切刚度与法向刚度, 将式(7)代入式(6)得:

$$\begin{cases} 0 = \sum_{j=1}^N A_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{sn}^{ij} D_n^j - (\sigma_s^i)_0 - K_s D_s^i, \\ 0 = \sum_{j=1}^N A_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{nn}^{ij} D_n^j - (\sigma_n^i)_0 - K_n D_n^i, \end{cases} \quad i=1,2,3,\dots,N. \quad (8)$$

3) 裂纹滑动破裂:

$$\begin{cases} \sigma_s^i = c \pm K_n D_n^i \tan \theta, \\ \sigma_n^i = K_n D_n^i. \end{cases} \quad (9)$$

式中: θ —裂纹内摩擦角; c —粘聚力, 滑动后 $c=0$ 。将式(9)代入式(6)得:

$$\begin{cases} 0 = \sum_{j=1}^N A_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{sn}^{ij} D_n^j - (\sigma_s^i)_0 \pm K_s D_s^i \tan \theta, \\ 0 = \sum_{j=1}^N A_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_{j=1}^N A_{nn}^{ij} D_n^j - (\sigma_n^i)_0 - K_n D_n^i, \end{cases} \quad i=1,2,3,\dots,N. \quad (10)$$

每个裂纹单元的状态均可通过 Mohr-Coulomb 破裂准则进行判定:

- 1) 张开节理: $\sigma_n > 0$;
- 2) 弹性节理: $\sigma_n < 0$, $|\sigma_s| < c + |\sigma_n| \tan \theta$;
- 3) 剪切节理: $\sigma_n < 0$, $|\sigma_s| \geq c + |\sigma_n| \tan \theta$ 。

1.2 基于应力释放率的 F 准则及 FRACOD

Shen 等^[10-11]提出了基于最大应变能释放率的 F-准则来预测裂纹传播。F-准则将裂纹尖端应变能释放率分为两部分: Mode I 和 Mode II, 二者之和决定裂纹起裂及传播方向。假设裂纹在任意方向传播一个单位长度, 新裂纹为张开裂纹, 没有任何剪切错动, 则应变能损失为 G_I ; 同理, 新裂纹若只有剪切错动, 没有张开裂纹, 则应变能损失为 G_{II} , 那么 F-准则可表示为:

$$F(\theta) = \frac{G_I(\theta)}{G_{IC}} + \frac{G_{II}(\theta)}{G_{IIC}}, \quad (11)$$

$$F(\theta) \big|_{\theta=\theta_0} = \max, \quad (12)$$

$$F(\theta) \big|_{\theta=\theta_0} = 1.0. \quad (13)$$

式(11)中, $G_I(\theta)$ 和 $G_{II}(\theta)$ 为最大应变能释放率, G_{Ic} 和 G_{IIc} 为材料强度参数。式(12)中, 当 $\theta = \theta_0$ 时, F 为最大值, 则 θ_0 为裂纹传播方向; 式(13)中当 F 值为 1.0 时, 裂纹开始起裂并扩展。

线弹性体中应变能

$$W = \iiint_V \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV, \quad (14)$$

式中: σ_{ij} —应力张量; ε_{ij} —应变张量。应变能可通过边界处的应力应变进行计算:

$$W = \frac{1}{2} \int_s (\sigma_s u_s + \sigma_n u_n) ds. \quad (15)$$

式中: σ_s —弹性体边界处的切向应力; σ_n —弹性体边界处的法向应力; u_s —弹性体边界处的切向位移; u_n —弹性体边界处的法向位移。将式(15)代入受远场法向应力与剪切应力的无限体裂纹系统中得:

$$W = \frac{1}{2} \int_0^a [(\sigma_s - (\sigma_s)_0) D_s + (\sigma_n - (\sigma_n)_0) D_n] da. \quad (16)$$

式中: a —裂纹长度; D_s —裂纹剪切非连续位移; D_n —裂纹法向非连续位移。利用位移非连续边界元进行计算, 应变能亦可以表示为:

$$W \approx \frac{1}{2} \sum_i (a(\sigma_s - (\sigma_s)_0) D_s + a(\sigma_n - (\sigma_n)_0) D_n). \quad (17)$$

G 的预测值为:

$$G(\theta) = \frac{\partial W}{\partial a} \approx \frac{[W(a + \Delta a) - W(a)]}{\Delta a}. \quad (18)$$

式中: $W(a)$ —原始裂纹应变能; $W(a + \Delta a)$ —裂纹扩展后应变能, Δa 为裂纹尖端沿 θ 方向次生裂纹扩展的距离, 如图 3 所示。

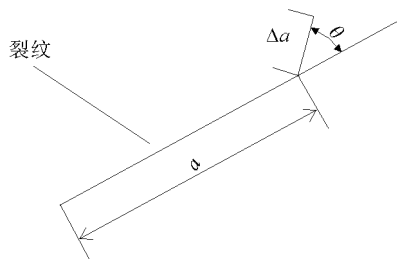


图 3 裂纹尖端扩展^[10]

Fig. 3 Fictitious crack increment^[10]

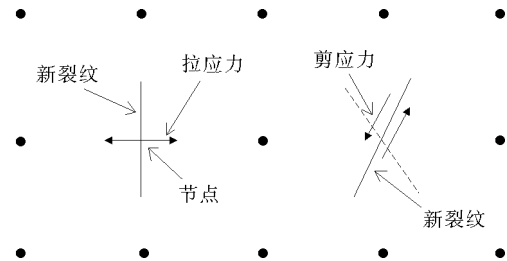


图 4 完整岩石拉伸或剪切裂纹起裂^[10]

Fig. 4 Fracture initiation in intact rock^[10]

Shen 等^[10]结合位移非连续边界元与 F-准则开发了岩石混合裂纹扩展软件 FRACOD。初始岩体假设为无损伤、各向同性的均质介质, 但局部可破裂产生新的裂纹。完整岩石的破裂可通过 Mohr-Coulomb 准则、Hoek-Brown 准则等进行预测。如图 4 所示, 当岩石某点拉伸应力大于其拉伸强度时, 则拉伸裂纹开始起裂。

$$\sigma_{\text{tensile}} \geq \sigma_t; \theta_{it} = \theta(\sigma_{\text{tensile}}) + \frac{\pi}{2}. \quad (19)$$

式中: σ_{tensile} —某点的拉伸应力; σ_t —完整岩石的拉伸强度; θ_{it} —拉伸裂纹起裂方向; $\theta(\sigma_{\text{tensile}})$ —拉伸应力方向。裂纹起裂长度由完整岩石内网格尺寸所决定。

对于剪切裂纹, 当某点剪切应力大于其剪切强度, 则剪切裂纹开始形成。

$$\sigma_{\text{shear}} \geq \sigma_n \tan(\theta) + c; \theta_{is} = \frac{\theta}{2} + \frac{\pi}{4}. \quad (20)$$

式中: σ_{shear} — θ_{is} 方向的剪切应力; σ_n —剪切破坏面上的正应力; θ —内摩擦角; c —内聚力; θ_{is} —最小剪切阻力方向,也是潜在剪切破坏面。裂纹扩展长度由完整岩石内网格尺寸所决定。

2 工程应用案例分析

FRACOD 研发的最终目的是为模拟实际工程中出现的断裂损伤、裂纹扩展等问题。近年来,FRACOD 在钻孔破裂、矿柱剥落、水压致裂、巷道及竖井的稳定性等^[9,12-17]方面得到了广泛应用。为验证 FRACOD 在岩石工程设计领域的可行性,对岩石力学双轴压缩试验、地热开发钻孔破裂、水压致裂等三个案例进行模拟验证分析。

2.1 模拟双轴压缩试验

地下工程施工过程中,如煤层开采、巷道开挖和隧道掘进等,施工周围岩体常处于双向受力状态,周围岩体的承载能力较三向受力状态明显下降,一旦失稳,将会带来灾难性的后果,严重威胁着施工人员的生命安全。因此,有必要对施工周围岩体的强度变化及裂纹扩展规律进行分析。根据前面对 FRACOD 理论基础分析可知,FRACOD 可用于模拟双轴压缩试验。故采用 FRACOD 模拟双轴压缩过程中岩体的轴向应力变化及裂纹扩展规律。同时,为验证该模拟结果的准确性,将模拟结果与室内试验结果进行对比验证。

试验采用的试样长度为 120 mm,宽度为 60 mm。为模拟非润滑接触条件(强摩擦),试验过程中,限制了试样顶部和底部边界的水平移动。试样的顶部和底部边界分别施加了垂直压缩位移,侧边界施加 10 MPa 的约束应力。在每一步的计算中,增加竖直相对位移 0.01 mm,直至试样破坏为止。根据前期试验经验^[20],假定本次试验完整岩样的弹性模量为 60 GPa,泊松比为 0.25,内聚力为 38 MPa,内摩擦角为 30° ,拉应力为 13.4 MPa。I 型和 II 型裂纹断裂韧度值分别为 $1.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 和 $3.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

本次模拟采用了 Mohr-Coulomb 强度准则及随机裂纹起裂函数,并且将初始起裂应力水平设定为岩石强度的 50%。模拟试验加载过程中裂纹起裂和扩展的预测过程如图 5 所示。

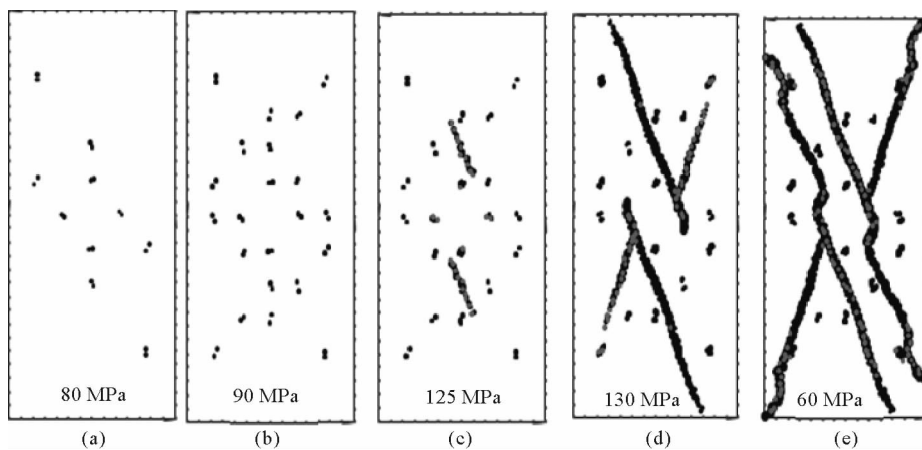
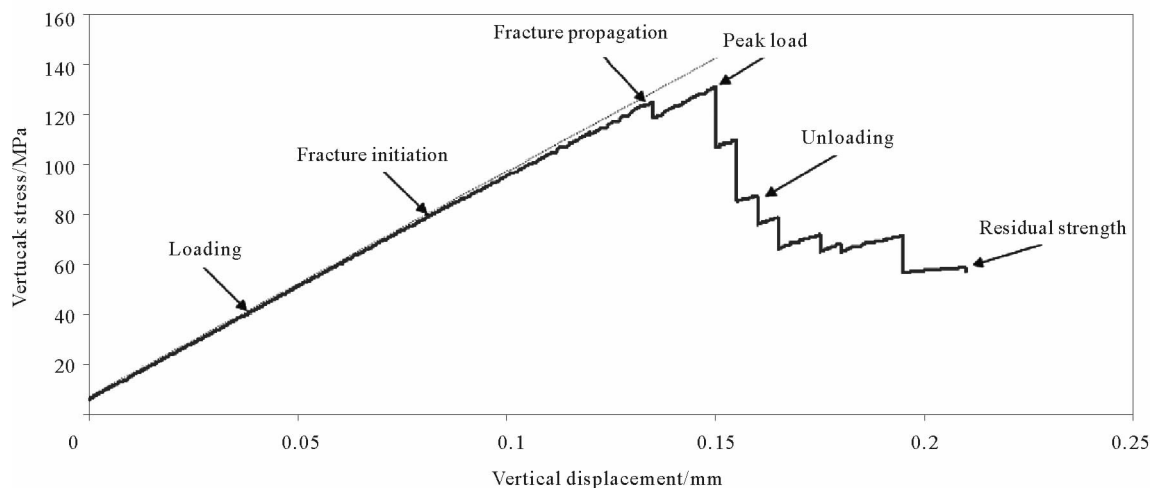


图 5 双轴应力压缩作用下岩样裂纹的起裂、扩展及最终破坏的预测过程^[20]

Fig. 5 Predicted process of fracture initiation, propagation and final failure of a rock specimen subjected to biaxial compression stress^[20]

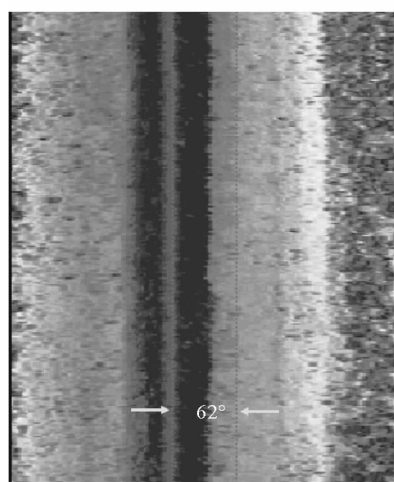
图 6 为 FRACOD 模拟双轴加载试验过程中的应力-应变曲线。轴向应力为 80 MPa 时裂纹开始起裂,应力-应变曲线偏离初始的线性关系,变为非线性。当施加的应力达到 125 MPa 左右时,裂纹快速扩展并贯通,当岩样的轴向载荷达到 130 MPa 时,其形成一个较大的剪切破坏面。峰后阶段裂纹继续扩展,整体承载能力降低。最终,试样完全破坏,残余强度约为 60 MPa。此次模拟试验结果与室内试验结果基本一致,说明 FRACOD 可以很好地模拟双轴压缩试验。

图6 双轴压缩模拟过程中的应力-应变曲线^[15]Fig. 6 Stress-strain curve obtained in numerical biaxial compression tests^[15]

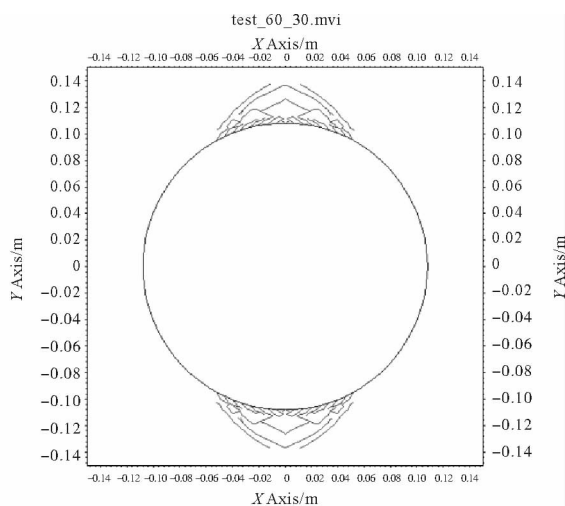
2.2 模拟钻孔破裂

FRACOD 于 2002 年开始用于模拟澳大利亚干热岩地热能开采过程中的深部花岗岩钻孔破裂过程^[18]。在该案例中由于钻孔深度较大($>4\,000\text{ m}$),现场地应力测量难以实施,尤其最大和最小主应力值均难以确定,这为后期工程方案设计和施工带来较大影响。为此,进行了钻孔破裂形态的现场观测,并利用 FRACOD 软件模拟了岩体主应力的分布情况。通过澳大利亚实测数据与模拟结果的对比较验证了 FRACOD 模拟的准确性。

首先,通过声波扫描获得了深度 $3\,000\sim 4\,500\text{ m}$ 段注入井的破裂宽度,并借助卡尺等工具测量了注入井的破裂深度。注入井典型的破裂扫描图像如图 7 所示,其中破裂宽度角约为 62° ,实测破裂深度约为钻孔半径的 23% 。



(a) 钻孔破裂声波扫描展开图



(b) FRACOD 模拟结果

图7 钻孔破裂测量值与 FRACOD 模拟值比较^[20]Fig. 7 Comparison between the observed borehole breakout and FRACOD prediction^[20]

基于以上现场观测结果,采用 FRACOD 软件进行注入井典型的破裂过程的模拟。由于注入井深度 4 500 m 处的压力过大(大于 35 MPa),温度过高(约 240°),难以获得力学参数,故本次模拟过程选用了文献[14]获得的花岗岩力学参数,即:弹性模量 65 GPa,泊松比 0.25,内聚力 31 MPa,摩擦角 35°,单轴抗压强度 120 MPa,I 型裂纹断裂韧度值为 $1.35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,II 型裂纹断裂韧度值为 $3.07 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

FRACOD 模型中分析了大量的最大和最小水平主应力组合。对于最大水平主应力为 60 MPa(减去空隙水压的有效应力)、最小主应力为 30 MPa 的组合,预测的破裂角为 58°、深度约为钻孔半径的 26%,如图 7(b)所示。通过对多个应力组合的模拟,得出两主应力组合与钻孔破坏的宽度及深度的关系,最后根据在不同深度测得的实际钻孔破坏尺寸反算出该处的水平应力大小。结果表明,该地区的原岩水平应力均大于竖直应力。

在后续的钻孔水压致裂工程中,根据微地震监测数据,裂隙的传播都在一个近水平的平面上,证实现场竖直应力为最小主应力。FRACOD 所模拟的应力与深井花岗岩的实际观测值相吻合。该模拟结果验证了 FRACOD 在模拟钻孔破裂方面的可行性。

2.3 模拟水压致裂

FRACOD 亦可应用于水压致裂方面的研究。为验证 FRACOD 在模拟水压致裂方面的可行性,进行了水压致裂模拟试验研究,并将模拟结果与 Tsukada 课题组的注水压裂室内试验结果进行对比验证。

Tsukada 等^[21]配制了含两条交叉预制裂隙的方形砂浆试件,并对该试件进行了水压致裂试验。结果表明,次生裂纹大致沿预制裂纹方向扩展。当采用 FRACOD 模拟该室内试验过程时,预测到该试件主要呈剪切裂纹扩展模式,如图 8 所示。通过对比发现,FRACOD 预测的裂纹扩展路径及临界载荷与室内试验结果基本一致,证明了 FRACOD 软件可准确模拟水压致裂。

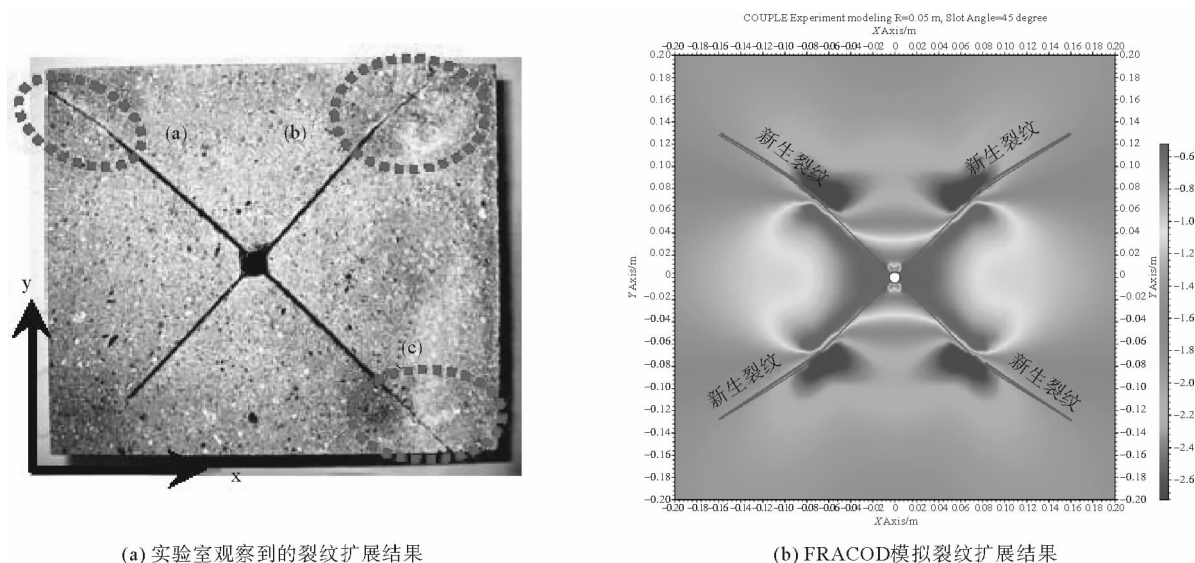


图 8 裂缝扩展观测与预测的比较^[20]

Fig. 8 Comparison between the observation and prediction of fracture propagation in mortar^[20]

3 结论

1) 基于岩石断裂力学理论及 F-准则,开发了能够模拟岩石混合裂纹扩展的 FRACOD 软件,可以准确模拟岩石的 I 型、II 型和 I + II 型裂纹扩展、应力场、位移场等物理参量的变化特征。该软件对岩石工程设计领域发展具有重要的指导意义和参考价值。

2) 从理论方面对 FRACOD 进行了详细的介绍,软件以间接边界元的位移非连续法为基本理论,引入 Mohr-Coulomb 准则模拟裂隙的起裂,以及 F-准则模拟混合型裂隙扩展及破坏特征。在此基础上,通过钻孔破裂、双轴压缩、水压致裂三个模拟试验进行了案例分析验证。通过模拟试验结果与室内试验或现场观测结

果对比发现,FRACOD可以准确模拟岩石的混合裂纹扩展,在众多工程领域具有适用性。

笔者开发的FRACOD软件不仅可以模拟单一场的裂纹扩展,而且还相继研发了H-M(液-力)耦合模块、H-T(液-热)耦合模块、H-T-M(液-热-力)耦合模块用以模拟多场耦合作用下的裂纹扩展规律及岩体破坏特征。在后期工作中,将会一一进行详细介绍。

参考文献:

- [1] SHEN B, STEPHANSSON O, RINNE M, et al. A fracture propagation code and its application to nuclear waste disposal[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(3): 448-449.
- [2] SHEN B, KIM H M, PARK E S, et al. Multi-region boundary element analysis for coupled thermal-fracturing processes in geomaterials[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2013, 46(1): 135-151.
- [3] SHEN B, SIREN T, RINNE M. Modelling fracture propagation in anisotropic rock mass[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(3): 1067-1081.
- [4] BARTON N, SHEN B. Risk of shear failure and extensional failure around over-stressed excavations in brittle rock[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, 9(2): 210-225.
- [5] JUNG Y B, CHEON D S, PARK E S, et al. Estimation of the characteristics of delayed failure and long-term strength of granite by Brazilian disc test[J]. *Tunnel and Underground Space*, 2014, 24(1): 67-80.
- [6] LI X Y, SHEN B T, SHI D F. A boundary element analysis for damage and failure process of brittle rock using FRACOD[J]. *Tunnel and Underground Space*, 2004, 14(4): 248-260.
- [7] SHEN B, SIREN T, RINNE M. Modelling fracture propagation in anisotropic rock mass[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(3): 1067-1081.
- [8] ZHANG S C, LI Y Y, SHEN B T, et al. Effective evaluation of pressure relief drilling for reducing rock bursts and its application in underground coal mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 119: 7-16.
- [9] SIREN T, UOTINEN L, RINNE M, et al. Fracture mechanics modelling of an in situ concrete spalling experiment[J]. *Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 48(4): 1423-1438.
- [10] SHEN B. Two dimensional fracture propagation code user's manual[M]. CRIIRO and FRACOM Ltd, 2014.
- [11] SHEN B. Mechanics of fractures and intervening bridge in hard rocks[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1993.
- [12] RINNE M, SHEN B, LEE H-S, et al. Thermo-mechanical simulations of pillar spalling in SKB APSE test by FRACOD[M]. Elsevier Geo-Engineering Book Series, 2004, 2: 425-430.
- [13] KLEE G, BUNGER A, MEYER G, et al. In situ stresses in borehole blanche-1 south Australia derived from breakouts, core discing and hydraulic fracturing to 2 km depth[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2011, 44(5): 531-540.
- [14] STEPHANSSON O, SHEN B, RINNE M, et al. Geomechanical evaluation and analysis of research shafts and galleries in MIU projects, Japan[C] // *Proceedings of the 1st Kyoto International Symposium on Underground Environment*. Kyoto: CRC Press, 2003: 39-45.
- [15] SHEN B, STEPHANSSON O, RINNE M, et al. FRACOD modelling of rock fracturing and permeability change in excavation-damaged zone[J]. *International Journal Geomechanics*, 2011, 11(4): 302-311.
- [16] RINNE M. Fracture mechanics and subcritical crack growth approach to model time-dependent failure in brittle rock[D]. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2008.
- [17] XIE L M, MIN K B, SHEN B. Displacement discontinuity method modelling of hydraulic fracturing with pre-existing fractures[C] // *Proceedings of 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium 2014*. Minnesota: ARMA, 2014: 14-27.
- [18] SHEN B, STEPHANSSON O, RINNE M. Simulation of borehole breakouts using FRACOD^{2D}[J]. *Oil and Gas Science and Technology-Rev*, 2002, 57(5): 579-590.
- [19] SHEN B, STEPHANSSON O, RINNE M, et al. FRACOD for continuum, discontinuum and fracture modelling of rocks[C] // *EUROCK 2004 and 53rd Geomechanics Colloquium Schubert*, 2004.
- [20] TSUKADA Y, KOBAYASHI A, YAMAMOTO K, et al. Hydraulic fracturing test of large scale mortar specimen under uniaxial compression condition[C] // *International Workshop on Prediction and Simulation Methods in Geomechanics*. Athens, 2003: 45-48.

(责任编辑:吕海亮)