

文章编号: 1000-7598-(2014) 08-2408-07

基于数字图像技术的岩土材料有限元-离散元分析

严成增, 郑 宏, 孙冠华, 葛修润

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 将数字图像技术与 Munjiza 提出的有限元法-离散元法 (FDEM) 耦合分析方法结合, 研制了可表征岩石真实非均质性的 FDEM 分析系统, 为从细观角度对岩体进行建模以及研究岩体的破裂机制提供了新途径。该系统借助数字图像技术从岩石断面的图像获取岩石材料的真实细观结构, 借助成熟的网格剖分技术, 将其映射到 FDEM 计算网格中, 从而克服了原有 FDEM 在考虑材料非均质性所存在的不足。利用该系统, 进行了巴西圆盘劈裂试验的数值模拟, 再现了花岗岩在荷载作用下的真实破裂过程。数值模拟结果表明, 考虑非均质性的岩样应力分布呈现出非对称性, 岩石的细观结构对岩石中裂纹的扩展及应力分布有重要影响。

关 键 词: 有限元-离散元分析; 数字图像技术; 材料非均质性; 巴西圆盘

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

FDEM of geomaterials based on digital image technology

YAN Cheng-zeng, ZHENG Hong, SUN Guan-hua, GE Xiu-run

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the digital image technology and FDEM (combined finite-discrete element method) proposed by Munjiza, the FDEM system is developed, which can identify the interface of different materials from a rock-like cross section photo. This system provides an innovative method for the investigation on mechanical feature and failure mechanism of heterogeneous material such as rock and so on. The system using digital imaging technology acquisition of real rock material microstructure from the rock section of the image, meshing with mature technology, mapped into FDEM computing grid, thus the deficiencies of the original FDEM in considering the material heterogeneity are overcome. Using this system, conducting numerical simulations of the Brazil split test, real failure processes of granite are visually observed. The simulation results show that, considering the heterogeneity of rock samples exhibiting asymmetric stress distribution, rock microstructure has an important influence on stress distribution and cracks of rock.

Key words: FDEM; digital image technology; material heterogeneity; Brazilian disc

1 引 言

众所周知, 岩土材料具有非均质性、各向异性等特性, 岩石材料是由不同类型和结构的矿物颗粒组成, 这些矿物颗粒的物理力学性质并不相同, 在外力作用下相应有不同的力学响应。因此, 可以说岩土材料的内部细观结构决定了材料的局部应力、应变分布, 并影响到材料的最终破坏模式^[1]。为了能够考虑岩土材料的非均质性, 出现了两种不同的研究方法, 其中一种是, 通过引入概率统计理论, 认为岩土材料的物理力学参数服从某种统计分布函

数, 以此来考虑材料分布的非均质性。该类方法中具有代表性的有: 唐春安^[2]提出的 RFPA 方法, 该方法通过在基于弹性损伤理论的有限元程序中引入 Weibull 分布函数来考虑材料的非均质性。这种方法的缺陷是, 通过统计分布生成的岩石虚拟细观结构并不能反映岩土材料真实的细观结构。为此出现了第 2 类方法, 该方法基于数字图像技术, 通过处理岩石断面的图像, 来获取岩石的真实的细观结构, 使得计算模型中物理力学参数按照获得的真实细观结构进行分布。这类方法中以岳中琦等^[3]提出的岩土工程材料的数字图像有限元分析最具代表性, 该

收稿日期: 2013-04-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目 (No. 2011CB013505, No. 2014CB047100); 国家自然科学基金项目 (No. 11202223)。

第一作者简介: 严成增, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事离散元有限元耦合、离散元、颗粒物质物理与力学、多物理场耦合、DDA、大规模高性能并行计算以及软件工程。E-mail: yanchengzheng86@gmail.com

方法不断发展,例如,徐文杰等^[4]、丁秀丽等^[5]等将数字图像技术与 PFC^{2D} 结合,实现了非均质材料细观结构的快速、真实建模,使得对土石混合体这类强非均质性材料的正确建模计算成为可能;于庆磊等^[6]通过数字图像技术获取岩石真实的细观结构,并将其引入 RFPA 软件中,强化了原有 RFPA 模拟岩石类材料破裂过程的真实性;陈沙等^[7]将数字图像技术与 FLAC^{3D} 软件结合,通过沿深度方向逐层扫描每一层材料的表面细观结构,最后叠加形成整个试件的三维真实细观结构,使得基于真实细观结构的数值计算扩展至三维;石崇等^[8]又将数字图像技术用于分析冰水堆积体结构的建模和力学参数研究,利用数字图像重构方法模拟冰水堆积体结构特征,真实反映出块石的分布特征;冯宝成等^[9]等基于水平集方法获取岩石的细观结构,为进一步力学分析提供条件。

为了对岩体的变形、裂纹的萌生、扩展及最终破坏的全过程进行模拟, Munjiza^[10]提出了 FDEM,该方法将连续体划分成三角形单元的有限元网格,并在相邻三角形单元的公共边上插入了起黏结作用的无厚度节理单元,由于三角形单元之间不共用节点,可通过节理单元的断裂很方便地模拟裂纹的萌生和扩展。该方法采用了基于势的接触力计算方法,可方便处理点-点接触,同时采用了高效的 NBS 接触判断算法,计算速度快。这使得该方法与传统的离散法 (DEM) 相比有独特的优势。由于岩石材料的非均质性、各向异性是客观存在的,本文将数字图像技术与 FDEM 结合,以实现岩石材料的精细建模。通过岩石断面的图像获取岩石材料的细观结构,亦即获得岩石中各种不同材料的真实分布,从而使得建立的计算模型真实地反映岩石的细观结构,计算结果与实际更相符。

2 数字图像处理

本文综合文献[3, 5, 11]中的图像处理方法,提出了如下的数字图像处理方法,并编制了数字图像处理程序 picTodxf, 该方法具有材料区域的边界识别效果好、人工修正工作量少的优点。具体的处理步骤如下:

- (1) 将岩样截面的彩色图像转换成灰度图像。
- (2) 确定阈值,将灰度图像转换为二值图像。
- (3) 对二值图像进行闭操作,平滑图像的轮廓,融合窄的缺口和细长的网口,去掉小洞,填补轮廓上的缝隙,以有利于后续有限元网格的划分。
- (4) 完成步骤(3)后,采用 Canny 边缘检测

算子,对二值图像进行边缘检测,采用这样的处理顺序的原因是: Canny 算子对检测阶跃性边缘的效果非常好,具有很好的信噪比和检测精度^[12]。其处理步骤为:用高斯滤波器平滑图像,计算平滑后的图像的梯度幅值和方向,对梯度幅值采用非极大值抑制,找出图像中梯度的局部极大值点,把非极大值点置零得到细化的边缘。用双阈值算法检测和连接边缘,仅当强边缘与弱边缘相连时,弱边缘才会包含在输出中。

(5) 基于链码追踪对不同材料区域的边界进行跟踪,识别出不同材料区域的边界。

(6) 设置要保留的区域的最大像素数,消除图像中的小区域,过滤掉过小的材料区域,不至于使得划分的有限元网格过细。

(7) 边界图形的几何矢量化,经过第(5)步的处理后,得到是由灰度 1 的像素点相互连接而成。由于不能从二值图像直接生成有限元网格,本文采用岳中琦等^[3]提出的构造几何矢量转换算法,获取各个材料区域边界的特征点的坐标,同时可消除不同材料区域边界锯齿现象,便于后续有限元网格的划分。

以岳中琦等^[3]论文中的岩样图片为例(如图 1 所示),采用本文的方法可以直接获得如图 3 的结果,与文献[3]中边缘检测的结果(见图 2)相比,本文的方法对材料区域边界的识别效果更好,验证了本文的图像处理的有效性。

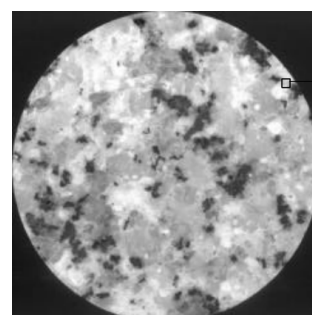


图 1 岩石试样截面图^[3]

Fig.1 Sectional view of the rock sample

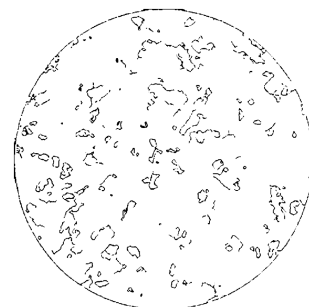


图 2 边界检测算法结果^[3]

Fig.2 Result of edge detection method

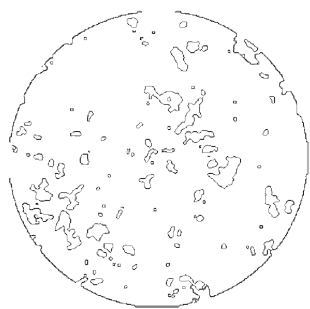


图3 本文检测算法的结果

Fig.3 Result of detection method in this paper

3 FDEM 模型的生成

3.1 FDEM 原理

FDEM 根据已有的非连续面划分离散块体, 每个离散块体内部又采用三角形网格进行剖分, 为了能够模拟离散块体本身的破裂, 离散块体内部的三角形网格与一般的有限元网格不同, 这些三角网格的公共边上插入了起黏结作用的四边形节理单元, 通过这种处理方式可以模拟块体本身的变形及破裂。单个三角形单元的运动及相互作用采用了与 DEM 相同的处理方式, 亦即采单个三角形单元的运动, 根据该单元所受的不平衡力或不平衡力矩按牛顿第二定律来确定。该方法较传统 DEM 的优越之处在于采用了基于势的接触力计算方法^[9]。

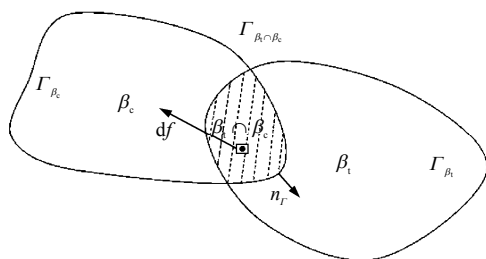


图4 势接触力计算示意图

Fig.4 Schematic of contact force based on potential

如图4所示, 将接触的块体分别称之为目标块体 β_c 和靶块体 β_t , 目标块体嵌入到靶块体的面积 dA 所引起的接触力为

$$df = [\text{grad}\varphi_c(P_c) - \text{grad}\varphi_t(P_t)]dA \quad (1)$$

式中: $\varphi_c(P_c)$ 、 $\varphi_t(P_t)$ 分别为目标块体和靶块体中的位于 P_c 、 P_t 点的势; grad 为梯度。

其总的接触力, 可对上式积分, 并通过格林公式转化为边界积分如下式所示:

$$f_c = \oint_{\Gamma_{\beta_t \cap \beta_c}} n_r (\varphi_c - \varphi_t) d\Gamma \quad (2)$$

式中: $\Gamma_{\beta_t \cap \beta_c}$ 为两块体重叠区域的边界; n_r 为重叠区域边界的外法向向量。

采用该方法得到的为分布式接触力, 不会引起应力集中, 可以方便处理点-点接触问题, 无需像传统 DEM 对角点进行圆角化处理。

对于接触判断则采用了高效的 NBS 算法^[13], 接触判断用时与单元数成线性关系。对于节理单元的断裂准则采用的是联合单一裂纹和弥散裂纹模型^[14], 限于篇幅限制, 此处不再详述, 可参考文献^[15], 该文献对节理的断裂准则作了详细的论述。

3.2 FDEM 模型的生成

如 3.1 节所述, FDEM 所采用三角形之间并不共用节点, 而是在相邻的三角形单元的公共边上插入了一个起黏结作用的无厚度节理单元, 如图 5 所示。

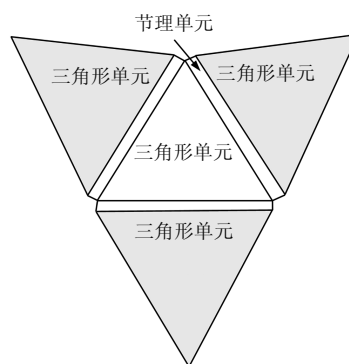


图5 三角形单元和节理单元的连接

Fig.5 Connection of triangular elements and joint elements

因此, 先将经过图像处理技术获得的 .dxf 文件导入到有限软件中, 对其划分有限元网格, 然后编写相应的转换程序, 在各相邻三角形单元的公共边上插入四边形的节理单元, 从而得到 FDEM 的所需的网格。对于有限元网格的划分, 采用 phase2 软件, 可对含任意复杂材料分界面的区域划分三角形网格, 且易于给不同的材料区域赋值, 在生成有限元网格后, 利用自己开发的 phase2ToY 程序, 生成 FDEM 程序的计算文件, 整个处理过程如图 6 所示。

以图 3 的结果为例, 继续处理, 对其进行边界光滑和矢量化, 划分有限元网格, 插入节理单元, 并最终生成含不同材料分区的网格, 如图 7 所示, 其中浅绿色的区域为一种材料, 黄颜色的区域为黑云母。

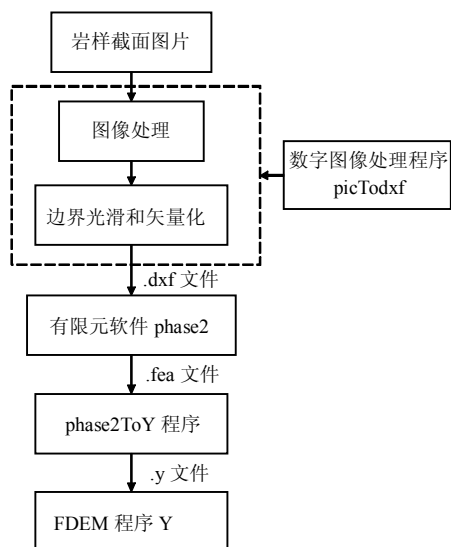


图 6 基于数字图像技术的 FDEM 分析系统的组成

Fig.6 FDEM system based on digital image technology

4 算 例

4.1 巴西圆盘劈裂试验

采用巴西劈裂试验来研究材料的非均质性对裂纹扩展形态和抗拉强度的影响。在原有 FDEM 程序的基础上开发了声发射监测模块，在 FDEM 中声发射定义为节理单元的断裂，当有一个节理单元断裂，记录为一次声发射。节理单元的断裂可能由拉破坏引起，也可能由压剪破坏引起，为此对其进行分别统计，来对岩体的破坏机制加以研究，亦即在断裂过程中，是以拉破坏为主还是以压剪破坏为主。基于节理单元断裂的声发射定义物理意义直观，声发射本身就是在岩体断裂的过程中产生的，声发射次数越密集，说明断裂越急剧发展，因此，在程序采用的声发射定义与物理直观相符。FDEM 在模拟断裂的过程中，不存在单元的软化及生死单元的问题，只存在起黏结作用的节理单元断裂（只要节理单元断裂就将该单元删去，相应地使得其所连接的两个实体的单元间的黏结作用去掉了），因此，系统的质量始终是守恒的。这种方法较基于单元软化和生死单元的方法而言，物理意义更为合理。

分别对均质材料的巴西圆盘和考虑材料非均质性的圆盘进行计算，两者所采用的网格完全一致，材料参数如表 1 所示。该圆盘岩样为花岗岩，主要由黑云母、长石、石英 3 种材料构成，由于石英、长石强度参数相差不大，故视为同一种材料，黑云母为另一种材料。均质圆盘所采用的材料参数，则根据两种材料所占的面积加权平均求得，其中黑云母占 11.7%，石英和长石占 88.3%。

表 1 材料的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the material

材料	ρ /(g/cm ³)	E /GPa	ν	T_s /MPa	c /MPa	ϕ /(°)	Gf /(N/m)
石英长石	2.6	70.0	0.29	10.0	25	50	40.0
云母	2.8	20.0	0.20	7.0	25	50	28.0
均质材料	2.6	64.1	0.28	9.6	25	50	38.6

计算所采用的整体网格模型可参看图 11，共划分 13 659 个实体单元，插入节理单元 19 900 个，节点数为 40 263（因为实体单元之间不共用节点，故节点数要比单元数多）

4.2 计算结果及讨论

计算结果如图 8 所示。

从图可以清楚地看出，巴西圆盘劈裂过程中的应力 σ_x 的演化和裂纹的萌生、扩展及最终破坏的全过程，开始时，拉应力区位于圆盘的上端，如图 8(a)、(b)所示；随着荷载的继续施加，拉应力区不断扩大并向下移动，最大拉应力位于拉应力区的中部，如图 8(c)、(d)所示，同时圆盘未产生破裂，因而此时其应位于荷载-位移曲线的峰前区域，从图 9 中可看出，计算时步数为 8 200 时，确实位于峰前区域，充分表明图 8、9 的对应关系；随着荷载的进一步施加，圆盘的上端部出现压应力区，且开始在上端部出现压剪破坏引起的裂纹，由于裂纹的产生导致裂纹两端的拉应力释放，该处由原有的拉应力区转变为压应力区，拉应力区的上端收缩至裂纹的末端，裂纹向下扩展，压应力区不断向下收缩，且此时的最大拉应力位于裂纹的端部，如图 8(e)、(f)所示，这与裂纹尖端产生应力集中的规律是吻合的。随着裂纹的继续扩展，圆盘中的拉应力区不断缩小，同时圆盘下端部的压应力区愈加明显，且下端部也开始产生由压剪破坏引起的裂纹，该裂纹向上扩展并与前面裂纹交汇，裂纹贯通后，原来以圆盘上下端直径为对称轴的拉应力区因为裂纹的产生，拉应力释放而不复存在，如图 8(g)、(h)所示，同时因为圆盘已经产生破裂，因而其位于荷载-位移曲线的峰后区域，但因为裂纹未贯通，仍有一定的强度，故荷载值并不为 0，如图 9 所示。由图 8(i)、(j)，可以看出，在圆盘的上、下端部产生了较为密集的剪切裂纹，且下端部较上端部要稍密，关于不同部位裂纹破裂的力学机制在后面的图 10 中会有专门的介绍。同时结合图 9，可以发现计算时步数为 34 200 时，由于裂纹已经完全贯通，此时考虑非均质性的圆盘的荷载几乎为 0，而均质圆盘的荷载值相对较大，这说明考虑材料非均质性，所得到荷载-位移曲线更

为合理。

从图 8 中还可以看出, 均质材料的圆盘的裂纹扩展基本是沿着通过上、下端部的直径扩展的, 应力分布呈现了较好的对称性, 没有严格对称则是由于网格剖分所致, 裂纹只能沿着网格的边界进行扩展。由于材料的非均质性, 非均质材料圆盘的裂纹扩展、应力分布呈现出非对称性, 如图 8(e)、(f)深红色的大块区域内夹杂着浅色的小区域。而均质材料的圆盘较实际材料的圆盘在上、下端部产生了更多的剪切裂纹, 如图 8(i)、(j)所示, 这是因为均质圆盘没考虑材料的非均质性, 不存在局部弱化区, 裂纹扩展受到的阻力更大, 更易在局部产生应力集

中, 从而在两端产生了更多的剪切裂纹, 考虑材料非均质性圆盘两端的剪切裂纹更少, 更为合理些。

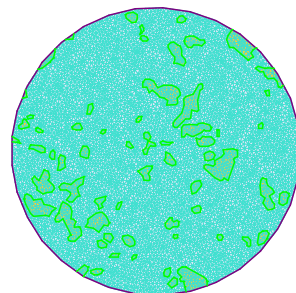


图 7 不同材料分区的网格
Fig.7 Mesh of different material regions

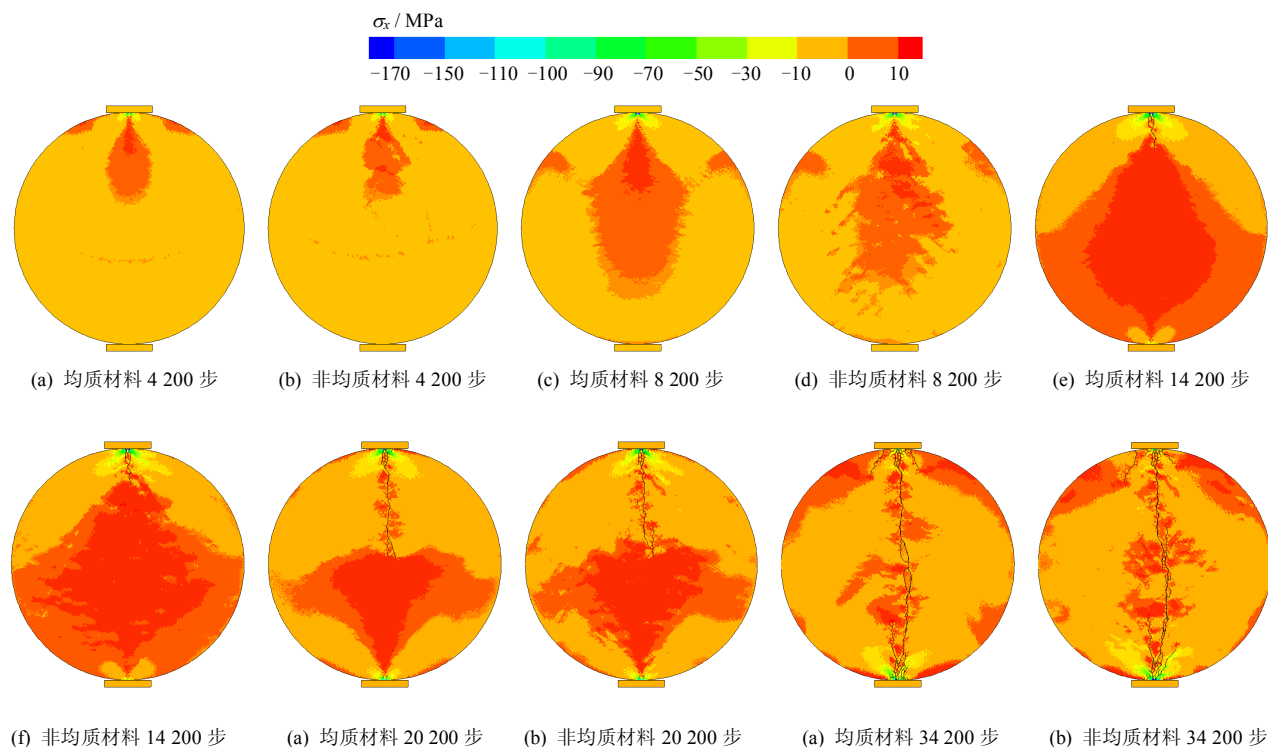


图 8 裂纹的扩展及应力 σ_{xx} 的演化
Fig.8 Crack growth and the evolution of the stress σ_{xx}

图 9 为劈裂试验的荷载-竖向位移曲线, 在开始加载到峰值, 两者的曲线基本重合, 非均质圆盘的峰值荷载并未因为考虑了非均质性而有明显的降低, 这主要是由于主裂纹所穿过的区域中黑云母(强度参数较弱)所占的比重很小, 使得两者的峰值荷载几乎一样。随着荷载的继续施加, 进入破坏后阶段, 因为大量次生裂纹的产生, 有更多的裂纹通过黑云母的区域, 此时材料的非均质性起到比较明显的作用, 考虑材料非均质性的圆盘的荷载更快地下降到 0 值, 而均质材料圆盘的荷载下降得则要更慢些。同时从以上分析可以发现, 圆盘的劈裂破坏,

并不全由拉破坏产生, 而是最先在圆盘的上端部产生剪切裂纹, 裂纹由上向下扩展, 同时圆盘的下端部也产生剪切裂纹, 在圆盘中部的裂纹则主要由拉破坏产生, 这可从图 11 圆盘的不同机制的声发射分布图中看出。

图 10 为不同破坏机制的累计的声发射数, 节理单元的破坏有可能由拉破坏引起, 也可能是由剪切破坏引起, 通过统计各个节理单元破坏的力学机制, 就可以清楚地知道岩体在破坏过程中, 到底以哪种破坏形式为主。从图可见, 圆盘在破坏过程中主要以拉破坏为主, 剪切破坏所占的比重很小, 但在开

始有声发射时(节理的破坏), 剪切破坏的节理单元数要高于拉破坏的节理单元数, 这主要是因为裂纹最开始是从圆盘的上端部产生, 而该处的裂纹主要由剪切破坏产生, 端部裂纹产生的力学机制可从图 11 中看出。随着荷载的进一步施加, 由拉破坏引起的声发射数持续增加, 而由剪切破坏引起的声发射数则几乎保持不变, 且由拉破坏引起的声发射数所占的比重逐渐增加。这说明了巴西圆盘在劈裂过程中, 由拉破坏主导, 说明了用巴西圆盘测算岩体抗拉强度的合理性。

图 10 虽然给出了各种破坏形式所占的比重, 但不能给出不同力学机制的破坏的分布区域, 在图 11 中可以清楚地看到, 拉破坏和剪切破坏的分布位置, 由图可见, 圆盘的破坏由拉破坏主导, 且由拉破坏引起的节理破坏几乎贯穿圆盘上下端, 而剪切破坏则主要分布在圆盘的上、下端部的位置, 进一步说明了前述在端部主要为剪切破坏、中部主要为拉破坏的论述。

$$\text{由公式: } \sigma_t = \frac{2P_t}{\pi DL} \quad (3)$$

式中: σ_t 为抗拉强度; P_t 施加的荷载值; D 为圆盘的直径; L 为圆盘的厚度。

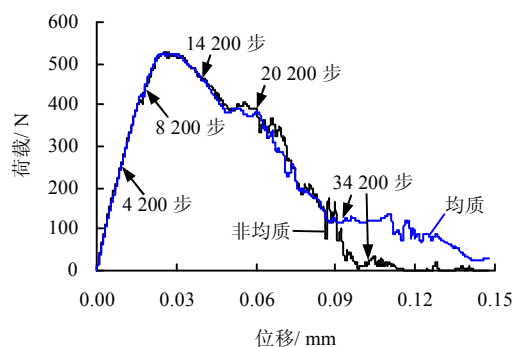


图9 巴西圆盘劈裂试验的荷载-位移曲线
Fig.9 Load-displacement curves of the Brazilian disc split tests

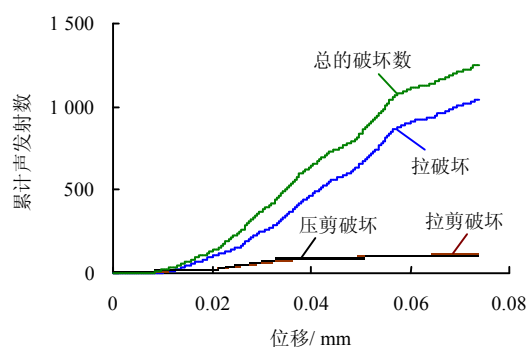


图10 不同机制的累计声发射数
Fig.10 Cumulative numbers of acoustic emission of different mechanisms

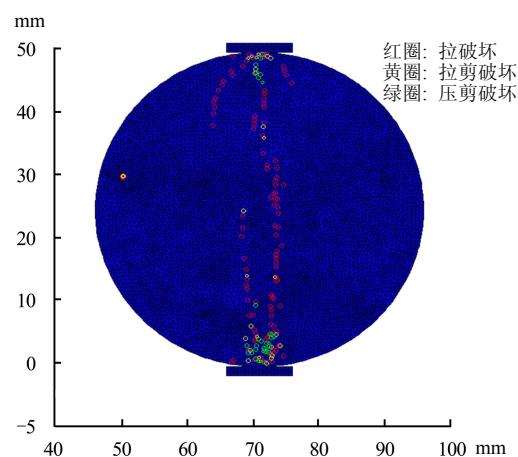


图11 不同机制的声发射分布图
Fig.11 Acoustic emission distribution of different mechanisms

计算得到的抗拉强度约为 $7.8 < 9.6 \text{ MPa}$, 即测得的抗拉强度要低于实际的强度值, 这是因为剪切破坏对圆盘的劈裂破坏也作了贡献。

5 结 论

(1) 在原有 FDEM 的基础上, 结合数字图像技术, 改进了原有 FDEM 程序, 使得其可以方便地考虑材料的非均质性, 而在原有 FDEM 程序中, 考虑多种材料则是极其费时、费力的, 而采用本文方法, 可以极大地降低建模的工作量, 且使得建立的计算模型与真实的更为接近。

(2) 在原有程序的基础上增加了声发射监测模块, 可以方便地监测出裂纹产生的力学机制, 亦即裂纹到底是由拉破坏还是由压剪破坏产生。通过该模块, 分析得出劈裂过程中以拉破坏为主, 剪切破坏产生的裂纹主要集中在圆盘的上、下端部, 说明了劈裂试验测算岩样抗拉强度的合理性。

(3) 非均质材料的圆盘劈裂过程中应力分布呈现出非对称性, 均质材料的圆盘较非均质的圆盘在上、下端部产生更密集的剪切裂纹, 而考虑材料非均质性的圆盘的上、下端部的剪切裂纹更少, 更为合理。

(4) 裂纹未扩展时, 拉应力区呈现椭圆型, 且随加载的进行, 不断扩大且向下移动, 在裂纹的扩展过程中, 拉应力区不断收缩于裂纹末端, 且拉应力在裂纹尖端集中, 裂纹区域两端的应力性质发生改变, 由原有的拉应力转变为压应力。裂纹是从上端部向下扩展的, 两端部主要发生压剪破坏, 中部主要发生拉破坏。

参考文献

- [1] 朱泽奇, 肖培伟, 盛谦, 等. 基于数字图像处理的非均质岩石材料破坏过程模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3780—3786.
ZHU Ze-qi, XIAO Pei-wei, SHENG Qian, et al. Numerical simulation of fracture propagation of heterogeneous[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(12): 3780—3786.
- [2] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [3] 岳中琦, 陈沙, 郑宏, 等. 岩土工程材料的数字图像有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 889—897.
YUE Zhong-qi, CHEN Sha, ZHENG Hong, et al. Digital image processing based on finite element method for geomaterials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(6): 889—897.
- [4] 徐文杰, 胡瑞林, 王艳萍. 基于数字图像的非均质岩土材料细观结构 PFC^{2D} 模型[J]. 煤炭学报, 2007, 32(4): 358—362.
XU Wen-jie, HU Rui-lin, WANG Yan-ping. PFC^{2D} model of mesostructure of inhomogeneous geomaterial based on digital image processing[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(4): 358—362.
- [5] 丁秀丽, 李耀旭, 王新. 基于数字图像的土石混合体力学性质的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 477—484.
DING Xiu-li, LI Yao-xu, WANG Xin. steparticle flow modeling mechanical properties of soil and rock mixtures based on digital image[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 477—484.
- [6] 于庆磊, 唐春安, 唐世斌. 基于数字图像的岩石非均匀性表征技术及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 551—559.
YU Qing-lei, TANG Chun-an, TANG Shi-bin. Digital image based characterization method of rock's heterogeneity and its primary application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(3): 551—559.
- [7] 陈沙, 岳中琦, 谭国焕. 基于真实细观结构的岩土工程材料三维数值分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1951—1959.
CHEN Sha, YUE Zhong-qi, THAM L G. Actual mesostructure based three-dimensional numerical modeling method for heterogeneous geomaterials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(10): 1951—1959.
- [8] 石崇, 王盛年, 刘琳, 等. 基于数字图像分析的兵堆积体结构建模与力学参数研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3393—3399.
SHI Chong, WANG Sheng-nian, LIU Lin, et al. Structure modeling and mechanical parameters research of outwash deposits based on digital image analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(11): 3393—3399.
- [9] 冯宝成, 曹金凤, 高洪秀, 等. 基于变分水平集方法获取岩石的细观结构[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3592—3597.
FENG Bao-cheng, CAO Jin-feng, GAO Hong-xiu, et al. Obtaining rock's mesostructure based on variational level set method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3592—3597.
- [10] MUNJIZA A A. The combined finite-discrete element method[M]. London: John Wiley & Sons, 2004: 29—32.
- [11] 冈萨雷斯. 数字图像处理(第2版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [12] 杨松, 邵龙潭, 郭晓霞, 等. 基于混凝土数字图像的有限元网格生成[J]. 计算力学学报, 2012, 29(4): 635—640.
YANG Song, SHAO Long-tan, GUO Xiao-xia, et al. Finite element mesh generation based on digital image for concrete crack[J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2012, 29(4): 635—640.
- [13] MUNJIZA A, ANDREWS K R F. NBS contact detection algorithm for bodies of similar size[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1998 43(1): 131—149.
- [14] MUNJIZA A, ANDREWS K R F, WHIHE J K. Combined single and smeared crack model in combined finite-discrete element analysis[J]. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 1999, 44(1): 41—57.
- [15] 严成增, 孙冠华, 郑宏, 等. 基于局部单元劈裂的 FDEM 自适应分析方法[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 2064—2070.
YAN Cheng-zeng, SUN Guan-hua, ZHENG Hong, et al. Adaptive FDEM analysis method based on the local splitting elements[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(7): 2064—2070.