单向压缩条件下圆形颗粒体含孔洞试样的力学模拟

伍小林,王学滨,潘一山

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:通过编程,用连续介质快速拉格朗日分析(FLAC)实现了圆形颗粒体在单向压缩条件下的力学行为模 拟.颗粒体试样中间含一圆形孔洞,颗粒体被离散成正方形网格,若2个颗粒体发生接触,则需要在颗粒体之间 预置界面.研究了施加的荷载对试样应力线、应变线及受拉破坏区域等的影响.结果表明,试样内部的最大压应 力约为所施加压应力值的5倍,这有别于连续介质理论的结果.孔洞顶部及底部各有1个三角形受拉区,内部可 见明显的拉裂纹,裂纹的长度随试样端部所施加应力的增加而增大.

关键词:颗粒体;单向压缩;应力线;应变线;拉应力区

中图分类号: TU45 文献标志码: A 文章编号: 1009-640X(2010)03-0040-05

颗粒体材料(沙粒、道渣、矿石等)是典型的非连续介质,模拟非连续介质力学行为常采用离散元法程序.在常规的离散元法程序中,假设颗粒是刚性的,若颗粒发生接触则可以传递力,从而形成力线或力网.但常规的离散元法程序不能获得连续介质模型中常见的一些力学量的分布及演变规律,如应力分布、应变分布、破坏单元数及能量释放量等.连续介质快速拉格朗日分析(FLAC),可以有效地处理连续介质的变形、破坏等问题,已广泛应用于岩土力学.FLAC可以直接获得或通过编程获得应力分布、应变分布、能量释放总量、能量释放率、释放的能量分布及声发射数^[1-4]等与岩土材料破坏及失稳密切相关的力学量信息.

本文采用针对连续介质而开发的 FLAC 模拟典型的非连续介质,即颗粒堆积体材料在单向压缩条件下的力学行为.首先通过编程生成圆形颗粒堆积体,颗粒半径服从均匀分布;然后,将颗粒体离散为正方形单元构成的集合,若颗粒之间发生接触,界面同样需要离散为正方形单元构成的集合.文中颗粒体试样由3部分构成,即颗粒、界面和孔隙.颗粒体试样生成之后,即可按照 FLAC 的常规方法进行加载,研究多种力学量的分布及演变规律,从而实现采用 FLAC 来模拟颗粒体材料的变形、破坏过程.

1 计算模型、本构关系及计算方案

1.1 模型的生成

在某一矩形区域内生成圆形颗粒堆积体,颗粒的堆积过程由下而上进行.为确保任一颗粒 i 在重力作用 下能保持静止,颗粒 i 至少要与其下方(或两侧)的2个颗粒发生接触,且颗粒 i 的中心应在其下方(或两侧) 2个颗粒的中心之间.此外,矩形区域的左边界、右边界及下边界均可视为半径为无限大的颗粒.在颗粒堆积 过程中,需要记录当前表层的各个颗粒,当任一新的颗粒被堆积上后,需修改当前表层各颗粒的记录.在堆积 新颗粒时,优先堆积在表层各颗粒中距矩形区域下边界最近的颗粒附近.

1.2 试样的切割和挖孔

设矩形区域为A,在A区域内任取1个边长为1m的正方形区域B,选择中心位于正方形区域B之内的

收稿日期: 2009-09-02

- **基金项目:**国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB226803);国家自然科学基金资助项目(50974069);辽宁省教育 厅 2009 年度高等学校科研项目(2009A322)
- 作者简介: 伍小林(1987-), 男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 主要从事非均质材料(岩石、混凝土及金属等) 变形、破坏及稳定性研究. 通讯作者: 王学滨(E-mail: wxbbb@263.net)

颗粒集合体作为试样.因颗粒体的强度高,不易在切割机上被切成两半,故在切割试样的过程中,不允许1个

6

0.625

0.750

0.875

颗粒半径/cm

图1 试样颗粒半径分布

Fig. 1 Distribution of granular radius

1.000

颗粒被切成两半.如果有些颗粒的中心位于区域 B 之内,但 仅与 B 内的其它颗粒有 1 个接触点,则需剔除这些颗粒.本 文计算方案中,区域 B 内的颗粒数为 2 680,最大的颗粒半径 为 1.250 cm,最小的颗粒半径为 0.625 cm.编程中假设颗粒 半径的分布服从均匀分布,颗粒半径的统计结果见图 1.

切割好试样后,以试样的中心为圆心挖1个半径为 0.2 m的圆孔(见图2).在图2中,浅灰色区域为颗粒,深灰 色区域为界面.为使中心的圆孔保持为圆形,允许挖孔时将 部分颗粒切开.



Fig. 2 Model of circle granular material

1.3 模型的加载及计算方案

圆孔挖好后,将每个颗粒离散为正方形单元构成的集合体.集合体水平及垂直方向上的最大长度均为500个单元.应当指出,并非本文的集合体被分成500×500个单元,因为模型中包含了许多孔隙.若任意2个颗粒之间发生接触,则需要规定2个颗粒之间的界面,界面用正方形单元构成的狭长集合体来模拟.为了清晰显示试样内部的微观结构,将试样的右下角放大(见图2).界面的作用是模拟颗粒间的接触和滑动.本文计算中,颗粒单元总数为171012,孔洞外颗粒单元总数为150845;界面单元总数为27976,孔洞外界面单元总数为24582.经计算,本文中集合体的孔隙度为(500×500-171012-27976)/(500×500)≈0.204.

计算中,颗粒体被视为各向同性弹性材料,弹性模量取 26.52 GPa,泊松比为 0.21,而界面在破坏之后被 视为莫尔-库仑材料.在界面破坏之前,其本构关系与颗粒体一致,界面的黏聚力为 2 MPa,内摩擦角为 30°. 试样内部 2 种单元的本构关系确立后,还需规定边界条件.本文模型的下边界约束纵向自由度.在试样的上面施加不同的应力,本文方案 1~4 的应力分别为 1,3,4 和 5 MPa,计算假设为平面应变及小变形条件.

2 结果分析及讨论

2.1 剪切应变增量的分布规律

当时步达到 50 000 时,方案 1~4 的剪切应变增量等值线见图 3.4 个方案的最大剪切应变增量分别为 1.1×10⁻⁴,1.0×10⁻³,2.2×10⁻³,4.7×10⁻³,且随着围压的增加,最大剪切应变增量以非线性形式快速增大.为 了清晰显示剪切应变增量的分布规律,图 3 中将剪切应变增量大于 7.0×10⁻⁵,2.0×10⁻⁴,3.0×10⁻⁴,3.0×10⁻⁴ 的高值区(依次见图(a),(b),(c),(d))显示为白色,剪切应变增量的低值区显示为黑色,背景也为黑色.计 算结果表明,当时步达到 50 000 时,最大失衡力已趋于零,说明模型已经达到了静力平衡状态.从图 3 可见, 在单向压缩条件下,剪切应变增量的高值区都位于孔洞的两侧.剪切应变增量的分布不连续,而是以网状或 线状方式在上、下端之间传递,这与连续介质传统弹塑性理论的结果不同.上述试样内部的网状或线状的剪 切应变增量称之为剪切应变网或剪切应变线.除试样的上、下端附近,剪切应变线基本呈垂直状,这与颗粒体

1 250

1.125

材料力的传递规律及离散元的计算结果[5-7]类似.



从图 3 还可见圆孔的顶部及底部出现了多条近乎垂直方向的裂纹(点状白色区域),随着围压的增加, 这些裂纹的长度有所增大.文献[8]的单向压缩试验结果也表明,在圆形孔洞的顶部和底部出现了拉裂纹, 以方案 4 为例,裂纹位置的最大剪切应变增量为 2.6×10⁻³,而该方案的最大剪切应变增量为 4.7×10⁻³.

2.2 垂直方向应力的分布规律

图 4 为方案 1 ~ 4 的垂直方向应力的分布规律,时步为 50 000.为清晰显示垂直方向应力的分布规律,图 4 分别将垂直方向应力大于 8.0×10⁵,2.0×10⁶,3.3×10⁶,4.0×10⁶ Pa 的区域(依次见图(a),(b),(c),(d)) 显示为黑色,分别将垂直方向应力小于-3.0×10⁶,-8.0×10⁶,-9.0×10⁶,-12.0×10⁶ Pa 的区域显示为白色.在 FLAC 中,压应力为负,拉应力为正.



图4中的白色区域为垂直方向压应力的高值区,黑色区域为垂直方向拉应力的高值区,背景也为黑色区域.在孔洞的两侧可以看到明显的应力线(白色长条区域),应力线基本为垂直方向,贯穿试样的上、下端.试样上、下端附近的应力线也十分明亮,说明这些位置为高压应力区.在孔洞的边缘,最大的垂直方向应力位于孔壁的两侧.计算结果表明,方案1~4 垂直方向最大压应力分别为4.8,13.0,18.0 和24.0 MPa.由此可见,随着围压的增加,最大压应力也随之增大,试样内部的最大压应力约为所施加压应力的5倍,这意味着连续介质理论的结果偏于不安全.

计算结果还表明,除了上述三角形区域外,试样的其他位置也可见零星拉应力区.为了清晰地显示孔洞

上下方的拉应力区,图 5 给出了当时 步为 50 000 时各方案孔洞上下方的拉 应力区.可见,随着围压增加,拉应力 区面积增大,且三角形的顶点至孔顶 或孔底的距离也增大,上方拉应力三 角形区深度变化不如下方明显.孔洞 发生2个三角形破坏(或 V 形破坏)的 现象在试验及现场中是常见的^[9-13], 人们通常称硬岩中的 V 形坑为岩爆坑.



方案1~4 计算的最大拉应力分别为0.98,2.81,3.62 和4.55 MPa,接近于相应所施加的应力值,孔洞上 方三角形区域的最大拉应力分别为0.58,1.07,1.16 和1.35 MPa,孔洞下方的最大拉应力分别为0.39, 0.65,0.91 和0.95 MPa.孔洞上方的拉应力大于下方,全局最大拉应力、孔顶和孔底的拉应力均随围压的增 加而增大.方案1~4 的破坏单元数目分别为503,7 929,11 523 和14 416,说明随着围压的增加,破坏的单元 数目也随之增多.

3 结 语

(1)采用连续介质方法(FLAC)模拟典型的非连续介质(圆形颗粒体材料),颗粒体及其之间的界面均用 正方形单元模拟,颗粒体视为各向同性的弹性材料,而界面在破坏之后服从莫尔-库仑准则;

(2)模拟结果表明,单向压缩条件下含圆形孔洞的试样内部的最大压应力约为所施加压应力的5倍,该 结果有别于连续介质理论的结果,说明连续介质理论偏于不安全;

(3)在孔洞的顶部及底部有1个三角形拉应力区,内部存在明显的拉裂纹,裂纹的长度随所施加应力的 增加而增大,三角形拉应力区的尺寸也随之增大;

(4)压缩应力及剪切应变在试样内部的分布不连续,而是以应力线和应变线的方式在试样的上、下端之间传递,基本上都与所施加应力的方向相同;在加载端附近,应力线和应变线出现分叉.

参考文献:

- [1] 王学滨. 缺陷数目对岩样声发射及应变能降低的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(8): 1541-1549. (WANG Xuebin. Influence of imperfection number on acoustic emissions and elastic strain energy decrease of rock specimens with initially random imperfections[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(8): 1541-1549. (in Chinese))
- [2] 王学滨.不同强度岩石的破坏过程及声发射数值模拟[J].北京科技大学学报,2008,30(8):837-843.(WANG Xuebin. Numerical simulation of failure processes and acoustic emissions of rock specimens with different strengths[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(8):837-843.(in Chinese))
- [3] 王学滨,代树红,潘一山. 孔隙水压力条件下含缺陷岩样破坏过程及声发射模拟[J]. 中国地质灾害与防治学报,2009, 20(2): 52-59. (WANG Xue-bin, DAI Shu-hong, PAN Yi-shan. Numerical simulation of failure processes and acoustic emissions of rock specimen with imperfections under different pore pressures[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and

Control, 2009, 20(2): 52-59. (in Chinese))

- [4] 王学滨,赵福成,潘一山. 孔隙压力对含随机缺陷岩石破坏过程及全部变形特征的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(1): 1-8. (WANG Xue-bin, ZHAO Fu-cheng, PAN Yi-shan. Effect of pore pressure on failure processes and overall deformational characteristics of rock specimen with random defects [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(1): 1-8. (in Chinese))
- [5] 刘源, 缪馥星, 苗天德. 二维颗粒堆积体中力的传递与分布研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 468-473. (LIU Yuan, MIAO Fu-xing, MIAO Tian-de. Force distributions in two dimensional granular packs [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 468-473. (in Chinese))
- [6] 蒋红英,鲁进步,苗天德. 三维颗粒堆中力传递实验与分析[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2007,43(2):134-139.
 (JIANG Hong-ying, LU Jin-bu, MIAO Tian-de. Force distribution in three-dimensional granular piles[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2007, 43(2):134-139. (in Chinese))
- [7] ANAND L, GU C. Granular materials: constitutive equations and strain localization [J]. J Mech Phys Solids, 2000, 48(8): 1701-1733.
- [8] 马少鹏,周辉. 岩石破坏过程中试件表面应变场演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(8):1667-1673.
 (MA Shao-peng, ZHOU Hui. Surface strain field evolution of rock specimen during failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1667-1673. (in Chinese))
- [9] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P K, MARTIN C D. Modelling brittle failure of rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(6): 731-741.
- [10] MARTIN C D. Seventeenth Canadian geotechnical colloquium: the effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength
 [J]. Can Geotech J, 1997, 34: 698-725.
- [11] 万姜林,周世祥,南琛,等. 岩爆特征及机理[J]. 铁道工程学报, 1998 (2): 95-102. (WAN Jiang-lin, ZHOU Shi-xiang, NAN Chen, et al. Characteristics and mechanical analysis of rock burst[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1998 (2): 95-102. (in Chinese))
- [12] 潘一山,李英杰,唐鑫,等. 岩石分区碎裂化现象研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(增1):3335-3341. (PAN Yi-shan, LI Ying-jie, TANG Xin, et al. Study on zonal disintegration of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Suppl1): 3335-3341. (in Chinese))
- [13] 刘刚,赵坚,宋宏伟,等. 断续节理岩体中围岩破裂区的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 62-66. (LIU Gang, ZHAO Jian, SONG Hong-wei, et al. Model experiments on the broken zone in intermittently jointed surrounding rock
 [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 62-66. (in Chinese))

Numerical simulation of mechanical behavior of a specimen composed of circular granular material

WU Xiao-lin, WANG Xue-bin, PAN Yi-shan

(College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: Fast Lagrangian analysis of continuous media (FLAC) is made to model the mechanical behavior of a specimen composed of circular granular material in uniaxial compression. The specimen has a central circular hole. The granular is divided into rectangular elements. If two granular bodies contact, an interface between them is needed. Effects of stress level applied at the top of the specimen on the stress line, strain line and tensile failure region are studied. Results show that the maximum tensile stress is about five times as high as the applied stress at the top of the specimen. This result is obviously different from the result of the continuous media theory. In the roof and floor of the hole, two triangular tensile stress regions are observed, in which apparent tensile cracks are formed. The length of the crack is increased with increase of the applied compressive stress at the top of the specimen.

Key words: granular material; uniaxial compression; stress line; strain line; tensile failure region