

基于 Flat-Joint 接触模型的软化本构开发 及其参数影响分析

何 珣¹, 何 勇¹, 郭 磊¹, 潘绪超¹, 庞春旭², 乔 良³, 涂 建³

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065;
3. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

摘要: 为研究黏结键软化效应在岩石破坏离散元模拟过程中的影响, 将黏结裂缝模型的软化关系引入到 Flat-Joint 本构模型中, 使颗粒间发生黏结破坏时考虑软化效应, 并通过 C++ 语言生成供颗粒程序(PFD^{2D})调用的离散元本构子程序(DLL)。模拟岩石单轴压缩过程, 根据其应力 - 应变曲线、软化黏结键数量和断裂黏结键数量变化曲线将破坏过程划分为以下 5 个阶段: 线性上升段、非线性上升段、非线性下降段、脆性下降段和残余应力段, 且黏结键软化主要发生在非线性段; 并采用水平直线软化曲线详细分析软化强度和软化应变对单轴压缩峰值强度、非线性区宽度、软化黏结键数量和泊松比等宏观参数的影响; 最后对复合破坏准则下黏结键的断裂能进行初步分析, 完善分析岩石类材料破坏问题的颗粒离散元方法。

关键词: 数值分析; 颗粒程序; 黏结键; 软化效应; 单轴压缩; 断裂能

中图分类号: O 231

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)10 - 2277 - 11

Development of softening constitutive model based on Flat-Joint contact model and parametric analysis

HE Xun¹, HE Yong¹, GUO Lei¹, PAN Xuchao¹, PANG Chunxu², QIAO Liang³, TU Jian³

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China; 2. Xi'an Model Control Technology Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to study the bond softening effect on rock failure using the discrete element, the softening relationship of the bond crack was implanted into the Flat-Joint constitutive model. The softening effect is considered when the bonds of particles are breaking. PFC^{2D} can call the subroutine(DLL) of constitutive model written in C++. According to the stress-strain curve, the variation of the numbers of softened bonds and broken bonds, the uniaxial compression process of rock is divided into 5 stages: a linear ascent stage, a nonlinear ascent stage, a nonlinear descent stage, a brittle stage and a residual stress stage. Bond softening occurs mainly at the nonlinear stages. The effects of strength and strain softening on the macroscopic parameters such as the peak stress, the length of nonlinear zone, the number of softening bond and Poisson ratio were analyzed in detail according to the horizontal softening curve. Finally, the fracturing energy of bond was analyzed preliminarily with

收稿日期: 2018 - 01 - 04; **修回日期:** 2018 - 06 - 21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(11702145)

Supported by the National Natural Science Foundation for Young Scientists of China(Grant No. 11702145)

作者简介: 何 珣(1989 -), 男, 2011 年毕业于南京理工大学兵器科学与技术专业, 现为博士研究生, 主要从事混凝土冲击破坏方面的研究工作。

E-mail: hxjust@outlook.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0007

the composite failure criterion. The method of simulating the rock failure with discrete element was improved.

Key words: numerical analysis; particle flow code(PFC); bonded contact; softening effect; uniaxial compression; fracturing energy

1 引言

在岩土工程的数值模拟方法中, 对于破裂和裂纹扩展等大变形问题分析, 颗粒离散元法比有限单元法、有限差分法、块体离散元法等方法更具优势, 因此近年来颗粒离散元法在各类工程中获得了大量尝试与应用^[1]。

适用于岩土力学的颗粒离散元法已有报道^[2-5], 并开发了二维圆盘和三维圆球离散元程序 PFC^{2D/3D}^[2]。颗粒离散元的研究域由一系列刚性颗粒及颗粒间接触构成, 通过颗粒的平动和转动模拟材料的变形及断裂过程。颗粒间力 - 位移关系被称为接触本构模型, 从 宇等^[6-9]对不同本构模型进行了大量研究。从 宇等^[6-7]分析了平行黏结模型中各细观参数与宏观力学特性之间的定量关系。刘富有等^[8-9]通过单轴压缩、直接拉伸和双轴压缩数值试验回归分析 Flat-Joint 黏结模型细观参数与宏观参数之间关系。然而现有接触本构模型中颗粒间力 - 位移关系均采用线性关系描述, 仿真结果与试验结果存在差异表明现有本构模型存在缺陷, 因此, 王 涛等^[10-16]根据实际需求完善了接触本构模型, 使分析结果更为真实可信。王 涛等^[10]研制了广义 Kelvin 接触模型离散元计算程序, 计算结果比弹性接触关系的计算结果更为理想。金爱兵等^[11-13]开发了能够描述流变特性的滑动本构模型, 实现岩石试样蠕变全过程的准确模拟。M. H. Mohamman 和 P. H. Kulatilake^[14]采用非线性力 - 位移关系代替 Smooth-Joint 接触模型中的线性关系并实现颗粒间的内锁, 在剪切数值模拟中得到比较理想的结果。然而本构模型的使用和开发尚需不断完善, 以上研究均为解决实际问题对某个本构模型进行修改, 对于修改算法的合理性以及添加参数对材料性能的具体影响等方面仍然存在大量工作有待完成。例如在岩石破碎分析中, 冯 春等^[15]在连接键中引入了考虑应变软化效应的 Mohr-Coulomb 准则及最大拉应力准则, 并对岩石单轴压缩过程进行了分析, 但并未就软化参数对宏观参数的影响进行详细分析。本文根据冯 春等^[15]的研究方法对 Flat-Joint 模型进行了改进, 将黏结裂缝模型的软化效应引入到黏结键破坏过程中, 描述黏结键发生损

伤、损伤累积继而发生黏结键断裂的渐变过程; 根据应力 - 应变曲线、软化黏结键和断裂黏结键数量变化曲线分析了黏结键软化效应对单轴压缩过程的影响; 并采用水平直线软化曲线分析了软化强度和软化应变对单轴压缩峰值强度、非线性区宽度以及泊松比等宏观参数的影响; 最后对复合破坏准则下黏结键的断裂能进行了初步分析。

2 考虑软化效应的黏结本构模型

2.1 Flat-Joint 模型

Flat-Joint 模型^[2, 4-5]是一种描述有限尺寸、线弹性且考虑局部损伤的黏结接触模型, 将交界面进行离散化, 每个交界面单元都有黏结和未黏结(见图 1) 2 种状态。黏结单元的力 - 位移关系为线性关系 (k_n, k_s), 其法向和切向接触力分别采用下式进行计算:

$$F_n^{(e)} = \int_c m k_n g(r) dA^{(e)} \quad (1)$$

$$F_s^{(e)}(t_1) = F_s^{(e)}(t_0) - n A^{(e)} k_s \Delta u_s \quad (2)$$

其中,

$$m = \begin{cases} 0 & (\text{未黏结}, g(r) \geq 0) \\ 1 & (\text{其他}) \end{cases}$$

$$n = \begin{cases} \frac{g_1^{(e)}}{g_1^{(e)} - g_0^{(e)}} & (\text{未黏结}, g_0^{(e)} > 0 \text{ 且 } g_1^{(e)} < 0) \\ 1 & (\text{其他}) \end{cases}$$

式中: $F_n^{(e)}$ 为法向接触力; $F_s^{(e)}(t_0), F_s^{(e)}(t_1)$ 分别为前一时刻和当前时刻切向接触力; k_n, k_s 分别为法向和切向接触刚度; $g(r)$ 为接触间距, $g(r) < 0$ 时表示两实体重叠; $A^{(e)}$ 为接触单元截面积; m, n 表示标识当前黏结状态, 且分别采用全量和增量计算模式。而黏结键在法向和切向上分别采用最大拉应力准则和 Mohr-Coulomb 准则判断黏结是否破坏:

$$F_n^{(e)} > f_n = \sigma_c A^{(e)} \quad (3)$$

$$|F_s^{(e)}| > f_s = c A^{(e)} - F_n^{(e)} \tan \varphi \quad (4)$$

当满足任一破坏准则时, 黏结键断裂, 示意图如图 2 所示(图中 f_n, f_s 分别为法向、切向黏结强

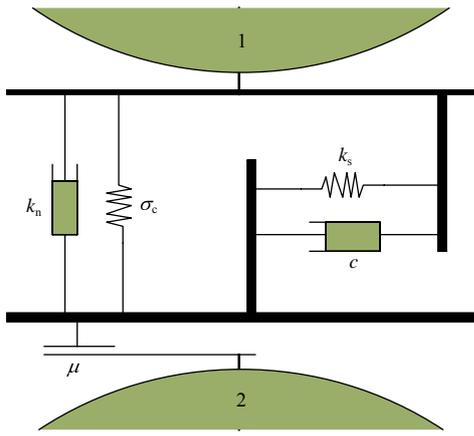


图 1 Flat-Joint 模型示意图

Fig.1 Behavior and rheological components of the Flat-Joint model

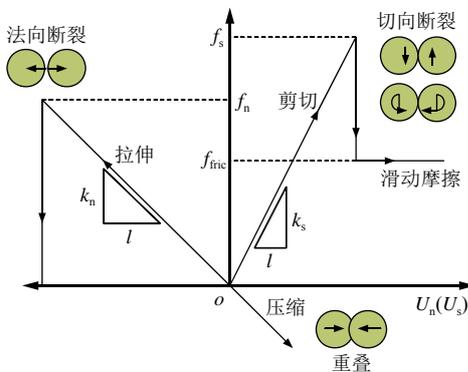


图 2 Flat-Joint 黏结模型力学行为示意图

Fig.2 Mechanical behavior of the Flat-Joint model

度； f_{fric} 为摩擦力； U_n, U_s 分别为法向、切向位移。未黏结单元的力 - 位移关系同样为线性关系(k_n, k_s)，但法向只作用压力而没有拉力，切向根据库仑法则判定是否发生滑动：

$$|F_s^{(e)}| > f_{fric} = -\mu F_n^{(e)} \quad (5)$$

式中： σ_c 为黏结拉伸强度， μ 为摩擦因数， c 为黏聚力， φ 为内摩擦角。

2.2 考虑软化效应的破坏准则

根据黏结裂缝理论^[16]中关于断裂过程区软化效应的描述，断裂过程区内材料刚度减小从而削弱材料应力传递能力的现象即为软化特性；软化本构曲线则是断裂过程区所传递应力大小与过程区宽度的关系，图 3 所示为指数型软化曲线，式(4)为裂缝张开度 w 与拉应力 σ 的软化关系。当 $w=0$ 时，裂缝处于临界张开状态且拉应力等于材料的抗拉极限强度($\sigma = \sigma_c$)；当裂缝开始张开且小于临界张开度 w_c (即 $0 < w < w_c$) 时，初始裂缝尖端处的拉应力从 σ_c 逐渐减小；当裂缝张开度大于或等于临界最大张

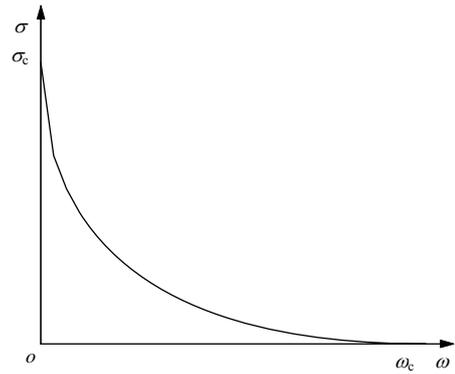


图 3 黏结裂缝模型软化曲线示意图

Fig.3 A softening curve of the virtual fracture model

开度(即 $w \geq w_c$) 时，初始裂缝尖端处的拉应力降为 0 ($\sigma = 0$)；断裂能 G_f 可由下式计算得到

$$\sigma = \sigma(w) \quad (6)$$

$$G_f = \int_0^{w_c} \sigma(w) dw \quad (7)$$

将颗粒离散元中颗粒间的黏结破坏视为材料断裂过程中微裂缝的产生，上述描述应力大小与裂缝宽度软化效应的黏结裂缝模型可运用于颗粒间黏结键断裂过程，修改 Flat-Joint 模型中的最大拉应力破坏准则和 Mohr-Coulomb 剪切破坏准则，使该接触本构模型能够描述材料的软化效应。

因此当黏结键根据式(3)或(4)判断在法向或切向上达到断裂强度时，黏结键进入应力软化阶段，法向力或切向力按软化曲线逐渐减小直至为 0，黏结键发生断裂。处于应力软化阶段的黏结键可采用下式进行拉伸破坏的判断及法向接触力的更新：

$$\left. \begin{aligned} \text{如果: } -F_n^{(e)}(t_1) &\geq \sigma_c(t_0)A^{(e)} \\ \text{那么: } F_n^{(e)}(t_1) &= -\sigma_c(t_0)A^{(e)} \\ \sigma_c(t_1) &= \sigma[w_n(t_1) - f_n/k_n] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中： $\sigma_c(t_0), \sigma_c(t_1)$ 分别为该时刻和下一时刻的抗拉强度，且 $\sigma_c(t_1)$ 按照给定的软化曲线 $\sigma(w)$ 更新； $w_n(t_1)$ 为该时刻法向位移。

处于应力软化阶段的黏结键可采用下式进行剪切破坏的判断及切向接触力的更新：

$$\left. \begin{aligned} \text{如果: } F_s^{(e)}(t_1) &\geq F_n^{(e)}(t_1)\tan\varphi + \tau_c(t_0)A^{(e)} \\ \text{那么: } F_s^{(e)}(t_1) &= F_n^{(e)}(t_1)\tan\varphi + \tau_c(t_0)A^{(e)} \\ \tau_c(t_1) &= \tau[w_s(t_1) - f_s/k_s] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： $\tau_c(t_0), \tau_c(t_1)$ 分别为该时刻及下一时刻的黏聚力，且 $\tau_c(t_1)$ 按照软化曲线 $\tau(w)$ 更新； $w_s(t_1)$ 为该时刻切向位移。

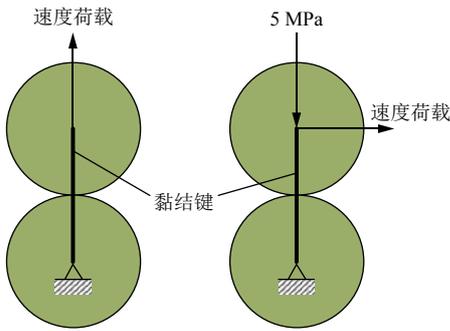


图 5 单一黏结键测试示意图
Fig.5 The failure test of single bond

颗粒半径为 0.5 m，密度为 2 500 kg/m³，刚度比为 2.0，弹性模量为 5 GPa，摩擦因数为 0.2，接触平面单元数为 1，抗拉强度及黏聚力为 2 MPa，内摩擦角为 30°，法向软化应变和剪切软化应变均为 0.001，采用线性型、双线性型和指数型 3 种典型的软化曲线。拉伸测试时，固定下方颗粒，上方颗粒施加竖直向上的准静态速度载荷；剪切测试时，固定下方颗粒，上方颗粒在竖直方向上施加 5 MPa 的压应力，并在水平方向施加准静态速度载荷。

图 6 为拉伸作用下黏结键法向应力 - 应变关系，法向应力达到抗拉强度 2 MPa 后分别以线性、双线性和指数形式逐渐减小直至为 0，黏结键断裂，该过程中软化应变为 0.001，计算结果与设计预想一致。

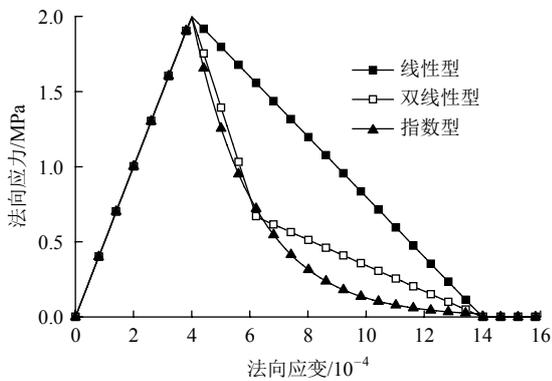


图 6 法向应力 - 应变关系
Fig.6 Normal stress-strain relationships

图 7 为剪切作用下黏结键切向应力 - 应变关系，根据式(4)可计算剪切强度为 4.89 MPa，切向应力达到剪切强度后分别以线性、双线性和指数形式逐渐减小直至为 0，黏结键断裂，该过程中软化应变为 0.001；黏结键断裂后颗粒间发生滑动，切向存在摩擦力作用，根据上方颗粒所受压应力与摩擦因数可计算得到黏结键断裂后切应力为 1 MPa，计算结果与设计预想一致。

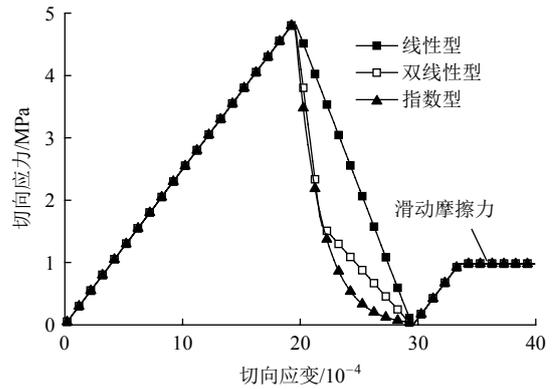


图 7 切向应力 - 应变关系
Fig.7 Tangential stress-strain relationships

4 单轴压缩数值分析

为分析软化效应相关参数对宏观参数的影响，本节以单轴压缩过程为例分析其对应力应变曲线的影响；为使分析过程更清晰，未选择典型的线性型或指数型软化曲线，而选择一条水平直线作为软化曲线，分别分析了软化强度和软化应变对宏观应力应变的影响。

4.1 单轴压缩破坏过程分析

图 8 给出了离散元数值试件模拟岩石单轴压缩过程，模型尺寸为 50 mm×50 mm，颗粒数量为 13 097 个，颗粒半径为 0.228~0.422 mm，颗粒间黏结键数量为 63 252 个，颗粒密度为 2 500 kg/m³；采用水平直线软化曲线，如图 9 所示，软化强度为峰值强度 40%，软化应变为 0.006，对试件施加准静态速度载荷。结果如图 10~12 所示。其中图 10 为应力 - 应变曲线、软化黏结键和断裂黏结键数量变化曲线；图 11 为软化黏结键与水平方向夹角分布图，图 12 则为典型时刻的接触状态图，包括

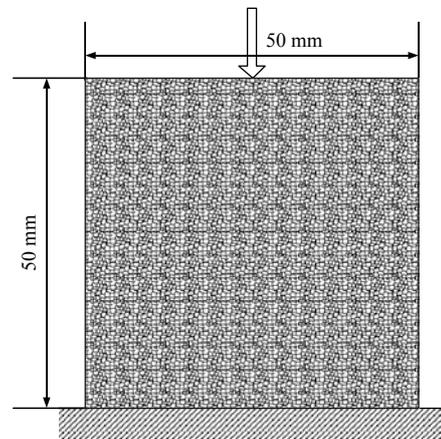


图 8 单轴压缩过程示意图
Fig.8 The process of uniaxial compression

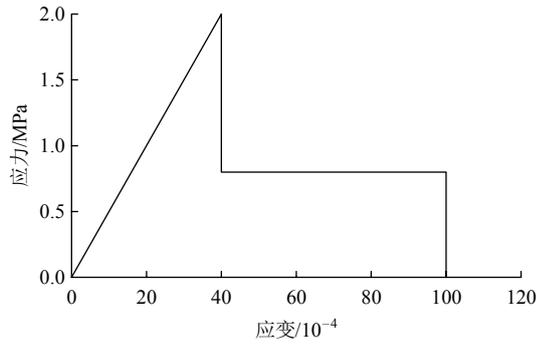


图9 水平直线软化曲线
Fig.9 A softening curve

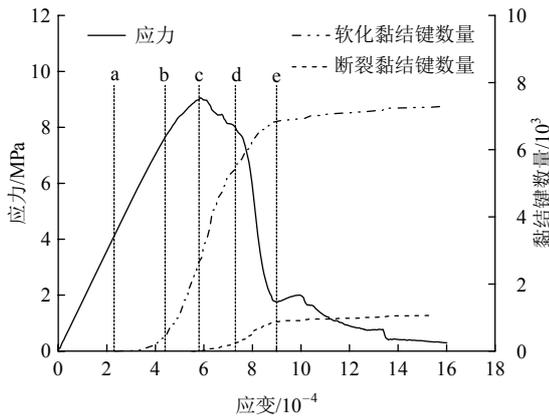


图10 应力-应变曲线及软化和断裂黏结键数量变化曲线
Fig.10 Stress-strain curve and variation curves of numbers of softened and broken contacts

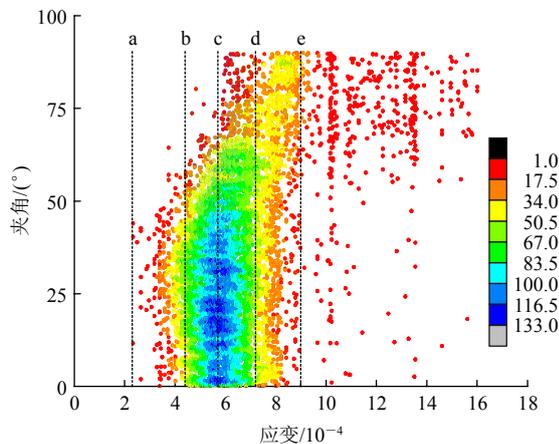
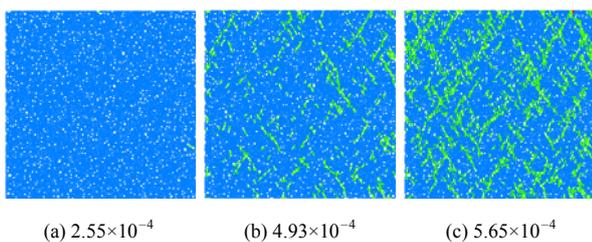
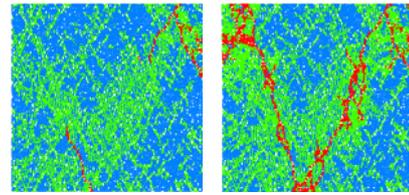


图11 软化黏结键法向与水平方向的夹角
Fig.11 The angles between normal directions of contacts and horizontal direction



(a) 2.55×10^{-4} (b) 4.93×10^{-4} (c) 5.65×10^{-4}



(d) 7.09×10^{-4} (e) 9.04×10^{-4}

图12 不同应变时刻接触状态图
Fig.12 Contact states at different strains

a~e 共 5 个典型时刻，且图 10 和 11 中同样标注出 5 个时刻的对应位置；其中 5 个时刻的状态特征如下：

- a——该时刻开始出现软化黏结键；
- b——该时刻开始软化黏结键数量迅速增加；
- c——该时刻为峰值时刻，且开始出现黏结键断裂；
- d——该时刻断裂黏结键连通，开始形成宏观裂纹；
- e——该时刻试件发生结构性破坏，进入残余应力阶段。

根据上述单轴压缩过程中的 5 种典型时刻，将应力-应变曲线划分为如下 5 个阶段：线性上升段(0-a-b)、峰前非线性上升段(b-c)、峰后非线性下降段(c-d)、脆性下降段(d-e)和残余应力段(e-)；具体如下：

(1) 0-a 阶段内所有黏结键的法向应力和切向应力均未达到屈服强度，应力随应变线性增长；a 时刻开始发生黏结键软化，但如图 10 所示 b 时刻之前软化连接键数量增长缓慢，应力随应变近似呈线性关系增长，因此 0-a-b 阶段为线性上升段；

(2) b 时刻开始随着加载深入，软化黏结键数量迅速增加，且仍未发生黏结键断裂，应力-应变关系保持非线性增长；如图 10 所示 c 时刻开始出现黏结键断裂，应力达到峰值，因此峰值前的 b-c 阶段为峰前非线性上升段；

(3) c 时刻出现断裂黏结键，但断裂黏结键数量增加缓慢，同时软化黏结键数量继续增加，且如图 11 所示此时大量与加载方向一致的黏结键进入软化阶段，试件承载能力缓慢下降；但断裂黏结键并未连通形成宏观裂纹，试件未发生结构性破坏，直至 d 时刻开始形成宏观裂纹，如图 12(d)所示，因此峰值后的 c-d 阶段为峰后非线性下降段；

(4) d 时刻开始断裂黏结键数量迅速增加，相互连通形成宏观裂纹，试件发生结构性破坏，如图 12(d), (e)所示，承载能力迅速下降，因此 d-e 阶段为脆性

下降段；

(5) e时刻开始软化黏结键和断裂黏结键数量基本保持不变，试件中宏观裂纹扩展完成，进入残余应力阶段。

综上所述，黏结键软化主要发生在峰值前后，使之出现峰前非线性上升段和峰后非线性下降段，且作用于峰前的黏结键主要为横向黏结键(即非载荷方向)，并未影响试件的承载能力，应力非线性增长；而作用于峰后的黏结键则主要为纵向黏结键(即载荷方向)，降低试件的承载能力，应力非线性下降；黏结键软化作用对应力 - 应变曲线的影响主要表现在提高应力峰值和延长非线性段，从力学现象上表现为降低材料脆性。

4.2 软化强度及应变对软化黏结键数量影响分析

上节可知，黏结键软化主要作用在应力应变曲线的峰值前后，并在峰前和峰后形成非线性区，首先考察软化强度和应变对软化黏结键数量的影响。假设软化曲线为水平直线，图 13 中所示软化应力为破坏强度 40%时 6 个不同软化应变下的水平直线型软化曲线。按照破坏强度的 30%，40%，50%，60%，70%，80%分成 6 组进行数值仿真，分析软化强度对软化黏结键数量的影响；按照不同软化应变 0.001，0.003，0.006，0.012，0.024，0.036 分成 6 组进行数值仿真，分析软化应变对软化黏结键数量的影响。

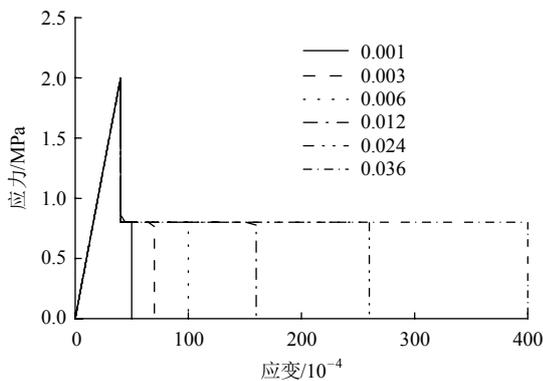


图 13 不同软化应变条件下水平直线软化曲线

Fig.13 Six softening curves with six different softening strains

由图 14 可知，软化黏结键数量随软化应变增大而增加，并逐渐趋于稳定；软化黏结键数量随软化强度的增大而增加，并趋于某极限值，该极限与试件内接触黏结键的总数量有关，该试件中黏结键数量为 13 907 个，当超过 70%的黏结键进入软化阶段时，试件将会发生破坏，提高软化应力或增加软化应变不会增加软化黏结键数量。

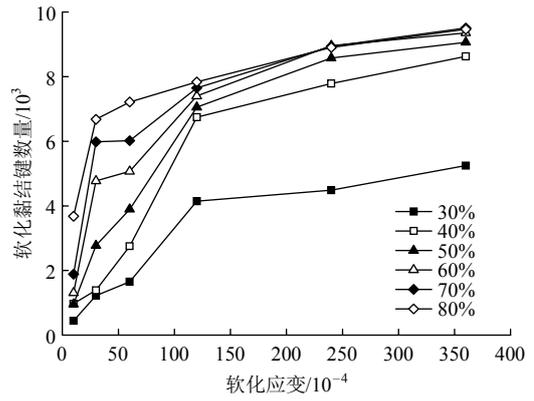


图 14 软化曲线对软化连接键数量的影响

Fig.14 Effect of softening curves on the number of softened bond contacts

4.3 软化强度及应变对应力 - 应变曲线影响分析

为分析软化应变对试件宏观应力 - 应变曲线的影响，使用节 4.1 中的模型及参数进行单轴压缩数值仿真，软化曲线如图 13 所示，按照不同软化应变 0.001，0.003，0.006，0.012，0.024，0.036 分成 6 组，软化强度为屈服强度的 40%，分析软化应变对应力 - 应变曲线的影响。结果如图 15 所示，峰值应力随软化应变增大而增大，峰值前后非线性应变区明显拉长，且根据节 4.1 中的分析软化黏结键数量同样随之增加；当软化应变为 0.012 时，试件软化黏结键数量超过总数的 70%，之后软化应变继续增加到 0.024，软化黏结键数量未随之增加仍然维持该水平；而当软化应变分别为 0.012 和 0.024 时，软化黏结键的数量基本持平，但软化应变越大时，宏观应力 - 应变曲线峰值前后的非线性区更大；可见软化应变增大能够推迟黏结键的断裂，从而拉长峰值前后的非线性区。

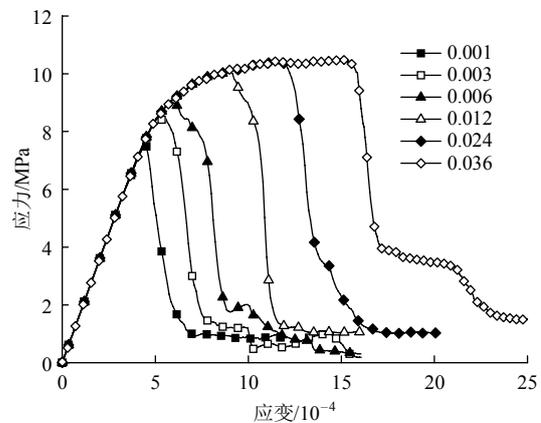


图 15 不同软化应变条件下应力 - 应变关系

Fig.15 Stress-strain curves with different softening strains

图 16 为泊松比变化曲线，泊松比反映试件变形

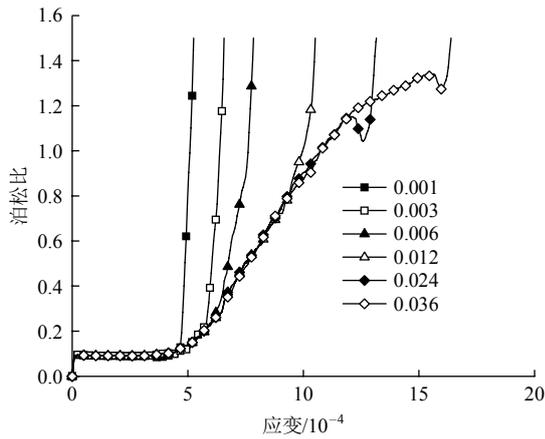


图 16 不同软化应变条件下峰值前泊松比变化曲线
Fig.16 Poisson ratio curves before the peak stress with different softening strains

过程，黏结键软化效应使试件在泊松比很大时仍然未发生破坏，图中所示当软化应变为 0.024 和 0.036 时，试件泊松比分别达到 1.1 和 1.3 才发生破坏；且随着软化应变的提高，泊松比曲线基本按同一轨迹提高，由此可知，软化效应会推迟试件破坏，软化应变越大，推迟愈加明显，应力 - 应变曲线的非线性区明显拉长。上述 6 组试件破坏效果如图 17 所示，可以发现裂纹扩展总是沿着软化黏结键的轨迹扩展；当软化应变超过 0.012 后，试件的破坏模式基本不变。

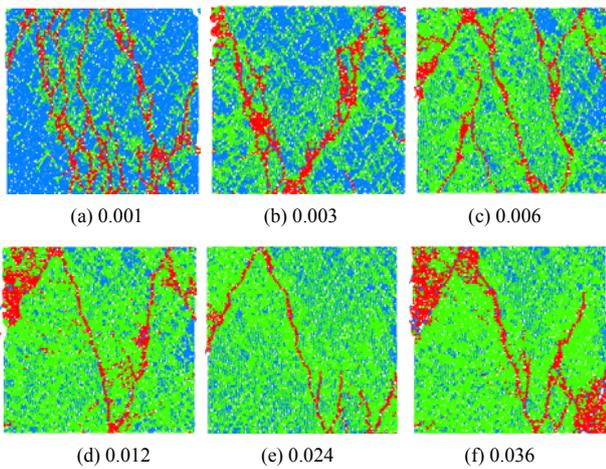


图 17 不同软化应变条件下试件破坏效果
Fig.17 Failure of six specimens under different softening strains

为分析软化强度对应力 - 应变曲线的影响，使用节 4.1 中的模型及参数进行单轴压缩数值仿真，软化曲线如图 18 所示，按照软化强度分别为屈服强度的 20%，30%，40%，50%，60%和 70%共 6 组，软化应变为 0.006，分析软化强度对应力 - 应变曲线的影响。结果如图 19 和 20 所示，可知峰值应力随

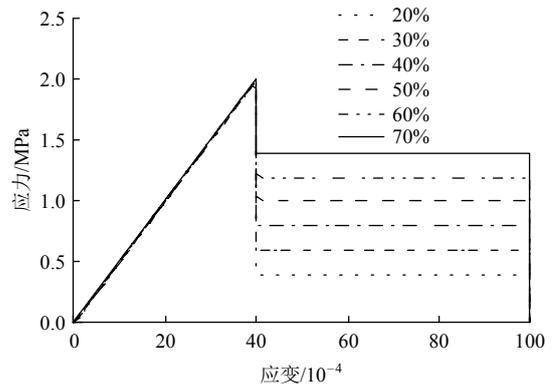


图 18 不同软化强度条件下水平直线软化关系
Fig.18 Softening curves with different softening strengths

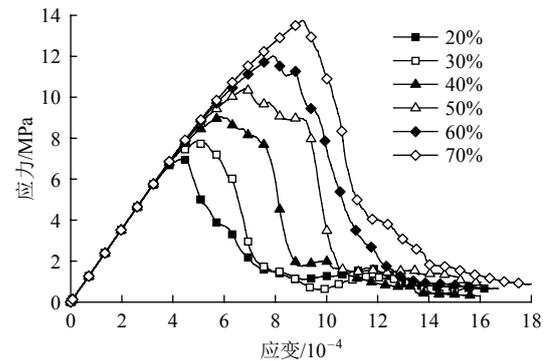


图 19 不同软化强度条件下应力 - 应变关系
Fig.19 Stress-strain curves with different softening strengths

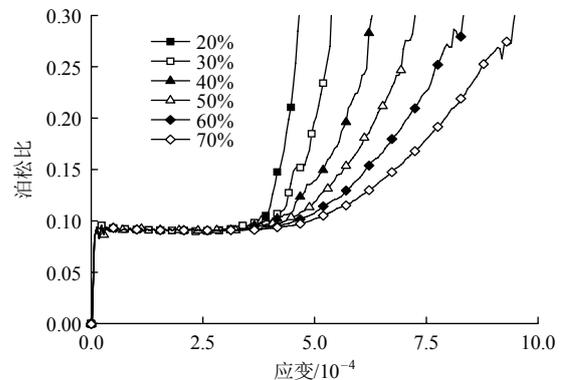


图 20 不同软化强度条件下峰值前泊松比变化曲线
Fig.20 Poisson ratio curves before the peak stress with different softening strengths

软化强度增大而提高，且峰值前后非线性区随之拉长；软化黏结键数量同样随之增加，由于黏结键总数量一定，软化黏结键数量存在一个极限(见图 14)，当软化强度为峰值的 50%时，软化黏结键数量超过总数的 70%，之后继续提高软化强度到 60%，软化黏结键数量仍保持该数量。软化强度增加，峰值应力明显增加，当软化强度从屈服强度的 20%增加到 60%时，峰值强度增加接近一倍。

由图 20 可知，随着软化强度提高，试件破坏时的泊松比同样增加，当软化强度从屈服强度的 30%

增加到 70% 时，泊松比从 0.11 增加到 0.26，影响效果没有软化应变显著，因此应力应变曲线的非线性区并未明显拉长。上述 6 组试件破坏效果如图 21 所示。

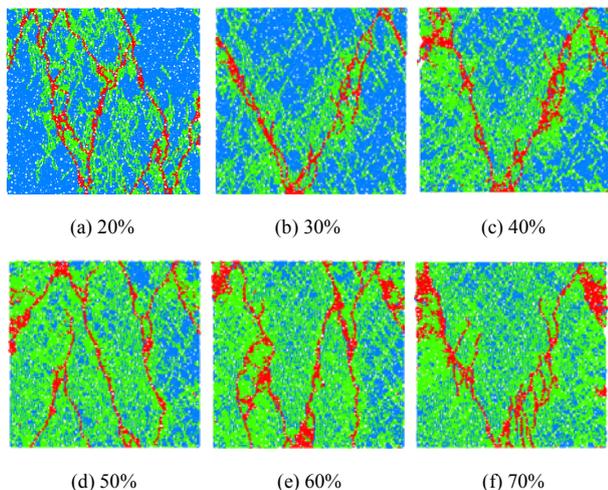


图 21 不同软化强度条件下试件破坏效果

Fig.21 Failure of six specimens under different softening strengths

由上述分析可知，软化强度和应变对应力应变曲线的峰值强度和非线性区宽度均有提升，但影响效果存在主次之分，为讨论影响程度的不同，进行了更大范围的数值模拟。按照软化强度和应变 2 个影响因素进行正交试验，软化应变取 0.001, 0.003, 0.006, 0.012, 0.024 和 0.036 共 6 组应变，而软化强度从屈服强度的 30% 提高至 90% 共 7 组强度，共 42 组数值试验数据，计算结果与未考虑软化效应的应力应变曲线进行比较，详细分析软化强度及应变对应力应变曲线的影响关系。

软化强度对峰值应力的影响关系如图 22 所示，峰值应力的增长与软化强度的增长呈线性关系；且随着软化应变的提高，该线性关系的斜率随之提高。软化应变对峰值应力的影响关系如图 23 所示，峰值应力随着软化应变的增长而提高，但增速趋缓，特别是在软化强度较低时，图中当软化强度为屈服强度的 30% 时，软化应变超过 0.006 之后，峰值应力基本不变；即使软化强度为屈服强度的 80%，软化应变超过 0.006 之后继续提高，峰值应力的增长依然十分有限。

软化强度对非线性区宽度的影响关系如图 24 所示，软化强度的提高将拉长应力 - 应变曲线非线性区，但增速趋缓；特别是在低软化应变条件下，非线性区基本维持不变。而软化应变对应力 - 应变

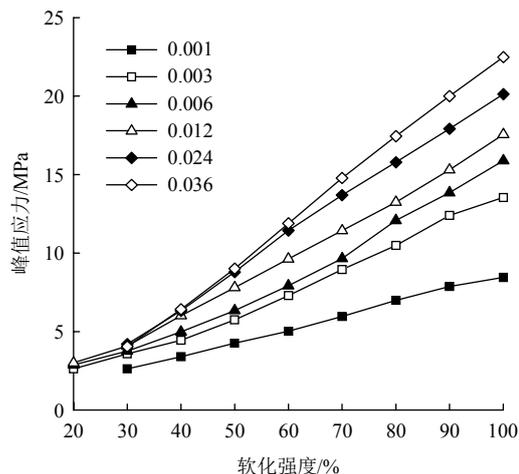


图 22 软化强度对峰值应力的影响关系

Fig.22 Influence of strength softening on peak stress

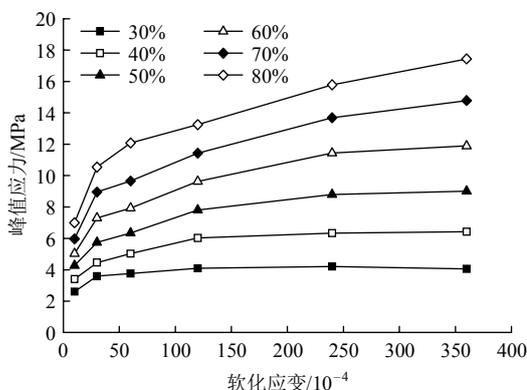


图 23 软化应变对峰值应力的影响关系

Fig.23 Influence of strain softening on peak stress

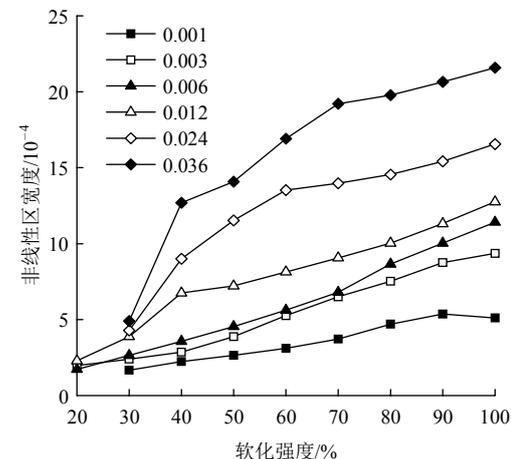


图 24 软化强度对非线性区的影响关系

Fig.24 Influence of strength softening on nonlinear zone

曲线非线性区宽度的影响关系如图 25 所示，软化应变的提高将拉长非线性区，基本呈线性增长关系，且当软化强度越大时，线性关系越明显。综上分析可知，黏结键引入软化效应后，软化强度为应力 - 应变曲线峰值应力的主要影响因素，且呈线性增长

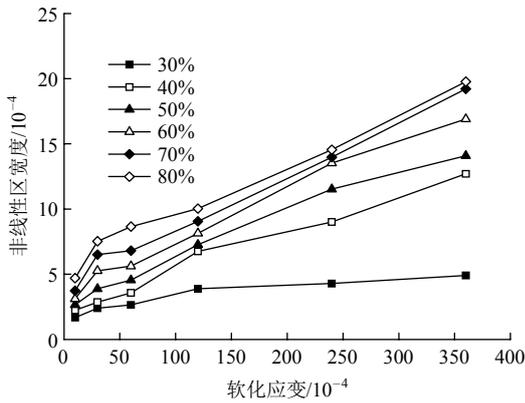


图 25 软化应变对非线性区的影响关系

Fig.25 Influence of strain softening on nonlinear zone

关系，其次为软化应变；而非线性区的宽度则由两者共同决定。

4.4 断裂能的影响规律

根据节 2.3 中的分析可知，黏结键断裂采用复合准则判断(见图 4)，计算断裂能时，根据破坏方式(拉伸破坏或剪切破坏)及颗粒间的相对位置，单个黏结键在发生破坏时断裂能各不相同。

从理论上分析，断裂能越大，黏结键承载能力越强。结合节 4.3 的分析可知，当软化强度从屈服强度的 30%提高到 80%，而软化应变从 0.001 增加到 0.036 时，试件应力 - 应变曲线的峰值应力会有提升，峰值前后的非线性区拉长，这些变化与黏结键断裂能有着直接关系，然而黏结键复合破坏准则使得变化关系变得十分复杂。因此选取如图 26 所示 4 种断裂能相同的软化曲线进行分析，软化应力分别为屈服强度的 30%，40%，60%和 80%，软化应变分别为 0.008，0.006，0.004 和 0.003，并采用节 4.1 中的数值模型及参数进行计算。计算结果如图 27~29 所示。图 29 中虚线所示位置为峰值应力位置。

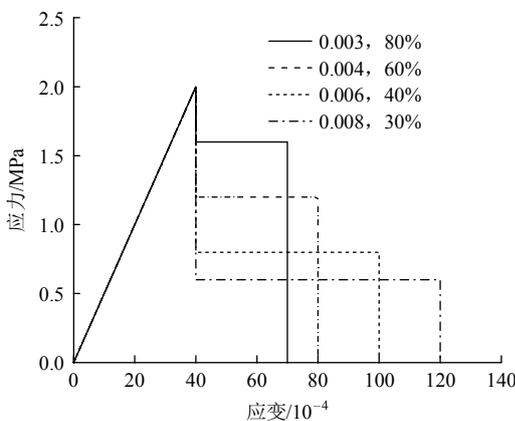


图 26 4 种断裂能相同的软化曲线

Fig.26 Four softening curves with the same fracturing energy

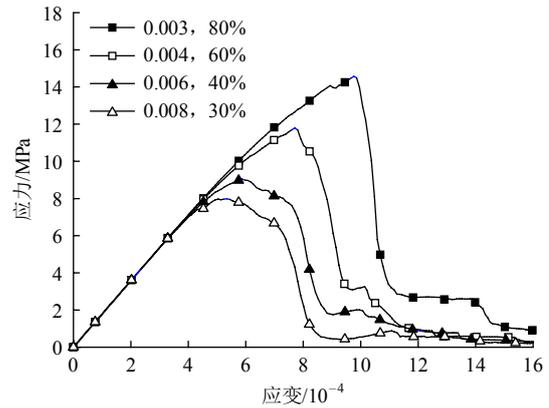


图 27 应变能相同情况下应力 - 应变曲线

Fig.27 Stress-strain curves with the same fracturing energy

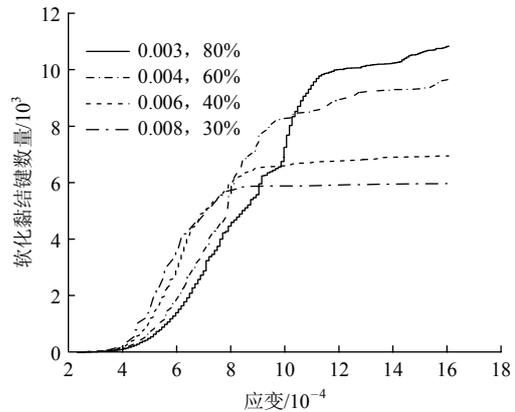


图 28 软化黏结键总数量变化曲线

Fig.28 Curves of variation of number of softening contacts

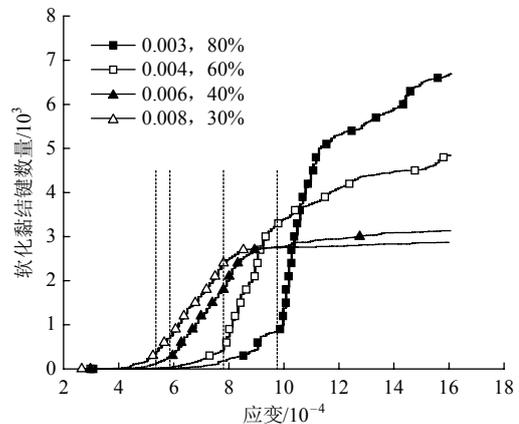


图 29 法向和切向均软化的黏结键数量变化曲线

Fig.29 Variation curves of numbers of softening contacts in normal and shear directions

4 种软化曲线虽然具有相同的断裂能，但单轴压缩数值仿真的结果差异非常明显，表明在采用复合准则的黏结键破坏中断裂能的参考价值有限，黏结键软化曲线的形状对结果有重要影响。当软化曲线应变大强度低时，整个过程中发生软化作用的黏结键数量较少，且法向和切向均发生软化的黏结键数量同样较少(见图 28, 29)，因此其峰值应力低且

峰前非线性区短; 峰值后, 软化黏结键数量增长较为缓慢, 在应力应变曲线中表现出一个相对较长且平缓的峰后下降段, 且峰后非线性区相对较宽。当软化曲线应变小强度高时, 整个过程中发生软化作用的黏结键数量较多, 且法向和切向均发生软化的黏结键数量同样较多(见图 28, 29), 因此其峰值应力高且峰前非线性区长; 峰值后, 软化黏结键数量增长迅速, 在应力应变曲线中表现出一个较为陡峭的峰后下降段。

5 结 论

本文对颗粒离散元中 Flat-Joint 模型的最大拉应力准则和 Mohr-Coulomb 剪切破坏准则进行修改, 使颗粒间黏结破坏时考虑软化效应, 并对复合破坏准则条件下黏结键的断裂能进行了初步分析; 以单轴压缩过程为例, 详细分析了软化曲线各参数对宏观应力应变曲线的影响规律; 使得颗粒离散元法对岩石类材料破坏问题的分析结果更为准确, 本文的主要结论如下:

(1) 采用考虑软化效应的黏结接触模型进行单轴压缩数值模拟, 根据其峰值应力、软化黏结键数量和断裂黏结键数量变化曲线可将应力应变曲线分为 5 个阶段: 线性上升段、非线性上升段、非线性下降段、脆性下降段和残余应力段; 且黏结键软化主要发生在非线性上升段和非线性下降段, 软化黏结键的方向在两区段内表现出选择性。

(2) 单轴压缩模拟中, 软化曲线的参数直接影响试件宏观力学性能。峰值应力的提高主要取决于软化强度, 且呈线性增长关系, 也随软化应变增大而提高, 但增速趋缓; 非线性区的宽度则由两者共同决定, 且近似呈线性增长关系; 另外增大软化应变将推迟黏结键断裂, 降低材料脆性, 显著提高泊松比。

(3) 黏结键断裂采用复合判定准则, 因此单个黏结键的断裂能根据破坏方法和颗粒间的相对位置各不相同; 即使软化曲线所示断裂能相同的情况下, 软化曲线的形状对软化黏结键和断裂黏结键数量变化曲线及宏观应力 - 应变曲线有着巨大的影响。

参考文献(References):

[1] 石 崇, 徐卫亚. 颗粒流数值模拟技巧与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 1 - 12.(SHI Chong, XU Weiya. Technique and practice of numerical simulation of particle flow[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015: 1 - 12.(in Chinese))

[2] Itasca Consulting Group Inc.. Particle flow code in two dimensions[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2008.

[3] CUNDALL P A. A discrete numerical model for granular assemble[J]. Geotechnique, 1979, 19(1): 47 - 65.

[4] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A Bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1 329 - 1 364.

[5] POTYONDY D O. A Flat-Jointed Bonded-Particle material for hard rock[C]// Proceedings of the 46th US Rock Mechanics Symposium. Chicago: [s. n.], 2012: 24 - 27.

[6] 丛 宇, 王在泉, 郑颖人, 等. 基于颗粒流原理的岩石类材料细观参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1 031 - 1 040.(CONG Yu, WANG Zaiquan, ZHENG Yingren, et al. Experimental study on microscopic parameters of brittle materials based on particle flow theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1 031 - 1 040.(in Chinese))

[7] 张志华, 张国栋, 李泯蒂, 等. 颗粒流模型中细观参数对粗粒土宏观力学特性的影响[J]. 水利学报, 2014, 45(2): 215 - 220.(ZHANG Zhihua, ZHANG Guodong, LI Mindi, et al. The influence of mesoscopic parameters in particle flow model on macro-reaction of coarse grained soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(2): 215 - 220.(in Chinese))

[8] 刘富有, 陈鹏宇, 余宏明. 基于 Flat-Joint 接触模型的岩石单轴压缩和巴西劈裂颗粒流模拟研究[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 60 - 65.(LIU Fuyou, CHEN Pengyu, YU Hongming. PFC simulation of uniaxial compression and Brazilian splitting test of rock based on Flat-Joint bonded-particle material[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(9): 60 - 65.(in Chinese))

[9] 陈鹏宇, 余宏明. 平直节理黏结颗粒材料宏观细观参数关系及细观参数的标定[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(5): 74 - 84.(CHEN Pengyu, YU Hongming. Relationship between macroparameters and microparements of Flat-Joint Bonded-Particle material and calibration of microparameters[J]. Journal of Civil Architectural and Environmental Engineering, 2016, 38(5): 74 - 84.(in Chinese))

[10] 王 涛, 吕 庆, 李 杨, 等. 颗粒离散元方法中接触模型的开发[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 4 040 - 4 045.(WANG Tao, LU Qing, LI Yang, et al. Development of contact model in particle discrete element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(2): 4 040 - 4 045.(in Chinese))

[11] 金爱兵, 王 凯, 张秀凤, 等. 基于颗粒流程序的广义 Kelvin 模型及其应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2 695 - 2 701.(JIN Aibing, WANG Kai, ZHANG Xiufeng, et al. A generalized Kelvin model based on the particle flow code and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(9): 2 695 - 2 701.(in Chinese))

[12] 杨振伟, 金爱兵, 高永涛, 等. 基于颗粒流程序的非定常西原体模型[J]. 工程科学学报, 2015, 37(7): 831 - 838.(YANG Zhenwei, JIN Aibing, GAO Yongtao, et al. Non-ationary nishihara model in the particle flow code[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(7): 831 - 838.(in Chinese))

[13] 杨振伟, 金爱兵, 周 喻, 等. 伯格模型参数调试与岩石蠕变特性颗粒流分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 240 - 247.(YANG Zhenwei, JIN Aibing, ZHOU Yu, et al. Parametric analysis of Burgers model and creep properties of rock with Particle Flow Code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 240 - 247.(in Chinese))

[14] MEHRANPOUR M H, KULATILAKE P H. Improvement for the smooth joint contact model of the particle flow code and its application[J]. Computer and Geotechnics, 2017, 87(1): 163 - 177.

[15] 冯 春, 李世海, 刘晓宇. 基于颗粒离散元方法的连接键应变软化模型及其应用[J]. 力学学报, 2016, 48(1): 76 - 85.(FENG Chun, LI Shihai, LIU Xiaoyu. Particle-DEM based linked bar strain softening model and its application[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(1): 76 - 85.(in Chinese))

[16] 徐世焯. 混凝土断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 129 - 139.(XU Shilang. Fracture mechanics of concrete[M]. Beijing: Science Press, 2011: 129 - 139.(in Chinese))